Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

José Avelino Loureiro Moreira Padrão

TÉCNICAS DE INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO EM ESTRUTURAS

MEST
Setembro, 2004

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

Técnicas de Inspecção e Diagnóstico em Estruturas

Dissertação apresentada à Universidade do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Aníbal Guimarães da Costa da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

José Avelino Loureiro Moreira Padrão

Licenciado em Engenharia Civil

pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2004

624 (043) / PADj / TEC
Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca M
Nº 93951
CDU
Data 02 / 04 / 2008

Para a Sónia, o João, o Afonso e a Matilde
Vocês são o "farol da minha vida"

Eu pedi forças
E Deus deu-me dificuldades
para me fazer forte.

Eu pedi sabedoria
E Deus deu-me problemas
para resolver.

Eu pedi prosperidade
E Deus deu-me cérebro
e músculos para trabalhar.

Eu pedi coragem
E Deus deu-me obstáculos
para superar

Eu pedi amor
E Deus deu-me pessoas
Com problemas para ajudar.

Eu pedi favores
e Deus deu-me oportunidades.

Eu não recebi nada do que pedi
mas recebi tudo o que precisava.

Anónimo

Agradecimentos: Ao terminar este trabalho, e reflectindo um pouco sobre estes anos de trabalho, gostava aproveitar estas pequenas linhas para agradecer a todas as pessoas que, de alguma maneira, me ajudaram. Como isso não é possível, gostaria de deixar nestas palavras o meu profundo agradecimento a todos os que me auxiliaram ao longo desta caminhada.

O meu mais profundo agradecimento e admiração ao Professor Doutor Aníbal Costa, pelo seu empenho, dedicação, amizade e, mais do que tudo, paciência, transmitidos durante este trabalho. Os seus conhecimentos foram fundamentais para eu levar "a bom porto" esta tese.

Agradeço o apoio e a disponibilidade demonstrados, ao longo do Mestrado, por todos os funcionários da Secção de Estruturas, nomeadamente à D. Vitória, à D. Elvira e à Marta. Foram inexcedíveis.

O meu obrigado ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Fundación Mapfre, pelo apoio logístico e monetário, tão útil no desenvolvimento do presente trabalho.

A todos os meus colegas do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia de Viseu, a minha admiração profunda e o meu obrigado, pela forma como me sempre acompanharam e incentivaram, e pelas condições que sempre me proporcionaram ao longo desta tese.

Nesta hora gostava de recordar os meus colegas de Mestrado, com quem fui aprendendo e convivendo. Como os primeiros nunca se esquecem as minhas saudações fraternas para os colegas do Mestrado de 1994/1996.

A todos os meus amigos, que me foram acompanhando e incentivando, o meu Obrigado.

Gostava, de forma particular, agradecer à minha família o carinho prestado, em especial ao Tó Miguel e ao Luís, pelo apoio logístico... não me esquecerei de vós.

E como os últimos são sempre os primeiros...

Aos meus pais, sogros e irmãos:
Sem vocês não estava aqui.
Acreditaram em mim, abdicando, muitas vezes deles próprios, para me proporcionarem o tempo, o espaço e o apoio. Vocês foram imprescindíveis. Uma referência especial para a Zézinha, pela sua dedicação e ajuda que me proporcionou..... cinco estrelas.
A todos a minha gratidão eterna.

Finalmente quero agradecer à Sónia pelo amor, amizade, sensibilidade e força com que sempre me presenteou. Pelo alento nas alturas mais difíceis, pela paciência e pelo carinho, sobretudo nas horas de ausência. És o máximo.

Ao João, ao Afonso e à Matilde ..... por existirem e serem a fonte da minha vida.

Resumo: Este trabalho foi desenvolvido com o objectivo de proporcionar uma visão global sobre o sector da Reabilitação Estrutural.

Assim, numa primeira fase, procura-se enquadrar os conceitos relacionados com a Patologia da Construção e as várias fases do Processo Patológico, através da sua definição e descrição. Mereceu particular atenção a discussão e a enumeração dos danos e suas causas principais, bem como o estudo patológico das lesões, nomeadamente enunciando as fases de inspecção e diagnóstico.

A fase seguinte do trabalho consistiu na recolha das técnicas de inspecção mais utilizadas na inspecção de estruturas, tendo em atenção aquelas que mais se aplicam em Portugal. Foi dada particular importância aos ensaios não destrutivos e ligeiramente destrutivos, por serem os que têm mais interesse prático na área da reabilitação estrutural.

Para cada uma das principais técnicas foram mencionados os fundamentos do método, a instrumentação necessária à sua aplicação *in situ* e os principais procedimentos de ensaio. Sempre que aplicável, mencionou-se a(s) norma(s) existente(s) que regulamentam o método, bem como as suas principais vantagens e desvantagens.

Todo o estudo é acompanhado por figuras, quadros e tabelas que fornecem preciosa ajuda no entendimento e acompanhamento da matéria apresentada.

Posteriormente, para os métodos construtivos mais utilizados em Portugal, estruturas de betão armado, de alvenaria, de madeira e metálicas, foram sistematizadas as principais causas de deterioração e as principais técnicas de inspecção e ensaio, específicas a cada tipo de estrutura.

Abstract: : This work was developed with the objective to proportionate a global vision over the Structural Reabilitation sector. Therefore, to beging with, one tryes to frame the concepts related to the Construction Pathology and the various stages of the Pathological Process, through its definitions and descriptions.A major and particular atention was taken into the discussion and enumeration of the damage and its main causes, as well as the pathological study of the lesion, mainly enunciating the inspection and diagnosis stages.

The next work step, consisted in gathering the most used inspection technics in structure inspection, bearing in mind the most usual ones aplied in Portugal. It was given particular importance to the non-destructive and the slightly destructive tests, regarded to be the ones with the most practical interest in the structural reabilitation area. For each one of the main technics were mentioned the fundaments of the method, the necessary instrumentation to its application "in situ" and the main tests procidures. Werever needed, the respective existing standard that rules the method was mentioned, as well as its main advantages and desadvantages were described.

All this study is illustrated with pictures, frames and tables, supplying a precious help in understanding and following the presented matter.

Further ahead, for the construction methods most commonly used in Portugal, concrete structures, stone-work, wood and metalic-work, the main deterioration causes and the main inspection technics and tests were systematized and specifyed for each kind of structure.

Índice

1. Introdução 1.1

1.1 Enquadramento 1.1

1.2 Objectivos da dissertação 1.6

1.3 O papel dos ensaios na Engenharia Civil 1.9

1.4 Organização da tese 1.12

2. Patologia da Construção 2.1

2.1 Introdução 2.1

2.2. Definições 2.3

2.3 Tipologia 2.7

2.3.1 Danos 2.7

2.3.1.1 Danos físicos 2.9

2.3.1.1.1 Humidade 2.9

2.3.1.1.2 Erosão 2.10

2.3.1.1.3 Sujidade 2.10

2.3.1.2. Danos mecânicos 2.10

2.3.1.2.1 Deformações 2.10

2.3.1.2.2 Fendas 2.11

2.3.1.2.3 Fissuras 2.11

2.3.1.2.4 Desprendimentos 2.12

2.3.1.2.5 Erosão 2.12

2.3.1.3. Danos químicos 2.12

2.3.1.3.1 Eflorescências 2.12

2.3.1.3.2 Oxidação e Corrosão 2.13

2.3.1.3.3 Erosão 2.13

2.3.1.4. Danos biológicos 2.13

2.3.1.5 Dados estatísticos 2.14

2.3.2 Causas ou acções..... 2.15

2.3.2.1 Causas directas..... 2.15

2.3.2.1.1 Acções mecânicas..... 2.16

2.3.2.1.2 Acções físicas..... 2.17

2.3.2.1.3 Acções químicas e biológicas..... 2.18

2.3.2.1.4 Danos prévios..... 2.18

2.3.2.2 Causas Indirectas..... 2.19

2.3.2.2.1 Fase de projecto..... 2.19

2.3.2.2.2 Fase de execução..... 2.20

2.3.2.2.3 Materiais..... 2.20

2.3.2.2.4 Manutenção..... 2.20

2.3.2.2.5 Dados estatísticos..... 2.20

2.4 Estudo patológico. Inspecção..... 2.21

2.4.1 Observação do dano..... 2.21

2.4.2 Recolha de dados..... 2.22

2.4.3 Análise do processo patológico Diagnóstico..... 2.26

2.4.4 Prognóstico..... 2.27

2.4.5 Proposta para Ficha de Recolha de Dados..... 2.27

3. Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural..... 3.1

3.1 Introdução..... 3.1

3.2 Ensaios Destrutivos..... 3.3

3.2.1 Ensaios de paredes de alvenaria *in-situ*..... 3.4

3.2.2 Considerações finais..... 3.7

3.3 Inspecção Visual..... 3.7

3.3.1 Meios complementares de inspecção..... 3.8

3.4 Ensaios Não Destrutivos e Ligeiramente Destrutivos..... 3.11

3.4.1 Introdução..... 3.11

3.4.2 Ensaios de Carga..... 3.13

3.4.2.1 Procedimentos de teste..... 3.13

3.4.2.2 Carga de ensaio e sua aplicação..... 3.14

3.4.2.3 Limitações e campos de aplicação..... 3.17

3.4.3 Técnicas baseadas na Teoria de Propagação das Ondas..... 3.18

3.4.3.1 Ensaios de Ultra-Sons..... 3.24

3.4.3.1.1 Instrumentação..... 3.25

3.4.3.2 Ensaios de Eco Ultra-Sónico..... 3.26

3.4.3.2.1 Instrumentação..... 3.27

3.4.3.3 Ensaios de Impulso Mecânico..... 3.27

3.4.3.4 Impacto Eco..... 3.28

3.4.3.4.1 Instrumentação..... 3.29

3.4.3.5 Ensaio Sónico (Cross-Hole)..... 3.29

3.4.3.6 Tomografia Sónica..... 3.30

3.4.3.6.1 Instrumentação..... 3.32

3.4.4 Radar..... 3.33

3.4.4.1 Instrumentação..... 3.37

3.4.5 Resistografia..... 3.38

3.4.6 Métodos baseados nas ondas mecânicas, para fundações profundas..... 3.39

3.4.6.1 Método do Eco Sónico..... 3.39

3.4.6.2 Método do Impulso Resposta..... 3.40

3.4.6.3 Registo de Impedância..... 3.42

3.4.6.4 CrossHole – Método Sónico..... 3.43

3.4.6.5 Método Parallel-Seismic..... 3.45

3.4.7 Métodos Nucleares..... 3.47

3.4.7.1 Transmissão directa de radiometria para determinação da densidade..... 3.48

3.4.7.1.1 Instrumentação..... 3.48

3.4.7.2 Radiografia..... 3.49

3.4.7.3 Vantagens e Limitações dos Métodos Nucleares..... 3.50

3.4.8 Métodos Electromagnéticos..... 3.52

3.4.8.1 Pacómetros..... 3.53

3.4.8.1.1 Métodos baseados no Princípio da Relutância Magnética..... 3.53

3.4.8.1.2 Métodos baseados no Princípio da Corrente Parasita..... 3.54

3.4.8.1.3 Limitações..... 3.55

3.4.8.2 Método do Potencial de Meia Célula..... 3.55

3.4.8.2.1 Princípios..... 3.56

3.4.8.2.2 Instrumentação..... 3.57

3.4.8.2.3 Análise de Resultados..... 3.59

3.4.8.2.4 Limitações..... 3.61

3.4.8.3 Método da Polarização Linear..... 3.61

3.4.8.3.1 Princípios..... 3.62

3.4.8.3.2 Instrumentação e Procedimentos..... 3.62

3.4.8.3.3 Vantagens e Limitações..... 3.66

3.4.9 Método *in situ*, para determinar a absorção e a permeabilidade das estruturas 3.68

3.4.9.1 Introdução..... 3.68

3.4.9.2 Mecanismos de ingresso..... 3.68

3.4.9.3 Testes de Penetração..... 3.71

3.4.9.4 Descrição dos Métodos de Ensaio..... 3.71

3.4.9.4.1 Ensaios de Absorção..... 3.71

3.4.9.4.1.1 Teste de absorção superficial de água (ISAT – Initial-Surface-Absorption Test)..... 3.71

3.4.9.4.1.2 Ensaios de absorção de água de Figg..... 3.73

3.4.9.4.1.3 Ensaios de Covercrete-Absorption..... 3.73

3.4.9.4.2 Ensaios de Permeabilidade à Água..... 3.74

3.4.9.4.2.1 Ensaio de CLAM..... 3.75

3.4.9.4.2.2 Método de Steinert..... 3.75

3.4.9.4.3 Ensaios de Permeabilidade ao Ar..... 3.76

3.4.9.4.3.1 Ensaio de permeabilidade ao ar de Figg..... 3.77

3.4.9.4.3.2 Ensaio de Schölin..... 3.77

3.4.9.5 Vantagens e Desvantagens..... 3.78

3.4.9.5.1 Testes de absorção..... 3.78

3.4.9.5.2 Testes de permeabilidade à água..... 3.79

3.4.9.5.3 Testes de permeabilidade ao ar..... 3.80

3.4.9.5.4 Limitações gerais dos ensaios para determinação *in situ* da absorção e permeabilidade das estruturas..... 3.80

3.4.10 Termografia..... 3.83

3.4.10.1 Equipamento..... 3.88

3.4.10.2 Vantagens e Limitações..... 3.90

3.4.11 Métodos, *in situ*, para a determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade..... 3.91

3.4.11.1 Necessidade dos ensaios *in situ* durante a construção..... 3.92

3.4.11.2 Necessidade dos ensaios *in situ* em construções existentes. 3.92

3.4.11.3 Revisão dos Métodos..... 3.93

3.4.11.3.1 Introdução..... 3.93

3.4.11.3.2 Método da medição da dureza superficial – Esclerómetro..... 3.93

3.4.11.3.3 Método da medição da resistência à penetração..... 3.96

3.4.11.3.4 Método baseado no conceito de maturidade..... 3.98

3.4.11.3.5 Ensaios de arranque..... 3.100

3.4.11.3.5.1 Ensaios planeados antes da betonagem..... 3.100

3.4.11.3.5.1.1 Teste Pull-Out..... 3.101

3.4.11.3.5.2 Ensaios planeados após a betonagem..... 3.103

3.4.11.3.5.2.1 Ensaio Dinamarquês..... 3.103

3.4.11.3.5.2.2 Ensaio da fractura interna..... 3.104

3.4.11.3.6 Ensaios de tracção..... 3.105

3.4.11.3.6.1 Teste Pull-Off..... 3.105

3.4.11.3.6.2 Ensaio de tracção por flexão..... 3.107

3.4.11.3.7 Métodos Combinados..... 3.108

3.4.11.3.8 Resumo..... 3.109

3.4.12 Ensaios Dinâmicos..... 3.111

3.4.13 Ensaios com aplicação de pressões..... 3.114

3.4.13.1 Ensaio com macacos planos..... 3.114

3.4.13.2 Ensaio com Dilatómetro..... 3.116

3.4.14 Fotogrametria..... 3.117

3.5 Recolha de Amostras e Ensaios em Laboratório..... 3.119

3.5.1 Carotagem e ensaios de carotes..... 3.119

3.5.2 Análise petrográfica de betões e argamassas..... 3.121

3.6 Notas finais..... 3.123

3.7 Monitorização..... 3.123

3.7.1 Objectivos..... 3.124

3.7.2 Instrumentação e sistemas de processamento de dados..... 3.127

3.7.2.1 Movimentos de fendas..... 3.128

3.7.2.2 Movimentos relativos de estruturas verticais..... 3.130

3.7.2.3 Movimentos horizontais absolutos..... 3.130

3.7.2.4 Assentamentos diferenciais..... 3.131

3.7.2.5 Rotações..... 3.131

3.7.2.6 Condições ambientais..... 3.131

3.7.2.7 Sensores de fibras ópticas..... 3.132

3.7.3 Sistemas de aquisição e processamento de dados..... 3.133

4. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão Armado..... 4.1

4.1 Introdução..... 4.1

4.2 O betão armado como material estrutural..... 4.2

4.3 Principais causas dos danos detectados em estruturas de betão armado. 4.7

4.3.1 Patologias com origem na fase de concepção e projecto..... 4.8

4.3.1.1 Erros de projecto devido à utilização incorrecta de programas de cálculo automático..... 4.11

4.3.1.2 Erros de projecto devido a acções mal estimadas..... 4.14

4.3.1.3 Erros de projecto em elementos estruturais..... 4.15

4.3.1.3.1 Erros que afectam os pilares..... 4.15

4.3.1.3.2 Erros que afectam as lajes e as vigas..... 4.16

4.3.1.3.3 Erros que afectam os muros de suporte..... 4.16

4.3.1.3.4 Erros que afectam as sapatas de fundação..... 4.17

4.3.1.3.5 Erros que afectam os edifícios industriais..... 4.17

4.3.1.4 Erros relativos à combinação de acções..... 4.18

4.3.2 Erros com origem na execução de estruturas de betão armado..... 4.19

4.3.2.1 Factores relacionados com o pessoal técnico..... 4.19

4.3.2.2 Factores relacionados com práticas construtivas..... 4.20

4.3.2.2.1 Condensações superficiais..... 4.20

4.3.2.2.2 Estanqueidade..... 4.21

4.3.2.2.3 Aspecto exterior..... 4.21

4.3.2.2.4 Amassadura..... 4.22

4.3.2.2.5 Transporte..... 4.22

4.3.2.2.6 Colocação e compactação..... 4.22

4.3.3 Erros com origem na utilização e manutenção de estruturas de betão armado..... 4.23

4.3.4 Erros com origem no material..... 4.24

4.3.4.1 Deterioração do betão..... 4.27

4.3.4.1.1 Processos mecânicos..... 4.27

4.3.4.1.2 Processos físicos..... 4.31

4.3.4.1.2.1 Ciclos de gelo/degelo..... 4.31

4.3.4.1.2.2 Erosão por Abrasão e por Cavitação..... 4.31

4.3.4.1.2.3 Acções Térmicas..... 4.32

4.3.4.1.2.4 Fluência e Fadiga..... 4.32

4.3.4.1.2.5 Impactos..... 4.33

4.3.4.1.2.6 Fogo..... 4.33

4.3.4.1.2.7 Processos químicos..... 4.34

4.3.4.1.2.8 Processos biológicos..... 4.37

4.3.4.2 A corrosão no betão armado..... 4.37

4.3.4.3 Outras causas de deterioração do betão..... 4.42

4.3.4.3.1 Factores relacionados com a concepção e projecto..... 4.42
4.3.4.3.1.1 Permeabilidade..... 4.43
4.3.4.3.1.2 Relação água/ligante..... 4.44
4.3.4.3.1.3 Cura..... 4.45
4.3.4.3.1.4 Dosagem e tipos de ligante..... 4.46
4.3.4.3.1.5 Água..... 4.46
4.3.4.3.1.6 Tipo de inertes e granulometria..... 4.47
4.3.4.3.1.7 Exposição ambiental..... 4.48
4.3.4.3.1.8 Recobrimento..... 4.50
4.4 A inspecção de estruturas de betão armado..... 4.51
4.4.1 Inspecção visual..... 4.53
4.4.2 Inspecção simplificada..... 4.53
4.4.3 Inspecção detalhada..... 4.55
4.4.4 Instrumentação..... 4.58
4.5 Técnicas Auxiliares de Diagnóstico..... 4.59
4.5.1 Introdução..... 4.59
4.5.2 Técnicas baseadas na Teoria de Propagação de Ondas..... 4.62
4.5.2.1 Ultra-Sons..... 4.62
4.5.2.1.1 Precisão dos resultados..... 4.64
4.5.2.1.2 Factores que influenciam os resultados..... 4.65
4.5.2.2 Impacto – Eco..... 4.68
4.5.2.3 Vantagens e Limitações..... 4.70
4.5.3 Esclerómetro..... 4.71
4.5.3.1 Precisão dos resultados..... 4.71
4.5.3.2 Factores que influenciam os resultados..... 4.72
4.5.3.3 Curvas de calibração..... 4.74
4.5.4 Método de medição da resistência à penetração..... 4.76
4.5.4.1 Precisão dos resultados..... 4.76
4.5.4.2 Factores que influenciam os resultados..... 4.76

4.5.4.3 Curvas de correlação..... 4.77

4.5.5 Teste Pull-Off..... 4.79

4.5.5.1 Precisão dos resultados..... 4.79

4.5.5.2 Factores que influenciam os resultados..... 4.79

4.5.5.3 Curvas de correlação..... 4.80

4.5.6 Ensaios de Arranque (Pull-Out)..... 4.80

4.5.6.1 Curvas de correlação..... 4.81

4.5.7 Método baseado no conceito de Maturidade..... 4.83

4.5.8 Ensaios utilizados na determinação do risco de corrosão..... 4.84

4.5.8.1 Através da medição da resistividade do betão..... 4.84

4.5.8.2 Técnica da resistência de polarização..... 4.85

4.5.9 Pacómetro..... 4.86

4.5.10 Determinação *in situ* do teor em cloretos do betão..... 4.87

4.5.11 Determinação da profundidade de carbonatação..... 4.89

4.5.12 Ensaios de carotes..... 4.90

4.5.12.1 Factores que influenciam os resultados do teste..... 4.91

4.5.12.1.1 Relação comprimento/diâmetro..... 4.91

4.5.12.1.2 Presença de armaduras na amostra..... 4.93

4.5.12.1.3 Tipo de elemento estrutural e localização da amostra na peça..... 4.93

4.5.12.1.4 Influência do diâmetro da amostra..... 4.94

4.5.13 Radar..... 4.94

4.5.14 Métodos combinados..... 4.96

4.5.15 Outros Métodos..... 4.98

4.6 Planear e Realizar Inspecções com recurso a Ensaios Não Destrutivos e Ensaios Semi-Destrutivos..... 4.99

4.6.1 Introdução..... 4.99

4.6.2 Relação dos Ensaios não Destrutivos e Ligeiramente Destrutivos utilizados em elementos estruturais de betão armado e sua aplicação..... 4.99

4.6.2.1 Métodos utilizados na determinação de Propriedades do Betão..... 4.99

4.6.2.2 Métodos utilizados na determinação do Estado e das Propriedades Estruturais 4.102
4.6.2.3 Métodos utilizados na Avaliação de Reparações 4.103
4.6.2.4 Quantidade de Testes 4.103
4.6.3 Qualificação de pessoal técnico 4.107
4.6.4 Definição do objectivo da investigação 4.107
4.6.4.1 Considerações estatísticas 4.108
4.6.4.2 Considerações práticas 4.109
4.6.5 Critério de custos 4.110
4.6.6 Densidade de resultados 4.110
4.6.7 Áreas de difícil acesso 4.111
4.6.8 Resultados de confiança e reprodutíveis 4.112
4.6.9 Simulações numéricas e experimentais 4.112
4.6.10 Correlação com os testes intrusivos 4.113
4.6.11 Apresentação de resultados 4.114
5. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria 5.1
5.1 Introdução 5.1
5.2 O Elemento Estrutural Parede de Alvenaria 5.4
5.2.1 Caracterização dos vários tipos de alvenaria 5.7
5.2.1.1 Paredes de cantaria 5.7
5.2.1.2 Paredes de alvenaria ordinária 5.9
5.2.1.3 Paredes de alvenaria aparelhada 5.9
5.2.1.4 Paredes Mistas 5.10
5.2.1.5 Paredes de alvenaria de tijolo 5.14
5.2.1.6 Paredes de taipa e adobe 5.17
5.2.2 A argamassa 5.18
5.3 Principais anomalias em paredes de alvenaria 5.20
5.3.1 Patologia da pedra 5.21
5.3.1.1 Características intrínsecas das rochas 5.21

5.3.1.2 Factores extrínsecos de agressão..... 5.22

5.3.1.3 Tipos de dano..... 5.24

5.3.1.3.1 Erosão..... 5.24

5.3.1.3.2 Dissolução..... 5.24

5.3.1.3.3 Desagregação..... 5.24

5.3.2 Descrição das principais anomalias em paredes resistentes..... 5.26

5.3.2.1 Desagregação..... 5.26

5.3.2.2 Esmagamento..... 5.27

5.3.2.3 Fendilhação..... 5.27

5.3.2.4 Acção da água..... 5.31

5.3.2.5 Deficiente isolamento térmico..... 5.33

5.3.2.6 Anomalias por acção de agentes biológicos, em paredes com elementos de madeira..... 5.34

5.3.2.7 Oxidação dos materiais..... 5.34

5.3.2.8 Degradação geral do edifício..... 5.35

5.3.3 Descrição das principais anomalias em paredes divisórias..... 5.35

5.3.4 Descrição das principais anomalias em paredes de alvenaria de terra..... 5.36

5.3.4.1 Elementos estruturais..... 5.36

5.3.4.2 Por acção de elementos exteriores..... 5.39

5.4 Técnicas de inspecção de edifícios em alvenaria..... 5.40

5.4.1 Aspectos gerais..... 5.40

5.4.2 A importância da investigação *in situ*..... 5.41

5.4.3 Identificação de alguns dos danos mais frequentes em estruturas de alvenaria..... 5.43

5.4.4 Procedimentos de investigação, apropriados para detectar danos.... 5.46

5.4.5 Escolha dos procedimentos de avaliação..... 5.47

5.4.6 Paredes de alvenaria multi-camadas..... 5.48

5.4.7 Técnicas de controle da reparação..... 5.48

5.5 Técnicas auxiliares de diagnóstico..... 5.49

5.5.1Determinação das dimensões geométricas de uma estrutura de 5.49

alvenaria.....

5.5.1.1 Sistemas topográficos..... 5.50

5.5.1.2 Sistemas fotogramétricos..... 5.51

5.5.2 Auscutação e Estetoscopia..... 5.52

5.5.3 Endoscopia..... 5.53

5.5.4 Ensaio Sónico (Cross-Hole)..... 5.54

5.5.5 Tomografia Sónica..... 5.56

5.5.6 Ensaio Ultra-Sónico..... 5.58

5.5.7 Impulso Mecânico..... 5.58

5.5.8 Impacto – Eco..... 5.59

5.5.9 Radar (GPR)..... 5.59

5.5.10 Termografia..... 5.60

5.5.11 Ensaios para determinar a resistência superficial da alvenaria..... 5.62

5.5.11.1 Esclerómetro..... 5.62

5.5.11.2 Ensaio de Penetração..... 5.63

5.5.11.3 Ensaio de Arranque (Pull-Off)..... 5.63

5.5.12 Fotogrametria..... 5.64

5.5.13 Extracção de carotes..... 5.65

5.5.14 Macacos Planos de Tensão..... 5.69

5.5.14.1 Medição do estado de tensão..... 5.69

5.5.14.2 A geometria e os macacos planos..... 5.71

5.5.14.3 Determinação da deformabilidade e resistência..... 5.72

5.5.14.4 Teste de corte na camada de argamassa..... 5.73

5.5.14.5 Limitações dos testes com macacos planos de tensão..... 5.74

5.5.15 Dilatómetro..... 5.74

5.5.16 Caracterização das Pedras..... 5.75

5.5.17 Análise Dinâmica..... 5.76

5.5.18 Ensaios de caracterização de juntas..... 5.78

5.5.19 Ensaios de Arranque..... 5.80

5.5.20 Associação e complementaridade de técnicas de inspecção..... 5.81

6. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira 6.1

6.1 Introdução 6.1

6.2 Caracterização da madeira 6.1

6.2.1 A madeira como material estrutural. Vantagens e desvantagens 6.7

6.3 Factores de degradação de estruturas de madeira 6.7

6.3.1 Danos de origem biológica 6.10

6.3.1.1 Fungos xilófagos 6.10

6.3.1.2 Insectos de origem larvar ou carunchos 6.14

6.3.1.3 Insectos sociais ou térmitas 6.15

6.3.1.4 Outros insectos 6.16

6.3.1.5 Xilófagos marinhos 6.16

6.3.2 Danos de origem não biológica 6.21

6.3.2.1 Agentes atmosféricos ou meteorológicos 6.21

6.3.2.2 Produtos químicos 6.23

6.3.2.3 Acção do fogo 6.23

6.3.2.4 Danos de origem estrutural 6.24

6.3.2.4.1 Secção insuficiente 6.25

6.3.2.4.2 Deformação excessiva e rotura a longo prazo 6.25

6.3.2.4.3 Uniões 6.25

6.3.2.4.4 Roturas locais 6.26

6.3.2.4.5 Contraventamento insuficiente 6.26

6.3.2.4.6 Fendas por secagem 6.26

6.3.2.5 Factores de crescimento 6.26

6.4 A inspecção em estruturas de madeira 6.28

6.4.1 Inspecção preliminar 6.30

6.4.1.1 Reconhecimento visual exterior 6.32

6.4.1.1.1 Fachadas e pátios 6.32

6.4.1.1.2 Coberturas 6.32

6.4.1.2 Flechas em lajes 6.33

6.4.1.3 Reconhecimento da estrutura..... 6.33

6.4.1.3.1 Pontos críticos de um elemento de madeira..... 6.34

6.4.1.3.2 Zonas de risco..... 6.34

6.4.2 Inspecção detalhada e diagnóstico..... 6.37

6.4.2.1 Degradação do material..... 6.38

6.4.2.2 Caracterização da madeira empregue - propriedades mecânicas..... 6.38

6.4.2.3 A classificação visual..... 6.39

6.5 Técnicas de inspecção em elementos de madeira..... 6.40

6.5.1 Técnicas de inspecção tradicionais..... 6.41

6.5.2 Técnicas especiais de inspecção..... 6.45

6.5.2.1 Ultra-sons..... 6.47

6.5.2.1.1 Métodos de avaliação através de ultra-sons..... 6.48

6.5.2.1.2 Factores que influenciam a velocidade de propagação. 6.49

6.5.2.1.3 Metodologia de ensaio..... 6.50

6.5.2.1.4 Resultados obtidos com esta técnica..... 6.51

6.5.2.2 Métodos de vibrações induzidas..... 6.52

6.5.2.3 Resistógrafo..... 6.53

6.5.2.4 Medição da densidade superficial..... 6.56

6.5.2.5 Radiografia/Raios gama..... 6.57

6.5.2.6 Termografia..... 6.58

6.5.2.7 Ground Penetrating Radar (G.P.R.) / Micro ondas..... 6.58

6.5.2.8 Datação da madeira..... 6.59

6.5.2.9 Detecção acústica de insectos xilófagos..... 6.60

7. Técnicas de Ensaio em Estruturas Metálicas..... 7.1

7.1 Introdução..... 7.1

7.2 O aço como material estrutural..... 7.2

7.3 Principais causas da deterioração do aço..... 7.7

7.3.1 Patologias relativas ao material..... 7.8

7.3.1.1 Material defeituoso..... 7.8

7.3.1.2 Corrosão..... 7.8
7.3.1.2.1 Introdução..... 7.8
7.3.1.2.2 Efeitos da corrosão..... 7.9
7.3.1.2.3 Tipos de corrosão..... 7.10
7.3.1.2.3.1 Corrosão electroquímica..... 7.11
7.3.1.2.3.1.1 Corrosão uniforme..... 7.11
7.3.1.2.3.1.2 Corrosão por picadas..... 7.11
7.3.1.2.3.1.3 Corrosão em fendas..... 7.12
7.3.1.2.3.1.4 Corrosão filiforme..... 7.12
7.3.1.2.3.1.5 Corrosão galvânica..... 7.13
7.3.1.2.3.1.6 Corrosão selectiva..... 7.13
7.3.1.2.3.1.7 Corrosão intragranular..... 7.13
7.3.1.2.3.1.8 Corrosão biológica..... 7.13
7.3.1.2.3.1.9 Corrosão por correntes parasitas..... 7.14
7.3.1.2.3.2 Corrosão influenciada por factores mecânicos..... 7.14
7.3.1.2.3.2.1 Fragilização pelo hidrogénio..... 7.14
7.3.1.2.3.2.2 Corrosão sob tensão..... 7.14
7.3.1.2.3.2.3 Corrosão sob fadiga..... 7.14
7.3.1.2.3.2.4 Corrosão por vibração..... 7.15
7.3.1.2.3.2.5 Corrosão – erosão..... 7.15
7.3.1.2.3.2.6 Corrosão – cavitação..... 7.15
7.3.1.2.4 Factores que influenciam a corrosão..... 7.16
7.3.1.2.4.1 Geometria dos elementos estruturais..... 7.17
7.3.1.2.4.2 Ligação entre os elementos estruturais..... 7.19
7.3.1.2.4.3 Pormenores gerais de concepção..... 7.20
7.3.1.3 Rotura frágil..... 7.23
7.3.1.3.1 Factores que influenciam a rotura frágil..... 7.23
7.3.1.3.2 Propriedades dos materiais..... 7.24
7.3.1.3.3 Influência da solda..... 7.24

7.3.1.3.4 Espessura dos elementos estruturais..... 7.25
7.3.1.4 Fadiga..... 7.25
7.3.1.5 Arrancamento lamelar (folheação)..... 7.26
7.3.2 Patologias relativas às normas e regulamentos..... 7.26
7.3.3 Patologias relativas à fase de projecto e concepção..... 7.27
7.3.3.1 Documentação insuficiente..... 7.27
7.3.3.2 Dimensionamento incorrecto..... 7.28
7.3.3.3 Ligações..... 7.29
7.3.3.3.1 Ligações aparafusadas..... 7.29
7.3.3.3.1.1 Ruína da ligação..... 7.30
7.3.3.3.1.2 Corrosão das ligações aparafusadas..... 7.30
7.3.3.3.1.3 Detalhe incorrecto..... 7.31
7.3.3.3.2 Ligações soldadas..... 7.32
7.3.3.4 Peças desenhadas incorrectas..... 7.34
7.3.4 Patologias relativas à fase de fabrico..... 7.34
7.3.4.1 Descontinuidades de fabrico..... 7.34
7.3.4.2 Fabrico não conforme com o projecto e incumprimento de intolerâncias..... 7.34
7.3.5 Patologias relativas à fase de montagem..... 7.35
7.3.6 Patologias relativas à falta de fiscalização adequada..... 7.36
7.3.7 Patologias relativas ao uso inadequado da estrutura..... 7.36
7.3.8 Patologias produzidas por causas fortuitas e inexplicáveis..... 7.37
7.3.8.1 Acções não previstas..... 7.37
7.3.8.2 Assentamentos excessivos..... 7.37
7.3.8.3 Impactos..... 7.37
7.3.8.4 Fogo..... 7.38
7.4 A inspecção de estruturas metálicas..... 7.38
7.4.1 A inspecção de rotina..... 7.39
7.4.2 A inspecção periódica e detalhada..... 7.40
7.5 Técnicas de inspecção em estruturas metálicas..... 7.41

Índice de Figuras

Introdução

Figura 1.1 - Evolução do sector da conservação e reabilitação de edifícios no mercado da construção..... 1.1

Figura 1.2 - Época de construção dos alojamentos existentes em Portugal..... 1.2

Figura 1.3 - Materiais utilizados na construção de edifícios em Portugal..... 1.3

Figura 1.4 - Edifícios em Portugal, segundo a época de construção, por estado de conservação..... 1.5

Patologia da Construção

Figura 2.1 - Evolução relativa de incidência das manifestações patológicas entre 1995 e 2002..... 2.2

Figura 2.2 - Principais causas de encargos financeiros em obras de reabilitação de construção..... 2.21

Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

Figura 3.1 - Ensaio de compressão diagonal *in situ*..... 3.4

Figura 3.2 - Algumas configurações possíveis de painéis de parede ensaiados *in situ*..... 3.5

Figura 3.3 - Ensaios em paredes de alvenaria *in situ*..... 3.5

Figura 3.4 - Ensaios em paredes de alvenaria *in situ*..... 3.6

Figura 3.5 - Medidor de fissuras microscópico..... 3.9

Figura 3.6 - Fibroscópios..... 3.10

Figura 3.7 - Boroscópios..... 3.10

Figura 3.8 - Sistema de carga constituído por bidões de água..... 3.15

Figura 3.9 - Conjunto de deflectómetros para leitura de flechas numa laje..... 3.16

Figura 3.10 a) e b) - Ensaios de carga em fundações. a) em sapata à escala real(Hospital Pedro Hispano, Matosinhos); e b) em estacas de compressão ϕ600 (Fábrica Siemens, Vila do Conde)..... 3.18

Figura 3.11 - Propagação de ondas P e ondas S, no interior de um sólido..... 3.19

Figura 3.12 - Propagação de ondas no interior de um material heterogéneo..... 3.23

Figura 3.13 - Tipos de leitura da velocidade de propagação por ultra-sons..... 3.24

Figura 3.14 - Efeitos dos defeitos no percurso de um impulso por ultra-sons, num elemento de betão..... 3.25

Figura 3.15 - Esquema do Método Eco Ultra-sónico (pulse-echo)..... 3.27

Figura 3.16 - Esquema do Método Impacto Eco..... 3.28

Figura 3.17 - Esquema do Ensaio Sónico, realizado numa parede de alvenaria.... 3.30

Figura 3.18 - Ensaio Tomografia Sónica: antes e após uma operação de reforço, realizado numa parede de alvenaria..... 3.31

Figura 3.19 - Ensaio Tomografia Sónica: Impacto com o martelo em parede de alvenaria..... 3.32

Figura 3.20 - Ensaio Tomografia Sónica: Malha de transdutores de recepção (horizontal e vertical)..... 3.32

Figura 3.21 - Ensaio GPR: impulsos de radiação electromagnética nas interfaces entre materiais, com constantes dieléctricas diferentes..... 3.34

Figura 3.22 - Exemplo do resultado de um ensaio, utilizando o Método do Eco Sónico..... 3.39

Figura 3.23 - Exemplo de um gráfico de Impulso Resposta, num ensaio de uma estaca..... 3.41

Figura 3.24 - (a) Defeitos planeados numa estaca experimental; (b) reflectograma obtido através do processamento de sinal de resultados do método do eco sónico; (c) desenho de impedância obtido pela combinação da informação obtida pelo reflectograma e a impedância característica obtida através da análise do método impulso resposta..... 3.42

Figura 3.25 - Esquema do Ensaio CrossHole, em fundações profundas..... 3.44

Figura 3.26 - Exemplo da saída de resultados, no Método CrossHole..... 3.44

Figura 3.27 - Exemplo da saída de resultados obtidos pelo Método Parallel-Seismic (a profundidade da estaca é indicada pela mudança do declive da linha que representa o tempo de chegada da onda de choque, em função da profundidade) 3.46

Figura 3.28 - Radiometria por transmissão directa com a fonte e o detector externos ao elemento de teste..... 3.49

Figura 3.29 - Esquema da técnica de radiografia..... 3.50

Figura 3.30 a) e b) - Pacómetros baseados no princípio da relutância magnética.. 3.54

Figura 3.31 - Pacómetro baseado no Principio da Corrente Parasita..... 3.55

Figura 3.32 - Equipamento para aplicação do Método do Potencial de Meia Célula, descrito na Norma ASTM C 876..... 3.57

Figura 3.33 - Medição dos potenciais de meia célula..... 3.59

Figura 3.34 - Mapa de linhas equipotenciais..... 3.60

Figura 3.35 - Equipamento utilizado no Método de Polarização Linear..... 3.63

Figura 3.36 - Esquema de um ensaio de absorção superficial da água, baseado no ensaio ISAT..... 3.72

Figura 3.37 - Esquema do teste de absorção de água de Figg..... 3.73

Figura 3.38 - Esquema do teste de permeabilidade à água..... 3.74

Figura 3.39 - Esquema de permeabilidade à água em paredes de alvenaria..... 3.74

Figura 3.40 - Esquema da instrumentação para a realização do ensaio CLAM..... 3.75

Figura 3.41 - Esquema do anel de segurança, utilizado no Método de Steinert..... 3.76

Figura 3.42 - Esquema do ensaio de permeabilidade ao ar de Figg modificado..... 3.77

Figura 3.43 - Esquema do ensaio de permeabilidade superficial ao ar de Schölin.. 3.78

Figura 3.44 - Princípio de funcionamento da Termografia (parede mista de Alvenaria)..... 3.84

Figura 3.45 - Efeito de uma anomalia interna na temperatura superficial, durante um fluxo de calor: a) Fluxo de calor para o interior, em zonas quentes situadas por cima da anomalia e b) Fluxo de calor para o exterior, em zonas frias situadas por cima da anomalia..... 3.85

Figura 3.46 - Câmara de detecção de raios infravermelhos..... 3.88

Figura 3.47 - Esquema para a criação de imagens termográficas..... 3.88

Figura 3.48 - Termogramas com a visualização das temperaturas obtidas..... 3.89

Figura 3.49 - Confrontação entre o termograma e fotografias da estrutura..... 3.90

Figura 3.50 - Exemplo da relação entre a tensão de compressão obtida através do ensaio de um provete cilíndrico e o valor obtido através de um ensaio *in situ*.... 3.93

Figura 3.51 - Esquema do esclerómetro de Schmidt..... 3.94

Figura 3.52 - Forma, aproximada, da zona, no betão, afectada, durante o teste de penetração..... 3.97

Figura 3.53 - Sequência do ensaio de penetração de Windsor..... 3.98

Figura 3.54 - Sequência do ensaio de maturidade..... 3.100

Figura 3.55 - Macaco de pressão utilizado no ensaio de arranque (Lok-test)..... 3.101

Figura 3.56 - Esquema do ensaio de arranque..... 3.102

Figura 3.57 - Esquema do ensaio *Capo - Test*..... 3.103

Figura 3.58 - Relação entre o ensaio *Lok-Test* e o ensaio *Capo-Test*, determinada em 6 investigações..... 3.104

Figura 3.59 - Esquema do ensaio de Fractura Interna..... 3.105

Figura 3.60 - Esquema do ensaio de tracção directa *Pull-Off*..... 3.106

Figura 3.61 - Realização do ensaio de tracção directa *Pull-Off*, numa laje de betão..... 3.106

Figura 3.62 - Geometria dos provetes arrancados pelo ensaio de tracção directa *Pull-Off*, em paredes de alvenaria e determinação da resistência..... 3.107

Figura 3.63 - Esquema do ensaio tracção por flexão..... 3.108

Figura 3.64 - Sistema de medição: acelerómetros..... 3.111

Figura 3.65 - Identificação dos locais de medição: note-se a sua localização em planta (com orientações bem definidas), e em altura..... 3.113

Figura 3.66 - Alguns aspectos relacionados com a execução de ensaios com macacos planos: (a) controlo de distâncias de referência; (b) disposição do macaco plano na ranhura e (c) pressurização do macaco..... 3.115

Figura 3.67 - Algumas configurações de macacos planos..... 3.116

Figura 3.68 - Equipamento e realização de um ensaio com dilatómetro..... 3.117

Figura 3.69 - Levantamento de uma estrutura obtido através de fotogrametria..... 3.118

Figura 3.70 - Extracção de carotes em paredes de alvenaria..... 3.120

Figura 3.71 - Procedimentos para a obtenção da lâmina para a análise petrográfica..... 3.122

Figura 3.72 - Imagem obtida ao microscópio da superfície de um betão..... 3.123

Figura 3.73 – Dispositivos de acompanhamento de movimento de juntas e de fissuras: fissurómetro..... 3.130

Figura 3.74 – Dispositivos de acompanhamento de movimento de juntas e de fissuras: réguas graduadas..... 3.130

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão armado

Figura 4.1 - Pormenor da degradação de um edifício realizado em betão armado. 4.4

Figura 4.2 - Conceitos de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão armado e suas inter-relações..... 4.5

Figura 4.3 - Vida útil de uma estrutura..... 4.6

Figura 4.4 - Vida útil e vida residual de uma estrutura..... 4.6

Figura 4.5 - Localização dos danos em elementos de betão..... 4.8

Figura 4.6 - Distribuição da origem da não qualidade dos projectos..... 4.9

Figura 4.7a - Pormenorização do projecto de estabilidade..... 4.11

Figura 4.7b - Pormenorização do projecto de estabilidade..... 4.11

Figura 4.8 - Projectar estruturas simples..... 4.11

Figura 4.9a – Erros no cálculo do muro de suporte..... 4.16

Figura 4.9b - Erros no cálculo de muros de suporte..... 4.17

Figura 4.10 - Deslocamento da armadura durante a betonagem..... 4.23

Figura 4.11 - Exemplos de cofragem defeituosa..... 4.23

Figura 4.12 - Exemplo de uma estrutura com armaduras corroídas..... 4.25

Figura 4.13 - Causas da fissuração do betão..... 4.27

Figura 4.14 - Idades do betão para possível aparecimento de fissuras com várias causas..... 4.28

Figura 4.15 - Fissuras por retracção plástica em pavimentos e lajes contínuas..... 4.30

Figura 4.16 - Fissuras por sobrecargas: causas directas..... 4.30

Figura 4.17 - Fissuras por assentamento plástico..... 4.31

Figura 4.18 - Efeitos da cavitação..... 4.32

Figura 4.19 - Efeito da acção do fogo em estruturas de betão armado..... 4.34

Figura 4.20 - Reacções mais importantes que levam à deterioração do betão..... 4.35

Figura 4.21 - Efeitos do ataque ácido em estruturas de betão..... 4.36

Figura 4.22 - Efeitos do ataque por sulfatos a estruturas de betão..... 4.36

Figura 4.23 - Estrutura de betão armado com corrosão de armaduras..... 4.38

Figura 4.24 - Avanço da frente de carbonatação e suas consequências..... 4.39

Figura 4.25 - Tipos de corrosão em armaduras..... 4.40

Figura 4.26 - Corrosão localizada em armaduras, causada por cloretos..... 4.40

Figura 4.27 - Fissuração na corrosão sob tensão..... 4.41

Figura 4.28 - Estragos provocados pela corrosão..... 4.41

Figura 4.29 - Resistência versus durabilidade..... 4.42

Figura 4.30 - Qualidade do betão em função do coeficiente de permeabilidade à água, k..... 4.44

Figura 4.31 - Influência da relação A/C na permeabilidade..... 4.44

Figura 4.32 - Efeito da espessura de recobrimento..... 4.51

Figura 4.33 - Ensaio de ultra-sons..... 4.62

Figura 4.34 - Exemplo da variação da resistência à compressão do betão com a velocidade de propagação dos ultra-sons..... 4.64

Figura 4.35 - Esquema de funcionamento do Método Impacto Eco..... 4.69

Figura 4.36 - Ensaio utilizando o Método Impacto Eco..... 4.69

Figura 4.37 - Ensaio utilizando o Esclerómetro..... 4.71

Figura 4.38 - Ensaio de Esclerómetro: exemplo da variação da resistência à compressão do betão com o índice esclerométrico..... 4.74

Figura 4.39 - Ensaio de resistência à penetração..... 4.76

Figura 4.40 - Ensaio de penetração de Windsor: exemplo da variação da resistência à compressão do betão com o comprimento da sonda..... 4.78

Figura 4.41 - Ensaio Pull-Off: tipos de ruptura..... 4.79

Figura 4.42 - Equipamento necessário para a realização de um Ensaio Pull-Off... 4.79

Figura 4.43 - Realização de um ensaio de arranque..... 4.81

Figura 4.44 - Estado de tensão no ensaio de arranque, ao longo da superfície de rotura prevista, antes do início da fissuração..... 4.81

Figura 4.45 - Curvas de correlação obtidas por diversos autores, entre a força de arranque e a resistência à compressão do betão, em cubos de 15 cm de aresta... 4.82

Figura 4.46 - Termómetro inserido em elemento de betão..... 4.84

Figura 4.47 - Disposição utilizada para determinar a resistividade do betão..... 4.85

Figura 4.48 - Realização de um ensaio com o objectivo de determinar a resistividade do betão..... 4.85

Figura 4.49 - Realização de um ensaio utilizando a técnica de resistência à polarização..... 4.86

Figura 4.50 - Realização de um ensaio com pacómetros e esboço das armaduras localizadas..... 4.87

Figura 4.51 - Equipamento utilizado na determinação do teor em cloretos..... 4.88

Figura 4.52 - Recta de correlação obtida em 30 amostras entre a técnica de ensaio *in situ* e ensaios laboratoriais..... 4.89

Figura 4.53 - Determinação da profundidade de carbonatação, com recurso à extracção de carotes..... 4.90

Figura 4.54 - Extracção de uma carote de uma viga de betão armado..... 4.90

Figura 4.55 - Factores de correlação de esbelteza..... 4.92

Figura 4.56 - Relação entre a posição das armaduras numa amostra e a resistência à compressão relativa..... 4.93

Figura 4.57 - Equipamento utilizado no ensaio GPR..... 4.94

Figura 4.58 - Imagem obtida na realização de um ensaio GPR..... 4.95

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria

Figura 5.1 - Representação esquemática da execução de uma parede de alvenaria..... 5.1

Figura 5.2 - Igreja dos Grilos (Porto): Exemplo de parede de cantaria..... 5.7

Figura 5.3 - Exemplo de aparelho regular..... 5.7

Figura 5.4 - Exemplo de variantes do aparelho regular: (a) Aparelho regular: perpianhos e placas; (b) e (c) idem, variante de perpianhos e placas..... 5.8

Figura 5.5 - Cunhais de cantaria, com pedras de forma paralelepipédica: (a) representação esquemática; (b) exemplo de edifício em Sintra..... 5.8

Figura 5.6 - Edifícios realizados em alvenaria ordinária..... 5.9

Figura 5.7 - Paredes de alvenaria aparelhada, representação esquemática: (a) aparelho rústico; (b) aparelho regular..... 5.10

Figura 5.8 - Paredes de alvenaria mista: reforço de construção em alvenaria ordinária, junto a abertura..... 5.10

Figura 5.9 - Evolução dos sistemas estruturais correntes na cidade de Lisboa..... 5.12

Figuras 5.10 (a) e (b) - Elementos construtivos característicos dos Edifícios *Pombalinos*: Cruz de Sto. André e Paredes em Tabique..... 5.12

Figura 5.11 - Pormenor da Construção Típica de um Edifício *Pombalino*..... 5.13

Figura 5.12 - Pormenor da estrutura de madeira da parede em gaiola..... 5.13

Figura 5.13 - Pormenor da estrutura dos Edifícios *Gaioleiros*..... 5.14

Figura 5.14 - Fabrico de tijolos no Antigo Egipto (pintura em Thebes, c. 1500 AC) 5.15

Figura 5.15 - (a) Pano de tijolo ao alto; (b) Pano de meia vez de tijolo..... 5.16

Figura 5.16 - Parede de duas vezes de tijolo: aparelho inglês..... 5.16

Figura 5.17 - Confecção de uma parede de taipa..... 5.17

Figura 5.18 - Exemplo de estrutura de alvenaria com danos de origem biológica.. 5.20

Figura 5.19 - Deterioração de elementos em pedra..... 5.21

Figura 5.20 - Desagregação de alvenaria fraca: edifício em Santiago do Cacém.. 5.27

Figura 5.21 – Exemplo da existência de fendas em paredes de alvenaria ortogonais..... 5.28

Figura 5.22 - Fendilhação de paredes por assentamento diferencial das fundações..... 5.28

Figura 5.23 - Abaluamento de uma parede de alvenaria..... 5.29

Figura 5.24 – Fendas características, na ocorrência de sismos..... 5.29

Figura 5.25 - Impulsos laterais, que podem provocar fendas horizontais nas paredes..... 5.30

Figura 5.26 - Fissuras verticais em panos de alvenaria..... 5.30

Figura 5.27 – Modos de fendilhação em juntas argamassadas..... 5.31

Figura 5.28 - Modelo de comportamento de uma parede de alvenaria em relação à humidade..... 5.31

Figura 5.29 - Exemplo de estrutura de alvenaria com eflorescências..... 5.32

Figura 5.30 – Esquema do mecanismo de formação de eflorescências e criptoflorescências, numa parede de cantaria..... 5.32

Figura 5.31 – Edifício em alvenaria apresentando humidade ascensional..... 5.33

Figura 5.32 – Degradação de edifício em alvenaria com oxidação de elementos metálicos..... 5.34

Figura 5.33 – Fendas em paredes interiores resultantes da deformação de lajes. 5.36

Figura 5.34 – Fendas mais comuns em paredes de alvenaria de terra, por deformação excessiva..... 5.38

Figura 5.35 - Ilustração de levantamento topográfico de uma estrutura..... 5.51

Figura 5.36 - Ilustração de um levantamento fotogramétrico com individualização de materiais diferentes..... 5.52

Figura 5.37 - Ilustração de um videoscópio..... 5.53

Figura 5.38 - Imagem do interior de uma parede de alvenaria, obtida por intermédio de um videoscópio..... 5.53

Figura 5.39 - Procedimento para inspecção de alvenarias com boroscópio: a) abertura de furo; b) introdução do equipamento..... 5.54

Figura 5.40 – Tomografia sónica: exemplo de saída de resultados..... 5.57

Figura 5.41 – Termografia: exemplo de parede com humidade..... 5.61

Figura 5.42 - Ensaio de esclerómetro (instrumentação diferente) em paredes de alvenaria..... 5.63

Figura 5.43 -Ensaio de arrancamento, numa parede de alvenaria..... 5.64

Figura 5.44 – Fotogrametria, exemplo de tratamento de imagem com software específico..... 5.65

Figura 5.45 – Extracção de carotes..... 5.66

Figura 5.46 - Imagem do interior do furo realizada após a extracção de carote. Inspecção visual do interior da estrutura..... 5.67

Figura 5.47 - Imagem obtida através da análise petrográfica de um alvenaria.... 5.67

Figura 5.48 – Macacos planos de tensão: procedimentos de ensaio..... 5.70

Figura 5.49 – Macacos planos simples: exemplo de saída de resultados..... 5.71

Figura 5.50 – Ensaio com macacos duplos..... 5.72

Figura 5.51 – Macacos planos duplos: exemplo de saída de resultados..... 5.73

Figura 5.52 – Ensaio com dilatómetro: equipamento..... 5.75

Figura 5.53 – Realização de ensaio com dilatómetro..... 5.75

Figura 5.54 - Ensaio dinâmico : aplicação de forças de impacto 5.77

Figura 5.55 - Ensaio dinâmico : exemplo de saída de resultados com software específico..... 5.77

Figura 5.56 – Representação esquemática de um ensaio *in situ de* juntas argamassadas..... 5.80

Figura 5.57 – Ensaio laboratorial de juntas argamassadas..... 5.80

Figura 5.58 - Ensaio de arranque *in situ* para a caracterização das ligações madeira/alvenaria..... 5.81

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira

Figura 6.1 - Variação da tensão de rotura à flexão estática para diversas espécies florestais..... 6.2

Figura 6.2 - Heterogeneidade da madeira..... 6.3

Figura 6.3 - Variação de propriedades na transição lenho juvenil/lenho adulto..... 6.3

Figura 6.4 - Direcções fundamentais da madeira..... 6.4

Figura 6.5- Curva média correspondente à relação entre as tensões de rotura em compressão axial e as densidades, com uma humidade de 12 %. Pinho bravo (Mata Nacional de Leiria) 6.5

Figura 6.6 - Incidência de defeitos na resistência da madeira à compressão axial. 6.6

Figura 6.7 - Danos produzidos por fungos de podridão castanha..... 6.13

Figura 6.8 - Danos produzidos por: (a) anóbidos, (b) líctidos e (c) cerambícidos... 6.14

Figura 6.9 - Danos produzidos por térmitas..... 6.16

Figura 6.10 - Efeito da radiação solar: fotodegradação..... 6.23

Figura 6.11 - Aspecto de caixilharia exterior..... 6.32

Figura 6.12 - Cobertura de madeira com deformações irregulares e com presença de vegetação..... 6.33

Figura 6.13 - Sótão de uma habitação com ataque biológico evidente..... 6.35

Figura 6.14 - Apoio de uma viga de madeira em parede de fachada..... 6.36

Figura 6.15 - Pavimento de madeira sob WC, com presença de humidade abundante..... 6.36

Figura 6.16 - Pormenor de carpintaria exterior deteriorada..... 6.37

Figura 6.17 - Influência do teor de água na resistência da madeira..... 6.42

Figura 6.18 - Inspecção preliminar, utilizando a percussão de um martelo para detectar sons diferentes..... 6.43

Figura 6.19 - Utilização de materiais de limpeza para por a descoberto elemento estrutural de madeira..... 6.44

Figura 6.20 - Ensaios com ultra-sons: Medição obliqua..... 6.50

Figura 6.21 - *Sylvatest*: aparelhagem portátil para a medição do tempo de transmissão de ultra-sons..... 6.51

Figura 6.22 - Propagação de ondas de choque: tempo de propagação em função da orientação das fibras..... 6.52

Figura 6.23 - Aparelhos que compõe o *Resistograph®*..... 6.54

Figura 6.24 - Ensaio de uma estrutura em madeira, utilizando o *Resistograph®*.... 6.55

Figura 6.25 - Ensaio com o *Resistograph®* .Relação entre várias situações possíveis de encontrar em elementos de madeira e a resistência à furação..... 6.55

Figura 6.26 - Ensaio com o *Resistograph®* .Exemplo de uma saída de resultados..... 6.55

Figura 6.27 - Aparelho de medição da resistência superficial: Pylodin 6.56

Figura 6.28 – Relação entre a presença de deterioração com a resistência à penetração, na realização de ensaios de determinação da densidade superficial... 6.57

Figura 6. 29 - Imagem obtida por GPR..... 6.59

Técnicas de Ensaio em Estruturas Metálicas

Figura 7.1 - Imagem, à época, da ponte de Coalbrookdale..... 7.3

Figura 7.2 - Imagem, actual, da ponte de Coalbrookdale..... 7.3

Figura 7.3 - Imagem da ponte de sobre o estreito de Menai, projectada por Thomas Telford..... 7.4

Figura 7.4 - Imagem, da ponte de Firth of Forth..... 7.4

Figura 7.5 - Tipos de corrosão..... 7.10

Figura 7.6 - Exemplo de corrosão uniforme..... 7.11

Figura 7.7 - Exemplo de corrosão por picadas..... 7.11

Figura 7.8 - Exemplo de corrosão em fendas..... 7.12

Figura 7.9 - Exemplo de corrosão filiforme..... 7.12

Figura 7.10 - Exemplo de corrosão galvânica..... 7.13

Figura 7.11 - Corrosão influenciada por factores mecânicos..... 7.15

Figura 7.12 - Exemplo de corrosão – erosão..... 7.15

Figura 7.13 - Exemplo de corrosão – cavitação..... 7.16

Figura 7.14 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: formas geométricas.. 7.17

Figura 7.15 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: arredondamento dos cantos..... 7.17

Figura 7.16 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: pormenores construtivos..... 7.18

Figura 7.17 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: elementos simples... 7.18

Figura7.18 - Local de deposição de lixo e humidade..... 7.18

Figura 7.19 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: tipos de cordões de solda..... 7.19

Figura 7.20 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: preferência por ligações de topo..... 7.19

Figura 7.21 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: acumulação de humidade..... 7.20

Figura 7.22 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: pormenores de concepção..... 7.21

Figura 7.23 - Corrosão em ligações aparafusadas..... 7.30

Figura 7.24 - Ligações aparafusadas: parafusos fora da chapa..... 7.31

Figura 7.25 - Ligações aparafusadas: dobragem da chapa para permitir a colocação de parafusos..... 7.31

Figura 7.26 e 7.27 - Ligações aparafusadas: Falta de furo em pilar e Erro de cálculo no comprimento de uma viga..... 7.32

Figura 7.28 e 7.29 - Ligações aparafusadas: desalinhamento geral da estrutura e parafuso com falta de aperto..... 7.32

Figura 7.30 - Ligações soldadas: ocorrência de porosidade..... 7.33

Figura 7.31 - Ligações soldadas: mordeduras..... 7.33

Figura 7.32 - Ligações soldadas: inclusão de escórias..... 7.33

Figura 7.33 - Ligações soldadas: falta de fusão..... 7.34

Figura 7.34 - Líquidos penetrantes: preparação e limpeza inicial da superfície..... 7.43

Figura 7.35 - Líquidos penetrantes: aplicação do penetrante..... 7.43

Figura 7.36 - Líquidos penetrantes: remoção do excesso de penetrante..... 7.44

Figura 7.37 - Líquidos penetrantes: aplicação do revelador..... 7.44

Figura 7.38 - Líquidos penetrantes: absorção do líquido pelo revelador..... 7.44

Figura 7.39 - Elemento metálico que contém uma fissura, dando origem a um campo de fuga..... 7.45

Figura 7.40 - Técnica de inspecção utilizando um Yoke electromagnético..... 7.46

Figura 7.41 - Esquema de ensaio de cordões de soldadura utilizando um Yoke... 7.46

Figura 7.42 - Técnica Geral de Ensaio Radiográfico..... 7.47

Figura 7.43 - Ensaio radiográfico: cordão de soldadura com porosidade..... 7.47

Figura 7.44 - Princípio básico da Inspecção de materiais por ultra-som..... 7.48

Índice de Quadros

Introdução

Quadro 1.1 - Estado de conservação dos edifícios em Portugal..... 1.3

Quadro 1.2 - Estado de conservação dos edifícios em Portugal: valores totais..... 1.4

Quadro 1.3 - Tipo de sistema estrutural e a frequência com que se utilizam os Ensaios 1.11

Quadro 1.4 - Utilização dos ensaios na Engenharia Civil..... 1.11

Quadro 1.5 - Objectivo para a realização de ensaios..... 1.11

Quadro 1.6 - Métodos de ensaio mais utilizados na Engenharia Civil..... 1.12

Patologia da Construção

Quadro 2.1 - Descrição geral dos danos..... 2.8

Quadro 2.2 - Danos em fachadas de edifícios..... 2.14

Quadro 2.3 - Origem de um processo patológico..... 2.16

Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

Quadro 3.1 - Etapas de intervenção quando são utilizadas a inspecção e técnicas de avaliação..... 3.2

Quadro 3.2 - Principais ensaios, aparelhos e técnicas utilizados nas diversas etapas da inspecção e diagnóstico estrutural..... 3.3

Quadro 3.3 - Ensaios *in situ* de painéis isolados do resto da estrutura..... 3.6

Quadro3.4 - Vantagens e desvantagens dos Métodos baseados em Ondas Mecânicas, para Fundações Profundas..... 3.47

Quadro 3.5 - Vantagens e desvantagens dos Métodos Nucleares..... 3.51

Quadro 3.6 - Vantagens e desvantagens dos Métodos Electromagnéticos..... 3.67

Quadro 3.7 - Comparação entre os ensaios *in situ* de permeabilidade ao ar..... 3.80

Quadro 3.8 - Vantagens e desvantagens dos Métodos de Penetração..... 3.81

Quadro 3.9 - Vantagens e Desvantagens da Termografia por Infravermelhos..... 3.90

Quadro 3.10 - Relação dos ensaios *in situ*, em elementos estruturais de betão armado..... 3.110

Quadro 3.11 - Comparação de técnicas utilizadas para determinação da resistência do betão *in situ*..... 3.110

Quadro 3.12 - Dispersão dos resultados e precisão da estimativa..... 3.111

Quadro 3.13 - Dispositivos de acompanhamento de movimento de junta e de fissuras..... 3.128

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão Armado

Quadro 4.1 - Factores de degradação e o seu efeito sobre o desempenho da estrutura de betão armado..... 4.26

Quadro 4.2 - Relação entre as causas de fissuras com a direcção das armaduras 4.28

Quadro 4.3 - Caracterização e origem das fissuras mais comuns..... 4.29

Quadro 4.4 - Resistência dos elementos de betão ao fogo, em função da temperatura atingida..... 4.33

Quadro 4.5 - Etapas da fase de inspecção e objectivos a atingir..... 4.56

Quadro 4.6 - Instrumentos de medida e o seu campo de aplicação..... 4.58

Quadro 4.7 - Classificação dos Métodos de Ensaio disponíveis, para Estruturas de Betão Armado..... 4.61

Quadro 4.8 - Métodos para a determinação *in situ* de parâmetros de resistência, de Estruturas de Betão Armado 4.62

Quadro 4.9 - Factores que influenciam os resultados de uma inspecção com ultra-sons..... 4.65

Quadro 4.10 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons..... 4.67

Quadro 4.11 - Vantagens e desvantagens das Técnicas baseadas na Teoria de Propagação de Ondas..... 4.70

Quadro 4.12 - Factores que influenciam os resultados do ensaio com o esclerómetro..... 4.72

Quadro 4.13 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de esclerómetro..... 4.75

Quadro 4.14 - Factores que influenciam os resultados do ensaio de resistência à penetração..... 4.77

Quadro 4.15 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de penetração de pinos..... 4.78

Quadro 4.16 - Vantagens e desvantagens dos ensaios de arranque, realizados antes e após a betonagem..... 4.83

Quadro 4.17 - Ensaios Não Destrutivos e Semi Destrutivos, para a determinação das propriedades materiais do betão, em construções existentes..... 4.100

Quadro 4.18 - Métodos de END e Semi Destrutivos utilizados para a determinação e avaliação das propriedades estruturais do betão..... 4.102

Quadro 4.19 - Métodos de END utilizados na avaliação de reparações..... 4.103

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria

Quadro 5.1 - Designação das paredes de alvenaria..... 5.5

Quadro 5.2 - Classificação das paredes de edifícios..... 5.5

Quadro 5.3 - Evolução dos vários sistemas estruturais na cidade de Lisboa..... 5.11

Quadro 5.4 - Principais Propriedades da Argamassa das juntas e sua importância..... 5.20

Quadro 5.5 - Tipos e caracterização da degradação da pedra de granito..... 5.25

Quadro 5.6 - Resumo das anomalias provocadas por deformação..... 5.37

Quadro 5.7 - Origem das fendas e suas principais características..... 5.37

Quadro 5.8 - Origem das fissuras em paredes de alvenaria de terra e sua caracterização..... 5.39

Quadro 5.9- Ensaio de carotes em paredes de alvenaria e ensaios complementares laboratoriais..... 5.68

Quadro 5.10 - Descrição dos ensaios existentes para definir as propriedades das argamassas..... 5.79

Quadro 5.11 - Complementaridade de técnicas de inspecção de paredes de alvenaria..... 5.82

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira

Quadro 6.1 - Classes de risco de aplicação de madeira maciça..... 6.9

Quadro 6.2 - Condições de humidade necessárias para o desenvolvimento de bolores e fungos..... 6.11

Quadro 6.3 - Resumo de alguns dos danos mais comuns, de origem biológica..... 6.17

Quadro 6.4 - Factores que provocam a alteração da madeira..... 6.27

Quadro 6.5 - Resumo dos ensaios não destrutivos em estruturas de madeira..... 6.61

Técnicas de Ensaio em Estruturas Metálicas

Quadro 7.1 - Inspecção de soldaduras: métodos mais utilizados..... 7.55

Quadro 7.2 - Ensaios Não Destrutivos em Estruturas de Aço..... 7.57

Quadro 7.3 - Normas Técnicas para os Ensaios Não Destrutivos em Estruturas de Aço..... 7.58

Índice de Tabelas

Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

Tabela 3.1 - Valores da impedância acústica para alguns materiais de construção 3.21

Tabela 3.2 - Valores da velocidade de ondas de compressão através de alguns materiais de construção..... 3.22

Tabela 3.3 - Valor da constante eléctrica relativa ε_R, para alguns materiais de construção..... 3.35

Tabela 3.4 - Interpretação da medição do Potencial de Meia Célula para vários tipos de eléctrodos..... 3.57

Tabela 3.5 - Valores de referência para a taxa de corrosão..... 3.64

Tabela 3.6 - Valores de referência para a resistividade..... 3.65

Tabela 3.7 - Aferição da qualidade do betão, através do ensaio ISAT..... 3.72

Tabela 3.8 - Valores da emissividade para alguns materiais estruturais..... 3.86

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão Armado

Tabela 4.1 - Características e exigências das águas para amassaduras de betões 4.45

Tabela 4.2 - Características e verificação de conformidade dos agregados..... 4.49

Tabela 4.3 - Velocidade de propagação de ondas em elementos de betão armado. Critério de Qualidade..... 4.63

Tabela 4.4 - Frequência mínima do transdutor emissor, de acordo com as dimensões da peça..... 4.66

Tabela 4.5 - Comparação entre os procedimentos preconizados por Normas Internacionais, no ensaio de ultra-sons..... 4.66

Tabela 4.6 - Comparação entre os procedimentos preconizados por Normas Internacionais, no ensaio com esclerómetro..... 4.73

Tabela 4.7 - Factores de correcção por esbelteza em amostras cilíndrica..... 4.92

Tabela 4.8 - Vantagens e desvantagens do GPR..... 4.96

Tabela 4.9 - Número de réplicas em cada local de ensaio..... 4.104

Tabela 4.10 - Limites de resistência para os métodos de teste *in situ*..... 4.105

Tabela 4.11 - Recomendações para lajes, paredes e núcleos de betão armado.... 4.105

Tabela 4.12 - Recomendações outras paredes, por cada 150 m^3..... 4.106

Tabela 4.13 - Recomendações pilares individuais..... 4.106

Tabela 4.14 - Número de repetições, por cada local de ensaio..... 4.107

Tabela 4.15 - Frequência de ensaio para alguns dos mais representativos END.... 4.111

Siglas e Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BSI	British Standards Institution
CE	Communauté Européenne
CEB	Comité Euro-international du Béton
CEN	Comité Européenne de Normalisation
CIB	Conseil International du Bâtiment pour la recherche, l'étude et la documentation
DGMEN	Direcção Geral dos Monumentos e Edifícios Nacionais
DIN	Deutches Institut für Normung
EN	Norma Europeia definitiva
END	Ensaio Não Destrutivo
ENV	Pré - Norma Europeia
FIB	Fédération française de l'Industrie du Béton
IPPAR	Instituto Português do Património Arquitectónico
IPQ	Instituto Português de Qualidade
ISO	The International Organization for Standardization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de recherches sur les Matériaux et les constructions

Introdução

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Assistiu-se nas últimas décadas, em Portugal, a um forte impulso na construção de novos edifícios, vias de comunicação e obras de arte. No entanto, constata-se que a manutenção e a reabilitação dos mesmos é praticamente inexistente. Assiste-se a uma degradação e abandono de áreas, que até há poucos anos constituíam zonas residenciais por excelência, sobretudo nos grandes centros urbanos.

De acordo com as estatísticas da EUROCONSTRUC-DAEI [01], referentes à produção de edifícios e obras públicas em 1995, verifica-se que Portugal surge em último lugar da lista de países europeus no que se refere ao investimento no sector da reabilitação/ conservação de edifícios, com apenas 6 % da verba total despendida. Comparativamente, países como a França, a Itália, Grã-Bretanha ou a Dinamarca investem mais de 40 % do total do sector da construção em trabalhos de reabilitação.

Parte significativa dessa verba investida na reabilitação corresponde a obras de conservação e manutenção em edifícios públicos e em monumentos classificados.

A ausência deste investimento faz com que os centros urbanos se degradem, com a consequente perda de qualidade de vida dos seus cidadãos.

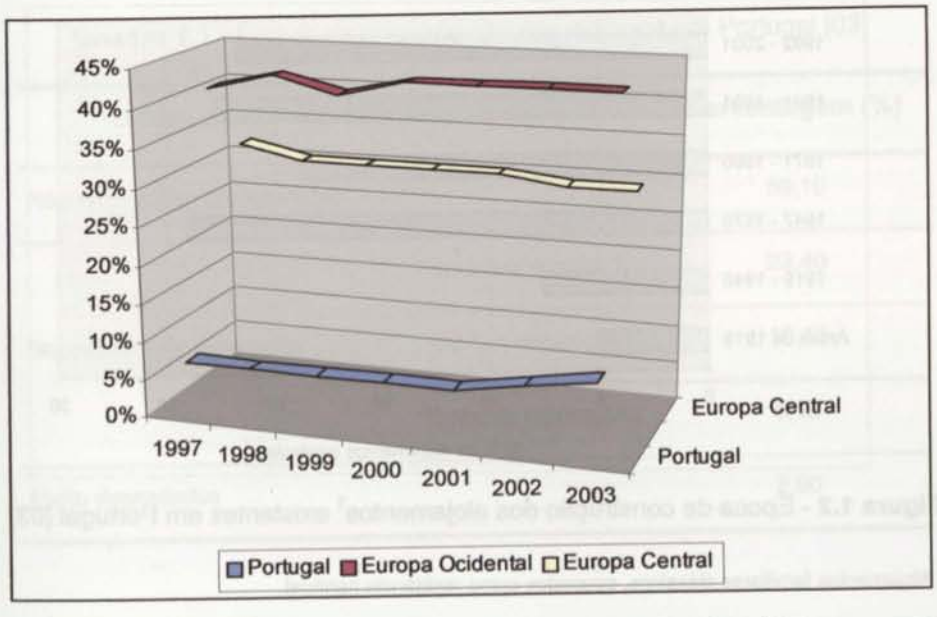


Figura 1.1 - Evolução do sector da conservação e reabilitação de edifícios no mercado da construção [02]

Acresce que a degradação do património edificado no nosso país, não se refere apenas aos edifícios construídos nas últimas décadas. A falta de conservação de edifícios seculares, construídos, na sua maioria com recurso a materiais disponíveis à época, como a madeira e a alvenaria de pedra, localizados não só nos centros urbanos, mas também nas zonas populacionais de todo o país, contribui significativamente para o referido estado de degradação.

Quando se fala em património pretende-se referir, não apenas os monumentos e edifícios públicos, classificados ou não, mais importantes, mas também o património edificado construído, que constitui, nas cidades, vilas e aldeias do nosso país, um testemunho de uma época, ajudando a clarificar a forma como a população se organizava, vivia e trabalhava ao longo da nossa história.

O Censos de 2001 [03] permitiu a caracterização do nosso parque habitacional, nomeadamente no que se refere à época de construção dos edifícios, aos materiais utilizados na sua construção, ao estado de conservação e à necessidade de reparação dos mesmos. Fazendo um resumo geral sobre os dados mais significativos, conclui-se:

a) em relação à idade do parque habitacional, nas duas últimas décadas existiu uma grande actividade no sector da construção (Figura1.2).

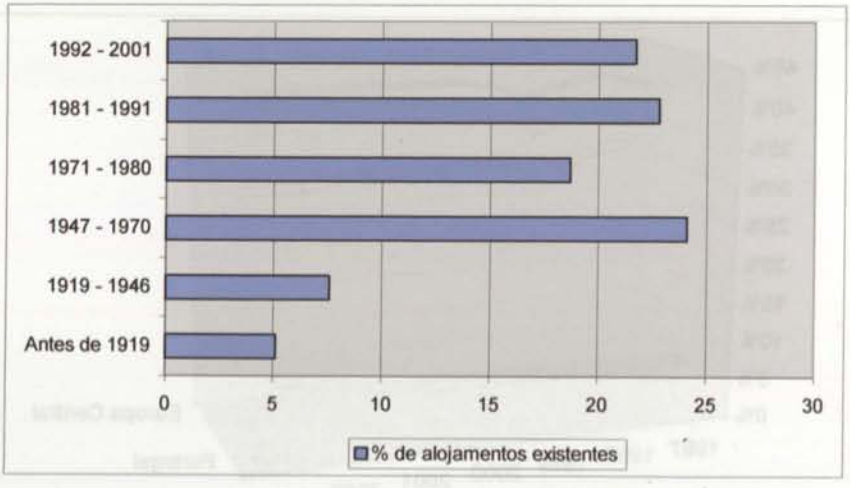


Figura 1.2 - Época de construção dos alojamentos[1] existentes em Portugal [03]

[1] Alojamentos familiares clássicos, ocupados como residência habitual.

b) em relação aos materiais utilizados na construção, ressalta a grande quantidade de edifícios realizados com paredes de alvenaria (Figura 1.3).

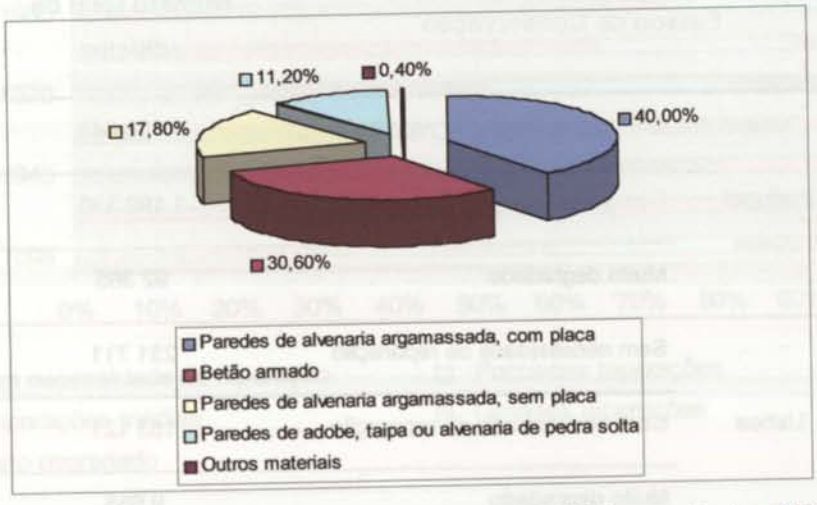


Figura 1.3 - Materiais utilizados na construção de edifícios em Portugal [03]

c) em relação ao estado de conservação dos edifícios, cerca de 59,1 % não apresentavam necessidade de reparação, 38 % necessitavam de trabalhos de reparação e 2,9 % encontravam-se muito degradados (Quadros 1.1 e 1.2).

Quadro 1.1 - Estado de conservação dos edifícios em Portugal [03]

Estado de conservação dos edifícios		Percentagem (%)
Não necessitam de reparação		59,10
Necessitam de reparação	Pequenas reparações	22,40
	Médias reparações	10,45
	Grandes reparações	5,15
Muito degradados		2,90

Quadro 1.2 - Estado de conservação dos edifícios em Portugal: valores totais [03]

Estado de Conservação		Número total de edifícios
Portugal	Sem necessidade de reparação	3 160 043
	Com necessidade de reparação	1 199 336
	Muito degradado	92 365
Lisboa	Sem necessidade de reparação	231 711
	Com necessidade de reparação	153 121
	Muito degradado	9 688
Grande Porto	Sem necessidade de reparação	1 410 58
	Com necessidade de reparação	113 675
	Muito degradado	9 991

Relacionando a idade dos edifícios com o seu estado de conservação, constata-se que à medida que o período de construção se aproxima da actualidade, menores são as necessidades de reparação. Assim, para os edifícios construídos antes de 1919, cerca de 65 % necessitavam de obras de reparação, 20 % não careciam de obras e os restantes 15 % encontravam-se muito degradados. Para os edifícios construídos entre 1991 e 2001, cerca de 87,6 % encontravam-se em bom estado de conservação. No entanto, 0,2 % dos edifícios construídos nessa década apresentavam-se muito degradados, o que corresponde a um universo de 1489 edifícios (Figura 1.4).

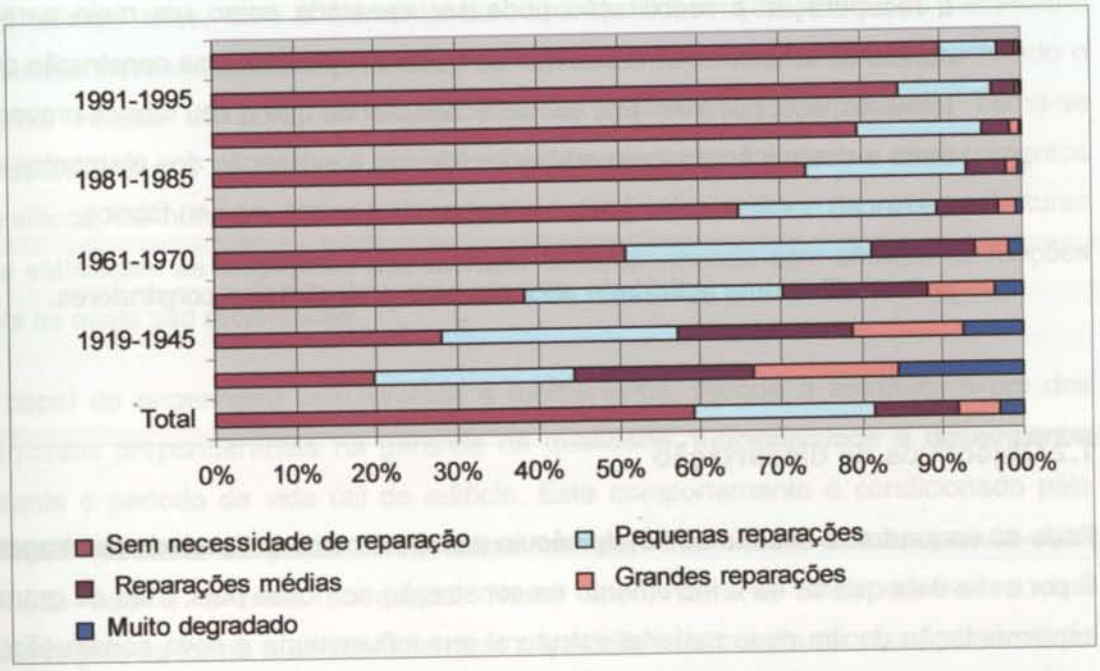


Figura 1.4 - Edifícios em Portugal, segundo a época de construção, por estado de conservação [03]

Saliente-se o facto dos dados aqui descritos se referirem apenas a edifícios de habitação e que os inquiridores não possuíam formação específica na área, correndo-se o risco dos dados estarem subavaliados.

Prevê-se que a recuperação/ reabilitação terá, nos próximos anos, um papel cada vez mais preponderante na indústria de construção em Portugal. Como pontos fundamentais que sustentam esta constatação, refira-se:

- a necessidade de promover e preservar o património existente;
- o parque habitacional, sobretudo nos grandes centros urbanos, está envelhecido;
- a necessidade de contrariar o despovoamento dos centros urbanos;
- incremento do investimento privado;
- a existência de problemas de funcionamento e de patologias em edifícios recentes;
- o apoio técnico-financeiro por parte do estado, através de programas como o RECRIA e o POLIS;

- a recuperação e reabilitação pode ser encarada como um meio para a defesa do ambiente, uma vez que os materiais utilizados na construção civil (cimento, aço, por exemplo) são artificiais, sendo que o seu fabrico provoca, tanto a destruição do meio ambiente (devido à extracção dos elementos do seu local) como envolve gastos enormes de energia, no seu fabrico;

- por constituir uma actividade aliciante para projectistas e construtores.

1.2 Objectivos da dissertação

Pode-se enquadrar a década de 40, do século passado, como um período de viragem. É por essa data que se dá o incremento na construção no nosso país, fruto da grande implementação de um novo material estrutural que influenciaria a nova construção: o betão armado. A este facto estão associadas algumas características que o tornaram tão requisitado pelos Engenheiros, Arquitectos e Construtores:

- é um material artificial, conhecendo-se por isso, o seu comportamento;

- é um material moldável, o que levou ao abandono das formas estruturais pré - estabelecidas;

- é resistente: a sua composição torna-o num material que muitos, à época, o consideravam indestrutível, pois possuía uma boa capacidade para resistir aos esforços de tracção e de compressão.

- permite a realização de edifícios maiores e mais complexos, o que possibilitou aos técnicos sonhar com objectivos e formas cada vez mais ousadas;

- passou a existir regulamentação sobre o material.

Abandonando-se, desta forma, as técnicas e os materiais tradicionais, como a madeira, o barro, a pedra e a cal e, ao mesmo tempo, a ideia que existia de conservação dos edifícios segundo as técnicas ancestrais (algumas com séculos de existência). Note-se, que à data do desenvolvimento da construção em betão armado, e em alguns casos ainda nos nossos dias, não existia regulamentação e normas para estes materiais. Todas as técnicas de construção fundamentavam-se no conhecimento e aplicação *in situ*, onde a experiência assumia um papel preponderante.

Nos últimos anos, com o aumento do ritmo de construção, tornou-se necessário encontrar novas técnicas e processos construtivos. Por outro lado, acompanhando o grande volume de obra, os prazos para a sua execução diminuíram. Torna-se indispensável que os técnicos envolvidos nestes processos possuam conhecimentos científicos, de natureza física e económica, que lhes permitam conceber estruturas que satisfaçam as exigências dos utentes, desempenhando com eficácia as funções para as quais são projectadas.

O papel do engenheiro estruturalista é fundamental, porque a estrutura é um dos elementos preponderantes na garantia da qualidade, funcionalidade e desempenho durante o período de vida útil do edifício. Este comportamento é condicionado pela solução estrutural adoptada e reflecte-se no aparecimento de danos, quando essa solução não é a mais adequada. Neste caso, torna-se indispensável a sua reabilitação, de forma a estabelecer quer a qualidade de construção quer os níveis de segurança necessários [06].

Quando se fala na recuperação do património edificado não podemos deixar de falar dos programas de reabilitação que foram feitos em diversas zonas do país: cite-se exemplos de recuperação de centros históricos como, a zona da Ribeira / Barredo, no Porto, de Alfama e Mouraria, em Lisboa, em Braga, em Évora, em Guimarães, a reconstrução de Angra do Heroísmo após o sismo de 1980 e a reconstrução do parque habitacional das Ilhas do Faial, Pico e S. Jorge, na sequência do sismo de 1998, como os casos mais conhecidos.

Apesar disto, continua a faltar documentação técnica, organizada de forma sistemática, que permita a intervenção posterior de investigadores, estudiosos ou técnicos em geral.

O percursor, a nível do ensino e da investigação, de encontros científicos nacionais sobre este tema foi o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que em 1985 realizou o Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios de Habitação. A partir desta data foi notório o interesse que as Escolas de Engenharia Civil do nosso país depositaram nesta área, começando a surgir acções de formação, encontros, seminários, congressos que trouxeram e despertaram o interesse do público comum e, particularmente, da classe política. Hoje em dia não se fala de política para o território sem falar na recuperação dos centros históricos das nossas cidades e vilas, não se fala de indústria de construção e da sua economia, sem falar na parcela de importância, que a área da conservação e reabilitação vem conquistando. Chega-se

ao ponto de constituir "cavalo de batalha" nas campanhas eleitorais, uma vez que, actualmente, um centro populacional que se preze tem de ter o seu centro histórico conservado e recuperado.

A reabilitação de obras de Engenharia Civil, em particular da sua componente estrutural, exige uma nova abordagem, por parte dos diferentes intervenientes (Dono de Obra, Promotores, Projectistas, Construtores, Técnicos de Controlo de Qualidade, Entidades Licenciadoras, Seguradoras) do processo construtivo, e uma imprescindível compreensão dos procedimentos a desenvolver.

Surge assim o propósito desta tese, que tem por objectivo principal a Análise de Técnicas de Inspecção e Diagnóstico em Estruturas. Pretende-se através da descrição dos procedimentos e análise de resultados dos variados ensaios, destrutivos, semi destrutivos e não destrutivos, utilizados na inspecção e avaliação de estruturas (de betão armado, de madeira, de aço, e de alvenaria), fornecer aos técnicos, um guia de como pode ser abordada a problemática da reabilitação de edifícios.

O interesse e a aplicação de técnicas de ensaio para analisar o estado de uma estrutura, remonta a tempos antigos (cite-se, por exemplo, as técnicas de inspecção acústica). Nos últimos anos, assistiu-se a um grande incremento destas técnicas. Tal deveu-se, entre outras causas, ao aperfeiçoamento tecnológico na aquisição e análise dos dados obtidos, às vantagens económicas na avaliação das estruturas (apresentando estas custos menores), à capacidade de se avaliar rapidamente a segurança estrutural, através da obtenção de parâmetros que possibilitem a definição completa e rigorosa das propriedades dos materiais.

Refira-se que estas técnicas aplicam-se não só a estruturas existentes, mas também durante a construção de edifícios, por forma a garantir que as suas diversas fases se processem em segurança. Pretende-se, deste modo, afiançar a qualidade da construção e assegurar que esta se execute segundo as especificações que constam do projecto.

O objectivo final da aplicação destes métodos é fornecer aos técnicos intervenientes, ferramentas que lhes permitam identificar e caracterizar uma estrutura, para que, através de critérios próprios de decisão, possam aferir sobre o nível de segurança da estrutura em causa. Isto é, a análise de técnicas de ensaio não é mais do que um meio eficaz de prevenção de riscos, humanos e materiais, que permite uma gestão eficiente dos riscos tecnológicos, na indústria da construção.

Surge, assim, a necessidade de promover e desenvolver documentação técnica especializada, na área do ensino e formação.

Esta tese tem por finalidade suprir esta carência, nomeadamente ao fazer o estado da arte desta área de conhecimento. Pretende-se com este trabalho dar a conhecer as características específicas, quer dos materiais quer dos elementos constituintes do património edificado, as tecnologias e procedimentos de intervenção, a partir não só das técnicas tradicionais mas também das técnicas mais recentes e inovadoras, referindo as normas e os procedimentos existentes.

1.3 O papel dos ensaios na Engenharia Civil

Há um grande número de actividades na Engenharia Civil, em que os ensaios desempenham um papel preponderante. Essas actividades abrangem áreas muito diferentes, que vão desde o Ensino à Normalização, passando pela Investigação, Qualidade da Construção, Inspecção, etc.

Os técnicos que actuam nesta área desempenham um papel muito importante, em que a sua qualificação é essencial, não só para aplicarem as técnicas de ensaio adequadas, mas também para interpretarem e compreenderem os problemas que afectam as estruturas ou os seus materiais constituintes, e os princípios de funcionamento dos equipamentos de teste utilizados. Este é o significado do termo "Engenharia".

A área dos Ensaios é relativamente nova, quando comparada com outras áreas da Engenharia Civil. Além disso, as técnicas de ensaio são numerosas. Assim, é necessário definir com rigor o objectivo dos ensaios, distinguindo o que constitui o objecto de teste, os seus problemas e métodos.

Este papel cabe ao investigador, mas convém referir que a delimitação dos objectivos depende de cada situação particular.

Ensaios	**Qualificação:** - Instrução; - Treino. **Regulamentação** **Normas** **Directivas** **Recomendações** **Análise de problemas** Por forma a desenvolver e modificar métodos de ensaio e equipamentos. **Avaliação *in situ*** **Certificação de Qualidade** Durante a construção **Pedidos de:** - Inspecção global; - Inspecção específica; - Avaliação de defeitos; - Avaliação de danos. **Transferência de Tecnologia** - Trocas de experiência; - Simpósios; - Secções de trabalho. **Estabelecimento de Bases de Dados:** - De equipamentos - De distribuidores - De métodos de ensaio - De aplicações; - De referências.

De seguida, apresentam-se alguns Quadros resumo que pretendem, de modo abreviado, relacionar a frequência com que são aplicados os ensaios e os sistemas estruturais, a área dentro da Engenharia Civil, em que se aplicam e as propriedades que se pretendem determinar.

No Quadro 1.6 identificam-se os métodos de ensaio em função da sua utilização.

Quadro 1.3 - Tipo de sistema estrutural e a frequência com que se utilizam os Ensaios [07]

Muito aplicado	Aplicado com frequência	Pouco / Não aplicado
Edifícios Históricos	Estacas de Fundação	Pedras Naturais
Alvenarias	Estruturas de Madeira	Solo
Estruturas de Betão Armado	Elementos Pré-fabricados	Estradas
Pavimentos	Estruturas Metálicas	
Soldas em Estruturas Metálicas		

Quadro 1.4 - Utilização dos ensaios na Engenharia Civil [07]

Muito aplicado	Aplicado com frequência	Pouco / Não aplicado
Controlo de Qualidade	Inspecção de Edifícios	Cooperação Internacional
	Regulamentação	Educação
		Políticas de Investigação

Quadro 1.5 - Objectivo para a realização de ensaios [07]

Muito aplicado	Aplicado com frequência	Pouco / Não aplicado
Resistência	Espessura de recobrimento	
Fendas e fissuras	Durabilidade	Densidade
Espessura	Delaminação	Objectos escondidos
Estado interior do elemento	Defeitos	Condutividade térmica
Humidade	Integridade	Idade
Corrosão	Heterogeneidade	

Quadro 1.6 - Métodos de ensaio mais utilizados na Engenharia Civil [07]

Muito aplicado	Aplicado com frequência	Pouco / Não aplicado
Ultra-sons	Métodos Dinâmicos	
Emissão Acústica	Aplicações Laser	
Métodos Electromagnéticos	Extracção de Carotes (para utilização em laboratório)	Métodos Nucleares
Impacto - Eco	Radiografia	Métodos Ópticos
Radar	Ensaios de Carga	
Termografia por Raios Infravermelhos	Endoscopia	

1.4 Organização da tese

Este trabalho de dissertação, para além desta introdução, encontra-se dividido em oito capítulos principais.

O Capítulo 2, apresenta uma abordagem sobre os principais aspectos relacionados com a Patologia das Construções, nomeadamente com a inspecção e avaliação de edifícios. Definem-se os principais conceitos, os vários tipos de danos, diferenciando-os e comparando-os entre si. Referem-se as causas do processo patológico e, por fim, sintetizam-se os aspectos principais do estudo patológico e da inspecção. Assume-se a importância da observação visual preliminar e da inspecção detalhada a par da análise do processo patológico e posterior diagnóstico final.

No Capítulo 3 descrevem-se as principais técnicas de ensaio em estruturas. O objectivo central é analisar, dentro do universo dos métodos de ensaio existentes, aqueles que são mais utilizados, os que constituem uma referência na bibliografia consultada, os que permitem a obtenção de resultados mais credíveis, sempre com o cuidado de desenvolver aqueles que são mais utilizados em Portugal. Assim, dentro de cada técnica de ensaio, apresenta-se: o fundamento do método, recorrendo-se sempre que necessário aos conceitos teóricos em que se baseiam, o seu modo de

execução, referindo os procedimentos de teste mais importantes, os equipamentos necessários à sua realização e a forma como são obtidos os resultados e os cuidados principais a ter na sua interpretação. Sempre que existirem normas que regulem os procedimentos do ensaio elas serão mencionadas, realçam-se os aspectos fundamentais, nomeadamente os que condicionam a sua realização. No final de cada apresentação serão referidas as principais vantagens e limitações do método.

Nos Capítulos 4, 5, 6 e 7 descrevem-se as Técnicas de Ensaio em Edifícios de Betão Armado, em Edifícios de Alvenaria, em Edifícios de Madeira e em Edifícios em Estrutura Metálica, respectivamente. Pretende-se estudar e discutir a problemática segundo os métodos construtivos mais utilizados em Portugal (ver Figura 1.2). Para cada método construtivo, após uma introdução, em que se pretende fazer uma primeira abordagem do tema, destaca-se o papel de cada material de construção na estrutura de um edifício, apresentando as suas principais vantagens e limitações. De seguida, apresentam-se as principais causas de deterioração e de danos, enumerando, com a ajuda de Figuras, Quadros e Tabelas, as mais importantes. Destacam-se, depois, os métodos de inspecção e avaliação mais adequados a cada tipo de estrutura, salientando os aspectos específicos de cada método construtivo. Por fim, enumeram-se as principais técnicas de ensaio utilizadas em cada tipo de estrutura, descrevendo-se os procedimentos mais adequados e listando as normas e especificações existentes.

Note-se que algumas das técnicas apresentadas são utilizadas em vários tipos de estrutura, pelo que a sua descrição surge naquele em que a técnica está mais desenvolvida e onde os resultados foram mais testados e comparados. No entanto, para cada método, há especificidades que se encontram descritas sempre que se justificar.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões mais relevantes obtidas pela presente dissertação, propondo-se ideias para futuros desenvolvimentos relacionados com os temas abordados.

2. Patologia da Construção

2.1 Introdução

Sem dúvida que os conceitos relacionados com a reabilitação estão na moda. Quando tal acontece, e não só na construção civil, todos querem participar e dar a sua opinião, muitas vezes sem possuir os conhecimentos necessários para o fazer. Constata-se que os profissionais que foram "chamados" para este sector da construção, quer participando na fase de projecto e concepção, quer na fase de construção, não possuem, muitas vezes, os conhecimentos necessários nem tiveram tempo para estudar e compreender os fenómenos com ele relacionados.

A patologia de edifícios é aceite como um ramo da ciência da construção que, com o passar do tempo vai adquirindo uma importância crescente (ver Capítulo 1). Para tal, contribui o envelhecimento do parque habitacional, bem como edifícios de construção recente que apresentam anomalias precoces, fruto do desfasamento entre os materiais utilizados e a velocidade de execução das obras.

No entanto, a compreensão do funcionamento de um edifício, em fase de utilização, é complexa, devido [08]:

- à diferença e diversidade de sistemas estruturais;
- à multiplicidade de elementos, componentes e materiais que constituem o edifício;
- às diversas solicitações definidas: pelo seu modo de actuação, pelo tempo de actuação, etc.;
- às diferentes formas de utilização do edifício;
- à grande diversidade de actuação dos utentes do edifício;
- à necessidade de respostas para uma grande diversidade de fontes de degradação;
- ao facto de um dano ser uma consequência de um processo patológico um produto de um faseamento e não de uma única acção.

Chama-se a atenção para uma característica peculiar que é a semelhança de termos e conceitos entre a reabilitação de edifícios e a medicina.

Com base na observação de cerca de 600 casos, em edifícios de habitação, foi publicado um estudo [08], resumido na Figura 2.1, em que se pretende apresentar a evolução relativa de incidência das manifestações patológicas (danos) entre 1995 e 2002.

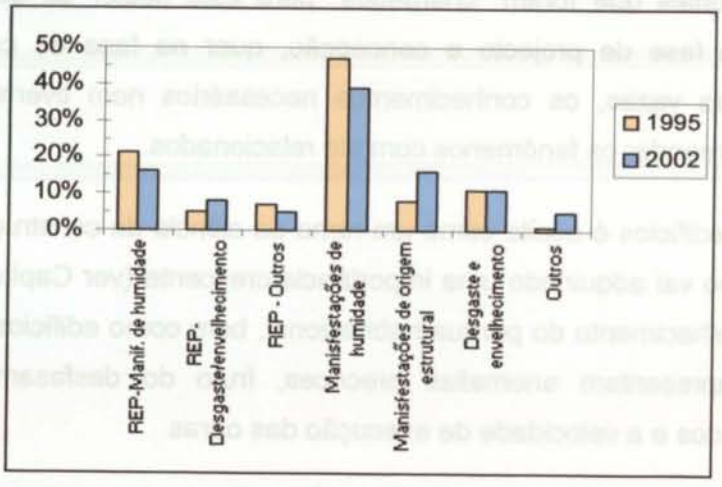


Figura 2.1 - Evolução relativa de incidência das manifestações patológicas entre 1995 e 2002 [08]

Saliente-se que em 1995 só foram estudados 382 casos e que o termo REP significa repatologia, isto é, são casos em que os danos são recorrentes, ou seja, o resultado das intervenções de reparação foi nulo, devido à inexistência ou inadequação do diagnóstico. Estas acções de reintervenção dizem respeito a cerca de 30 % dos casos observados. Dentro dos danos relativos ao desgaste e envelhecimento estão incluídos a acção de agentes atmosféricos, de agentes químicos, o uso excessivo e inadequado da estrutura, o termo de vida útil da mesma e causas acidentais.

É, assim, premente esclarecer os conceitos e estabelecer uma metodologia adequada ao estudo particular de cada caso.

A patologia das construções pode ser analisada segundo dois conceitos principais: por uma *via empírica ou qualitativa*, baseada na experiência, e onde o técnico desempenha um papel fundamental, ou por uma *via científica ou quantitativa*, onde se inclui a recolha de toda a informação disponível, com vista ao conhecimento do processo patológico e elaboração do relatório de diagnóstico. Estão incluídas a

recolha de informação necessária, através da observação visual, da execução de ensaios *in situ* e em laboratório, e da modelação matemática e física do problema.

2.2 Definições

A importância em definir um determinado termo, traduz-se pela necessidade de sintetizar um conceito.

De seguida estabelecem-se definições para alguns dos conceitos mais conhecidos e empregues na área da patologia e reabilitação de edifícios.

Patologia Construtiva

A palavra patologia surge da conjugação das palavras gregas "*pathos*", que significa doença, e "*logos*", que significa *estudo* ou *tratado*. Este termo surge associado à medicina como a ciência que estuda as doenças.
Relativamente à área da construção civil, pode-se definir patologia como *a "ciência que estuda os problemas construtivos que surgem nos edifícios (ou em algum dos seus elementos), depois da sua execução*".
Há alguma "confusão" entre os técnicos, no uso do termo "patologia", nomeadamente na associação da palavra a um determinado dano.
A palavra "patologia", substantivo, deve ser referida apenas à ciência que estuda um determinado problema, a sua progressão e possíveis soluções.
Por outro lado, o termo "patológico/a", adjectivo, deve ser empregue para qualificar os processos e os estudos relacionados ao assunto.

Processo Patológico e Diagnóstico

Refere-se ao conhecimento de um determinado problema construtivo desde a sua origem, englobando a determinação da sua causa e da sua evolução, sintomas e estado actual da estrutura.
Este conceito está associado ao factor tempo, isto é, este processo deve ser elaborado em partes distintas: a sua origem, a sua evolução e o seu estado actual. Na prática, a sequência é em sentido contrário, isto é, começa-se por observar o resultado do dano, ou por outras palavras o sintoma; depois faz-se uma avaliação à sua evolução, recorrendo à monitorização da estrutura; no final, determina-se a origem do mesmo, conhecendo a sua causa.
A palavra diagnóstico deriva do grego "*diagnostikós*", que significa *capaz de discernir*. É o conjunto de procedimentos interdependentes e

organizados com o objectivo de compreender e explicar um determinado processo patológico através da observação e ensaios de manifestações [08].

Deve incluir, também, a avaliação do estado de conservação da estrutura e do seu nível de segurança.

A fase de diagnóstico deve anteceder as fases de projecto e de construção, uma vez que só depois de se conhecer, com rigor, o processo patológico é que se pode definir quais as tecnologias e os materiais que melhor se adaptam às características físicas, mecânicas e químicas do elemento a reabilitar.

Como se destacará nos capítulos de desenvolvimento, é fundamental que o técnico responsável pelo estudo do processo patológico e pelo diagnóstico, possua conhecimentos "transversais" na área da Engenharia Civil. Por outras palavras, possua conhecimentos sobre áreas tão diversas como as estruturas, os processos construtivos e a sua execução em obra. No entanto, quando se pretende um aprofundamento sobre algum dos temas é necessário um técnico especialista nessa área. Para tal, o técnico responsável, mediante o tipo de processo patológico, deve recorrer a técnicos ou a equipas técnicas aptas a encontrar as soluções certas para o(s) problema(s) que tem em mãos. Não basta saber manejar os equipamentos à disposição e recolher os dados obtidos. Mais do que noutras áreas, é necessário saber "ler" o edifício, interpretar toda a informação recolhida e produzir conclusões que levem à resolução eficaz dos danos e lesões encontrados.

Dano

Dano é a manifestação, observada visualmente, de um determinado problema construtivo, que altera e/ou afecta o comportamento estrutural de um edifício.

É fundamental a sua determinação, uma vez que um erro nesta fase pode conduzir a um estudo errado do problema e, por consequência, a uma conclusão deficiente. Muitas vezes os danos não aparecem isolados e podem ser confundidos entre si, pelo que é importante fazer a cronologia dos mesmos, isto é, saber qual o que surgiu em primeiro lugar e qual a sua sequência, da qual depende o processo patológico.

Pode-se distinguir dois tipos de dano: o primário e o secundário. O dano primário é aquele que surge em primeiro lugar, enquanto que o secundário surge na sequência de uma lesão anterior.

Degradação

Alteração e afectação das características dos materiais, produzidas por acções físicas, químicas e biológicas.

Causa ou acção

Por definição, causa é o agente, activo ou passivo, que actua como origem de um processo patológico e que origina uma ou várias lesões.
O objectivo de cada estudo é conhecer a causa de um determinado problema (dano). Assim, este só fica resolvido quando se conhecer a sua origem. Esta é a chave de todo o processo de diagnóstico.
A sua origem pode ser de diversos tipos: causa directa ou indirecta. A directa implica a origem imediata do processo patológico, enquanto que a indirecta refere-se a erros ou defeitos relativos à fase de concepção, projecto e execução, e que necessita da conjugação de uma causa directa para se iniciar o processo patológico.

Reparação, restauro, reabilitação e reforço

As acções de reparação, restauro, reabilitação e esforço surgem após ser conhecido, com exactidão, o diagnóstico de um determinado processo patológico. O objectivo global de cada uma destas acções é devolver à estrutura a sua funcionalidade inicial.
Define-se reparação como o conjunto de acções, destinadas a recuperar o estado original de uma determinada estrutura. Dependendo do tempo em que foi detectado um determinado dano, e em que foi activado o processo patológico, a acção de reparação pode ser circunscrita a um determinado local ou, por outro lado, pode implicar a demolição, total ou parcial, da construção em causa.
O restauro refere-se à reparação de um elemento específico da estrutura e surge, muitas vezes, associado a reparações de obras de arte. É um processo pelo qual se recupera a forma de uma construção, de acordo com a sua imagem inicial, quer pela remoção de material estranho ao material primitivo quer pela substituição de trabalhos posteriores em falta.

A reabilitação refere-se à recuperação da funcionalidade de um edifício no seu todo e envolve a actuação faseada de uma equipa projectista, nomeadamente no desenvolvimento de:

- um projecto de arquitectura;
- um estudo patológico, com diagnósticos parciais;
- uma acção de reparação dos diversos elementos estruturais danificados;
- uma acção de restauro, dos distintos elementos e objectos, de per si.

O reforço engloba todas as intervenções necessárias ao aumento da capacidade de carga de uma construção, para os níveis de segurança desejados.

Prevenção

O conhecimento, cada vez maior, dos processos patológicos e das suas causas, permite estabelecer uma série de medidas preventivas, com o objectivo de evitar o aparecimento de novas lesões. Surge um novo conceito que se designa como patologia preventiva. Assim, o seu objectivo é impedir e, se possível, eliminar as causas que desencadeiam um processo patológico. A sua actuação é, sobretudo, eficaz para impedir a aparição das causas indirectas, referentes às fases de projecto e execução, assim como para programar acções de manutenção de estruturas.
Refira-se a semelhança entre a patologia preventiva e a medicina preventiva.

Conclusão prévia

A conclusão prévia é o conjunto de acções que levam à resolução completa e eficaz de um determinado processo patológico. Tem duas fases distintas, atrás definidas. A primeira compreende a fase de análise e de estudos prévios, que conduz à elaboração de um plano de intervenção. A segunda fase diz respeito à realização das medidas que constam desse plano e que permitirão a reparação, o restauro e a reabilitação do edifício em causa.

2.3 Tipologia

Pretende-se, neste ponto, estabelecer um resumo dos danos que podem ocorrer num edifício, assim como determinar as causas que as originam.

2.3.1 Danos

Existe uma grande variedade de danos que podem surgir num edifício. Os sistemas construtivos, bem como os materiais empregues na sua construção, são muito diferentes, apresentando características e propriedades distintas. Por isso, é essencial simplificar os termos e a tipologia empregue, agrupando os danos em famílias e em tipos, de acordo, por exemplo, com o Quadro 2.1.

Os danos estruturais ocorrem quando as tensões produzidas por uma, ou várias, acções excedem a resistência dos materiais em zonas significativas, devido ao facto de que as próprias acções aumentam as ditas tensões ou porque a resistência foi reduzida.

A forma como os danos surgem está relacionada com o tipo de acções actuantes e com os materiais de construção empregues. Por exemplo, os materiais frágeis podem entrar em colapso ao sofrer pequenas deformações enquanto que materiais dúcteis podem suportar grandes deformações antes de atingir o colapso.

Os danos podem também ocorrer em elementos não estruturais, como por exemplo nos revestimentos das paredes exteriores e interiores dos edifícios, em resultado de tensões ocorridas nesses elementos devido a deformações da própria estrutura.

Pode-se dividir os danos em quatro grandes grupos, em função do seu carácter patológico, a saber: danos físicos, danos mecânicos, danos químicos e danos biológicos. As degradações têm origem em acções físicas, químicas e biológicas, e a redução de capacidade resistente está relacionada, sobretudo com as acções mecânicas.

Quadro 2.1 - Descrição geral dos danos [09]

Danos	Tipo de dano	Primária	Secundária
Físicos	**Humidade:**		
	- De obra	S	
	- Capilar	S	
	- Por infiltração	S	
	- Por condensação	S	S
	- Acidental		S
	Erosão:		
	- Atmosférica	S	S
	Sujidade	S	
Mecânicos	**Deformações:**		
	- Encurvadura	S	S
	- Abaluamento	S	S
	- Deslocamento	S	S
	- Flechas	S	
	Fendas:		
	- Por carga	S	S
	- Por dilatação-contracção	S	S
	Fissuras:		
	- Por suporte	S	S
	- Por acabamento	S	S
	Desprendimentos	S	S
	Erosão:		
	- Mecânica	S	S
Biológicos	**Organismos:**		
	- Animais	S	
	- Vegetais		S
Químicos	**Eflorescências**	S	S
	Oxidação e Corrosão:		
	- Oxidação	S	
	- Corrosão:		
	- Por imersão		S
	- Por aereação diferencial	S	S
	- Por par galvânico	S	
	- Intergranular	S	
	Erosão:		
	- Química		S

2.3.1.1 Danos físicos

Neste grupo incluem-se os danos cujo processo patológico está baseado em factores físicos, tais como, o gelo, as condensações, etc.

Em geral, a origem deste processo, bem como a sua evolução, depende de processos físicos. No entanto, os elementos estruturais a eles sujeitos podem sofrer alterações de forma, de cor ou de teor de humidade.

2.3.1.1.1 Humidade

Entende-se por humidade a ocorrência descontrolada de uma percentagem de água superior ao desejado, num material ou elemento construtivo [09].

De entre os vários tipos de humidade cite-se:

- Humidade de obra: quando a sua origem está relacionada com a execução de um determinado edifício, em que não se deixou secar convenientemente a estrutura, aplicando-se o acabamento final, que actua como uma barreira, dificultando a sua evaporação;

- Humidade capilar: quando a água proveniente do solo, ascende através dos elementos verticais, tais como paredes de alvenaria;

- Humidade por infiltração: é aquela que penetra através da fachada do edifício, pelos seus poros ou pelas aberturas existentes (por exemplo, fendas e fissuras);

- Humidade por condensação: surge nas fachadas, em consequência da condensação do vapor de água que se forma à superfície ou no interior da mesma;

- Humidade acidental: é toda a humidade que surge de forma fortuita, como por exemplo, quando há uma rotura numa canalização de água.

2.3.1.1.2 Erosão

O dano provocado por erosão corresponde à perda ou transformação superficial de um material.

A erosão atmosférica é provocada pela acção física dos agentes atmosféricos. Como exemplo, refira-se a meteorização dos elementos estruturais como a pedra, provocada pela sucção de água da chuva e a sua posterior congelação no interior da pedra que ao dilatar vai destruindo as lâminas superficiais do material.

2.3.1.1.3 Sujidade

Entende-se por sujidade o depósito de partículas em suspensão na atmosfera sobre a superfície, ou a sua penetração nos poros superficiais, de um elemento estrutural.

Como resultado mais comum, refira-se o enegrecimento das fachadas. Neste tipo de dano não há nenhuma reacção química entre as ditas partículas e os materiais constituintes da estrutura.

2.3.1.2 Danos mecânicos

Neste grupo situam-se todas as situações patológicas em que predomina o factor mecânico, tanto nas suas causas, como na sua evolução, como nos sintomas apresentados. Caracterizam-se pela existência de movimentos que produzem aberturas, ou separações entre os materiais constituintes ou entre os diversos elementos estruturais, ou ainda pela presença de algum tipo de desgaste.

2.3.1.2.1 Deformações

A deformação refere-se a toda a alteração de forma, sofrida pelos elementos estruturais, como consequência de alguma acção mecânica, tanto em fase de execução como quando entra em serviço. Pode-se dividir as deformações em três sub-grupos:

- encurvadura: como consequência de esforços de compressão sobre um elemento estrutural vertical, superior à sua capacidade resistente;

- abaluamento: como consequência da rotação de um elemento estrutural devido a esforços, em geral, horizontais;

- deslocamentos: como consequência de esforços horizontais, com o deslocamento do topo dos elementos verticais;

Em consequência das deformações podem surgir outro tipo de danos, como fissuras, fendas ou desprendimentos, característicos de paredes de alvenaria.

2.3.1.2.2 Fendas

Define-se uma fenda como sendo uma abertura longitudinal incontrolada de um elemento construtivo, que o abrange em toda a sua espessura.

Convém diferenciar fendas de fissuras: enquanto que as primeiras afectam toda a espessura do elemento construtivo, as fissuras só atingem a sua camada superficial.

Pode-se distinguir dois tipos de fendas:

- por excesso de carga: que afectam, sobretudo, os elementos estruturais e que exigem o seu reforço imediato, por risco elevado de não se garantir a sua segurança estrutural.

- por dilatação e contracção: com origem higrotérmica, afectam sobretudo elementos de fachada, ainda que, em casos extremos, possa afectar os elementos estruturais, nomeadamente por ausência de juntas de dilatação.

2.3.1.2.3 Fissuras

Como foi referido no ponto anterior, as fissuras só afectam a zona superficial do elemento construtivo.

Por vezes, associam-se as fissuras à fase inicial de uma fenda. No entanto, na maioria das situações, a sua origem e evolução é distinta, ainda que a sintomatologia seja idêntica. De entre as principais causas que lhes dão origem, as mais comuns são:

- Fundação: quando o solo de fundação sofre uma deformação que não é absorvida pela estrutura, nomeadamente o seu revestimento. Ocorre, também, quando há descontinuidade nos apoios, devido a diferentes soluções estruturais e materiais, a juntas de construção e à falta de aderência.

- Acabamento superficial: devido à diferença entre os revestimentos, por retracção hidráulica ou por movimentos de dilatação.

2.3.1.2.4 Desprendimentos

Para ocorrer um desprendimento tem de existir uma separação entre os materiais que compõem a estrutura.

A sua ocorrência está relacionada com a existência de danos iniciais, tais como, humidade, deformações ou fendas. Surgem, sobretudo, em revestimentos e afectam as zonas superficiais da estrutura.

2.3.1.2.5 Erosão

As erosões de origem mecânica resultam da acção mecânica sobre os elementos construtivos.

Nele estão incluídos, o desgaste dos pavimentos e de elementos de fachada (neste caso quando expostas ao efeito da acção do vento, por exemplo).

2.3.1.3 Danos químicos

Este tipo de danos resulta da presença de sais, ácidos e bases, que entram em reacção com os elementos construtivos, dando origem a lesões que provocam a decomposição do material. Por consequência fica afectada a integridade dos referidos elementos bem como a sua durabilidade. De entre os danos, com origem em processos químicos, refira-se a ocorrência de eflorescências, a oxidação e a corrosão.

2.3.1.3.1 Eflorescências

Referem-se à cristalização dos sais solúveis, na superfície de um determinado elemento construtivo. Esses sais são arrastados até ao exterior, dissolvidos em água. Aí chegados, ocorre a sua evaporação, o que permite a cristalização dos sais.

As criptoflorescências são um caso particular de eflorescências. A cristalização ocorre nos vazios, próximos da superfície e provoca o desprendimento da lâmina exterior, originando a erosão dos elementos de construção afectados.

Em qualquer dos casos aqui apresentados, é fundamental a presença de humidade para que este tipo de dano ocorra.

2.3.1.3.2 Oxidação e corrosão

Quer a oxidação quer a corrosão ocorre quando se dá a transformação molecular, e consequente perda de material, na superfície dos elementos metálicos, como o ferro e o aço.

A maior diferença entre a oxidação e a corrosão tem a ver com os processos patológicos, que são quimicamente diferentes:

- Oxidação: consiste na transformação em óxido da superfície dos metais, em contacto com o oxigénio.

- Corrosão: consiste na perda progressiva de partículas superficiais do elemento metálico, como consequência da ocorrência de uma pilha electroquímica, na presença de um electrólito, em que o metal actua como ânodo perdendo electrões em favor do polo positivo (cátodo), electrões esses que provocam a dissolução das moléculas, isto é, a materialização da perda de material.

No Capítulo 7, referente às estruturas metálicas, serão descritos os vários tipos de corrosão.

2.3.1.3.3 Erosão

Envolve todo o tipo de alteração molecular na superfície dos elementos construtivos (sobretudo em pedras), em consequência das reacções químicas dos seus componentes com outras substâncias, tais como os contaminantes atmosféricos, água de capilaridade ou de filtração, produtos aplicados pelo homem, etc.

2.3.1.4 Danos Biológicos

Os danos aqui descritos, envolvem a presença de organismos vivos, de origem animal ou vegetal, que afectam a superfície dos materiais, quer pela simples presença, quer pelo ataque aos mesmos, quer pelos produtos químicos que produzem.

O processo patológico é fundamentalmente químico, ainda que alguns danos se possam associar a processos mecânicos ou físicos.

- Animais: os mais comuns envolvem os insectos xilófagos que "atacam" as estruturas de madeira, podendo provocar o seu colapso. Uma das características mais importantes é, que além de viverem dentro do

próprio material, alimentam-se dele, provocando lesões significativas no elemento estrutural.

- Vegetais: Os microscópicos produzem ataques químicos directos, sendo os mais importantes os bolores e os fungos. Os bolores, característicos em materiais porosos, húmidos e pouco ventilados, provocam a alteração na cor e aspecto do material e originam desprendimentos. Ocorrem sobretudo em elementos de madeira e em alvenarias de pedra. Os fungos atacam a madeira e a consequência mais importante é a podridão que pode levar à destruição dos elementos lenhosos (ver Capítulo 6).

Surgem também danos em estruturas, devido à acção das raízes de árvores, sobretudo quando existem fissuras (por exemplo, em materiais pétreos).

2.3.1.5 Dados estatísticos

Analisando alguns dados estatísticos disponíveis [09], constata-se que os desprendimentos e a sujidade são os danos mais comuns em fachadas, seguidos das fendas e das fissuras.

No Quadro 2.2, apresentam-se os resultados de um inquérito realizado em Madrid, durante os anos de 1988 e 1990 a mais de cinco mil edifícios, referente a lesões em fachadas [09].

Quadro 2.2 - Danos em fachadas de edifícios [09]

Danos	Valor percentual (%)
Desprendimentos	23,00
Sujidade	22,00
Fendas e Fissuras	15,00
Humidade	13,00
Erosão	9,00
Corrosão	8,00
Eflorescências	5,00
Organismos	5,00

Este quadro é significativo, porque os danos ocorridos nas fachadas são muitas vezes origem de posteriores danos estruturais.

2.3.2 Causas ou acções

Podemos dividir a(s) causa(s) de um processo patológico em dois grandes grupos: as causas directas e as causas indirectas.

Têm natureza diversa e provocam efeitos muito diferentes na estrutura e nos seus materiais constituintes.

Normalmente, uma estrutura é afectada por várias acções, que devem ser perfeitamente identificadas, uma vez que são as causadoras de qualquer processo patológico.

As acções/causas de origem mecânica afectam directamente a estrutura, enquanto que as acções/causas físicas, químicas e biológicas afectam os seus materiais constituintes.

No Quadro 2.3 estão resumidas as principais causas de um processo patológico, de acordo com as suas características e o grupo onde se inserem.

2.3.2.1 Causas directas

Referem-se aquelas que produzem uma acção concreta sobre o elemento construtivo (acções mecânicas) ou sobre os materiais que o constituem (acções físicas, químicas ou biológicas).

Incluem-se as intervenções que se revelaram inadequadas ou inexistentes e que, por serem abrangentes, não se incluem directamente em nenhuma das divisões apresentadas.

Quadro 2.3 - Origem de um processo patológico [09]

Acções	Tipo de causa
Directas	**Mecânica** - Esforço mecânico - Impulsos - Impactos - Desgaste
	Física - Agentes atmosféricos: chuva, vento, gelo, mudança de temperatura, contaminação.
	Química - Contaminação ambiental - Humidade - Conteúdo de sais solúveis
	Biológica - Organismos
	Lesões prévias - Humidade - Deformação - Fendas e fissuras - Desprendimentos - Corrosão - Organismos
Indirectas	**Projecto** - Escolha do material - Sistema construtivo - Cálculo automático
	Execução
	Material - Defeito de fabrico - Alteração
	Manutenção - uso incorrecto - Falta de manutenção periódica

2.3.2.1.1 Acções mecânicas

Actuam na estrutura, produzindo tensões e extensões nos materiais, que geralmente resultam em fendilhação, esmagamento e deformações. Normalmente, são acções não previstas ou superiores àquelas que a estrutura pode suportar.

De entre as acções mecânicas, as mais comuns são:

- as sobrecargas não previstas (por alteração de uso, por exemplo);
- acções dinâmicas;
- acções sobre elementos estruturais secundários que, por deficiência dos elementos principais (por exemplo, a deformação de pavimentos), são colocadas em serviço. No entanto, como não foram dimensionadas para essa função, podem surgir danos como deformações e fissuras;
- impactos mecânicos, sobretudo sobre os elementos situados no solo (desgaste), ou junto a ele, normalmente associadas a actos de vandalismo.

As acções mecânicas podem ser divididas em acções estáticas ou dinâmicas, sendo que as primeiras podem actuar directamente sobre as estruturas, designadas por acções directas (por exemplo, peso próprio e sobrecargas) ou através de deformações impostas, designadas por acções indirectas (como por exemplo os assentamentos do terreno).

A acção dinâmica mais significativa é a acção dos sismos, mas pode-se também citar a acção do vento, vibrações de máquinas, etc.

2.3.2.1.2 Acções físicas

São devidas a agentes atmosféricos que actuam, predominantemente sobre a envolvente exterior (fachadas e cobertura) dos edifícios. De entre elas destaca-se:

- a chuva: a principal causa de ocorrência de humidade, sobretudo em elementos construtivos porosos ou de grande capacidade capilar;
- o vento: que pode influenciar na incidência da água da chuva;
- o gelo: que, por alteração térmica, pode ser a origem de erosão e de desprendimentos;
- mudança de temperatura: que provoca dilatações e contracções, originando fissuras ou desprendimentos;
- contaminação atmosférica: sob a forma de partículas, que provocam a sujidade de fachadas.

O fogo pode ser considerado como uma variação extrema de temperatura.

2.3.2.1.3 Acções químicas e biológicas

Estão incluídos todo o tipo de produtos químicos e as suas reacções, quer as originadas pelo ambiente, quer pelos organismos vivos quer pelo seu uso.

As alterações químicas podem acontecer espontaneamente, devido às características do material, ou por acção de agentes externos, como a poluição.

2.3.2.1.4 Danos prévios

Muitas das causas imediatas de um determinado dano, provêm de outro dano prévio, de acordo com o Quadro 2.1. De entre os principais danos primários e suas consequências, refira-se [09]:

Humidade, origem de:

- eflorescências;
- erosão física e química;
- corrosão;
- desprendimentos.

Deformações, origem de:

- fendas;
- fissuras;
- desprendimentos.

Fendas e **fissuras**, origem de:

- humidade;
- erosão física;
- corrosão;
- desprendimentos.

Desprendimentos, origem de:

- humidade;
- erosão física;
- desprendimentos.

Corrosão, origem de:

- sujidade;

2.3.2.2 Causas indirectas

São factores inerentes à estrutura, consequência de uma selecção de material ou cálculo defeituoso, que ao associar-se a uma acção directa possibilita a ocorrência de um processo patológico.

A classificação que se apresenta, tem por base as diversas fases do processo construtivo, que poderão ser a origem dos processos patológicos já referidos.

É uma área ingrata, pois grande parte dos intervenientes na construção considera a fase de projecto e execução de um edifício como secundária, na realização de uma obra com qualidade.

2.3.2.2.1 Fase de projecto

Engloba os erros cometidos na fase de projecto. Vão desde a concepção estrutural até à escolha dos materiais, passando pelo cálculo automático e finalizando nas peças desenhadas. Assim, os erros mais representativos são:

- escolha errada de materiais;
- utilização de sistemas construtivos inadequados ao fim a que se destina a estrutura;
- quantificação errada das acções;
- falta de definição estrutural;
- cálculo estrutural mal executado;
- utilização de programas de cálculo inadequados;

- falta de pormenorização dos elementos estruturais;
- peças desenhadas incompletas e erradas.

2.3.2.2.2 Fase de execução

Engloba os factores inerentes à execução da estrutura. Umas vezes por incumprimento do projecto e das condições técnicas prescritas, outras por má execução em obra, como por exemplo, a colocação errada de armaduras, a vibração defeituosa de peças em betão armado, a má condição de cura, erros nas ligações das peças metálicas ou de madeira, etc.

2.3.2.2.3 Materiais

Refere-se a materiais defeituosos ou que não cumprem as especificações de projecto.

Um dos casos mais comuns é a utilização de betão, com resistência característica inferior ao prescrito no projecto de execução.

2.3.2.2.4 Manutenção

Neste caso os erros mais comuns são a utilização inadequada dos materiais e dos elementos de construção, bem como a sua falta de manutenção.

2.3.2.2.5 Dados estatísticos

A falta de cuidado, inerente às causas indirectas aqui descritas conduz a que, em conjugação com as causas directas, surjam processos patológicos que, para se resolverem, envolvem custos financeiros elevados.

Tal facto ainda coloca este ponto num patamar de resolução mais elevado, uma vez que diversos estudos indicam que actuando com rigor e com eficácia é possível diminuir a probabilidade de ocorrência de danos posteriores. Acresce que, os custos inerentes à sua resolução são incomparavelmente menores em fase de projecto do que em fase de obra ou após a estrutura estar concluída.

Por outro lado, e apenas em relação às causas indirectas, apresenta-se na Figura 2.2, as percentagens de causas geradoras dos citados processos patológicos.

Sublinhe-se a importância da prevenção, já as causas indirectas são mais fáceis de controlar e de impedir a sua efectivação.

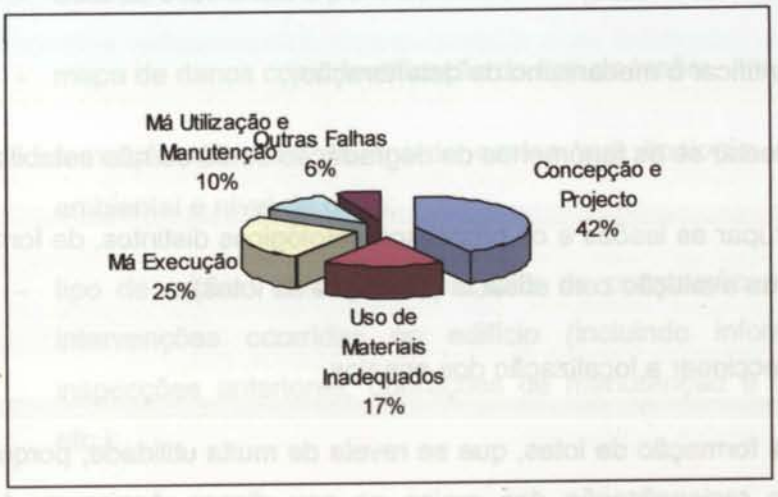


Figura 2.2 - Principais causas de encargos financeiros em obras de reabilitação de construção [14]

2.4 Estudo patológico. Inspecção

A análise e o estudo de um processo patológico deve permitir ao investigador a determinação, com rigor, das causas e dos danos subsequentes, de forma que possa avaliar e concluir sobre as técnicas de reparação mais eficazes. A denominação mais comum, para caracterizar este estudo, é a inspecção/avaliação de uma estrutura.

Como já foi referido, esta análise é feita de maneira inversa ao processo patológico. Em primeiro lugar detecta-se um dano, analisa-se a sua evolução e, por fim, determina-se a sua origem ou a sua causa. Para isso, a análise deve ser metódica e exaustiva, sendo necessário a adopção de alguns procedimentos principais, que envolvem:

- a observação do dano;
- a recolha de dados;
- a análise do processo patológico e o seu diagnóstico.

2.4.1 Observação do dano

Também designada por inspecção visual preliminar, é a base para o estudo de qualquer processo patológico. A sua finalidade principal deve ser:

- detectar o dano;

- identificar a lesão;
- identificar o mecanismo de deterioração;
- detectar se os fenómenos de degradação estão ou não estabilizados;
- agrupar as lesões e os processos patológicos distintos, de forma a analisar a sua evolução com eficácia (formação de lotes);
- seleccionar a localização dos ensaios.

Destaque-se a formação de lotes, que se revela de muita utilidade, porque permite ao investigador a racionalização dos meios ao seu dispor. Assim, na base da sua formação, deve ser tida em conta:

- a tipologia estrutural;
- o nível do dano;
- a agressividade ambiental.

É útil, nesta fase, a utilização de fichas ou guias de inspecção, por forma a facilitar a classificação dos danos detectados.

2.4.2 Recolha de dados

Após a primeira fase de observação, deve iniciar-se uma fase distinta, que deve incidir na recolha de todos os dados disponíveis à avaliação das lesões detectadas.

Serão realizadas visitas ao local, tantas quantas as necessárias para a completa observação dos danos. Por outro lado, caberá ao investigador/técnico a utilização de todos os aparelhos necessários à análise e evolução dos danos, tais como, a utilização de aparelhos de medida, de máquina fotográfica, de lupas e microscópios, etc. Se for preciso, pode-se recorrer a ensaios *in situ* e à recolha de amostras para posterior análise laboratorial. Outra medida fundamental é a recolha de todo o material bibliográfico e documental sobre o edifício.

De entre os aspectos mais importantes, refira-se:

a) A identificação do dano:

   - tipo de dano;

- data de ocorrência e periodicidade;
- mapa de danos com identificação do tipo de lesão;
- formação de lotes de acordo com a sua tipologia, agressividade ambiental e nível de dano;
- tipo de edifício, sua utilização, data de construção e historial das intervenções ocorridas no edifício (incluindo informação sobre inspecções anteriores, operações de manutenção e de reparação, etc.);
- fotografias;

b) Os aspectos construtivos:

- material ou materiais afectados;
- elemento estrutural danificado;
- sistemas e detalhes construtivos;
- cálculos e modelos estruturais preconizados;
- recolha de todas as peças desenhadas e escritas existentes sobre a construção;
- recolha de amostras para ensaio, se necessário.

c) A caracterização ambiental:

- localização da lesão no edifício;
- dados do clima;
- fenómenos ambientais: por exemplo, exposição solar, chuva, vento, humidade, nível de cloretos, etc.;
- orientação da fachada ou do elemento estrutural onde se localiza a lesão;
- nível de exposição do local em relação às vias de comunicação e à proximidade a outros edifícios.

Todos estes dados devem ser recolhidos numa ficha de recolha de dados, à qual se devem anexar fotografias que ajudem à sua compreensão, bem como as peças escritas e desenhadas do edifício em causa (se existirem).

Nesta fase de inspecção, a formação de lotes deve ser realizada de uma forma mais detalhada. Os elementos estruturais podem ser classificados de acordo com [10]:

- a tipologia estrutural: por exemplo, elementos sujeitos a esforços de compressão, tracção, flexão, pré-fabricados, etc.;
- a exposição ambiental;
- o nível de dano, a partir da realização da observação preliminar.

As zonas que se prevêem ser mais susceptíveis à ocorrência de danos, devem ser alvo de um estudo mais detalhado. De entre essas zonas pode-se citar [10]:

- as áreas submetidas a esforços mais intensos;
- as áreas mais susceptíveis à ocorrência de danos, de acordo com o sistema estrutural e construtivo preconizado;
- as áreas sujeitas a ambientes mais agressivos.

Uma vez na posse de todos os parâmetros acerca da estrutura, fruto da inspecção visual preliminar e da recolha de dados, é possível planificar uma inspecção mais detalhada. A sua realização só deve ocorrer se não for possível determinar, nas duas fases iniciais, a origem e o mecanismo de deterioração.

No final de uma inspecção detalhada devem ser disponibilizados todos os dados necessários à caracterização dos danos existentes, de forma a realizar um diagnóstico sobre o estado da estrutura, bem como prever o seu comportamento futuro.

Assim, em primeiro lugar, deve ser estabelecido um plano de ensaios, onde deve constar o local dos mesmos, o número de provas necessário, o método de teste mais adequado e a informação pretendida após a sua efectivação.

Sempre que possível, devem ser utilizados ensaios não destrutivos, uma vez que não envolvem qualquer alteração da estrutura. Em último recurso, recorre-se a ensaios laboratoriais ou ensaios destrutivos, que, normalmente, envolvem a extracção de carotes ou pequenas intervenções na estrutura.

Ao técnico/inspector cabe a responsabilidade, devido ao custo elevado de uma campanha de ensaios, desta planificação, tendo como base de sustentação para a sua escolha, os seguintes parâmetros [10]:

- tipo de ensaios a realizar;
- número de medições necessário para obter um valor representativo;
- limitação dos métodos de ensaio disponíveis;
- localização dos ensaios;
- necessidade de contar com meios auxiliares de apoio.

Os ensaios devem ser orientados para a quantificação dos parâmetros que sejam relevantes para o tipo de estrutura alvo de inspecção, como por exemplo:

Parâmetros:

- determinação da resistência e deformabilidade mecânica;
- localização de fissuras ou fendas;
- localização de vazios ou descontinuidades internas;
- determinação da resistência superficial;
- determinação do teor de humidade do elemento;
- porosidade;
- determinação da tensão e deformação instalada na estrutura;
- verificação da ocorrência de corrosão;
- etc.

Medidas geométricas:

- geometria e dimensões dos elementos estruturais;
- perdas de secção;
- localização de armaduras e reforços metálicos;
- determinação da espessura de revestimento;

- etc.

Pode ser necessário realizar a observação estrutural, por um determinado período de tempo, não só para a aquisição de informação útil, quando ocorrem fenómenos evolutivos de danos, mas também durante a realização faseada de uma reabilitação estrutural. Durante esta última, o comportamento estrutural, em cada fase, é monitorizado, de forma a que os dados obtidos possam servir de base a uma futura acção de reabilitação.

Qualquer sistema de monitorização serve para recolher e gravar alterações na estrutura, através de medições, de deformações, fissuras, temperaturas, etc.

A monitorização dinâmica é utilizada para gravar acelerações, em zonas sísmicas, por exemplo.

A monitorização estrutural funciona, assim, como um primeiro sinal de alarme.

A maneira mais simples e mais económica para monitorizar fendas e fissuras, a monitorização mais comum, é utilizando testemunhos e fissurómetros. Em alguns casos é necessário utilizar sistemas de monitorização computadorizados, para gravar dados em tempo real.

Como regra geral, a utilização de sistemas de monitorização, deve estar sujeita a uma análise de custo-benefício, para que apenas sejam obtidos os dados estritamente necessários à revelação de fenómenos evolutivos.

2.4.3 Análise do processo patológico. Diagnóstico

A recolha de dados possibilita ao investigador o conhecimento de como se desenvolveu o processo patológico, qual a sua origem, suas causas e a sua evolução. Realizado o diagnóstico, o investigador está apto a desenvolver um relatório com as conclusões que possibilitem a reabilitação/reparação da estrutura afectada. Neste relatório deve constar a(s) causa(s) que originaram o processo, a sua evolução ao longo do tempo, o estado actual do dano detectado e a avaliação da segurança estrutural.

Se o diagnóstico for incorrecto, as decisões daí resultantes podem conduzir a soluções de reabilitação deficientes (níveis de segurança inferiores ao desejado) ou conservadores (níveis de segurança muito superiores ao necessário).

O processo patológico deve ser estudado recorrendo à [11]:

- análise histórica;
- análise qualitativa;
- análise quantitativa, onde se inclui a modelação matemática e os ensaios, da estrutura alvo de investigação.

A análise histórica envolve o estudo e compreensão do comportamento da estrutura ao longo do tempo. A análise qualitativa é baseada na comparação do comportamento da estrutura em causa como comportamento de estruturas semelhantes, já analisadas. Dentro da análise quantitativa a modelação matemática tenta reproduzir a estrutura original, podendo-se comparar os danos obtidos com os danos reais, observados no local. Os ensaios permitem a medição directa da resposta da estrutura quando submetida a determinados esforços (por exemplo, recorrendo a ensaios de carga).

Após a recolha desta informação será possível fazer um juízo fiável, sobre a segurança estrutural.

2.4.4 Prognóstico

A fase de prognóstico compreende a avaliação sobre a evolução de um determinado processo patológico no tempo.

É nesta fase que se define a necessidade e urgência de uma intervenção ou, apenas, a data de uma nova inspecção.

2.4.5 Proposta para Ficha de Recolha de Dados

O objectivo desta ficha é o da recolha de dados relativos a uma determinada ocorrência. Como atrás se referiu, a ficha deve ser dividida em várias células, para permitir uma análise mais eficaz e eficiente, contendo, pelo menos, os seguintes dados [09], [12]:

1. Identificação do Edifício
2. Identificação dos danos observados

   2.1 Caracterização do local onde ocorreu a anomalia

2.2 Identificação da anomalia

2.3 Detalhes construtivos

2.4 Caracterização ambiental

2.5 Fotografias

3. Identificação do mecanismo de deterioração com recomendações referentes à:

3.1 Necessidade de inspecção detalhada

3.2 Locais de realização de ensaios

3.3 Urgência de intervenção

Ficha de Recolha de Dados

1. Identificação do Edifício Refª.: _____

Identificação do Edifício: _____

Motivo da Inspecção: Reclamação ☐ Inspecção de rotina: ☐ Outro ☐

Inspecção realizada por: _____ Hora: _____ Data: _____

2. Identificação dos danos observados

2.1 Caracterização do local onde ocorreu anomalia

Identificação do local: _____

Elemento/Componente estrutural: _____

Intervenções anteriores: _____ Responsável: _____Data:_____

_____ Responsável: _____Data:_____

_____ Responsável: _____Data:_____

Uso do edifício: _____

2.2 Identificação da anomalia

Tipo de dano:

Humidade ☐ Erosão ☐ Deformação ☐ Fendas ☐

Fissuras ☐ Corrosão ☐ Desprendimentos ☐ Oxidação ☐

Eflorescências ☐ Organismos ☐ Sujidade ☐

Descrição do dano: _____

_____

Observação visual da envolvente:

O dano é localizado?_____

Extensão aproximada: _____

Esquema da anomalia:

Existem outras anomalias? Sim ☐ Não ☐

Descrição: _____

História:

Data em que surgiu: _____ Como evoluiu:_____

Aparece e desaparece em ciclos? _____

2.3 Detalhes Construtivos

Documentação existente:

Peças Escritas: _____

_____

Peças Desenhadas: _____

_____

Descrição do tipo de Estrutura:

Betão Armado ☐ Alvenaria ☐ Madeira ☐ Metálica ☐

Descrição do Sistema Estrutural existente: _____

_____

2.4 Caracterização Ambiental

Localização do dano:

Na vertical: _____

Na horizontal: _____

Orientação do dano: N ☐ NE ☐ E ☐ SE ☐ S ☐ SW ☐ W ☐ NW ☐

Nível de Exposição:

H = altura do dano, em relação à rua

D = distância em relação aos edifícios, situados em frente

H < 10 m	H < 10 m	H > 10 m	H > 10 m
D < 15 m	D > 15 m	H < 30 m	D > 30 m

Nível de contaminação:

1 - alto, 2 - médio, 3 - baixo

SO_2 ☐ CO ☐

Outra ☐ Especificar: _____

2.5 Fotografias

3. Identificação do Mecanismo de Deterioração

Identificação da causa da deterioração:

☐ Caso particular

Necessária a intervenção de um técnico especializado

Observações: _____

_____

☐ Caso tipificado:

☐ Dar por concluído o diagnóstico

Observações: _____

☐ Proceder a inspecção detalhada

Inspecção específica a realizar: _____

_____

Locais de realização de ensaios: _____

_____

Urgência da intervenção: _____

_____

☐ Requer apenas manutenção:

Data da próxima Inspecção Visual: _____

Observações: _____

_____

Data: ___/___/_____

O técnico:

_____

Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

3. Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

3.1 Introdução

De acordo com a avaliação realizada, pode ser necessário o recurso a ensaios experimentais sobre a estrutura ou sobre os seus materiais constituintes, com o objectivo de determinar as suas características físicas, químicas e mecânicas.

Existem inúmeros métodos de ensaio em estruturas de Engenharia Civil. Eles podem variar desde a simples inspecção visual até aos ensaios destructivos que provocam o colapso da estrutura. Estes métodos são geralmente associados a dois tipos de ensaios, os destrutivos (ED) e os não destrutivos (END). A distinção entre as técnicas destrutivas e não destrutivas é baseada no grau de destruição provocado na zona da estrutura sob ensaio. No entanto, existem outros métodos cujos procedimentos não se incluem nesses grupos, como por exemplo os métodos químicos, os semi - destrutivos e a inspecção visual. Cada um tem as suas vantagens e desvantagens, e a sua aplicação e resultados são diferentes. Por exemplo, os testes químicos, são normalmente utilizados na determinação das propriedades dos materiais, e os ensaios destrutivos na determinação do comportamento estrutural e da resistência global de uma determinada estrutura. Os métodos não destrutivos são utilizados na avaliação da resistência e do estado das estruturas.

No âmbito desta tese, e como se pretende sobretudo, focar as técnicas de ensaio em edifícios relacionadas com a sua reabilitação, serão descritos, principalmente, os ensaios não destrutivos e os ensaios ligeiramente destrutivos, bem como alguns ensaios laboratoriais com eles relacionados.

Como foi mencionado no capítulo anterior a inspecção e diagnóstico de edifícios deve ser feita por etapas (Quadro 3.1), às quais se podem associar diversos métodos de análise.

No Quadro 3.2 são apresentados os principais métodos, dispositivos e técnicas associadas às diversas fases do processo de inspecção estrutural.

Quadro 3.1 - Etapas de intervenção quando são utilizadas a inspecção e técnicas de avaliação [22]

Fase	Objectivo
1) Antes da Intervenção	1.1 - Investigação Preliminar
	1.2 - Recolha de informação sobre a geometria e estrutura do edifício
	1.3 - Avaliação das propriedades mecânicas dos materiais
	1.4 - Validação do modelo
2) Durante a Intervenção	2.1 - Garantia de qualidade
3) Após a Intervenção	3.1 - Avaliação dos efeitos na intervenção
	3.2 - Monitorização da estrutura

Neste capítulo pretende-se fazer uma apresentação e descrição dos métodos de ensaio em edifícios relacionados com a sua reabilitação, nomeadamente em estruturas de betão armado, de alvenaria, de madeira e de aço. Verifica-se que existem muito mais técnicas de ensaio para avaliar edifícios em betão armado, do que em relação à dos outros tipos de estruturas aqui estudados. Por isso, grande parte dessas técnicas aqui descritas, aplicam-se sobretudo a esse tipo de estruturas.

A descrição dos métodos e técnicas de ensaio será feita de forma global, isto é, não se referindo especificamente a um determinado tipo de elemento estrutural. Nos capítulos seguintes, específicos a cada tipo de construção, mais comum em Portugal, serão referidas as particularidades mais importantes.

Os testes aqui descritos serão apresentados por Métodos de Ensaio, agrupando-os por técnicas, por exemplo, Métodos Electromagnéticos, Métodos Eléctricos, etc.

Será referida a sua origem, o modo como deve ser realizado, os cuidados a ter com a obtenção de resultados, as suas principais vantagens e desvantagens. Sempre que existirem, serão mencionadas as Normas que se aplicam.

Os Métodos de Ensaio característicos de apenas um tipo de sistema estrutural, como por exemplo o Ensaio com Líquidos Penetrantes para as Estruturas Metálicas, serão referidos no Capítulo referente a esse sistema estrutural.

Quadro 3.2 - Principais ensaios, aparelhos e técnicas utilizados nas diversas etapas da inspecção e diagnóstico estrutural [22]

Ensaios, Aparelhos e Técnicas	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	3.1	3.2
Boroscopia e videoscopia	X	X			X	X	
Células de carga				X			X
Ensaios sónicos e ultra-sónicos		X			X	X	
Esclerómetros	X		X				
Fissurómetro	X						
Impulso mecânico		X			X	X	
Inspecção visual dos danos	X	X	X			X	
Inspecção visual por técnico qualificado	X						
Macacos planos de tensão			X	X		X	
Medição de rotações				X			X
Medição de fissuras com cabos de tensão				X			X
Medição com cabos de tensão				X			X
Medição de vibrações				X		X	X
Medidor de deformações mecânicas				X			X
Medidor eléctrico de extensões			X	X			
Pêndulo directo e telecoordenadores				X			X
Penetração	X		X				
Penetrómetro e SPT			X				
Radar		X			X		
Resistografia			X				
Teodolito automático				X			
Termografia		X					
Termómetro				X			X
Testes Pull-out	X		X				
Topografia e fotogrametria		X					
Vibração forçada				X		X	X

Nota: A numeração apresentada no cabeçalho deste Quadro tem correspondência com a que figura no Quadro 3.1, referente ao objectivo de uma inspecção estrutural.

Serão ainda referidos os aspectos mais importantes relacionados com a monitorização de estruturas, uma vez que esta se revela como um importante meio auxiliar de apoio à avaliação do estado de uma estrutura existente.

3.2 Ensaios Destrutivos

Os ensaios destrutivos, como o nome indica, implicam a destruição completa ou parcial da estrutura alvo de ensaio. Por isso, a sua utilização é limitada. Em casos em

que o edifício em causa não tem interesse histórico ou patrimonial, e que esteja destinado à demolição, a sua execução é particularmente importante porque os resultados obtidos serão uma mais valia científica para a compreensão das técnicas e soluções estruturais.

3.2.1 Ensaio de Paredes de Alvenaria *in situ*

O principal objectivo destes ensaios é a determinação da resistência e da rigidez de uma parede sujeitas a acções segundo o seu plano, nomeadamente a tensão de corte. O painel, segundo as especificações ASTM [20], deve ser isolado do resto da parede de alvenaria através de uma máquina de corte, equipada com coroas com dentes de diamante, de modo a não provocar distúrbios ou danos, no dito painel (ver Figura 3.1). Aliás esta é uma das principais limitações deste tipo de ensaio. Este ensaio é denominado ensaio de compressão diagonal.

Nas Figuras 3.2 e 3.3 são apresentados outros exemplos de ensaios *in situ* em paredes de alvenaria, que envolvem o recurso à destruição de uma zona significativa da dita parede. Como se pode verificar, em alguns casos, a sua realização é feita junto de vãos de portas ou janelas, cujas ombreiras servem como paredes de reacção aquando da aplicação da carga, através de macacos hidráulicos. Um dos principais problemas é o incremento de forças verticais, sobre o pano de alvenaria ensaiado.

Este tipo de ensaio também pode ter como objectivo a caracterização das juntas.

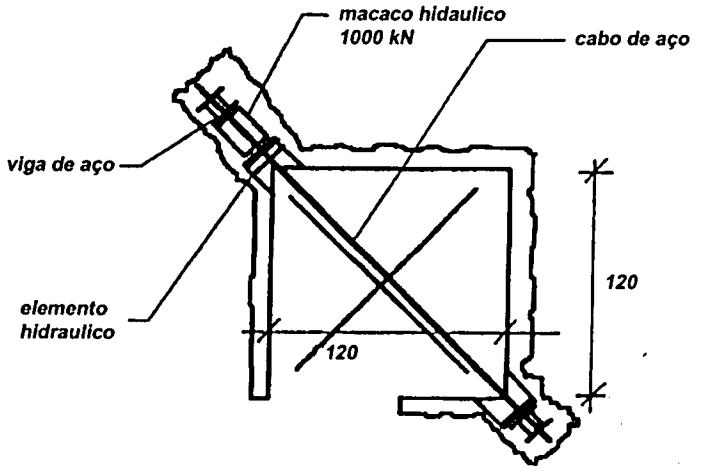


Figura 3.1 - Ensaio de compressão diagonal *in situ* [20]

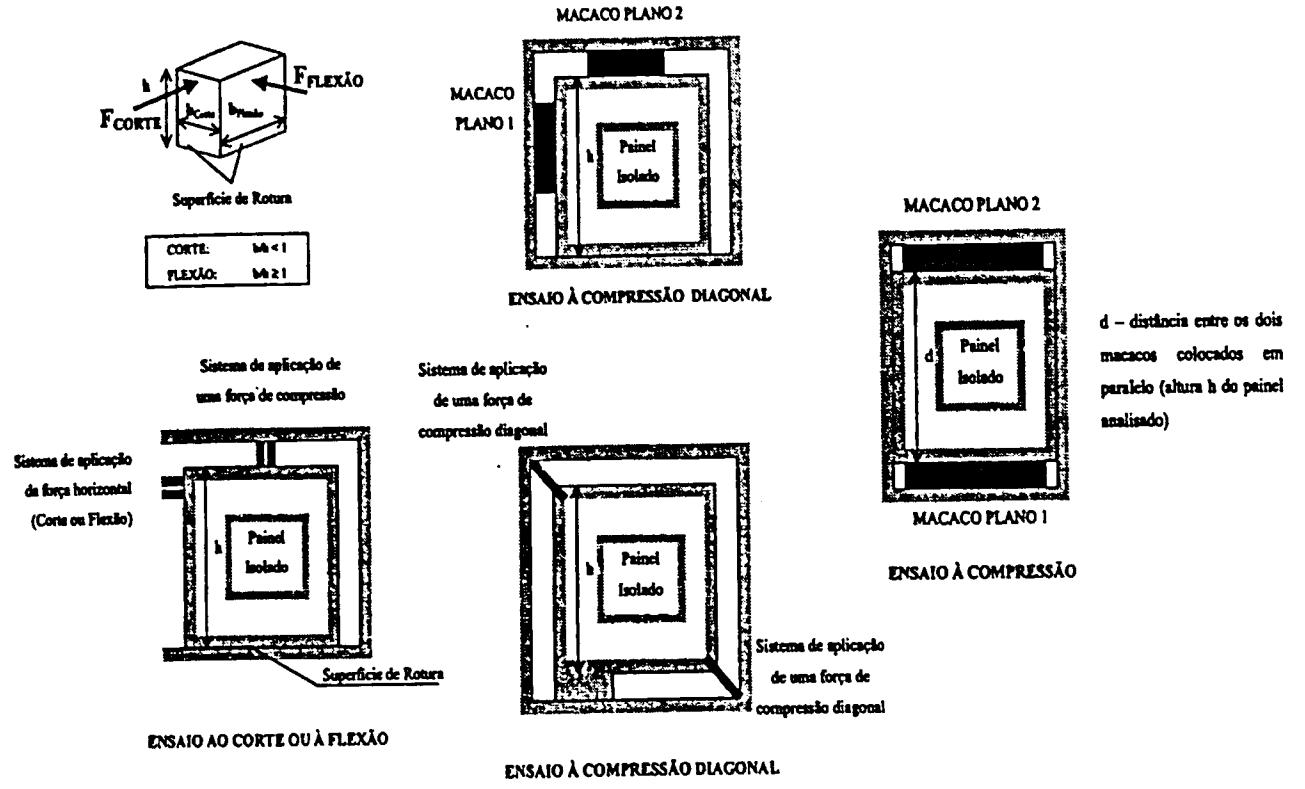


Figura 3.2 - Algumas configurações possíveis de painéis de parede ensaiados *in situ* [25]

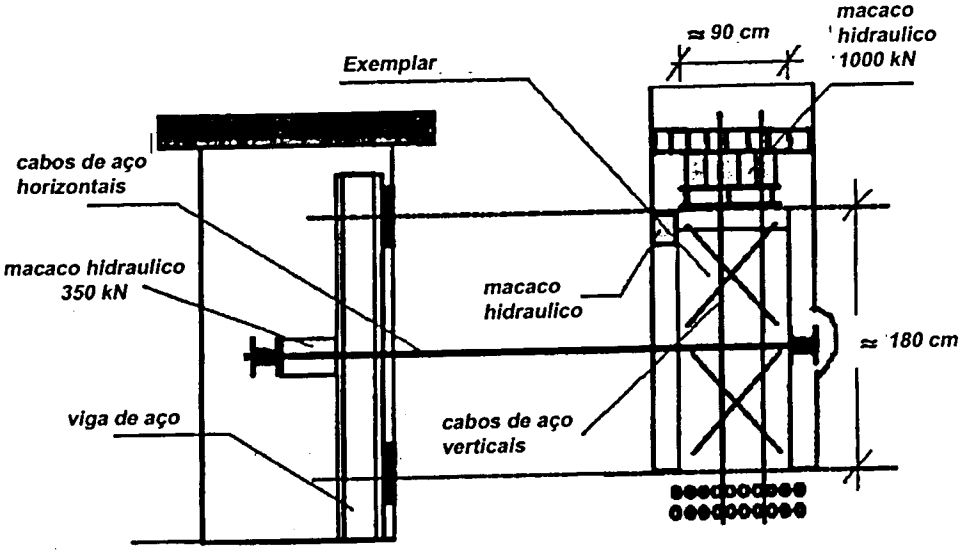


Figura 3.3 - Ensaios em paredes de alvenaria *in situ* [21] e [22]

No Quadro 3.3 resume-se os ensaios *in situ* mais utilizados, relacionando-os com o tipo de carregamento, bem como os parâmetros de comportamento do material que se obtém.

Quadro 3.3 - Ensaios *in situ* de painéis isolados do resto da estrutura [25]

Tipo de ensaio	Descrição do ensaio	Tipo de carregamento	Informação obtida
Ensaio de compressão[1]	Ensaio com dois macacos planos paralelos, aplicando uma força vertical [1]	Aplicação de pressão que pode ser monotónica ou cíclica	Tensão de cedência e de rotura à compressão. Rigidez (Módulo de elasticidade).
Ensaio de corte	Aplicação de uma força vertical de compressão a simular o peso próprio da estrutura, idêntica às condições iniciais, e de uma força horizontal, paralela ao plano da parede	Força horizontal, monotónica ou cíclica	Tensão de cedência e de rotura à compressão. Rigidez (Módulo de elasticidade). Ductilidade
Ensaio de compressão diagonal	Aplicação de uma força de compressão segundo a direcção da diagonal do painel.	Força de compressão, monotónica ou cíclica	Tensão de cedência e de rotura à tracção, obtida a partir da tensão de rotura à compressão [2]. Rigidez (Módulo de elasticidade).
Ensaio à flexão	Aplicação de uma força lateral horizontal no topo do painel, segundo o plano da parede ou para fora deste.	Força de compressão, monotónica ou cíclica	Tensão de rotura à tracção. Rigidez (Módulo de elasticidade). Ductilidade.

(1) - Impossibilidade de realização deste ensaio *in situ* através da aplicação de forças verticais, que é a forma mais usual.

(2) Os valores destas tensões são obtidos através do círculo de Mohr.

Note-se que em grande parte destes ensaios o resto da estrutura serve de parede de reacção.

Figura 3.4 - Ensaios em paredes de alvenaria *in situ* [adapt. de www.oz-diagnostico.pt]

3.2.2 Considerações finais

Para além dos ensaios aqui descritos, existe uma infinidade de testes destrutivos. Normalmente esses ensaios requerem a extracção de amostras in situ e posterior execução em laboratório.

Como exemplo, para as estruturas de betão armado cite-se os ensaios de tracção, de compressão, de flexão, para as estruturas metálicas os ensaios de tracção, de dobragem, de resiliência, de dureza, para as estruturas em alvenaria os ensaios do prisma e para as estruturas de madeira em ensaios de tracção, compressão e flexão, só para citar os mais conhecidos. Todos estes ensaios encontram-se devidamente normalizados e foram por demais estudados pelo que não serão referidos nesta tese.

3.3 Inspecção Visual

Qualquer que seja o tipo de inspecção a desenvolver, a inspecção visual é o primeiro passo para a identificação das anomalias ou defeitos existentes.

Apesar de não se considerar como um ensaio, a observação directa da estrutura é uma fase essencial do seu estudo. Esta inspecção deve ser realizada por um técnico, ou equipe, qualificado(a), de modo a se obter um conhecimento e interpretação da estrutura, tendo como finalidade indicar um rumo para uma posterior investigação (inspecção detalhada).

Os objectivos principais da inspecção visual incluem:

- a identificação da deterioração e dos danos estruturais;
- a verificação de que esses fenómenos estão ou não estabilizados;
- a decisão sobre se existem riscos imediatos na estrutura e quais as medidas de prevenção a tomar;
- a identificação da progressão de qualquer efeito ambiental, no edifício.

A inspecção visual é um dos mais poderosos e versáteis meios de inspecção.

No entanto, como já foi referido, a sua eficiência depende do conhecimento e da experiência do investigador. A inspecção visual tem uma limitação óbvia que é a de só

permitir a inspecção de superfícies visíveis. Os defeitos internos à estrutura continuarão a não ser referenciados e não se tem acesso a nenhuma informação quantitativa acerca das propriedades do betão. É por esta razão que a inspecção visual é normalmente associada a um ou mais END. O inspector pode considerar que, após proceder à inspecção visual, outras propriedades da estrutura podem realçar e até complementar o que foi analisado pela inspecção visual.

A inspecção visual pode-se dividir em duas áreas. A inspecção visual externa que, como o próprio nome indica executa o exame à superfície exterior da estrutura, e a inspecção visual interna, que inspecciona o interior da estrutura, através de meios auxiliares de inspecção como o boroscópio, o fibroscópio e o endoscópio.

3.3.1 Meios complementares de inspecção

Para realizar a inspecção visual é útil o emprego de equipamento manual de fácil utilização, com o objectivo de auxiliar o inspector na confirmação de algum aspecto decorrente da observação das anomalias detectadas, na delimitação de zonas ou na caracterização da sua evolução no tempo.

De entre o equipamento mais utilizado cite-se:

- máquina fotográfica;
- giz e marcadores;
- régua;
- régua de fendas
- martelo;
- punção;
- aparelhos de ampliação óptica;
- fibroscópio e boroscópio;
- videoendoscopia.

A ampliação óptica permite detalhar as áreas danificadas. Actualmente, existe uma enorme variedade de aparelhos ópticos, desde uma simples lupa, a sofisticados microscópios manuais. A selecção do aparelho mais indicado para um determinado

caso, pode ser facilitada pelo conhecimento dos princípios fundamentais da ampliação óptica.

A distância focal reduz com o aumento da potência do aparelho, o que quer dizer que as lentes principais devem ser colocadas próximo da superfície a ser inspeccionada. O campo de visão diminui com a ampliação, tornando-se moroso inspeccionar grandes superfícies, usando uma grande ampliação. Quando se necessita de efectuar grandes ampliações, é necessário ter em consideração a luminosidade necessária para se ver claramente o aumento do nível de ampliação, bem como a necessidade de se recorrer à iluminação artificial.

Um instrumento muito útil para a inspecção visual, nomeadamente para a inspecção a fendas ou fissuras, é um pequeno amplificador manual com uma escala de medição incorporada na lente mais próxima, à superfície a ser inspeccionada. Com este fissurómetro, a largura das mesmas pode ser medida com exactidão.

Figura 3.5 - Medidor de fissuras microscópico [adapt. www.controls.it]

Dentro do mesmo tipo de aparelhos refira-se o microscópio stéreo que permite obter uma visão tridimensional de uma determinada superfície, uma vez que possui incorporadas duas lentes de visão.

O fibroscópio (designado em inglês *fiberscope*) e o boroscópio, permitem a inspecção de zonas que de outra forma são inacessíveis a olho nu. Um fibroscópio é composto por um feixe de fibras ópticas e por um sistema de lentes; que permite a inspecção de cavidades no interior de estruturas, inspecção essa realizada através de pequenos furos de acesso. O fibroscópio é assim denominado pois algumas das fibras brilham, de modo a iluminar a cavidade a inspeccionar. O operador pode rodar o visor, para permitir um campo de visão muito alargado, através de um simples furo de acesso. Um boroscópio é composto por um tubo rígido com espelhos e lentes e é indicado para observações segundo o seu eixo ou na perpendicular ao mesmo. A imagem é muito mais nítida, utilizando o boroscópio, enquanto que o fibroscópio nos oferece uma maior flexibilidade de campo de visão. O uso destes aparelhos requer a furação de pequenos buracos, se não existirem outros meios de acesso. Esses buracos devem interceptar o local que se pretende inspeccionar. Outros END, posteriormente mencionados, permitem localizar essas cavidades. No entanto, o fibroscópio e o

boroscópio podem ser utilizados na verificação e comprovação de resultados de outros END, sem ser necessária a extracção de carotes.

Figura 3.6 - Fibroscópios

Figura 3.7 - Boroscópios

Um recente desenvolvimento veio aumentar as possibilidades da inspecção visual: uma pequena câmara de vídeo, designada por videoendoscopia. A técnica consiste em transportar a luz para o interior de um objecto de modo a conseguir obter imagens. Pode ser realizado através de sondas rígidas (boroscopia) ou flexíveis, sendo que estas podem ser construídas com fibras ópticas com microcâmaras acopladas, para permitir a recolha e gravação de imagens. A utilização desta técnica revela-se fundamental, uma vez que permite a obtenção instantânea de imagens, com grande qualidade de resolução, bem como a produção de vídeos que, posteriormente, podem ser visionados através de um monitor e armazenados em gravadores específicos. Podem ser introduzidas em buracos perfurados nas estruturas sujeitas a inspecção de cavidades internas, ou podem ser montadas em robos para inspecções em tubos/ canalizações ou até em zonas expostas a perigos biológicos ou químicos.

Resumindo, a inspecção visual é um dos END mais poderoso. A sua eficácia, no entanto, está dependente do conhecimento e experiência do investigador. Requer-se, pois, um bom conhecimento do comportamento estrutural, dos materiais constituintes e dos processos de construção. A inspecção visual é uma teoria de ensaio, de entre os que compõe um plano de avaliação/inspecção global de uma estrutura que é, muitas vezes, complementado por outros END ou até ensaios semi – destrutivos, tais como os ensaios sónicos, os ensaios de arranque, etc.

3.4 Ensaios Não Destrutivos e Ligeiramente Destrutivos

3.4.1 Introdução

Os Ensaios Não Destrutivos (END) têm vindo a ser utilizados de forma crescente na investigação/inspecção de estruturas, na Engenharia Civil, devido ao seu baixo custo e à facilidade e rapidez de execução. Este aumento é, também, devido a um conjunto de factores, que se passa a enunciar:

- o aperfeiçoamento tecnológico, quer do hardware quer do software, na aquisição e análise dos dados;

- as vantagens económicas na avaliação de estruturas de grande volume, quando comparados com ensaios comuns, tais como a extracção de carotes para ensaio em laboratório;

- a capacidade de se avaliar rapidamente, através das inspecções, estruturas existentes, e posterior avaliação da sua segurança estrutural.

- os métodos dos END são especialmente indicados para a determinação, com segurança, das propriedades dos materiais que constituem os elementos estruturais.

Para além das características geométricas dos elementos estruturais permitem a determinação das propriedades dos materiais que os constituem., tais como a densidade, o módulo de elasticidade, a resistência, a dureza superficial e a capacidade de absorção. De entre outras características também são utilizados na localização de descontinuidades superficiais e internas, tais como a presença de vazios e fissuras e na verificação da presença de humidade, etc.

Estes ensaios podem ser utilizados em estruturas novas e em estruturas antigas. Nas primeiras revelam-se particularmente úteis para monitorizar a evolução da capacidade resistente da estrutura e esclarecer dúvidas sobre a qualidade dos materiais estruturais empregues. Nas segundas, os END permitem avaliar o estado da estrutura e a sua capacidade resistente.

A tecnologia ligada aos END investiga e desenvolve, de uma forma permanente, os testes conhecidos (existentes), bem como desenvolve novos métodos

De entre os métodos aqui descritos, será dado um particular ênfase aqueles que permitem determinar as propriedades físicas, a detecção de fendas e descontinuidades e fornecem todas as informações necessárias à caracterização de um elemento estrutural.

Esta utilização de END ocorre, não obstante a falta de normas técnicas para a aplicação de grande parte dos ensaios.

Tradicionalmente, a certificação da qualidade das construções era efectuada, em grande medida, pela inspecção visual do processo construtivo e pelo ensaio, por exemplo, do betão através de testes standard em amostras de betão fresco e endurecido. Esta aproximação não fornecia dados das propriedades *in situ* do betão. Os métodos aplicados nos END têm por vantagem, fornecer informação sobre essas propriedades.

Tudo isto pode ser realizado através de END, no intuito de se obter toda a informação essencial sobre as condições estruturais do elemento a inspeccionar, tais como:

a) A dimensão dos elementos;

b) A localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e delaminações, e da falta de ligação entre as diversas camadas de uma dada estrutura;

c) Aceitação, ou não, de materiais fornecidos;

d) A localização e tamanho das armaduras;

e) A corrosão das armaduras;

f) A extensão de danos estruturais, devido a incêndio, exposição química, acção do gelo/degelo, etc.

No entanto, refira-se que os END também apresentam deficiências na sua aplicação, como por exemplo:

- problemas genéricos de aplicação, derivados da difícil interpretação de resultados;

- falta de normas, em alguns dos métodos, que estabeleçam os procedimentos para a realização dos ensaios, bem como regras sobre a interpretação dos resultados obtidos;

- desconexão entre a investigação e a aplicação comercial;
- composição heterogénea e a porosidade de alguns elementos estruturais, como o betão, alvenarias e a madeira;
- alteração das propriedades com o tempo;

Neste ponto revê-se o estado da arte relativo aos END. O objectivo principal é fornecer ao potencial utilizador um guia para o ajudar a planear, conduzir e interpretar os END em estruturas. Discute-se os princípios, equipamentos e procedimentos técnicos e análise de dados de vários métodos de END. Para ajudar os técnicos na aplicação dos métodos e técnicas mais adequadas a cada caso particular, são referidas as aplicações mais correntes, assim como as principais limitações inerentes a cada método citado.

3.4.2 Ensaios de Carga

Os ensaios de carga estáticos de curta duração, em estruturas, substituem os ensaios *in situ*, quando estes não são adequados para determinar a resistência de uma estrutura. Por exemplo, uma carote retirada de uma laje não é adequada para a determinação do grau de deformação da mesma, sob uma qualquer solicitação. Na maior parte dos casos, o objectivo deste teste é a demonstração da eficiência e adequação de uma estrutura. Por outras palavras, avalia-se a forma como as componentes de um sistema estrutural reagem à medida que se vão incrementando, gradualmente, as cargas. Pretende-se, assim, a verificação dos estados limites de uma estrutura, por forma a não comprometer a sua funcionalidade, durabilidade e aparência.

Os ensaios de carga são realizados, essencialmente, em elementos estruturais submetidos a esforços de flexão, como por exemplo, as lajes e as vigas.

3.4.2.1 Procedimentos de teste

As cargas utilizadas no teste devem ser aplicadas ou retiradas através de incrementos uniformes, de modo a monitorizar o comportamento elástico e linear da estrutura alvo de ensaio. Por outras palavras, monitorizam-se as deformações (deslocamentos e rotações), a abertura de fissuras existentes ou a formação de novas fissuras durante a aplicação das cargas. As normas e recomendações, ACI 437R-91 e ACI 318-02 e RILEM [16], [17] e [18], mencionam os procedimentos e cuidados a ter para a realização do ensaio, na determinação [19]:

a) de deslocamentos verticais;

b) de assentamentos de apoio;

c) de rotações dos apoios;

d) de formações de fissuras e abertura de fissuras existentes, em cada fase dos ensaios;

e) extensões em alguns pontos significativos, à superfície dos elementos estruturais.

É essencial monitorizar as deformações e fissuras do elemento estrutural, bem como dos elementos adjacentes, de modo a assegurar se se pode continuar a incrementar as cargas, ou, pelo contrário, diminui-las no caso de se detectar algum perigo.

3.4.2.2 Carga de ensaio e sua aplicação

A norma ACI 318-02 determina que a carga a aplicar nos elementos é, no limite, cerca de 85 % da carga de cálculo, isto é, da carga majorada. Inclui-se neste valor a parcela correspondente à majoração do peso próprio.

A zona a ensaiar deve estar perfeitamente definida. Se a estrutura for contínua deve ensaiar-se, pelo menos, dois vãos. No entanto, deve limitar-se a superfície máxima do ensaio a 100 m^2. Em lajes pré-fabricadas e em lajes fungiformes nervoradas não se devem realizar testes em bandas estreitas, uma vez que o efeito dos esforços transversos pode influenciar, e até falsear o resultado final [09].

Existem várias técnicas para aplicação de cargas, e o seu uso depende da sua exequibilidade, numa situação específica. As formas mais comuns de aplicar as cargas são através de sacos de areia ou cimento, bidões de água, pesos de aço e macacos hidráulicos. As primeiras são utilizadas quando se pretende aplicar cargas uniformes, enquanto que os macacos hidráulicos são utilizados quando se pretendem cargas pontuais. Para testes em pontes e viadutos, recorre-se usualmente ao uso de camiões ou de vagões com pesos pré-estipulados.

Deve evitar-se que a carga esteja disposta na totalidade da superfície a ensaiar, para que não se produza o efeito de arco.

Figura 3.8 - Sistema de carga constituído por bidões de água [adapt. de www.oz-diagnostico.pt]

É, também, importante obter dados e medições exactas durante a execução do ensaio. Essas medidas estão relacionadas com a determinação das fissuras e das extensões devidas à aplicação das cargas. Para tal recorre-se a sistemas de leitura aptos a fornecer os dados requeridos. De entre eles, saliente-se [19]:

- alongâmetros mecânicos de milésimos com bases de 200 e 400 mm, sendo utilizados para medir a menos de 0,001 mm, as distâncias entre os pontos definidos por cada par de bases circulares metálicas com diâmetro de 5 cm;
- deflectómetros mecânicos de centésimos com campo de medida de 10 ou 20 mm;
- prumos metálicos extensíveis com tripés, servindo de suporte às bases magnéticas;
- bases magnéticas, que seguram os deflectómetros no topo dos prumos;
- inclinómetro para medir rotações nos apoios;
- bases inclinométricas;
- fita métrica com pelo menos 5 metros de comprimento;
- régua graduada em milímetros;
- medidor óptico de fissuras.

De forma a auxiliar o posicionamento e o acesso aos aparelhos de leitura deverá ser prevista a presença de elementos de escoramento e de acesso aos ditos aparelhos.

Figura 3.9 - Conjunto de deflectómetros para leitura de flechas numa laje [adapt. de www.oz-diagnostico.pt]

Para se obter o máximo proveito da execução deste ensaio é conveniente proceder à elaboração de um plano de observações que deve conter a seguinte informação [19]:

- definição geométrica da estrutura a ensaiar;
- as propriedades mecânicas dos materiais utilizados;
- definição das cargas a utilizar nos ensaios;
- definição das grandezas a medir para a montagem adequada dos aparelhos de leitura e análise dos resultados;
- procedimento geral da realização dos ensaios, pormenores de certas montagens, precauções de segurança (eventual escoramento), interrupções da utilização da estrutura, etc..

O número mínimo de incrementos de carga deve ser quatro [17].

No fim de cada incremento deve-se proceder à leitura das deformações observadas, quando os instrumentos de medida estiverem estáveis. A duração do intervalo e número de leituras dependem do tipo de estrutura, dos materiais constituintes e dos patamares de carga.

As provas de carga terminam quando ocorre uma das seguintes situações:

a) é atingida a carga desejada, acrescida da margem de segurança apropriada;

b) a resposta da estrutura indicia o início de um comportamento não linear ou surge qualquer outro sinal visual de perigo.

No fim procede-se à descarga total da zona ensaiada, também ela faseada, até se repor a situação inicial do ensaio.

As leituras devem ser anotadas nas folhas de registo correspondentes: deslocamentos verticais, rotações e aberturas de fendas. Neste último caso, se a estrutura a ensaiar já apresentar zonas fissuradas, estas devem ser marcadas por forma a permitir a referenciação e controle por parte dos técnicos.

Os resultados são, normalmente, apresentados sob a forma de tabelas ou de gráficos, de modo a distinguir-se as várias fases dos ensaios. Se existir, por exemplo, alguma deformação residual, ela deve ser apresentada e salientada nas ditas tabelas ou gráficos.

No final do ensaio de carga , segundo a Norma Espanhola UNE 7.457, podem ocorrer duas situações:

- se a deformação residual for superior a 25 % da flecha obtida no ensaio este deve repetir-se. Se após a repetição a situação persistir a estrutura deve ser demolida.
- se a deformação residual for inferior a 25 % considera-se válidos os resultados obtidos.

Estes procedimentos aplicam-se em estruturas com funcionamento predominantemente elástico, como o caso de estruturas de betão armado. Em estruturas de alvenaria, onde estas se adaptam às deformações aplicadas, esta metodologia não é adequada.

3.4.2.3 Limitações e Campos de Aplicação

A principal limitação deste método de ensaio é o seu alto custo, bem como o tempo de execução do mesmo. Assim, a sua aplicação, geralmente, está confinada apenas a uma parte da estrutura alvo de teste.

Para além das aplicações acima referidas, este ensaio também é muito solicitado quando se pretende:

a) determinar a confiança sobre um método de cálculo não normalizado;

b) verificar o comportamento da estrutura, após alguma modificação estrutural ou alteração da ocupação do edifício;

c) verificar o comportamento estrutural de estruturas antigas;

d) quantificar a degradação da estrutura, devido à deterioração de material ou qualquer dano físico.

Outro campo de aplicação importante á a utilização destes ensaios na verificação da capacidade de carga de fundações (sapatas e estacas, por exemplo).

Neste caso, os procedimentos para a sua execução estão referidos nas Normas: ASTM D 1143-87, D 1194-87 e D 1196-87.

a)

b)

Figura 3.10 a) e b) - Ensaios de carga em fundações. a) em sapata à escala real(Hospital Pedro Hispano, Matosinhos); e b) em estacas de compressão ϕ600 (Fábrica Siemens, Vila do Conde) [adapt. de //paginas.feup.up.pt/sgwww/labgeo]

3.4.3 Técnicas baseadas na Teoria de Propagação de Ondas

Esta técnica baseia-se na teoria de propagação de ondas em meios homogéneos e consiste na emissão ou geração de um sinal e na sua recepção, no mesmo ou noutro local. O sinal emitido transmite-se no meio através de ondas mecânicas (som e tensão) ou de ondas electromagnéticas (radar e detecção de metais) que serão descritas noutro ponto deste capítulo.

As ondas mecânicas ocorrem quando uma pressão ou deformação é aplicada de repente, como por exemplo um impacto, na superfície de um determinado sólido. O distúrbio propaga-se através da peça de um modo análogo à propagação do som através do ar. A velocidade de propagação da onda de choque num sólido elástico é

função do módulo de elasticidade, do coeficiente de Poisson, da densidade e da geometria do sólido. Esta dependência entre as propriedades do sólido e o comportamento da propagação das ondas de choque, permite tirar conclusões sobre as características do sólido, bastando para isso monitorizar a propagação das supracitadas ondas.

Quando aplicamos, num determinado instante, uma determinada pressão, num determinado ponto, situado a meio da superfície de um sólido, o distúrbio propaga-se através do sólido por meio de três tipos de ondas diferentes. As ondas P e as ondas S propagam-se pelo interior do sólido por meio das chamadas frentes de onda hemisféricas. As ondas P, também designadas por ondas dilatacionais ou de compressão, estão associadas à propagação da tensão axial e o movimento das partículas é paralelo à direcção da propagação. As ondas S, também designadas de ondas de corte ou ondas transversais, estão associadas à tensão de corte e o movimento das partículas é perpendicular à direcção de propagação.

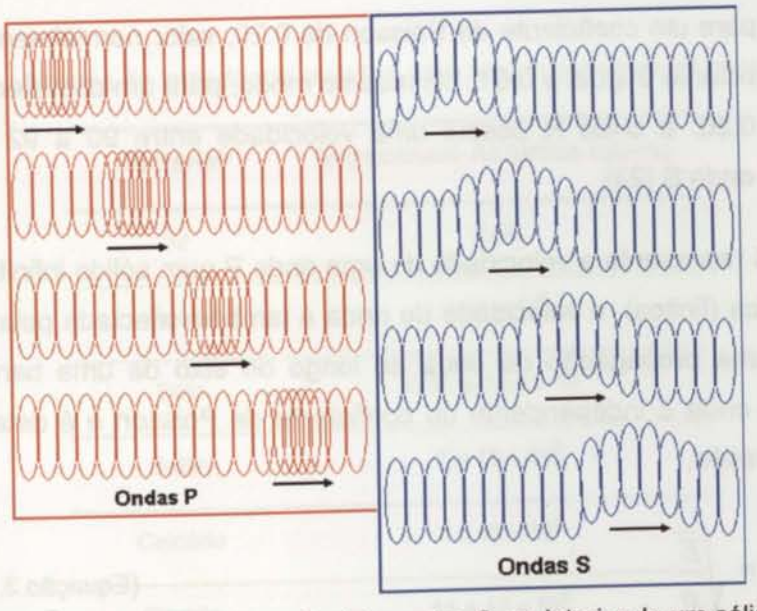


Figura 3.11 - Propagação de ondas P e ondas S, no interior de um sólido

Em adição, as ondas R, viajam a partir da perturbação, ao longo da superfície.

Num sólido elástico e isotrópico, a velocidade de uma onda P, v_P, está relacionada com o Módulo de Elasticidade, E, com o coeficiente de Poisson , υ, e com a densidade ρ, tal como se segue:

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

A onda S propaga-se a uma velocidade menor, v_S, e é dada por (Krautkrämer and Krautkrämer, 1990),

$$v_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde G é o módulo de elasticidade de corte.

Um parâmetro útil é a razão entre a velocidade de onda S, v_S e a velocidade de onda P, v_P:

$$\frac{v_S}{v_P} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Por exemplo, para um coeficiente de Poisson de 0.20, valor normalmente utilizado no betão, este quociente é igual a 0.61. Do mesmo modo, para um coeficiente de Poisson entre 0.15 e 0.20, a onda R possui uma velocidade entre 90 a 92 por cento da velocidade de onda S [23].

A Equação 3.1 representa a velocidade de uma onda P num sólido infinito. No caso de sólidos limitados (finitos), a velocidade de onda é também afectada pela geometria do sólido. Para uma propagação de onda ao longo do eixo de uma barra delgada, a velocidade de onda é independente do coeficiente de Poisson e é determinada pela seguinte expressão,

$$v_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \text{(Equação 3.4)}$$

Onde v_b é a velocidade de onda da barra. Para um coeficiente de Poisson entre 0.15 e 0.25, a velocidade de onda é cerca de 3 a 9 por cento menor do que a velocidade de uma onda P, num sólido de grandes dimensões [23].

Quando uma onda de tensão atravessa um Material 1 e incide na interface com um Material 2 de composição diferente, parte da onda é reflectida. A amplitude de onda reflectida é função do ângulo de incidência e é máxima quando o ângulo é de 90º (incidência normal).

Para uma incidência normal, o coeficiente de reflexão, *R*, é dado pela seguinte expressão,

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad \text{(Equação 3.5)}$$

em que,

R - é o quociente entre a pressão sonora da onda reflectida e a pressão sonora da onda incidente.

Z_2 - impedância acústica do Material 2

Z_1 - impedância acústica do Material 1

A impedância acústica é o produto da velocidade de onda pela densidade do material. Na Tabela3.1, apresentam-se os valores aproximados de *Z*, para alguns materiais [24]:

Tabela 3.1 - Valores da impedância acústica para alguns materiais de construção [23]

Material	**Impedância Acústica kg/(m²s)**
Ar	0,40
Água	$1,50 \times 10^6$
Solo	$0,30 \text{ a } 0,40 \times 10^6$
Betão	$7 \text{ a } 10 \times 10^6$
Calcário	$7 \text{ a } 19 \times 10^6$
Granito	$15 \text{ a } 17 \times 10^6$
Aço	47×10^6

Desta maneira, para as ondas mecânicas que encontrem uma interface de ar (um vazio), como o que acontece com o betão ou com as alvenarias, o valor absoluto do coeficiente de reflexão é próximo de 1,0, fazendo com que ocorra, praticamente, uma reflexão total na interface. É por isso que os Métodos dos END baseados na

propagação de ondas mecânica têm feito com tanto sucesso os seus resultados na determinação dos locais defeituosos, sobretudo em estruturas de betão.

Concluindo quando se aplicam ondas mecânicas a um determinado meio, elas necessitam de um suporte físico para a sua propagação. Através da caracterização do seu movimento, consegue-se obter as propriedades elásticas do meio que atravessam. Dentro das ondas mecânicas podemos ter dois tipos de ensaios:

- os ensaios baseados nas ondas sonoras: ensaios sónicos e ultra-sónicos;
- os ensaios baseados nas ondas de tensão, designados, também, por de impacto.

O intervalo de tempo entre a emissão e a recepção das ondas no interior dos elementos depende das características do meio que atravessam.

A detecção da reflexão das ondas fornece indicação sobre a existência de fendas, vazios ou outros defeitos internos.

A velocidade de propagação no meio, v, está relacionada com o tempo medido, t, e do percurso percorrido, s, através da lei da cinemática para o movimento uniforme:

$$s = v\,t \qquad \text{(Equação 3.6)}$$

Tabela 3.2 - Valores da velocidade de ondas de compressão através de alguns materiais de construção [33]

Material	**Velocidade da onda de compressão (m/s)**
Ar	330
Água	1500
Betão	3000-4500
Tijolo	3400
Arenitos	1500-4000
Aço	5900
Material de enchimento (alvenaria)	500-1000

O desenvolvimento deste método baseia-se no pressuposto de que o meio é homogéneo, o que pode não corresponder à realidade. Por isso, muitas vezes os resultados obtidos podem ser inconclusivos. Refira-se, por exemplo, o caso das alvenarias devido à sua heterogeneidade, o caso de estruturas de betão armado e o caso de elementos de madeira.

No entanto, para evitar a reflexão da onda, é possível ajustar a frequência do sinal, alterando o seu comprimento, λ. Deste modo, este comprimento será superior às dimensões máximas dos vazios e dos inertes.

A relação entre o comprimento de onda, λ, a frequência, f, e a velocidade de propagação da onda no meio, v, é dada por:

$$v = \lambda f \qquad \text{(Equação 3.7)}$$

No entanto, o aumento do comprimento de onda é limitado pela espessura dos elementos analisados, inviabilizando, muitas vezes, a realização deste tipo de ensaios em alvenarias de pedra irregular, com grandes dimensões.

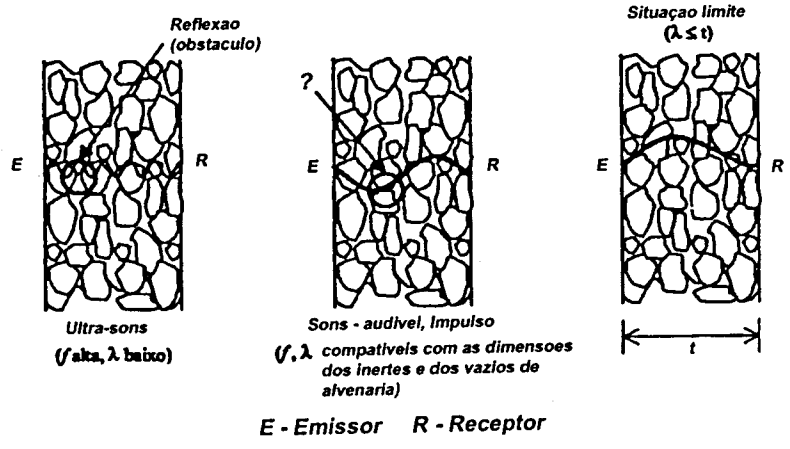


Figura 3.12 - Propagação de ondas no interior de um material heterogéneo [25]

Devido às dimensões dos inertes e à presença de vazios (que muitas vezes ocupam grande volume), as frequências ($20 < f < 20000$ Hz) são inferiores à gama de ultra-sons ($f > 20000$ Hz). Frequências inferiores implicam comprimentos de onda maiores, para a mesma velocidade (ver Equação 3.7).

Por isso, nas paredes de alvenaria, recorre-se com mais assiduidade aos ensaios sónicos, em detrimento dos ultra-sónicos.

3.4.3.1 Ensaio de Ultra-sons

É um dos métodos mais antigos utilizados nos END para o betão, e baseia-se na medição do tempo que demora uma onda de ultra-sons a percorrer uma determinada distância.

Como já foi referido obtêm-se melhores resultados em estruturas homogéneas, como estruturas de betão e estruturas metálicas, do que em estruturas heterogéneas, como estruturas de alvenaria. Nas estruturas de madeira é preciso tomar alguns cuidados, como se referirá no Capítulo 6.

A classificação do ensaio depende do modo como é feita a transmissão das ondas (ver Figura 3.13). Denominam-se ensaios directos, se o percurso entre o emissor e o receptor é uma linha recta, perpendicular à superfície do elemento a ensaiar. Nos ensaios semi-directos o emissor e o receptor estão colocados segundo direcções perpendiculares entre si e nos ensaios indirectos ambos estão na mesma superfície.

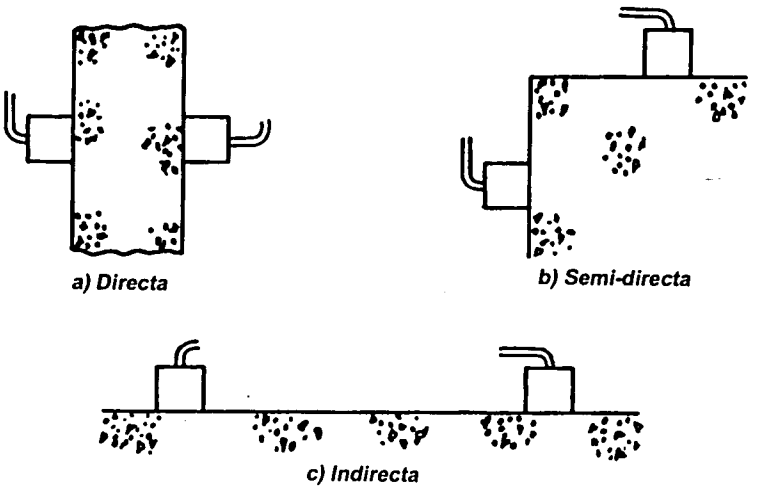


Figura 3.13 - Tipos de leitura da velocidade de propagação por ultra-sons [26]

Os fundamentos do teste estão ilustrados na Figura 3.14, que representa o percurso dos impulsos ultra-sónicos, quando percorrem o elemento de betão, de um lado para o outro.

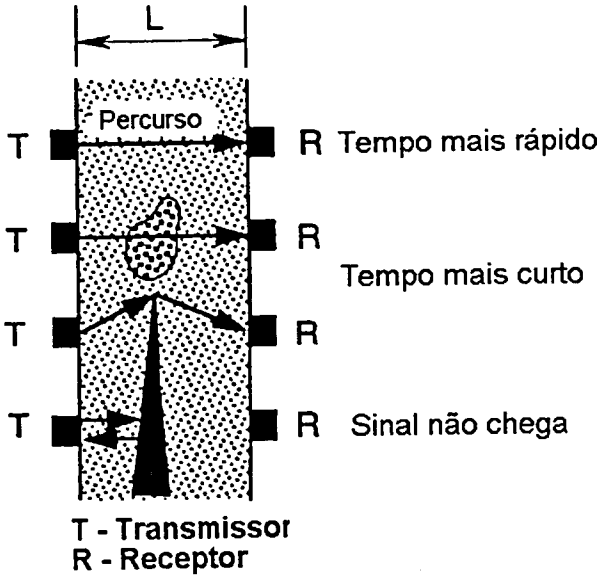


Figura 3.14 - Efeitos dos defeitos no percurso de um impulso por ultra-sons, num elemento de betão [23]

O primeiro caso, representa o caminho mais curto percorrido pelo som através do betão, e resulta no tempo mais rápido ou na velocidade de propagação de onda maior.

O segundo caso, representa um percurso em que a onda atravessa uma porção interna de betão de inferior qualidade e o terceiro caso mostra o desvio do percurso, em torno do dano. Neste caso o tempo que demorou será maior do que no primeiro. No último, como se disse, o caminho da onda é interrompido pela existência de um vazio. Esta interferência, resulta na total reflexão da onda de choque, pelo que não chegará nenhum impulso ao lado oposto. A velocidade de propagação da onda será determinada dividindo a espessura do elemento pelo tempo que demorou a ser efectuado o percurso. A comparação da velocidade da onda em pontos diferentes do elemento, fornece a informação necessária para a detecção das anomalias no interior da estrutura. Pode também ser possível utilizar o enfraquecimento do sinal, como um indicador da qualidade relativa do betão, mas tal requer uma especial atenção para efectivar uma correcta ligação dos transdutores em todos os pontos de ensaio.

Estes ensaios permitem determinar as características mecânicas do material, assim como as heterogeneidades, fissuras e outros defeitos internos.

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM [27], ISO [28], BS [29] e RILEM [30].

3.4.3.1.1 Instrumentação

Os principais componentes dos aparelhos de medição de ultra-sons mais recentes, são os transdutores de transmissão e de recepção. Estes transdutores possuem

elementos piezométricos de cerâmica. Este material piezométrico muda de dimensão quando lhe é aplicada uma determinada tensão (voltagem), ou produzem uma mudança de tensão, quando se deformam. Para se aplicar uma grande tensão ao transdutor de transmissão (fonte emissora) é utilizada uma vibração. Esta tensão faz com que o transdutor vibre na sua frequência natural. A vibração do transmissor produz um impulso de pressão que se propaga pelo elemento a ensaiar. Ao mesmo tempo que a tensão é gerada, é colocado em acção um relógio electrónico. Quando o impulso chega ao receptor, a vibração muda para um sinal de tensão que desliga o relógio, simultaneamente é apresentado o tempo gasto. Os requisitos dos aparelhos de medição por ultra-sons estão devidamente apresentados na norma ASTM C 597/1983.

Os transdutores são ligados à superfície de betão, utilizando um material viscoso. Por vezes, quando se pretende preservar o aspecto da superfície, utiliza-se um gel ultra-sónico, que não suja nem mancha.

Neste ensaio podem ser utilizados vários tipos de transdutores, fazendo variar as frequências ressonantes, sendo os de 50 kHz os mais comuns. Como exemplo podemos dizer que, para o betão, são utilizados transdutores de baixa frequência (20 kHz), enquanto se utilizam os de alta frequência, quando temos necessidade de uma medição mais correcta.

3.4.3.2 Ensaio de Eco Ultra-sónico

Uma das desvantagens do método de transmissão contínua é a necessidade de se ter acesso às duas faces do elemento a ensaiar, bem como a necessidade de ter informação no local (profundidade) da anomalia detectada. Estas limitações podem ser superadas utilizando os métodos baseados no eco, em que o ensaio é realizado numa só superfície da estrutura.

No método pulse-echo (denominação em inglês, pelo qual é conhecido), aplica-se um impulso, através de um transmissor de pressão, numa determinada superfície acessível. O impulso propaga-se no dito elemento, sendo reflectido pela existência de fendas ou interface. A resposta de superfície, provocada pela chegada das ondas reflectidas, ou ecos, é monitorizada pelo mesmo transdutor, que também actua como receptor. Esta técnica está ilustrada na Figura 3.15.

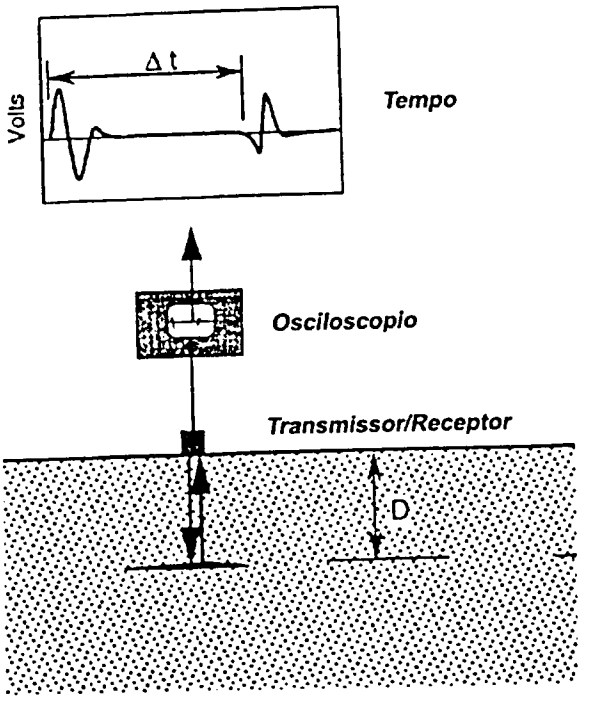


Figura 3.15 - Esquema do Método Eco Ultra-sónico (pulse-echo) [23]

Os resultados são indicados através de um osciloscópio, por meio de uma onda no domínio do tempo. O tempo pode ser obtido através da citada onda, determinando-o desde o início da transmissão do impulso, até à recepção do eco. Se se conhecer a velocidade de propagação de onda do material, esse tempo pode ser utilizado para a determinação da profundidade de interface de reflexão.

3.4.3.2.1 Instrumentação

Os componentes principais de um sistema de teste são o transdutor de transmissão e de recepção, o vibrador e o osciloscópio. Para ensaios no betão são indicados os transdutores que recebam e transmitam ondas de baixa frequência (≈ 200 kHz), e pequena duração. Recentes avanços tecnológicos levaram ao aperfeiçoamento dos transdutores, mas a sua profundidade de penetração está limitada a 250 mm [23].

3.4.3.3 Ensaio de Impulso Mecânico

Os procedimentos para a realização do ensaio de impulso mecânico são idênticos aos do ensaio de ultra-sons. A grande diferença é que são indicados para a avaliação de paredes de alvenaria, uma vez que os impulsos gerados mecanicamente têm frequências compatíveis com o tipo de estrutura em causa.

O impulso mecânico permite a análise de elementos estruturais de grande espessura. No entanto, esta técnica apenas permite uma caracterização global do material, isto é, não se consegue definir com exactidão as dimensões, nem identificar o tipo de danos.

3.4.3.4 Impacto Eco

O fundamento do ensaio consiste na introdução de uma perturbação elástica, através de um impacto mecânico de uma esfera, na superfície do elemento estrutural.

As ondas P e S, produzidas pela propagação do impulso de pressão, propagam-se através do elemento, a partir do ponto de impacto. As ondas são reflectidas pelas interfaces internas ou pelos limites externos do elemento. A chegada das ondas reflectidas, ou ecos, à superfície onde foi gerado o impulso, produz deslocamentos, que são determinados (medidos) por um transdutor de recepção, localizado junto à zona de impacto, e posteriormente gravados, utilizando um sistema de aquisição de dados.

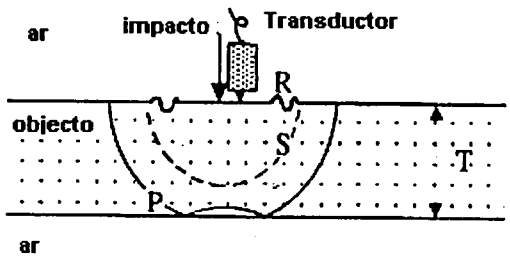


Figura 3.16 - Esquema do Método Impacto Eco [23]

Este método revela-se eficaz na determinação da espessura e localização de fendas em vigas, pilares e elementos cilíndricos ocos, na determinação da qualidade na ligação entre camadas de betão e na medição da profundidade de fendas [23].

Para elementos estruturais pouco espessos, tais como lajes e paredes, pode-se recorrer à análise no domínio do tempo, mas tem de se utilizar impactos de curta duração. No entanto, e uma vez que o tempo de propagação de onda é diminuto, pode existir uma grande dificuldade de análise, que depende sobretudo da geometria da estrutura [31].

Na análise de frequência, o sinal no domínio do tempo é convertido ao domínio da frequência, utilizando o método rápido da transformada de Fourier. O resultado é um espectro de amplitude que indica a amplitude da frequência dos vários componentes, nos diversos tipos de onda. A frequência correspondente á chegada das várias

reflexões do impulso de pressão inicial, é evidenciada por um "pico" no espectro de amplitude. Para estruturas tipo laje, (para valores correctos da espessura, a velocidade da onda P deve ser multiplicada por 0.96 [32]), a relação entre a distância T até à superfície de reflexão, a velocidade de onda P, v_P e a frequência de espessura, f, é dada por:

$$T = \frac{v_P}{2f} \qquad \text{(Equação 3.8)}$$

Este ensaio encontra-se normalizado: ASTM C 1383-98.

3.4.3.4.1 Instrumentação

O esquema de teste do método Impacto Eco é composto por três componentes: a fonte de impacto, um transdutor de recepção e um sistema de aquisição de dados.

A escolha do tipo de impacto é um aspecto crítico para se obter um ensaio com sucesso.

A duração do impacto, influencia a frequência do impulso de pressão gerado por este impacto e determina qual a menor dimensão da fenda que pode ser calculada. Se a duração do impacto for curta, são geradas componentes de maior frequência.

As esferas de aço podem ter diâmetros que variam entre 2 e 15 mm, gerando frequências superiores a 100 KHz e a 15 KHz, respectivamente.

O sistema de aquisição de dados é utilizado para captar a informação proveniente do transdutor, armazena os tipos de onda digitalizados, calcula e efectua a análise do sinal.

3.4.3.5 Ensaio Sónico (Cross-Hole)

Este ensaio consiste na geração de impulsos sónicos e no seu registo, medindo-se o tempo de propagação do sinal, determinando-se a velocidade através da Equação 3.6.

Os fundamentos deste teste são idênticos ao do ensaio, com o mesmo nome, utilizado para avaliar a integridade das estacas.

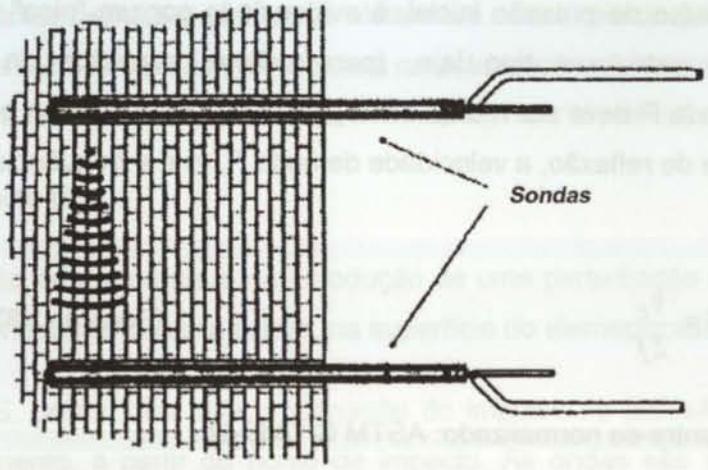


Figura 3.17 - Esquema do Ensaio Sónico, realizado numa parede de alvenaria [23]

Uma das vantagens é que permite uma análise em profundidade do elemento estrutural. Para se proceder ao ensaio há a necessidade de se executarem dois furos no elemento estrutural (ver Figura 3.17). Por isso, é considerado como um ensaio semi-destrutivo. Outra consequência da necessidade de furar a estrutura é a de evitar a sua realização em paredes pouco espessas ou de fraca rigidez, pois existe o risco de provocar a sua destruição.

A distância entre o emissor e o receptor está relacionada com a dimensão e a composição do elemento.

3.4.3.6 Tomografia Sónica

Os fundamentos deste ensaio são idênticos aos do ensaio sónico. A grande diferença está no processamento e análise dos resultados, provenientes da propagação das ondas sónicas. Assim, e de acordo com a Equação 3.1, pode-se relacionar os parâmetros elásticos do material (E e ν), com os valores da velocidade de propagação das ondas. Consegue-se, através deste ensaio, definir um mapa detalhado da distribuição da velocidade do som, numa determinada secção plana da estrutura. Aliás a palavra tomografia tem origem na palavra grega "tómos" que significa pedaço cortado. Este mapa permite detectar o estado de conservação do elemento estrutural, analisando a sua morfologia e a presença de heterogeneidades no seu interior, nomeadamente as zonas deterioradas, que correspondem às zonas onde a velocidade de propagação do som é baixa.

A velocidades baixas (v < 2500 m/s), corresponde um material com más características resistentes, descontínuo e com muitos vazios, enquanto que a velocidades altas (v > 5000 m/s), corresponde um material que poderá apresentar descontinuidades, mas que a sua presença pode ser desprezada, encontrando-se em bom estado de conservação.

Este ensaio inicialmente foi desenvolvido para a análise de elementos de betão, mas nos últimos anos tem sido muito usado na análise de alvenarias e estruturas de madeira, nomeadamente em estruturas antigas de grande valor histórico.

Outra das utilidades do método é o controlo de qualidade de intervenções de reforço, nomeadamente naquelas que envolvem a injecção de calda para consolidação do material, através da comparação dos mapas de velocidade antes e após a operação de reforço estrutural (Figura 3.18). Nesta figura pode-se comparar o mapa de velocidades de uma secção de uma parede de alvenaria. À direita surge o mapa de velocidades na condição inicial, no centro após a operação de reforço, que consistiu na injecção de calda, e na direita a percentagem de incremento da velocidade. Note-se que a cor amarela significa que se tratam de zonas de velocidade baixa e que a vermelho são zonas de velocidade alta. Por outro lado refira-se que o maior incremento de velocidade se deu nas zonas com velocidade menor.

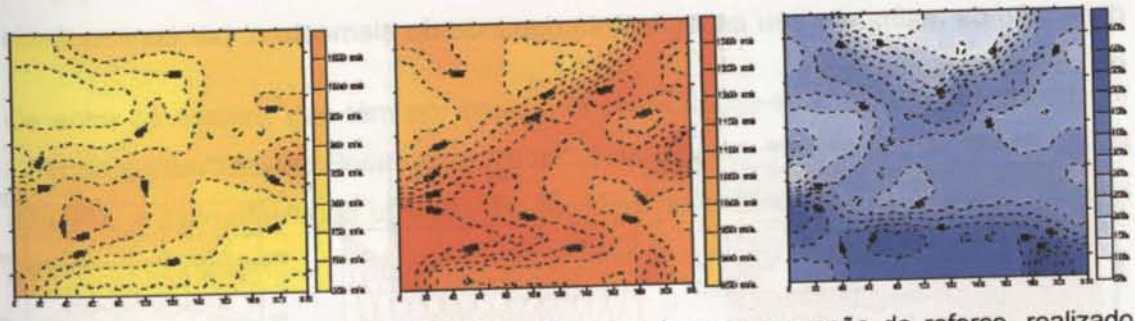


Figura 3.18 - Ensaio Tomografia Sónica: antes e após uma operação de reforço, realizado numa parede de alvenaria [34]

Foram realizados aperfeiçoamentos nesta técnica, através do registo e análise das características de amplitude e frequência do sinal transmitido. A este processo dá-se o nome de tomografia para atenuação, e os resultados obtidos incrementam a qualidade e confiança deste teste [15].

A maior limitação deste método tem a ver com o processamento e análise dos resultados obtidos, o que restringe a sua aplicação apenas a instituições que se especializaram com a técnica, o que faz com que a sua realização tenha custos muito elevados.

3.4.3.6.1 Instrumentação

O equipamento para realizar este teste consiste num martelo de impacto, para iniciar as ondas de compressão e transdutores de recepção, para medir as vibrações do elemento a ensaiar.

Figura 3.19 - Ensaio Tomografia Sónica: Impacto com o martelo em parede de alvenaria [19]

O tipo de martelo utilizado é função do elemento a ensaiar, de acordo com a sua superfície e com a energia e frequência de impulso desejada.

O martelo e o transdutor devem ser ligados a um amplificador e a um conversor de sinal (analógico para digital), por sua vez ligado a um computador portátil, de forma a se obter, em tempo real a informação.

A secção da estrutura a ser investigada deve ser dividida numa malha, onde se colocam os transdutores de recepção de sinal. Para se obterem melhores resultados é importante que os percursos estejam uniformemente distribuídos pela secção. A dimensão da malha e o seu espaçamento depende do elemento e, por consequência do comprimento de onda.

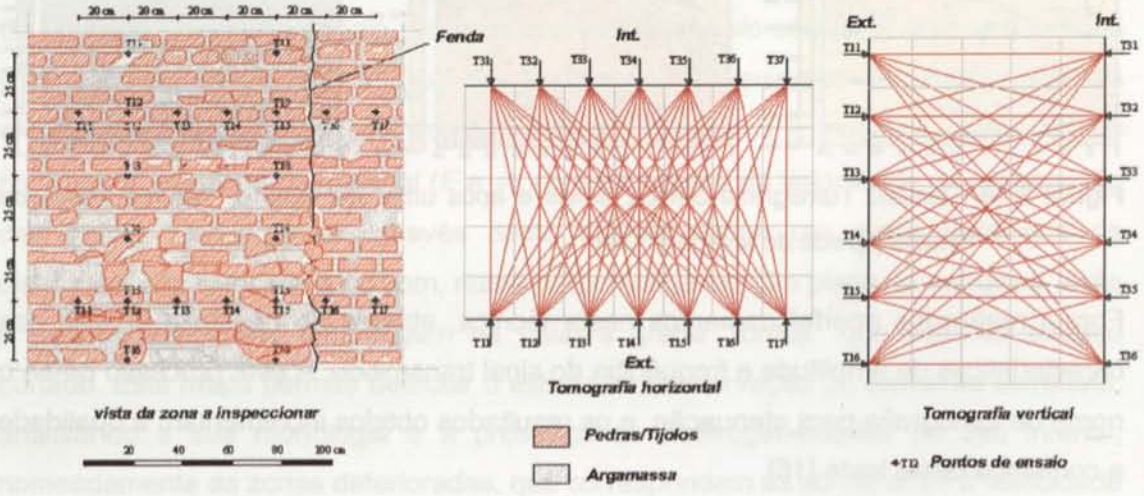


Figura 3.20 - Ensaio Tomografia Sónica: Malha de transdutores de recepção (horizontal e vertical) [34]

3.4.4 Radar

A palavra radar provem do nome " Radio Detection and Ranging". A técnica utilizada neste método é análoga à técnica utilizada no método do Eco Ultra-Sónico, discutida neste Capítulo. A diferença é que são utilizadas as ondas electromagnéticas (ondas rádio ou microondas), em vez de ondas de sónicas. Das aplicações desta técnica na Engenharia Civil, constam, para além detecção das heterogeneidades internas, idênticas ao método do Eco Ultra-Sónico, a detecção de elementos metálicos, quer no interior de paredes de alvenaria quer de armaduras em elemento de betão armado, e a caracterização do tipo de ligações entre os vários elementos estruturais.

A técnica de ensaio consiste na utilização de ondas electromagnéticas de alta frequência (100MHz a 1GHz) a partir de impulsos muitos curtos (0,5 a 1 μs) emitidos através de uma antena. As ondas de reflexão, geradas em superfícies de separação de materiais com constantes dieléctricas diferentes, são recebidas e registadas por um receptor.

De entre as vantagens mais interessantes desta tecnologia estão: a facilidade de penetração em camadas interiores dos elementos, a detecção das condições não visíveis, a facilidade na pesquisa de grandes superfícies, em curtos períodos de tempo e a grande sensibilidade em relação à humidade interna e à presença de elementos de metal embebidos.

De entre os ensaios que têm por base esta técnica, cite-se o ensaio designado por GPR do inglês "*Ground Penetrating Radar*". Neste ponto, referem-se os fundamentos do GPR, a instrumentação utilizada, as técnicas de análise de resultados e algumas limitações inerentes.

Os fundamentos de realização do GPR, estão ilustrados na Figura 3.21. Uma antena transmite pequenas vibrações, de origem electromagnética, que penetram no material alvo da inspecção.

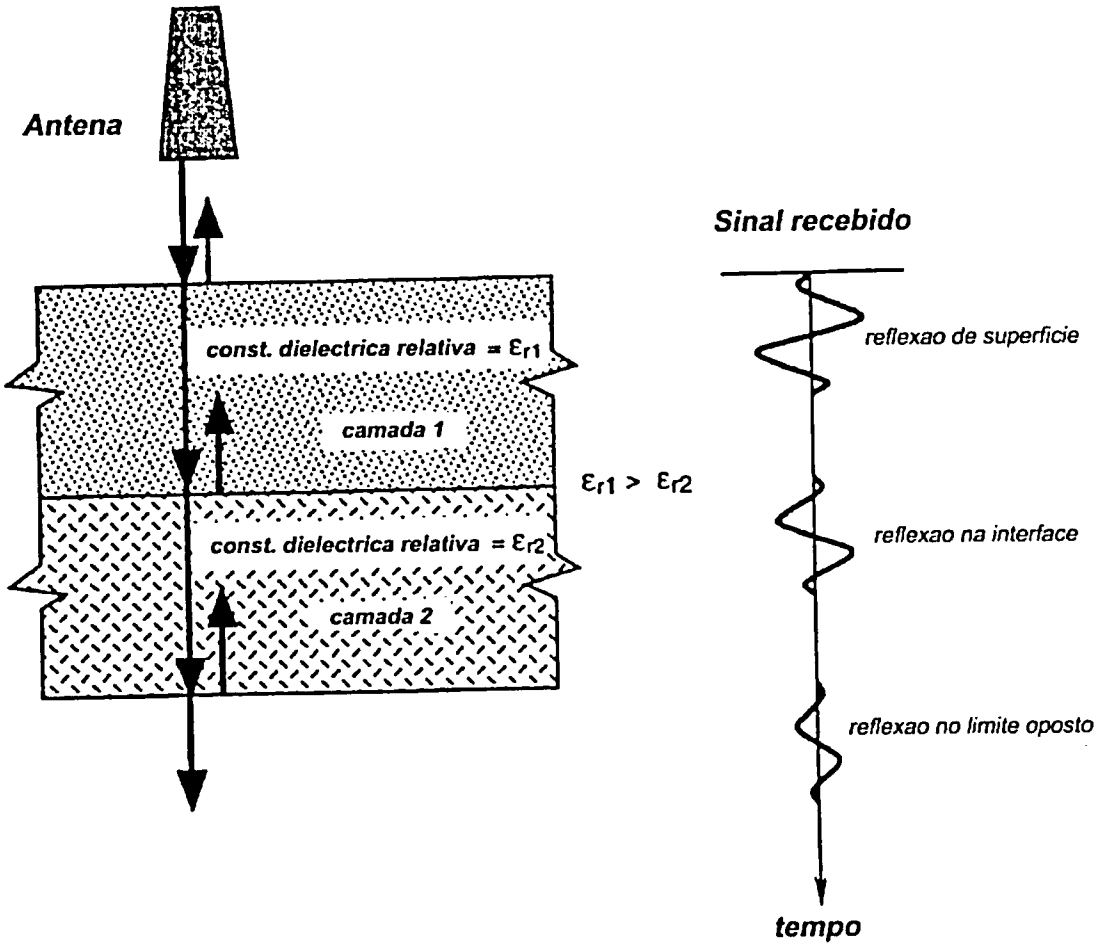


Figura 3.21 - Ensaio GPR: impulsos de radiação electromagnética na interface entre materiais, com constantes dieléctricas diferentes [23]

A teoria de propagação de ondas electromagnéticas é complicada. Apresenta-se, de uma forma simplificada, e com base nas aplicações correntes em Engenharia Civil, as principais propriedades materiais que afectam a energia, transmitida e reflectida: a constante dieléctrica e a condutividade. Os materiais com interesse para aplicação do GPR, com a excepção dos metais, são dieléctricos de baixa perda. A constante dieléctrica de um determinado material, também designada por permitividade dieléctrica, é o aumento de energia electrostática armazenada por unidade de volume, para um gradiente de potencial unitário. A condutividade eléctrica, recíproca de resistividade eléctrica, é uma medida que traduz a facilidade com que se produz corrente eléctrica para fluir através de um determinado material. A razão entre a constante dieléctrica de um material e a do ar livre, é definida como a constante dieléctrica relativa ε_R

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \qquad \text{(Equação 3.9)}$$

em que:

ε = constante dieléctrica, farad/metro;

ε_0 = constante dieléctrica do ar livre, que é $8{,}85x10^{-12}$, farad/metro.

Tabela 3.3 - Valor da constante eléctrica relativa ε_R, para alguns materiais de construção [23]

Material	Constante eléctrica relativa ε_R
Ar (*)	1
Betão (cimento Portland) (*)	6 a 11
Betão betuminoso (*)	3 a 5
Saibro/Cascalho (*)	5 a 9
Areia (*)	2 a 6
Rocha (*)	6 a 12
Água	80

(*) - Segundo a Norma ASTM D 4748

A constante dieléctrica relativa comanda a velocidade de uma onda electromagnética, num material específico. Para materiais de baixa perda, a velocidade das ondas electromagnéticas, *C*, é dada pela seguinte expressão:

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_R}} \qquad \text{(Equação 3.10)}$$

em que:

C_0 = velocidade da luz, no ar ($3x10^8$ m/s);

ε_R = constante dieléctrica relativa.

Uma análise dos diversos tipos de onda registados no domínio do tempo, permite a determinação da profundidade da interface de reflexão, assumindo que é conhecida a constante dieléctrica relativa. Essa profundidade obtém-se a partir da medição do tempo que demora o vai e vem, bem como a velocidade da onda electromagnética. Se esse tempo, para uma determinada vibração, for *t*, a profundidade *D*, será obtida por:

$$D = \frac{C_t}{2} \qquad \text{(Equação 3.11)}$$

O contraste, em termos de constante dieléctrica, permite determinar o aumento da energia reflectida na interface entre os dois materiais diferentes. Para materiais dieléctricos de baixa perda, a razão entre a amplitude, reflectida e incidente, do campo electromagnético (coeficiente de reflexão) é dada pela seguinte equação [23]:

$$\rho_{1,2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} \qquad \text{(Equação 3.12)}$$

em que:

$\rho 1,2$ = coeficiente de reflexão

ε_{r1} = constante dieléctrica relativa, do Material 1 (onda incidente)

ε_{r2} = constante dieléctrica relativa, do Material 2

A constante dieléctrica do um elemento é afectada pela natureza dos materiais, bem como pela quantidade de humidade. Por definição, a constante dieléctrica relativa ao ar é igual a 1 (ver Tabela 3.3). Note-se que a constante dieléctrica da água é muito maior do que os outros materiais referenciados. É por essa razão que a água dá um grande contributo dieléctrico, nos materiais de construção. Explica-se, também, o porquê do radar ser altamente sensível à humidade. À medida que a humidade aumenta, a constante dieléctrica do material, como por exemplo o betão, também aumenta.

Uma diferença importante entre o GPR e os métodos baseados em ondas mecânicas, como o Impacto Eco, é a amplitude das reflexões, num interface que contém ar. Para as ondas mecânicas, a reflexão é de quase 100 %, devido ao facto de a impedância acústica do ar ser desprezável, quando comparada com a de um material estrutural, como o betão. Por outro lado, o desequilíbrio de impedância nas constantes dieléctricas num interface ar - material não é tão drástica, e só 50% da energia incidente é reflectida na dita interface. Desta condição resulta uma diferença significativa entre os dois métodos. O GPR não é tão sensível à detecção de interfaces ar - material. No entanto, e uma vez que a energia não totalmente reflectida na interface, o GPR é capaz de penetrar por debaixo desse tipo de interface e analisar o que lá se passa.

A equação 3.12 mostra que, quando a constante dieléctrica do Material 2 é maior do que a do Material 1, o coeficiente de reflexão é negativo. Isto significa que uma fase inversa (troca de polaridade) de uma onda reflectida, o que quer dizer que a parte positiva da onda é reflectida como uma parte negativa (Figura 30). Numa interface de metal, tal como entre o betão e a armadura, existe uma reflexão completa e inverte-se a polaridade da onda reflectida. Este facto dá ao GPR uma grande eficácia na localização de metais embebidos, tais como as armaduras em elementos de betão. Por outro lado, grandes reflexões devido aos metais embebidos podem ofuscar reflexões mais fracas de outras interfaces de reflexão que possam existir. Do mesmo modo as armaduras podem "disfarçar" sinais provenientes de anomalias a maior profundidade.

O radar detecta o tempo de chegada e o grau de energia de uma vibração electromagnética. Uma vez que as propriedades das ondas electromagnéticas são afectadas pelas alterações nas propriedades dieléctricas, qualquer mudança no estado da estrutura, causará alteração no sinal. A informação é obtida pela observação do tempo de retorno, amplitude, forma e a polaridade do sinal.

3.4.4.1 Instrumentação

A instrumentação necessária à realização de ensaios tipo GPR, inclui os seguintes componentes principais: uma antena, uma unidade de controlo, um aparelho de visionamento e um aparelho de armazenamento de dados. A antena emite uma onda de vibração (impulso) electromagnética e recebe as reflexões. Para um determinado material, a profundidade de penetração e a resolução do GPR são função da frequência do impulso. As baixas frequências penetram em maior profundidade mas têm menos resolução, enquanto que as altas frequências fornecem maior detalhe, mas têm menor profundidade de penetração. Por exemplo, para uma antena com uma frequência nominal de 1GHz, a profundidade de penetração no betão é de cerca de 400 mm [23].

A unidade de controlo é o "coração" do sistema GPR. Controla a repetição de frequência de impulso, fornece a força para emitir o impulso, obtém e amplifica o sinal recebido e fornece saídas para um aparelho de visionamento. Os dados são normalmente armazenados num gravador analógico ou num aparelho de armazenamento digital para posterior análise e interpretação.

Os aparelhos de visionamento incluem oscilógrafos que imprimem uma série de tipos de onda gravadas, a partir das quais é possível, imediatamente, observar as

alterações aos tipos de onda modelo. Está também disponível software que possui variados métodos de processamento de sinal, para ajudar à interpretação dos resultados obtidos, como, por exemplo, o visionamento através de cores diferentes em função da amplitude de sinal da polaridade [23].

Os sistemas GPR emitem impulsos continuamente, com um elevado grau de repetição (50 kHz). Por um lado, permite explorar os objectos de ensaio, por outro, resulta num enorme incremento de dados disponíveis. Como resultado, foram desenvolvidas variadas técnicas que empregam o processamento por computador.

Como já foi referido, os metais são um material de forte reflexão das ondas electromagnéticas. Esta característica, torna o GPR muito eficaz na localização de objectos metálicos. A presença de armaduras resulta em modelos característicos de saída de resultados, e torna mais fácil a sua localização.

Em consequência da complexidade que envolve os ensaios que utilizam o GPR, em estruturas de betão armado, não existem procedimentos de teste devidamente normalizados. No entanto, está a ser desenvolvida uma norma ASTM (Method D 4748) para determinar da espessura da camada superior de pavimentos com multicamadas. Essencialmente, a técnica envolve a medição do tempo que demora o impulso a percorrer a camada superior deste tipo de pavimentos, utilizando para tal, as relações do tipo das referidas nas equações 2.22 e 2.23. Os procedimentos, na norma ASTM D 4748, são baseados na utilização de uma antena específica (que não está em contacto com o elemento a ensaiar). O cálculo da profundidade depende do valor da constante dieléctrica relativa. Erros na sua determinação implicam a inexactidão dos resultados. A norma refere que, para uma interpretação correcta do sinal recebido, se deve recorrer a um profissional experiente.

Este método também se encontra descrito RILEM TC 127 - MS.D.3.

3.4.5 Resistografia

É uma técnica recente, utilizada na detecção de elementos metálicos no interior de paredes de alvenaria. A sua detecção é feita através da observação de anomalias no campo magnético gerado por um íman colocado da superfície da alvenaria. É uma técnica que apresenta algumas limitações, quer pelo facto de ser uma técnica pouco experimentada, quer pelo facto de só permitir a análise em zonas muito próximas da superfície. Acresce que só indica a presença de elementos metálicos (como, por exemplo, ligadores entre os blocos de pedra, ancoragens, pregagens e correntes) e

não a sua geometria.

3.4.6 Métodos baseados nas ondas mecânicas, para fundações profundas

3.4.6.1 Método do Eco Sónico

O procedimento deste método consiste na aplicação de um impacto, transmitido no topo da fundação, e na medição do tempo que demora a onda de choque, gerada pelo dito impacto, a percorrer toda a fundação e a ser reflectida até um transdutor (normalmente utiliza-se um acelerómetro) colocado no topo da fundação. O impulso é originado por uma marreta com um disparador electrónico. O tempo gasto no percurso, bem como o movimento vertical no topo da estaca, são gravados através de um osciloscópio ou por um aparelho de aquisição de dados digital.

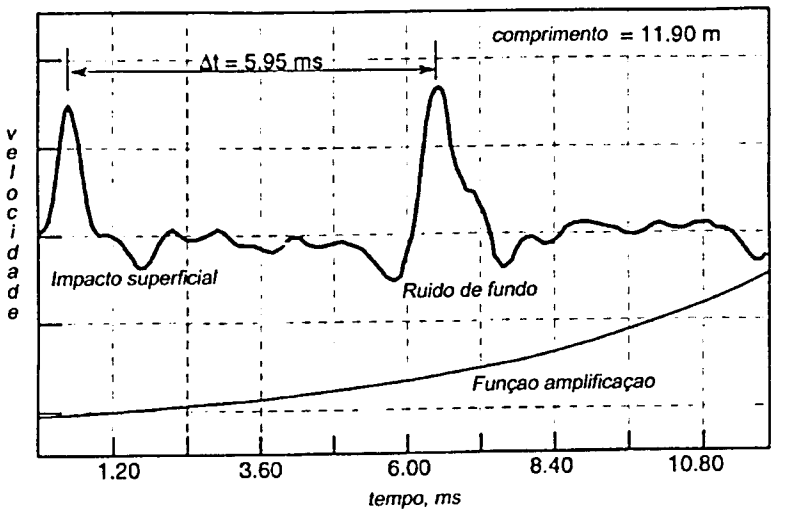


Figura 3.22 - Exemplo do resultado de um ensaio, utilizando o Método do Eco Sónico [23]

Se se conhecer o comprimento da fundação e o tempo que demora, desde a transmissão da onda de pressão até ao seu retorno, pode-se calcular a velocidade de onda. Reciprocamente, se conhecermos a velocidade, podemos deduzir o comprimento da fundação. Uma vez que a velocidade de onda de pressão é função do Módulo de Elasticidade dinâmico e da densidade do betão, o seu cálculo fornece a informação necessária sobre a qualidade do betão. Como a onda mecânica percorre todo o comprimento da fundação, estes cálculos baseiam-se na fórmula:

$$C_b = \frac{2L}{\Delta t} \qquad \text{(Equação 3.13)}$$

em que,

C_b = velocidade de onda, no betão;

L = comprimento da fundação;

Δt = tempo de transmissão das ondas de choque.

3.4.6.2 Método Impulso Resposta

Este método foi originalmente desenvolvido como um teste de vibração em estado estacionário, em que se aplica uma força controlada no topo da fundação, através de um gerador de frequência. A resposta vertical da fundação é gravada através de um transdutor de velocidade e a força exercida pelo vibrador é monitorizada continuamente.

O impulso na "cabeça" da estaca, produzido por uma pequena marreta, equipada com uma pequena célula de carga, gera uma onda de pressão com um vasto conteúdo de frequência, que pode variar entre 0 e 1000 Hz, para marretas de borracha macia ou entre 0 e 3000 Hz para marretas de meta. A célula de carga mede a força introduzida, enquanto que a resposta vertical na "cabeça" da estaca é monitorizada com um geofone [23].

Os sinais, em função do tempo, da força e da velocidade, são gravados por um aparelho digital de aquisição de dados, sendo processados, depois, através de um computador, utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier, para converter os resultados no domínio da frequência. A velocidade é então dividida pela força, para fornecer a unidade de resposta, ou função de transferência, que é apresentada através de um gráfico, em que se apresenta a mobilidade versus a frequência.

Na Figura 3.23, apresenta-se um exemplo de um gráfico da mobilidade de uma estaca. A curva de resposta, divide-se em duas partes, que contém a seguinte informação [23]:

- para frequências baixas (menores que 100 Hz), a falta do efeito de inércia, faz com que o conjunto estaca / solo se comporte como uma mola. Isto é evidenciado através do incremento linear em amplitude, a partir do zero,

com o aumento da frequência. O declive desta recta, no gráfico, é conhecido como a flexibilidade ou deformação. O inverso da flexibilidade é a rigidez dinâmica. Esta rigidez é uma propriedade do dito composto e pode, por isso, ser utilizada para avaliar estacas, a partir de uma base "comparativa" e até para estabelecer uma uniformização, ou ainda como uma ajuda para seleccionar uma estaca representativa para um ensaio de carga em larga escala, através de outros meios estáticos ou dinâmicos.

- a parte respeitante às frequências elevadas da curva de mobilidade, representa a ressonância longitudinal da estaca. As frequências dessas ressonâncias são função do comprimento da estaca e do seu grau de ancoragem, enquanto que a sua amplitude relativa é função do amortecimento lateral do solo. A diferença de frequência entre os dois picos adjacentes é constante e está relacionada com o comprimento da estaca e com a velocidade de onda do betão.

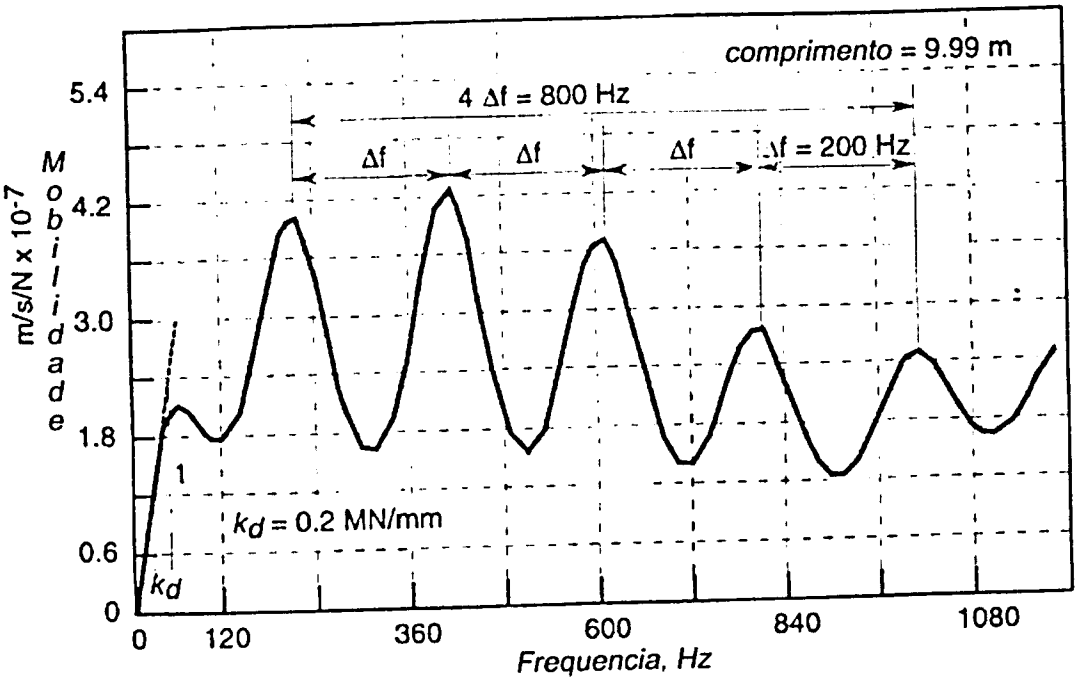


Figura 3.23 - Exemplo de um gráfico de Impulso Resposta, num ensaio de uma estaca [23]

Tal como no teste do eco sónico, quando se conhece o comprimento da estaca, uma redução clara na medição do comprimento, indica a presença de uma anomalia. Pode-

se obter informação adicional a partir deste gráfico de mobilidade / frequência, tal como, a secção transversal da estaca e a sua rigidez dinâmica.

3.4.6.3 Registo de Impedância

Este método resultou da combinação dos dois anteriores, em que a informação a partir da resposta amplificada, no domínio do tempo, proveniente do eco sónico, é combinada com a impedância característica da estaca, medida através do teste de mobilidade.

Não obstante a força aplicada na "cabeça" da estaca, pelos métodos de reflexão, seja temporária, a onda gerada não o é. Esta onda contém informações sobre as alterações na impedância da estaca, à medida que a percorre, sendo a informação reflectida até à "cabeça" da estaca. O reflectograma assim obtido, no teste do eco sónico, não pode ser quantificado. No entanto, é possível a partir de modernos aparelhos de gravação, modelar a onda de reflexão e as propriedades de impedância, a partir do ensaio das estacas. A medição da força e da velocidade de resposta é armazenada como dados com base no tempo, com um filtro extenso de banda de passagem e uma rígida amostragem. A resolução dos níveis de resposta, quer seja uma resposta fraca ou forte, é, por isso, favorecida.O reflectograma de uma estaca sem grandes defeitos (impedância nula) é equivalente a 100 % de reflexão, enquanto que uma estaca infinitamente comprida, sem defeitos, fornecerá reflexão nula.

Se, no entanto, o defeito ou o seu comprimento, se posicionarem a uma distância considerável da "cabeça" da estaca, a amplitude reflectida é reduzida, por amortecimento, no interior da estaca. Com condições de solo uniformes, a função de amortecimento tem a seguinte forma $e^{-\sigma L}$, em que L é o comprimento da estaca e σ é um factor de amortecimento. O reflectograma pode ser corrigido utilizando esta função de ampliação, para produzir uma resposta forte, através do comprimento total da estaca, tal como é usualmente utilizado no tratamento de dados do método eco sónico [23].

A Figura 3.24 mostra o exemplo de um reflectograma corrigido através deste método.

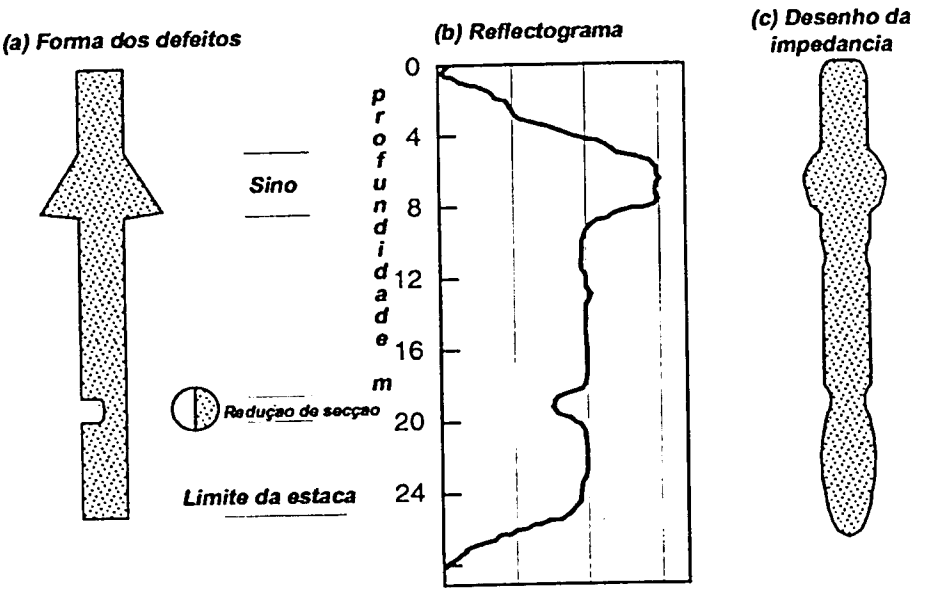


Figura 3.24 - (a) Defeitos planeados numa estaca experimental; (b) reflectograma obtido através do processamento de sinal de resultados do método do eco sónico; (c) desenho de impedância obtido pela combinação da informação obtida pelo reflectograma e a impedância característica obtida através da análise do método impulso resposta [23].

O equipamento de ensaio *in situ* deve possuir os seguintes requisitos [23]:

- a célula de carga do martelo, bem como o transdutor de velocidade ou acelerómetro, devem ser calibrados (no prazo máximo de 6 meses antes do ensaio);
- o sistema de aquisição e armazenamento de dados deve ser digital, para análise posterior;
- devem ser guardadas as respostas aos ensaios, quer no domínio do tempo, quer no domínio da frequência.

3.4.6.4 CrossHole - Método Sónico

Este método é indicado para superar as limitações de profundidade dos métodos eco sónicos e de mobilidade em estacas compridas e é utilizado em fundações de betão maciço e em paredes de alvenaria (ver ponto 3.4.2.5).

O método necessita de um determinado número de tubos de metal, ou de plástico, posicionados paralelamente ao elemento estrutural, antes da betonagem ou após a mesma. É colocado um transmissor no interior de um dos tubos, que emite um impulso sónico que será detectado por um receptor, colocado num segundo tubo. Através de uma unidade de gravação, é medido o tempo que demora o dito impulso, para passar pelo betão, entre os dois tubos. As sondas e os tubos devem ser cheios de água, para permitir a ligação entre as referidas sondas e o betão.

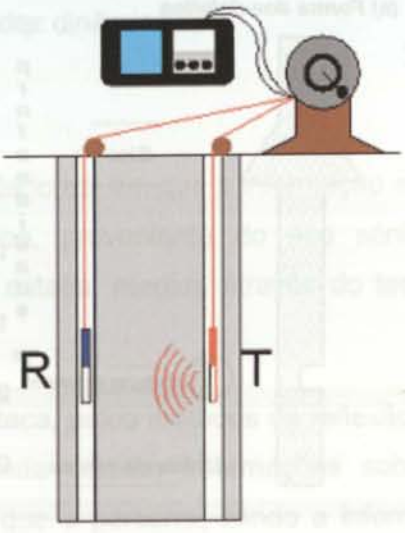


Figura 3.25 - Esquema do Ensaio CrossHole, em fundações profundas [adapt. www.idesweb.it]

Os cabos de ensaio são separados sobre uma roda instrumentada que mede o seu comprimento, e assim, a profundidade do ensaio. São feitas medições contínuas durante afastamento, através de oito incrementos espaçados entre 10 e 50 mm, fornecendo uma série de medições que podem ser imprimidas para fornecer um perfil vertical do material entre os tubos. A presença de defeitos ou danos é reconhecida pela ausência de sinal recepcionado.

A velocidade de impulso é função da densidade e da constante elástica dinâmica do betão. Se se conhecer o comprimento do sinal e o tempo de passagem do mesmo sinal, pode ser calculada a velocidade de impulso, de modo a aquilatar da qualidade do betão.

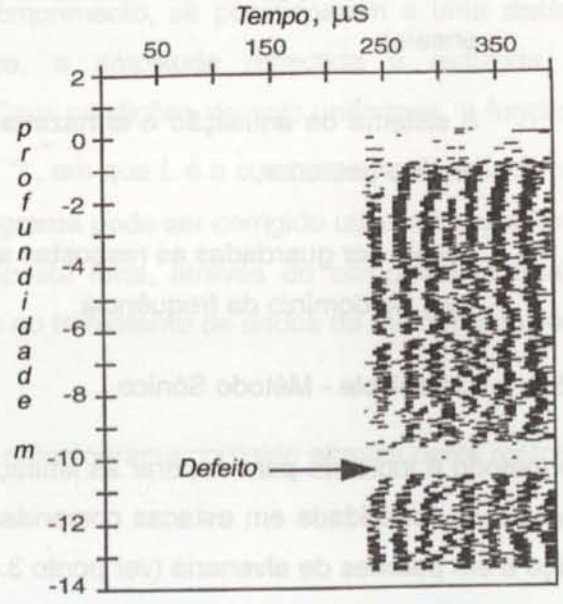


Figura 3.26 - Exemplo da saída de resultados, no Método CrossHole [23]

Este método fornece a medição directa do comprimento da fundação, e pode ser utilizado para avaliar a qualidade da interface entre a base da estaca e o substracto rochoso, se os furos de acesso assim o permitirem. A maior limitação do método é a necessidade de instalação dos tubos de acesso, antes ou após a betonagem. A maior vantagem é a de não ter limitações de profundidade, ao contrário dos métodos de reflexão superficial.

A informação obtida é limitada ao material entre os pares de tubos. Por consequência, os tubos devem ser posicionados tão próximo quanto o possível das estacas, para permitir a máxima cobertura do betão entre eles. Nenhuma informação será obtida, acerca da secção da estaca, fora da área coberta pelos tubos de acesso.

3.4.6.5 Método Parallel - Seismic

Qualquer dos métodos atrás referidos, depende do acesso à cabeça da estaca, e por isso, são mais fáceis de realizar durante a fase de construção, uma vez que, posteriormente, poderá ser impossível o acesso. Este método foi especialmente desenvolvido para situações que surgem após a construção da fundação ou para a avaliação de estruturas antigas, em que o acesso à cabeça da estaca já não é possível sem que se proceda a alguma demolição [35].

Os procedimentos de ensaio consistem na realização de um furo, de pequeno diâmetro, no solo, paralelo e o mais próximo possível da fundação a ser ensaiada. Este furo deve ser executado até à profundidade, estimada ou conhecida, da fundação, devendo ser envolvido por um tubo de plástico, para reter a água, que funciona como ligação acústica. Coloca-se uma sonda receptora acústica no cimo do tubo percutindo-se a estrutura, tão perto do topo da fundação quanto possível, com um martelo de gatilho (disparo). Os sinais, quer do martelo quer do receptor, são gravados numa unidade de aquisição de dados, como o tempo que a onda de choque provocada pelo impacto demora a percorrer a fundação e o solo adjacente, até à sonda receptora. Vai-se descendo a sonda, em pequenos incrementos uniformes, sendo o processo repetido para cada nível, com o impacto a ser executado no mesmo local, em cada novo procedimento. Os danos, entretanto gravados, são imprimidos num perfil vertical, registando-se cada onda, em função do tempo que demora a percorrer o percurso entre o local do impacto até cada posição ao longo do tubo de acesso (Figura 3.27).

A velocidade de onda será menor no solo que no betão. Se o tubo de acesso estiver, razoavelmente, paralelo à fundação, o efeito do solo, entre o tubo e a estaca será, efectivamente, constante. No entanto, o tempo aumentará em proporção ao incremento da profundidade da estaca. Quando o receptor passar o nível da base da fundação, o tempo de passagem do sinal será maior, devido à menor velocidade do solo interveniente, pelo que as linhas de ligação do sinal ao local de chegada, mostrarão uma descontinuidade diferente nessa cota. Do mesmo modo, qualquer descontinuidade significativa ou restrição na fundação forçará o sinal a ser desviado à sua volta, aumentando o comprimento do tempo de passagem.

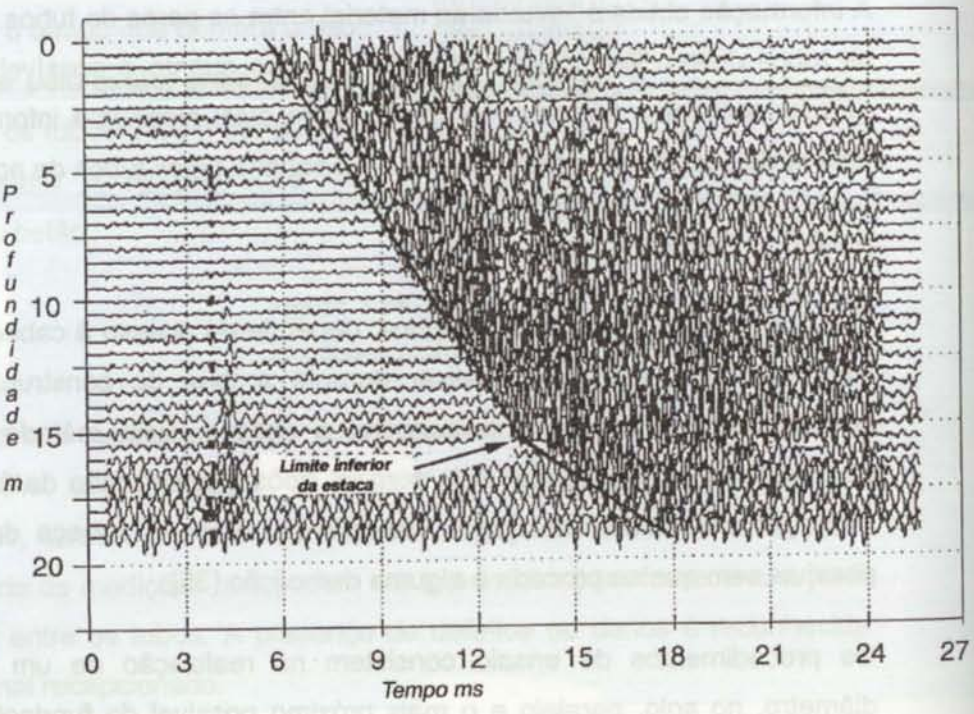


Figura 3.27 - Exemplo da saída de resultados obtidos pelo Método Parallel-seismic (a profundidade da estaca é indicada pela mudança do declive da linha que representa o tempo de chegada da onda de choque, em função da profundidade) [23]

O Quadro 3.4 resume as vantagens e desvantagens dos métodos de ondas mecânicas, para fundações profundas.

Quadro3.4 - Vantagens e desvantagens dos Métodos baseados em Ondas Mecânicas, para Fundações Profundas [23]

Método	Vantagens	Desvantagens
	Métodos de superfícies de Reflexão	
Eco Sónico	- Não necessita da pré-colocação de tubos de auxílio. - Equipamento portátil. - Rápido.	- Não mede diâmetros. - Não consegue determinar defeitos em estacas com mais de 30 m de comprimento ou que a relação L/d>30.
Impulso-Resposta (Mobilidade)	- Não necessita da pré-colocação de tubos de auxílio. - Equipamento portátil. - Rápido. - Mede a rigidez.	- Difícil interpretação dos resultados. - Limitação acerca do tipo de geometria das estacas a serem ensaiadas, tal como no método do eco sónico.
Registo da Impedância	- Tal como no teste da mobilidade, obtém-se a partir da análise dos resultados uma melhor facilidade para determinar a forma da estaca.	- Requer, para uma análise correcta, resultados do ensaio bem determinados. - Não se consegue fazer uma análise completa *in situ*, na altura do teste.
	Métodos de Transmissão Directa	
Registo sónico	- A detecção dos defeitos entre os tubos é mais exacta que nos testes de superfície de reflexão. - Os ensaios não estão limitados pela profundidade. - Relativamente rápido.	- É necessária a pré-colocação de tubos, ou então há necessidade de se proceder à execução de furos. - Pode não detectar defeitos junto aos bordos de uma estaca.
Paralell-seismic	- Podem ser ensaiadas fundações situadas sob estruturas existentes. - Não é afectado pelo amortecimento do solo, como nos testes de superfície de reflexão. - Relativamente rápido.	- Custo da realização dos furos adjacentes a cada fundação. - O sinal para na primeira anomalia, significativa, detectada. - Não se desvia de defeitos dos bordos. - da fundação.

3.4.7 Métodos Nucleares

Os métodos nucleares utilizados na inspecção não destrutiva de elementos estruturais, podem ser subdivididos em dois grupos principais: os métodos radiométricos e os métodos radiográficos [23]. Ambos envolvem a aquisição de dados dos elementos a ensaiar, com base na interacção entre a energia electromagnética de radiação e o material objecto de ensaio. Estes ensaios utilizam materiais radioactivos,

pelo que as equipas de ensaio necessitam de uma licença e de treino específicode segurança.

A radiometria permite a determinação da densidade do material, através da medição da intensidade de radiação electromagnética (raios gama) que passa através do elemento. A radiação, emitida por isótopos radioactivos, é medida por um detector apropriado. A esse detector converge a radiação, recebida sob a forma de impulsos eléctricos.

A radiografia envolve a utilização de radiação, que passa através do objecto de teste, para produzir uma "fotografia" da estrutura interna do betão. Normalmente, a fonte radioactiva é posicionada de um dos lados do elemento a ensaiar, colocando-se na face oposta um filme fotográfico especial, para a gravação da intensidade de radiação que passa através do objecto. Quanto maior for essa intensidade maior é a exposição ao filme. Este método é muito similar ao que se utiliza nos raios X, na medicina.

Os ensaios são utilizados, sobretudo em elementos de betão armado.

3.4.7.1 Transmissão directa de radiometria para determinação da densidade

As técnicas de transmissão directa podem ser utilizadas na detecção de armaduras. No entanto, o objectivo principal da aplicação desta técnica é a medição da densidade do betão. Os elementos estruturais onde esta técnica apresenta melhores resultados, são as estruturas espessas e de grande densidade.

A fonte de radiação é colocada num dos lados da estrutura do betão a ser ensaiada, e o detector é posicionado na outra face. Enquanto a radiação percorre a estrutura, ocorre a sua dispersão, em que parte é dispersa por electrões livres e uma pequena parte absorvida por átomos. Esta radiação depende da densidade do betão, enquanto que a porção que é absorvida depende da sua composição química [23]. Se o espaçamento dos detectores for constante, a redução (ou aumento) da densidade do betão, conduz a uma mudança na intensidade da radiação que é reflectida.

3.4.7.1.1 Instrumentação

Na Figura 3.28 ilustra a preparação da fonte de radiação e do detector para a medição directa, através de elementos de betão. A fonte de radiação aplicada são os isótopos radioactivos Césio - 137 (^{137}Cs). O detector mais comum é o tubo de Geiger - Müller, que produz impulsos eléctricos, assim que a radiação penetra no tubo. De entre os

detectores mais utilizados, destaque-se os cristais cintilantes, que convertem a radiação incidente em impulsos de luz.

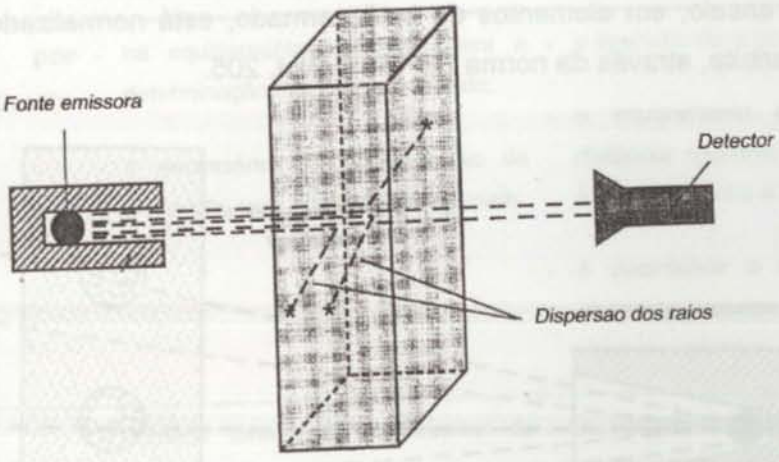


Figura 3.28 - Radiometria por transmissão directa com a fonte e o detector externos ao elemento de teste [23]

A norma ASTM C 1040 indica-nos os procedimentos a utilizar nos métodos nucleares, para medição da densidade *in situ*, do betão fresco ou endurecido. O elemento chave do processo é o desenvolvimento da curva de calibração do instrumento. É ainda referida a execução de ensaios em elementos com densidades distintas, ilustrando-se a medição de cada uma. Esta medição é determinada em função da densidade, calculando-se, de seguida, a curva de comportamento que melhor se adapta.

3.4.7.2 Radiografia

A radiografia permite a obtenção de uma imagem da radiação no interior de um elemento estrutural, baseando-se, para isso, no princípio de que os materiais mais densos impedem a passagem de radiação. A partir dessa imagem pode-se, por exemplo, localizar armaduras ou vazios no interior das peças de betão armado.

O emissor de radiação é colocado de um dos lados do elemento alvo de inspecção. É então emitido um feixe de radiação, que percorre o elemento. Esta é atenuada, dependendo da densidade e da espessura do material que é ensaiado. A radiação que chega ao lado oposto, penetra numa película fotográfica especial (ver Figura 3.29).

O filme é exposto, em proporção, à intensidade da radiação incidente. Quando se proceder à revelação do mesmo, obter-se-á uma imagem, a duas dimensões, do interior da estrutura. A presença de materiais de grande densidade, tais como, as

armaduras, é revelada na película através de uma zona mais iluminada, enquanto que as zonas de baixa densidade, tal como os vazios são identificadas por zonas escuras.

Este tipo de ensaio, em elementos de betão armado, está normalizado pela British Standards Institute, através da norma BS 1881: Part. 205.

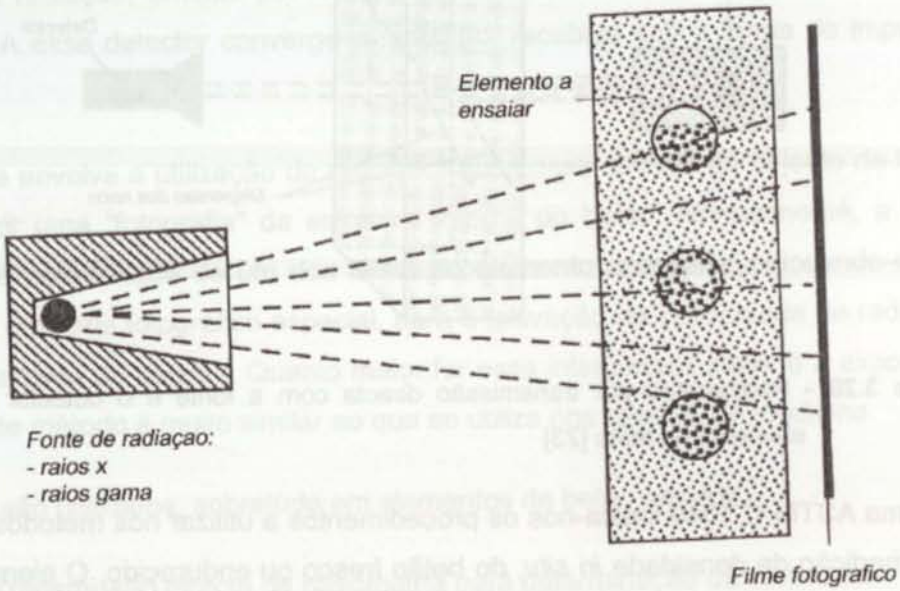


Figura 3.29 - Esquema da técnica de radiografia [23]

Nos ensaios que utilizam raios X, a radiação produz-se através de um tubo de raios X [36]. Na radiografia por raios gama, utiliza-se um isótopo radioactivo como fonte de radiação. A selecção do emissor depende da densidade e da espessura do elemento a ensaiar e do tempo de exposição que ele pode tolerar. A fonte de medição mais intensa é o Cobalto - 60 (^{60}Co), que pode ser utilizado para penetrar em elementos de betão com 500 mm de espessura. Para espessuras menores que 150 mm, utiliza-se o Irídio - 192 (^{192}Ir) ou o Césio - 137 (^{137}Cs) [36]. O tipo de película a utilizar também depende da espessura e da densidade do elemento a ensaiar.

3.4.7.3 Vantagens e Limitações dos Métodos Nucleares

O Quadro 3.5 resume as vantagens e desvantagens dos métodos nucleares.

Quadro 3.5 - Vantagens e desvantagens dos Métodos Nucleares

Método	Vantagens	Desvantagens
Radiometria por transmissão directa	- há equipamentos portáteis para a determinação *in situ* da densidade; - é necessário um equipamento de protecção para o operador de ensaio.	- o operador deve possuir uma licença; - o equipamento disponível só permite distância menores que 300mm, entre a fonte emissora e a receptora. - é necessário o acesso ao interior do elemento (ensaios em betão fresco) ou às duas superfícies.
Radiografia	- fornece uma visão do interior da estrutura a inspeccionar.	- o operador deve possuir uma licença e deve estar devidamente protegido; - o equipamento disponível é volumoso e caro; - é difícil identificar fendas perpendiculares ao feixe de radiação; - o ensaio por raios gama estão limitados ao ensaio de elementos com espessuras menores que 500 mm.

Na radiometria por transmissão directa, o equipamento é relativamente fácil de ser transportado, tornando possível a sua utilização *in situ*. No mercado, os equipamentos disponíveis requerem que o afastamento entre a fonte emissora e a fonte receptora seja de, no máximo, 300 mm. Além disso, esses equipamentos medem uma densidade média entre o emissor e o receptor, colocado à superfície. Não estão, assim, aptos a identificar zonas de menor compactação, a determinadas profundidades. Todas as técnicas utilizadas nos ensaios em betão fresco, têm outras desvantagens, pois necessitam da imersão da sonda no elemento, que pode influenciar, localmente, o betão que será ensaiado. Os resultados do teste podem ser afectados pela presença de armaduras, se estas estiverem localizadas próximo do percurso entre a fonte emissora e o detector.

Os métodos radiográficos permitem visualizar parte da estrutura interna de um elemento de betão, quando existe uma variação de densidade. Embora as fontes emissoras de raios gama e de raios X possam ser utilizadas na radiografia, o equipamento de raios X é, comparativamente, mais caro e mais incómodo na sua aplicação *in situ*. Por isso, os aparelhos de raios gama são mais utilizados. No entanto, o equipamento de raios X tem a vantagem de se desligar, enquanto não estiver a ser utilizado. Pelo contrário, o de raios gama emite continuamente, sendo que é necessária a utilização de equipamento pesado para a protecção das pessoas envolvidas no ensaio. Além disso, os equipamentos de raios X podem produzir mais energia de radiação do que outras fontes radioactivas, o que permite a inspecção de elementos espessos ou o seu uso em curtos períodos de tempo de exposição.

A aplicação de todos estes métodos nucleares é segura. Em geral, as pessoas que aplicam estes métodos devem possuir uma licença especial. O ensaio da totalidade da espessura de um elemento de betão, é particularmente perigoso e requer grandes medidas de protecção. Os técnicos devem estar devidamente protegido. O equipamento é altamente especializado. Os procedimentos radiográficos são caros e é necessária a evacuação da estrutura, por parte de todos os elementos estranhos ao ensaio. A utilização de equipamentos de raio X provoca um perigo adicional devido à grande voltagem que é utilizada. Existem limites à espessura dos elementos de betão, alvos de ensaio. Para radiografia com raios gama, a máxima espessura a ensaiar é de 500 mm, pois elementos espessos requerem um grande tempo de exposição, o que torna inviável a sua utilização. A radiografia não é muito eficaz na localização de fendas perpendiculares ao feixe de radiação.

3.4.8 Métodos Electromagnéticos

Quando se avaliam/inspeccionam estruturas de betão armado, é necessário conhecer a localização, a disposição e a quantidade de armaduras presentes. Por outro lado, quando as condições de serviço, bem como a segurança estrutural da estrutura está em risco, deve-se, em complemento, conhecer a actividade de corrosão das armaduras, para aquilatar da necessidade de aplicação de acções curativas. Nesta secção referem-se alguns dos métodos magnéticos e dos métodos eléctricos, utilizados nos END, de modo a ser obtida informação acerca do tipo e das condições das armaduras em elementos de betão armado [23]. Os pacómetros (*covermeter* é o termo utilizado na bibliografia inglesa) são aparelhos aptos a localizar as armaduras, bem como a estimar o recobrimento das mesmas. Utilizando a técnica designada por

potencial de meia-célula podemos monitorizar a actividade de corrosão. Os métodos de polarização linear dão-nos informação sobre o grau de corrosão das armaduras.

3.4.8.1 Pacómetros

Os pacómetros permitem a determinação da profundidade de recobrimento das armaduras, através da monitorização da interacção entre elas, entre outros procedimentos. Na maior parte dos pacómetros, essa interacção realiza-se entre as armaduras e a frequência do campo electromagnético. A relação base entre a electricidade e o magnetismo é a chave para o conhecimento acerca do funcionamento dos pacómetros. Um dos princípios mais importantes é a indução electromagnética. Significa que um campo magnético alternativo intersecta um circuito eléctrico, induzindo um potencial eléctrico nesse circuito. Segundo a Lei de Faraday, o potencial eléctrico induzido é proporcional ao grau de alteração do fluxo magnético, através da área confinada pelo circuito [23].

Os pacómetros comercializados, podem ser divididos em duas classes:

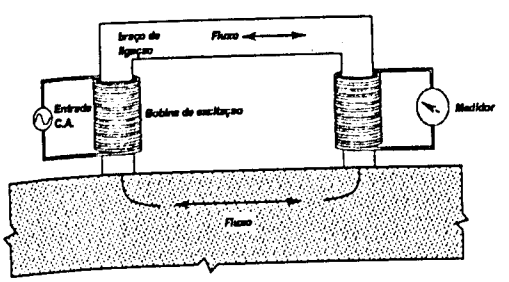
- os que são baseados no princípio da relutância magnética; e
- os que são baseados nas correntes parasitas.

As principais diferenças são sintetizadas de seguida ([37]:

3.4.8.1.1 Métodos baseados no Princípio da Relutância Magnética

Quando uma corrente percorre uma bobina eléctrica, cria-se um campo magnético, passando a existir um fluxo de linhas magnéticas entre os pólos magnéticos. Isto faz com que se crie um circuito, no qual o fluxo, entre os pólos é análogo ao fluxo de corrente num circuito eléctrico. A resistência ao fluxo magnético denomina-se *relutância*, e é análoga à resistência ao fluxo de corrente, num circuito eléctrico.

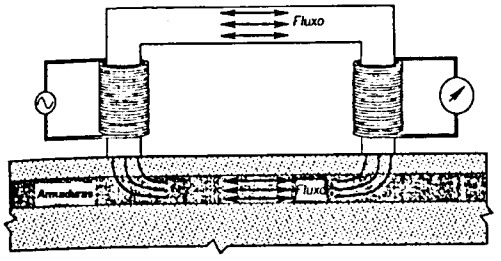
Na Figura 3.30 apresenta-se um esquema de um pacómetro baseado nas alterações da relutância de um circuito magnético, devidas à presença ou ausência de armaduras na sua vizinhança.



a)

Este pacómetro é composto por um braço ferromagnético de ligação, por uma bobina de excitação e por uma bobina de captação de dados. Quando se aplica uma corrente alternada (menos de 100 Hz) à bobina de excitação, é criado um campo magnético alternativo, e o fluxo magnético percorre os pólos do braço. Na ausência de armaduras (Figura 3.30a), o circuito magnético, composto pelo braço ferromagnético e pelo betão, possui uma

relutância alta, pelo que o fluxo magnético alternativo entre os dois pólos é pequeno. O fluxo alternativo induz uma pequena (secundária) corrente na bobina de captação de dados. Se estamos na presença de armaduras (Figura 3.30b) a relutância diminui, a amplitude do fluxo magnético aumenta, assim como a corrente na bobina de captação de dados. Por isso a presença de armaduras é assinalada pela alteração na saída de dados, na bobina respectiva.



b)

Figura 3.30 a) e b) - Pacómetros baseados no princípio da relutância magnética [37]

Para uma dada armadura, a relutância dos circuitos magnéticos depende essencialmente da distância entre a mesma e os pólos do braço de teste. O aumento do recobrimento, incrementa a relutância e reduz a corrente na bobina de captação de dados. Se o medidor de corrente for calibrado em função do recobrimento, estabelece-se uma relação de calibração, que pode ser utilizada na medição do dito recobrimento.

Uma vez que a dimensão da armadura afecta a relutância do circuito magnético, existe uma relação independente para cada diâmetro de armadura.

3.4.8.1.2 Métodos baseados no Princípio da Corrente Parasita

Se a bobina transportar uma corrente alternativa próximo de um condutor eléctrico, a alteração do campo magnético induz a circulação de correntes no dito condutor, denominadas *correntes parasitas*. Como qualquer fluxo de corrente dá lugar a um campo magnético, as correntes parasitas produzem um campo magnético secundário que interage com o da bobina. Este tipo de pacómetros é baseado na monitorização dos efeitos que estas correntes parasitas induzem nas armaduras. Há duas categorias

de medidores de corrente parasita: um é baseado na excitação contínua da bobina, através de corrente alternada (normalmente com 1 kHz) e o outro é baseado na sobreexcitação da vibração.

Na Figura 3.31 está descrito, esquematicamente, um pacómetro de corrente parasita contínua. Na ausência de armaduras, a intensidade da corrente alterna na bobina depende da sua impedância. Se a bobina está colocada junto à armadura, a corrente parasita alterna é estabelecida dentro da superfície da armadura.

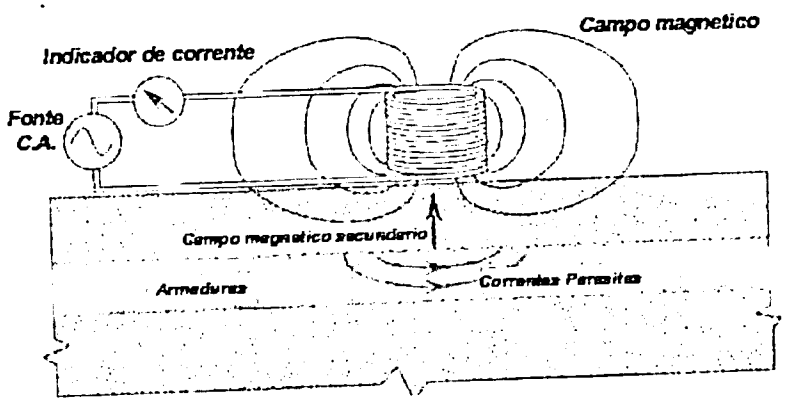


Figura 3.31 - Pacómetro baseado no Princípio da Corrente Parasita [37]

3.4.8.1.3 Limitações

As armaduras são detectadas pelos pacómetros, quando estes se encontram na sua zona de influência. A resposta é máxima quando a sonda se encontra por cima da armadura. Uma das características principais dos pacómetros, é a relação entre o medidor de amplitude e a distância, na horizontal, entre o centro da armadura e o centro da sonda ou aparelho de pesquisa.

Uma das maiores diferenças entre os dois tipos de pacómetros, é a direcção de pesquisa das sondas. Devido à forma do braço, o medidor de relutância magnética é comparado, directamente, com o medidor de corrente parasita contínua, através de uma bobina simétrica. Como já se referiu, a resposta com mais intensidade ocorre quando a sonda está sobre a armadura.

3.4.8.2 Método do Potencial de Meia Célula

Os métodos eléctricos são utilizados para avaliar a actividade de corrosão das armaduras. Como noutros métodos utilizados nos END, é essencial o conhecimento

dos princípios fundamentais deste método para a obtenção de resultados relevantes. Em complemento, deve-se compreender todos os factores envolvidos no mecanismo da corrosão, para se poder interpretar com confiança e segurança os resultados obtidos. Nesta secção será referida a informação necessária acerca deste teste. No entanto, os ensaios, bem como a interpretação dos resultados, devem ser realizados por pessoas experientes.

O método do potencial de meia célula é utilizado para descrever as zonas de uma determinada estrutura, onde existe uma forte probabilidade de ocorrer a actividade de corrosão.

3.4.8.2.1 Princípios

A corrosão é um processo electromecânico que envolve fluxos de cargas (electrões e iões). Em zonas activas da armadura, designadas por ânodos, átomos de ferro perdem electrões e deslocam-se para o betão que o circunda, como iões de ferro. Este processo é denominado por reacção de oxidação de meia célula, ou de reacção anódica de redução e é representado por:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

Os electrões que permanecem na armadura deslocam-se para locais designados por cátodos, onde se combinam com a água e o oxigénio presentes no betão. A reacção nos cátodos é designada por reacção de redução, e é representada por:

$$2H_2O + O_2 + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$$

Para manter a neutralidade eléctrica, os iões ferrosos migram, através do betão, para estes locais catódicos, onde se combinam para formar um óxido de ferro hidratado, mais conhecido por ferrugem. Por isso, quando a armadura está corroída, os electrões passam para a armadura e os iões passam para o betão. Quando a armadura não está corroída, não há este fluxo de electrões e iões.

Enquanto os iões de ferro se deslocam para o betão circundante, os electrões deixados para trás na armadura, fornecem-lhe carga negativa. O método do potencial de meia célula é utilizado para detectar esta carga e, por este meio, para fornecer indicações sobre a actividade de corrosão.

3.4.8.2.2 Instrumentação

As regras para a aplicação deste método estão descritas na norma ASTM C 876, e estão indicadas na Figura 3.32.

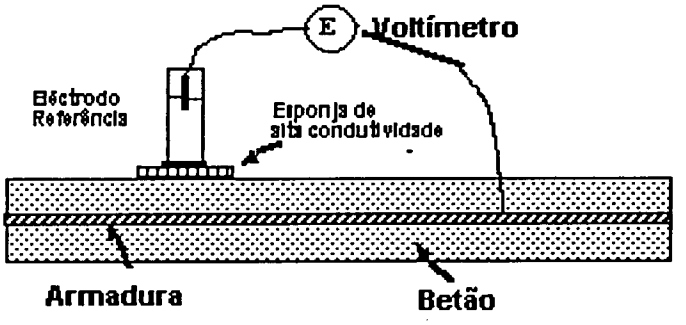


Figura 3.32 - Equipamento para aplicação do Método do Potencial de Meia Célula, descrito na Norma ASTM C 876 [38].

O mecanismo inclui uma meia célula de sulfato de cobre (ou electricamente similar), fios de ligação e um voltímetro de elevada impedância. A medição da voltagem depende do tipo de meia célula utilizada. No entanto, existem factores de conversão para transformar as leituras obtidas por um tipo de célula em células de sulfato de cobre, ou outro qualquer. Utiliza-se o voltímetro para que a corrente (diminuta) percorra o circuito. Como se indica na Figura 3.32, a meia célula faz o contacto eléctrico com o betão através de um obturador poroso e de uma esponja, que é humedecida com uma solução aquosa.

Tabela 3.4 - Interpretação da medição do Potencial de Meia Célula para vários tipos de eléctrodos [38]

Sulfacto de cobre $Cu/CuSO_4$	Calomelano (SCE)	Cloreto de Prata Ag/AgCl	Interpretação dos resultados
E > - 200 mV	E > - 126 mV	E > - 119 mV	Probabilidade de não ocorrer corrosão é superior a 90 %.
- 200 mV < E > - 350 mV	- 126 mV < E > - 276 mV	- 119 mV < E > - 269 mV	Actividade de corrosão incerta
E < - 350 mV	E < - 276 mV	E < - 269 mV	Probabilidade de não ocorrer corrosão é superior a 90 %.

Segundo a Norma ASTM C 876, em milivolts.

Se a armadura estiver corroída, os electrões tentarão passar da armadura para a meia célula. Do mesmo modo, os electrões são destruídos numa reacção de redução, transformando os iões de cobre da solução de sulfato de cobre em átomos de cobre, depositando-os na vareta. Quanto mais negativa for a leitura da tensão, maior será a probabilidade de a armadura estar corroída (ver Tabela 3.4). Se o fio de ligação à armadura estiver ligado à extremidade negativa do voltímetro, a leitura será positiva.

As leituras do potencial de meia célula são indicativas da probabilidade de existir actividade de corrosão nas armaduras, localizadas por debaixo da célula de referência. No entanto, isto é verdadeiro se todas as armaduras estiverem ligadas electricamente. Para assegurar esta condição, devem ser efectuadas medições da resistência eléctrica entre as armaduras, efectivamente separadas (ASTM C 876). Deve ser previsto o acesso às armaduras. O método não pode ser aplicado em estruturas de betão que possuam armaduras revestidas por epóxidos.

Estes ensaios são normalmente executados em pontos específicos da estrutura, em que a distância entre os locais de ensaio depende da sua especificidade. Espaçamentos excessivos podem levar à perda de locais onde exista actividade de corrosão ou até a insuficiência de dados para uma correcta avaliação da estrutura. Por outro lado, pequenos espaçamentos aumentam o custo do ensaio. Por exemplo, em tabuleiros de pontes, a norma ASTM C 876 recomenda espaçamentos de 1,20 metros. Acrescente-se que se a tensão entre dois pontos adjacentes for maior que 150mV, sugere-se uma diminuição do espaçamento entre ensaios.

Os instrumentos de ensaio disponíveis, incluem várias células para ser mais rápida a colecta de dados, quando se utiliza espaçamentos pequenos.

Um aspecto importante do ensaio é assegurar-se que o betão está suficientemente húmido. A forma de o verificar é analisar se o potencial de medição, no local de ensaio, não muda mais de ± 20 mV, num período de 5 minutos (ASTM C 876). Se esta condição não for satisfeita, a superfície de betão deverá ser molhada, sendo que são fornecidas duas possibilidades, de acordo com a norma ASTM C 876. Quando é necessária uma pré-humidificação, não deve existir nenhuma superfície seca entre os pontos de ensaio. Se não houver estabilidade, pré-humidificando a superfície, pode ser devido a correntes eléctricas residuais e, por isso, o ensaio utilizando o método do potencial de meia célula não pode ser realizado. Quando os ensaios são efectuados com temperaturas situadas fora do intervalo de 17 a 28 ° C, deve ser utilizado um factor de correcção, na medição da tensão.

3.4.8.2.3 Análise de Resultados

Segundo a norma ASTM C 876, para se formular conclusões acerca da actividade de corrosão, as leituras do potencial de meia célula, devem ser conjugadas com outros dados, tais como, o conteúdo de cloretos, a profundidade de carbonatação, a inspecção para a detecção de delaminações e as condições de exposição dos elementos a ensaiar. Os resultados da avaliação do potencial de meia célula, podem ser apresentados de duas maneiras: através de um mapa de curvas de nível equipotenciais ou através de um diagrama de frequências acumuladas.

O mapa de curvas de nível equipotenciais é mais utilizado para resumir os resultados da inspecção. Esta maneira, a localização dos ensaios é desenhada, à escala, numa planta, ou alçado, da área de teste. Na planta referente a cada ponto de ensaio, são marcadas as leituras da tensão da meia célula, permitindo o desenho dos pontos de igual tensão (Figuras 3.33 e 3.34).

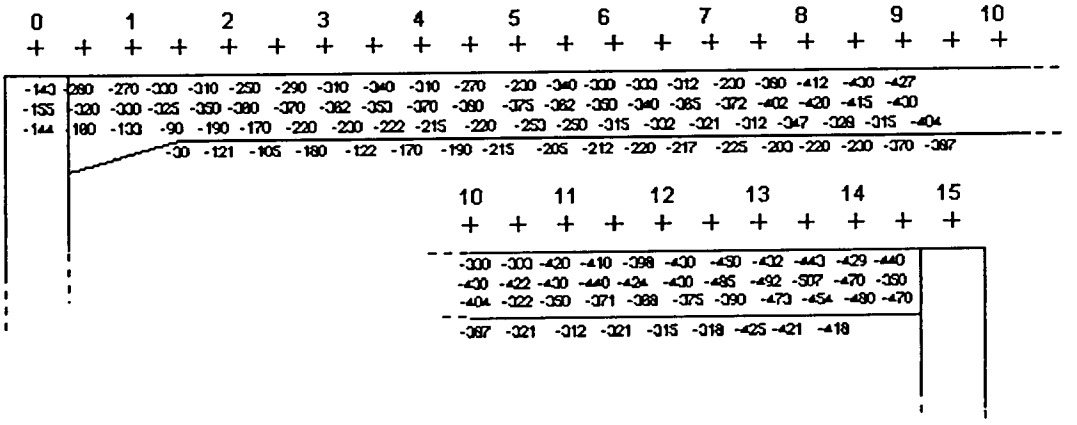


Figura 3.33 - Medição dos potenciais de meia célula [adapt. www.ndt.net/article/wcndt00/papers].

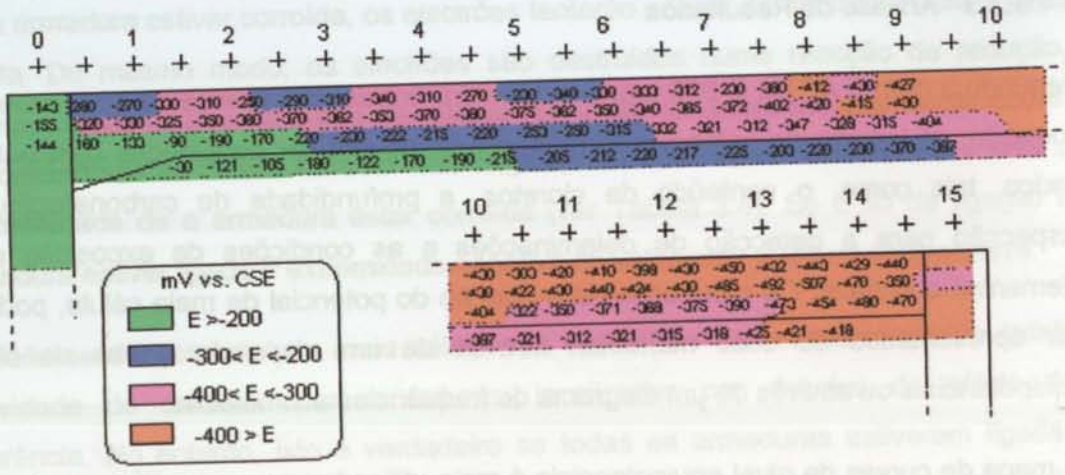


Figura 3.34 - Mapa de linhas equipotenciais [adapt. www.ndt.net/article/wcndt00/papers].

Os diagramas de frequências acumuladas obtêm-se através da impressão dos resultados em papel específico, de acordo com os procedimentos citados na norma ASTM C 876. Este diagrama é utilizado na determinação da percentagem, em relação às leituras do potencial de meia célula, dos resultados que apresentam valores inferiores aos que foram pré estipulados.

Segundo a norma ASTM C 876, podem ser utilizadas duas técnicas para avaliar os resultados obtidos: uma técnica numérica e outra baseada na diferença de potencial. Na técnica numérica, o valor do potencial é utilizado como um indicador da probabilidade de existir actividade de corrosão. Se o potencial for maior do que -200 mV, há uma grande probabilidade de não ocorrência de corrosão, ao tempo do ensaio. Pelo contrário, isto é, se for menor do que -350 mV, há uma grande probabilidade de tal ocorrer. Quando a tensão está entre -200 e -350 mV, não se pode aferir se existe ou não actividade de corrosão. A norma ASTM C 876 estabelece que, a menos que exista uma grande evidência de que a podemos usar, esta técnica não deve ser utilizada [38]:

- se a carbonatação se estender até à armadura;
- na avaliação de elementos de betão que não sejam sujeitos a humidificação;
- para comparar a actividade de corrosão em elementos de betão exteriores, sujeitos a uma grande variedade de humidade e de teor de oxigénio;

- na formulação de conclusões acerca de alterações da actividade de corrosão devido reparações que alterem o teor de humidade ou de oxigénio, ao nível da armadura.

3.4.8.2.4 Limitações

As vantagens e as desvantagens do método do potencial de meia célula estão descritas e sumariadas na Tabela 3.5. Como foi estabelecido, só se conseguem leituras válidas se o betão estiver suficientemente húmido, devendo o ensaiador saber como reconhecer quando isso acontece. Devido aos factores que afectam os resultados finais, é necessário recorrer a um especialista em corrosão, para que se possa interpretar a inspecção, recorrendo a este método, segundo as seguintes condições [38]:

- o betão está saturado com água;
- o betão está carbonatado até à armadura;
- o aço das armaduras está protegido (galvanizado).

Em complemento, as inspecções devem ser realizadas em conjunto com ensaios de carbonatação. A maior limitação do método é que ele não mede o grau de actividade de corrosão, na altura em que é executado o ensaio. O grau de corrosão da armadura depende da eficácia da necessidade de oxigénio, para a reacção catódica. Depende também da resistência eléctrica do betão que controla a facilidade que os iões têm de se movimentar através do mesmo. A resistência eléctrica depende da micro-estrutura da pasta de cimento e do grau de humidade do betão.

3.4.8.3 Método do Polarização Linear

A maior desvantagem do método do potencial de meia célula é a dificuldade da medição do grau de corrosão.

Esta técnica é utilizada para quantificar a taxa de corrosão das armaduras, em elementos de betão armado, permitindo a sua evolução, e avaliar o seu desempenho futuro.

Nesta secção faz-se uma exposição do método, mas desde já se refere que o ensaio e posterior interpretação dos resultados deve ser executado por pessoal com elevada experiência.

3.4.8.3.1 Princípios

Nos testes de resistência à polarização, é determinada a corrente que provoca a alteração do potencial de meia célula, da armadura corroída. Para uma pequena perturbação do circuito aberto do potencial, existe uma relação linear entre a alteração da tensão, ΔE, e a alteração de corrente por unidade de área da superfície da armadura, Δi. Esta relação é designada por resistência de polarização, R_P [23]:

$$R_P = \frac{\Delta E}{\Delta i} \qquad \text{(Equação 3.14)}$$

Uma vez que a corrente é expressa por unidade de área da armadura que é polarizada, a unidade de resistência de polarização R_P, é ohms por área. A relação fundamental, entre o grau de corrosão da armadura e a resistência de polarização foi estabelecida por Stern and Geary [23]. O grau de corrosão é inverso da resistência à polarização. É expresso, normalmente, como a corrente de corrosão por unidade de área da armadura, e é determinado pela expressão [23]:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_P} \qquad \text{(Equação 3.15)}$$

em que:

i_{corr} = valor de corrosão, em ampere/cm²;

B = constante, em volts;

R_P = resistência de polarização, em ohms x cm².

A constante B é característica do sistema de corrosão, sendo geralmente utilizado o valor de 0,026 V, para a corrosão de armaduras no betão [39]. É possível converter o valor da corrosão em massa de aço corroída por unidade de tempo. Se se conhecer o diâmetro da armadura, o grau de corrosão pode ser convertido em perda de diâmetro da armadura.

3.4.8.3.2 Instrumentação e Procedimentos

O equipamento necessário para a realização deste ensaio é composto por uma unidade central de controle e dois sensores, um para medir a taxa de corrosão e o

potencial de meia-célula, e o outro para medir a resistividade, temperatura e humidade relativa.

Figura 3.35 - Equipamento utilizado no Método de Polarização Linear [adapt. www.oz-diagnóstico.pt]

De modo simplificado, os procedimentos para usar este tipo de aparelhos consistem em [23]:

- localizar a disposição das armaduras, com o auxílio de um pacómetro, marcando-a na superfície do betão;
- gravar a profundidade de recobrimento e o diâmetro da armadura;
- executar uma ligação eléctrica com as armaduras (eléctrodo trabalhador);
- localizar a armadura, cujo grau de corrosão se pretende quantificar, molhar a superfície correspondente e colocar o aparelho sobre o meio da armadura;
- medir o potencial de corrosão da armadura, relativa ao eléctrodo de referência, isto é, medir o potencial de meia célula;
- medir a corrente, entre o eléctrodo oposto e o eléctrodo trabalhador, que é necessária para produzir uma alteração de -4 mV, no potencial do eléctrodo trabalhador;
- repetir os mesmos passos para diferentes valores de potencial, nomeadamente -8 mV e -12 mV, para além do potencial de corrosão;
- determinar a área de armadura afectada, através da medição do perímetro da armadura multiplicando pelo comprimento sobre o eléctrodo oposto;

- dividir o potencial pela corrente, por unidade de área de armadura, e determinar o declive da recta.

É esta a resistência de polarização.

Ensaios laboratoriais permitiram identificar um valor para a taxa de corrosão que preconiza a fronteira entre um aço activo e um aço passivo. Esse valor corresponde a [19]:

$$i_{corr} \cong 0,1 \text{ a } 0,2 \text{ A/cm}^2$$

Podemos adoptar valores de referência para a taxa de corrosão, em armaduras de betão armado (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Valores de referência para a taxa de corrosão [19]

Taxa de corrosão	Nível de corrosão
< 0,1	Desprezável
Entre 0,1 e 0,5	Baixo
Entre 0,5 e 1,0	Moderado
> 1,0	Elevado

Do mesmo modo, também se pode quantificar, em termos de resistividade do betão, a fronteira entre as zonas passivas e activas:

$$R_e \cong 200 \text{ a } 400 \text{ K.cm}$$

Podemos adoptar valores de referência para a resistividade, em elementos de betão armado (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Valores de referência para a resistividade [19]

Resistividade (k.cm)	Nível de corrosão
< 100 - 200	As taxas de corrosão serão muito baixas, mesmo em elementos de betão carbonatado ou contaminado com cloretos.
Entre 10 e 100	Taxas de corrosão baixas e altas.
< 10	A resistividade não é um parâmetro relevante para a taxa de corrosão.

O grau de corrosão num determinado local da estrutura depende de vários factores, tais como, a composição do betão, a presença de oxigénio e a temperatura. Por isso, o grau de corrosão em qualquer local de uma determinada estrutura exposta pode ter variações sazonais. Para podermos estimar o aumento da corrosão que ocorre após um determinado período de tempo, é necessário repetir as medições em diferentes ocasiões do ano. Podem ser utilizadas diversas alternativas na previsão da futura condição da armadura [23]:

- utilizar o máximo de medições para determinar o grau de corrosão, por forma a obter uma estimativa conservadora do tempo de vida útil da estrutura;
- utilizar a média anual do grau de corrosão, como valor característico (ou até o pior valor) da própria estrutura;
- utilizar o menor e o maior grau de corrosão para estimar o tempo de vida útil da estrutura.

Não há procedimentos padrão para interpretar as medições do grau de corrosão obtidas pelos diferentes aparelhos de medição, pelo que é sugerida a consulta de um especialista qualificado em corrosão. Por exemplo, baseado nos anos de experiência, quer em laboratório quer em campo, Clear [40] desenvolveu estas regras para interpretação das medições do grau de corrosão:

. se o i_{corr} for menor do que 2 mA/m², não existe dano por corrosão;

. se o i_{corr} estiver entre 2 e 10 mA/m², deve ser esperada a ocorrência de dano por corrosão, num período entre 10 e 15 anos;

. se o i_{corr} estiver entre 10 e 100 mA/m², deve ser esperada a ocorrência de dano por corrosão, num período entre 2 e 10 anos;

Assume-se que o grau de corrosão é constante com o tempo.

Devem ser ainda consideradas outras limitações, quando se está a planear ensaios ao grau de corrosão das armaduras [23]:

- .a superfície de betão deve ser lisa (não fissurada ou desigual);
- a superfície de betão não deve ter impermeabilizantes ou camadas protectoras;
- a camada de recobrimento deve ser menor do que 100 mm;
- as armaduras não devem ter qualquer tratamento epoxídico ou galvânico;
- a armadura ensaiada deve estar em contacto directo com o betão;
- a armadura não deve estar protegida catodicamente;
- a estrutura de betão armado não deve ficar próximo de correntes eléctricas parasitas e de grandes campos magnéticos;
- a temperatura ambiente deve oscilar entre 5 e 40 °C;
- a superfície de betão, no local de ensaio, não deve apresentar humidade aparente;
- os locais de teste não devem distar de menos de 300 mm de descontinuidades, como arestas e juntas.

3.4.8.3.3 Vantagens e Limitações

O Quadro 3.6 sumaria as vantagens e desvantagens dos métodos magnéticos e dos métodos eléctricos, que devem ser tidas em conta na obtenção da informação sobre a localização e condição das armaduras, em elementos de betão. Os pacómetros são eficazes na localização da armadura, mas apresentam dificuldade quando elas estão agrupadas e o recobrimento for pequeno. O potencial de meia célula fornece indicação

segura sobre a probabilidade de existir actividade de corrosão, mas a interpretação dos dados não é simples. Os métodos de polarização linear indicam o grau de corrosão na altura do ensaio mas a interpretação dos resultados é, igualmente, difícil.

Quadro 3.6 - Vantagens e desvantagens dos Métodos ElectroMagnéticos [23]

Método	Vantagens	Desvantagens
Pacómetro	- fácil localização de armaduras ou outros metais embebidos. - o equipamento é leve, portátil e de fácil localização. - pode ser estimada a espessura de recobrimento.	- a exactidão do recobrimento estimado é afectada pelo tamanho e espaçamento da armadura. - estimativa precisa do diâmetro da armadura é difícil. - não se consegue identificar camadas múltiplas de armadura. - a facilidade de identificação de armaduras isoladas é afectada pelo tipo de aparelho de medição, pela profundidade de recobrimento e pelo seu espaçamento. - os aparelhos baseados na relutância magnética não conseguem detectar apenas objectos ferromagnéticos. - a penetração máxima é limitada e depende do tipo de aparelho de medição
Potencial de meia célula	- o equipamento é leve e portátil. - fornece indicação sobre o aspecto da actividade de corrosão, ao tempo do ensaio.	- requer o estabelecimento de uma ligação á armadura, que deve ser ligada electricamente. - não é aplicável em armaduras revestidas com epóxidos. - o betão deve estar húmido. - não indica o grau de corrosão - o ensaio e a sua interpretação deve ser feito por pessoal especializado.
Polarização Linear	- o equipamento é leve e portátil. - fornece indicação sobre o aspecto da actividade de corrosão, ao tempo do ensaio.	- requer o estabelecimento de uma ligação á armadura, que deve ser ligada electricamente. - não é aplicável em armaduras revestidas com epóxidos ou galvanizadas. - não há normas para a interpretação de resultados. - a espessura de recobrimento deve ser menor do que 100 mm. - a superfície de ensaio deve estar limpa, não fissurada, sem revestimentos impermeáveis e húmida - o ensaio e a sua interpretação deve ser feito por pessoal especializado.

3.4.9 Métodos *in situ* para determinar a absorção e a permeabilidade das estruturas

3.4.9.1 Introdução

Muitos dos mecanismos de degradação, no betão e nas paredes de alvenaria, envolvem a penetração de materiais agressivos, tais como os sulfatos, o dióxido de carbono e iões de cloreto. Na maior parte dos casos, é necessário evitar a presença de água para suster os ditos mecanismos de degradação. Como consequência, os elementos que possuam uma superfície altamente resistente ao ingresso da água, terão um maior período de vida útil.

A capacidade dos elementos estruturais para resistir à degradação ambiental, depende dos materiais utilizados, da sua composição, do grau de consolidação. A qualidade da superfície do betão tem vindo, de forma crescente, a ser reconhecida, como o factor que mais afecta o grau de degradação de uma estrutura de betão. Para avaliar o potencial de durabilidade deste tipo de estruturas *in situ*, é necessária a existência de métodos que permitam determinar a capacidade da peça em restringir a passagem dos agentes externos que possam interferir directamente na deterioração do betão e nas paredes de alvenaria, bem como na despassivação e corrosão das armaduras (no caso do betão). Os ensaios, aqui descritos, são testes de superfície, que fornecem informações úteis para a avaliação do potencial de durabilidade do elemento estrutural.

A descrição dos métodos é feita para elementos de betão armado. No entanto, e sempre que for oportuno, serão referidos os procedimentos a tomar para outro tipo de estruturas.

3.4.9.2 Mecanismos de ingresso

Existem três tipos de mecanismos, através dos quais os agentes externos podem penetrar no betão.

a) Absorção

Refere-se à entrada de líquidos devido às forças capilares, que surgem devido à diferença de pressão entre a superfície livre da água, no exterior do betão, e a sua superfície, nos poros capilares. Depende, sobretudo, do diâmetro capilar. Agentes contaminantes, como os iões de cloreto e os sulfatos, são transportados em conjunto com o líquido. O coeficiente de absorção traduz a tendência que um determinado

material possui para absorver um fluído. Para se determinar o volume de absorção de um líquido, unidirecional, de um sólido poroso, inicialmente seco, podemos recorrer à seguinte equação empírica [23]:

$$V = A.s.\sqrt{t} \qquad \text{(Equação 3.16)}$$

em que:

V = volume de fluído absorvido, m^3;

A = área molhada, m^2;

s = coeficiente de absorção, $m/\sqrt{s}$; e

t = tempo, s

b) Penetração através dos poros

Diz respeito ao fluxo de um fluído sobre a acção de uma determinada altura de carga. Para um determinado estado estacionário, com um fluído unidireccional através de um material poroso saturado, o grau de fluidez é descrito pela lei de Darcy, do seguinte modo:

$$Q = K.A.I \qquad \text{(Equação 3.17)}$$

em que:

- Q = grau de fluidez, m^3/s;
- K = coeficiente de permeabilidade, m/s;
- A = área da secção transversal do fluído, m^2; e
- I = gradiente hidráulico, m/m.

O coeficiente de permeabilidade depende quer da estrutura do material quer das propriedades do fluído. No caso do betão, o coeficiente de permeabilidade depende sobretudo das proporções dos componentes, a relação água/cimento e da maturidade, que significa a extensão de hidratação. Se o fluído for gás, pode ser utilizada uma

equação análoga à Equação 3.17, para descrever o grau de fluidez, unidireccional, em termos de diferencial de pressão.

Os valores do coeficiente de permeabilidade para o betão variam entre 10^{-16} e 10^{-10} [41].

c) Difusão

Diz respeito ao movimento de substâncias moleculares ou iónicas de regiões de maior concentração de substâncias, para regiões de menor concentração. O grau de movimentação das substâncias é proporcional ao gradiente de concentração ao longo da direcção do movimento e ao coeficiente de difusão e é dado, matematicamente, pela primeira Lei de difusão de Fick [23]:

$$F = \frac{\partial m}{\partial t}\frac{1}{A} = -D\frac{\partial C}{\partial x} \qquad \text{(Equação 3.18)}$$

em que,

F = massa de fluxo, $Kg/m^2 s$;

m = massa de substância em movimento, Kg;

t = tempo, s;

A = área, m^2;

D = coeficiente de difusão, m^2/s;

C = concentração, Kg/m^3; e

X = distância, m.

3.4.9.3 Testes de Penetração

Vários métodos de ensaio foram idealizados para fornecer o potencial de durabilidade de uma superfície de betão. A maior parte das técnicas utilizadas tentam modelar os diversos mecanismos de transporte. Os testes de penetração podem ser agrupados em três categorias:

a) Os que são baseados na absorção de água;

b) Os que são baseados na permeabilidade à água;

c) Os que são baseados na permeabilidade ao ar.

As secções seguintes descrevem a instrumentação e os procedimentos para alguns dos ensaios mais utilizados.

3.4.9.4 Descrição dos Métodos de Ensaio

3.4.9.4.1 Ensaios de Absorção

Os ensaios de absorção medem a quantidade de água que é absorvida pelo betão, sob a acção de uma altura de carga moderada. O grau de absorção é função da porosidade capilar, que por sua vez depende da relação água/cimento e do tempo de cura. Dos ensaios aqui descritos, um baseia-se em técnicas de absorção à superfície e os outros medem a absorção através de um furo perfurado no betão.

3.4.9.4.1.1 Teste de absorção superficial da água (ISAT - Initial Surface-Absorption Test)

Neste método, é selada, na superfície do betão, uma cobertura circular, com uma área mínima de 5000 mm². Após a acoplagem de um reservatório à dita cobertura, este é cheio de água, de maneira a que o seu nível esteja 200 mm acima da superfície do betão. Essa cobertura, está também ligada a um capilar horizontal, posicionado à mesma altura do nível da água, no reservatório (Figura 3.36).

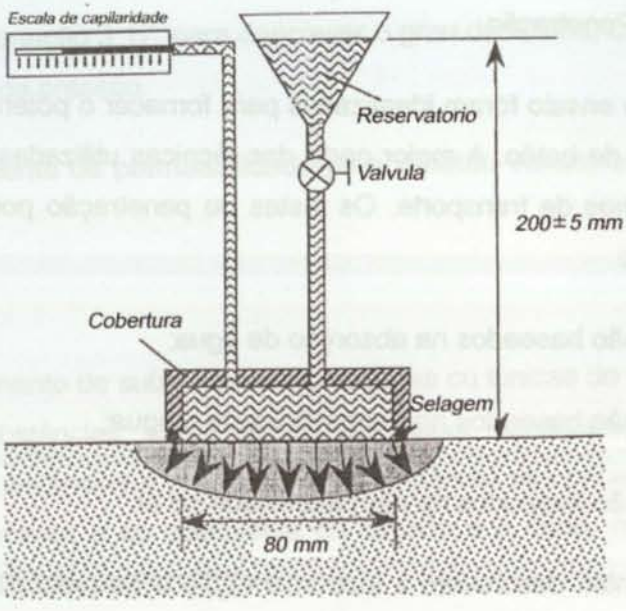


Figura 3.36 - Esquema de um ensaio de absorção superficial da água, baseado no ensaio ISAT [23]

A válvula situada sob o reservatório é fechada, determinando-se a quantidade de água que é absorvida pelo betão, em intervalos de tempo pré-definidos (por exemplo, 10 minutos, 30 minutos, 1 hora ou 2 horas), a partir do início do teste. Essa absorção é determinada pelo movimento da água na escala de capilaridade, ligada à cobertura.

Este teste encontra-se descrito na norma BS 1881 : Part 5 (1970).

Tabela 3.7 - Aferição da qualidade do betão, através do ensaio ISAT [70]

Absorção do betão	**Tempo após o início do ensaio**			
	10 min.	30 min.	1 h	2 h
Elevada	> 0,50	> 0,35	> 0,20	> 0,15
Média	0,25 - 0,50	0,17 - 0,35	0,10 - 0,20	0,07 - 0,15
Pequena	< 0,25	< 0,17	< 0,10	< 0,07

3.4.9.4.1.2 Teste de absorção de água de Figg

Os procedimentos para a realização deste ensaio requerem a execução de um furo, com 5.5 mm de diâmetro e uma profundidade de 30 mm, no betão. Uma vez limpo, empurra-se um disco de espuma polimérica rígida, através do furo, até uma profundidade de 20 mm, a contar da superfície, após o que se sela com uma rolha de silicone [23]. Através da rolha insere-se uma agulha hipodérmica, que por sua vez é ligada a uma seringa e a uma escala de capilaridade, por intermédio de uma série de ligações (ver Figura 3.37).

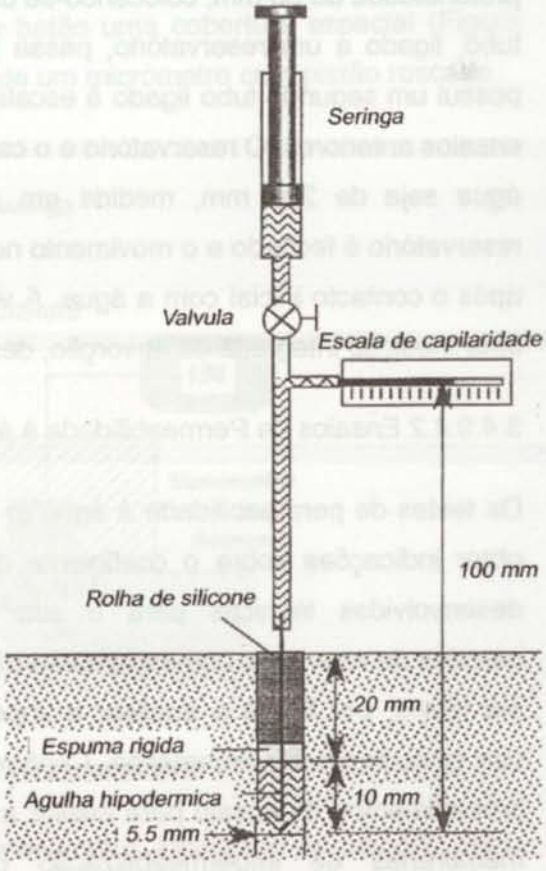


Figura 3.37 - Esquema do teste de absorção de água de Figg [23]

Aplica-se uma altura (pressão) de água com cerca de 100 mm registando-se o tempo que demora a ser percorrido, na escala de capilaridade horizontal, 50 mm (tal como no método ISAT). O valor obtido, designado por índice de absorção, é medido em segundos. Quanto maior for o índice de absorção, melhor é a qualidade do betão. A partir deste método inicial, foram feitas várias alterações no equipamento e nos procedimentos de ensaio, de forma a aumentar a sua precisão e permitir a sua repetição [23]. De entre as modificações efectuadas refira-se o aumento do diâmetro do furo, a medição automática do tempo e a utilização de uma rolha pré-moldada.

3.4.9.4.1.3 Ensaios de Covercrete - Absorption

Uma das limitações do teste ISAT é que a absorção é influenciada, predominantemente, pela superfície de betão. No teste de Figg, a absorção é controlada pelo betão a profundidades maiores do que 20 mm. Este ensaio tenta colmatar estas limitações, realizando uma medição da absorção onde se inclui, quer

valores da superfície, quer valores do interior do betão. Por isso se designa por "covercrete". Procede-se à furação de um buraco com 13 mm de diâmetro, até uma profundidade de 50 mm, colocando-se uma cobertura bem vedada sobre o buraco. Um tubo, ligado a um reservatório, passa pela dita cobertura, até ao furo. A cobertura possui um segundo tubo ligado à escala de capilaridade horizontal, tal como nos dois ensaios anteriores. O reservatório e o capilar são colocados de modo a que a altura de água seja de 200 mm, medida em relação ao centro do furo. O tubo para o reservatório é fechado e o movimento no capilar é determinado entre 10 e 11 minutos, após o contacto inicial com a água. A vantagem deste teste é a capacidade de obter uma medição integrada da absorção, desde a superfície até à profundidade de 50 mm.

3.4.9.4.2 Ensaios de Permeabilidade à água

Os testes de permeabilidade à água *in situ*, foram desenvolvidos com o objectivo de obter indicações sobre o coeficiente de permeabilidade de betão. Também foram desenvolvidas técnicas para a sua utilização em paredes de alvenaria, nomeadamente nas constituídas por tijolos, por forma a analisar a impermeabilização das suas juntas de argamassa. Conhecem-se, ainda, procedimentos de ensaio para avaliar a eficiência das membranas de impermeabilização utilizadas nas juntas de construção, de dilatação e de isolamentos das estruturas.

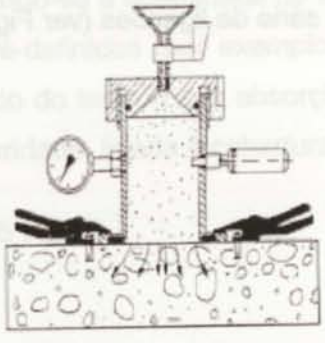


Figura 3.38 - Esquema do teste de permeabilidade à água [adapt. www.germann.org]

As técnicas de ensaio disponíveis no mercado, consistem na medição da quantidade de água, sob pressão, absorvida pelo elemento estrutural. A câmara que contém a água deve ser selada à superfície do elemento através de ancoragens ou através de uma cola especial. Enche-se a câmara com água e fecham-se as válvulas. Antes de se iniciar o ensaio, deve-se colocar a água à pressão desejada.

Figura 3.39 - Esquema de permeabilidade à água em paredes de alvenaria [adapt. www.germann.org]

3.4.9.4.2.1 Ensaio CLAM

Este método envolve a medição do fluxo de água na superfície de betão, sob uma determinada pressão. Sela-se à superfície de betão uma cobertura especial (Figura 3.40) e é fornecida água sob pressão, através de um micrómetro com pistão roscado.

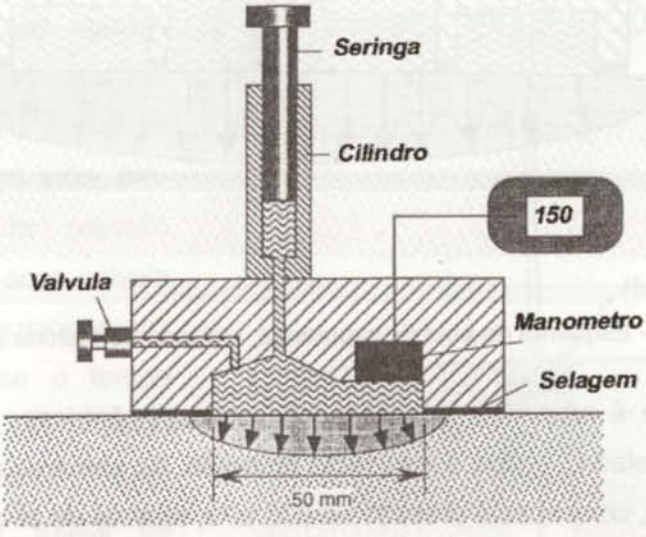


Figura 3.40 - Esquema da instrumentação do para a realização do ensaio CLAM [23]

A pressão da água é medida através de um manómetro, localizado na câmara, cerca de 150kPa acima da pressão atmosférica, enquanto que, ao mesmo tempo, se regista os movimentos do pistão, em intervalos de 20 a 30 minutos. O volume de água que penetra no betão é determinado multiplicando percurso do pistão pela área da base do cilindro, dá-nos o volume de água que penetra no betão. A informação sobre a permeabilidade do betão, isto é, sobre o volume de água que penetra no dito betão, é dada através de um gráfico que representa o volume de água versus o tempo. Uma vez que o fluxo de água no betão não é unidireccional e que não se consegue atingir um estado estacionário, do fluxo, este teste fornece, apenas, um índice de permeabilidade [23].

3.4.9.4.2.2 Método de Steinert

Este método, relatado por Steinert em1979, utiliza o princípio do anel de segurança, para conseguir uma melhor aproximação ao fluxo unidireccional sob pressão (Figura 3.41).

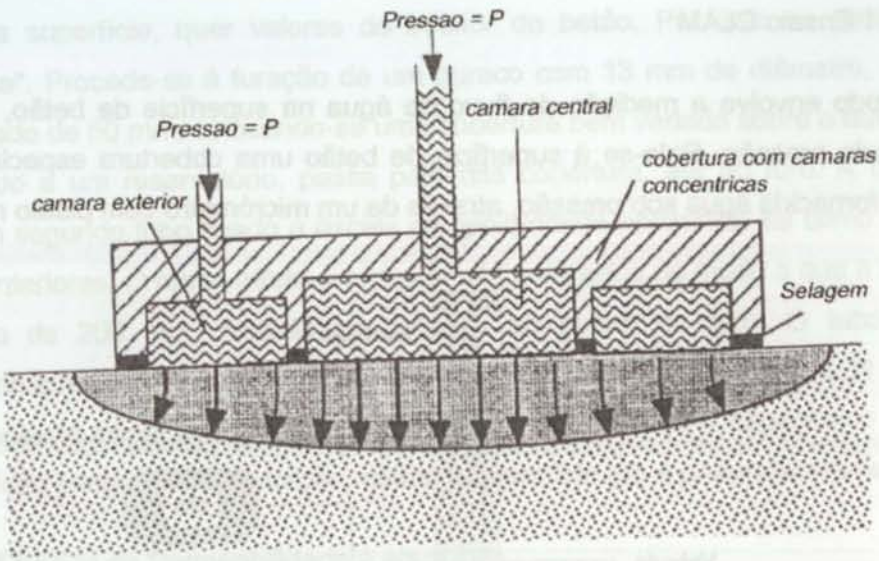


Figura 3.41 - Esquema do anel de segurança, utilizado no Método de Steinert [23]

A cobertura, que é composta por duas câmaras concêntricas, separadas por um tampão circular selado, ligadas à superfície do betão. As câmaras são cheias de água e, posteriormente, colocadas à pressão de 600 kPa, através de ar comprimido. O fluxo sobre a câmara interior é, aproximadamente, unidireccional, de modo a que o registo do fluído, como uma função do tempo, será de mais fácil interpretação, em relação, por exemplo, à do ensaio CLAM.

3.4.9.4.3 Ensaios de Permeabilidade ao ar

Foram propostos uma grande variedade de ensaios, baseados na medição do fluxo de ar, ou de outros gases, através do betão. Consegue-se estabelecer relações entre a permeabilidade ao ar e outros indicadores de durabilidade, tais como a relação água/cimento, a resistência e a eficiência do processo de cura [23]. Estes ensaios envolvem, também, a execução de um buraco na superfície de betão ou a aplicação de uma câmara sobre a mesma. Na maior parte dos casos, aplica-se um vácuo na câmara de ar registando-se o decréscimo da pressão com o tempo, tomado como um indicador da permeabilidade ao ar. Geralmente, estes testes são mais simples de se executar do que os testes com a água.

3.4.9.4.3.1 Ensaio de permeabilidade ao ar de Figg

O ensaio original envolvia a mesma preparação e procedimentos, em relação ao furo, que o teste de absorção de água (secção 3.4.8.4.1.2). No entanto, o tubo é ligado a uma bomba de vácuo, em vez da seringa e do manómetro utilizado no ensaio com água A bomba de vácuo é activada até que a pressão no interior do tubo diminua até um valor pré-definido, abaixo da pressão atmosférica. Fecha-se a válvula e o fluxo de ar, no buraco, reduz o vácuo. Regista-se o tempo gasto na obtenção da pressão pré-definida, no furo, designando-se por índice de permeabilidade ao ar, sendo a unidade de medida o segundo. Um índice de permeabilidade ao ar elevado, indica um betão menos permeável.

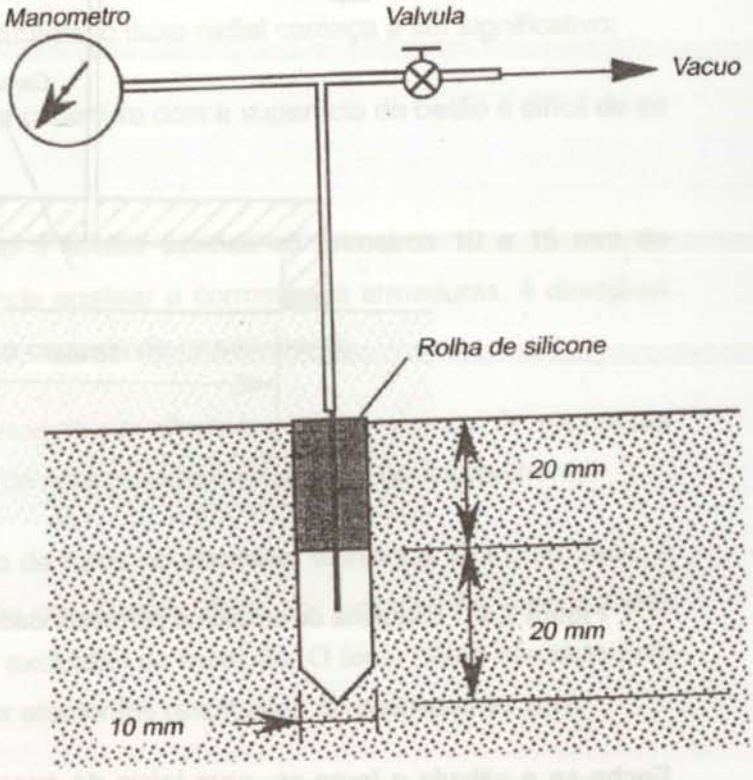


Figura 3.42 - Esquema do ensaio de permeabilidade ao ar de Figg modificado [23]

Este ensaio encontra-se descrito na Especificação LNEC E 413.

3.4.9.4.3.2 Ensaio Schölin

Por forma a não se realizar a furação na superfície de betão, foram propostos ensaios de superfície. No ensaio de Schölin (Figura 3.43) é colocada na superfície de betão, uma câmara, com 50 mm de diâmetro, utilizando-se uma bomba de vácuo, que retira o ar existente na câmara, por forma a se obter uma pressão de - 99 kPa [23].

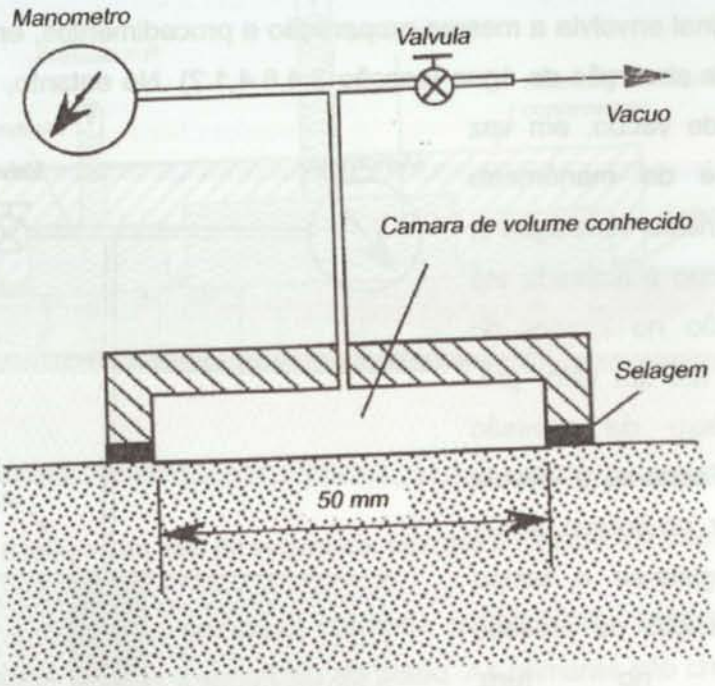


Figura 3.43 - Esquema do ensaio de permeabilidade superficial ao ar de Schölin [23]

Fecha-se a válvula e toma-se, para início do ensaio, o tempo que leva a pressão a atingir o valor de - 95kPa. Determina-se, posteriormente o tempo necessário para que a pressão do vácuo aumente para - 70 kPa. Para betões de elevada densidade mede-se a alteração da pressão no vácuo, durante 120 segundos. Com base nestas medições, e conhecido o volume da câmara, determina-se o índice de permeabilidade, que tem como unidade de medida o m^2/s. De modo a que se tenha sempre o mesmo teor de humidade, condição prévia para a realização do ensaio, a superfície é molhada com ar quente durante 5 minutos, antes da sua realização [23].

3.4.9.5 Vantagens e Desvantagens

As vantagens e desvantagens dos vários ensaios estão resumidas no Quadro 3.7, apresentado no final desta secção.

3.4.9.5.1 Testes de absorção

O teste ISAT fornece medições de superfície e modela a absorção de água, que é o mecanismo de impregnação associado à degradação do betão. O ensaio é totalmente

não destrutivo e pode ser realizado, quer em superfícies verticais, quer em superfícies horizontais. De entre as suas limitações destacam-se [23]:

- Para betões com um coeficiente de absorção pequeno, o percurso do fluxo pode ser considerado, unidireccional. No entanto, à medida que a absorção da camada superficial aumenta, o fluxo radial começa a ser significativo;

- Na prática, a selagem da cobertura com a superfície de betão é difícil de se realizar;

- O ensaio ISAT está apto a avaliar apenas os primeiros 10 a 15 mm de betão. Quando se pretende analisar a corrosão de armaduras, é desejável o conhecimento de toda a camada de recobrimento;

- Os resultados do teste podem ser afectados pela presença de elementos resultantes do processo de cura ou outros elementos de recobrimento.

O teste de Figg requer a realização de furos no elemento estrutural. Por outro lado, a camada superficial de betão, cerca de 20 mm, deve ser isolada. As propriedades superficiais do betão são, por isso, excluídas da medição. O teste não é afectado pelo recobrimento da superfície, nem por elementos resultantes do processo de cura.

O teste covercrete absortion também requer a execução de um furo, mas a medição inclui o efeito de todo o betão que circunda o buraco.

3.4.9.5.2 Testes de permeabilidade à água

Quer o ensaio CLAM, quer o ensaio Steinert, determinam um índice de permeabilidade empírico. No entanto, é preferível a medição de uma propriedade absoluta, pois existe uma relação bem definida entre o coeficiente de permeabilidade e outros factores de durabilidade [23]. Os métodos *in situ*, baseados na permeabilidade à água, não relacionam, no entanto, esses factores de durabilidade, tão bem como os ensaios de permeabilidade ao ar. A interferência do grau de humidade, tem uma grande influência, neste tipo de ensaios.

Outras desvantagens são a duração elevada do teste, a necessidade de selar o equipamento à superfície, por forma a suster com eficiência a pressão da água.

3.4.9.5.3 Testes de permeabilidade ao ar

Em geral, estes ensaios são mais simples e mais fáceis de realizar. No caso dos aparelhos de vácuo, não é necessário nenhuma ligação permanente. Diferentes dos testes com água, estes ensaios não afectam a propriedades de permeabilidade do betão. Como consequência, podem ser repetidos, no mesmo lugar. Como já foi referido, a interferência da presença de humidade, neste tipo de ensaios, é menor.

Os métodos de superfície, como o ensaio de Schölin, são afectados principalmente pelos primeiros 15 mm de betão, pelo que não fornecem informação sobre as propriedades de permeabilidade de toda a camada de recobrimento. Os ensaios baseados no Método de Figg, necessitam da execução de um furo e excluem a camada próxima da superfície, na sua medição.

Normalmente, os resultados de cada um destes testes, classificados através de um índice, podem ser relacionados com outros factores que estão intimamente ligados à durabilidade do betão. No entanto, esses índices, obtidos por um método específico, não se relacionam com outro quaisquer outros índices, obtidos através de realização de outro ensaio, que utilize, por exemplo, geometria ou pressões diferentes.

Quadro 3.7.- Comparação entre os ensaios *in situ* de permeabilidade ao ar [70]

Método	**Parâmetros de comparação**			
	Meio	**Humidade relativa**	**Coeficiente de permeabilidade**	**Aplicabilidade *in situ***
Figg	Ar	Influencia	Não	Boa
Schönlin	CO_2/Ar	Considerada	Sim	Muito boa

3.4.9.5.4 Limitações gerais dos ensaios para determinação *in situ* da absorção e permeabilidade das estruturas

Ainda que os testes de penetração estejam relacionados com o mecanismo de deterioração, devem ser tidas em consideração certas limitações. Essas limitações incluem: a sensibilidade às alterações de humidade e de temperatura, a alteração dos mecanismos de transporte durante o ensaio, a mudança da permeabilidade ao ar com a pressão aplicada, a influência da furação nos valores do ensaio. A natureza empírica dos ensaios, bem como as características complexas do fluxo, impedem a conversão dos resultados de teste, em propriedades absolutas do betão.

A maior limitação, é de longe, o efeito do grau de humidade, à altura da realização do ensaio. Um betão seco, absorverá mais água e permitirá um fluxo mais elevado de ar, do que o mesmo betão, num estado saturado. Um betão de fraca qualidade, ensaiado quando estiver húmido, permite a obtenção de resultados finais melhores, no que se refere à durabilidade, do que um betão de melhor qualidade, ensaiado quando se encontrar seco. Alguns métodos tentam levar em conta este problema, especificando que o teste não pode ser realizado dentro de um certo período de tempo após o local ser molhado. No entanto, e uma vez que o grau de secagem do betão é função da temperatura ambiente e do grau de humidade, mesmo especificando o tempo da dita secagem, não se pode garantir que o grau de humidade do elemento a ensaiar esteja no nível pretendido [23].

Em relação aos métodos baseados na execução de um buraco para o ensaio, a percussão do aparelho de furação, pode ter um efeito nocivo no betão situado na vizinhança do furo. Podem surgir mais fendas que permitam à água e ao ar uma penetração mais rápida e facilitada a longo prazo. Este facto pode levar à ocorrência de discrepâncias entre os resultados dos testes, especialmente os que são baseados na absorção de água.

Quadro 3.8 - Vantagens e desvantagens dos Métodos de Penetração [23]

Método	Vantagens	Desvantagens
ISAT	- simples de realizar e de baixo custo;. - Sensível às alterações à qualidade do betão; - Totalmente não destrutivo; - Largamente testado em obra.	- Não sé aconselhado para betões de grande sorptivity da camada superficial; - Mede apenas a camada superficial do betão e é afectado pelos revestimentos; - A selagem da cápsula à superfície de betão é difícil de ser concretizar; - Sensível ao teor de humidade do betão.
Teste de absorção de água de Figg	- simples de realizar e de baixo custo;. - Os resultados não são afectados pelos revestimentos e pela camada superficial de betão.	- Método intrusivo devido á furação necessária; - A furação pode afectar o betão a ser testado; - Sensível ao teor de humidade do betão; - Sensível às características dos agregados do betão.

Teste de covercrete absortion	- Os resultados fornecem uma medição integrada de toda a zona de recobrimento do betão.	- Método intrusivo devido á furação necessária; - A furação pode afectar o betão a ser testado; - Sensível ao teor de humidade do betão;
CLAM (Permeabilidade à água)	- As medições são registadas sobre condições de pressão constante.	- Fornece um índice de permeabilidade, e não um coeficiente de permeabilidade; - A superfície de betão fica danificada; - Sensível ao teor de humidade do betão; - Duração elevada do ensaio.
Método de Steiner (Permeabilidade à água)	- Medições de fluxo unidireccional; - Mais fácil de interpretar que o ensaio CLAM.	- Fornece um índice de permeabilidade, e não um coeficiente de permeabilidade; - A superfície de betão fica danificada; - Sensível ao teor de humidade do betão; - Duração elevada do ensaio.
Teste de permeabilidade ao ar de Figg	- simples de realizar e de baixo custo;. - Os resultados não são afectados pelos revestimentos e pela camada superficial de betão. - Menos sensível ao teor de humidade que os testes com água.	- Método intrusivo devido á furação necessária; - A furação pode afectar o betão a ser testado; - Fornece um índice de permeabilidade, e não um coeficiente de permeabilidade; - Sensível às características dos agregados do betão.
Teste de Schönlin (permeabilidade ao ar)	- Não destrutivo; - Menos sensível ao teor de humidade que os testes com água; - Inclui procedimentos sobre as condições de teor de humidade.	- Fornece um índice de permeabilidade, e não um coeficiente de permeabilidade; - Mede apenas a camada superficial do betão e é afectado pelos revestimentos;

3.4.10 Termografia

A inspecção termográfica (termografia) é uma técnica não destrutiva que utiliza os raios infravermelhos, para medir temperaturas ou observar padrões diferenciais de distribuição de temperatura, com o objectivo de fornecer informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. Em qualquer dos sistemas estruturais, a termografia é uma técnica de inspecção extremamente útil, uma vez que permite: realizar medições sem contacto físico com a instalação (segurança); verificar estruturas em pleno uso e inspeccionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento).

A técnica consiste em converter o calor irradiado por um objecto (invisível a olho nu) numa imagem que se imprime em papel fotográfico, em que as diferentes cores representam intervalos de temperatura de radiação diferente. Esta técnica apenas mede o calor irradiado à superfície desses elementos. Este calor depende de vários factores, tais como:

- da emissividade superficial;
- da condutividade térmica do elemento;
- da convexão superficial do elemento estrutural;
- da radiação solar.

A base da técnica é observar, através de instrumentação adequada, o aquecimento, artificial ou natural, e o arrefecimento de uma determinada superfície, gravando-se as diferenças. A termografia permite:

- verificar a presença de materiais estruturais distintos;
- detectar anomalias construtivas;
- detectar descontinuidades, cavidades e fissuras;
- detectar delaminações e destacamento superficial dos materiais;
- determinar o estado de conservação das paredes;
- determinar a presença de humidade: por capilaridade, por condensação ou por infiltração.

A termografia, tal como qualquer sistema que utiliza a radiação infravermelha, mede a variação da radiação à superfície, mas não mede directamente, a temperatura de superfície.

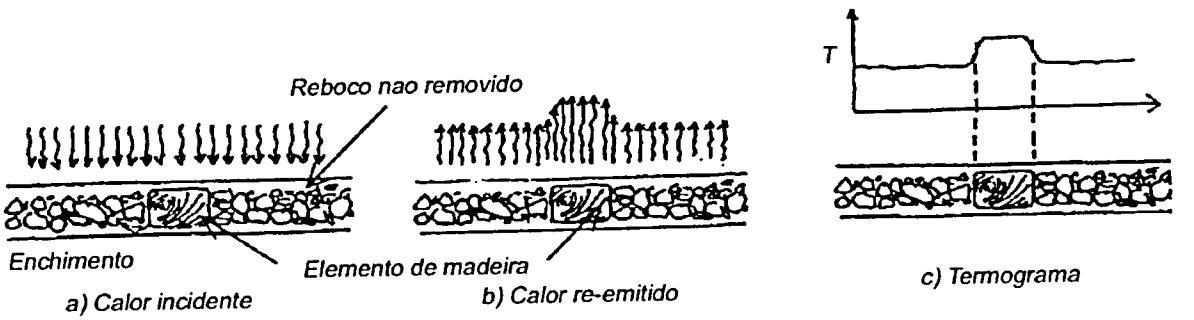


Figura 3.44 - Princípio de funcionamento da Termografia (parede mista de Alvenaria) [23]

A base do método fundamenta-se em dois princípios. O primeiro é que a superfície emite energia, sob a forma de energia electromagnética. A intensidade de energia emitida, por unidade de superfície, é indicada pela Lei de Stefan-Boltzmann [23]:

$$R = e.\sigma.T^4 \qquad \text{(Equação 3.19)}$$

em que:

R = intensidade de radiação de energia de superfície, em $^{w}/_{m^2}$

e = emissividade da superfície;

σ = constante de Stefan-Boltzmann, em $^{w}/_{m^2.k^4}$; e

T = temperatura absoluta da superfície, em k.

O comprimento de onda da radiação emitida, depende da temperatura. À medida que esta aumenta o comprimento de onda é menor. A uma determinada temperatura, a radiação situa-se no espectro visível. Por exemplo, este fenómeno pode ser observado quando um prego é aquecido e emite uma luz visível a altas temperaturas. No entanto, nos elementos estruturais dos edifícios, o comprimento de onda da radiação emitida é da ordem de 10 μm, que é a região infravermelha do espectro.

Esta radiação pode ser detectada por sensores especiais que produzem sinais eléctricos proporcionais ao aumento da energia radiante incidente. Com uma calibração adequada, a saída de resultados pode ser convertida em temperatura. Por isso, é possível medir a temperatura superficial de uma parede, sem ser necessário utilizar um termómetro.

O segundo princípio é que as anomalias sub-superficiais dos elementos, afectam o fluxo de calor através do mesmo (Figura 3.44 e 3.45 a e b). Se essas anomalias não forem muito profundas, as alterações no fluxo de calor provocam diferenças localizadas na temperatura de superfície. Medindo essa temperatura, segundo as condições de fluxo de calor, as anomalias podem ser localizadas.

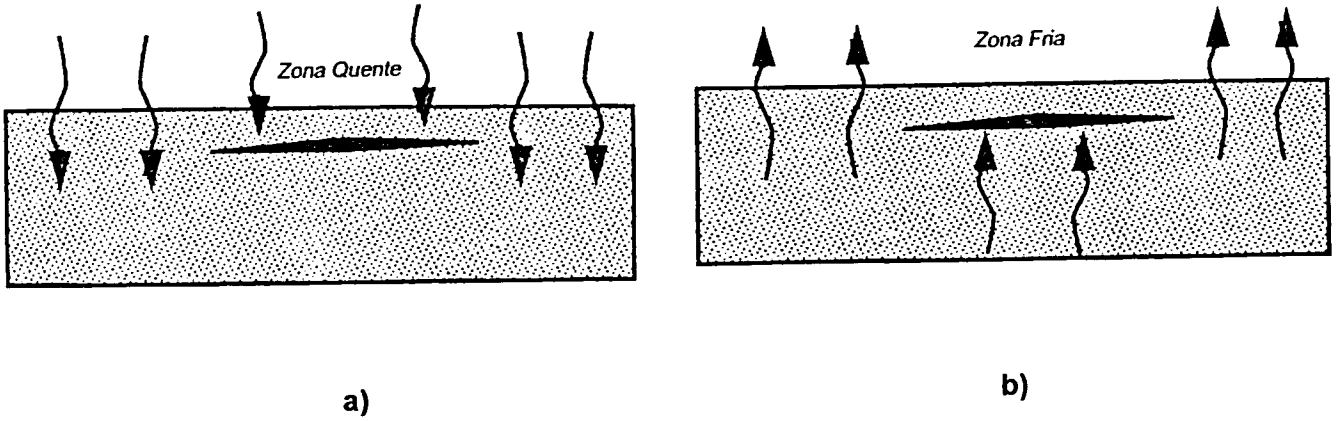


Figura 3.45 - Efeito de uma anomalia interna na temperatura superficial, durante um fluxo de calor: a) Fluxo de calor para o interior, em zonas quentes situadas por cima da anomalia e b) Fluxo de calor para o exterior, em zonas frias situadas por cima da anomalia [23]

O fluxo de calor, pode ser criada, artificialmente, utilizando lâmpadas de calor, ou pode ocorrer, de forma natural, através do aquecimento solar (o calor flui para a estrutura) e do arrefecimento nocturno (o calor flui para o exterior da estrutura). A principal diferença na utilização da fonte de calor é de caracter económico.

Resumindo, a termografia por infravermelhos explora dois mecanismos próprios de transferência de calor: condução e radiação. Um elemento estrutural são é, termicamente, mais conductivo que um elemento danificado. A radiação superficial depende, sobretudo, da capacidade de emissão do material, que é definida como a sua capacidade para irradiar energia, comparando com um elemento emissor de

radiação, perfeitamente preto. Por outro lado, as superfícies rugosas do mesmo material possuem valores de emissividade maiores.

Na Tabela 3.8 apresentam-se valores de emissividade para alguns materiais estruturais. Numa das colunas apresentam-se os valores das temperaturas, aquando da sua determinação, uma vez que a emissividade muda com a temperatura.

Tabela 3.8 - Valores da emissividade para alguns materiais estruturais [4]

Material de Construção	Temperatura (°C)	Emissividade, ε
Aço brilhante	–	0,05
Adobe	20	0,90
Água	–	0,90
Betão	–	0,94
Cimento	0 - 200	0,96
Granito polido	21	0,85
Madeira (verde)	–	0,90
Mármore	22	0,93
Tijolo (argila)	21	0,93
Zinco	28	0,23

A textura e o acabamento da superfície (marcas de pintura, de borracha ou de resíduos de óleo, por exemplo) afectam as propriedades de radiação da superfície. Por isso, deve-se ter muito cuidado na medição e interpretação dos resultados do ensaio, por forma a que possíveis diferenças de temperatura não sejam devidas a diferenças de emissividade.

Os parâmetros físicos que influenciam a medição da emissão da radiação infravermelha, durante os ensaios termográficos, são [23]:

- a emissividade da superfície do elemento;
- a capacidade de volumetria / calor do elemento;

- a espessura da camada aquecida;
- a intensidade da radiação solar incidente;
- as condições ambientais à hora da execução do ensaio.

As nuvens reduzem a radiação solar durante o dia e reflectem a radiação infravermelha à noite, retardando a transferência de calor. O vento e a humidade à superfície, reduzem os gradientes de temperatura e, como se sabe, a água com temperaturas inferiores a 0 °C, forma gelo nos vazios e fendas da estrutura. As condições óptimas de tempo são: céu limpo, vento fraco, superfície de betão seca e radiação solar intensa.

Para superar a influência do tempo no ensaio, a norma ASTM D 4788, sugere os seguintes procedimentos:

- retirar os resíduos da superfície;
- não se ensaiar enquanto exista água, gelo ou neve. A superfície deve secar, pelo menos, 24 horas antes do início do teste;
- não ensaiar se a velocidade do vento for superior a 25 Kph;
- a temperatura ambiente deve ser superior a 0 °C;
- os ensaios nocturnos devem ser realizados com céu limpo.

Acima de tudo isto, os ensaios devem ser realizados quando existirem os gradientes de aquecimento ou arrefecimento. Quando o ensaio se realizar em condições de arrefecimento (ensaios nocturnos, por exemplo), a zona situada por cima de uma anomalia fica mais frio que a restante. O inverso é verdadeiro durante as condições de aquecimento (ver Figura 3.45) . A hora ideal para ensaios com infravermelhos é logo a seguir ao pôr-do-sol ou meia a uma hora após o nascer do sol. Se o ensaio durar mais tempo que alguma alteração termal, a superfície de betão pode tornar-se termicamente saturada, até que essas anomalias termais passem. O acréscimo de tempo necessário, à luz directa do sol, para a detecção das anomalias, difere consoante as aplicações. Por exemplo, a norma ASTM D 4788 recomenda 4 horas de incidência de radiação solar, em superfícies de betão.

3.4.10.1 Equipamento

O equipamento utilizado na detecção e análise, inclui três componentes principais: uma unidade de detecção, um aparelho de aquisição e análise de dados e um gravador de imagens. A sonda de detecção infravermelha (câmara óptica), é composta por lentes que transmitem apenas radiação infravermelha, com comprimentos de onda entre 3 a 5,6 μm (ondas curtas) e 8 a 12 μm (ondas médias).

Figura 3.46 - Câmara de detecção de raios infravermelhos

É utilizado um sistema de espelhos rotativos para proporcionar uma visão bidimensional do objecto a ensaiar (Figura 3.47). O detector de infravermelhos pode detectar variações de temperatura da ordem de 0,1 ºC.

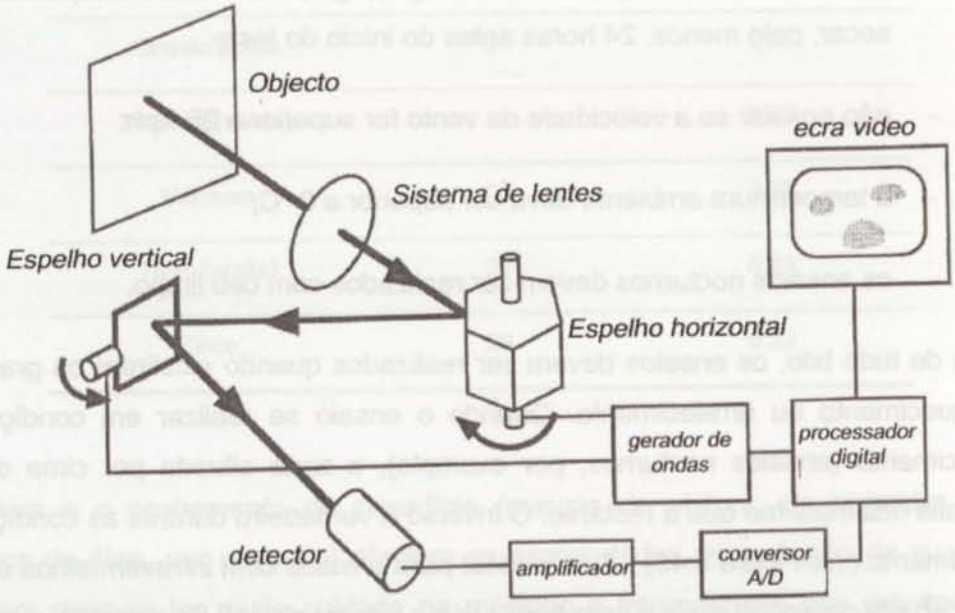


Figura 3.47 - Esquema para a criação de imagens termográficas [23]

O sistema de aquisição de dados inclui um conversor, analógico para digital (A/D), um computador com um monitor de alta resolução, um aparelho de armazenamento de dados e um software para análise dos resultados.

Nos procedimentos para a realização deste ensaio devem constar:

- a determinação de parâmetros ambientais externos e internos à estrutura, tais como a temperatura e o grau de humidade;
- a elaboração dos termogramas com a visualização dos intervalos de temperatura superficial (Figura 3.48) ;
- a confrontação entre o termograma obtido e fotografias da estrutura (Figura3.49);
- a elaboração de um relatório em que deve constar:
  - a planimetria esquemática da estrutura com a indicação dos locais de teste e as zonas a serem avaliadas;
  - informação sobre as condições térmicas e de humidade ambiente, durante o ensaio;
  - imagens térmicas com a indicação das zonas de particular interesse;
  - comentário sobre os termogramas obtidos, nomeadamente sobre os defeitos/danos revelados.

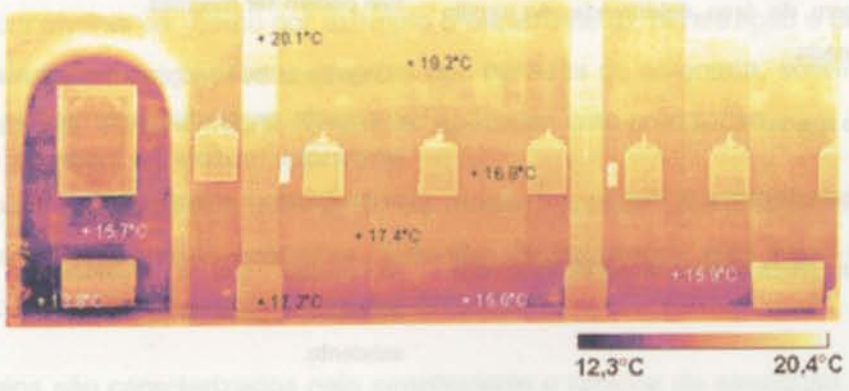


Figura 3.48 - Termogramas com a visualização das temperaturas obtidas [adapt.www.idesweb.it]

Figura 3.49 - Confrontação entre o termograma e fotografias da estrutura [adapt.www.idesweb.it]

3.4.10.2 Vantagens e Limitações

A termografia por infravermelhos é um método de inspecção global, e permite uma inspecção em grande escala (grande áreas) em pouco tempo. No Quadro 3.9, são apresentadas, de forma resumida, as vantagens e desvantagens deste método.

Quadro 3.9 - Vantagens e Desvantagens da Termografia por Infravermelhos [23]

Vantagens	Desvantagens
- Técnica global que abrange áreas muito superiores à de outros métodos, influenciando positivamente o custo final da inspecção.	- Equipamento é caro.
	- Necessita de condições climáticas específicas.
- Os resultados fornecem informação da percentagem de área deteriorada, na região inspeccionada.	- A profundidade e a espessura da zona danificada não podem ser medidas.
	- Ocorrência de variações dos resultados do ensaio, consoante as condições ambientais (gradiente de temperatura, sombra ou incidência directa da luz solar, nuvens e chuva).
- Inspecção rápida.	
- Não há contacto com a estrutura.	
- Resultados, relativamente, fáceis de interpretar.	- À medida que a profundidade da anomalia aumenta, é mais difícil de detectar qualquer dano existente.
	- É necessário treino individual para assegurarmos que os resultados têm significado e são correctamente interpretados.

De entre as desvantagens, saliente-se a necessidade de realização do ensaio mediante condições de tempo apropriadas, de modo a se obter o fluxo de calor necessário à detecção de anomalias. Refira-se que, embora a termografia forneça indicações sobre a localização das anomalias, não indique, no entanto, informações sobre a sua profundidade.

3.4.11 Métodos, *in situ*, para a determinação de parâmetros de resistência e deformabilidade

Em contraponto com os testes laboratoriais, em que se recorre à extracção de amostras, ensaiadas com o mesmo material com que se construiu uma determinada estrutura, os testes *in situ* são realizados com o material da própria estrutura. Normalmente, estes testes eram designados por testes não destrutivos pois não danificavam a estrutura. No entanto, com o desenvolvimento de novos métodos que provocavam alguns danos superficiais localizados, grande parte deles são classificados como semi-destrutivos ou ligeiramente destrutivos. Uma das características mais importantes destes métodos é a determinação de parâmetros de resistência e de deformabilidade na própria estrutura.

Os ensaios aqui descritos, podem ser utilizados para estimar os referidos parâmetros durante a construção (sobretudo em estruturas de betão), ou na inspecção de estruturas existentes. Os procedimentos a tomar são diferentes, pelo que se deve utilizar os métodos adequados a cada situação.

Existe uma grande diversidade de técnicas para a obtenção das propriedades dos materiais, atrás citadas. Grande parte delas foram desenvolvidas para elementos de betão armado. No entanto, de entre os ensaios apresentados, alguns também são aplicados em alvenarias (como por exemplo o esclerómetro, penetração e pull-out). No entanto, devido às características próprias das paredes de alvenaria, sobretudo a sua heterogeneidade, estas técnicas devem ser aplicadas com precaução.

Também para os elementos estruturais de madeira existem técnicas similares. Pelo facto de serem unicamente aplicadas neste tipo de estruturas, elas serão analisadas no Capítulo referente às estruturas de madeira (6).

Estes ensaios são caracterizados pela simplicidade e rapidez de execução, por serem pouco intrusivos, pela facilidade de interpretação dos resultados e por terem custos baixos.

Os dados obtidos, normalmente sobre a forma de índices ou parâmetros que, através de correlações, permitem a determinação de características de resistência e de deformação.

3.4.11.1 Necessidade dos ensaios *in situ* durante a construção

O ensaio, no betão, mais conhecido e usual é o teste em provetes cilíndricos, devidamente normalizados, para determinação da sua resistência. No entanto, este ensaio só representa a resistência do betão, no local de ensaio. Na maior parte das vezes é utilizado no controlo de qualidade, de forma a assegurar que as especificações que constam do projecto são cumpridas. Não é apropriado para a determinação, as suas propriedades *in situ*, uma vez que não faz referência aos efeitos localizados, à compactação e ao processo de cura do betão.

Para determinar as características da construção antes de remover, zonas da estrutura, aplicar pré-esforço ou determinar a efectivação do processo de cura, deve-se determinar as propriedades do betão de forma rápida, segura e eficientemente. Para tal, deve-se recorrer a ensaios *in situ* credíveis. A necessidade de se obter esta informação é ainda maior quando se tem em conta a existência de inúmeras falhas de construção. A utilização deste tipo de ensaios, não só aumenta a segurança, como pode resultar em ganhos substanciais no custo final da construção.

3.4.11.2 Necessidade dos ensaios *in situ* em construções existentes

Na inspecção estrutural de construções existentes, é necessário obter estimativas correctas sobre a resistência do betão *in situ*. Historicamente, essa resistência era estimada através da extracção de carotes, retiradas da própria estrutura. Os ensaios *in situ* aqui referidos, permitem uma inspecção mais económica ao betão. A maior precaução refere-se ao estabelecimento de correlações entre os resultados dos ensaios e a resistência do betão. Muitas vezes, estes ensaios não eliminam a necessidade da extracção de carotes, mas pode reduzir significativamente o seu número, por exemplo, quando se está a inspeccionar um grande volume de betão. Para obter sucesso numa campanha de inspecção, deve ser executado um plano de amostragem.

3.4.11.3 - Revisão dos Métodos

3.4.11.3.1 Introdução

O objectivo de um ensaio *in situ* é estimar as propriedades do elemento estrutural. Na maior parte das vezes o parâmetro requerido é a sua tensão de compressão. Para a estimar é necessário conhecer a relação entre o resultado do ensaio e a tensão do betão. Para construções novas, essa relação é, normalmente, estabelecida, empiricamente em laboratório. Para construções existentes, é estabelecida através da realização de ensaios *in situ*, em locais pré-selecionados da estrutura, procedendo-se, ao mesmo tempo, à determinação da tensão através da extracção de carotes, em zonas adjacentes ao local dos ensaios. A Figura 3.50 apresenta um gráfico que relaciona a tensão de compressão de um provete cilíndrico em função dos resultados obtidos através de um ensaio *in situ*.

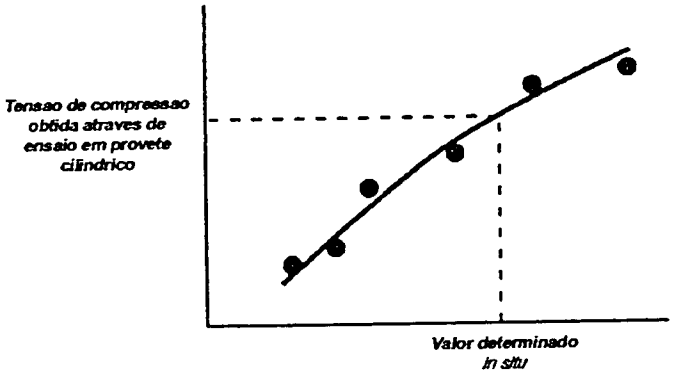


Figura 3.50 - Exemplo da relação entre a tensão de compressão obtida através do ensaio de um provete cilíndrico e o valor obtido através de um ensaio *in situ* [23]

Esta relação pode ser utilizada para estimar a tensão do betão na estrutura A precisão da estimativa depende directamente do grau de correlação entre a tensão do betão e a quantidade medida pelos ensaios. O ensaiador deve possuir um grande conhecimento sobre a quantidade que deve ser medida, e como ela se relaciona com a tensão do betão.

3.4.11.3.2 Método da medição da dureza superficial - Esclerómetro

A realização deste ensaio consiste na aplicação de pressão, através do disparo de um pistão de aço, perpendicularmente à superfície do material que se pretende caracterizar.

O esclerómetro (também designado por esclerómetro de Schmidt ou por esclerómetro Suíço), foi desenvolvido por volta de 1940, por um engenheiro suíço de nome Ernest Schmidt (daí o seu nome).

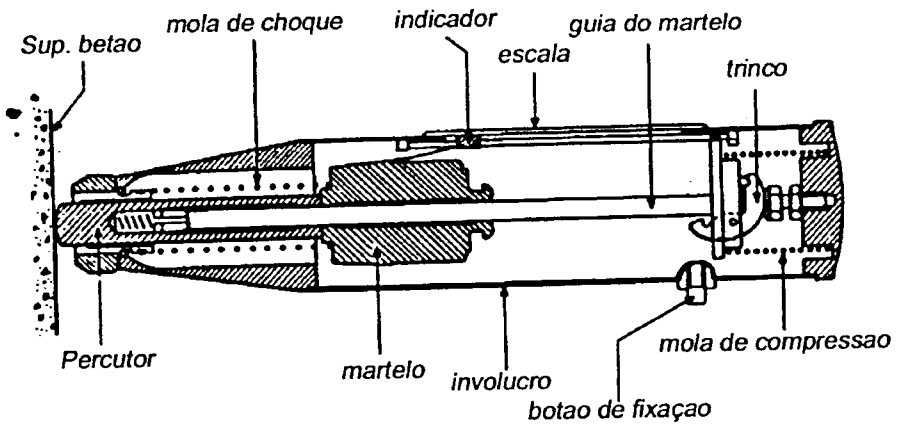


Figura 3.51 - Esquema do esclerómetro de Schmidt [26]

O aparelho tem os seguintes componentes principais: o corpo exterior, a mola de compressão, o martelo, a mola de choque e o percutor. Para realizar o ensaio, coloca-se o percutor em contacto com a superfície a ensaiar. Quando se estende o percurtor, um ferrolho engata o martelo até ao topo superior do dito percutor. É então que o esclerómetro é empurrado contra o elemento. Esta acção provoca uma extensão na mola, que liga o martelo ao corpo do esclerómetro. Quando se atinge o limite de extensão, o engate solta-se e a mola empurra o martelo contra o elemento. O martelo choca com a sua superfície e ressalta. O esclerómetro move um cursor, que indica a distância do ressalto. Esta é medida através de uma escala, numerada de 10 a 100, registando esse número como o número de ressalto "rebound number", indicado na referida escala.

A chave, para entender as limitações inerentes a este teste de estimativa da tensão de compressão do betão, é perceber os factores que influenciam a distância de ressalto. Fundamentalmente, este ensaio envolve um problema de força de impacto e propagação de ondas de choque. A distância de ressalto depende da energia cinética do martelo, antes do impacto, com o corpo do pistão de compressão e da quantidade dessa energia que é absorvida, durante o impacto. Parte dessa energia é absorvida pela fricção mecânica, dentro do aparelho, e a outra parte é absorvida pela interacção entre o pistão e a superfície do elemento estrutural. É este factor que faz do número de ressalto um indicador acerca das propriedades desse elemento. A energia absorvida pela estrutura depende da relação tensão-extensão do mesmo. No entanto essa energia está relacionada com a sua resistência e com a sua rigidez.

Uma estrutura com rigidez menor, absorverá mais energia do que uma estrutura com maior rigidez. Por exemplo, um betão com menor resistência possui um número de ressalto menor.

No ensaio com esclerómetro, o número de ressalto apenas é influenciado pelo zona situada próximo do pistão percutido. Por isso, o ensaio é sensível às condições locais.

O número de ressalto não representa o que se passa no interior da estrutura, uma vez que só ensaia a camada próxima da superfície (numa espessura de cerca de 3 cm [26]). Na execução do ensaio deve evitar-se as superfícies rugosas e de porosidade elevada.

Com base nos resultados obtidos, pode-se estabelecer uma correlação entre o índice de ressalto ou índice esclerométrico e a tensão de rotura do elemento.

No betão são vulgares as relações do tipo [26]:

$$\sigma_r = an^b \text{ ou } \sigma_r = ae^{bn} \qquad \text{(Equação 3.20)}$$

em que:

σ_r = tensão de rotura do betão;

ã, b = constantes;

n = índice de ressalto ou índice esclerométrico.

Com base nestas relações são elaborados ábacos que tornam este ensaio expedito. Para que os resultados sejam credíveis é necessário que já existam resultados obtidos experimentalmente, em estruturas semelhantes.

Se se pretender avaliar as alvenarias, a pressão aplicada deve ser inferior à aplicada em elementos de betão armado, uma vez que a sua resistência é menor.

Resumindo, sendo o ensaio do esclerómetro simples de executar, há muitos factores além da resistência do betão que influenciam o resultado final do teste.

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM C 805-79, pela ISO/DIS 8045 e pela BS 4408: Part4: 1971.

3.4.11.3.3 Método da medição da resistência à penetração

Nesta técnica, mede-se a profundidade de penetração de um ponteiro, quando impelido contra um determinado elemento estrutural, através de uma unidade de controlo.

Tal como no ensaio anterior, o ensaio de penetração é uma técnica utilizada essencialmente em elementos de betão, para obter a sua resistência superficial. De qualquer modo também pode ser utilizada em alvenarias, tomando os mesmos cuidados referidos no ensaio do Esclerómetro.

A técnica de penetração de uma sonda, envolve a utilização de um aparelho, cuja finalidade é forçar a sonda, feita numa liga de aço de elevada dureza, a penetrar no elemento estrutural (é conhecida como a pistola de Windsor). A dimensão da penetração é um indicador da resistência à compressão do elemento. Este método é semelhante ao do ensaio com esclerómetro, com a excepção de que a sonda embate na estrutura com muito mais energia do que o pistão do esclerómetro.

A sonda penetra na peça até que a energia cinética inicial seja absorvida. Esta energia é função da carga de pólvora, utilizada para propulsionar a sonda, da localização da sonda no aparelho, antes do disparo, e das perdas por fricção, à medida que a sonda percorre o cilindro do aparelho propulsor. Um requisito fundamental deste ensaio é que a sonda possua um valor consistente de energia cinética inicial.

À medida que a sonda penetra na estrutura, alguma da energia é absorvida por atrito, e a restante, é absorvida pelo esmagamento e fractura do elemento alvo do ensaio. Não existem estudos rigorosos dos factores que afectam a geometria da zona fracturada, mas a sua forma é, provavelmente, a que se ilustra na Figura 3.52. Normalmente, forma-se uma região em forma de cone, na qual o betão, neste caso, fica muito fracturado, sendo esta, a zona em que a maior parte da energia da sonda é absorvida.

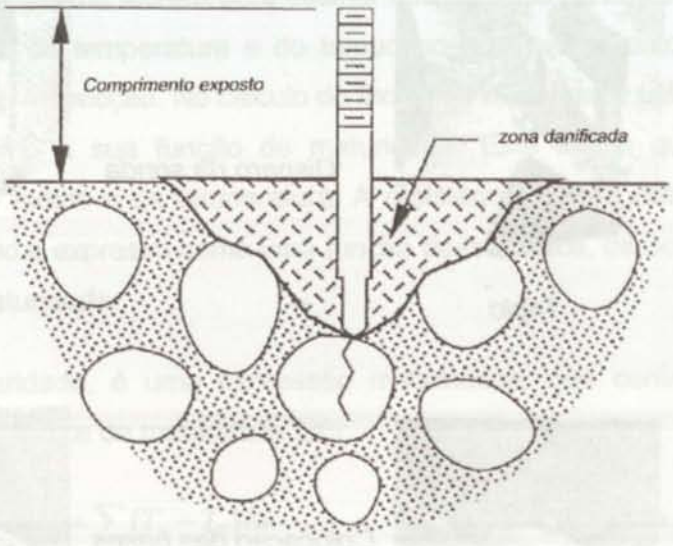


Figura 3.52 - Forma, aproximada, da zona, no betão, afectada, durante o teste de penetração [23]

A instrumentação necessária para a realização do teste consiste na unidade de base (pistola) que faz penetrar a sonda, pelo elemento de posicionamento e guia da sonda e pela própria sonda.

Os procedimentos utilizados neste teste estão referidos na norma ASTM C 803. Assim, utiliza-se um aparelho regulador de molas, para conduzir uma ponteira de aço com 3,56 mm de diâmetro até ao betão. A penetração com o ponteiro cria um pequeno buraco na superfície do betão. Remove-se o ponteiro do buraco, que é limpo com pressão de ar comprimido e, no fim, mede-se a profundidade do dito buraco, com um medidor normalizado. Utiliza-se esta profundidade para estimar a resistência à compressão e estabelecer uma relação prévia de resistência. Num sistema corrente, a máxima penetração é limitada a 7,60 mm.

A sensibilidade da penetração do ponteiro ao aumento de resistência dos elementos a ensaiar, faz com que este teste não seja recomendado para tensões de compressão maiores do que 28 Mpa, para elementos de betão armado, por exemplo.

Figura 3.53 - Sequência do ensaio de penetração de Windsor [26]

3.4.11.3.4 Método baseado no conceito de maturidade

Este ensaio é utilizado apenas em elementos de betão.

O betão fresco possui um acréscimo de resistência devido a reacções químicas exotérmicas entre a água e a pasta cimentícia, na sua mistura. Uma vez que tem humidade suficiente, a intensidade das reacções de hidratação é influenciada pela temperatura do betão. O aumento da temperatura de conservação provoca o aumento do nível das reacções. A extensão da hidratação e, por isso, da resistência, em qualquer idade, depende do historial térmico do betão.

Este método utiliza uma técnica para estimar a resistência do betão *in situ*, levando em conta os efeitos da temperatura e do tempo no desenvolvimento da resistência da estrutura alvo de inspecção. No cálculo do *índice de maturidade* utiliza-se o historial do betão, bem como a sua função de maturidade. Este índice quantifica os efeitos combinados do tempo e da temperatura. A resistência de um determinado elemento de betão armado é expresso como uma função desse índice, de acordo com a relação resistência - maturidade.

A função maturidade, é uma expressão matemática, que converte o historial de temperatura, no índice de maturidade [26]:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0)\Delta t \qquad \text{(Equação 3.21)}$$

em que,

$M(t)$ = Maturidade, em graus-dias ou graus-hora;

Δt = intervalo de tempo de cura, em dias ou horas;

Ta = média da temperatura o betão, durante o intervalo de tempo Δt;

T_0 = temperatura de referência.

Tradicionalmente, a temperatura T_0, utilizada na Equação 3.21, é a temperatura abaixo da qual a tensão de rotura do betão, nela conservado, permanece constante, e que se assume ser de -10 °C [26].

A utilização deste método requer o estabelecimento de uma relação resistência/maturidade para o betão que vai ser ensaiado. O historial de temperatura do betão *in situ* é continuamente monitorizado (através de termo-pares), sendo que, a partir desses dados, calcula-se o índice de maturidade *in situ* (factor tempo-temperatura ou idade equivalente). Conhecendo esse índice e a relação resistência-maturidade, pode-se estimar a resistência *in situ* da estrutura.

Está disponível, comercialmente, instrumentação que, automaticamente, determina o índice de maturidade, designada por medidores de maturidade.

A norma ASTM C 1074, indica o procedimento para a utilização do teste de maturidade, bem como fornece exemplos de como se calcula o factor tempo - temperatura ou idade equivalente, a partir do historial de temperatura determinado. A

norma ACI 306 R, ilustra o uso deste método para estimar a resistência "in situ", durante a operação de betonagem, em tempo frio.

Figura 3.54 - Sequência do ensaio de maturidade [adapt. www.germann.org]

Este método é apropriado para estimar o desenvolvimento da resistência do betão. Esta estimativa é baseada em dois princípios fundamentais: (1) existe água suficiente para a hidratação contínua, e (2) o betão na estrutura é o mesmo que o utilizado no desenvolvimento da relação resistência / maturidade. Os próprios procedimentos de cura (tal como é referido na norma ACI 308) asseguram que a primeira condição é satisfeita. A segunda condição requer confirmações adicionais, de que o betão, na estrutura, tem o potencial de resistência correcto. Tal pode ser determinado realizando testes de resistência de rápida execução, que forneçam indicações correctas sobre o nível da resistência. Tal verificação é essencial quando se está a estimar a resistência *in situ*, para a realização de operações importantes, tais como a remoção de escoramentos ou a aplicação de pré-esforço.

3.4.11.3.5 Ensaios de arranque

Os ensaios de arranque, conhecidos na literatura internacional como *pull-out tests*, são ensaios que se efectuam em estruturas de betão, e dividem-se essencialmente pela forma como são planeados. Assim, temos os ensaios planeados antes e após a betonagem. A principal diferença é que, nos primeiros, é necessário deixar os dispositivos dentro do elemento de betão.

3.4.11.3.5.1 Ensaios planeados antes da betonagem

O fundamento do método consiste no arranque de um dispositivo, fixo nos moldes ou cofragens do elemento a ensaiar, de modo a ficar colocado no interior do betão depois da betonagem. Existem várias versões do ensaio, em que a principal diferença são as

dimensões do dispositivo de arranque, sendo a mais conhecida pelo ensaio *Lok-test*.

3.4.11.3.5.1.1 Teste Pull-Out

O teste Pull-Out mede a máxima força necessária para arrancar uma peça de metal embebida num elemento de betão, constituída por um disco metálico e por um veio centrado no referido disco.

Aplica-se a força contínua, por intermédio de um macaco hidráulico, que reage contra a superfície de betão através de um anel de apoio, concêntrico com a dita peça de metal (Figura 3.55).

Figura 3.55 - Macaco de pressão utilizado no ensaio de arranque (Lok-test) [adapt. www.germann.org]

À medida que a peça embebida á arrancada, um fragmento de betão, em forma de cone, é também extraído. O diâmetro desse fragmento, *d3*, é determinado pelo diâmetro inferior do anel de reacção, enquanto que o diâmetro menor, *d1*, é determinado pelo diâmetro da peça embebida. Os requisitos para a realização deste ensaio são mencionados na norma ASTM C 900-82 e ISO/Dis 8046. A profundidade e o diâmetro da peça metálica embebida devem ser iguais, mas não existem referências sobre a sua dimensão. O diâmetro interior do anel de reacção deve ser, entre 2 a 2,4 vezes, o diâmetro da peça embebida. Isto quer dizer que o ângulo do tronco de cone, formado pelos supracitados diâmetros, pode variar entre 54 e 70 graus [23] e [26]. Esta geometria deve ser utilizada no desenvolvimento das relações de resistência.

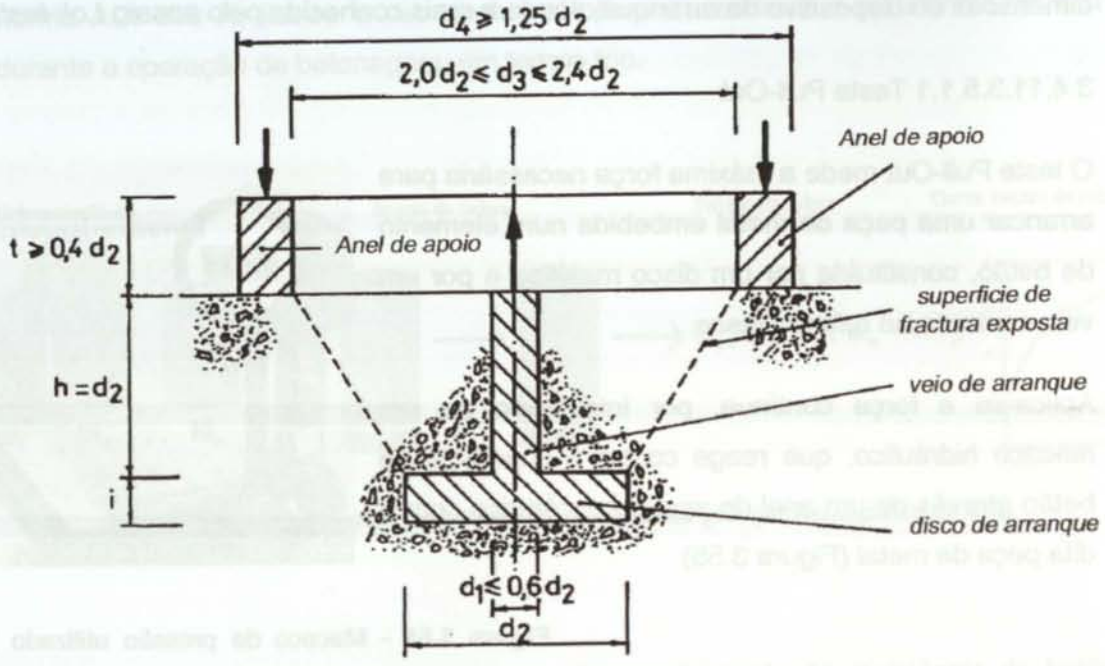


Figura 3.56 - Esquema do ensaio de arranque [26]

Ao contrário dos testes do esclerómetro e de resistência à penetração, este teste sujeita o betão a cargas estáticas que são responsáveis pela análise da tensão.

Considera-se que um ensaio *Pull-out* bem sucedido é aquele que produz uma superfície de fractura bem definida no betão e que determina com precisão as propriedades de resistência do mesmo. De qualquer modo, e uma vez que não existe consenso acerca dos parâmetros de resistência, torna-se necessário desenvolver uma relação empírica entre a resistência ao arranque e a resistência de compressão do betão. Essa relação aplica-se somente a configurações de ensaio específicas, bem como a betões cujos componentes estejam previamente definidos.

A resistência do arranque é determinada pela zona de betão localizada próxima do tronco de cone, definido pela peça embebida e o anel de reacção. As peças embebidas, que existem no mercado, impõem profundidades de inserção de cerca de 25 a 30 mm. Por conseguinte, apenas um pequeno volume de betão é testado.

Este ensaio apresenta bons resultados na determinação da resistência à compressão de estruturas de betão armado, de modo a:

- avaliar o tempo de cura do betão;

- avaliar a qualidade do betão de recobrimento, fundamental para a protecção das armaduras, quando a estrutura entrar em serviço.

A utilização deste método está limitada às construções novas, devido à necessidade de inserir as peças metálicas no betão.

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM C 900-99 e pela BS 1881: Part 207.

3.4.11.3.5.2 Ensaios planeados após a betonagem

Estes ensaios surgiram para ultrapassar a dificuldade colocada pelos métodos anteriores, que exigem o planeamento atempado para a sua realização.

3.4.11.3.5.2.1 Ensaio Dinamarquês

É um ensaio idêntico aos citados anteriormente e surge na bibliografia muitas vezes designado por *Capo-Test*.

Para a realização do ensaio é necessário fazer um furo no betão com cerca de 18 mm de diâmetro e 45 mm de profundidade. Utilizando um disco de corte com o diâmetro do furo, fixo num veio de diâmetro inferior, obtém-se uma cavidade circular, concêntrica do furo, com 25 mm de diâmetro e a igual profundidade.

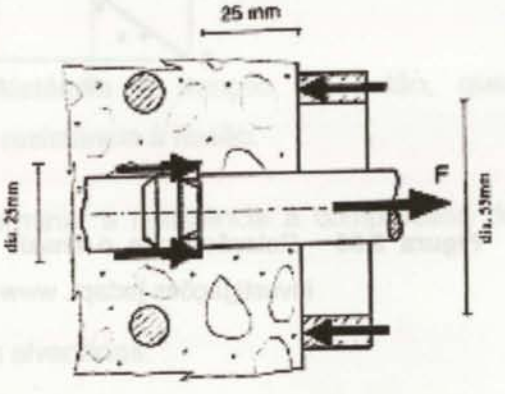


Figura 3.57 - Esquema do ensaio *Capo - Test* [26]

Introduz-se no furo o dispositivo de arranque, constituído por um veio e uma anilha expansiva. Quando esta atinge a cavidade circular, o veio permite a aplicação de um aperto na anilha, que alarga para um diâmetro de 25 mm. A geometria do dispositivo de arranque e o diâmetro do anel de apoio são idênticos aos do *Lok-Test* [26].

Este ensaio revela-se uma alternativa credível à extracção de carotes, na determinação da resistência à compressão dos elementos. Para além dos resultados serem obtidos imediatamente, revela outras vantagens, tais como:

- controlar a qualidade final da estrutura;
- avaliar a integridade da estrutura;
- avaliar a resistência da estrutura, quando sujeita a acções não previstas, como a acção do fogo.

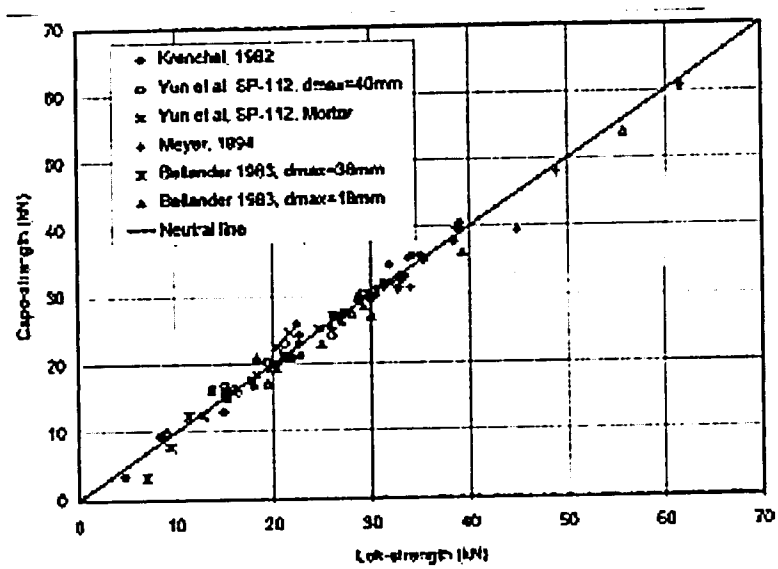


Figura 3.58 - Relação entre o ensaio *Lok-Test* e o ensaio *Capo-Test*, determinada em 6 investigações [adapt. www.germann.org]

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM C 900-99 e pela BS 1881: Part 207.

3.4.11.3.5.2.2 Ensaio da fractura interna

Neste caso, o teste, requer a execução de um buraco com 6 mm de diâmetro, onde se coloca ancoragem em cunha, com uma profundidade de 30 mm, aproximadamente.

O dispositivo de arranque é constituído por um eixo de forma troco-cónica, à volta do qual se coloca uma bucha metálica expansiva. Ao puxar o veio, a bucha alarga de encontro às paredes do furo. O contacto entre a bucha e o betão é efectivado pelo vinco saliente que esta possui.

O binário máximo fornece uma indicação da resistência à compressão do betão.

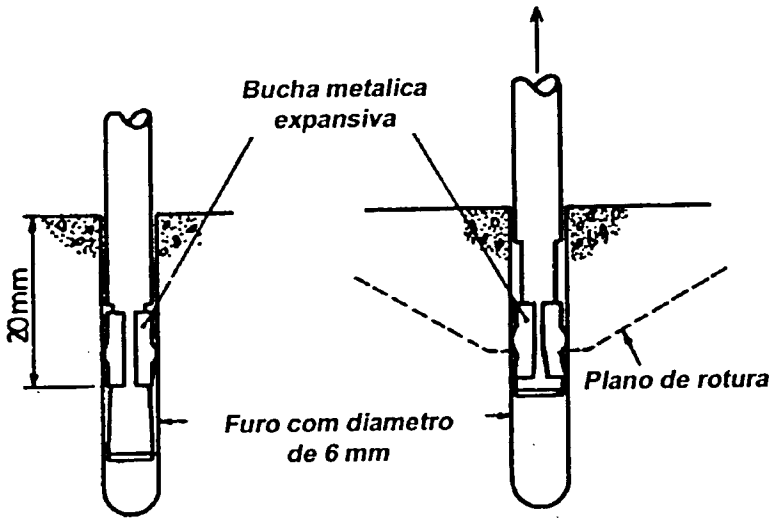


Figura 3.59 - Esquema do ensaio de Fractura Interna [26]

3.4.11.3.6. Ensaios de tracção

Neste tipo de ensaios determina-se a resistência à tracção do betão, quer directamente quer através da determinação da resistência à flexão.

Através de curva de calibração, pode-se determinar a resistência à compressão do mesmo elemento.

O ensaio *pull-off* também pode ser utilizado em alvenarias.

3.4.11.3.6.1 Teste Pull-Off

Este ensaio consiste no arranque de um disco de aço, normalmente com 50 mm de diâmetro, colado na superfície do elemento estrutural. Esta ligação pode ser realizada através de elementos altamente adesivos, tais como as resinas epóxi. Aplica-se depois uma força de tracção, incrementada por acréscimos de carga. Antes da colagem, a superfície deve ser completamente limpa, para permitir uma boa aderência. Se o betão se encontrar carbonatado ou ter sido fabricado com cimento aluminoso, deve-se efectuar uma carotagem parcial para que a rotura se dê a maior profundidade. Também pode ser utilizado este procedimento no caso de se pretender avaliar a aderência entre camadas de betão diferentes, ou quando forem detectadas delaminações no betão. Neste caso, a carotagem deve atravessar a superfície de separação, observando-se se a rotura se deu ou não por essa superfície (Figura 3.60).

A sua principal aplicação é a determinação da resistência de elementos de betão. È um dos ensaios de mais fácil execução, além de que pode ser realizado em qualquer local da estrutura, sem ser necessário qualquer planeamento do mesmo.

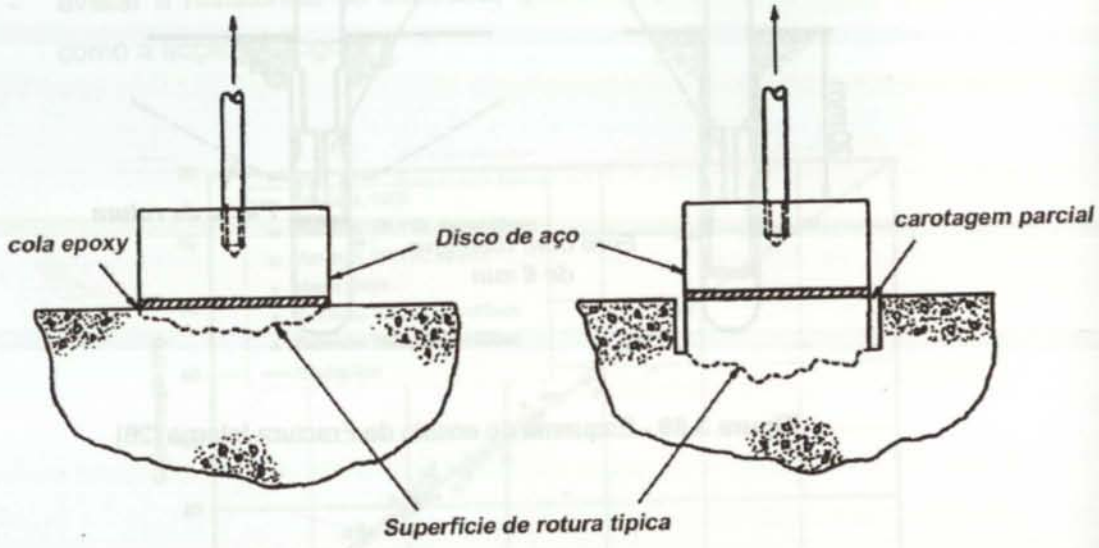


Figura 3.60 - Esquema do ensaio de tracção directa *Pull-Off* [26]

Através de gráficos de calibração, pode-se determinar a resistência à compressão do material sujeito ao ensaio.

Quando a força traccionada exceder a do betão, nesse local, ele quebra. A área da quebra é semelhante à da amostra, sendo que assim podemos calcular a tensão de tracção do elemento a ensaiar. Através dos já citados gráficos de calibração, pode-se estimar a tensão de compressão do betão.

Figura 3.61 - Realização do ensaio de tracção directa *Pull-Off*, numa laje de betão [adapt.www.germann.org]

Os procedimentos de ensaio deste teste são simples e fáceis de executar. Ao contrário de outros testes, como o *Lok-Test*, este ensaio não necessita de pré planeamento. A maior desvantagem deste teste é que está limitado às zonas superficiais da estrutura.

Em relação aos ensaios em alvenaria, em alguns casos, este ensaio pode ser utilizado para determinar a tensão de ligação entre os tijolos/pedras e a argamassa. Uma das limitações relaciona-se com as dimensões dos inertes, superiores às dos do betão, sendo, por isso, necessário ensaiar uma quantidade maior de material para estabelecer curvas de correlação mais representativas. Normalmente, a forma de rotura do material arrancado do interior da parede pode aproximar-se de um cilindro ou de um cone, consoante as características do material. A resistência ao corte e à tracção da alvenaria podem ser identificadas em função dessa geometria conforme se ilustra na Figura 3.62 [25].

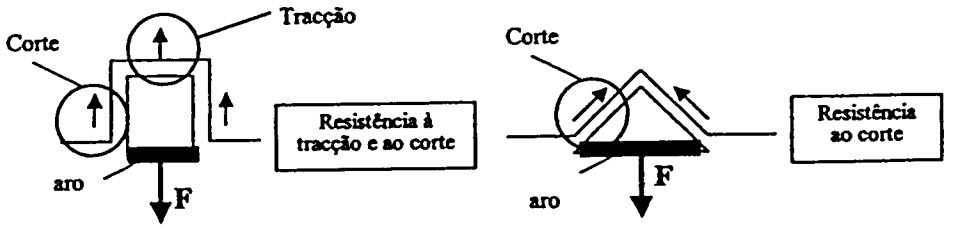


Figura 3.62 - Geometria dos provetes arrancados pelo ensaio de tracção directa *Pull-Off*, em paredes de alvenaria e determinação da resistência [25]

Este ensaio encontra-se normalizado pela BS 1881: Part 207 e pela ASTM D 1144.

3.4.11.3.6.2 Ensaio de tracção por flexão

Este teste mede a força necessária para provocar a ruptura de uma carote de betão, de forma cilíndrica. Essa força, bem como a relação de resistência previamente definida, são utilizadas para estimar *in situ* a resistência à compressão.

Para construções novas, a carote é feita, inserindo um tubo de plástico no betão fresco. Esse tubo pode ser ligado à cofragem e ser cheio durante a betonagem. Em alternativa, as amostras podem ser preparadas para betão endurecido, utilizando uma broca especial para executar a carote. Por isso, este ensaio pode ser utilizado para a inspecção quer de construções novas quer de construções existentes.

O ensaio consiste na aplicação de uma força numa direcção paralela à superfície, no topo da já referida carote, com 55 mm de diâmetro. A zona de rotura situa-se a 70 mm de profundidade.

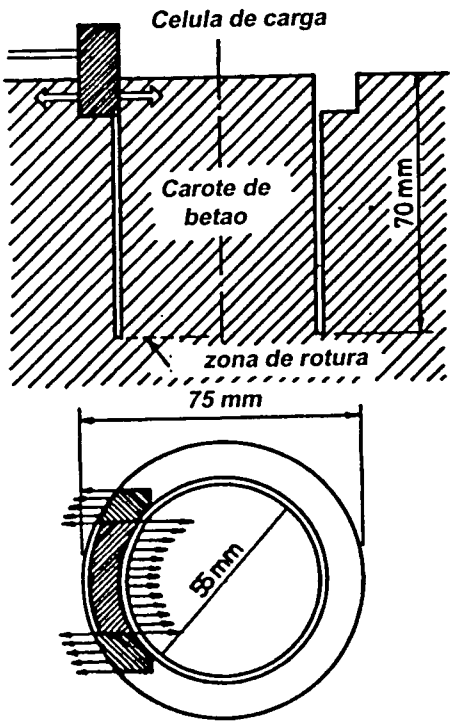


Figura 3.63 - Esquema do ensaio tracção por flexão [26]

Tal como no teste *pull-out*, este ensaio sujeita o betão a uma força de pequena intensidade, e mede as propriedades de resistência estática do betão. A carote é submetida a um carregamento semelhante ao de uma consola, sendo que a sua base está sujeita à combinação de esforços de corte e de flexão.

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM C 1150.

3.4.11.3.7 Métodos Combinados

Referem-se à combinação de dois ou mais métodos *in situ*, para estimar a resistência do betão. Pela combinação de resultados pode-se estabelecer correlações multi-variadas para a sua avaliação. Aumenta-se, assim, a precisão dessa estimativa. O conceito fundamental é que se dois métodos são influenciados, de maneira diferente, pelo mesmo factor, o seu uso combinado resulta num efeito de neutralização, que aumenta a precisão da resistência estimada. Por exemplo, um aumento do teor de humidade aumenta a velocidade de impulso, mas diminui o número de ressalto (esclerómetro).

Este ponto será referido com maior detalhe no capítulo referente às estruturas de betão armado.

3.4.11.3.8 Resumo

Foram revistos os métodos que podem ser utilizados na estimativa da resistência *in situ*, referentes, sobretudo, a estruturas de betão.

O Quadro 3.10 resume o desempenho dos testes apresentados, quer no que se refere à sua precisão quer no que diz respeito à facilidade de execução. O Quadro também indica os métodos que se aplicam a construções novas e os que se aplicam em construções já existentes. Um método de teste que possua como entrada "++" significa que é um método de fácil aplicação ou que resulta em estimativas de resistência da estrutura mais exactas, quando comparado com aqueles que possuam como entrada "+". Geralmente, aquelas técnicas que envolvam um planeamento da localização do teste e a inserção de hardware requerem um maior cuidado na sua aplicação. No entanto, esses métodos tendem a fornecer resultados mais fiáveis, na estimativa da resistência. O utilizador deve considerar as características individuais de cada um, aquando da selecção do sistema de teste *in situ*, para uma determinada aplicação específica.

Os testes *in situ* são uma alternativa credível aos ensaios que requerem a extracção de carotes ou podem suprir os resultados obtidos a partir de um número limitado de carotes. Estes métodos são baseados na medição de propriedades do betão que conduzam a uma qualquer relação com a resistência. A exactidão destes métodos é, em parte, determinada pelo grau de correlação entre a resistência e o parâmetro físico determinado através dos testes *in situ*. Na avaliação específica destes resultados, o utilizador deve estar atento a estes factores, que podem afectar o resultado final.

Quadro 3.10 - Relação dos ensaios in situ, em elementos estruturais de betão armado [23]

Método de Teste	Normas	Precisão		Facilidade de execução
		Construções novas	Construções existentes	
Esclerómetro	C 805	+	+	++
Resistência à penetração	C 803	+	+	++
Pull-Out	C 900	++	++ [1]	+
Pull-Off	C 900	++	++ [1]	+
Tracção por flexão	C 1150	++	++	+
Maturidade	C 1074	++[2]	N.A	+

Nos métodos de teste assinalados com "++", obtém-se uma estimativa de resistência mais precisa, sendo também fáceis de se executarem, quando comparados com os métodos assinalados com "+".

"N.A." indicam que o método não se aplica a construções existentes.

"[1]" Não existem normas ASTM para este caso.

"[2]" Os resultados necessitam de ser confirmado com outros métodos.

Quadro 3.11 - Comparação de técnicas utilizadas para determinação da resistência do betão *in situ* [70]

Método	Custo	Velocidade de Ensaio	Dano	Representatividade	Grau de correlação com a resistência à compressão
Carotes	Alto	Baixa	Moderado	Moderada	Bom
Pull-Out **Resistência à penetração**	Moderado	Rápida	Pequeno	Só perto da superfície	Moderado
Pull-Off **Tracção por flexão**	Moderado	Moderada	Pequeno	Só perto da superfície	Moderado
Fractura Interna	Baixo	Rápida	Pequeno	Só perto da superfície	Moderado
Ultra-sons	Baixo	Rápida	Nulo	Boa	Pobre
Esclerómetro	Muito baixo	Rápida	Improvável	Só superficial	Pobre

Quadro 3.12 - Dispersão dos resultados e precisão da estimativa [70]

Técnica de Ensaio	Coeficiente de variação típico num elemento estrutural de boa qualidade	Melhor estimativa da resistência para um nível de confiança de 95%
Carotes:		
- **segundo a Norma**	10 %	± 10 % (3 provetes)
- **pequeno diâmetro**	15 %	± 15 % (9 provetes)
Pull-Out	8 %	± 20 % (6 ensaios)
Fractura interna	16 %	± 28 % (6 ensaios)
Pull-Off	8 %	± 15 % (3 ensaios)
Tracção por Flexão	9 %	± 20 % (5 ensaios)
Resistência à penetração	4 %	± 20 % (3 ensaios)
Ultra-sons	2,5 %	± 20 % (1 ensaio)
Esclerómetro	4 %	± 25 % (12 ensaios)

3.4.12 Ensaios Dinâmicos

A utilização de métodos dinâmicos de análise, realizados *in situ*, constitui uma ferramenta credível para verificar o comportamento estrutural, a integridade do edifício e calibrar parâmetros de comportamento global do mesmo.

O fundamento deste método consiste na medição das frequências próprias de vibração da estrutura. Como a frequência está directamente relacionada com a rigidez e inversamente com a massa da estrutura, mantendo a massa inalterada, consegue-se ao controlar a frequência, controlar também a rigidez.

No entanto esta análise dinâmica não é de fácil aplicação, sobretudo em estruturas com muitos graus de liberdade e em que a sua rigidez estrutural é conhecida, como é o caso dos edifícios históricos. Por outro lado, se se conhecer a rigidez estrutural, se a estrutura tiver poucos graus de liberdade, a aplicação deste método é simples e eficaz.

Figura 3.64 - Sistema de medição: acelerómetros [44]

Assim, através da identificação dinâmica da estrutura, pode-se obter um valor para o módulo de elasticidade dinâmico por calibração de um modelo numérico da estrutura, de modo a que as frequências no modelo sejam próximas das registadas, aliás a esta calibração está associada a fiabilidade do ensaio.

A investigação dinâmica pode ser executada de acordo com os seguintes procedimentos [15] e [43]:

a) *Medições de vibração ambiental*: através da análise dos dados obtidos pela resposta do edifício a forças dinâmicas aplicadas continuamente à estrutura (tráfego urbano, sinos a tocar, vento, etc.). A obtenção dos dados para análise, é feita através da instalação de uma rede de acelerómetros, em zonas diversas da estrutura, criteriosamente definidas. O ensaio consiste na gravação, em tempo real, dos sinais obtidos, que posteriormente são analisados e processados em termos de amplitude e conteúdo de frequência, com recurso a técnicas de análise espectral. Através desta análise é possível determinar as características dinâmicas da estrutura, tais como a sua frequência e modos fundamentais de vibração e o amortecimento estrutural. A vantagem do método é a facilidade de transporte e manuseamento do equipamento e o facto de não afectar o normal funcionamento da estrutura, sendo possível executá-lo em estruturas em uso.

b) *Medições de vibração forçada*: sujeitando o edifício a testes de vibração forçada, através da aplicação de forças de pequena intensidade, por forma a não afectar a integridade da estrutura. A recolha dos dados é feita em termos dos deslocamentos, velocidade e aceleração. A força é induzida através de vibradores mecânicos ou por explosivos de baixa potência e a resposta é medida por acelerómetros. Esta análise permite a identificação do comportamento dinâmico da estrutura, através da avaliação dos parâmetros modais (frequência natural, modos de vibração, coeficientes de amortecimento). O conhecimento destes parâmetros permite a computação da resposta estrutural para qualquer acção dinâmica, se estes testes se repetirem estes testes por um dado período de tempo, pode-se avaliar as possíveis, variações dos parâmetros modais. Estas variações podem estar associadas a modificações na integridade estrutural do edifício, relacionadas com a degradação do mesmo.

Os aparelhos utilizados, acelerómetros, são equipamentos sensíveis e de custo elevado. Por outro lado a interpretação dos resultados obtidos, baseada em manipulações matemáticas e em algoritmos complexos, faz com que os técnicos

tenham de possuir conhecimentos profundos sobre o assunto. A tendência actual é para a disponibilização no mercado de aparelhos mais simples e de uso expedito, assim como de software de análise de resultados.

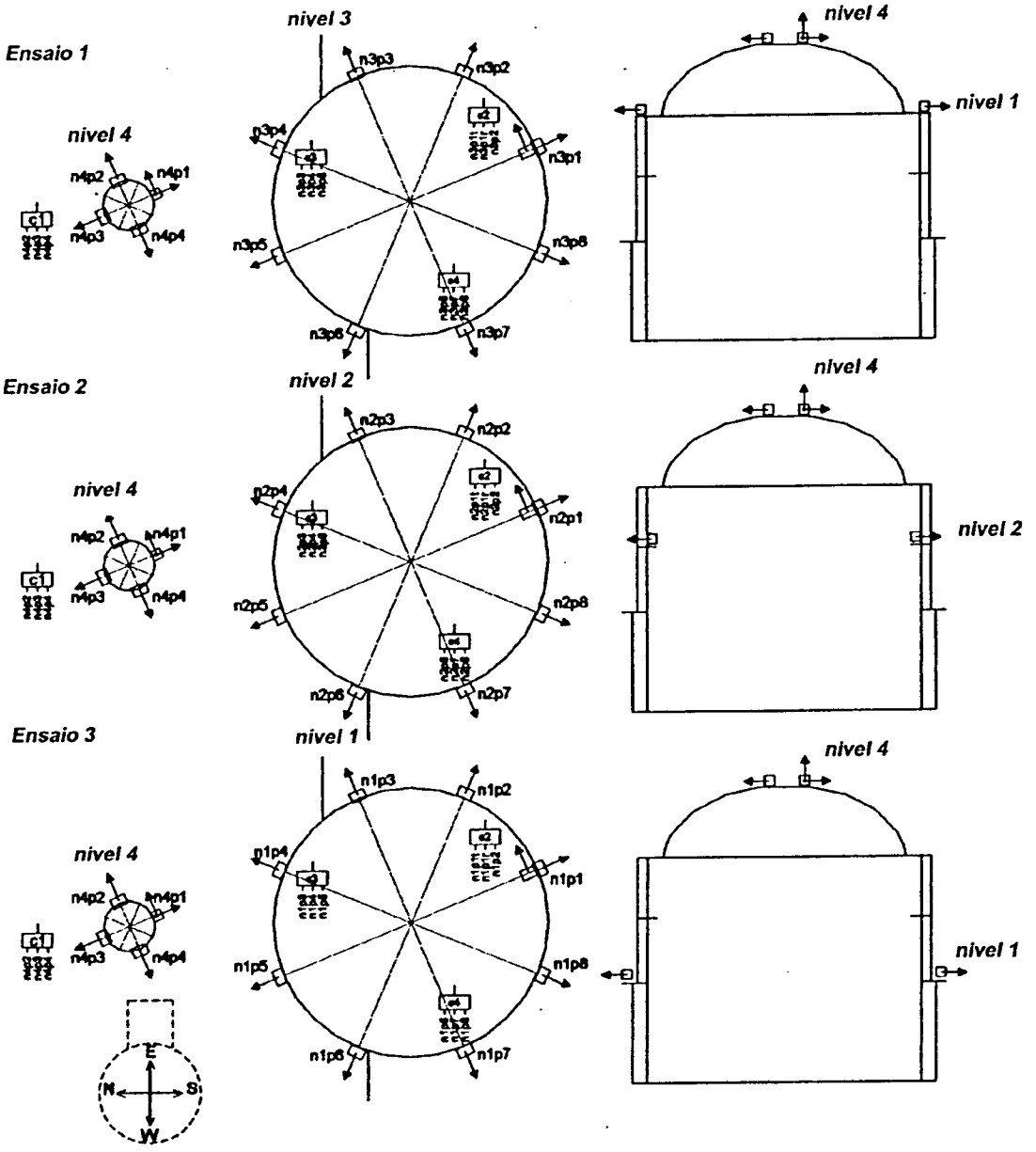


Figura 3.65 - Identificação dos locais de medição: note-se a sua localização em planta (com orientações bem definidas), e em altura [44]

Uma das suas maiores vantagens é ser um método rápido e não intrusivo.

3.4.13 Ensaios com aplicação de pressões

Estes ensaios têm a particularidade da aplicação de pressão nos elementos estruturais, por forma a caracterizar o seu estado de tensão. São ensaios semi destrutivos pois, na sua execução, é necessário proceder à abertura de rasgos ou furos.

O seu campo de aplicação são as paredes de alvenaria.

O conceito fundamental deste método é a libertação, através de uma abertura, do estado de tensão do elemento, introduzindo-se uma célula de carga, com dimensões adequadas ao seu ajuste perfeito, no interior. Com o auxílio de macacos de pressão, o elemento estrutural volta a restabelecer o estado de tensão inicial.

A origem destes ensaios remonta à caracterização de maciços rochosos, generalizando-se a sua utilização para a caracterização de paredes de alvenaria espessa.

3.4.13.1 Ensaio com macacos planos

Este ensaio, realizado *in situ*, destaca-se como sendo aquele que permite obter uma informação credível sobre as características mecânicas de uma estrutura de alvenaria, nomeadamente a sua deformabilidade, resistência e estado de tensão.

Este método é semi destrutivo, pois é necessário introduzir o macaco plano, ainda que de reduzida espessura, na direcção perpendicular ao plano da parede de alvenaria a ensaiar. Normalmente, esta operação é executada através da remoção da argamassa da junta. Depois de realizado, o aparelho pode ser facilmente removido, repondo-se as condições iniciais, isto é, recolocando a argamassa retirada.

O grau de confiança nos resultados obtidos por este método, deve-se sobretudo ao facto de ele ser realizado sem provocar qualquer interferência nas condições reais em que as características mecânicas da estrutura serão determinadas, e na dimensão da superfície alvo de ensaio, cujo comportamento irá ser testado.

A técnica de ensaio foi organizada de modo a fornecer respostas credíveis [43]:

- na medição do estado de tensão da estrutura (ensaio com macacos planos simples);

- na determinação das características de deformabilidade e de resistência (ensaio com macacos planos duplos);
- na determinação da tensão de corte ao longo da camada de argamassa (ensaio com macacos planos duplos).

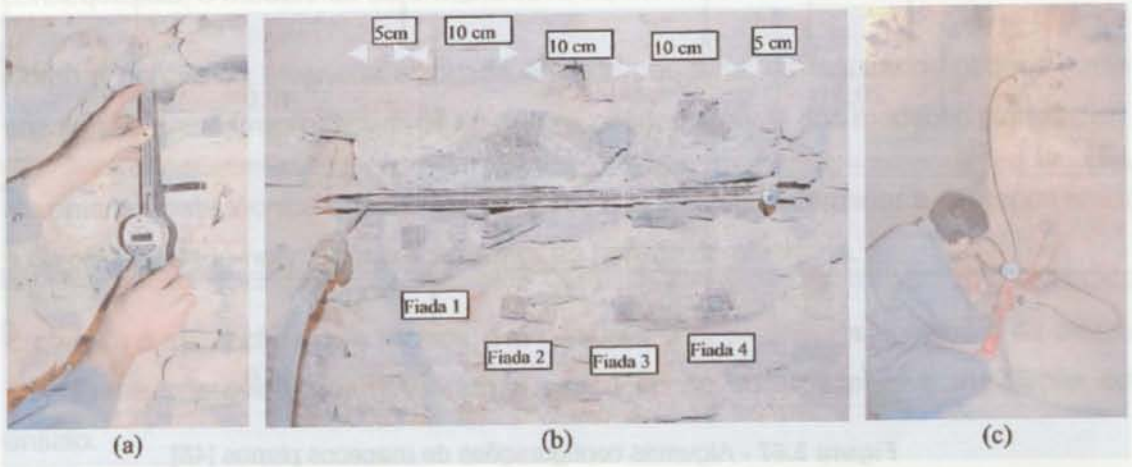


Figura 3.66 - Alguns aspectos relacionados com a execução de ensaios com macacos planos: (a) controlo de distâncias de referência; (b) disposição do macaco plano na ranhura e (c) pressurização do macaco [45]

Estes ensaios estão normalizados de acordo com as normas da ASTM C 1196 e C 1197 [46] e [47], respectivamente para os ensaios com macacos planos simples e duplos.

Estes ensaios baseiam-se nas seguintes hipóteses principais [45]:

- o estado de tensão local é de compressão uniforme;
- a alvenaria à volta do rasgo é homogénea;
- a alvenaria deforma-se simetricamente em relação ao rasgo;
- a tensão aplicada pelos macacos na alvenaria é uniforme;
- a alvenaria deve estar em regime elástico, isto é, os valores estimados devem, quando comparados com os da resistência à compressão, assegurar que a alvenaria está em regime elástico.

A geometria dos macacos planos varia consoante a sua aplicação (Figura 3.67). Assim, as formas circulares (Figura 3.67 a) e b)) são utilizadas em alvenarias de

blocos irregulares, enquanto as formas regulares (Figura 3.67 c) e d)) são utilizados em alvenarias de blocos regulares, como as alvenarias de tijolo.

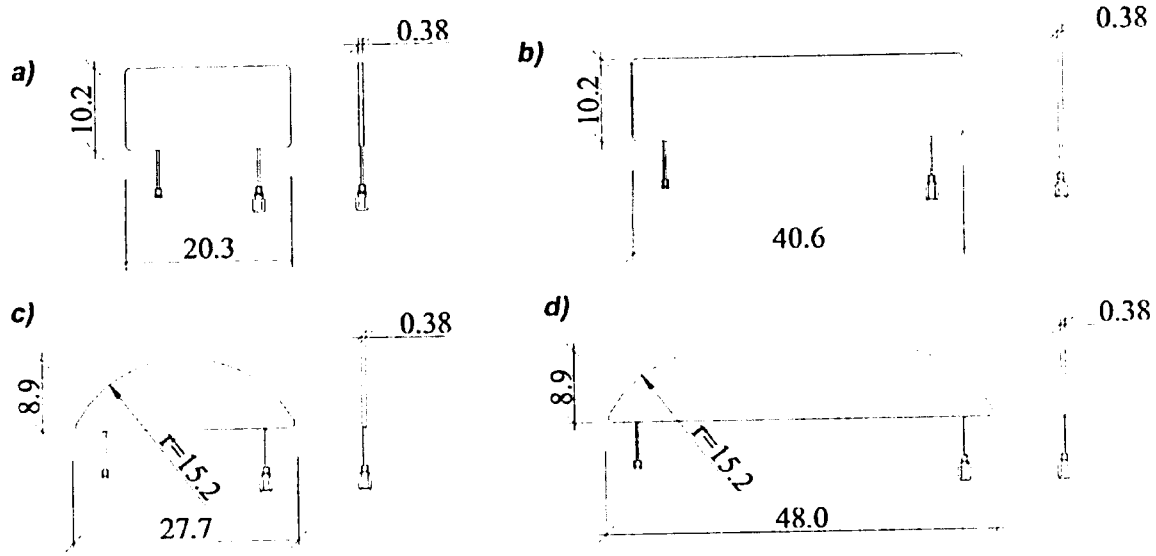


Figura 3.67 - Algumas configurações de macacos planos [48]

O valor do estado de tensão (σ), no local de ensaio, é dado pela expressão:

$$\sigma = p.K_m.K_a \qquad \text{(Equação 3.22)}$$

em que,

p = pressão do líquido;

K_m = constante do macaco plano, que deve ser determinada em laboratório (<1);

$K_a = {A_j}/{A_c}$, quociente entre a área do macaco plano e a superfície de corte (<1).

No capítulo referente às estruturas de alvenaria o método será descrito com mais pormenor

3.4.13.2 Ensaio com Dilatómetro

A utilização dos testes com macacos planos, para a determinação das características de deformabilidade, só fornecem dados sobre a camada superficial da alvenaria. Os testes com dilatómetros têm a vantagem de fornecer essas características, não só do

exterior mas também do interior da parede de alvenaria. Para tal, é necessário executar um furo, com aproximadamente 25 cm, no qual se introduz o dilatómetro. Aplica-se uma pressão hidrostática uniforme na superfície do furo, através de água bombada para o interior de uma sonda dotada de um corpo rígido cilíndrico, envolvido por uma membrana de borracha, medindo-se a deformação obtida, e, por consequência, o módulo de deformabilidade da mesma.

Como a porção de alvenaria ensaiada é muito pequena, os resultados obtidos neste ensaio são menos representativos do que os obtidos através dos macacos planos.

No entanto, esta técnica é muito útil, uma vez que permite determinar a diferença entre a deformabilidade no interior e no exterior da parede de alvenaria.

É comum a aplicação desta técnica, em conjunto com os ensaios sónicos e de cross--hole, uma vez que todos requerem a execução de buracos para a realização do ensaio.

Figura 3.68 - Equipamento e realização de um ensaio com dilatómetro [44]

3.4.14 Fotogrametria

A fotogrametria é um método que permite obter informações sobre um objecto, através da gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas. Consiste na observação do objecto segundo dois ou três ângulos diferentes. A partir das imagens obtidas (bi-dimensionais) é possível a reconstituição de uma imagem espacial.

Esta técnica pode ser utilizada sempre que necessite de desenhos tri-dimensionais precisos e inspecção e medição de edifícios e monumentos.

As fotografias devem ser realizadas com o recurso a câmaras fotográficas de precisão, dotadas de um sistema de miras que permite o ajuste das deformações da película.

Quanto maior é o formato da imagem, mais pormenorizada será a fotografia. Consegue-se obter uma precisão de 10 mm para inspecções à escala de 1:50.

O equipamento necessário para a realização deste ensaio é constituído por [19]:

- um computador com sistema operativo Windows e software de fotogrametria e de desenho;
- uma estação total, munida de caderneta de terreno, conectável ao computador e um distanciómetro laser;
- um aparelho fotográfico, métrico, munido de objectivas de 24 e 50 mm, e programado para o software de fotogrametria;
- mesa digitalizadora.

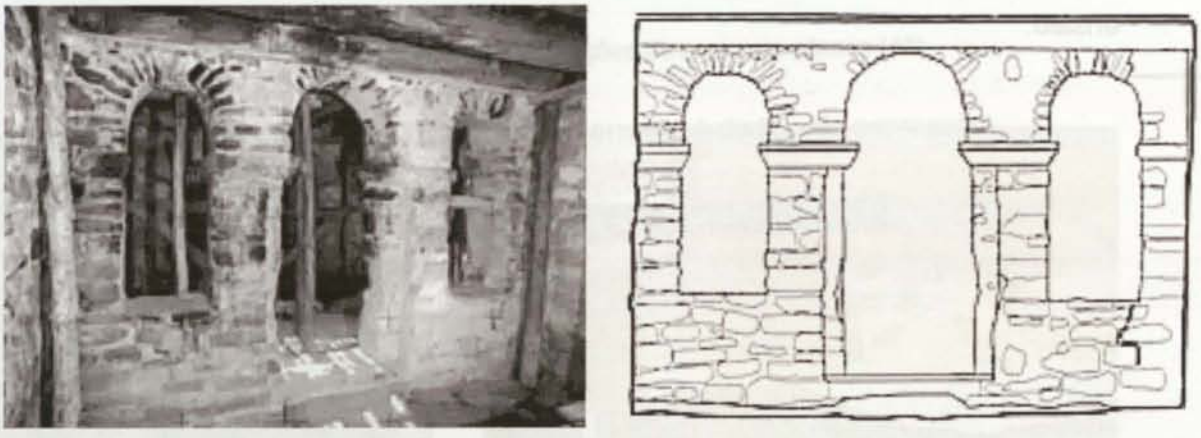


Figura 3.69 - Levantamento de uma estrutura obtido através de fotogrametria [adapt.www.oz-diagnostico.pt]

As principais vantagens da fotogrametria são:

- a utilização dos dados recolhidos para futuras inspecções;
- pode ser utilizada como um meio de monitorizar a estrutura;
- é uma técnica não intrusiva;
- possui uma precisão muito grande;
- auxílio no levantamento de danos de uma fachada;

- flexibilidade na manipulação dos resultados digitais: por exemplo na construção de modelos estruturais de um edifício, utilizando elementos finitos;

- custo relativamente baixo.

3.5 Recolha de amostras e ensaios em laboratório

Como se referiu no início deste capítulo a forma tradicional de se obter a caracterização de um determinado material estrutural é através da realização de ensaios laboratoriais efectuados com amostras retiradas do local de ensaio. O local de extracção é muito importante pois deve representar um ponto significativo das estruturas a ensaiar.

O processo de extracção deve ser compatível com o material, quer seja betão armado, quer seja alvenaria. Por exemplo, se a amostra incluir partículas finas, deve-se evitar a presença de água durante o ensaio, por forma a impedir a lavagem e consequente alteração ou destruição do provete.

Uma das vantagens deste tipo de ensaios é que permite ao investigador a inspecção visual do interior do furo. No caso de paredes de alvenaria é ainda mais notado, pois em virtude da sua constituição: é normal que as paredes de alvenaria de edifícios antigos fossem realizadas com o recurso a dois panos, e que entre eles existisse um enchimento com materiais inertes muito variados (saibro, telhas, pedras soltas, pedaços de tijolo, etc.). Em complemento, pode-se aproveitar o furo para recorrer a métodos expeditos de inspecção visual, tais como a endoscopia e a buroscopia.

A partir destas amostras serão realizados os ensaios laboratoriais, que permitem a determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais.

3.5.1 Carotagem e ensaios de carotes.

A extracção de carotes consiste na retirada de uma amostra de forma circular de diâmetro pequeno ($\geq$ 10 cm, no caso de alvenaria e $\geq$ 5 cm, no caso de betão), em pontos representativos da estrutura.

As carotes devem ser obtidas após a analise da estrutura, para se determinar qual o local mais apropriado à obtenção de uma boa distribuição de tensões no interior do elemento estrutural. Este aspecto é importante, pois se o local escolhido para a furação não apresentar rigidez suficiente, pode acontecer que, na extracção da carote,

o material não apresente as condições mínimas exigidas neste tipo de análise. Por outro lado, a carote deve representar efectivamente o material utilizado na construção da estrutura. As amostras devem ser recolhidas em locais que não afectem a integridade da estrutura e após a sua remoção, sempre que possível deve-se guardar a face exterior da carote, para se obturar de novo o furo com o material original.

Após a escolha do local a amostra é retirada através de um equipamento específico, uma máquina de corte rotativa dotada de coroas com dentes de diamante. A sua extracção deve ser feita de forma a não provocar qualquer perturbação da estrutura, sendo que para isso, o equipamento deve estar o mais firme possível. A pressão necessária para extrair a amostra deve ser uniforme, pelo que o operador do equipamento deve ser experiente e hábil.

Figura 3.70 - Extracção de carotes em paredes de alvenaria [44]

Logo após a sua extracção deve-se etiquetar a amostra, e é recomendável que a carote seja imediatamente ensaiada, uma vez que se pode chegar à conclusão que é necessário uma nova extracção, com diâmetro diferente, maior comprimento, etc. Uma inspecção visual após a extracção, permite ao investigador ter uma ideia acerca dos materiais constituintes, bem como da sua dimensão e características. A carote deve ser preparada e rematada, para que fique com as duas superfícies paralelas, perpendiculares ao eixo da peça.

A maior limitação deste método é o seu custo. Inconvenientes arquitectónicos bem como a extensão dos danos provocados na estrutura podem, também, limitar a extensão e o número de extracção de amostras. Os resultados obtidos podem não ser muito representativos de todo o material da estrutura.

3.5.2 Análise petrográfica de betões e argamassas

Este ensaio consiste na análise em microscópio electrónico de lâminas delgadas de material, para a caracterização física e química dos materiais constituintes.

A análise petrográfica permite obter informações sobre [19]:

- os tipos de componentes que foram utilizados no fabrico, e em que proporções;
- a qualidade dos métodos de trabalho empregues: mistura, compactação, cura, etc.
- reacções secundárias, ao nível da micro-estrutura.

Após a obtenção das carotes, procede-se ao corte das lâminas por meio de procedimentos normalizados. O objectivo da presença de lâminas muito finas é que elas se tornem translúcidas e semitransparentes, para que possam ser observadas através de um microscópio em vários modos ou condições de transmissão de luz [19].

Os equipamentos necessários para a realização deste ensaio são: o equipamento para a extracção das carotes, o equipamento para a execução das lâminas e o microscópio para a sua análise.

A extracção da carote (primeira etapa do método), permite ao técnico a obtenção de uma ideia sobre a homogeneidade do material extraído, bem como uma informação sobre a sua constituição.

A preparação da lâmina delgada requer a execução do trabalho por técnicos qualificados. Dos procedimentos de ensaio, nesta fase, fazem parte a selecção do local para a obtenção da amostra e o corte de um prisma com cerca de 50 x 40 x 10 mm com uma serra de diamante, após o que se deve embeber em álcool e posterior secagem no forno. No final deve-se impregnar o prisma, sob vácuo, com uma resina epóxida de baixa viscosidade contendo um pigmento fluorescente, para evitar a fissuração artificial e a carbonatação. Após a rectificação e polimento da superfície impregnada, procede-se à montagem num dispositivo petrográfico de vidro, com uma serra de precisão, até se atingir a espessura final de 25 microns. (ver Figura 3.71).

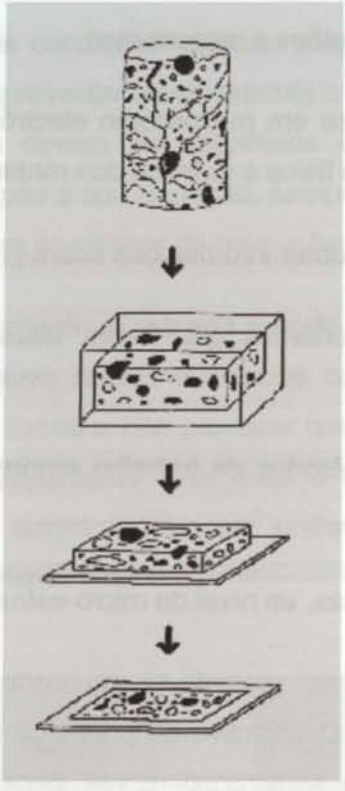


Figura 3.71 - Procedimentos para a obtenção da lâmina para a análise petrográfica [adapt.www.oz-diagnostico.pt].

A análise, através de microscópio, das lâminas delgadas, permite obter informação sobre os seguintes parâmetros [19]:

- a composição e qualidade dos agregados;
- o tipo de cimento, grau de hidratação, conteúdo de cinzas volantes, escórias de alto forno e "filler";
- os vazios preenchidos por bolhas de ar;
- a porosidade capilar e a relação aparente água/cimento;
- reacções secundárias: carbonatação, ataque de sulfatos, reacções entre os agregados e o cimento, lixiviação, etc.;
- microfissuras: sua tipologia nomeadamente fissuras de adesão, fissuras de retracção, fissuras provocadas pelo gelo/degelo, fissuras por reacções alcali-sílica.

O LNEC possui uma especificação específica para a realização deste ensaio: Especificação LNEC E388-1993.

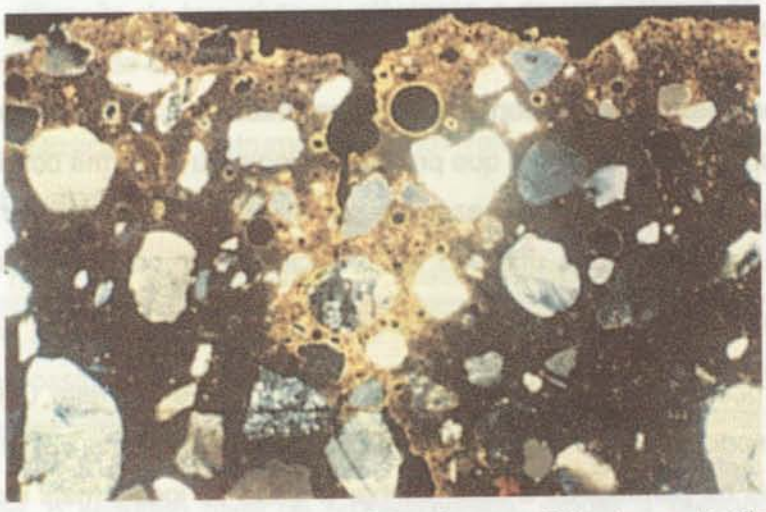


Figura 3.72 - Imagem obtida ao microscópio da superfície de um betão [adapt.www.oz-diagnostico.pt].

Em elementos de alvenaria, este ensaio permite a determinação de: porosidade, permeabilidade, índice de vazios e microfissuras da alvenaria.

3.6 Notas finais

Como já foi referido, pretendeu-se neste capítulo apresentar, de uma forma objectiva os ensaios mais importantes que se utilizam no diagnóstico dos elementos estruturais mais utilizados em Portugal.

Alguns dos que não se encontram aqui citados são referidos nos capítulos seguintes, por serem específicos a determinado tipo de estrutura. Outros nem sequer são referidos, ou porque ainda se encontram pouco desenvolvidos ou porque a sua aplicação no nosso país ainda não é significativa.

3.7 Monitorização

A monitorização consiste na observação e acompanhamento, ao longo de um determinado período de tempo, de um processo patológico com o objectivo de determinar a sua causa e definir as estratégias e técnicas para o atenuar ou eliminar. O objectivo é, assim, diagnosticar correctamente o dito processo patológico, de modo a que este constitua um meio fidedigno de apoio à determinação do estado real de uma estrutura.

Os parâmetros mais registados aquando de uma monitorização são: as deformações, as rotações, os movimentos de juntas, as fissuras, o nivelamento, a verticalidade, as variações de temperatura e de humidade, as tensões, os assentamentos de fundação, as variações de nível freático, etc.

Este registo pode ser realizado pontualmente, em intervalos de tempo definidos pelo investigador, consoante o objectivo que pretende atingir, ou de forma contínua, através de um sistema de aquisição e armazenamento de dados, que por ser muito mais dispendioso e complexo só é utilizado em edifícios de importante valor cultural e histórico.

Antes de se proceder à monitorização de um edifício deve ser feita uma inspecção preliminar, de modo a que os técnicos conheçam a estrutura. Esta inspecção permite determinar quais os parâmetros a acompanhar e quais os locais mais indicados para colocar os equipamentos de mediada.

3.7.1 Objectivos

Um sistema de monitorização, instalado num edifício, durante um determinado período de tempo, permite, através de métodos eficazes [49]:

- a avaliação do comportamento estrutural, através da correlação entre as acções actuantes (temperatura, radiação, vento, sismos, novas forças aplicadas à estrutura, alteração das condições fronteira) e a resposta estrutural (abertura de fendas, deslocamentos e rotações da estrutura de suporte, movimentos diferenciais da fundação, etc.);

- o estudo do comportamento do edifício antes, durante e após os trabalhos de consolidação, ajudando a planear, com eficácia a sua manutenção, com base numa análise da tendência de evolução do seu comportamento;

- a definição dos procedimentos para uma rápida verificação, quer do comportamento anómalo da estrutura quer quando os níveis de segurança da estrutura são ultrapassados.

A monitorização requer a utilização de sistemas estáveis (sem variação) e exactos, capazes de reflectir o real comportamento da estrutura. Por outro lado, os sensores devem ser instalados de forma a que não interfiram nem com a estética do edifício nem com a sua funcionalidade.

Dependendo das condições *in situ*, o projecto do sistema de monitorização deve ser baseado em dois níveis de procedimentos distintos [49]:

a) a utilização de transdutores eléctricos e de um sistema de aquisição e de gravação de dados;

b) a utilização de instrumentos amovíveis e de leitura manual, obtida em intervalos de tempo fixos.

O primeiro nível de procedimentos é mais interessante e atractivo, devido à monitorização em tempo real do comportamento da estrutura, sem a ajuda de técnicos, e à possibilidade de obter informações num determinado intervalo de tempo, entre as diversas leituras.

Pelo contrário, o segundo nível de procedimentos, requer a presença periódica de técnicos no local, sendo que não é possível obter leituras contínuas do comportamento da estrutura. No entanto, tem a vantagem de ser economicamente mais acessível.

Antes de intervir numa estrutura o técnico responsável deve definir como objectivo da monitorização:

- que parâmetros vão ser acompanhados;
- quais os aparelhos de medida disponíveis;
- qual a "resposta" da estrutura às solicitações: que hipóteses se colocam;
- quais os resultados esperados;
- que tipo de monitorização vai ser realizada (curto período de observação ou longo período de observação;
- qual a possibilidade de adaptar o sistema de monitorização adoptado aos resultados intermédios que vão sendo obtidos.

A selecção das secções mais representativas da estrutura, com base no resultado das inspecções preliminares, deve ser realizada em função de alguns critérios:

- dos locais onde se prevêem encontrar as piores condições (quer ambientais, quer mecânicas);
- da duração da monitorização;

- da alteração das condições de funcionamento;

- da acessibilidade aos locais de avaliação.

Quando se está a projectar um sistema de monitorização automático, devem ser tidos em consideração os seguintes aspectos [49]:

- as condições ambientais;

  Na escolha do sistema de medição, o caminho de cabos deve ser pensado de modo a que se tenha em consideração as condições ambientais, de modo a garantir a sua protecção, bem como outros aspectos como o fornecimento de energia estável e contínua, a prevenção contra distúrbios eléctricos e a acessibilidade do sistema para possíveis trabalhos de manutenção;

- a precisão:

  A precisão de um sistema pode ser definida pela análise dos tipos de erros que o podem afectar. Neste tipo de sistemas de monitorização, é importante prestar atenção, não só à precisão dos componentes individuais (instrumentos, recolha de dados e computadores) mas também à precisão global do mesmo;

- a confiança:

  Pelo facto do objectivo principal da monitorização ser a observação a longo prazo do comportamento da estrutura, é fundamental que se confie, ao longo desse período de tempo, no sistema. Por isso, é necessário garantir a confiança nas diversas fases do processo: projecto, instalação e funcionamento.

  O sistema deve estar apto a ser sujeito a inspecções periódicas e para fazer um auto-diagnóstico, com o objectivo de detectar algum mau funcionamento, devido à rotura de ligações internas, contactos defeituosos e outros acidentes.

- a flexibilidade

  Ainda devido ao facto de que o sistema deve estar activo durante um longo período de tempo, deve-se prever a necessidade de alguns

componentes serem substituídos ou até alterados. É, pois, aconselhável projectar sistemas de aquisição de dados e de análise em que seja possível a calibração de constantes e de valores iniciais, o número de itens e de pontos de medição e a frequência dessa mesma medição.

- a manutenção

A inspecção periódica de todo o sistema e a verificação de possíveis desvios nos valores medidos, deve ser executada de uma forma célere, de modo a assegurar a eficácia do sistema. Em alguns casos, é necessário proceder a inspecções de urgência.

3.7.2 Instrumentação e sistemas de processamento de dados

Os parâmetros a determinar dependem do objectivo da avaliação e podem-se dividir em duas áreas principais:

a) parâmetros relacionados com a resposta estrutural

- deslocamentos verticais e horizontais absolutos;
- deslocamentos relativos entre elementos (por exemplo, entre dois blocos de uma parede de alvenaria);
- tensões em zonas críticas,
- presença, extensão e variação da espessura das fendas;
- rotações;
- movimentos nas juntas;
- assentamentos nas fundações,
- acelerações e velocidade.

b) parâmetros relacionados com os edifícios a avaliar:

- temperatura;
- radiação solar;
- humidade;

- nível de água no solo;
- vento (direcção e velocidade).

3.7.2.1 Movimentos de fendas

Antes de se projectar um sistema de monitorização é necessário proceder à inspecção e levantamento das fissuras existentes, para analisar quais as mais importantes, isto é, quais as que podem afectar o comportamento da estrutura. A medição do movimento relativo das fendas, quer a abertura quer o deslizamento, é o método mais aplicado.

Quando se utiliza um sistema automático é necessário recorrer a medidores de fendas eléctricos. Estes aparelhos são fixos à estrutura através de instrumentos esféricos especiais, que eliminam o efeito de curvatura, no sensor.

Quando se utilizam instrumentos de leitura manual, os movimentos nas juntas são determinados com o auxílio de medidores de deformação manuais, posicionados em duas placas de metal fixadas nos dois lados da fenda. Se utilizarmos três aparelhos é possível a medição de deslizamentos entre as superfícies das fendas.

No Quadro 3.13 resumem-se os dispositivos mais utilizados no acompanhamento de movimentos de junta e de fissuras.

Quadro 3.13 - Dispositivos de acompanhamento de movimento de junta e de fissuras [51]

Dispositivo	Funcionamento	Observações
Testemunho rígido de gesso	O gesso firma uma ligação rígida sobre a fissura, o que vai partir com pequenos deslocamentos relativos dos dois lados da fissura, permitindo, por vezes, observar a direcção e amplitude desse deslocamento.	Para uso interior. Dimensões entre 5 x 50 x 100 e 10 x 100 x 200 mm. Recomenda-se a amassadura de gesso puro com 70 % de água (em peso). Com um módulo de elasticidade baixo pode não fissurar com pequenos deslocamentos.
Testemunho rígido de gesso, cal e cimento	Idem	Para uso no exterior. Alguns autores recomendam apenas cal e cimento ou cal e gesso.
Testemunho de vidro	Placa de vidro colada de ambos os lados da fissura, que parte com o seu deslocamento relativo.	Muito frágil e difícil de colar ao suporte, em toda a extensão. É difícil avaliar a direcção e amplitude do movimento relativo a partir da fractura do vidro.
Testemunho de papel	Fita de papel colada dos dois lados da fissura, que rasga ou enruga com os movimentos relativos.	Só detecta grandes movimentos. É muito vulnerável à acção da humidade.

Luneta e régua de ranhuras graduadas	Observa-se a fissura ampliada, com auxílio da luneta, verificando qual das ranhuras graduadas corresponde à sua largura (precisão de 0,1 mm).	Rigor limitado. Serve apenas para a determinação da largura inicial. Pode ter fonte de iluminação incorporada.
Fissurómetro com micrómetro óptico	Luneta que inclui duas escalas graduadas ortogonais, dispensando o uso da régua (precisão de 0,1 mm).	Idem. Pode ser utilizado para avaliar a evolução das fissuras, quando usada em conjunto com dois traços de referência, ortogonais, sobre a zona fissurada.
Réguas graduadas corrediças ou extensómetros mecânicos (plástico, metal ou vidro)	Duas peças rígidas graduadas ou com simples traços de referência que correm uma sobre a outra, quando se verificam movimentos relativos dos dois lados. Os de plástico opaco têm variantes para medir deformações lineares no plano da parede com registo máximo e mínimo, deformações perpendiculares ao plano da parede, evolução de inclinações e deformações complexas no plano da parede (translação oblíqua e rotação).	Os extensómetros de metal ou de vidro limitam-se, em geral, a graduações lineares de referência. Os mais versáteis - pela sua reduzida espessura, flexibilidade e resistência à humidade - são os de plástico. A precisão é variável mas, muitas vezes, não ultrapassa 1 mm.
Extensómetros eléctricos	Extensómetros com configuração especial com filamentos de comprimento variável ou filamentos sucessivamente quebráveis, permitindo medir afastamentos de duas zonas distintas, em função da variação da resistência eléctrica do extensómetro.	Eficácia reduzida ou nula com redução da largura das fissuras, uma vez que são flexíveis. Obrigam à ligação a um data-logger, mas permitem o registo automático e periódico e dos deslocamentos
Dilatómetro ou comparador digital, também conhecido por fissurómetro electrónico	Equipamento de precisão (até 0,002 mm), mede a evolução da distância entre dois testemunhos metálicos (base) colocados um de cada lado da fissura, distanciados de cerca de 200 mm. A colocação de testemunhos e a aferição é feita com barra de invar apropriada.	Tem limites máximos de variação de 2 mm. Antes da deformação exceder esse valor, é necessário alterar a posição dos testemunhos, transportando os valores anteriores.
Paquímetro digital ou mecânico com base de 2 ou 3 pontos (parafusos)	Constituindo uma base com 2 ou 3 parafusos, fixos rigidamente à parede através de furo preenchido com resina epoxi, o paquímetro mede a evolução das distâncias entre eles (vertical e horizontal, no caso da base triangular, que deve ter um ângulo recto, com lados vertical e horizontal, ou rodados de 45°.	O paquímetro ou craveira digital tem maior precisão, atingindo sem dificuldade 0,01 mm, enquanto que o mecânico se limita a 0,1 mm. Os parafusos devem ser de latão e a sua fixação deve ser criteriosa, seguindo as recomendações da bibliografia especializada.

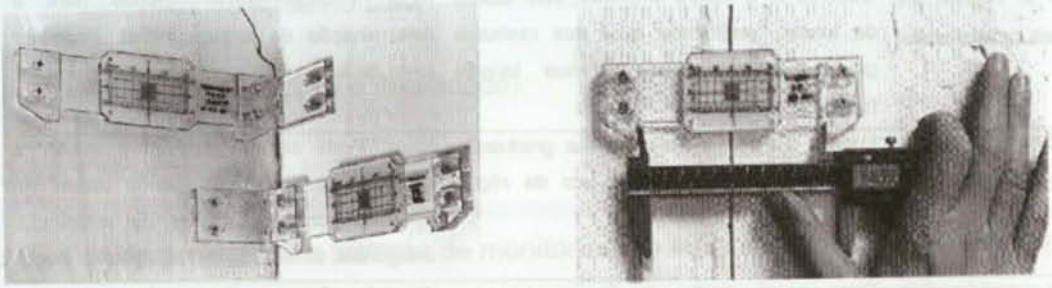


Figura 3.73 – Dispositivos de acompanhamento de movimento de juntas e de fissuras: fissurómetro

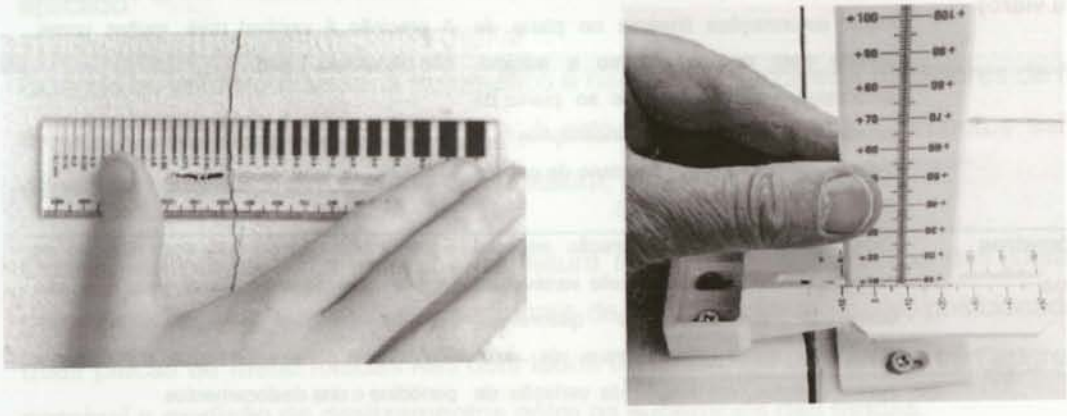


Figura 3.74 – Dispositivos de acompanhamento de movimento de juntas e de fissuras: réguas graduadas

3.7.2.2 Movimentos relativos de estruturas verticais

Na medição de movimentos relativos de estruturas verticais, como paredes e pilares, utilizam-se extensómetros. Este equipamento é composto por um arame invariável (invar), de liga de níquel, aço e carbono, colocado em tensão através de um peso, e por um transdutor eléctrico ligado ao sistema de aquisição de dados. Este instrumento é muito fiável e a instalação é muito fácil, devido à sua grande flexibilidade.

3.7.2.3 Movimentos horizontais absolutos

A medição de movimentos horizontais absolutos é feita através de pêndulos directos. É colocada uma viga na parte superior da estrutura, com a função de suportar o pêndulo, enquanto que na parte inferior se instala uma unidade de leitura, equipada com telecoordenadores, que têm por função a medição dos dois deslocamentos dos componentes do sistema.

3.7.2.4 Assentamentos diferenciais

Os assentamentos diferenciais das estruturas de fundação são medidos através da utilização de vasilhas de nivelamento, que contêm um líquido e comunicam entre si. Dentro de cada vasilha existe um transdutor eléctrico que mede o nível do líquido.

Usualmente, também se instalam sistemas de monitorização geotécnica, que incluem medidores de assentamentos e piezómetros, por forma a analisar a deformação das diferentes camadas de solo de fundação, relacionadas com a variação dos níveis freáticos.

3.7.2.5 Rotações

Para medir as rotações, são utilizados inclinómetros. Estes aparelhos fornecem uma medição relativa, isto é, local, que pode, em alguns casos, ser afectada por anomalias localizadas, devidas ao comportamento da estrutura de alvenaria. Os inclinómetros medem o ângulo formado pelo aparelho com um plano horizontal. Existem vários tipos de inclinómetro:

- inclinómetros de bolha;
- inclinómetros baseados em sensores de tensão (resistências): baseados na medição da deformação de um elemento devido à inclinação do aparelho;
- inclinómetros baseados em sensores electrónicos de deslocamento: sistemas do paralelogramo e pendulares;
- inclinómetros baseados em servo-aceleradores: que têm como referência a aceleração da gravidade.

3.7.2.6 Condições ambientais

A deformação de uma estrutura pode estar relacionada com as condições ambientais como por exemplo, a temperatura, os níveis de radiação, a velocidade e direcção do vento.

A medição da temperatura é a mais importante porque afecta a deformação no comportamento da estrutura.

A medição, quer da temperatura quer do gradiente térmico de uma parede, por exemplo, pode ser efectuada com o recurso a medidores de temperatura (termómetros), colocados em pequenos buracos executados nas paredes.

Para além da temperatura, outros parâmetros de origem ambiental, devem ser avaliados, por força da sua influência sobre o comportamento estrutural de uma construção:

- humidade relativa do ar;
- pressão atmsférica;
- humidade superficial;
- humidade dos elementos estruturais;
- fluxo de calor.

3.7.2.7 Sensores de fibra óptica

A utilização de sensores de fibra óptica pode constituir-se como um elemento que introduz uma melhoria significativa na instrumentação relacionada com a monitorização de uma estrutura. Utilizados em vários sistemas estruturais, desde edifícios de alvenaria a edifícios de betão armado, revelaram possuir características capazes de responder favoravelmente aos aspectos salientados nesta secção. Assim, para além de serem necessários poucos sensores para monitorizar a construção,

a) são duráveis, isto é, as fibras oferecem segurança nas medições a longo prazo;

b) são insensíveis a influências externas, a perturbações electromagnéticas, à corrosão, à variação de temperatura e à humidade;

c) possuem grande resolução (0.002 mm), precisão (0,2 %) e estabilidade;

d) são fáceis de instalar , quer à superfície que embebidos no betão ou em argamassa.

e) monitorizam deformações dos edifícios, aberturas de fendas, deslocamentos de apoio, e avaliam a eficiência da intervenção de reabilitação/reforço.

3.7.3 Sistemas de aquisição e processamento de dados

Os instrumentos instalados em diferentes locais da estrutura são ligados, em primeiro lugar, a unidades periféricas, que convertem o sinal analógico em informação digital, que por sua vez é processado por um sistema automático (computador). As unidades periféricas, são muito úteis pois reduzem de forma significativa o comprimento dos cabos de cada instrumento, e estão ligados a um sistema central de aquisição e processamento de dados, que deve possuir as seguintes funções [49]:

- aquisição de dados periódica, em intervalos de tempo pré-definidos;
- aquisição de dados especial, a pedido do operador;
- gravação de dados;
- elaboração dos dados e verificação, quer de anomalias, quer dos limites de segurança;
- representação gráfica dos dados, em formato designado.

Os dados obtidos podem ser, facilmente, transmitidos a longa distância, através de modem.

A recolha de dados deve, no entanto, ser verificada, por forma a detectar possíveis anomalias ou erros, nomeadamente nos sensores de recolha de informação. Por isso, é de boa norma a discussão dos resultados obtidos ao longo da operação de monitorização de edifícios.

Os técnicos capacitados para executarem e analisarem o processamento de dados, enfrentam uma quantidade de informação elevada cuja análise pode revelar-se complexa.

4. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão Armado

4.1 Introdução

A utilização massiça de estruturas de betão armado na construção de edifícios, levou a que as questões relacionadas com a durabilidade e a degradação do material tivessem um tratamento secundário por todas as entidades intervenientes na construção civil.

Criou-se o mito inicial do betão como material eterno, capaz de resistir às mais diversas solicitações, capaz de assumir as mais diversas formas e de vencer vãos nunca antes atingidos.

Apenas nos anos mais recentes, primeiro pelos investigadores e só depois pelos construtores e utilizadores finais, foi dado ênfase às questões que se levantam quando se abordam estes temas.

No entanto, e sobretudo nos países mais desenvolvidos (casos dos Estados Unidos da América, da Inglaterra, da Alemanha e dos países Nórdicos), constatou-se que o betão era um material que está sujeito a acções de degradação, capazes, no limite, de levar uma estrutura ao colapso. Não é por acaso que nesses países as verbas despendidas na reabilitação são maiores do que as despendidas em novas estruturas.

Também em Portugal, embora desfasadas no tempo, estas questões estão na ordem do dia, sendo que a comunidade académica encabeça os agentes que demonstram um interesse nesta área.

Os requisitos existentes na legislação actual sobre a durabilidade do betão baseiam-se, sobretudo, na sua composição e nos procedimentos e condições de cura. No entanto, nos projectos mais recentes, é notória a preocupação com parâmetros de qualidade baseados na durabilidade, desde as práticas construtivas até a aspectos de projecto e pormenorização. Para reforçar estes cuidados foram desenvolvidos ensaios e procedimentos que controlam *in situ* a qualidade. Para reforçar a importância destes aspectos, têm sido desenvolvidos modelos que traduzem de forma correcta e exacta a vida útil das estruturas de betão.

É claro que o recurso a ensaios, não serve apenas para o controlo da durabilidade em estruturas novas. São também utilizados com outros fins, como por exemplo, para

avaliar, através das inspecções, estruturas existentes, e posterior determinação da sua segurança estrutural.

De entre as principais propriedades a avaliar, refira-se:

- a resistência à compressão;
- a porosidade;
- a permeabilidade;
- a exposição ambiental;
- a espessura de recobrimento;
- etc.

Para avaliar o estado das estruturas de betão recorre-se à sua inspecção. Esta inspecção deve ser planeada em função do objectivo que se pretende, isto é, pode ser simplificada, quando apenas se pretende definir o estado da estrutura ou detalhada quando se pretende realizar uma peritagem rigorosa à mesma.

De acordo com a sua importância, dentro dos sistemas estruturais utilizados na construção, os ensaios em estruturas de betão armado estão mais desenvolvidos, pelo que, neste capítulo estão descritos com mais pormenor do que nos outros.

4.2 O betão armado como elemento estrutural

O campo de aplicação do elemento estrutural betão armado tem sido, ao longo dos anos, sido muito diverso:

- utilizado como único elemento da construção: por exemplo, em viadutos e pontes;
- utilizado como elemento estrutural principal: por exemplo, em estruturas porticadas;
- utilizado como elemento de fachada: por exemplo, em painéis pré-fabricados.

É, por isso, um material muito apreciado pela sua versatilidade, adaptando-se aos mais diversos requisitos mantendo a competitividade necessária, em termos económicos.

Apresentam-se, resumidamente, as suas principais vantagens e desvantagens:

a) Vantagens:

- trabalhabilidade e flexibilidade: assume as mais diversas formas, podendo ser utilizado em funções estruturais ou arquitectónicas;
- economia de materiais e custos de execução;
- resistência ao fogo: resiste, sem qualquer protecção específica, a uma exposição de, pelo menos, uma a três horas;
- rigidez;
- baixo custo de manutenção;
- facilidade em encontrar os seus materiais constituintes;
- resiste a esforços de tracção/compressão;
- durabilidade;
- mão-de-obra tradicional de construção civil;
- empregue em qualquer sistema estrutural;

b) Desvantagens:

- baixo índice de resistência por unidade de volume: o que implica estruturas de maiores dimensões;
- peso específico elevado;
- dificuldade na execução de reformas e reparações;
- baixa protecção térmica;
- muitos materiais envolvidos na sua produção.

O historial da utilização do betão armado como material de construção revela a tendência para a progressiva diminuição da sua secção, bem como da espessura de recobrimento. Esta tendência é fundamentada com o maior conhecimento sobre o betão, a sua composição e as propriedades dos ligantes, o recurso a programas de cálculo automático mais aperfeiçoados e complexos e a utilização de adjuvantes na sua composição. Todos estes factores conduziram a estruturas de betão armado com maiores riscos para a ocorrência de danos, nomeadamente em construções recentes, relacionadas com a menor protecção das armaduras, aumentando a possibilidade, por exemplo, de danos por corrosão.

A principal consequência, foi a constatação de que o betão armado também envelhece e se degrada, sendo necessário tomar medidas para o evitar, mantendo, no entanto, um bom desempenho estrutural.

Figura 4.1 - Pormenor da degradação de um edifício realizado em betão armado

Aplicam-se aqui dois conceitos de extrema importância: a **durabilidade** e o **desempenho da estrutura**.

Por definição, **durabilidade** é a propriedade que uma estrutura possui quando conserva os requisitos de projecto, em termos de segurança, de funcionalidade e de estética, sem custos adicionais de manutenção [52]. O **desempenho** de uma estrutura é a sua capacidade em satisfazer os fins para que foi projectada, sob o ponto de vista de segurança, funcionalidade e aspecto geral [53].

Dos factores que mais influenciam a durabilidade de uma estrutura de betão armado citem-se [54]:

- o projecto de estabilidade: em especial a pormenorização (sobretudo das peças desenhadas) e o cuidado a ter com a cofragem.
- os materiais: betão e armaduras;
- a execução;
- a cura: humidade e o calor.

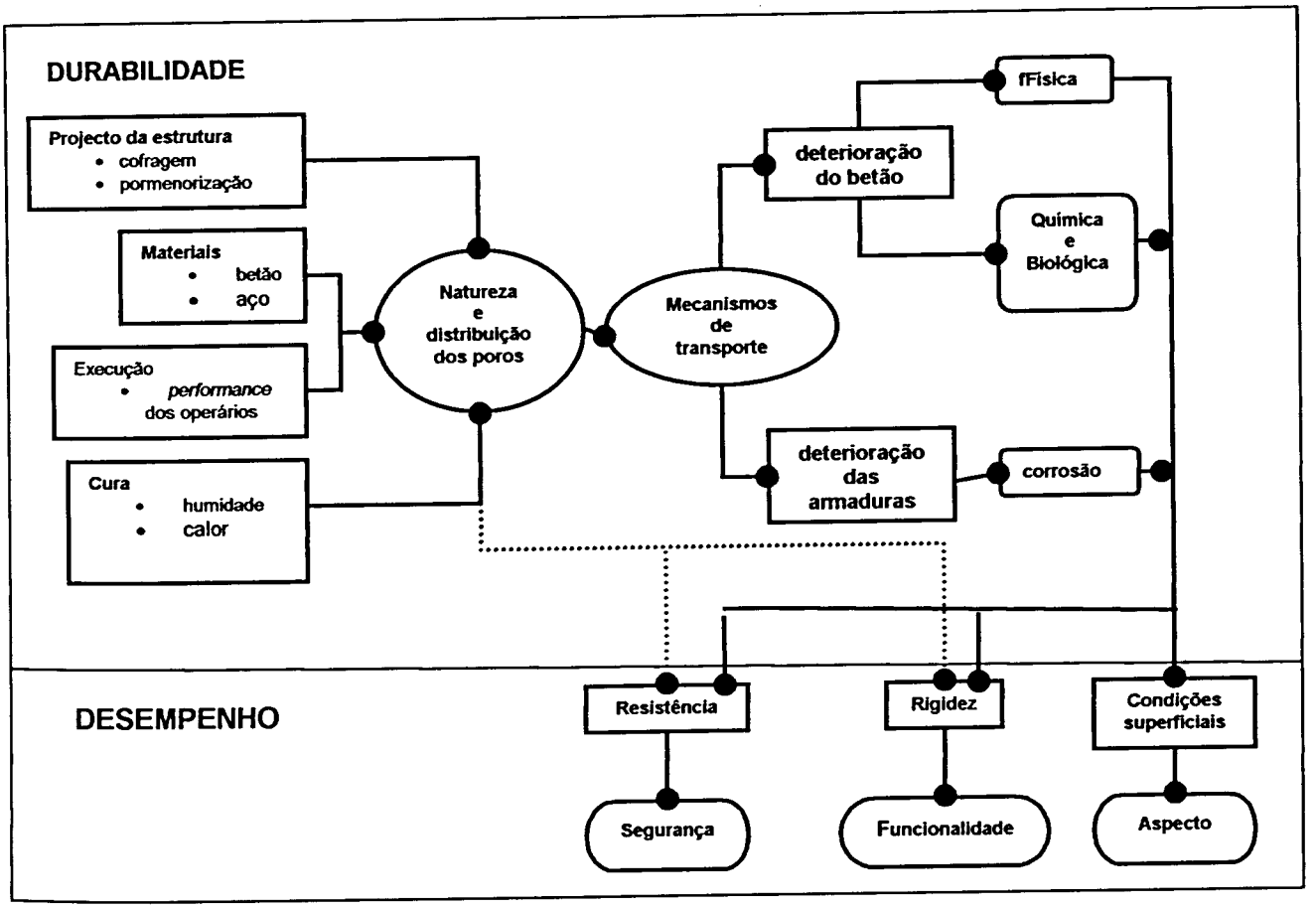


Figura 4.2 - Conceitos de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão armado e suas inter-relações [adapt. CEB, 1992]

No dimensionamento de uma estrutura de betão, em fase de projecto, deve ser definido o período de vida útil, que corresponde ao período de tempo durante o qual a estrutura deve satisfazer os requisitos de segurança, de funcionalidade e estética (ver Figura 4.3). O limite a partir do qual a estrutura deixa de ter um bom desempenho

depende de vários factores, entre os quais, o tipo de elemento estrutural afectado, o seu aspecto, etc.

A partir do momento em que o desempenho da estrutura se torna inaceitável, diz-se que a estrutura está no período de vida residual. Como consequência, torna-se imperativo intervir/reabilitar a dita estrutura para repor a estrutura em níveis de bom desempenho. Após essa acção de reparação a estrutura terá um novo período de vida útil (ver Figura 4.4).

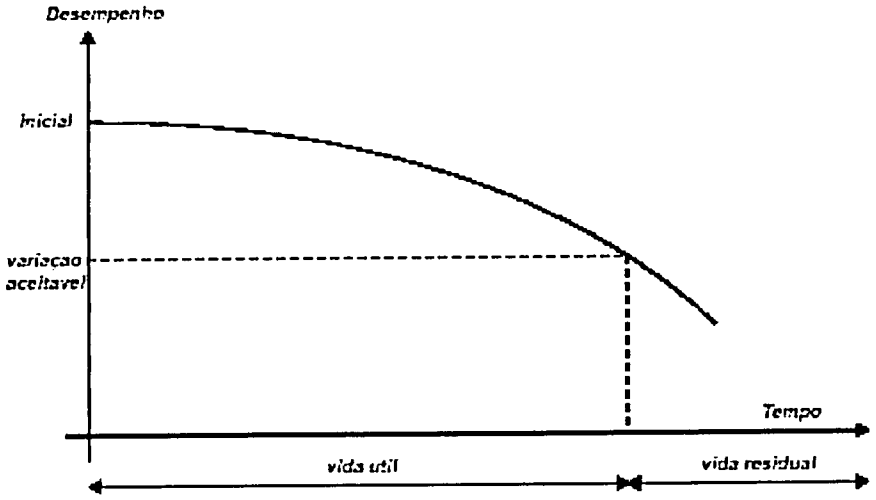


Figura 4.3 - Vida útil de uma estrutura [54]

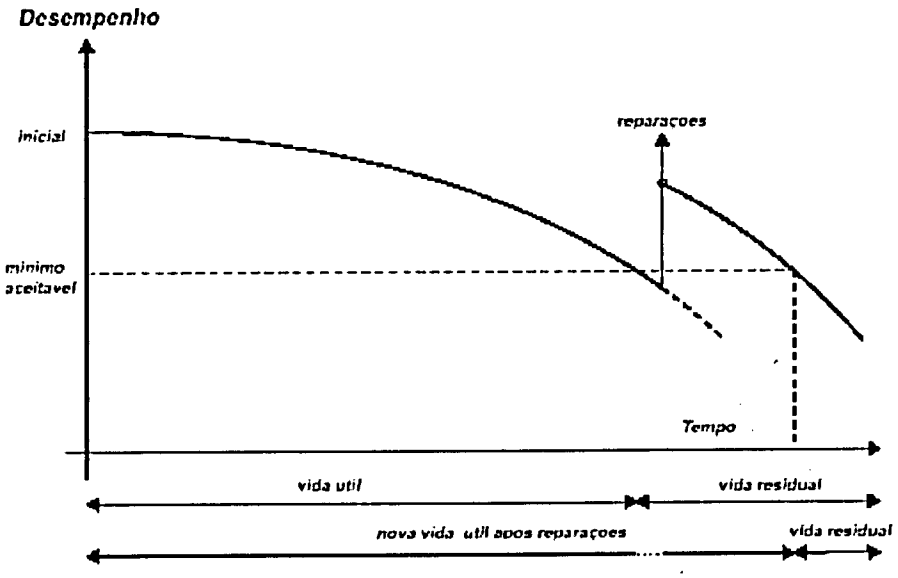


Figura 4.4 - Vida útil e vida residual de uma estrutura [54]

Apesar dos avanços, traduzidos pela introdução destes conceitos nas normas mais recentes, constata-se que existem outros aspectos relacionados com hábitos incompatíveis com a durabilidade que não evoluíram o suficiente, nem existiu, por parte dos responsáveis pelo sector, qualquer intenção para os corrigir através, por exemplo, de especificações eficazes. De entre estes aspectos, podem-se referir as características dos ligantes utilizados, o emprego de inertes adequados, a utilização de dosagens, atendendo apenas à resistência mecânica do material e descurando aspectos importantes como a compactação e a cura do elemento em causa.

A imposição inicial do período de vida útil do material ou do edifício projectado é fundamental para estabelecer as características do material, as condições de execução, o cálculo, as futuras operações de inspecção e manutenção durante o tempo especificado.

Esta tarefa deve ser definida antes de qualquer outra e é primordial quando se pretende projectar uma estrutura durável, segundo os conceitos atrás referidos.

4.3 Principais causas dos danos detectados em estruturas de betão armado

Os problemas estruturais têm origem em aspectos relacionados com a falta de capacidade resistente das estruturas, como por exemplo: a deformação excessiva, os assentamentos de apoio, a falta de durabilidade das construções, acabamentos defeituosos por ausência de pormenorização, ausência de protecção contra agentes agressivos, falta de manutenção durante o período de vida útil da estrutura.

Estudos, referidos em [14] e [56], em que se pretendeu relacionar a origem das principais causas dos processos patológicos com as fases do processo de construção, constatou-se que a fase de concepção e projecto de estruturas de betão armado é a principal responsável pela falta de durabilidade e desempenho da estrutura.

Por outro lado, em estudos realizados em Espanha [55], que vieram reforçar os dados atrás citados, constatou-se que os danos localizavam-se, preferencialmente, em vigas e lajes, conforme indica a Figura 4.5.

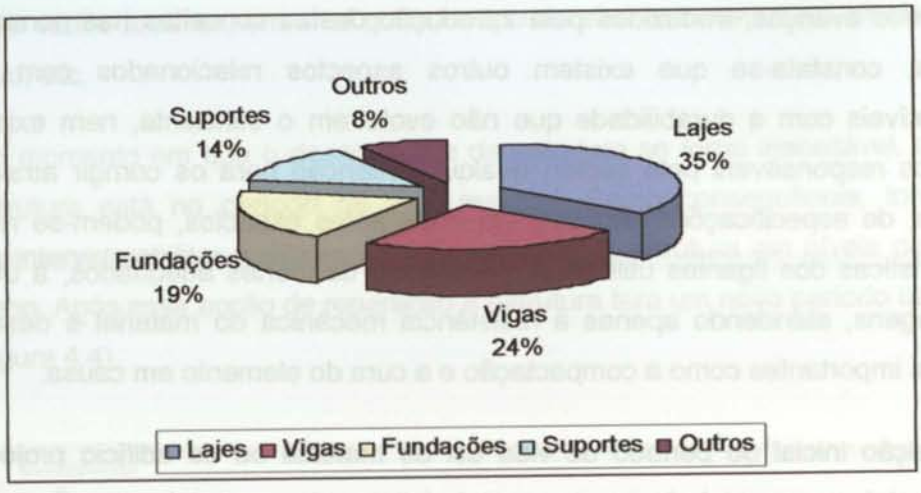


Figura 4.5 - Localização dos danos em elementos de betão [55]

De entre o tipo de danos encontrados, cerca de 60 % correspondem a fissuras. Outros danos encontrados foram: a deformação excessiva (em lajes e vigas de pouca rigidez) e a corrosão de armaduras (em estruturas situadas em ambientes agressivos, como os ambientes marítimos).

Conclusões adicionais podem ser extraídas desses estudos:

- em cerca de 72 % dos casos analisados os edifícios foram construídos nos últimos anos;
- em 50 % das ocasiões, surgiram nos dois primeiros anos após a execução;
- em 61,7 % dos casos os danos manifestaram-se durante a construção.

Em relação aos sintomas encontrados refira-se que as fissuras aparecem rapidamente, nos primeiros anos após a entrada em serviço da estrutura. A corrosão, normalmente, demora 10 anos a surgir (dependendo, por exemplo, da sua localização, da espessura da camada de revestimento, etc.). As deformações podem começar a manifestar-se nos primeiros anos, mas é após cinco anos que se observa essa sintomatologia.

4.3.1 Patologias com origem na fase de concepção e projecto

Através dos dados referidos na Figura 2.2 e complementados com estudos realizados nos mais diversos países, pode-se concluir que a fase de concepção e projecto é uma condição fundamental para a obtenção do bom desempenho da estrutura.

A realização de projectos com qualidade é um objectivo prioritário.

Ribas e Figueiras [57] desenvolveram uma análise de projectos de estabilidade, efectuada na região de Entre Douro e Minho, com o objectivo de avaliar a qualidade de projectos de estruturas que integrem processos de licenciamento. Esta avaliação foi efectuada tendo por base um método de avaliação desenvolvido na FEUP e designado por método FEUP/MC [58]. A principal conclusão foi que, em média, a qualidade dos projectos era de baixa qualidade (cerca de 64 % obteve a classificação de medíocre e insuficiente).

A falta de qualidade é, em boa medida, devida ao projecto de fundações (cerca de 56 %). Dentro deste 44 % dos erros detectados são devidos à falta de informação geotécnica, 29 % ao dimensionamento e 27 % à falta de pormenorização.

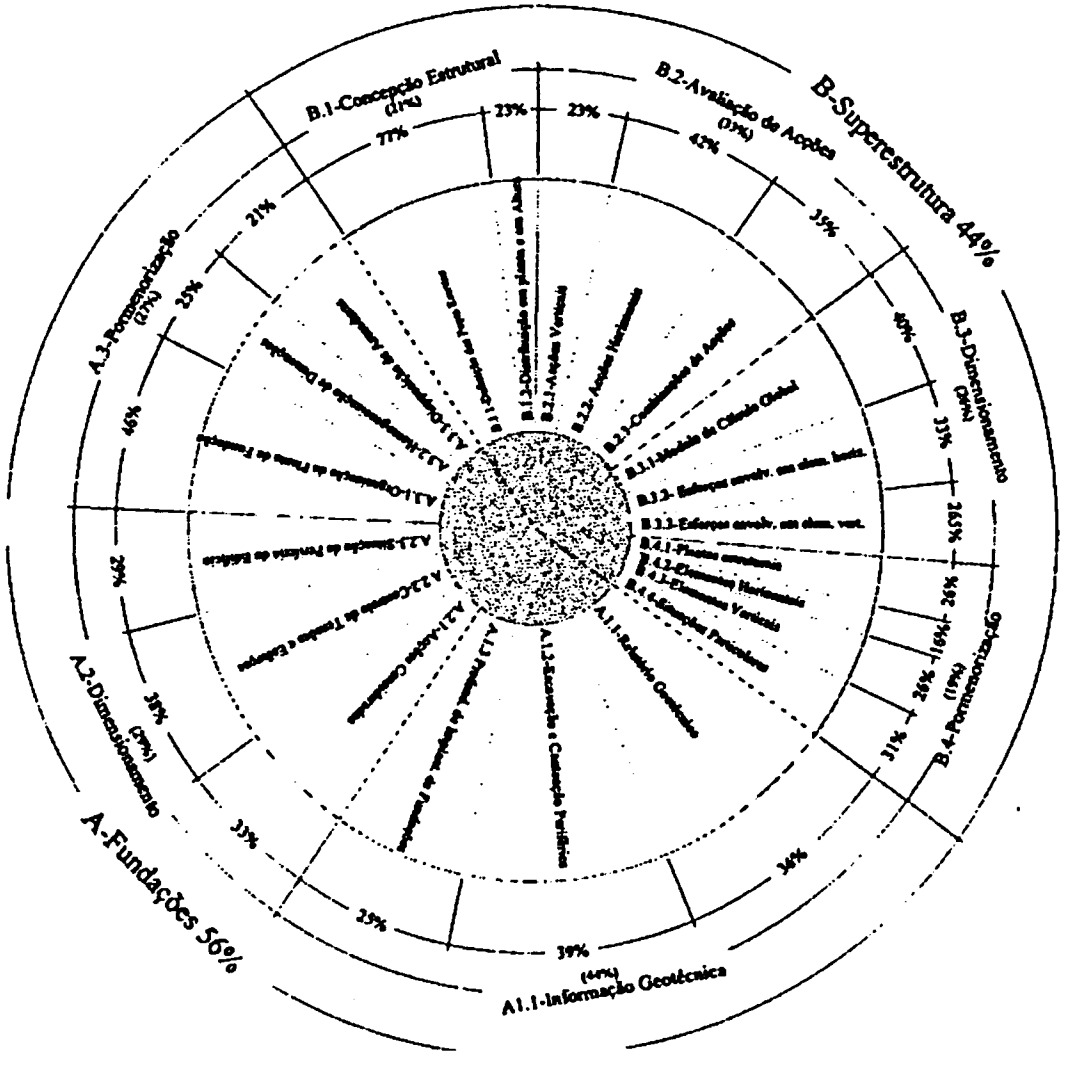


Figura 4.6 - Distribuição da origem da não qualidade dos projectos [58]

Dentro do processo de construção, a fase de concepção e projecto de uma estrutura de betão armado é composta por várias etapas, a saber:

- a fase da concepção;
- a modelação estrutural;
- a definição dos valores característicos das acções actuantes;
- o pré-dimensionamento dos elementos estruturais;
- a avaliação da sua capacidade resistente;
- a verificação da segurança para os diferentes estados limites.

As patologias associadas à concepção e projecto estão relacionadas com todas essas fases. Para se obter uma estrutura durável é necessário que a qualidade e o seu bom desempenho sejam assegurados desde a sua fase inicial, isto é a fase de projecto. É fundamental a concepção de elementos estruturais simples e de fácil execução. Estes elementos devem possuir características que permitam evitar a sua deterioração, como por exemplo [54]:

- a forma dos elementos estruturais deve permitir a drenagem, evitando a saturação do betão e a presença de agentes agressivos ao betão;
- as superfícies devem ser lisas;
- os pontos fracos da estrutura, por exemplo as juntas, devem ser alvo de pormenorização;
- a colocação das armaduras, nas peças desenhadas, deve ser feita com especial cuidado por forma a evitar, por exemplo, zonas inacessíveis aos vibradores e zonas de concentração elevada de tensão;
- aumentar a protecção das armaduras contra a corrosão incrementando a espessura de recobrimento, por exemplo.

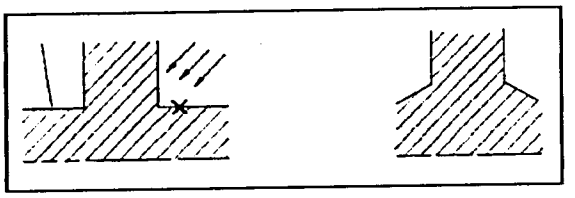


Figura 4.7a - Pormenorização do projecto de estabilidade [53]

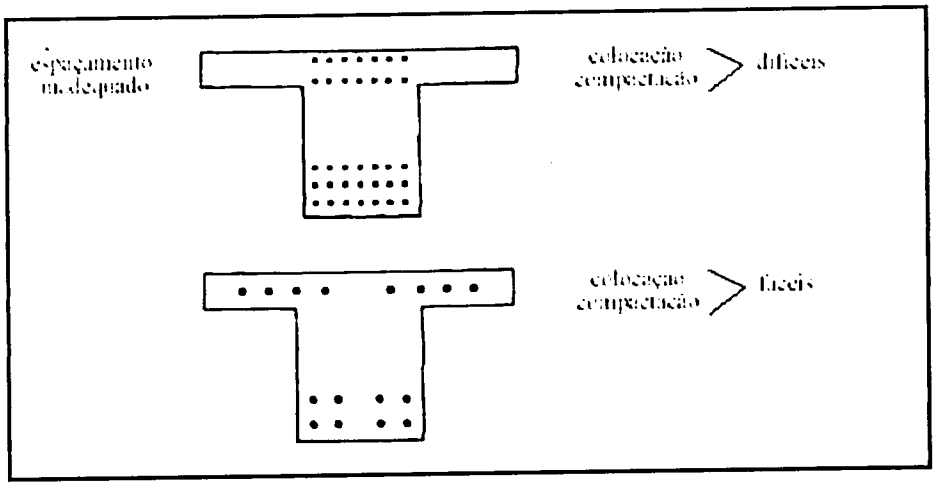


Figura 4.7b - Pormenorização do projecto de estabilidade [53]

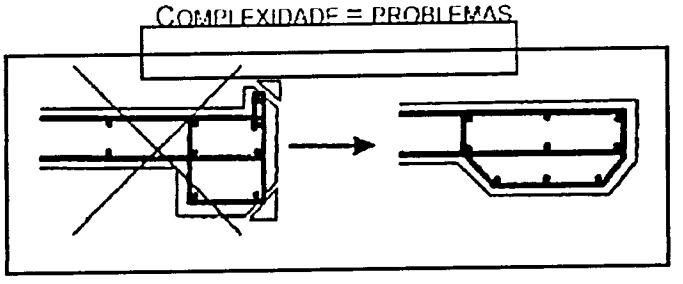


Figura 4.8 - Projectar estruturas simples [54]

4.3.1.1 Erros de projecto devido à utilização incorrecta de programas de cálculo automático

O cálculo de uma estrutura de betão armado sofreu, nos últimos anos, grandes modificações, sobretudo após a introdução de programas de cálculo automático. Estes revelaram ser ferramentas muito poderosas, uma vez que permitem:

- uma maior velocidade de cálculo;

- a utilização de métodos de análise mais complexos e exactos;
- o estudo e comparação de várias soluções alternativas;
- a optimização dos elementos estruturais.

No entanto, a sua utilização maciça pode provocar erros provenientes do uso inadequado dos ditos programas, contrariamente às expectativas criadas, em que prevalece a ideia que o programa de cálculo remete para segundo plano o projecto estrutural.

Para cimentar esta situação não existe o controle e verificação dos projectos, por parte de nenhuma entidade reguladora, correndo-se o risco de que ninguém detecte eventuais falhas existentes pelo que, deste modo, as estruturas projectadas são construídas e colocadas em serviço.

Tem sido incutido às pessoas ligadas à construção civil, que os novos programas disponíveis no mercado não carecem de operadores experientes (nem sequer que possuam classificação académica), para calcular determinadas estruturas, esquecendo-se de que uma coisa é introduzir dados e utilizar o programa, outra é projectar estruturas de modo a que elas obedeçam e cumpram os requisitos legais necessários ao seu bom comportamento estrutural.

Outra questão importante é a utilização generalizada de programas ilegais, fruto de cópias pirateadas. Normalmente são cópias de versões antigas, que assim não contêm as versões mais actualizadas que surgem fruto da detecção de erros do próprio programa ou da actualização das normas vigentes.

A questão das normas utilizadas nos programas é pertinente porque existem muitos programas cuja origem é estrangeira e, portanto, contêm normas não aplicáveis no nosso país.

Para a utilização correcta dos programas é necessário estabelecer regras que permitam aos projectistas saber que estão a recorrer a programas fiáveis e credíveis, que respondam aos anseios esperados e que lhes facilitem o trabalho. A saber:

- utilização de programas ilegais:

  Normalmente a obtenção deste tipo de programas acarreta consequências que podem contribuir para o mau desempenho da estrutura. Em primeiro lugar não

possuem documentação escrita que permita a explicação e a utilização correcta dos mesmos. São cópias de versões antigas, pelo que não possuem versões actualizadas dos mesmos, fruto da correcção de presumíveis erros detectados ou da actualização de normas vigentes, como atrás se referiu. Acresce que, pelo facto de ser ilegal, não têm assistência técnica por parte do distribuidor do programa

- selecção do programa adequado:

O utilizador tem de saber qual o objectivo que pretende para recorrer à compra do programa. É com este pressuposto que se faz a selecção dos sistemas susceptíveis por forma a melhor se adaptar ao seu objectivo. A utilização de programas de cálculo que não são os mais indicados para a resolução de uma determinada estrutura é frequente, pelo que é necessário conhecer, entre outros: o campo de aplicação do programa, as bases de cálculo, métodos e simplificações utilizadas na análise estrutural; os critérios, métodos e simplificações utilizadas na definição das armaduras, as normas e especificações utilizadas, etc.

- utilização do programa:

Antes de se colocar à frente do computador para realizar um determinado cálculo estrutural, é fundamental que o projectista realize e conceba a estrutura, efectue um pré-dimensionamento dos principais elementos estruturais, realize, através de métodos expeditos, cálculos auxiliares de forma a comparar com os resultados obtidos pelo programa. Por outras palavras, o programa de cálculo deve confirmar, optimizar (se possível) e calcular a estrutura que o projectista concebeu.

Deve ser dado um cuidado especial à entrada de dados, onde foram detectados grande parte dos erros que se produzem em fase de projecto. Por isso, é necessário controlar os resultados do programa, verificando, com cuidado, pontos sensíveis da estrutura (por exemplo, os deslocamentos máximos obtidos). Muitos programas de cálculo automático não apresentam resultados intermédios, tornando impossível estabelecer comprovações.

- manutenção do programa:

A manutenção (actualização) de um programa de cálculo automático é fundamental, pelos motivos atrás mencionados. É fundamental possuir um contacto permanente com o autor do programa (ou com o seu representante na zona), por forma a resolver de imediato dúvidas entretanto surgidas. Por outro lado, é importante estar a par de todas as actualizações, pois todos os programas são evolutivos, isto é, não são fechados ou imunes a erros que se vão detectando à medida que o utilizam.

4.3.1.2 Erros de projecto devido a acções mal estimadas

É frequente encontrarem-se erros, por não se estimar correctamente peso próprio das estruturas, revestimentos, sobrecargas, etc. Como exemplo muito comum, refira-se o caso das bibliotecas em que, apesar de estarem contemplados valores em diversas tabelas técnicas, o conceito não é muito claro e, como tal, deve ser estudado, caso a caso, o valor real da solicitação. Como exemplo, refira-se a possibilidade da altura de estantes ser completamente diferentes, a diversidade do material constituinte do acervo de uma biblioteca, etc.

Outro erro frequente acontece quando se procede à alteração da utilização para a qual uma dada estrutura foi projectada. A base do cálculo e da análise é o projecto inicial. Como exemplo, refira-se os problemas que ocorrem em zonas de arquivo por substituição de sistemas de arquivo antigos por outros que permitem um maior aproveitamento do espaço existente, assim como, a acumulação de material de arquivo e oficina em lajes de piso que anteriormente tinham como utilização uma habitação.

Também podemos citar o caso de flexão de coberturas planas, ou de muito pequena pendente, que ao deformar-se, por acção das solicitações a que se encontra submetida, flecte, formando uma superfície côncava onde a água das chuvas se pode acumular, e cujo peso, que não foi tido em conta, produz flexões adicionais e portanto um maior volume de água se acumula. Devido a este acréscimo de peso pode-se produzir uma rotura na estrutura.

Este fenómeno é ainda mais grave se tiver de se contabilizar a acção da neve.

Um caso similar ocorre quando temos platibandas, com muretes a toda a volta, e não se prevê uma drenagem adequada, para evacuação das águas pluviais.

Outro grupo de causas que poderão dar origem a problemas devido à contabilização errada das solicitações:

- Colocação de grandes floreiras em terraços, o que introduz sobrecargas adicionais importantes e onde a sua localização pode criar problemas de instabilidade do elemento estrutural.

- Colocação de zonas ajardinadas sobre lajes devidamente impermeabilizadas e sem drenagem, onde, por exemplo, se omitiu que a terra se podia encontrar saturada de água.

- Colocação de marquises nas varandas e consequente aproveitamento para a colocação de máquinas de uso doméstico.

Ainda que, num menor número de casos, podemos encontrar graves problemas em estruturas sujeitas a acções indirectas, tais como a variação de temperatura, sobretudo em edifícios nos quais não se adoptaram disposições específicas para que os efeitos das ditas acções não sejam apreciáveis.

4.3.1.3 Erros de projecto em elementos estruturais

4.3.1.3.1 Erros que afectam os pilares

Um dos erros que se cometem com mais frequência no cálculo de pilares de betão armado, é o de supor que a combinação mais desfavorável é a que considera a carga axial máxima e o momento máximo. Recorde-se que, quando a rotura se dá por compressão no betão temos de considerar, na realidade, a carga e o momento máximo, mas quando a rotura se dá por tracção na armadura o mais desfavorável é considerar a carga mínima e o momento máximo.

Os pilares dos edifícios industriais, são geralmente de grande altura, pelo que é muito importante o efeito que pode produzir a transmissão dos esforços horizontais, pois apesar destes esforços serem de pequena monta, o momento na base do pilar pode ser bastante elevado. Como consequência, rotações nos pilares podem afectar o funcionamento, por exemplo das pontes rolantes.

Nos pórticos articulados submetidos à acção de cargas horizontais, deve-se prever esta acção sobre as sapatas; no caso desta acção não estar prevista, a sapata terá dimensões menores que as necessárias, pelo que se deve colocar um tirante horizontal que absorva o efeito da força mencionada.

4.3.1.3.2 Erros que afectam as lajes e vigas

Um dos maiores problemas que se detectaram nas construções realizadas com sistemas estruturais reticulados, constituídos por uma estrutura resistente de betão armado formada por lajes, vigas e pilares combinados com paredes de alvenaria de tijolo, são as deformações diferidas das vigas e das lajes. Tal deve-se, quer à pouca rigidez desses elementos estruturais quer à incompatibilidade entre a estrutura de betão e as paredes de alvenaria.

4.3.1.3.3 Erros que afectam os muros de suporte

Este tipo de estrutura é das que, frequentemente, apresenta uma maior quantidade de problemas, uma vez que dá origem a um número elevado de acidentes. Por ser isostático, quando estamos a falar em equilíbrio, este tipo de estrutura tem muitos problemas de estabilidade. Se falhar a sua base, falhará o muro, pelo que o seu dimensionamento deve ser efectuado com muito cuidado.

Exemplo:

Temos um muro com uma sapata de largura "L", submetido a um impulso "I", que produzirá uma tensão "T", num qualquer ponto "O". Ao incrementar ligeiramente o impulso, a tensão no citado ponto "O" pode manter-se em redor do valor de "T"; depende sobretudo do comprimento do tramo AB. Se se diminui consideravelmente este valor, mantendo o mesmo comprimento de base "L", é possível que a tensão aumente várias vezes o valor de "T", acarretando como consequência numerosos problemas de comportamento do muro.

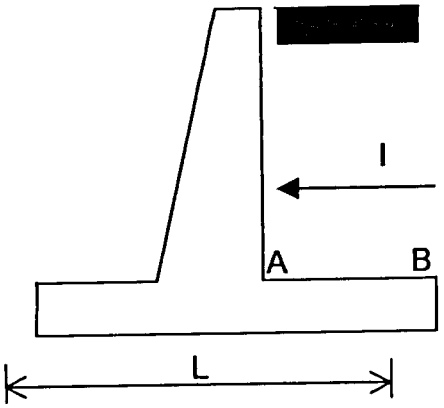


Figura 4.9a - Erros no cálculo de muros de suporte

Outro problema que surge amiúde é o de se considerar um certo tipo de terreno, quando se está a projectar, e em obra esse terreno é substituído por outro, que produz um impulso diferente e, como consequência, provoca um mau comportamento ao muro. Veja-se, por exemplo, o caso da drenagem que em termos de acções, provoca uma disparidade de valores, quando ela está, ou não, contemplada no cálculo.

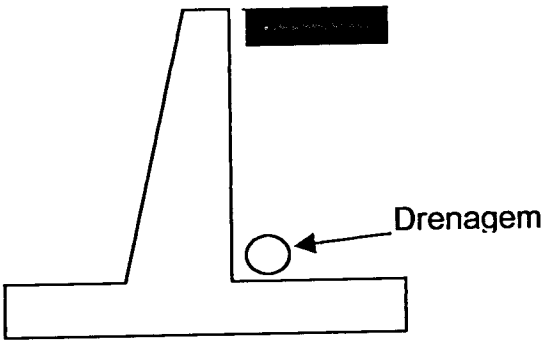


Figura 4.9b - Erros no cálculo de muros de suporte

Outro caso frequente, é o de betonar o muro directamente contra o terreno, pois diminui a escavação prevista. Isto impede a impermeabilização e a drenagem do muro. Obviamente, deve prever-se uma escavação maior e cofrar o muro de ambos os lados para o drenar e impermeabilizar melhor.

É normal que se registem infravalorações de acções por se supor impulsos activos, na fase de projecto, sobre elementos que, ao estar impedida a sua deformação, na verdade se encontram submetidos a estados de impulso de repouso. É claro que as acções associadas a este estado de impulso superam as do estado activo (0.50 para 0.33).

4.3.1.3.4 Erros que afectam as sapatas de fundação

Um dos casos mais emblemáticos, ocorre quando temos sapatas numa zona limítrofe do nosso terreno, e por consequência temos de projectar sapatas excêntricas. Ora, uma vez que existem excentricidades temos de prever vigas de fundação que liguem as ditas sapatas às sapatas mais próximas, for forma a "absorver" os momentos e as possíveis rotações daí decorrentes.

Acresce ainda o caso da implantação de sapatas a uma cota altimétrica diferente, não se considerando, regra geral a acção de uma sapata na outra.

4.3.1.3.5 Erros que afectam os edifícios industriais

Em relação às lajes de piso, pode-se citar algumas das patologias que acontecem em lajes de edifícios de habitação, tais como a alteração do uso de uma determinada estrutura.

Há, no entanto, alguns aspectos específicos a estes edifícios, tais como a não consideração de cargas pontuais. Tal facto, poderá originar roturas parciais de elementos específicos da estrutura, tais como de vigotas de lajes pré-fabricadas, ou o punçoamento da camada de compressão das ditas lajes.

Outro aspecto importante e que tem um caracter específico neste tipo de edifícios é a omissão da acção do vento e da acção da neve. Em relação à primeira, há que ter especial cuidado na disposição de elementos de contraventamento quer nos pórticos quer na cobertura. A sua não inclusão pode criar um problema de instabilidade de conjunto conduzindo a acidentes que afectam o todo da estrutura. Chama-se ainda a atenção a problemas que surgem durante a fase de montagem de uma estrutura metálica. São geralmente problemas de instabilidade, originados como consequência de tolerâncias mais elevadas e impactos na estrutura, que podem surgir devido à falta de elementos de contraventamento. Muita atenção ainda ao dimensionamento das peças estruturais ditas secundárias, como por exemplo as madres, as platibandas, etc, alvo de recomendações específicas na nossa regulamentação.

Quanto à acção da neve, o problema surge geralmente pela sua não inclusão como acção variável, sobretudo pelo seu elevado peso acompanhado pela possibilidade da concentração de grande quantidade de neve em certas zonas da estrutura (cobertura). Veja-se o sucedido à alguns anos aquando de um nevão nos distritos de Bragança e Guarda, onde a sua não inclusão, como acção de base, aquando do seu cálculo, levou á queda de numerosos edifícios industriais.

Assinale-se ainda o caso de acções dinâmicas, sobretudo as resultantes de vibrações de máquinas industriais, pelo que se chama a atenção a este facto que exige, por parte do projectista, um cuidado acrescido e uma necessidade de se informar sobre o uso futuro de determinado edifício industrial.

4.3.1.4 Erros de projecto relativos à combinação de acções

a) Majoração simultânea de todas acções com o mesmo coeficiente.

b) Não consideração do coeficiente de majoração das acções permanentes mais desfavorável. Veja-se o caso da acção base vento, nos edifícios industriais.

c) Não consideração do caracter permanente de algumas acções variáveis, ou, do mesmo modo, do caracter de acidente de algumas acções variáveis.

d) Não consideração do sistema construtivo e das fases de obra na combinação de acções.

4.3.2 Erros com origem na execução de estruturas de betão armado

Os danos com origem na execução de estruturas de betão armado são muito variados e dependem de muitos factores, tais como a tecnologia utilizada na construção e o comportamento dos materiais utilizados.

Os que têm origem na execução derivam do processo construtivo utilizado. As causas podem ter origem técnica ou não, sendo que ambas podem afectar a resistência, a durabilidade e a economia da construção.

Refira-se o caso em que há modificação do projecto após o início da obra. A origem das possíveis deficiências deve-se, normalmente, à ausência de um estudo que permita aferir se as alterações implementadas se repercutem na estrutura calculada.

Outras causas comuns que podem ocorrer:

- especificações com erros;
- falta de detalhes construtivos;
- erros na transmissão de ordens;
- falta de controle de qualidade;
- falta de fiscalização.

4.3.2.1 Factores relacionados com o pessoal técnico

A construção civil envolve a actuação de técnicos com origem, funções e formação muito distintas, que vão desde os engenheiros aos encarregados, passando pelos pedreiros, ajudantes, arquitectos, topógrafos, etc.

Exigências, cada vez maiores, quer monetárias quer temporais, fazem com que a probabilidade de ocorrerem danos estruturais seja muito maior, devido ao não cumprimento das regras de projecto e de construção, à falta de conhecimento, à negligência, etc.

É, por isso, um problema que abarca todos os intervenientes:

- mão-de-obra não qualificada;
- não existem técnicos intermédios;
- arquitectos e engenheiros sem experiência;
- construtores sem nenhuma formação;

Um bom exemplo de como a qualidade da mão-de-obra é essencial reflecte-se na operação da compactação. A experiência e qualificação são essenciais para se obter um betão durável.

A ambição económica é um dos aspectos fulcrais deste ponto. É devido a ela que se reúne uma série de factores preponderantes para a falta de desempenho das estruturas:

- equipas antiquadas e pouco eficazes (falsa economia);
- pessoas com pouca ou nenhuma experiência (mais barato);
- redução do controle de qualidade a favor de benefícios;
- construir para o presente sem olhar para o futuro;
- o Dono de Obra não define o uso do edifício, assim como o seu período de vida útil.

É fundamental a formação contínua de todos os intervenientes, por ser uma forma eficaz de motivação e envolvimento na execução da obra.

4.3.2.2 Factores relacionados com práticas construtivas

4.3.2.2.1 Condensações superficiais

As condensações superficiais em elementos de betão ocorrem, sobretudo, em duas situações:

- na empena interior das fachadas exteriores realizadas em betão;
- próximo de elementos estruturais transversais às fachadas (lajes, por exemplo), que contactam com o interior das mesmas.

A causa desta deterioração é devido à fraca capacidade de isolamento térmico dos elementos de betão armado e manifesta-se com o surgimento de bolor nas ditas superfícies.

4.3.2.2.2 Estanqueidade

Os problemas de estanqueidade manifestam-se sobretudo em pisos enterrados, como por exemplo em caves para aparcamento automóvel, e resultam de infiltrações de água através das paredes periféricas em betão armado.

De entre as causas que estão na origem desta deterioração refira-se:

- a segregação do betão, aquando da betonagem;
- a presença de fissuras de retracção no próprio muro;
- a ausência de estanqueidade nas juntas de dilatação.

Em consequência, estas zonas podem sofrer dois tipos de deterioração: a que é causada pela presença de água nos pisos, afectando a sua utilização, e a que afecta as armaduras dos elementos de betão, podendo levar à presença de corrosão, devido ao elevado teor de humidade presente.

4.3.2.2.3 Aspecto exterior

Este tipo de deterioração não é estrutural. É sim, de aparência e ocorre em edifícios ou construções onde se aplica o betão aparente e está relacionado com a sua imagem exterior.

De entre as deteriorações mais comuns, cite-se:

- desagregação do material;
- diferenças de cor;
- fissuras;
- juntas defeituosas;
- chochos;

Outro aspecto importante é a poluição urbana que leva ao enegrecimento progressivo do betão.

4.3.2.2.4 Amassadura

A operação de amassadura consiste em cobrir a superfície de todas as partículas de agregados com pasta de cimento e misturar todos os materiais que constituem o betão, formando uma massa homogénea.

Normalmente esta operação é realizada por uma betoneira.

Os problemas que surgem são devidos à mistura deficiente dos materiais e ao processo de descarga da betoneira, que tornam o betão, daí resultante, num material não uniforme.

4.3.2.2.5 Transporte

A escolha adequada do meio de transporte do betão, desde o local de fabrico (por exemplo, betoneira ou central de betão) até ao local de betonagem é fundamental e pode revelar-se decisiva na obtenção de um material durável e com bom desempenho.

O problema principal surge com a possibilidade de ocorrer a segregação do betão.

4.3.2.2.6 Colocação e compactação

As estruturas devem ser simples e fáceis de executar, quer por razões estruturais quer por razões de durabilidade. Questões relacionadas com a dificuldade de acesso para acções de betonagem, com a falta de espaço entre armaduras para acções de vibração, a falta de fixação das armaduras antes da betonagem de forma a evitar a sua deslocação, a colocação de espaçadores entre as armaduras, o emprego de cofragens rígidas, limpas e bem vedadas, são exemplos de factores que exercem uma grande influência na durabilidade das estruturas.

Para se realizar uma boa colocação deve-se depositar o betão o mais próximo possível da sua posição final, com o objectivo de evitar a sua segregação e garantir a compactação adequada [59].

Algumas das regras que permitem alcançar esse objectivo, são [60]:

- a deslocação do betão não deve ser feita com o auxílio de uma agulha vibradora;
- o betão não deve ser colocado em montes, mas sim em camadas uniformes;

- a escolha do método de vibração deve ser função do tipo de estrutura a betonar;
- a velocidade de colocação e de compactação deve ser a mesma;
- só se deve betonar uma determinada camada quando a anterior estiver colocada e devidamente compactada, e ainda estiver plástica;
- deve-se evitar a deslocação da cofragem e de armaduras dentro da própria cofragem, durante a betonagem (ver Figura 4.11);
- o betão deve ser colocado num plano vertical para evitar a segregação durante a colocação.

Na compactação o objectivo é eliminar o ar no interior do elemento betonado. As agulhas de vibração desempenham um papel muito importante nesta operação.

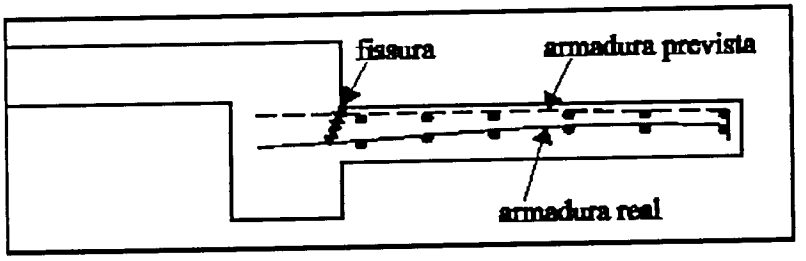


Figura 4.10 - Deslocamento da armadura durante a betonagem [53]

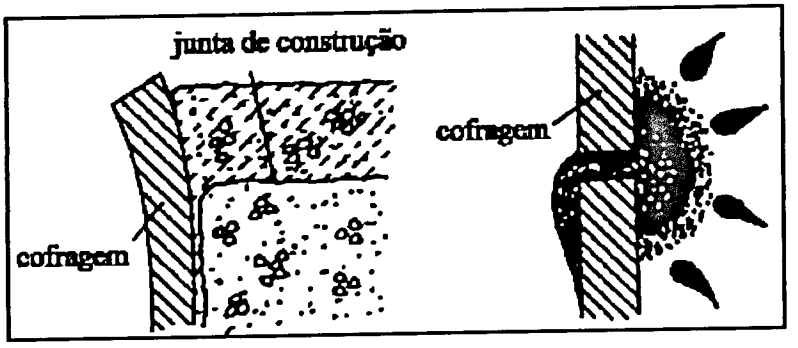


Figura 4.11 - Exemplos de cofragem defeituosa [53]

4.3.3 Erros com origem na utilização e manutenção de estruturas de betão armado

Este tipo de danos ocorre, tal como o nome indica, durante o período de vida útil da estrutura. A sua origem pode ser devida a erros de projecto, de execução e ao uso indevido da mesma.

De entre os mais comuns encontram-se:

- a utilização de sobrecargas não previstas, incluindo a mudança de uso da estrutura;
- a ocorrência de acções não contabilizadas como vibrações e impactos;
- a falta de planos e operações de manutenção;
- a falta de controle aquando de acções de remodelação/recuperação de estruturas;
- a supressão de elementos estruturais;
- a contaminação dos elementos estruturais por fugas em condutas de água;
- o envelhecimento dos materiais;
- ataques químicos em elementos estruturais expostos a ambientes contaminados.

4.3.4 Erros com origem no material

A degradação de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado, está associada a dois factores principais, que implicam o bom desempenho dos seus dois principais constituintes, de acordo com a norma pr EN 1504-9:

- **a deterioração do betão**

e

- **a corrosão das armaduras**.

A deterioração do betão pode ser causada pelos seguintes processos [54]:

- **Mecânicos e Físicos**: impactos, sobrecarga, assentamentos, deformações, erosão, diferencial de temperatura, fluência e fadiga, fogo, etc.
- **Químicos**: devido a sulfatos, sais, soluções ácidas, etc. .
- **Biológicos**: ataques de líquenes, bacilos, etc. .

A corrosão das armaduras pode ser causada por [54]:

- **Carbonatação do betão de recobrimento**, destruindo a camada protectora da armadura.
- **Penetração de Cloretos**: se forem utilizados elementos (do betão) contaminados, certos adjuvantes ou aditivos;
- **Outras condições**: por correntes vagabundas, heterogeneidades no aço ou formação de hidrogénio.

Figura 4.12 - Exemplo de uma estrutura com armaduras corroídas

No Quadro 4.1, apresenta-se um resumo dos factores de degradação e o seu efeito sobre o desempenho dos materiais, componentes ou sistema [59]:

Quadro 4.1 - Factores de degradação e o seu efeito sobre o desempenho da estrutura de betão armado [59]

Factor de Degradação	Processo	Degradação
Mecânicos		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento por impacto	Fadiga	Vibração, deflexão, fendilhação, rotura
Biológicos		
Micro-organismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactérias	Produção de ácido	Lixiviação
Químicos		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido e gases ácidos	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição da camada de passivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço+H_2O+O_2	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência
Tensão + cloretos	Corrosão do aço	Rotura dos tendões de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado (sílica) + álcalis	Reacção da sílica	Expansão, desagregação
Agregado (carbonato) + álcalis	Reacção do carbonato	Expansão, desagregação
Físicos		
Variação de temperatura	Expansão/Contracção	Deformação restringida
Variação de humidade	Retracção e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Desagregação do betão
Sal descongelante + geada	Transferência de calor	Destacamento do betão
Gelo (mar)	Abrasão	Destacamento, fendilhação
Trânsito	Abrasão	Desgaste, rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades
Electromagnéticos		
Electricidade	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência
Magnetismo	Corrosão	Expansão do aço, perda de diâmetro e de aderência

4.3.4.1 Deterioração do betão

4.3.4.1.1 Processos mecânicos

A fendilhação é o processo mecânico de deterioração do betão mais comum. Surge quando a tensão de tracção instalada no betão, é superior à sua resistência à tracção.

Normalmente subdividem-se as causas que levam à fissuração em duas fases: antes e após o endurecimento do betão.

Na Figura 4.13 estão indicadas, em resumo, as principais causas que levam à fissuração do betão, enquanto que na Figura 4.14 se relaciona a idade do aparecimento de fissuras com a sua causa.

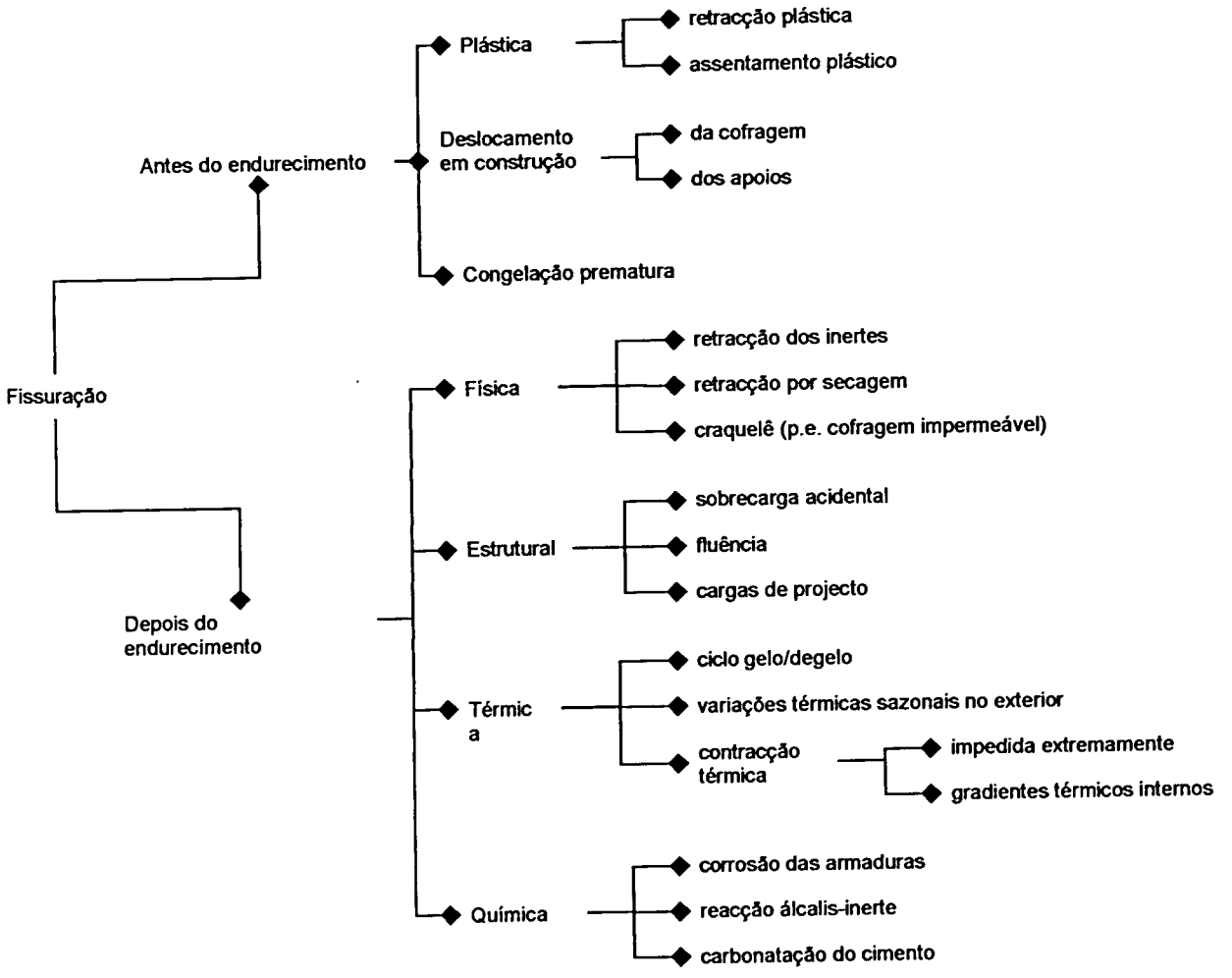


Figura 4.13 - Causas da fissuração do betão [53]

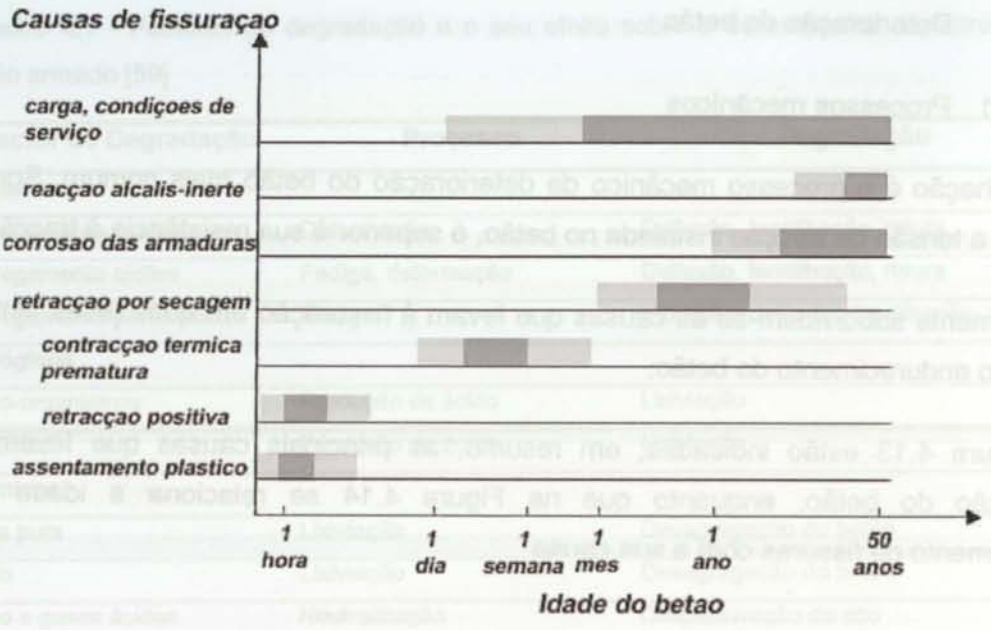


Figura 4.14 - Idades do betão para possível aparecimento de fissuras com várias causas [54]

A direcção de fissuração pode ser determinante na durabilidade do betão. Assim, fissuras com a mesma direcção que as armaduras são potencialmente bem mais perigosas que as transversais.

Quadro 4.2 - Relação entre as causas de fissuras com a direcção das armaduras [53]

Causa de fissura	Direcção das fissuras (em relação às armaduras)		
	Transversal	Longitudinal	Diagonal
Cargas directas (tracção e flexão)	•		
Deformações impostas	•		
Cargas directas (corte e torção)			•
Aderência	•	•	
Retracção plástica		•	
Assentamento plástico		•	

Quadro 4.3 - Caracterização e origem das fissuras mais comuns [54]

Tipo de fissuração	Por Deformação	Por Sobrecarga	Por Assentamento Plástico	Por Retracção Plástica
Origem	Ocorre devido ao impedimento dos deslocamentos causados por a gradientes térmicos, retracção ou assentamento diferencial de fundações.	Ocorre em estruturas em serviço, em pontos de tensão máxima devido a dimensionamento incorrecto.	Ocorre antes da presa. As partículas de betão assentam por gravidade e a água desloca-se em sentido contrário, isto é, para a superfície. As fissuras surgem quando o assentamento não é uniforme, devido à presença de armaduras, por exemplo.	Ocorre no betão fresco e é originado por tensões capilares nos poros quando a evaporação à superfície é superior à exsudação de água no betão.
Caracterização	Fissuração com alguns milímetros de profundidade.	Fissuração ligeira, variando consoante o tipo de sobrecarga. - Ver Figura 4.16 -	Fissuras longitudinais ao longo da armadura, na parte superior de vigas ou lajes de grande espessura, ou ao longo das cintas, nas faces laterais dos pilares. Se as armaduras estiverem muito próximas pode ocorrer a delaminação do betão de recobrimento. - Ver Figura 4.17 -	São fissuras superficiais e de pequena dimensão (até 1 a 2 milímetros) - Ver Figura 4.15 -

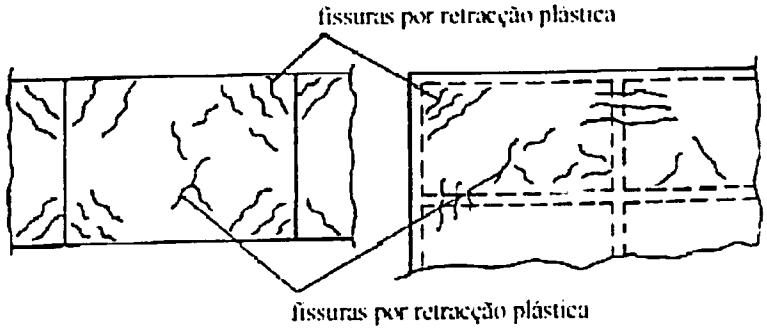


Figura 4.15 - Fissuras por retracção plástica em pavimentos e lajes contínuas [54]

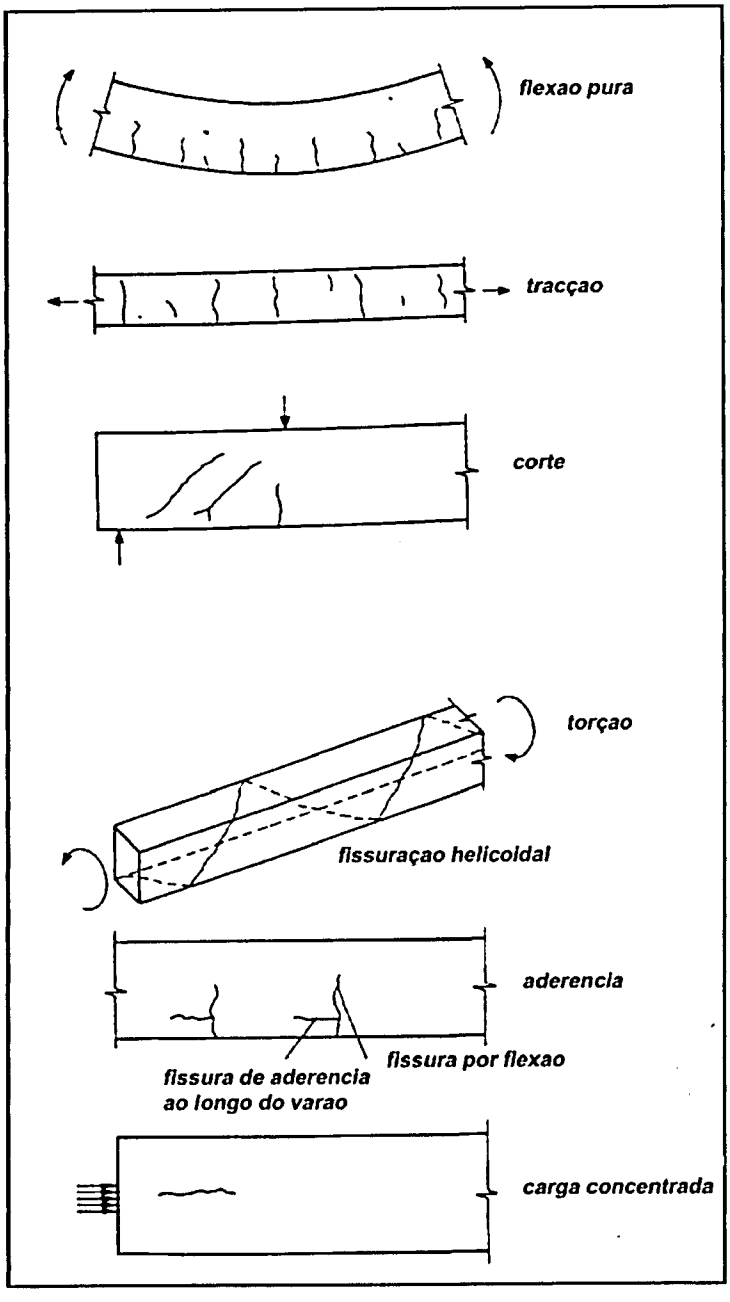


Figura 4.16 - Fissuras por sobrecargas: causas directas [53]

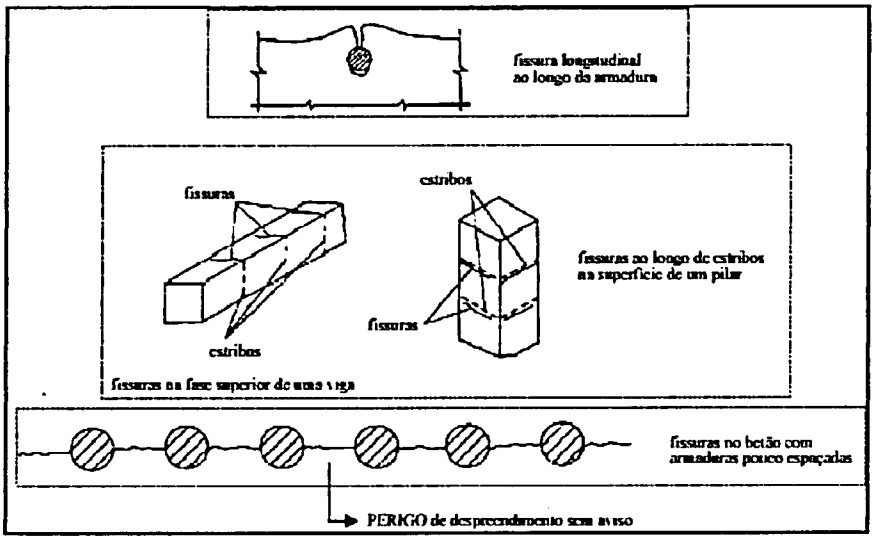


Figura 4.17 - Fissuras por assentamento plástico [53]

4.3.4.1.2 Processos Físicos

De entre os processos físicos que podem conduzir à fissuração e deterioração do betão, os mais comuns são os ciclos de gelo/degelo, a erosão por abrasão e cavitação, as acções térmicas, a fluência e a fadiga e a acção do fogo.

4.3.4.1.2.1 Ciclos de gelo/degelo

O betão quando passa do estado líquido para o estado sólido aumenta de volume cerca de 9%. Se os poros e fendas, que existem no betão, estiverem saturados, ele não resiste e devido a este aumento de volume, pode degradar-se.

Os ciclos repetitivos de gelo/degelo provocam o aumento da pressão dilatante e resultam na fendilhação e consequente deterioração do betão.

Em Portugal, devido ao clima ameno, este processo de deterioração é raro

4.3.4.1.2.2 Erosão por Abrasão e por Cavitação

O fenómeno da erosão por abrasão é característico dos pavimentos rodoviários, aeroportuários e industriais, onde pode ocorrer um grande desgaste superficial do betão, através de fricção repetitiva, de esfregamento, de enrolamento.

Por outro lado, a erosão por cavitação é característica de elementos estruturais que estejam parcialmente submersos, sujeitos a grande velocidade de água. É o caso de

barragens, canais, pilares de pontes, etc. A cavitação é caracterizada pela criação de fossos, em zonas de variação abrupta de secção.

Figura 4.18 - Efeitos da cavitação [54]

4.3.4.1.2.3 Acções térmicas

O diferencial de temperatura, numa estrutura de betão armado, pode provocar a sua variação de volume. Quando essa variação de volume (através de contracções e expansões) são constrangidas, pode ocorrer a fendilhação.

Os danos estruturais mais comuns estão associados à variação brusca de temperatura, em que a temperatura superficial do elemento se ajusta rapidamente à temperatura ambiente e a temperatura no seu interior se ajusta lentamente. Os danos típicos resultantes são o destacamento do betão.

4.3.4.1.2.4 Fluência e Fadiga

Ocorre um fenómeno de fluência quando se verifica o aumento da deformação de um elemento estrutural de betão armado, sujeito a uma tensão constante. Esta deformação aumenta com o tempo e pode atingir valores muito elevados (até superiores aos valores de deformação verificados aquando da aplicação de uma carga).

O dano na estrutura (deformação) ocorre alguns anos após a estrutura entrar em serviço e pode resultar (quando não devidamente considerada) na transferência de cargas dos elementos estruturais para os não estruturais, como as paredes de alvenaria, onde se observam fissuras e consequentes estragos.

A fluência é tanto maior quanto menor for a humidade relativa.

A fadiga manifesta-se, também, pelo aumento da deformação de um elemento estrutural de betão armado, através da aplicação repetida de uma carga ao longo do tempo. A rotura por fadiga pode ocorrer nesses elementos, quando sujeitos a tensões cíclicas (como por exemplo, em estruturas sujeitas à acção das ondas do mar e do vento) inferiores à tensão máxima resistente.

4.3.4.1.2.5 · Impactos

Geralmente, a deterioração surge sob a forma de destacamento de parte dos elementos de betão, por acção de ondas de choque, como [59]:

- em sismos;
- no manuseamento de peças pré-fabricadas;
- na cravação de estacas;
- aquando das forças de compressão exercidas por equipamentos nas fundações que os sustentam.

4.3.4.1.2.6 Fogo

O efeito da acção do fogo sobre os elementos de betão armado depende de três factores principais: da temperatura atingida, do intervalo de tempo durante o qual a temperatura é mantida e das características do betão (tipo de cimento, razão A/C, tipo de agregados, dosagem de cimento e espessura de recobrimento).

Quadro 4.4 - Resistência dos elementos de betão ao fogo, em função da temperatura atingida [61]

Temperatura	**Resistência dos elementos de betão**
< 300 ºC	Pouco afectada
Entre 300 ºC e 900 ºC	A resistência começa a diminuir, devido à desidratação dos componentes do cimento. O hidróxido de cálcio decompõe-se, restando apenas cal.
> 900 ºC	A resistência é muito afectada. A camada superficial é danificada por destacamento do betão. O nível de danos depende da diferença de temperatura entre o interior e o exterior do elemento de betão armado.

Ao destacar, a camada de betão de revestimento expõe-se o betão branco e surgem fendas de forma aleatória (normalmente superficiais). Como a dilatação das armaduras é superior à do betão, desenvolvem-se tensões em volta deste, surgindo fendas no seu contorno. Uma vez que ficam expostas ao fogo, as armaduras servem como condutoras de calor, acelerando a degradação do betão.

Em relação às características do betão constata-se o seguinte [59]:

- Na relação A/C, verifica-se que a perda de resistência à compressão é muito menor para razões A/C de 0,60 do que em betões com razões A/C de 0,45.
- Betões com agregados leves possuem uma menor perda de resistência à compressão, quando comparados com o betão normal, enquanto que em betões de elevada resistência, se passa o contrário.
- Em betões de elevada resistência que contêm sílica de fumo, ocorre o destacamento explosivo, quando exposto a temperaturas elevadas (> 300 ºC).

Figura 4.19 - Efeito da acção do fogo em estruturas de betão armado [adapt. www.trombik.ch]

4.3.4.1.3 Processos Químicos

Os processos químicos de degradação do betão são gerados por agentes agressivos, provenientes do meio ambiente. Estas substâncias são transportadas para o interior do betão, onde reagem. Para a ocorrência e efectivação destas reacções a temperatura e a água têm um papel decisivo. A primeira porque influi na velocidade das reacções, a segunda é imprescindível para que se verifiquem as mesmas.

Os danos, normalmente, dependem da permeabilidade da camada superficial do elemento de betão. Os constituintes de um fluído agressivo podem penetrar nos poros do betão como resultado de três forças [59]:

- Forças de difusão;
- Pressão hidráulica;
- Forças capilares.

Apresenta-se um resumo das principais reacções que levam à deterioração do betão [54] .

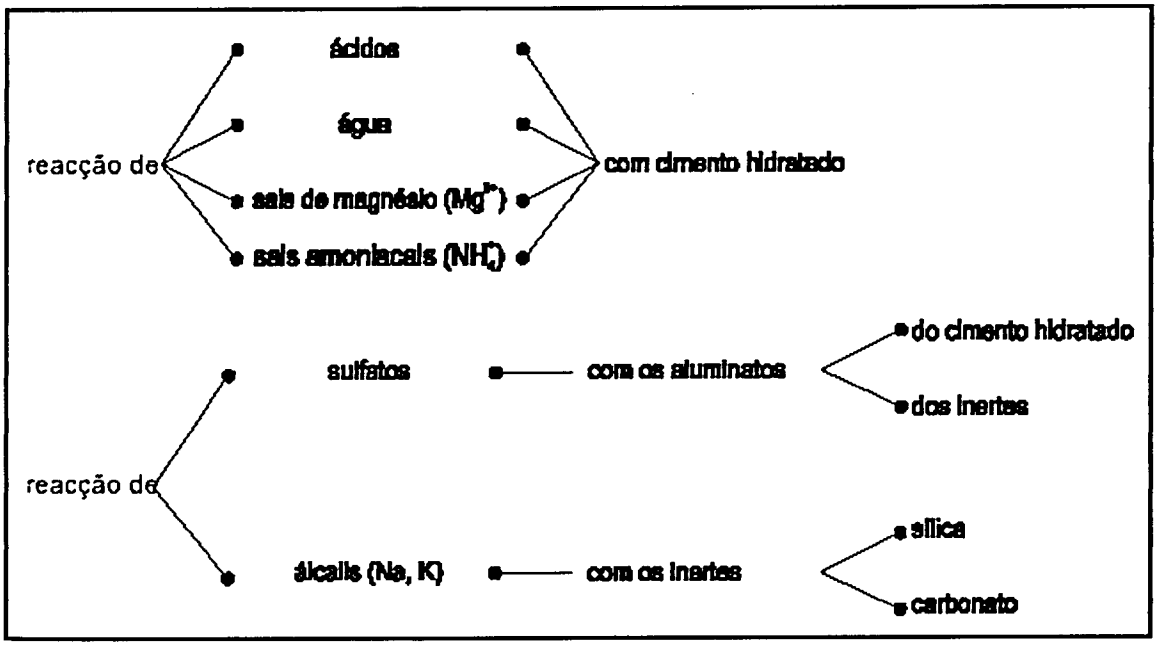


Figura 4.20 - Reacções mais importantes que levam à deterioração do betão [54]

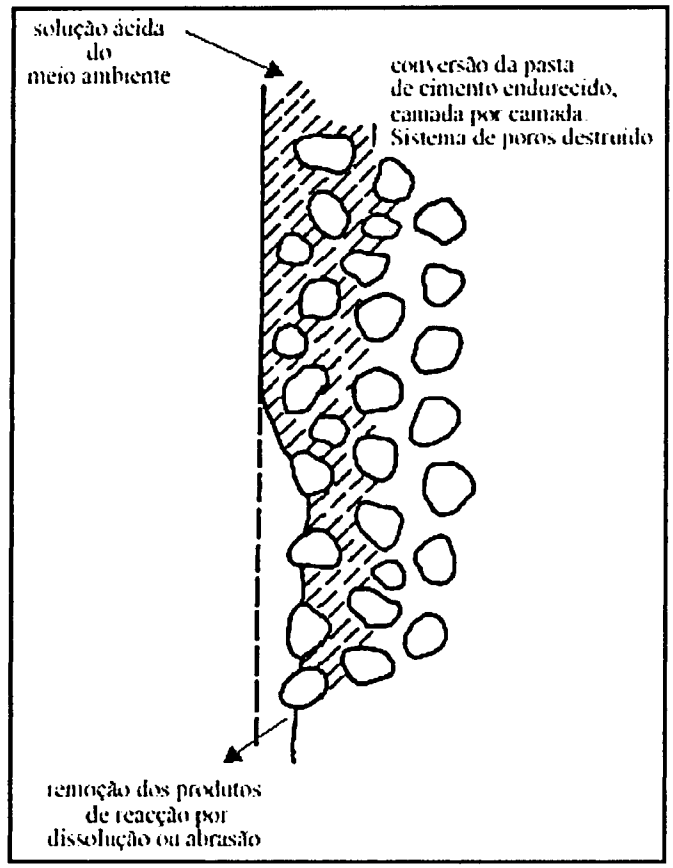


Figura 4.21 - Efeitos do ataque ácido em estruturas de betão [53]

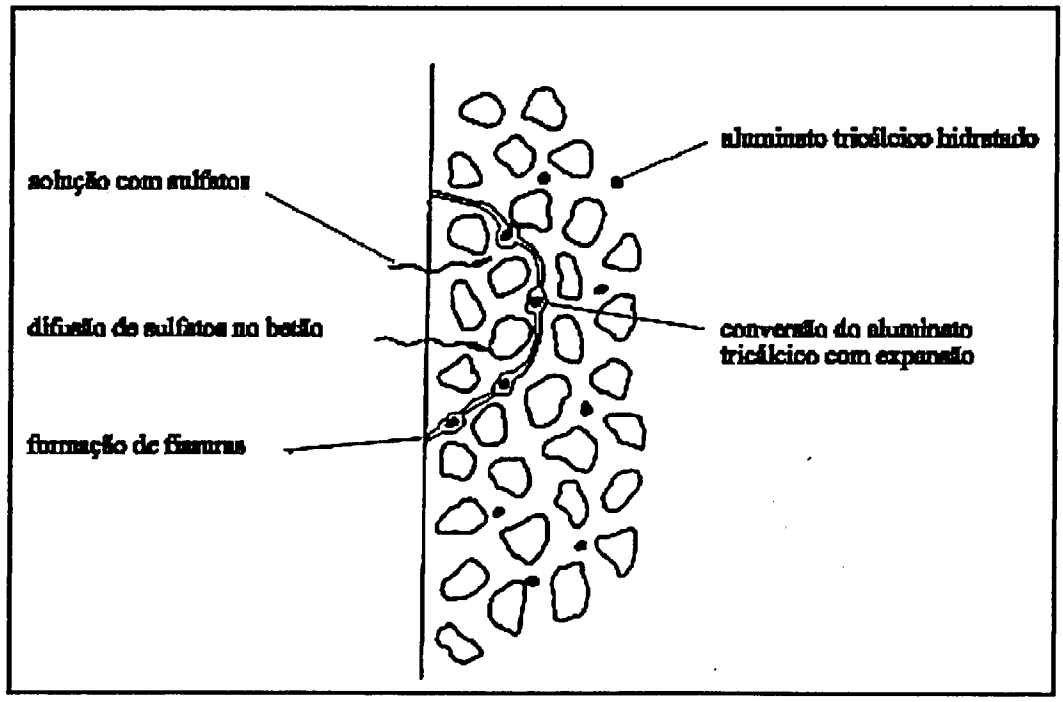


Figura 4.22 - Efeitos do ataque por sulfatos a estruturas de betão [53]

4.3.4.1.4 Processos Biológicos

A deterioração de elementos de betão por processos biológicos surge, sobretudo, devido a quatro factores principais [54]:

- penetração em fendas e pontos fracos;
- retenção de água à superfície do elemento de betão;
- formação de ácido húmico;
- sistemas de água residuais.

O ataque biológico mais comum é o que ocorre em sistemas de água residuais, devido à formação de sulfureto de hidrogénio, que oxidado por acção bacteriológica, forma ácido sulfúrico, que por sua vez, ataca o betão.

A existência de fendas ou outro tipo de aberturas em elementos de betão pode, por acção de agentes bacteriológicos como o musgo, líquenes ou raízes de plantas ou árvores, provocar a sua deterioração. Por outro lado a retenção de humidade também pode provocar o aumento de deterioração por reacção com os elementos constituintes do betão.

A formação de ácido húmico deve-se ao desenvolvimento de microorganismos nos elementos de betão. Este ácido ataca a pasta de cimento e, por consequência, provoca a deterioração do betão.

4.3.4.2 - A corrosão no betão armado

O betão constitui um excelente meio de protecção do aço das armaduras da corrosão, devido à possibilidade de se formar uma película passivante de óxidos de ferro na superfície do aço, e de o betão constituir uma barreira física à penetração dos agentes agressivos que podem desestabilizar essa película [62].

O **efeito barreira** depende da espessura e da qualidade do betão da camada de recobrimento, nomeadamente, das suas características de transporte das espécies químicas despassivantes e dos agentes que devem estar presentes, para que se dê a progressão dos fenómenos de corrosão, principalmente, a água e o oxigénio.

A **película passivante** pode ser destruída, originando a despassivação do aço devido principalmente:

- à redução da alcalinidade do betão, por acção da carbonatação (pH<11.50).
- à presença de iões de cloreto junto das armaduras, em teores suficientes para que ocorra a rotura da película passivante.

Uma vez reunidas as condições para a despassivação das armaduras, a corrosão do aço prosseguirá, desde que a água e o oxigénio possam chegar junto da armadura, e, além disso, o betão apresente uma boa condutividade iónica.

A durabilidade de uma estrutura de betão depende, assim, destes dois factores.

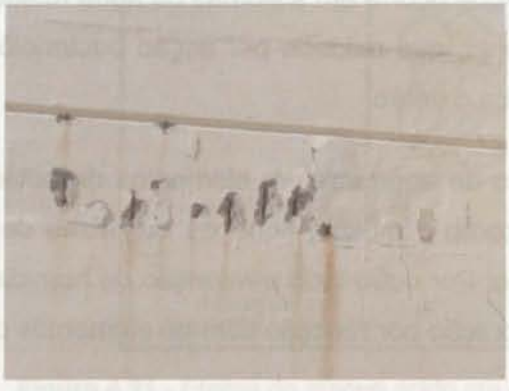


Figura 4.23 - Estrutura de betão armado com corrosão de armaduras

A carbonatação do betão, embora sendo um processo inevitável, é tanto mais lento quanto mais denso for o betão e depende do teor de humidade, pois a reacção é reduzida em condições de saturação ou de baixa humidade [62].

É um processo que pode ser preocupante, no caso de baixas espessuras do betão de recobrimento, especialmente se este for poroso, uma vez que, quando a frente de carbonatação atinge o nível das armaduras, estas deixam de estar passivadas e pode iniciar-se a corrosão.

O fenómeno da corrosão do aço das armaduras em elementos de betão armado pode ser traduzido por [54]:

$$\text{Ferro} + O_2 + H_2O \rightarrow \text{Produto de Corrosão} + \text{Electrões}$$

Pode-se dizer, de forma simplificada, que a degradação das estruturas, devido à corrosão das armaduras deve ser vista como um processo que ocorre em dois períodos [62]:

- **Período de iniciação**: que corresponde ao tempo necessário para que estejam reunidas as condições que levam à despassivação do aço;
- **Período de propagação**: que corresponde ao tempo que decorre desde a destruição irreversível da passivação até ao momento em que, devido à progressão da corrosão, a estrutura alcança um dado estado limite a partir do qual o nível de degradação já é inaceitável, tornando-se necessária a sua reparação ou, em alguns casos, a sua desactivação ou demolição.

A extensão do período de iniciação dependerá, em primeiro lugar, do nível da agressividade ambiental e das características intrínsecas do betão. A concentração crítica de cloretos, ou seja, a concentração a partir da qual ocorre a despassivação das armaduras e há progressão da corrosão, varia não só com o tipo de betão mas também com as condições de exposição e de agressividade do meio ambiente.

A extensão do período de propagação depende da velocidade de corrosão, cujo valor irá variar de acordo com a facilidade de transporte no betão dos agentes alimentadores da corrosão, isto é, a água e o oxigénio, com as condições climáticas ambientais e, obviamente, com o conceito adoptado na definição do estado limite da estrutura.

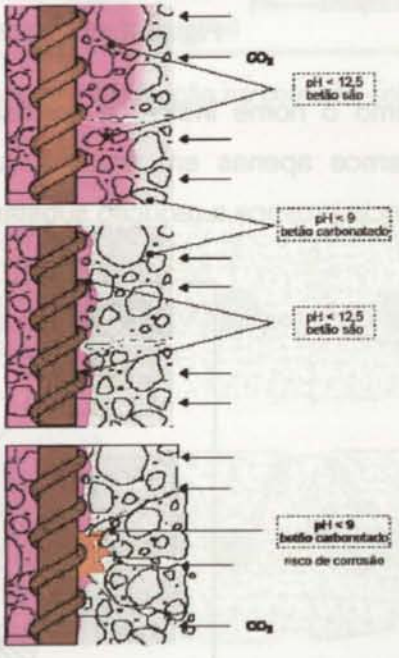


Figura 4.24 - Avanço da frente de carbonatação e suas consequências [54]

São três os tipos de corrosão mais comuns:

- a corrosão localizada;

- a corrosão generalizada;
- a corrosão sob tensão.

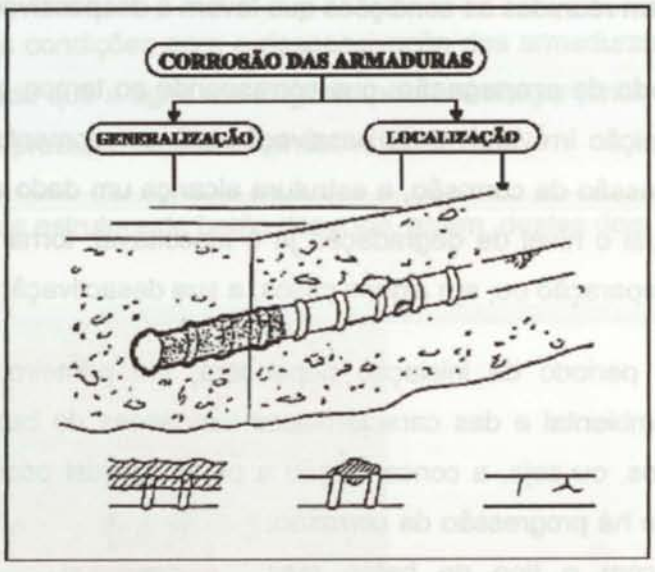


Figura 4.25 - Tipos de corrosão em armaduras [62]

Tal como o nome indica, a corrosão localizada surge quando a película passiva desaparece apenas em áreas reduzidas, devido à presença de cloretos. A sua ocorrência provoca a redução substancial da armadura afectada.

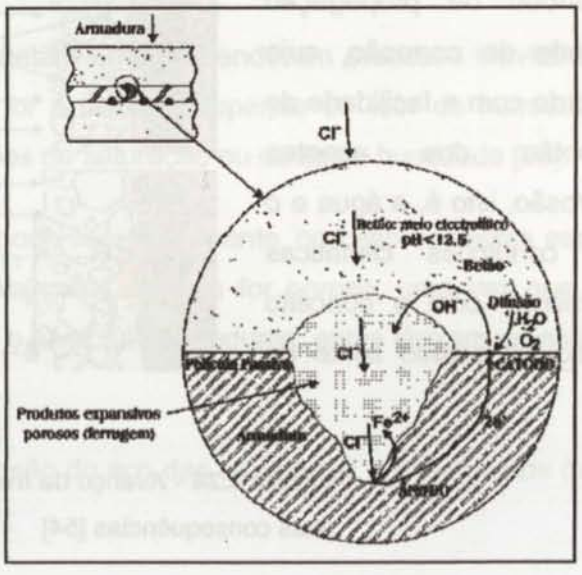


Figura 4.26 - Corrosão localizada em armaduras, causada por cloretos [63

Por seu lado, na corrosão generalizada a despassivação das armaduras ocorre em toda a sua superfície. A origem desta generalização pode ser: ou a carbonatação da camada de revestimento, ou a penetração de cloretos até à armadura ou a lixiviação de álcalis [54].

Como consequência ocorre a redução da secção da armadura e a presença de fissuras que, no limite, provoca o destaque do betão de recobrimento, uma vez que o aparecimento de ferrugem implica o aumento e volume da armadura. Estas fissuras permitem o acesso mais facilitado de oxigénio e de humidade, aumentando a degradação de elementos de betão.

A corrosão sob tensão é característica do aço pré-esforçado e ocorre após a perda da película de passivação e resulta da distribuição não uniforme de tensão na armadura, devido a defeitos de fabrico.

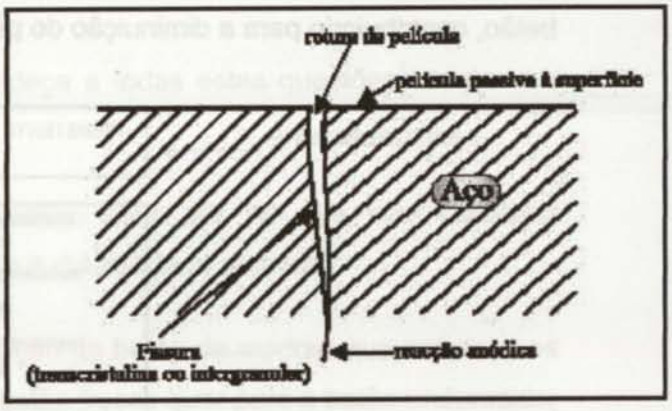


Figura 4.27 - Fissuração na corrosão sob tensão [53]

Na Figura 4.28 apresentam-se vários tipos de patologias, resultantes da corrosão de armaduras, em estruturas de betão armado.

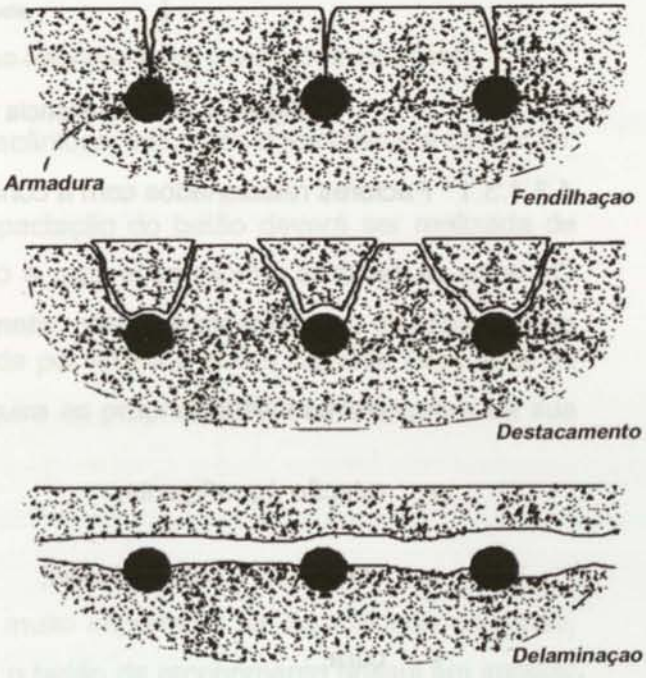


Figura 4.28 - Estragos provocados pela corrosão [59]

4.3.4.3 Outras causas da deterioração do betão

Pretende-se, neste ponto, sintetizar outros factores, relacionados com a durabilidade do betão, que podem levar à deterioração do betão. Esses factores foram divididos em três grandes grupos: factores relacionados com a concepção e projecto, factores relacionados com a execução em obra e factores relacionados com o pessoal técnico.

As questões aqui levantadas contribuem para esclarecer, de uma maneira mais aprofundada, os factores que levam ao aparecimento de fissuras e da corrosão que, como já foi referido, são as duas principais causas de deterioração dos elementos de betão, contribuindo para a diminuição do período de vida útil da estrutura.

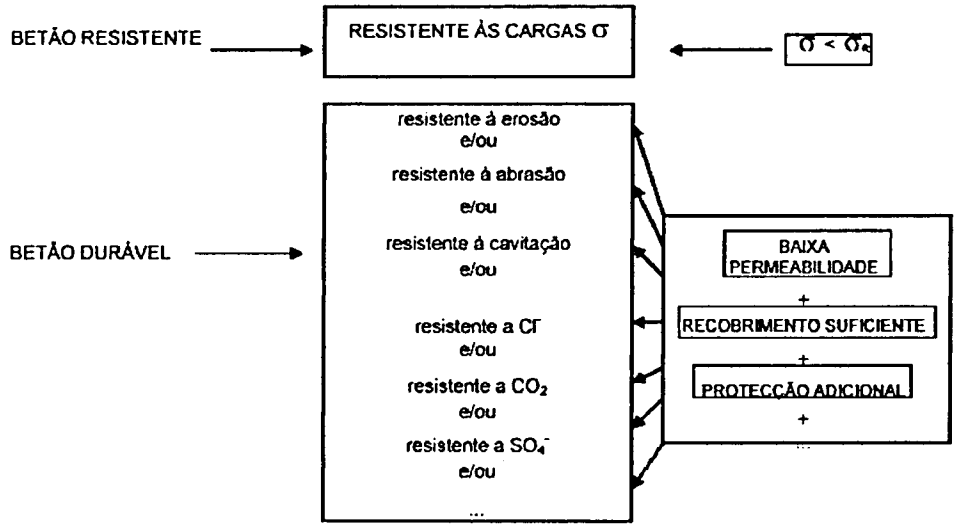


Figura 4.29 - Resistência versus durabilidade [54]

4.3.4.3.1 Factores relacionados com a concepção e projecto

De entre os factores relacionados com a concepção e projecto, que condicionam a deterioração de um elemento de betão, citem-se [54]:

- permeabilidade;
- relação água/ligante;
- colocação e compactação;
- cura;
- dosagem e tipos de ligante;

- tipo e granulometria de inertes;
- exposição ambiental;
- recobrimento de armaduras;
- projecto e pormenorização.

Alguns destes factores estão sobretudo ligados a questões de obra. Porém, pelo facto de deverem terem sido tidos em consideração aquando da concepção e projecto, serão incluídos neste ponto.

Para se obter um betão durável e que obedeça a todas estas questões, devem ser tomados em conta alguns factores [64]:

- a escolha dos constituintes do betão deve ser tal que não contenha substâncias prejudiciais que afectem a durabilidade do betão;
- deve ser feita a escolha da composição do betão de modo a que satisfaça os critérios estabelecidos quer para o betão fresco quer para o betão endurecido;
- o betão deve ser colocado em obra de modo a formar um revestimento duro e impermeável para as armaduras;
- o betão deve resistir quer a acções internas quer a reacções externas;
- o betão deve resistir a ataques mecânicos, tais como a abrasão e a cavitação;
- a amassadura, colocação e compactação do betão deverá ser realizada de modo a evitar a segregação;
- a cura do betão deve ser realizada por forma a que a camada superficial de recobrimento das armaduras adquira as propriedades que se espera da sua composição.

4.3.4.3.1.1 Permeabilidade

A permeabilidade desempenha um papel muito importante na durabilidade do betão, uma vez que determina a capacidade que o betão de recobrimento possui em impedir ou atrasar o ingresso de líquidos e gases agressivos [65].

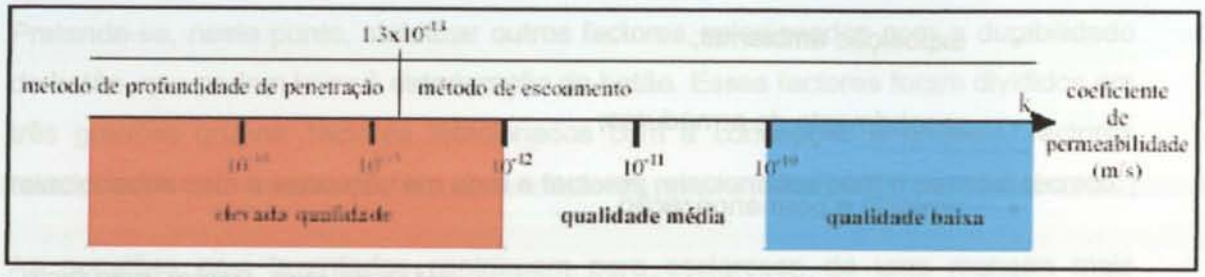


Figura 4.30 - Qualidade do betão em função do coeficiente de permeabilidade à água, k [54]

De entre os factores que influem nesta capacidade citem-se: os componentes e suas quantidades, nomeadamente a relação água/cimento, a cura, o tipo e dosagem de cimento, os inertes, as condições de colocação, compactação e protecção e da natureza dos moldes [53], [54], [[60] e [66].

4.3.4.3.1.2 Relação água / ligante

Como se pode verificar através da Figura 4.31 a permeabilidade aumenta a partir de uma razão A/C de 0,60, devido ao excesso de água.

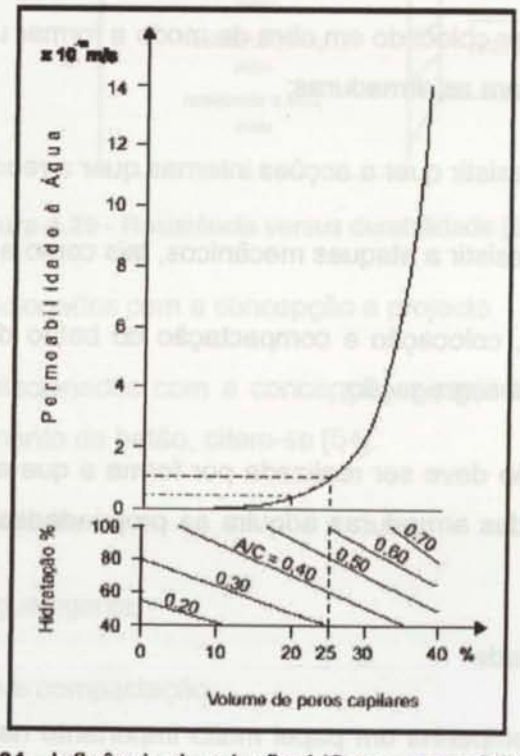


Figura 4.31 - Influência da relação A/C na permeabilidade [53]

A especificação do LNEC E-372 [67], indica as características e exigências que a água utilizada na amassadura do betão deve possuir.

Tabela 4.1 - Características e exigências das águas para amassaduras de betões [67]

Característica	Documento normativo	Exigências	
		Betão simples	Betão armado e pré-esforçado
pH	NP 411	≥ 4	≥ 4
CQO (1) (mg/dm³)	NP 1414	≤ 500	≤ 500
Teor de cloretos (mg/dm³)	NP 423	≤ 4500 (2)	≤ 600 (2)
Resíduo em suspensão (mg/dm³)	E - 380	≤ 5000	≤ 2000
Resíduo dissolvido (mg/dm³)		(3)	
Teor de sulfatos (mg/dm³)	NP 413	≤ 2000	≤ 2000
Teor de carbonatos e hidrogenocarbonatos (mg/dm³)	NP 421	(3)	
Teor de potássio e sódio (4) (mg/dm³)	E - 381	≤ 1000	≤ 1000
Teor de ortofosfatos (mg/dm³)	E - 379	≤ 100	≤ 100
Teor de nitratos (mg/dm³)	E - 382	≤ 500	≤ 500
Teor de sulfuretos (5) (mg/dm³)	NP 1417	-	≤ 100
Teor de zinco (mg/dm³)	E - 417	≤ 100	≤ 100

(1) CQO - Carência Química de Oxigénio.

(2) Para concentrações superiores deverá verificar-se se o teor total de cloretos no betão não é superior a 1%, 0,4% ou 0,2% no caso do betão simples, armado e pré-esforçado.

(3) Ver verificação da conformidade na cláusula 7.

(4) Sé se os agregados forem potencialmente reactivos.

(5) Só no caso de betão pré-esforçado e de caldas de injecção.

4.3.4.3.1.3Cura

O processo de cura permite criar as condições necessárias para que as reacções de endurecimento sejam o mais eficaz possível, de modo a minimizar a retracção plástica e assegurar o desenvolvimento das resistências mecânicas, incluindo a resistência à abrasão e a resistência aos agentes agressivos ambientais [54].

O objectivo da cura é manter o betão o mais saturado possível, até que os espaços inicialmente preenchidos por água, na pasta de cimento fresca, tenham sido ocupados pelos produtos da hidratação do cimento [22].

O projectista deve incluir no projecto de execução, referências para que seja realizada uma boa cura do betão, não permitindo, por exemplo, que o mesmo seque rapidamente à superfície nem que se verifique um grande diferencial de temperatura, e ainda que a operação de descofragem só seja efectuada depois de garantida a resistência necessária.

Há várias maneiras de prevenir uma cura eficaz [54]:

- manutenção da cofragem no lugar;
- aspersão com água em intervalos frequentes;
- uso de plásticos protectores;
- uso de coberturas e paramentos laterais protectores;

sendo que podem ser utilizados quer individualmente quer em conjunto.

Assim, o projectista deve garantir que o betão tenha atingido a resistência necessária aquando da descofragem.

4.3.4.3.1.4 Dosagem e tipos de ligante

A dosagem de cimento deve ser tal que garanta a trabalhabilidade da mistura, por forma a que a compactação seja eficaz, permitindo obter uma baixa permeabilidade.

Como valor de referência surge uma dosagem de 300 kg de cimento por m^3 de betão, para garantir a supracitada trabalhabilidade.

Betões pobres em cimento tornam as misturas ásperas e de acabamento superficial difícil. Pelo contrário betões ricos em cimento são mais coesivos e aderentes e tornam as operações de betonagem mais difíceis.

A definição do tipo de ligante é muito importante, uma vez que tem influência na permeabilidade do elemento de betão. Assim, observa-se que a utilização de cimentos compostos ou com adições são mais sensíveis que o cimento portland.

Toma-se, assim, em função do objectivo e do tipo de estrutura, importante definir em projecto o tipo de ligante a utilizar, de modo a optimizar o comportamento futuro da estrutura, em função do tempo de vida útil que se pretende.

4.3.4.3.1.5 Água

A água, elemento fundamental no fabrico do betão, deve respeitar uma série de características fundamentais, de forma a garantir o bom desempenho daquele elemento estrutural.

A especificação do LNEC E - 372 [67], estabelece as propriedades físico-químicas que deve possuir a água a ser utilizada (ver Tabela 1.1).

Para realizar as operações de amassadura do betão pode-se recorre a água de variadas origens. No entanto deve-se tomar cuidados especiais, a saber [59]:

- A água potável não necessita de ser analisada.
- Águas superficiais e pluviais devem ser analisadas antes da primeira utilização;
- Águas residuais industriais devem ser analisadas previamente e durante a sua utilização.
- Água do mar ou salobra são consideradas adequadas para o betão simples. Se se pretender utilizar em betão armado e pré-esforçado devem ser analisadas previamente.
- A água proveniente da lavagem de equipamento e instalações de produção de betão são consideradas adequadas, desde que não contenham óleos ou adjuvantes introdutores de ar.
- A água residual doméstica não é adequada.

4.3.4.3.1.6Tipo de inertes e granulometria

A influência do tipo de inertes e da sua granulometria é importante para a resistência aos ciclo gelo/degelo e nas reacções álcalis/inerte e álcalis/carbonato e na reacção com agentes agressivos como cloretos, sulfatos, impurezas orgânicas, etc.

O projectista deve ter cuidado em definir qual o tipo de inertes e sua granulometria, devendo limitar o uso em estruturas de betão a inertes do tipo: granitos com feldspatos alterados, inertes com sulfuretos ou sulfatos (gesso), inertes com materiais argilosos, com sílica sob a forma de opala, calcedónia ou cristolabite, etc. .

No entanto, as características e os valores limites que os agregados devem respeitar, para poderem ser utilizados no fabrico de betões e argamassas encontram-se estabelecidas na especificação do LNEC E - 373 [68], de acordo com a Tabela 4.2.

4.3.4.3.1.7 Exposição ambiental

A regulamentação Portuguesa NP EN 206 [69], selecciona o tipo de ambiente onde se situa a estrutura com vários aspectos relacionados com a durabilidade, nomeadamente: relação máxima água/cimento, espessura da camada de recobrimento, dosagem mínima de cimento.

É necessário definir com exactidão o ambiente que rodeia a estrutura pois tem influência directa na durabilidade na mesma, podendo levar à sua deterioração.

Tabela 4.2 - Características e verificação de conformidade dos agregados [68]

Característica		Documento normativo	Valor a satisfazer
Resistência mecânica dos agregados grossos	Resist. À compressão	NP 1040	≥ 50 Mpa
	Resist. Ao esmagamento	NP 1039	≤ 45 %
	Desgaste de Los Angeles (2)	E - 237	≤ 50 %
	Desagregação pelo sulfato de sódio ou de magnésio (3)	NP 1378	SO_4Na: perdas peso<10% SO_4Mg: perdas peso<15% Ao fim de 5 ciclos de ensaio
Absorção de água (1) e massa volúmica	De agregados grossos	NP 581	Absorção ≤ 5,0 %
	De areias	NP 984	Absorção ≤ 5,0 %
Quantidade de partículas ou matérias prejudiciais	De matéria orgânica	NP 85	Não prejudicial
	De partículas muito finas e matéria solúvel	NP86	Areia natural ≤ 3,0 % Areia britada ≤ 10,0 % Godo ≤ 2,0 % Brita ≤ 3,0 %
	De partículas de argila	E - 196	≤ 2,0 % de massa do ligante
	De partículas friáveis	NP 1380	Areia ≤ 1,0 % Godo ou brita ≤ 0,25 %
	De partículas moles	E - 222	Godo ou brita ≤ 5,0 %
	De partículas leves (1) (3)	NP 953	Areia ≤ 1,0 % Godo ou brita ≤ 1,0 %
Índice volumétrico		E - 223	Godo ≥ 0,12 Brita ≥ 0,15
Reactividade potencial com os alcális do cimento	Processo absorciométrico	E - 159	Negativo
	Processo da barra de argamassa	NP 1381	Extensão ≤ 1,0E-3 ao fim de 6 meses
	Análise petrográfica	E - 415	Negativo
Reactividade com os sulfatos		E - 251	Provete de argamassa: Ausência de fendilhamento Extensão < 0,5E-3 Provete de rocha: Extensão < 0,5E-3
Teor de cloretos		E - 253	(6)
Teor de sulfuretos		NP 2107	(7)
Teor de sulfatos		NP 2106	
Teor de álcalis		NP 1382	
Análise granulométrica		NP 1379	(8)
Baridade		NP 955	(9)
Teor de água total		NP 956 NP 957	(10)

(1) Os valores exigidos por esta característica não se aplicam aos agregados leves.

(2) O desgaste Los Angeles não é, em princípio, significativo.

(3) Os ensaios de desagregação pelo sulfato de sódio ou de magnésio e de quantificação de partículas leves são exigidos quando o betão está sujeito a ambientes em que a temperatura pode atingir, com frequência, valores inferiores a -5 °C ou se se pretender obter betões de3 elevada resistência à penetração de cloretos.

(4) Na especificação LNEC E - 415 indicam-se os minerais e rochas com formas de sílica potencialmente reactivas ou fornecedoras de álcalis.

(5) Os ensaios de reactividade com os sulfatos é exigido quando os betões ficam em contacto com a água do mar ou com águas ou solos que contenham sulfatos com teores iguais ou superiores aos da água e quando os agregados exibem felspatos.

(6) O teor de cloretos dos agregados deve ser somado ao teor de cloretos dos outros constituintes do betão de forma que o teor por massa de cimento seja inferior a 1%, 0,4% e 0,2%, no caso de betão simples, armado ou pré-esforçado, respectivamente.

(7) O teor de sulfuretos, sulfatos e álcalis dos agregados deve ser somado aos correspondentes teores determinados nos outros componentes do betão (com excepção do cimento) e o valor não deve exceder as seguintes percentagens, referidas à massa do cimento ou à massa do cimento e das adições:

Cimento	Sulfureto (expresso em S)	Sulfatos (expresso em SO_3)	Álcalis (expresso em Na_2O)
Tipo I	0,2	0,5	0,6
Tipo II	0,0	0,5	0,6
Tipo III	0,0	1,0	–
Tipo IV	0,2	2,0	–

(8) A classificação dos agregados em classes granulométricas é feita na Especificação LNEC E - 355.

(9) A baridade é utilizada para definir ou controlar a composição do betão.

(10) O teor de aágua é usado para corrigir, quando necessário, a água de amassadura.

4.3.4.3.1.8 Recobrimento

A espessura de recobrimento está relacionada directamente com o período de vida útil da estrutura (ver Figura 4.32) e, por consequência, com a durabilidade da mesma.

Uma vez que os dois principais factores de corrosão, a carbonatação e a penetração de cloretos, dependem da espessura do betão de recobrimento, é necessário ter muito cuidado na sua estimação.

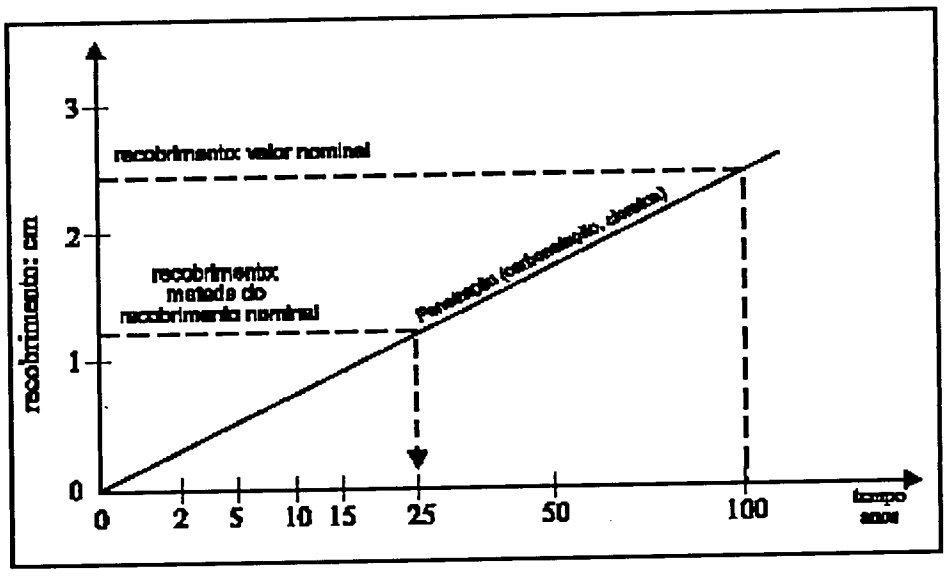


Figura 4.32 - Efeito da espessura de recobrimento [54]

4.4 A inspecção de estruturas de betão armado

O objectivo da inspecção de uma estrutura de betão armado é a detecção de danos, o diagnóstico das anomalias e a caracterização das suas propriedades. Neste último caso, a caracterização pode resultar de um processo de controlo da qualidade do betão ou da execução da obra ou, por outro lado, da ocorrência de degradação da dita estrutura [70].

Antes da realização de qualquer tipo de avaliação é necessário proceder à recolha de toda a informação disponível sobre a construção, nomeadamente [70]:

- o projecto de execução, incluindo as peças escritas e desenhadas e o caderno de encargos;
- informação sobre os processos construtivos utilizados;
- os materiais empregues e o seu modo de aplicação;
- o livro de obra;
- condições de serviço, incluindo:
    - a utilização que foi dada à estrutura;
    - o seu tempo de serviço;

- a ocorrência de acidentes;
- as possíveis modificações que sofreu;

- informações relativas ao meio:
  - tipo de ambiente atmosférico;
  - condições climatéricas;
  - características geográficas e geotécnicas do local;
- informações relativas a inspecções anteriores.

Estas informações são fundamentais para determinar o comportamento da estrutura durante o período de vida útil da estrutura alvo da inspecção.

Tal como nos outros elementos estruturais, a avaliação/inspecção de uma estrutura de betão armado pode ser feita de uma forma simplificada (inspecção de rotina) ou de uma forma detalhada. A decisão sobre qual o tipo de avaliação preconizada deve ser baseada em critérios, mais ou menos padronizados, a saber [10]:

- qual o objectivo e importância da inspecção;
- qual o número de elementos a avaliar e a extensão do dano;
- quais os resultados obtidos em outras inspecções anteriores;
- qual o nível de informação necessária ou os dados disponíveis;
- razões económicas e interesse do Dono de Obra;

Estes dois tipos de avaliação são complementares entre si.

O objectivo principal da avaliação simplificada é determinar qual o estado actual da estrutura e, se for necessário, quais as intervenções (inspecções) posteriores a desenvolver.

Na avaliação detalhada realiza-se uma peritagem rigorosa da estrutura, elemento a elemento, utilizando-se para tal, os meios de diagnóstico necessários para determinar, por exemplo, se a estrutura apresenta armaduras corroídas (que é um dos danos mais característicos deste tipo de estrutura).

4.4.1 Inspecção visual

Qualquer que seja o tipo de inspecção a desenvolver, a inspecção visual é o primeiro passo para a identificação das anomalias ou defeitos existentes.

A observação directa da estrutura é uma fase essencial do seu estudo. Esta inspecção deve ser realizada por uma equipe qualificada, de modo a fornecer um conhecimento e interpretação da estrutura, tendo como finalidade indicar um rumo para uma posterior investigação (inspecção detalhada).

Os objectivos principais da inspecção visual incluem:

- a identificação da deterioração e dos danos estruturais;
- a verificação de que esses fenómenos estão ou não estabilizados;
- a tomada de decisão sobre se existem riscos imediatos na estrutura e quais as medidas de prevenção;
- a identificação da progressão de qualquer efeito ambiental, no edifício.

A inspecção visual é considerada como um dos mais poderosos e versáteis meios de inspecção.

No entanto, como já foi referido, a sua eficiência depende do conhecimento e da experiência do investigador. A inspecção visual tem uma limitação óbvia que é a de só permitir a inspecção de superfícies visíveis. Os defeitos internos à estrutura continuarão a não ser referenciados e não se tem acesso a nenhuma informação quantitativa acerca das propriedades do betão. É por esta razão que a inspecção visual é normalmente associada a um ou mais END. O técnico pode considerar que, após proceder à inspecção visual, outras propriedades da estrutura podem realçar e até complementar o que foi analisado pela inspecção visual.

4.4.2 A inspecção simplificada

A inspecção simplificada ou preliminar é aquela que se efectua inicialmente com o objectivo de obter uma visão global do problema.

Esta inspecção é imprescindível qualquer que seja o objectivo da avaliação.

Deve ser realizada por forma a determinar a causa da deterioração, bem como, permitir a recolha dos dados necessários ao desenvolvimento de uma metodologia

que conduza à sua eliminação. É muitas vezes associada ou mesmo confundida com a inspecção visual.

Para podermos aferir, com segurança, às informações obtidas através da inspecção visual, é necessário um conhecimento completo de engenharia estrutural, dos materiais constituintes da estrutura e até dos seus processos construtivos.

Antes de proceder a uma inspecção, o investigador deve desenvolver e seguir um plano de inspecção, por forma a maximizar a qualidade dos dados recolhidos. Plano esse que deve envolver, no mínimo, estas actividades:

- uma visita detalhada, por forma a ficar familiarizado com a estrutura a inspeccionar;
- obtenção de documentos relacionados com a obra, tais como, o projecto, o seu processo construtivo, as condições ambientais e até a sua função;
- planeamento completo da inspecção;
- colocação de elementos de controle da estrutura (monitorização), para servir de base às observações obtidas;
- inspecção visual detalhada;
- proceder à execução de testes adicionais.

No caso de estruturas de betão armado, a inspecção terá por objectivo a avaliação do seu estado de conservação e/ou a detecção da presença de danos na construção. Para tal, deverão identificar-se as alterações existentes ao nível dos materiais e dos elementos construtivos, as possíveis fissuras e os assentamentos ou movimentos que a estrutura possa ter sofrido. A detecção dos danos pode servir para o investigador estabelecer um diagnóstico do processo patológico dos mesmos permitindo-lhe definir as causas que os motivem. Este diagnóstico pode ser preliminar, propondo uma série de causas para os danos detectados, que deverão ser estudadas em inspecções mais detalhadas.

Exemplos de inspecções simplificadas:

a) assentamentos e escorregamentos de apoio

Exemplo de acções a desenvolver na Inspecção preliminar:

- levantamento topográfico no terreno;
- tipologia dos danos nas fachadas;
- inspecção às paredes de alvenaria;
- verificação dos danos da estrutura;
- verificação do nivelamento das lajes e verticalidade das fachadas.

b) Fendas, fissuras e deformações

Exemplo de acções a desenvolver na Inspecção preliminar:

- levantamento da tipologia da estrutura e da sua geometria;
- desenho, em croquis da fissuração.

c) Avaliação da corrosão, ataques químicos ou danos por fogo

Exemplo de acções a desenvolver na Inspecção preliminar:

- verificação do aspecto do betão;
- desenho, em croquis, dos danos encontrados.

4.4.3 Inspecção detalhada

A inspecção detalhada, posterior à inspecção preliminar, é composta por várias fases: inspecção, avaliação, prognóstico e determinação da segurança da estrutura em relação aos Estados Limites Últimos e de Serviço. Esta inspecção pode ser acompanhada pela realização de medições com vista ao acompanhamento e auscultação da obra, de modo a acompanhar a evolução patológica do problema. O programa de inspecção englobará ainda um plano de realização de ensaios cujo objectivo é a determinação das propriedades materiais do betão armado, a localização de danos, etc.

Como já foi referido, podem definir-se várias fases nesta inspecção:

a) Inspecção

O objectivo principal desta fase é a recolha de todos os aspectos relevantes da estrutura. É composta por três etapas, com objectivos perfeitamente definidos:

Quadro 4.5 - Etapas da fase de inspecção e objectivos a atingir

Inspecção visual preliminar
- Identificar o mecanismo de deterioração
- Levantamento de todos os danos observados
- Formação de lotes
- Localização dos ensaios a realizar
Trabalho de escritório
- Compilação de toda a informação disponível
- Classificação ambiental
- Formação de lotes
Ensaios *in situ*
- Determinação das propriedades dos materiais
- Determinação das secções dos elementos a ensaiar

A formação de lotes é importante porque permite dividir a estrutura em diferentes elementos representativos. Os elementos estruturais podem dividir-se segundo vários aspectos de acordo com a sua tipologia estrutural, localização e nível de dano, de acordo com o referido no Capítulo 2.

Em relação aos ensaios a desenvolver, é necessário que se elabore um planeamento , tendo em conta os seguintes aspectos:

- o tipo de ensaios a realizar;
- o número de dados necessários para obter um valor representativo;
- as limitações inerentes a cada ensaio;
- a sua localização;
- a necessidade de recorrer a meios auxiliares.

b) Avaliação estrutural

Nesta etapa pretende-se determinar o comportamento da estrutura na altura da inspecção e estimar a sua evolução durante o seu período de vida útil.

A determinação do comportamento estrutural é realizada em função dos dados obtidos na primeira etapa, aplicando-se a teoria dos estados limites para determinar o seu nível de segurança.

b.1) Diagnóstico

O objectivo é, além de determinar o comportamento estrutural, avaliar o nível de deterioração da estrutura em causa, em função dos danos encontrados.

b.2) Prognóstico

Pretende-se nesta fase prever como vai evoluir o processo de deterioração e determinar a altura em que a estrutura alcança um nível de comportamento não aceitável.

c) Relatórios de inspecção

O relatório de inspecção é um elemento fundamental, quando se realiza uma avaliação de uma estrutura de betão armado. Nele devem constar todos os dados que foram necessários à tomada de decisão por parte do inspector. Assim deve ser composto por:

1. Descrição da estrutura.
2. Lotes em que se agrupou a estrutura.
3. Descrição dos danos observados, incluindo plantas detalhadas com a sua localização e aspecto.
4. Resultados obtidos nos ensaios realizados.
5. Diagnóstico, com referência a:
   - 5.1. Causas do dano, identificação do mecanismo de deterioração e agressividade do meio ambiente.
   - 5.2. Situação actual da estrutura (ao nível do dano encontrado).
   - 5.3. Cálculo da capacidade portante actual da estrutura.
6. Prognóstico, com referência a informação sobre a evolução da deterioração encontrada.
7. Modelo estrutural, onde se deve incluir informação sobre o modelo de cálculo utilizado incluindo as solicitações empregues.
8. Recomendações referentes a:

- frequência das futuras inspecções;
- informação sobre a urgência da intervenção.

4.4.4 Instrumentação

Durante a realização de uma campanha de ensaios, existem uma série de instrumentos de medida que são imprescindíveis à equipe de inspecção, como por exemplo, os transductores, flexímetros, extensómetros, clinómetros, etc. Cada um tem o seu campo de aplicação e precisão.

No Quadro 4.4 faz-se referência a alguns desses aparelhos, essenciais a qualquer laboratório/empresa que se dedique à reabilitação e inspecção de estruturas de betão armado.

Estes equipamentos também são muito úteis se se optar por monitorizar a estrutura, por forma a acompanhar a sua evolução por um determinado período de tempo.

Quadro 4.6 - Instrumentos de medida e o seu campo de aplicação

Parâmetros de medida	Instrumento recomendado	Precisão	Limite de leitura
Deslocamentos lineares e deformações (assentamentos, flechas)	Níveis de precisão com miras de Invar	0,5 mm	Ilimitado
	Flexímetros de barra	0,1 ... 0,001 mm	200 mm
	Comparadores	0,002 mm	5 mm
	Transdutores	0,01 mm	200 mm
Rotações	Par de flexímetros	Depende do braço	
	Clinómetros	1"	3 °
	Comparadores	0,01 ‰	5 ‰
Deformações unitárias (tensões)	Extensómetros mecânicos e electrónicos	0,005 ‰	30 ‰
	Comparadores	0,005 - 0,01 mm	5 mm
Largura de fendas	Microscópios graduados	0,01 mm	–
	Lupas graduadas	0,1 mm	–
Distância entre fissuras (ver Quadro 3.10)	Réguas graduadas e fissurómetros	Variável	Ilimitado
Forças	Dinamómetros mecânicos	Classe de precisão 2,5 %	
	Dinamómetros electrónicos		
	Manómetros		
Pressão	Células de pressão electrónicas		

4.5 Técnicas Auxiliares de Diagnóstico

4.5.1 Introdução

As técnicas de Ensaio Não Destrutivo e Semi-Destrutivo para estruturas de betão armado, são muito variadas, como já se enumerou no Capítulo anterior, e tanto se aplicam a estruturas em construção como a estruturas já construídas.

No momento dè iniciar o planeamento de uma inspecção detalhada, em que é necessário o recurso a meios auxiliares de diagnóstico, vulgo ensaios, cabe ao inspector ou à equipe de inspecção, em conjunto com os responsáveis pela condução da investigação decidir as técnicas, os locais e com que frequência se vai proceder à dita investigação.

De uma forma mais detalhada ficam aqui algumas das questões mais pertinentes que se colocam [74]:

- Qual o objectivo da inspecção?
- Porque é que se realiza a inspecção?
- Quais os ensaios disponíveis para alcançar este objectivo, tendo em conta as variáveis que intervêm em cada caso?
- De entre esses ensaios, qual(is) o(s) mais recomendável(eis)?
- Qual a localização e em que peças se vai realizar o ensaio?
- Qual o número de ensaios necessário à obtenção dos resultados pretendidos?
- Quem e como se vai proceder à análise e interpretação dos resultados obtidos?

Nesta secção pretende-se dar resposta a estas perguntas enunciando os testes disponíveis, alguns procedimentos específicos, as vantagens e limitações e algumas questões relacionadas com a execução e interpretação dos resultados obtidos, complementando o que foi mencionado no capítulo anterior.

A Norma Britânica BS 1881: Part 201 [75] contém algumas recomendações que podem ajudar na decisão da escolha do método mais indicado, relacionadas com:

- o custo directo e indirecto da sua realização;
- as condições da zona a ensaiar;
- a acessibilidade à mesma;
- o efeito dos possíveis danos produzidos pelo ensaio no local de teste;
- o nível de precisão requerido na estimação do parâmetro que se pretende conhecer.

A mesma Norma refere algumas das aplicações possíveis para este tipo de ensaio [75]:

- controle tecnológico da construções, in situ ou pré-fabricadas;
- controlo de materiais com a sua aceitação, ou não;
- esclarecimento de dúvidas a respeito da execução da obra, nomeadamente sobre a mão de obra envolvida nas operações de transporte, betonagem e cura do betão;
- monitorização da evolução da resistência do elemento, com o objectivo de aquilatar possibilidade de realizar outras operações como a remoção de cofragem, a aplicação de cargas e de pré-esforço, a remoção do escoramento, etc.;
- a localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas na betonagem;
- a determinação da posição, diâmetro e estado das armaduras;
- a determinação da uniformidade do betão;
- a verificação sobre o estado da estrutura após a aplicação de sobrecargas ou outro tipo de acções como a fadiga, fogo e ataque ambiental;
- avaliação do potencial de durabilidade do betão;
- a monitorização das alterações das propriedades do betão ao longo do tempo;

- indicação sobre o estado da estrutura, se for necessário mudar a utilização da mesma.

- etc.

Nos Quadro 4.7 e 4.8 apresenta-se os Métodos existentes e a sua relação com o tipo de informação requerida, de forma a oferecer uma informação global dos critérios de escolha disponíveis.

Quadro 4.7 - Classificação dos Métodos de Ensaio disponíveis, para Estruturas de Betão Armado [74]

Informação pretendida	Métodos disponíveis
Comportamento em serviço, ou quase até à rotura de um elemento estrutural	Ensaios de carga
Resistência do betão	Extracção de carotes Esclerómetro Ultra-sons Pull-out Pull-off Tracção por flexão Resistência à penetração
Propagação das fissuras	Ultra-sons Emissão acústica
Determinação de vazios ou defeitos internos e efectividade do processo de compactação	Radiografia Extracção de carotes Ultra-sons Impulso-Eco
Densidade	Radiometria
Permeabilidade	Ensaios de penetração
Presença de humidade	Métodos nucleares Resistividade eléctrica Termografia
Conteúdo de cimento	Análise química Métodos nucleares
Propriedades da pasta cimentícia e dos seus constituintes	Análise química Extracção de carotes
Detecção de armaduras	Métodos electromagnéticos Radiografias
Grau de deterioração do betão	Análise química Ultra-sons
Resistência à abrasão e grau de consistência	Esclerómetro Métodos físicos Termografia por infravermelhos

Quadro 4.8 - Métodos para a determinação in situ de parâmetros de resistência, de Estruturas de Betão Armado [74]

Tipo de Ensaio	Método	Propriedade medida	Zona afectada pelo ensaio
Semi-Destrutivo	**Pull-out**	Resistência à tracção, combinado com esforço cortante	Superficial
	Tracção por flexão	Resistência à flexo-tracção	Superficial
	Pull-off	Resistência à tracção	Superficial
	Resistência à penetração	Resistência à penetracção	Superficial
	Extracção de carotes	Resistência à compressão	Zona interna
Não Destrutivo	**Esclerómetro**	Dureza superficial Resiliência	Superficial
	Ultra-sons	Módulo de deformação dinâmico	Zona interna e zona superficial

Como já se referiu os principais fundamentos dos Ensaios foram descritos no Capítulo 3, pelo que aqui só serão mencionados os aspectos específicos relevantes para o ensaio de estruturas de betão armado.

4.5.2 Técnicas baseadas na Teoria de Propagação de Ondas

4.5.2.1 Ultra-Sons

A velocidade de propagação de uma onda vibratória está relacionada com o módulo de elasticidade do betão, que por sua vez influencia directamente a sua resistência

Quer isto dizer que a velocidade de propagação de ondas é influenciada pela qualidade do betão, nomeadamente pelo coeficiente de Poisson, pelo módulo de elasticidade e pela massa específica do betão (ver Equação 3.1)

Figura 4.33 - Ensaio de ultra-sons

Tabela 4.3 - Velocidade de propagação de ondas em elementos de betão armado. Critério de Qualidade [76]

Velocidade de propagação de ondas (m/s)	Estado do elemento de betão
Superior a 4575	Excelente
3660 - 4575	Bom
3050 - 3660	Questionável
2135 - 3050	Mau
Inferior a 2135	Muito Mau

Este método tem sido aplicado com muita frequência por ter um equipamento fácil de transportar e de custo não muito elevado, de ser um método não destrutivo e analisar o betão além da zona superficial.

Um dos aspectos chave, para a sua boa execução é a ligação entre o transdutor e a superfície de betão, que deve apresentar-se lisa e devidamente limpa. Para facilitar o contacto aconselha-se o uso de uma gordura leve, entre eles.

A correlação entre a tensão de rotura do betão e a velocidade de propagação dos ultra-sons, em geral do tipo polinomial ou exponencial é feita de modo experimental, devido, sobretudo, à heterogeneidade do betão. O betão é constituído por vários materiais (pasta de cimento, água, inertes, armaduras, ar) com velocidades de propagação diferentes, pelo que a velocidade depende das percentagens relativas de cada um deles. Assim só se conseguem obter correlações satisfatórias, desde que se analisem betões com a mesma dosagem de cimento, igual tipo de inertes e estados higrométricos semelhantes. Deve-se evitar a presença de armaduras, especialmente na direcção paralela às leituras (uma limitação) [26].

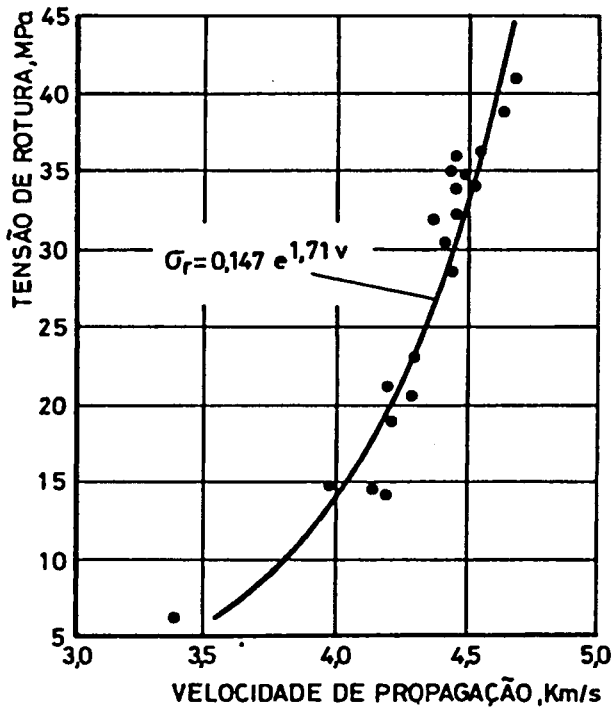


Figura 4.34 - Exemplo da variação da resistência à compressão do betão com a velocidade de propagação dos ultra-sons [26]

4.5.2.1.1 Precisão dos resultados

Segundo Facaoaru, citado em (77), a precisão da estimativa de resistência, utilizando os ultra-sons é a seguinte:

a) 12 a 16 %: quando estão disponíveis amostras e se conhece a composição do betão;

b) 14 a 18 %: quando só estão disponíveis amostras;

c) 18 a 25 %: quando se conhece apenas a composição do betão;

d) acima de 30 %: quando não estão disponíveis amostras nem se conhece a composição do betão, estando os resultados dependentes da experiência do profissional e da existência de dados auxiliares.

Se não se conseguir evitar a presença de armaduras, sobretudo se tiverem uma direcção paralela à direcção do ensaio, poder-se-ão cometer erros de mais de 50 % [26].

4.5.2.1.2 Factores que influenciam os resultados

No Quadro 4.9 apresenta-se um resumo dos principais factores que influenciam uma inspecção a elementos de betão armado.

Quadro 4.9 - Factores que influenciam os resultados de uma inspecção com ultra-sons [77]

Factores que influenciam os resultados	Observações
Estado da Superfície	Devem estar limpas e lisas. Não devem ter qualquer tipo de recobrimento, de modo a não influenciarem o resultado obtido.
Tipo e quantidade de inertes	Elementos de betão com massas específicas maiores ou com maior quantidade de inertes apresentam velocidade de propagação de onda mais elevada (inertes de basalto e quartzito têm o dobro da velocidade de inertes de arenito). A velocidade de onda é menor em betões com inertes maiores.
Proporções de mistura	Para uma determinada velocidade, a resistência do elemento de betão diminui quando a relação água/cimento diminui, ou quando o teor de cimento aumenta.
Tipo de cimento	Não se constatam grandes diferenças entre elementos de betão que utilizam cimento Portland comum e cimento Portland de alta resistência inicial.
Temperatura	O RILEM NDT 1, refere que a velocidade de propagação é influenciada pela temperatura, caso esta seja superior a 30 °C e inferior a 5 °C. Investigadores verificaram que em betões ensaiados que foram mantidos a temperaturas de 45 °C, obtiveram velocidades menores do que os que foram conservados a temperaturas de 25°C e 35°C.
Presença de armaduras	Em elementos de betão ensaiados com armaduras na mesma direcção das ondas, a velocidade de propagação foi maior, uma vez que a velocidade de onda no aço é maior do que no betão (1,2 a 1,9 vezes) . Se não se puder evitar a presença de armaduras, deve-se proceder a uma correlação nos valores obtidos. Para armaduras transversais ao percurso da onda, com diâmetros inferiores a 20 mm, a sua influência é praticamente nula.
Presença de fissuras e vazios internos	A velocidade das ondas sonoras depende do comprimento da fissura e dos vazios e se está preenchida com ar e água. De qualquer modo é menor do que a velocidade de um elemento de betão são.

Comprimento de propagação de onda	O RILEM ND 1 recomenda um comprimento mínimo para a propagação de onda, por forma a que os transdutores não fiquem muito próximos, porque seria influenciados negativamente pela heterogeneidade do betão: - 100 mm para elementos de betão com inertes de dimensão máxima inferior a 30 mm: - 150 mm para elementos de betão com inertes de dimensão máxima inferior a 45 mm:
Frequência do transdutor emissor	Em ensaios em elementos de betão armado, são indicados transdutores com frequência entre 20 e 150 kHz, sendo os mais utilizados os de 54 kHz.

Em relação ao último ponto o RILEM recomenda frequências mínimas para o transdutor emissor, de acordo com as dimensões da peça (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Frequência mínima do transdutor emissor, de acordo com as dimensões da peça [76]

Comprimento (mm)	Frequência (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 - 700	≥ 60	70
200 - 1500	≥ 40	150
> 1500	≥ 20	300

Tabela 4.5 - Comparação entre os procedimentos preconizados por Normas Internacionais, no ensaio de ultra-sons [77]

Parâmetros de Ensaio	Normas		
	RILEM NDT 1/1972	BS 1881:Part203: 1986	ASTM C 597/1983
Frequência do transdutor	20 a 200 kHz	20 a 150 kHz	10 a 150 kHz
Superfície	Plana	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana
Distância entre os transdutores	Precisão de ± 1%	Precisão de ± 1%	Precisão de ± 0,5%
Medições de velocidade		Precisão de ± 0,5%	Precisão de ± 0,5%

Quadro 4.10 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons [77]

Autor	Tipo de cimento	Tipo de inerte	Proporção das misturas	Dimensão dos inertes
RILEM NDT 1 (1972)	Teor e tipo de cimento influenciam na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade.	Tipo e granulometria influenciam na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade	--	--
Elvery e Ibrahim (1976)	Não há influência na velocidade, comparando betões com cimento ASTM tipo I e cimento ASTM tipo III, após 2 dias de idade.	--	Quanto maior for a quantidade de inertes, maior é a velocidade. A relação A/C não influencia significativamente a velocidade.	--
Tomsett (1980)	--	--	--	A velocidade é maior em betões com $D_{máx}$ maior.
Chung e Law (1983)	--	O tipo de inerte (rocha de origem), influencia a velocidade.	Quanto maior for o inerte maior é a velocidade.	--
Sturrup et al (1984)	Não há influência na velocidade, comparando betões com cimento ASTM tipo I e cimento ASTM tipo III,	Betão com inertes leves, apresenta velocidades menores	Nas idades iniciais, a influência é menor do que em idades mais avançadas.	A velocidade é maior em betões com $D_{máx}$ maior.
BS 1881: Part 203 (1986)	Teor e tipo de cimento influenciam na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade.	Tipo e granulometria influenciam na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade	Influi na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade.	--
NBR 8802 (1994)	O tipo de cimento e o grau de hidratação influenciam a velocidade.	Tipo e massa específica influenciam na correlação entre a resistência à compressão e a velocidade	Influencia o resultado da velocidade	--
Nogueira e Willam (2001)	--	--	A relação A/C não influencia significativamente a velocidade.	A velocidade é maior em betões com $D_{máx}$ maior.

Nota: *Velocidade equivale a velocidade de propagação da onda.*

O ensaio de ultra-sons apresenta algumas limitações importantes. Na detecção de fissuras quando a sua abertura for reduzida ou se encontrar preenchida com água ou outros materiais, a sua detecção é praticamente impossível. A detecção de vazios no interior do betão também está condicionada pela sua dimensão, relativamente à trajectória do som ou à espessura do elemento a ensaiar.

4.5.2.2 Impacto - Eco

Este método tem-se revelado eficaz na inspecção de estruturas de betão armado, nomeadamente:

- na detecção de descontinuidades no interior das peças;
- na determinação da profundidade das fissuras;
- na determinação da espessura de elementos de betão, nomeadamente nos que apenas possuem uma superfície visitável, como por exemplo, lajes de fundação, paredes moldadas, etc.

Após o impacto provocado pelas esferas (ver secção 3.4.2.4), a perturbação propaga-se através do elemento sob a forma de ondas que se reflectem na sua face oposta ou em descontinuidades internas, sendo captadas por um transdutor localizado junto à zona de impacto. Os dados recebidos são tratados por um software específico que regista o formato da onda e apresenta o seu espectro de frequência. É a análise deste espectro que permite determinar a espessura do elemento e avaliar a existência de eventuais descontinuidades internas.

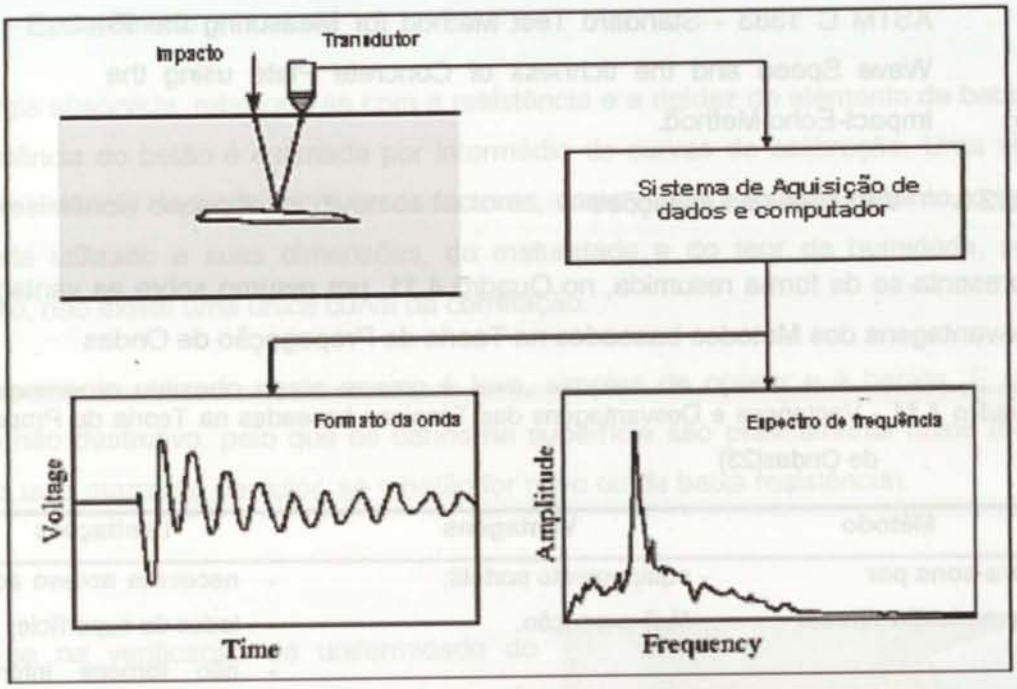


Figura 4.35 - Esquema de funcionamento do Método Impacto Eco

Os resultados do teste não são afectados pela presença de armaduras.

Figura 4.36 - Ensaio utilizando o Método Impacto Eco [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

Este Método está normalizado através da ASTM C 1383, para a medição da espessura de elementos de betão armado:

ASTM C 1383 - Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the tichness of Concrete Plate using the Impact-Echo Method.

4.5.2.3 Vantagens e Limitações

Apresenta-se de forma resumida, no Quadro 4.11, um resumo sobre as vantagens e desvantagens dos Métodos baseados na Teoria de Propagação de Ondas

Quadro 4.11 - Vantagens e Desvantagens das Técnicas baseadas na Teoria de Propagação de Ondas[23]

Método	Vantagens	Limitações
Ultra-sons por transmissão directa	- equipamento portátil; - fácil execução.	- necessita acesso aos dois lados da superfície; - não fornece informação sobre a profundidade do defeito. - Dificuldade na detecção de fissuras e vazios de pequena abertura e preenchidas com água ou outro elemento.
Eco ultra-sónico	- só necessita o acesso a uma das superfícies da estrutura a ensaiar; - fornece informação sobre a superfície que contém o defeito.	- aplica-se a um limitado número de espessuras; - não está comercializado; - é necessário um operador com experiência.
Impacto / Eco	- só necessita o acesso a uma das superfícies da estrutura a ensaiar; - está disponível equipamento comercial; - capacidade de localização de uma grande variedade de defeitos; - não necessita materiais de acoplamento.	- é necessário um operador com experiência; - a instrumentação actual limita os elementos alvos de teste a´ menos de 2 metros de espessura.

4.5.3 - Esclerómetro

A energia absorvida, relaciona-se com a resistência e a rigidez do elemento de betão. A resistência do betão é estimada por intermédio de curvas de calibração. Uma vez que a resistência depende de diversos factores, como o tipo e teor de cimento, o tipo de inerte utilizado e suas dimensões, da maturidade e do teor de humidade, por exemplo, não existe uma única curva de correlação.

O equipamento utilizado neste ensaio é leve, simples de operar e é barato. É um ensaio não destrutivo, pelo que os danos na superfície são praticamente nulos (fica apenas uma marca do percutor, se o betão for novo ou de baixa resistência).

Utiliza-se na verificação da uniformidade do elemento, no acompanhamento do desenvolvimento dos parâmetros de resistência ao longo do tempo e para estimar a sua resistência.

Figura 4.37 - Ensaio utilizando o Esclerómetro

Uma das maiores limitações prende-se com o facto de que os resultados obtidos apenas estão relacionados com a resistência superficial do elemento de betão, mais propriamente os primeiros 30 a 50 mm [77], segundo Teodoru, sendo que a partir dos três primeiros meses há influência da carbonatação do betão.

4.5.3.1 Precisão dos resultados

Segundo [77], citando Facaoaru, a precisão deste método é de:

a) 12 a 18 %: se estiverem disponíveis amostras e se conhecer a composição de betão;

b) 15 a 20 %: se apenas estiverem disponíveis amostras;

c) 18 a 28 %: se se conhecer, apenas, a composição do betão;

d) acima de 30 %: se só se conhecerem dados auxiliares e se o betão não possuir mais de um ano de idade.

4.5.3.2 Factores que influenciam os resultados

No Quadro 4.12 apresenta-se um resumo dos principais factores que influenciam uma inspecção a elementos de betão armado.

Quadro 4.12 - Factores que influenciam os resultados do ensaio com o esclerómetro [77]

Factores que influenciam os resultados	Observações
Estado da Superfície	Deve ser o mais lisa possível, uma vez que o índice esclerométrico depende do seu estado, isto é, uma superfície deve estar desempenada (mais dura). As superfícies que estiverem saturadas podem corresponder a índices cerca de 20 % menores do que os que correspondem a superfícies secas. A norma BS 1881: Part 202, refere que em betões com idade superior a três meses, a influência da carbonatação pode ser significativa e que as camadas superficiais podem deixar de ser representativas do betão do interior da peça. Em complemento, o ACI 228 2R diz que nas zonas de ensaio que possuam camadas carbonatadas, resultam índices esclerométricos maiores do que os correspondentes às camadas internas.
Tipo de cimento	Segundo as Normas BS 1881: Part 202 e RILEM NDT 3, para os diversos tipos de cimento Portland os resultados não apresentam variações significativas (na ordem dos 10 %). Se se utilizar cimento aluminoso pode existir ima variação de 199 %, em relação às curvas de correlação obtidas para o cimento Portland.
Teor de cimento	A Norma BS 1881: Part 202, refere que a mudança do teor de cimento pode levar a um erro de 10 % na estimativa da resistência, sendo que betões com elevado teor de cimento têm índices esclerométricos menores do que betões com teores de cimento menores.
Tipo e dimensão dos inertes	Para um determinado índice esclerométrico, a resistência à compressão é menor para a correlação feita com para betões com inertes de seixo do que com inertes de calcário, por exemplo. A presença de inertes de maiores dimensões, situados por baixo do percutor, pode provocar índices muito mais elevados, sendo que o oposto acontece se existirem vazios. Deve-se, de acordo com o ACI 228 2R [23] estabelecer curvas de correlação específicas, de acordo com o tipo de inerte utilizado.
Direcção do ensaio	O esclerómetro deve ser utilizado segundo uma direcção perpendicular à da superfície de ensaio. Se, por alguma razão, tal não puder suceder, deve-se corrigir o índice, por meio de coeficientes fornecidos pelo fabricante.

Rigidez da peça	Segundo as diversas normas, o impacto provocado pelo esclerómetro não pode provocar vibração na peça a ensaiar. Em ensaios cujo objectivo é comparar diversos elementos estruturais, estes devem ser realizados enter peças com rigidez semelhante.
Tipo de cura e idade do betão	Segundo a Norma BS 1881: Part 202, são necessárias curvas de correlação para diferentes condições de cura. A dureza e a resistência variam em função do tempo.

Tabela 4.6 - Comparação entre os procedimentos preconizados por Normas Internacionais, no ensaio com esclerómetro [77]

Parâmetros de Ensaio	**Normas**		
	RILEM NDT 3/1984	**BS 1881:Part202: 1986**	**ASTM C 805/1982**
Elementos estruturais	Evitar painéis e lajes com espessura inferior a 120 mm		Espessura mínima de 100 mm
Superfície de ensaio	Entre 1000 x 100 mm e 200 x 200 mm	Inferior a 300 x 300 mm	Diâmetro > 150 mm
Distância entre pontos	Mínima de 30 mm	20 a 50 mm	Mínima de 25 mm
Nº. de medições	Mínimo 9	12	10
Distância entre o pto. de medição e cantos e arestas da peça	Mínima de 30 mm		
Resultados		Adoptar a média de todas as medições	Das 10 medições, retirar as que se distanciarem 7 unidades da média. Se isto ocorrer em mais de duas medições, eliminar o conjunto das medições

4.5.3.3 Curvas de calibração

As diversas Normas referem a necessidade de se efectuarem ensaios em testemunhos extraídos da estrutura, normalmente cubos com arestas de 150 mm. De acordo com o ACI 228 2R [23], para cada idade devem ser obtidos, por cada par de testemunhos, 20 índices esclerométricos, que devem ser fixos entre os pratos de uma prensa utilizada em ensaios de resistência à compressão, sob uma tensão de 3 Mpa. Em primeiro lugar efectua-se o ensaio na mesma direcção que será realizada na estrutura, após o que a amostra será ensaiada à compressão. As condições de humidade e de textura devem ser idênticas às que se encontram na estrutura.

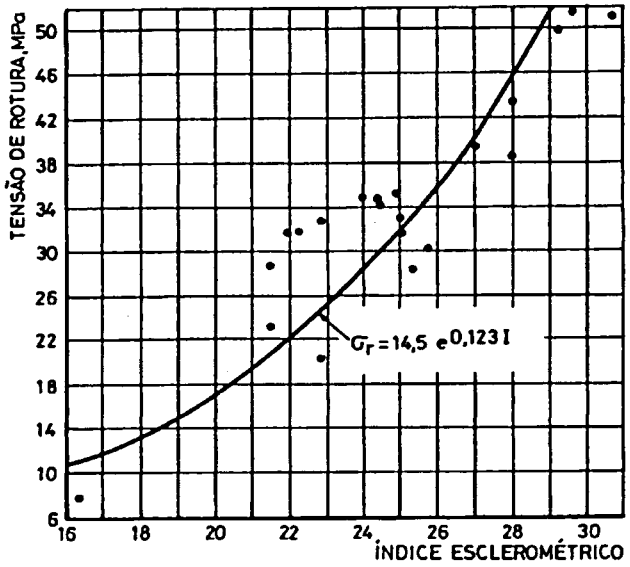


Figura 4.38 - Ensaio de esclerómetro: exemplo da variação da resistência à compressão do betão com o índice esclerométrico [26]

Quadro 4.13 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de esclerómetro [77]

Autor	Tipo de cimento	Tipo de inerte	$D_{máx}$	Idade do betão
RILEM NDT 3 (1984)	Influencia o IE, em especial o cimento aluminoso e o cimento supersulfatado.	Curava IE vs. resistência à compressão diferentes para inertes comuns e para inertes leves	--	Em betões com idades compreendidas entre 3 dias e 3meses não se considera a carbonatação.
BS 1881: Part 201 (1986)	Influencia o IE, em especial o cimento aluminoso e o cimento supersulfatado.	Curava IE vs. resistência à compressão diferentes para inertes comuns e para inertes leves	--	Em betões com idades compreendidas entre 3 dias e 3meses não se considera a carbonatação.
Teodoru (1988)	Influencia na correlação entre o IE e a resistência à compressão.	O tipo e a proporção de inertes graúdos influencia o IE e a siua correlação com a resistência à compressão.	--	--
Yun et al (1988)	--	--	O conteúdo de inertes tem mais influência que o $D_{máx}$.	--
Bungey (1989)	Influencia o IE, em especial o cimento aluminoso e o cimento supersulfatado. O teor de cimento não influencia o IE.	O tipo e a proporção de inertes graúdos influencia o IE e a siua correlação com a resistência à compressão.	--	--
ACI 228 (1989)	--	Curava IE vs. resistência à compressão diferentes para cada tipo de inertes.	O IE é maior em superfícies carbonatadas.	--
NBR 7584 (1995)	Influencia na correlação entre o IE e a resistência à compressão.	Curava IE vs. resistência à compressão diferentes varia com o tipo de inertes.	--	Em betões com 14 a 60 dias, considera-se a curva obtida em condições normalizadas.
Neville (1997)	--	IE diferente para diferentes tipos de inertes.	--	--

Nota: *IE significa Índice Esclerométrico.*

4.5.4 Método de medição da resistência à penetração

Este ensaio é simples de realizar e não requer grande experiência por parte do operador. A Norma BS 1881: Part 201 limita a realização do ensaio a betões cuja máxima dimensão dos inertes seja 50 mm. A camada a ser ensaiada corresponde a uma profundidade entre os 25 a 75 mm.

O método é influenciado, sobretudo, pelo tipo de inertes e suas dimensões. Ao contrário dos métodos anteriores, o teor de humidade, o tipo de cimento e o processo de cura não têm influência nos resultados obtidos.

O campo de aplicação é vasto, nomeadamente para a determinação da evolução da resistência à compressão nas idades jovens e verificar a sua uniformidade.

Para a sua realização apenas é necessário o acesso a uma das superfícies do elemento a ensaiar, devendo-se evitar as armaduras para obter resultados credíveis.

Figura 4.39 - Ensaio de resistência à penetração

4.5.4.1 Precisão dos resultados

De acordo com [77], citando Malhotra e Bungey, a precisão do ensaio situa-se em torno de 15 a 20 %, desde que os corpos de prova sejam moldados, curados e ensaiados sob condições idênticas às que se estabeleceram para as curvas de correlação.

4.5.4.2 Factores que influenciam os resultados

No Quadro 4.14 apresenta-se um resumo dos principais factores que influenciam uma inspecção a elementos de betão armado.

Quadro 4.14 - Factores que influenciam os resultados do ensaio de resistência à penetração [77]

Factores que influenciam os resultados	Observações
Estado da Superfície	A textura e a humidade superficial não têm influência no resultado final. No entanto, se o recobrimento final for executado à colher, a camada superficial é mais dura, o que pode resultar em valores inferiores de penetração.
Tipo de inerte e sua dimensão	O tipo de inerte influencia directamente no comprimento de penetração: quanto mais rígido for o inerte maior é o comprimento exposto.
Carga de pólvora	O tipo de carga de pólvora pode influenciar a velocidade do disparo, o que pode implicar profundidade de penetração diferentes. Yun et al, citado em [77], sugere os Seguintes tipos de carga (relacionando-os com a resistência do betão): - carga baixa para elementos de betão com resistência de 21 Mpa; - carga padrão para elementos de betão com resistência de 35 Mpa; - carga padrão e baixa para elementos de betão com resistência de 28 Mpa;
Tipo de pino	Em elementos de betão com resistência elevada devem ser utilizados pinos de maior rigidez, sob o risco de não penetrarem na peça.
Diversos	O posicionamento da pistola (que deve estar perpendicular à superfície de ensaio) e a localização da armadura pode influenciar o resultado final.

4.5.4.3 Curvas de correlação

Para estabelecer as curvas de correlação, devem ser extraídas 12 carotes (cilíndricas), de seis idades diferentes, numa laje onde seja possível realizar 18 ensaios de penetração, o que equivale a dizer que se ensaiaram para cada idade duas carotes e se realizaram 3 penetrações [23].

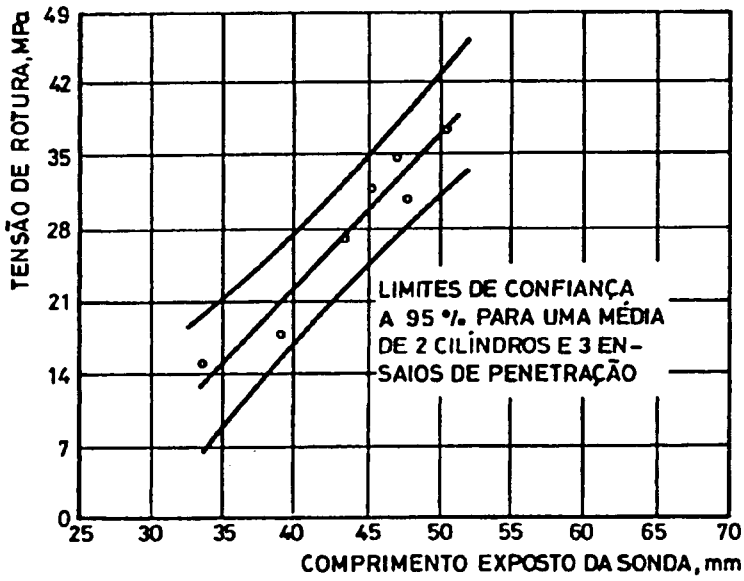


Figura 4.40 - Ensaio de penetração de Windsor: exemplo da variação da resistência à compressão do betão com o comprimento da sonda [26]

Quadro 4.15 - Comparação entre diversos autores, sobre os factores que influenciam os resultados obtidos no ensaio de penetração de pinos [77]

Autor	Tipo de inerte	$D_{máx}$ do inerte	Carga de pólvora
ACI 228 (1989)	O tipo de inerte influencia a penetração.		
BS1881: Part 207 (1992)	O tipo de inerte influencia a penetração.		
Bungey (1989)	O tipo e dureza do inerte influencia a penetração.		
Jenkins (1985)			Influencia a penetração
Yun et al (1988)		$D_{máx}$ influencia a penetração	Influencia a penetração

4.5.5 Teste Pull-Off

Neste ensaio, a estimativa da resistência à compressão é dada em função da força de tracção necessária, para provocar a ruptura do betão. Esta resistência é determinada através da utilização de curvas de correlação/calibração.

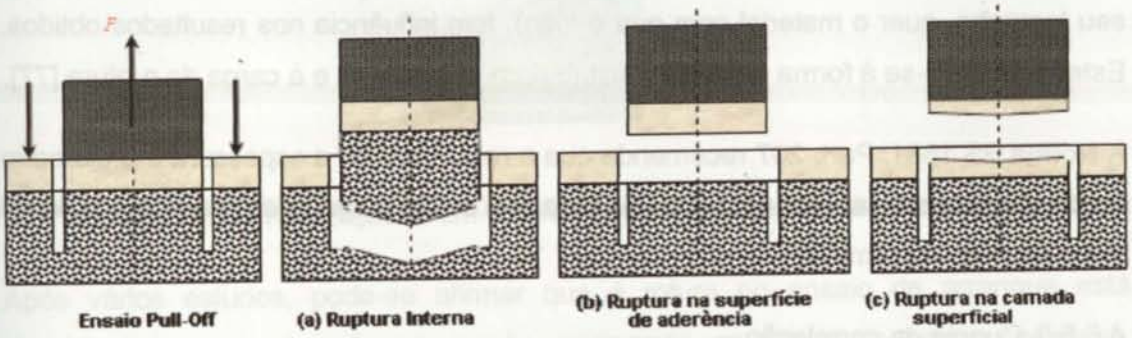


Figura 4.41 - Ensaio Pull-Off: tipos de ruptura

É um ensaio semi-destrutivo, uma vez que é necessário proceder à reparação da zona de ensaio. Antes de ser executado, deve-se avaliar se a cura da resina, utilizada na colagem, foi correctamente realizada.

Figura 4.42 - Equipamento necessário para a realização de um Ensaio Pull-Off: [adapt. www.defeldsko.com]

4.5.5.1 Precisão dos resultados

É possível estimar a resistência à compressão com uma precisão de ± 8 % em ensaios laboratoriais e de ± 20 %, quando os ensaios se realizam *in situ* [26].

4.5.5.2 Factores que influenciam os resultados

Os factores de que depende a relação entre a força de tracção e a resistência à compressão, são os seguintes [26]:

- idade do betão;

- tipo e dimensão máxima dos inertes;
- condições de cura;
- dosagem e tipo de cimento.

Também o material utilizado na realização do ensaio, nomeadamente o disco (quer o seu tamanho, quer o material com que é feito), tem influência nos resultados obtidos. Este facto deve-se à forma como são distribuídas as tensões e à carga de ruptura [77].

A Norma BS 1881: Part. 207 recomenda que a relação entre a espessura e o diâmetro do disco não deve ser menor que 40 %, para que seja assegurada uma distribuição de tensões mais uniforme [77].

4.5.5.3 Curvas de correlação

As curvas de correlação são do tipo exponencial, $\sigma_R = a\ x^b$, em que x é a força de tracção [26].

Devem ser obtidas experimentalmente, tendo em atenção os factores que influenciam o método.

4.5.6 Ensaios de Arranque (Pull-Out)

Como já foi referido no Capítulo anterior, dentro dos ensaios de arranque, os ensaios Pull-Out destacam-se por serem os mais utilizados. A bibliografia consultada destaca dois métodos: os que se baseiam no planeamento antes da betonagem e os que se baseiam no planeamento após a betonagem. Como se pode constatar pela Figura 3.58, os valores obtidos são muito semelhantes nos dois métodos. Como os procedimentos são idênticos e as Normas também são as mesmas, os dois métodos vão ser relatados em conjunto.

É necessário ter em consideração as dimensões dos equipamentos utilizados, uma vez que se constatou que o diâmetro do disco e o diâmetro do anel de apoio têm influência no resultado final do ensaio [26].

Figura 4.43 - Realização de um ensaio de arranque [adapt. www.germann.org]

Após vários estudos, pode-se afirmar que a rotura no ensaio de arranque está relacionada com a rotura à compressão, originando um estado de tensão complexo, provavelmente triaxial, que varia durante o ensaio e ao longo da superfície de rotura.

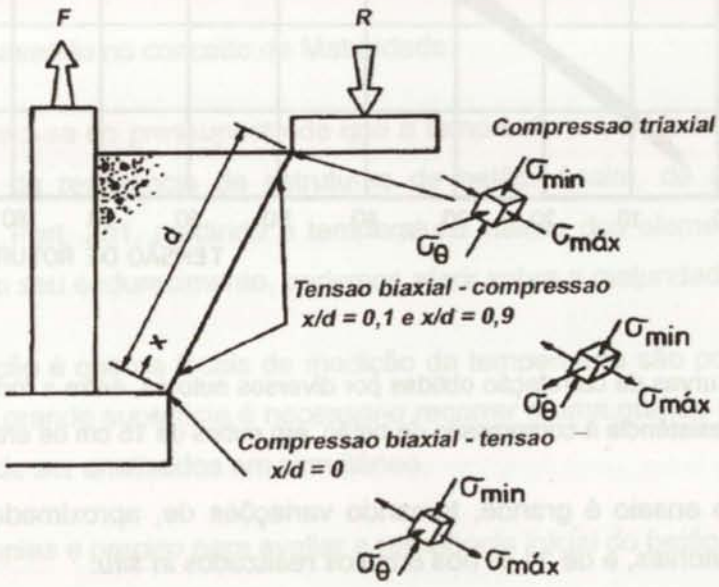


Figura 4.44 - Estado de tensão no ensaio de arranque, ao longo da superfície de rotura prevista, antes do início da fissuração [26]

4.5.6.1 Curvas de correlação

A obtenção de curvas de correlação entre a força de arranque e a resistência à compressão, pode ser feita colocando o dispositivo de arranque no próprio provete que vai posteriormente ser ensaiado à compressão ou em provetes diferentes, mas oriundos de peças com as mesmas condições [26]. Os diferentes estudos realizados, sobretudo na Dinamarca, referem uma relação linear do tipo: $F = a\,\sigma_R + b$, em que *a* e *b*

são constantes, F é a força de arranque (em kN) e σ_R é a tensão de rotura à compressão (em Mpa).

Concluiu-se que o ensaio não era afectado pela relação A/C, pelo tipo de cimento, idade e condições de cura, tipo de inerte, volume de vazios e adjuvantes. A dimensão dos inertes pode afectar os resultados [26].

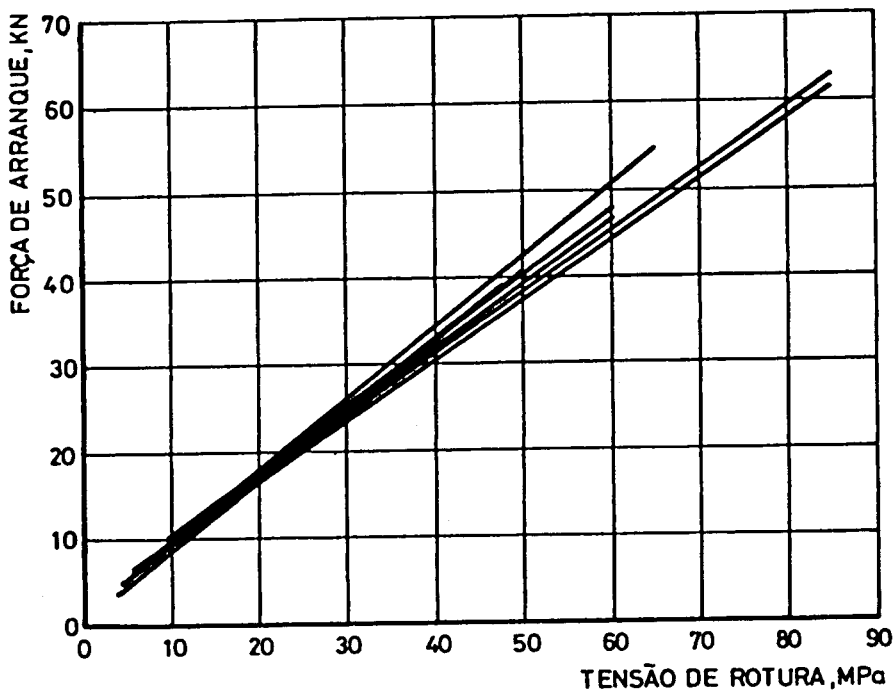


Figura 4.45 - Curvas de correlação obtidas por diversos autores, entre a força de arranque e a resistência à compressão do betão, em cubos de 15 cm de aresta [26]

A precisão do ensaio é grande, tomando variações de, aproximadamente 7 %, em ensaios laboratoriais, e de 11 % nos ensaios realizados *in situ*.

Quadro 4.16 - Vantagens e Desvantagens dos ensaios de arranque, realizados antes e após a betonagem

	Vantagens	Desvantagens
Antes da betonagem (Lok-Test)	Obtenção de bons resultados na estimativa da resistência de elementos de betão de pouca idade. Avaliação do tempo de cura do betão.	Apenas permite ensaiar o betão a menos de 2,5 cm de profundidade. Necessita de planeamento.
Após a betonagem (Capo-Test)	Não necessita de planeamento. Permite avaliar a resistência de estruturas de betão quando estas estão sujeitas a acções não previstas, como a acção do fogo.	Necessita a furação do elemento alvo de ensaio.

Os ensaios de arranque revelaram-se mais eficazes a estimar a resistência do betão, do que os ensaios de dureza superficial e ultra-sons [26].

4.5.7 Método baseado no conceito de Maturidade

Este método baseia-se no pressuposto de que a temperatura e a idade influenciam o desenvolvimento da resistência de estruturas de betão. Assim, de acordo com a Norma BS 1881: Part. 201, medindo a temperatura interna dos elementos, desde a betonagem até ao seu endurecimento, podemos aferir sobre a maturidade do betão.

A principal limitação é que os locais de medição da temperatura são pontuais, isto é, para avaliar uma grande superfície é necessário recorrer a uma grande quantidade de pontos, que têm de ser analisados em simultâneo.

É um método simples e preciso para avaliar a resistência inicial do betão.

Os principais factores que influenciam a relação entre a resistência e a maturidade são a temperatura, o tipo de inertes, o tipo de cimento e a relação água/cimento, pelo que as curvas de correlação devem ser específicas para cada situação.

Figura 4.46 - Termómetro inserido em elemento de betão [adapt. www.germann.org]

4.5.8 Ensaios utilizados na determinação do risco de corrosão

4.5.8.1 Através da medição da resistividade do betão

A medição da resistividade de um elemento de betão, tem por objectivo estimar os níveis de corrente entre a peça e um eléctrodo de referência. Com a aplicação deste método, o técnico consegue determinar e identificar as áreas onde existe corrosão ou onde ela está prestes a ocorrer, antes dos seus efeitos se tornarem visíveis, uma vez que consegue saber o nível de corrente que flui entre as regiões catódicas e anódicas.

Assim, o inspector localiza as zonas de betão armado que precisam ser reparadas ou protegidas, podendo, ainda, monitorizar a sua evolução por um dado período de tempo.

O equipamento necessário à realização deste ensaio consiste num conjunto de quatro eléctrodos em linha, uma fonte de corrente alterna e circuitos electrónicos. Aplica-se uma corrente alterna entre as duas sondas externas (designadas por sondas de corrente) e mede-se uma voltagem entre as duas sondas internas (sondas de voltagem) [19]

As sondas são colocadas em contacto com a superfície de betão (com o espaçamento previamente definido). Esta deve estar limpa, sem resíduos nem gorduras.

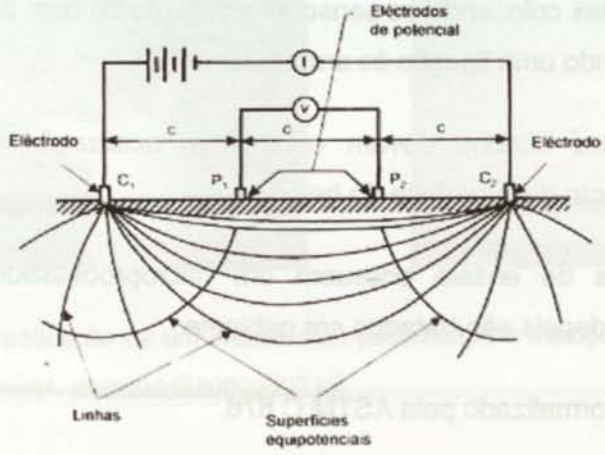


Figura 4.47 - Disposição utilizada para determinar a resistividade do betão [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

A obtenção de resultados pode ser feita através da detecção da variação da resistividade, em profundidade ou através do mapeamento da resistividade (variação da resistividade ao longo da superfície).

Figura 4.48 - Realização de um ensaio com o objectivo de determinar a resistividade do betão [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

4.5.8.2 Técnica da resistência de polarização

Esta técnica permite determinar a taxa de corrosão das armaduras de elementos estruturais de betão armado.

O equipamento utilizado é constituído por uma unidade de controlo do sistema, um sensor para medir a taxa de corrosão e os potenciais de meia-célula e um sensor para medir a resistividade, temperatura e humidade relativa (ver secção 3.4.8.3) [19].

As medições são efectuadas colocando os sensores em contacto com a superfície do elemento a ensaiar e fazendo uma ligação às armaduras [19].

No registo dos resultados obtidos devem constar a localização do ensaio e observações sobre o aspecto da superfície do betão.

Os próprios instrumentos de ensaio possuem um microprocessador, capaz de armazenar os dados, que depois são tratados em gabinete.

Este ensaio encontra-se normalizado pela ASTM C 876.

Figura 4.49 - Realização de um ensaio utilizando a técnica de resistência à polarização [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

4.5.9 Pacómetro

Os pacómetros são aparelhos utilizados com muita frequência em estruturas de betão armado, com o objectivo de:

- localizar as armaduras;
- determinar a espessura de recobrimento do elemento;
- estimar a dimensão das armaduras.

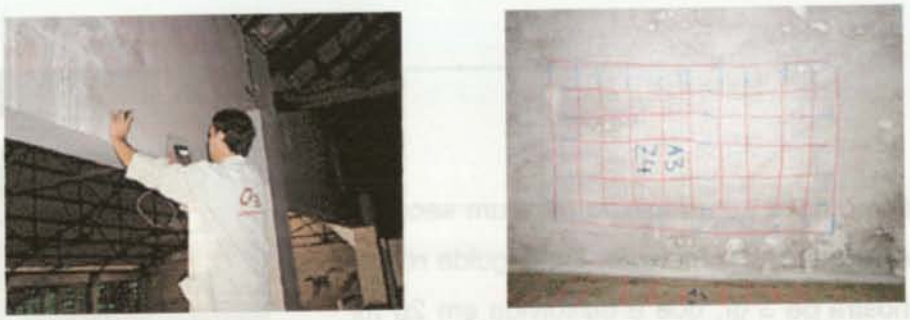


Figura 4.50 - Realização de um ensaio com pacómetros e esboço das armaduras localizadas [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

As medições realizadas com recurso a este equipamento não são afectadas pela presença de humidade e é imune à variação de temperatura e a interferências de origem eléctrica.

A intensidade das correntes parasitas (um dos métodos em que se baseia o ensaio) é condicionada pela profundidade da armadura, pelo seu tamanho e orientação, em relação ao aparelho.

Em primeiro lugar determina-se a orientação das armaduras, após o que se coloca o aparelho sobre ela, em direcção longitudinal. De seguida procede-se à medição da camada de recobrimento, e por fim, estima-se o diâmetro das armaduras.

Este ensaio encontra-se normalizado pela BS 1881: Part. 204.

4.5.10 Determinação *in situ* do teor em cloretos do betão

A importância da determinação do teor de cloretos em elementos de betão, prende-se com o facto de a sua presença estar relacionada com danos em estruturas existentes ou com aspectos de durabilidade, em construções novas.

O ensaio consiste na realização de três furos no betão a ensaiar, até à profundidade em que se pretende determinar o teor em cloretos. Se o objectivo for determinar um perfil do teor em cloretos, será necessário proceder à recolha de amostras em três profundidades diferentes: perto da superfície, ao nível das armaduras e abaixo das mesmas. O local de ensaio deve ser seleccionado antecipadamente, bem como se deve localizar as armaduras, com o recurso a pacómetros, por exemplo.

O pó resultante deve ser recolhido para um saco de plástico, hermeticamente fechado. De seguida retira-se uma amostra de 3 gr, que é dissolvida em 20 ml de uma solução ácida. Após a sua calibração, coloca-se o eléctrodo, na garrafa de ensaio e lê-se o teor em cloreto, indicado no mostrador.

Figura 4.51 - Equipamento utilizado na determinação do teor em cloretos [adapt.www.germann.org]

A Norma NP ENV 2056 fixa os limites do teor em cloreto [19]:

- 1,0 % de ião cloro, em relação ao peso de cimento, em elementos de betão simples;
- 0,4 %, no caso de betão armado;
- 0,2 %, no caso de betão pré-esforçado.

Para aferir os resultados obtidos, devem ser realizados ensaios laboratoriais, sendo posteriormente determinadas curvas de correlação (Figura 4.52).

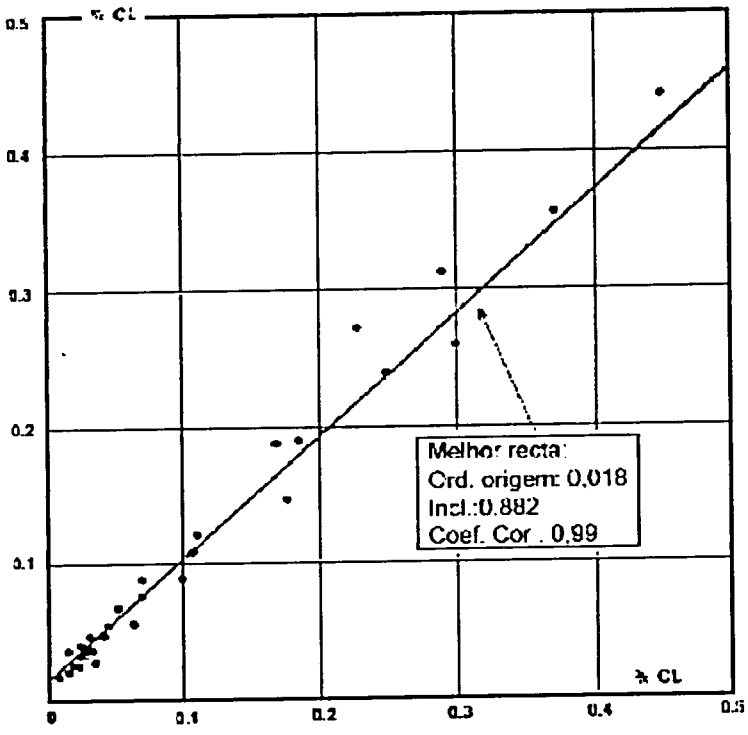


Figura 4.52 - Recta de correlação obtida em 30 amostras entre a técnica de ensaio *in situ* e ensaios laboratoriais [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

O desvio entre os resultados obtidos em laboratório e os realizados in situ são da ordem dos 5 %.

4.5.11 Determinação da profundidade de carbonatação

A importância da ocorrência de carbonatação, num elemento de betão armado, está ligada à protecção que as armaduras possuem devido ao meio alcalino existente, e que é neutralizado pela ocorrência da dita carbonatação. Assim, uma camada de betão carbonatada favorece o aparecimento de corrosão nas armaduras.

O teste consiste em evidenciar a diferença de pH, entre o betão e a frente de carbonatação, por meio da aspersão de indicadores químicos, como a fenolftaleína dissolvida em álcool na concentração de 1 %. A utilização de fenolftaleína deve-se ao facto de ser incolor, para pH inferior a 9,2 e violeta acima desse valor.

Figura 4.53 - Determinação da profundidade de carbonatação, com recurso à extracção de carotes [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

A aspersão deve ser feita logo após a extracção da carote. A profundidade da camada incolor (a camada carbonatada), deve ser medida desde a superfície exterior, em mm, em várias posições, tomando-se a média das várias medições como resultado final.

É um teste de simples execução e económico, fornecendo informação credível sobre o risco de ocorrência de corrosão nas armaduras. A principal limitação do teste é o facto de ser semi-destrutivo.

4.5.12 Ensaios de carotes

Em relação aos testes não destrutivos e semi-destrutivos realizados in situ, a extracção de carotes é utilizada como última escolha, uma vez que é necessária a furação da estrutura. Duas outras questões se colocam: qual a localização mais adequada e o que fazer quando a estrutura for fortemente armada.

Como foi referido na secção 3.5.1, a extracção de carotes pode ser utilizada para determinar a tensão de rotura à compressão e tracção, as propriedades físicas e químicas do material, bem como permite uma inspecção visual da amostra.

Figura 4.54 - Extracção de uma carote de uma viga de betão armado [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

O local de realização do ensaio deve ser escolhido em função do objectivo do teste, tendo sempre em consideração que a amostra deve representar, efectivamente, o tipo de material utilizado na estrutura.

A selecção do equipamento de corte deve ser feita de modo a não provocar interferência na estrutura e a não danificar a amostra recolhida. Por isso, a pressão exercida pela máquina de corte deve ser constante.

4.5.12.1 Factores que influenciam os resultados do teste

De entre os resultados que influenciam os resultados do ensaio, cite-se:

a) características materiais:

- teor de humidade;
- vazios;
- condições de cura;
- relação A/C;

b) variáveis de teste:

- relação comprimento/diâmetro da amostra;
- diâmetro da amostra;
- tipo de elemento estrutural;
- localização da amostra no elemento;
- existência de armaduras.

Como as características materiais que afectam os resultados se encontram enumeradas e referidas em grande número de referências bibliográficas relacionadas com o tema dá-se maior relevo aos aspectos relacionados com as variáveis de ensaio.

4.5.12.1.1 Relação comprimento/diâmetro

Os valores relacionados com a esbelteza da amostra foram base de inúmeros ensaios que se traduziram pela adopção de coeficientes de correcção, que se aplicam

aquando da realização do ensaio. Na Tabela 4.7 são apresentados os factores de correcção, de acordo com as Normas ASTM e BS.

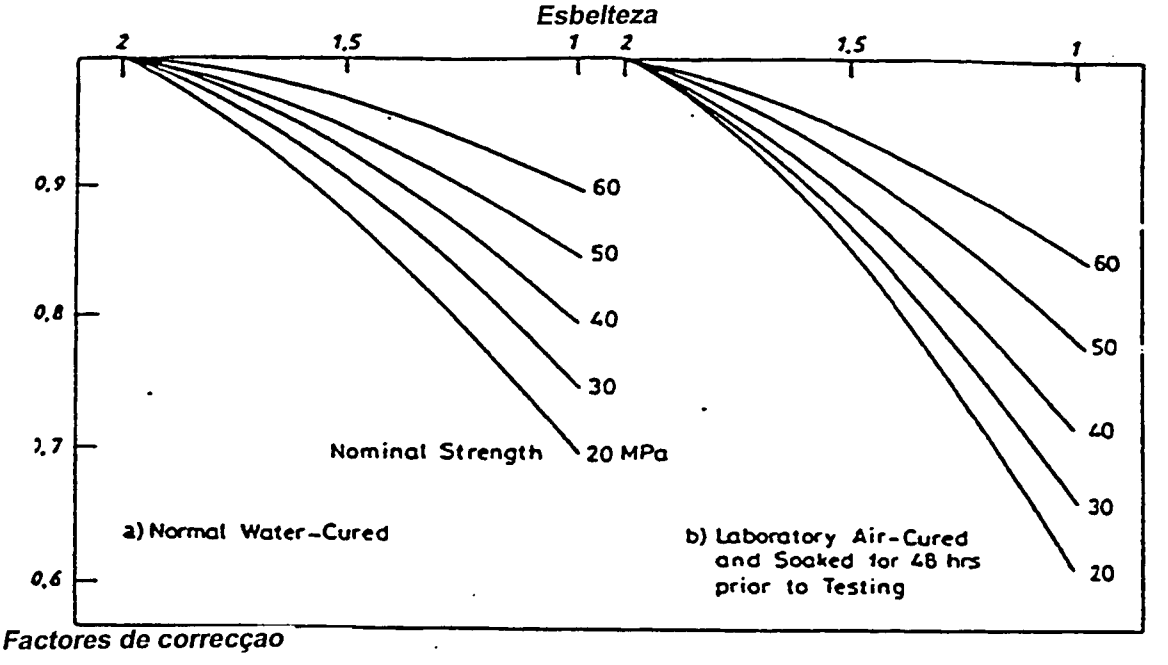


Figura 4.55 - Factores de correlação de esbelteza [74]

Tabela 4.7 - Factores de correcção por esbelteza em amostras cilíndrica [74]

Esbelteza	Factores de correcção	
	ASTM C 42	BS 1881
2,00	1,00	1,00
1,75	0,98	0,97
1,50	0,96	0,92
1,25	0,93	0,87
1,00	0,87	0,80

4.5.12.1.2 Presença de armaduras na amostra

Os estudos realizados demonstram que a presença de armaduras nas amostras de teste influenciam os resultados. A Norma Espanhola UNE 83.302-84, refere que se deve eliminar a zona das amostras que contenham armaduras transversais ao seu eixo. Sempre que a mostra resultante tenha uma esbelteza superior a um.

As Normas BS também referem esta influência, indicando como se deve quantificar a presença de armadura transversal e a sua posição na amostra.

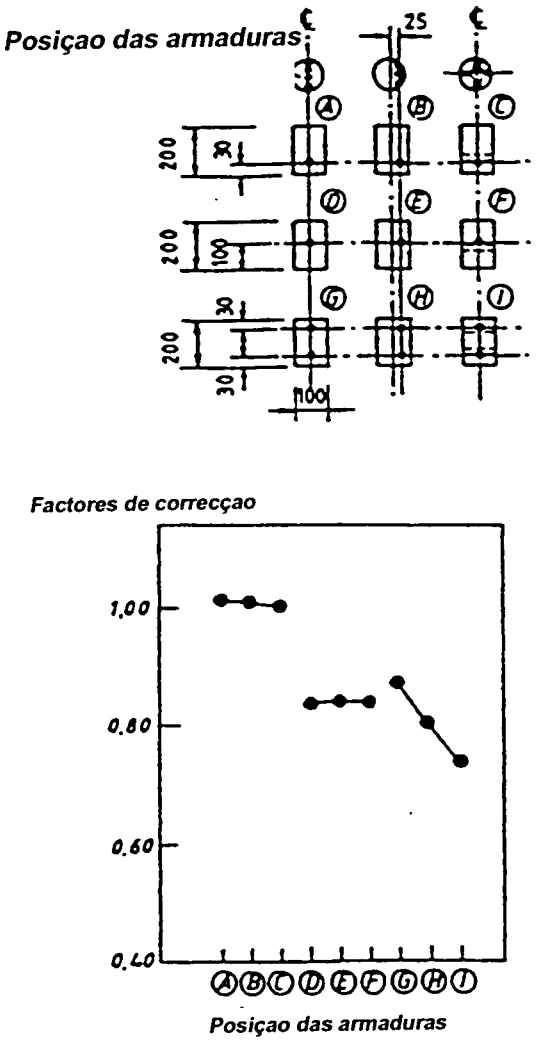


Figura 4.56 - Relação entre a posição das armaduras numa amostra e a resistência à compressão relativa [74]

4.5.12.1.3 Tipo de elemento estrutural e localização da amostra na peça

Os resultados obtidos neste ensaio são influenciados pela zona onde se vai localizar o ensaio, nomeadamente tendo em atenção as tensões instaladas na peça. As Normas ASTM e BS contemplam quer a fase preparatória do ensaio quer a interpretação dos resultados.

4.5.12.1.4 Influencia do diâmetro da amostra

As Normas internacionais recomendam diâmetros iguais ou superiores a 100 mm. No entanto, já se realizam ensaios com amostras de menor diâmetro: cerca de 50 mm, que apresentam algumas vantagens em relação às anteriores [74]:

- a utilização de equipamento de potência menor;
- por consequência, mais barato;
- menor possibilidade de cortar armaduras;
- o dano causado na estrutura é menor;
- mais fácil obter relação de esbelteza mais adequadas ao desenvolvimento do ensaio;

O valor da resistência que se obtém através das carotes com menor diâmetro, é idêntico às carotes de diâmetro superior a 100 mm . No entanto a dispersão de valores é muito maior, pelo que se aconselha a realização do triplo de amostragens [74].

4.5.13 Radar

A utilização do ensaio GPR (Ground Penetrating Radar) em elementos de betão armado é vasta. É um END eficaz na detecção de descontinuidades (vazios, fissuras, etc.) no interior dos elementos, para medir a espessuras dos elementos e na localização de armaduras, por exemplo.

Este ensaio encontra-se descrito na secção 3.4.3 desta tese.

Em inspecções a elementos de betão armado é aconselhável o uso de antenas de alta resolução, por forma a detectar descontinuidades de pequena dimensão.

Figura 4.57 - Equipamento utilizado no ensaio GPR [adapt. www.bakertesting.com]

Na interpretação dos resultados devem ser tios em consideração os seguintes factores:

- as formas hiperbólicas representam pontos de reflexão (armaduras, por exemplo);
- não se consegue determinar o diâmetro das armaduras;
- a velocidade das ondas electromagnéticas diminuem em elementos com teor de humidade mais elevado;

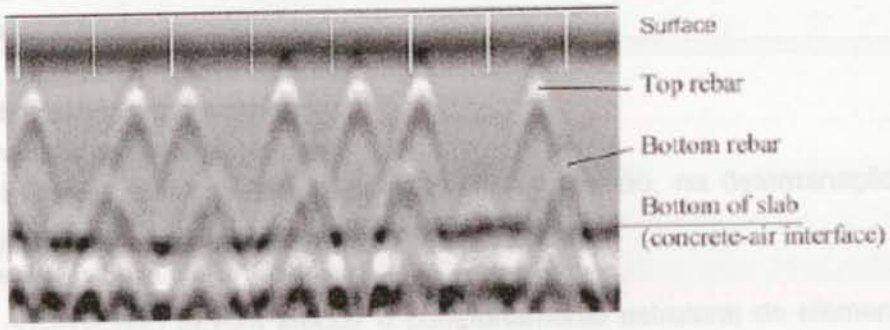


Figura 4.58 - Imagem obtida na realização de um ensaio GPR [adapt. www.bakertesting.com]

As principais vantagens e desvantagens do GPR estão resumidas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Vantagens e desvantagens do GPR [23]

Vantagens	Desvantagens
- As antenas de radar não contactam com a superfície de teste, o que permite uma pesquisa mais elevada. - Sensível à presença de armaduras e metais embebidas. - Facilidade em penetrar nas interfaces do betão / ar. - Sensível à presença de humidade.	- A região pesquisada está restrita ao volume em forma de cone, situado por debaixo da antena. - Grande número de armaduras leva à impossibilidade de análise dos defeitos situados por debaixo da dita camada. - A localização de fissuras e delaminações não é fácil, a menos que a presença de humidade se faça sentir. - Impulsos, a partir de antenas de grande resolução, estão limitados a profundidades de penetração de 400 a 750 mm. - O comportamento dos impulsos electromagnéticos, através de estruturas de betão armado, ainda não está suficientemente desenvolvido. - È necessária muita experiência dos operadores para lidar com o equipamento e para interpretar os resultados do ensaio. - Grande volume de informação, obtida durante a pesquisa.

4.5.14 Métodos combinados

A utilização de métodos de ensaio combinados representa um potencial aumento no nível de precisão que se obtém na realização de ensaios *in situ*, em relação aos métodos utilizados de forma isolada. Normalmente utiliza-se a combinação de métodos quando se pretende determinar a resistência in situ de elementos de betão.

A Norma RILEM NDT 4 [78], enumera algumas das combinações em que se utilizam dois ou mais métodos, nas quais se detectou um ganho de eficácia nos resultados obtidos:

- ultra-som + esclerómetro
- ultra-som + pull-out
- ultra-som + maturidade
- esclerómetro + pull-out

- esclerómetro + maturidade
- ultra-som + esclerómetro + pull-out

A mesma norma refere alguns pressupostos de ensaio, a ter em consideração de modo a que o recurso à combinação de métodos seja vantajosa:

- cada método deve fornecer informação sobre diferentes propriedades que influenciam a resistência do betão;
- cada método deve estar apto à realização de ensaios em elementos com tamanho e formas diferentes;
- os ensaios devem ser rápidos;
- os métodos devem ter o mesmo nível de precisão, na determinação da resistência;
- os ensaios não devem afectar o comportamento estrutural do elemento a ser ensaiado.

De entre as combinações de métodos atrás citados, aquela que é mais utilizada, inclusive é citada em algumas Normas Europeias, é o método que combina os ultra-sons com o esclerómetro.

Ao utilizarem-se os dois métodos, consegue-se um aumento de precisão, pois alguns dos factores que influenciam os resultados individualmente (como a humidade no caso dos ensaios por ultra-sons) podem ser minimizados com a sua combinação.

Segundo o RILEM NDT 4, para determinar as curvas com a mesma resistência devem ser avaliados os seguintes parâmetros:

- quantidade de água na mistura;
- grau de compactação;
- idade do betão (3 a 90 dias);
- condições de cura;
- proporção de inertes miúdos;
- teor de cimento.

Utilizando uma regressão linear múltipla na análise de resultados, consegue-se diminuir o erro da estimativa.

Os dados podem ser representados graficamente, com a velocidade de propagação de ultra-sons na abcissa e o índice esclerométrico na ordenada, ou vice-versa.

Ambos os métodos são não destrutivos e de execução rápida.

4.5.15 Outros Métodos

Como já foi referido ao longo desta dissertação, existem inúmeros ensaios aptos a avaliar estruturas de betão armado. E dentro de cada método/Ensaio existem diferentes procedimentos e técnicas que quase que constituem métodos diferentes de inspecção. Os métodos expostos neste Capítulo são aqueles que são mais utilizados no nosso país e a nível Internacional. Dos que não estão aqui mencionados faz-se referência a alguns no Capítulo 3. De qualquer modo muitos outros poderiam ter sido mencionados, mas devido ao carácter abrangente desta tese não foi possível incluí-los.

4.6 Planear e Realizar Inspecções com recurso a Ensaios Não Destrutivos e Ensaios Semi-Destrutivos

4.6.1 Introdução

Na secção anterior, procedeu-se à revisão dos métodos de END, citando os fundamentos e procedimentos principais, realçando-se as vantagens e desvantagens da sua utilização na avaliação de estruturas de betão simples e de betão armado. No entanto, a lista de métodos disponíveis para determinar as propriedades estruturais do betão ou para determinar o seu estado, pode, facilmente ser incrementada. A escolha, por vezes difícil, deve ser feita com base na confiança, simplicidade, precisão e custo final da inspecção.

Nesta secção, serão referenciados métodos "principais" e métodos "secundários" para a determinação de propriedades específicas ou para avaliar condições particulares dos elementos alvos de ensaio. Considera-se como "principal" o método mais indicado para atingir um determinado objectivo. O método "secundário" é aquele que, normalmente, requer um elevado grau de experiência do operador para ser realizado, sendo menos preciso, menos confiável e menos rápido. O método escolhido deve seguir a linha dos objectivos da avaliação. Os métodos END podem ser ferramentas valiosas na inspecção de um edifício, mas pode suceder que uma determinada tecnologia empregue, se revele como não sendo a mais prática ou até a que fornece resultados mais fáceis de aplicar. Muitas vezes, a metodologia mais eficaz é a combinação de técnicas não destrutivas, para obter, em conjunto, uma informação mais completa do que se pretende.

4.6.2 Relação dos END utilizados em elementos estruturais de betão armado e sua aplicação

Nos pontos seguintes apresentam-se tabelas com a relação dos ensaios, principais e secundários, indicados para a inspecção de cada uma das propriedades e parâmetros referidos.

4.6.2.1 Métodos utilizados na determinação de Propriedades do Betão

O Quadro 4.16 sumaria os métodos END mais utilizados na determinação das propriedades materiais de elementos de betão. Alguns desses métodos necessitam da extracção de carotes ou de outro tipo de amostras, para ensaios laboratoriais, por forma a estabelecer correlações entre a propriedade desejada e os resultados obtidos

através dos END. Alguns desses métodos podem ainda ser indicados para a preparação das amostras de laboratório ou para a validação dos ensaios *in situ*. Quando apropriado, são indicadas as normas ou outros documentos relevantes para a execução e percepção dos métodos.

Quadro 4.17 - Ensaios Não Destrutivos para a determinação das propriedades materiais do betão, em construções existentes [23]

Propriedades	Métodos possíveis		Comentários
	Principais	Secundários	
Resistência à compressão	Extracção de carotes (ASTM C 42 e C 39)	Resistência à penetração (ASTM C 803) Ensaio Pull-Out	Resistência do betão *in situ*; comparação da resistência em locais diversos; o ensaio pull-out ainda não está normalizado pela ASTM.
Resistência, relativa, à compressão	Esclerómetro (ASTM C 805) Velocidade de impulso ultra-sónico (ASTM C 597)		O ensaio com o esclerómetro é influenciado pelas propriedades da camada superficial: O ensaio da velocidade de impulso ultra-sónico indica um valor médio, obtido pelo percurso da onda através da espessura.
Resistência à tracção	Fragmentação da carote por força de tracção (ASTM C 496)	Ensaio Pull-Off (ACI 503R; BS 1881: Part. 207)	Avaliação da resistência à tracção do betão.
Densidade	Gravidade específica das amostras (ASTM C 642)	Métodos nucleares	
Teor de humidade	Medidores de humidade	Métodos nucleares	
Módulo de elasticidade estático	Ensaio à compressão das carotes (ASTM C 469)		
Módulo de elasticidade dinâmico	Teste de ressonância magnética em amostras (ASTM C 215)	Velocidade de impulso ultra-sónico (ASTM C 597) Impacto - Eco Análise espectral de ondas de superfície (SASW)	Necessita do.conhecimento, quer da densidade quer do coeficiente de Poisson. O módulo de elasticidade dinâmico, geralmente, é maior que o módulo de elasticidade estático.
Contracção/ expansão	Alteração do comprimento de amostras (ASTM C 341)		Medição da alteração do incremento potencial do comprimento.

Resistência à penetração de cloretos	Teste do reservatório a 90 dias 90-day ponding test (AASHTO T 259)	Indicação eléctrica da facilidade do betão resistir à penetração de iões cloretos (ASTM C 1202)	Determina a possibilidade de intrusão de iões cloreto; avaliação da eficácia dos vedantes químicos, membranas e camadas de protecção.
Teor de ar, teor de cimento e propriedades dos inertes	Exame petrográfico de amostras de betão, retiradas da estrutura (ASTM C 856 e ASTM C 457) Conteúdo de cimento (ASTM C 1084)	Exame petrográfico dos agregados (ASTM C 294, C 295)	Ajuda na determinação das causas de do danos; grau dos danos; qualidade do betão.
Reactividade alcali-sílica	Teste Cornell/SHRP (SHRP-C-315)		Confirma, *in situ*, se a deterioração observada é devida à reactividade alcali-sílica
Carbonatação, pH	Fenolftaleína (indicação qualitativa) Medidor de pH	Outros indicadores de pH (por exemplo, papel de tornesol)	Avalia a protecção à corrosão de um betão com susceptibilidade de corrosão de armaduras; determina a profundidade de carbonatação.
Danos de incêndio	Petrografia; Esclerómetro (ASTM C 805)	SASW; Velocidade de impulso ultra-sónico (ASTM C 597); Impacto - Eco; Impulso - Resposta	O ensaio com esclerómetro permite a demarcação da superfície danificada.
Danos devido ao gelo / degelo	Petrografia	SASW; Impulso - Resposta	
Teor de iões cloreto	Ácido solúvel (ASTM C 1152) Água solúvel (ASTM C 1218)	Amostra específica de ião (SHRP-S-328)	A entrada de cloretos aumenta a susceptibilidade da corrosão nas armaduras.
Permeabilidade ao ar	Método SHRP, de fluxo de ar à superfície (SHRP-S-329)		Mede, *in situ*, o índice de permeabilidade na camada superficial do betão (15 mm).
Resistividade do betão	Resistividade do betão, através de quatro eléctrodos em linha	Método, SHRP, de resistência superficial (SHRP-S-327)	A resistividade é útil na avaliação da eficácia das misturas e da inclusão de aditivos no betão; o método SHRP é útil para avaliar a eficácia de vedantes.

4.6.2.2 Métodos utilizados na determinação do Estado e das Propriedades Estruturais

O Quadro 4.18 resume os métodos END seleccionados, que podem ser utilizados na determinação das condições e das propriedades estruturais de elementos de betão. A informação obtida a partir deste tipo de testes é importante para avaliar a integridade de uma estrutura de betão. Tal informação pode ser utilizada para determinar o tempo de serviço que possui a dita estrutura, bem como para desenvolver estratégias de reparação e reforço.

Quadro 4.18 - Métodos de END utilizados para a determinação e avaliação das propriedades estruturais do betão [23]

Propriedade/ Avaliação	Método		Comentário
	Principais	Secundários	
Localização de armaduras	Pacómetro GPR (ASTM D 4748)	Radiografia por raios X	Localização das armaduras e sua disposição; determinação da espessura de recobrimento.
Espessura do elemento de betão	Impacto - Eco GPR (ASTM D 4748)	Ensaios intrusivos	Verificação da espessura do betão; permite a realização do cálculo estrutural, com valores correctos; o método Impacto - Eco requer o conhecimento da velocidade de onda e o GPR da constante dieléctrica.
Redução da área de aço	Medidor da espessura por ultra-sons (requer o contacto directo com a armadura)	Ensaios intrusivos Radiografia	Observa e mede e ferrugem e a área reduzida da armadura; observa a corrosão de componentes do pré-esforço, embebidos; localiza e verifica a extensão da deterioração; permite a realização do cálculo estrutural, com valores correctos.
Comportamento e Resistência local e global	Ensaios de carga Medição de tensões e deformações	Medição de acelerações, tensões e deslocamentos	Averigua a condição da estrutura sem executar o reforço ou reparação da mesma; determina, com eficácia, a capacidade de carga da estrutura.
Potencial de corrosão	Potencial de Meia-Célula (ASTM C 876)		Identifica e localiza a corrosão activa das armaduras.

Grau de corrosão	Polarização linear (SHRP-S-324 e S-330)		Grau de corrosão das armaduras; é influenciado pelas condições ambientais.
Localização de delaminações, vazios, e outros defeitos internos	Impacto - Eco Termografia por infravermelhos (ASTM D 4788) Impulso - Resposta Radiografia ·GPR	Auscultação (ASTM D 4580); Impulso-Eco; SASW, perfuração intrusiva e buroscópio	Avaliação da redução das propriedades estruturais; localização e extensão dos defeitos e danos internos; a auscultação está limitada às delaminações superficiais.

4.6.2.3 Métodos utilizados na Avaliação de Reparações

O Quadro 4.19 resume os métodos END úteis na avaliação da eficácia de reparações. Este tipo de testes são importantes para garantir a qualidade dos projectos de reparação. Em alguns casos, os resultados destes ensaios podem ser utilizados para a efectivação de pagamentos de empreitadas.

Quadro 4.19 - Métodos de END utilizados na avaliação de reparações [23]

Propriedade/Avaliação	**Método**		**Comentário**
	Principais	**Secundários**	
Resistência do reforço	Teste Pull-Off (ACI 503R); CAN/CSA A23.2-6B; BS 1881: Part 207		
Qualidade do reforço (ausência de vazios na interface)	Teste Pull-Off (ACI 503R); CAN/CSA A23.2-6B; BS 1881: Part 207	Impacto-Eco; SASW; Impulso - Resposta	O método SASW é recomendado para estruturas com diversas camadas.
Injecção de fendas ou vazios	Velocidade de impulso ultra-sónico; Impacto-Eco	SASW	Nos ensaios por velocidade de impulso ultra-sónico é necessário uma geometria apropriada.

4.6.2.4 Quantidade de Testes

O programa de ensaios *in situ* de uma estrutura existente, envolve duas fases. Na primeira, deve ser estabelecida a curva de correlação entre os parâmetros obtidos no ensaio com a resistência do betão, através do ensaio com carotes e medindo os

parâmetros correspondentes. A localização dos pontos para a realização dos ensaios de correlação, deve ser escolhida por forma a fornecer um vasto campo de conhecimento sobre a resistência do betão. Um mínimo de seis a nove locais de ensaio devem ser escolhidos, para se obterem os resultados de correlação. Em geral, a extracção das carotes deve ser efectuada após a realização os ensaios *in situ*. Em cada local devem ser extraídas duas carotes, sendo que o número de réplicas de ensaios *in situ* deve ser:

Tabela 4.9 - Número de réplicas em cada local de ensaio

Método de teste	Réplicas em cada local de ensaio
Esclerómetro	10
Penetração da amostra	3
Break-off	5
Velocidade de impulso Ultra-sónico	5

Estes valores são baseados em considerações sobre a variabilidade do método e do custo dos ensaios adicionais. Por exemplo, o custo da repetição do teste de velocidade de impulso ultra-sónico é baixo, assim como o custo das leituras das réplicas, no mesmo local, também é baixo. Por isso, são recomendadas cinco leituras de réplica para nos assegurarmos que se obtém um valor representativo, devido à variação na eficiência de acoplagem do transdutor na estrutura.

A segunda fase do programa de ensaios envolve a realização dos testes *in situ* noutros locais e a estimativa da resistência à compressão, com base nas relações de resistência. O número de locais de teste, nesta fase, depende de vários factores. Primeiro, temos factores estatísticos. De acordo com os princípios referidos na norma ASTM E 122, o número de testes depende da variabilidade da resistência do betão, da margem de erro entre o valor correcto e a média da sondagem e do grau de risco aceitável para que o erro o ultrapasse. Para um dado erro e nível de risco, o número de testes aumenta com a raiz quadrada da variabilidade (ASTM E 122).

Razões económicas também influenciam o plano de teste. Para alguns casos, o custo de uma investigação extensiva, está relacionado com o aumento do desempenho dos ensaios, um alto grau de confiança é considerado como um prémio. A selecção de um plano de ensaios, envolve uma solução de compromisso entre os aspectos económicos e o grau de confiança desejado.

Estes factores de decisão serão referidos, com mais pormenor, nos pontos seguintes.

Tabela 4.10 - Limites de resistência para os métodos de teste *in situ* [79]

Método de teste	Campo de tensões (Mpa)
Esclerómetro	10 - 40
Resistência à penetração (sonda)	10 - 40
Resistência à penetração (pino)	3 - 30
Pull-Out	2 - 130[1]
Velocidade de impulso ultra-sónico	1 - 70
Tracção por flexão	3 - 50
Maturidade	Sem limite

Podem ser ensaiadas tensões maiores, se os resultados obtidos do método de teste e o seu equipamento oferecerem confiança.

[1] - Para tensões superiores a 55 Mpa, deve ser utilizado um equipamento especial, para extrair as peças incrustadas no betão.

Tabela 4.11 - Recomendações para lajes, paredes e núcleos de betão armado [79]

Método de teste	Número de locais de ensaio necessário		Número mínimo de locais de ensaio necessário	
	Primeiros 75 m³	Em cada 15 m³, adicionais	Primeiros 75 m³	Em cada 15 m³, adicionais
Esclerómetro	20	2	10	1
Resistência à penetração (sonda)	8	1	6	1
Resistência à penetração (pino)	15	2	10	1
Pull-Out	15	2	10	1
Velocidade de impulso ultra-sónico	15	2	10	1
Tracção por flexão	10	2	8	1
Maturidade	5	2	5	1

[1] - Apenas para as lajes

Tabela 4.12 - Recomendações outras paredes, por cada 150 m³ [79]

Método de teste	Número de locais de ensaio necessário		Número mínimo de locais de ensaio necessário	
	Com espessura menor do que 300 mm	Com espessura de 300 mm, ou mais	Com espessura menor do que 300 mm	Com espessura de 300 mm, ou mais
Esclerómetro	20 - 25	15 - 20	10	8
Resistência à penetração (sonda)	8 -10	6 - 8	8	6
Resistência à penetração (pino)	10 - 15	8 - 12	10	8
Pull-Out	10 - 15	8 - 12	10	8
Velocidade de impulso ultra-sónico	10 - 15	8 - 12	10	8
Tracção por flexãof	10 - 12	8 - 12	10	8
Maturidade	5	5	5	5

Tabela 4.13 - Recomendações pilares individuais [79] *

Método de teste	Número de locais de ensaio necessário	Número mínimo de locais de ensaio necessário
Esclerómetro	5 - 8	5
Resistência à penetração (sonda)	5 - 8	5
Resistência à penetração (pino)	5 - 8	5
Pull-Out	5 - 8	6
Velocidade de impulso ultra-sónico	5 - 8	6
Tracção por flexão	5 - 8	6
Maturidade	5	5

* Estes números são baseados na suposição de que existem, pelo menos 6 a 10 pilares em cada área de teste, e que cada pilar contém cerca de 1 m³ de betão. Para pilares maiores, e para áreas de teste com mais de 10 pilares, devem ser necessárias mais localizações.

Tabela 4.14 - Número de repetições, por cada local de ensaio [79]

Método de teste	Número de determinações individuais por local de teste
Esclerómetro	10
Resistência à penetração (sonda)	3
Resistência à penetração (pino)	6
Pull-Out	1
Velocidade de impulso ultra-sónico	2
Tracção por flexãof	1
Maturidade	1

4.6.3 Qualificação de pessoal técnico

Na maior parte das técnicas de END descritas neste trabalho, a inspecção consiste na determinação de uma dada propriedade do betão ou na determinação de alterações nessa propriedade devido à presença de defeitos ou descontinuidades. A partir dessa informação, o investigador analisa a natureza e a gravidade desse defeito Por isso, a obtenção de resultados credíveis envolve o diagnóstico, por vezes difícil, por parte do dito investigador, suportado por pequenas confirmações, obtidas pela extracção de carotes ou por outros tipos de exame. Esta análise deve ser feita por indivíduos que tenham conhecimento profundo sobre o método de END que está a utilizar, bem como experiência suficiente, quer do uso da tecnologia do método quer na investigação das estruturas, por forma a lhe permitir uma interpretação exacta dos resultados obtidos.

Em muitos casos, a investigação requer uma interpretação preliminar *in situ*, à medida que o ensaio é executado. Tal é necessário para permitir ao investigador o planeamento, envolvendo por vezes modificação, do plano de ensaios, com base nos resultados que estão a ser obtidos, de modo a obter dados precisos, nos locais apropriados. Por esta razão, o mais indicado é não delegar a investigação *in situ*, nem a aquisição de resultados a técnicos menos qualificados, a menos que o investigador chefe confie que os dados recolhidos, com a qualidade requerida, lhe permita chegar a conclusões credíveis.

4.6.4 Definição do objectivo da investigação

Após a selecção dos métodos de END mais apropriados, o passo seguinte é decidir qual o objectivo da investigação. Este é um dos aspectos mais difíceis no processo de

investigação. A situação ideal era efectuar os testes suficientes, de modo a termos um alto grau de certeza, para que sejam detectados os defeitos e anomalias mais significativos. Na maior parte dos casos, o incremento dos ensaios é limitado quer pelo orçamento disponível quer pelo tempo necessário à sua realização, pelo que o investigador terá de efectuar uma programação de ensaios, através da qual possa obter toda, ou a maior parte, da informação necessária. A experiência do investigador é essencial para a programação e execução de um programa de testes. Deste modo, ele deve, não só estar a par das capacidades e limitações dos métodos escolhidos, mas também possuir bons conhecimentos sobre os métodos de construção, o comportamento estrutural e os mecanismos de deterioração dos materiais. O conhecimento dos métodos de construção ajuda a antecipar as localizações das possíveis anomalias internas. O conhecimento do comportamento estrutural é valioso na selecção das zonas da estrutura que são mais vulneráveis à presença dos defeitos. O conhecimento dos mecanismos de deterioração é fundamental para decidir que propriedades devem ser determinadas.

4.6.4.1 Considerações estatísticas

Devido à variedade de situações que podemos encontrar, é difícil definir um esquema simples que deva ser aplicado a todos os métodos de END e a todas as investigações. Técnicas globais, como a termografia por infravermelhos, podem ser utilizados para inspeccionar toda a superfície exposta de um elemento de betão. Outras técnicas de pesquisa, como o GPR, podem fornecer uma inspecção completa, ao longo de uma determinada linha de pesquisa. Ensaios locais a local, como o Impacto–Eco, fornecem informação no próprio local de ensaios. Outros ainda, como o ensaio Impulso–Resposta, fornecem informação de todo o elemento estrutural.

A norma ASTM Practice C 823 pode ser adaptada como um meio auxiliar no planeamento de um programa de ensaios. Pode-se dividir as situações de amostragem em duas categorias [23]:

- Quando as investigações preliminares, ou outras informações complementares, indicam que o estado da estrutura é homogéneo;

- Quando as investigações preliminares ou outras informações complementares, indicam que o estado da estrutura não é igual. A estrutura deve ser subdividida em lotes que possuam propriedades/parâmetros idênticas.

Para a primeira categoria, a localização dos pontos de amostragem deve ser feita ao acaso ou de forma sistemática, ao longo do elemento/estrutura a ensaiar. Segundo a norma ASTM C 823 "*qualquer método utilizado na determinação do local de amostragem, deve ser empregue, estabelecendo que essa localização seja realizada sem qualquer influência*". A intenção é seleccionar locais de amostragem por forma a que todos tenham a mesma probabilidade de serem escolhidos.

Para a segunda categoria, cada zona que aparente ter condições semelhantes deve ser inspeccionada de forma independente, a menos que os resultados do teste revelem diferenças pouco significativas.

Para testes realizados em locais onde se pretende encontrar danos internos, devem ser adoptados conceitos estatísticos de controlo de qualidade do ensaio, quando se está a seleccionar a dimensão de amostragem. Por exemplo, pode ser colocada uma grelha de pontos numa determinada superfície da estrutura. O seu espaçamento depende da dimensão mínima dos defeitos que o investigador pretende encontrar.

A escolha do número de amostras, baseada em princípios estatísticos, deve ser realizada de forma moderada, tendo em atenção o seu custo. A norma ASTM E 122 faz considerações em relação ao custo do ensaio: "*após ser determinado o tamanho de amostragem necessário à obtenção da precisão estipulada, o próximo passo é saber o custo necessário para proceder ao seu ensaio. Se for demasiado elevado, pode ser possível baixar a dita precisão (ou, do mesmo modo, aceitar o aumento de probabilidade de modo a que o erro da amostra possa exceder o máximo erro permitido, E) e reduzir o tamanho da amostra, para encontrarmos um custo aceitável*".

4.6.4.2 Considerações práticas

Para que um programa de inspecção, que inclua END, seja justificável, deve satisfazer grande parte das seguintes necessidades [23]:

- deve aproximar o seu custo, ao de um programa de ensaios intrusivos (ensaios destrutivos) único, para a mesma área ou volume;
- deve fornecer uma grande quantidade de resultados credíveis, e por isso, mais fáceis de obter;
- seja capaz de incluir zonas que sejam difíceis de ensaiar, quando se recorre a métodos destrutivos;

- os dados recolhidos devem ser reprodutíveis, de modo a que futuras inspecções à mesma estrutura possam ser feitas com confiança, utilizando os resultados dos END como base de referência.

4.6.5 Critério de custos

É desejável que a inspecção ao estado de uma estrutura produza a maior quantidade de informação, para um dado investimento. Com um orçamento limitado, o dono de obra é colocado perante um problema importante, que deve resolver cabal e rapidamente, com a mínima despesa. O investigador/inspector deve ser requisitado para pôr fim a este "conflito", pois, caso contrário, o projecto é muitas vezes abandonado.

Alguns problemas de cariz mais prático podem ser resolvidos com a combinação entre os testes intrusivos e os END. A inspecção ao estado de uma estrutura, recorrendo à observação visual, à amostragem intrusiva e a testes isolados, contando também com a experiência do técnico inspector na interpretação dos resultados, permite, de forma rápida, avaliar a dita estrutura. A extracção de um determinado número de carotes, acompanhada com os testes laboratoriais necessários, pode ser utilizada para estabelecer um custo preliminar de base à futura inspecção.

Com os END, a redução do número de carotes recolhidas, pode ser compensada com a realização de ensaios de superfície (termografia, por exemplo). Deste modo reduz-se a incerteza inerente à observação visual. A redução de amostras intrusivas, em conjunto com a rapidez de execução de grande parte dos END, mantém o custo da inspecção *in situ* a níveis razoáveis.

4.6.6 Densidade de resultados

O custo aqui discutido, implica que a inspecção não destrutiva forneça uma grande quantidade de resultados, quando comparados com a inspecção visual e com a inspecção intrusiva. Normalmente, quando se realizam inspecções/avaliações ao estado de uma determinada estrutura, com recurso a END, é necessário interpolar resultados entre dois locais de teste, pois, em grande parte dos procedimentos de ensaio não é praticável testar a totalidade da superfície de uma dada estrutura, devido a aspectos económicos e de tempo. A Tabela 4.15 indica exemplos de densidade de resultados (espaçamento entre locais de ensaio), em inspecções com END. O teste ideal é aquele apresenta espaçamentos entre pontos de ensaio que permitam obter uma avaliação estatisticamente válida, sobre o estado da estrutura de betão. Um teste

prático representa espaçamentos que permitam ter em conta uma boa relação entre o rigor estatístico e o seu custo.

Tabela 4.15 - Frequência de ensaio para alguns dos mais representativos END [23]

Método de teste	Densidade "ideal" de ensaio	Densidade "prática" de ensaio	Observações
Velocidade de impulso, por transmissão directa	Grelha de 0,3 a 0,6 m.	Grelha de 1,0 a 1,5 m.	Espaçamentos típicos para verificar a densidade de estruturas de betão e a presença de vazios.
Esclerómetro (um lado de uma parede ou laje)	Grelha de 0,3 a 0,6 m.	Grelha de 1,0 a 1,5 m.	Espaçamento utilizado para avaliar paredes danificadas por um incêndio.
Impulso - Resposta	Grelha de 1,5 m.	Grelha de 1,5 m por 3 para 1m.	Espaçamentos utilizados para avaliar chaminés industriais, torres de arrefecimento e silos.

Não se pode esquecer que diferentes técnicas de ensaio servem diferentes propósitos, e cada tipo de ensaio fornece uma determinada quantidade de informação, diferente, para a mesma área ou volume de betão ensaiado. Por exemplo, um ensaio Impacto-Eco numa laje de betão, com várias camadas de armaduras, fornece informação das alterações de propriedades, na interface de betão, somente sobre o local de teste. A interpretação sobre a continuidade das interfaces detectadas entre pontos de ensaio adjacentes é feita, de forma subjectiva, pelo investigador, utilizando para isso, o seu conhecimento acerca dos detalhes da laje, o historial da construção, bem como a sua experiência pessoal. Em contraponto, a inspecção com radar ao longo da superfície da mesma laje fornece uma imagem contínua da camada superior de armaduras, mas a informação acerca do estado da camada inferior da armadura é muito reduzida.

4.6.7 Áreas de difícil acesso

O acesso a estruturas de betão é, em muitos casos, difícil. Assim, a execução de programas de inspecção envolvendo a observação visual e testes intrusivos, pode ficar comprometida. De entre os exemplos de estruturas que apresentam tais dificuldades, cita-se:

- muros de retenção, lajes de fundação, ou qualquer elemento estrutural em que apenas um dos lados está acessível;
- fundações profundas (estacas, poços de fundação, muros Berlim, etc.), em que todo o elemento está enterrado;
- elementos de betão localizados em zonas perigosas, tais como tanques com desperdícios e centrais nucleares.

Nestes casos, os END são a única maneira, quer económica quer prática, viável de obter informação suficiente sobre o estado da estrutura.

4.6.8 Resultados de confiança e reprodutíveis

Os resultados obtidos pelos END devem ser fiáveis e reprodutíveis. Isto implica que [23]:

- Todos os locais de ensaio, na estrutura, devem ser facilmente identificáveis, quando realizados anteriormente, para que possam ser repetidos, se necessário, no mesmo local e em qualquer época;
- Os resultados de testes realizados numa inspecção preliminar, devem ser apresentados, gráfica e numericamente, de forma a que possam ser feitas comparações directas entre eles e posteriores ensaios. Isto pode ser facilitado pelo seu armazenamento digital.
- O investigador deve possuir a máxima confiança na reprodução de cada resultado obtido no ensaio.

4.6.9 Simulações numéricas e experimentais

Como já foi referido, muitos métodos utilizados nos END são baseados na interacção entre os vários tipos de ondas (choque, acústicas e electromagnéticas) é a estrutura interna do elemento alvo do ensaio. Para certas condições, essas interacções são relativamente simples, pelo que a interpretação dos resultados é fácil. Por exemplo, a delaminação em lajes e paredes podem ser facilmente detectadas utilizando o ensaio Impacto-Eco, bem como as armaduras, com espessura de recobrimento pequena e grande espaçamento entre si, são facilmente detectadas através de um pacómetro ou por GPR. No entanto, o investigador pode ser posto perante situações complexas, em que as respostas não são fáceis de prever. Nestes casos, o investigador deve

considerar a hipótese de ter de utilizar simulações numéricas ou experimentais, antes da investigação *in situ*.

Quando se fala em simulação numérica, refere-se à estimativa da resposta do elemento a um determinado tipo de ensaio. A simulação experimental refere-se à construção de modelos, ensaiando-os com os métodos de teste propostos. As simulações devem ter três objectivos principais:

- Estabelecer qual dos métodos disponíveis é capaz de detectar a anomalia que se pretende investigar;
- Estabelecer respostas "perfeitas" para utilizar como base de comparação com respostas "imperfeitas";
- Determinar a dimensão crítica a partir da qual a detecção de uma fenda se toma incerta.

Em complemento, a simulação numérica, em conjunto com as respostas obtidas, é útil para inferir o estado interno da estrutura. O ideal era determinar a resposta de um determinado END e utilizar um programa de computador para estimar o estado interno ou as propriedades materiais dos elementos de betão. Normalmente, isto não é possível. Por isso, o problema inverso é muitas vezes resolvido utilizando interacções. Determina-se a resposta teórica, para um determinado rol de condições, comparando-a com as respostas medidas.

4.6.10 Correlação com os testes intrusivos

Uma vez que os métodos dos END fornecem informação indirecta sobre o estado do objecto de teste, na maior parte das inspecções/avaliações, não é boa prática confiar apenas nos END. É necessário para realizar boas avaliações, obter um número mínimo de amostragens, recorrendo a testes intrusivos ou provetes. Tais técnicas intrusivas podem ter várias funções:

- Fornecer verificações para os resultados obtidos nos END;
- Ter acesso ao estado dos diversos locais de ensaio, previamente seleccionados, com a investigação através dos END; e
- Refinar a correlação entre os resultados dos END e o estado actual da estrutura.

Uma vez que os métodos utilizados nos END, que aqui foram relatados, muitas vezes são mal interpretados pelas pessoas que os requisitam, fornecer resultados de testes intrusivos através da amostragem e extracção de provetes, para comparar os resultados dos END, pode resultar num método eficiente para aumentar a confiança nesses mesmos resultados. Se as provas intrusivas não confirmarem os resultados dos END, essa informação deve, também, ser sustentada, no sentido de ajudar a explicar as limitações inerentes a um determinado método. A extracção de provetes aumenta o custo da investigação, mas tal é necessário quando se está perante inspecções difíceis.

A confirmação dos resultados provenientes dos END como um instrumento de rotina, é necessária para se garantir a consistência e a veracidade dos ensaios. O ideal era que a selecção das provas intrusivas fosse baseada num determinado tamanho de amostragem. Esse tamanho devia ser suficiente para fornecer medições pré-determinadas de boa confiança. No mínimo, recomenda-se que essa confirmação seja realizada em rotinas básicas, tais como, o ensaio diário de projectos em pequena escala, ou o ensaio semanal de projectos em larga escala.

Quando as amostras são necessárias para a realização de outros ensaios, elas devem ser obtidas por carotagem ou por serragem. Primeiro devem ser realizados os END e só depois deve ser seleccionado o local da extracção, após os resultados provenientes dos END serem alvo de análise preliminar. Se possível, as amostras devem ser extraídas dos locais onde as anomalias forem claramente detectadas, onde não há indícios da sua aparição e onde os resultados dos END foram inconclusivos.

Quando as amostras não forem solicitadas para ensaios adicionais, podem ser utilizadas outras provas intrusivas, tais como:

- A execução de um buraco e posterior inspecção com um buroscópio ou fibroscópio (ver inspecção visual);
- A colocação de água num buraco previamente executado, para fornecer informação sobre a dimensão relativa dos vasos comunicantes.

4.6.11 Apresentação de resultados

Durante a inspecção de uma determinada estrutura, realizada com recurso a END, podem ser adquiridos uma grande quantidade de dados. Um dos desafios que se apresentam ao investigador é o de seleccionar o formato de apresentação dos

resultados, de maneira a que eles possam ser percebidos por aqueles que tomam as decisões finais. Por outro lado, todos os resultados devem ser preservados e armazenados, de modo que possam, também, ser facilmente entendidos por outros. Estas questões são tanto mais importantes quanto se sabe o quanto importante é analisar o modo como o estado da estrutura se altera ao longo do tempo. Nestes casos é fundamental que os locais onde se efectuam os ensaios sejam documentados correctamente. É, pois, recomendado o uso de fotografias que complementem os registos escritos. Antes de se iniciarem as inspecções, o investigador deve saber, junto do dono de obra, qual o alcance dos resultados dos END. O formato final do relatório pode ter de ser alterado, por forma a ajustá-lo a possíveis modificações na investigação, devido a condições inesperadas.

A utilização de gráficos para resumir e reduzir os dados finais é um bom suplemento aos dados. Por exemplo, utilizam-se desenhos de contorno para resumir os resultados obtidos através dos métodos de ultra-som e da inspecção através do potencial de meia-célula. Em anexo podem ser apresentados todos os resultados obtidos. Em ensaios de larga escala, uma boa solução é o armazenamento de dados de forma electrónica.

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria

5. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria

5.1 Introdução

As paredes de alvenaria constituem, em conjunto com as construções em madeira, os sistemas de construção mais antigos, representando uma parte significativa do património edificado.

A inspecção, análise e reforço de estruturas de alvenaria são tarefas difíceis, devido à sua complexidade geométrica intrínseca, à heterogeneidade e variabilidade das propriedades dos seus materiais constituintes, ao escasso conhecimento sobre as técnicas construtivas originais (no caso de edifícios antigos), à difícil caracterização das acções e à quase inexistência de normas ou instruções específicas que salvaguardem os técnicos responsáveis. Acrescem a estes problemas, as restrições à inspecção e remoção de amostras em edifícios de elevado valor histórico, bem como, os custos elevados das tarefas de inspecção e diagnóstico, que conduzem, frequentemente, à recolha de informação muito reduzida sobre a composição construtiva interna dos elementos estruturais e sobre as propriedades dos materiais existentes.

Figura 5.1 – Representação esquemática da execução de uma parede de alvenaria

Em Portugal, a reabilitação de estruturas de alvenaria está ligada, em grande parte, aos monumentos e aos edifícios de valor patrimonial elevado, onde o DGMEN e o IPPAR, têm um papel relevante. De acordo com o Capítulo 1, esta tendência terá de ser invertida, através da recuperação dos centros históricos das cidades e vilas do nosso país, da transmissão eficaz dos conhecimentos e da abertura cada vez maior

por parte de todos, especialmente dos intervenientes ligados ao sector da construção, da problemática da reabilitação.

A conservação e restauro de edifícios existentes, nomeadamente os monumentos e as zonas históricas, urbanas ou rurais, são disciplinas que exigem formação específica. O rápido desenvolvimento dos materiais e técnicas de construção, que se afastaram da prática tradicional, e as descobertas científicas, que colocam novos métodos à disposição de todos aqueles que estão envolvidos nesta área, são aspectos decisivos na divisão entre a arte da construção e a ciência da reparação e restauro. Estes aspectos introduzem na conservação do património edificado uma dimensão e carácter próprios, sendo extraordinariamente difícil respeitá-lo sem formação e conhecimentos específicos. O conhecimento e a formação cobrem uma área abrangente, que muitas vezes não está incluída na formação tradicional oferecida a engenheiros e arquitectos, os profissionais mais envolvidos na conservação e reabilitação do património. Incluem-se, ainda, nesta disciplina, a arqueologia, a história da arquitectura e do urbanismo, o planeamento urbano, a forma estrutural da arquitectura e a utilização dos materiais tradicionais, o estudo dos seus mecanismos de deterioração e os métodos de consolidação ou substituição, e finalmente, a história da filosofia e ética da conservação.

A qualidade de uma intervenção assenta na integração dos conceitos descritos pelo coordenador da intervenção, que deverá possuir qualificações generalistas nas áreas descritas e a capacidade de se rodear de especialistas adequados, nos casos em que tal for necessário. Após a realização dos trabalhos e a decisão da intervenção apropriada ao caso em estudo, é essencial o planeamento adequado da intervenção que, necessariamente, se irá reflectir sobre o projecto e sobre as condições técnicas do caderno de encargos. A qualidade destes dois elementos baliza de imediato a qualidade da intervenção, sendo, infelizmente, corrente, que os problemas de execução sejam resolvidos em obra, por indivíduos com preparação técnica menos adequada.

A ideia que as construções que sobreviveram durante séculos sem danos, ou com danos menores, já demonstraram a sua segurança, parece receber uma aceitação generalizada. No entanto, existem inúmeras situações onde este raciocínio não é válido, porque a capacidade resistente da construção pode-se reduzir ao longo do tempo por diversas razões, entre as quais se salientam:

- a deterioração natural dos materiais;

- os danos sucessivos introduzidos por sismos anteriores, movimentos das fundações e acções de carácter repetitivo, como o vento e as variações de temperatura;

- as modificações na estrutura e materiais de construção, tais como a adição de novos corpos nos conjuntos monumentais, a ampliação de corpos existentes em planta e altura, a ligação de construções anteriormente independentes e a substituição de coberturas leves em madeira por coberturas com peso elevado.

Adicionalmente, é um facto bem conhecido, que os sistemas estruturais do património arquitectónico se foram desenvolvendo, ao longo dos tempos, tendo em vista soluções cada vez mais eficientes para resistir à acção do peso da estrutura, mediante um processo de aprendizagem baseado essencialmente nas lições dos erros anteriores. Esta aprendizagem não ocorreu necessariamente no que respeita às acções eventuais e à segurança sísmica. Em países onde a ocorrência de sismos é frequente, como no Japão, as lições fornecidas pelos danos dos sismos traduzem-se directamente em modificações da prática construtiva, que incorpora aspectos destinados a aumentar a resistência e estes eventos. Nos casos em que a existência de sismos destrutivos é esporádica, a modificação da prática construtiva é menos evidente ou duradoura. Este é o caso de Portugal continental, em que sismos fortes ocorrem cada dois séculos ou mais, e no intervalo entre estes grandes acontecimentos raras vezes acontecem sismos significativos. Em particular, a lição do terramoto de 1755 e a técnica construtiva anti-sísmica que se seguiu (*Construção Pombalina*) foram quase esquecidas, antes de volvido um século sobre este desastre.

Apesar disso, nos últimos anos tem-se verificado investimentos consideráveis nesta área, os quais têm resultado num desenvolvimento técnico-científico notável no âmbito da inspecção, das técnicas de ensaios não destrutivos, da monitorização e da análise estrutural. O estudo das construções de alvenaria (onde se incluem as construções históricas) deve ser desenvolvido com base na utilização adequada das modernas tecnologias, sendo o investigador responsável por escolher e gerir os meios técnicos e financeiros disponíveis para alcançar os elementos necessários e suficientes para o conhecimento sobre a construção, o seu comportamento estrutural e as suas necessidades reais de reparação.

De entre o conjunto de acções a desenvolver numa fase inicial do trabalho, encontram-se:

- análise histórica do edifício;
- história sismológica do local;
- sondagem geotécnica, poços e ensaios de placa;
- vectorização da fachada por fotogrametria;
- levantamento geométrico simplificado;
- levantamento fotográfico e gráfico das patologias encontradas;
- inspecção boroscópica da fachada.

Torna-se fundamental conhecer os métodos construtivos e os materiais empregues. As alvenarias foram evoluindo, deixaram de ser pesadas, de grande espessura e muito rígidas, passando a ser mais esbeltas e leves, com um processo de fabrico muito mais industrializado e com exigências funcionais muito mais elevadas (cite-se normas relacionadas com o conforto térmico e com os níveis acústicos, por exemplo).

5.2 O Elemento Estrutural Parede de Alvenaria

Por definição alvenaria é a "*arte de construir com pedra e cal*" e é "*uma associação de pedras que, ligadas por argamassa, formam uma construção*" (Dicionário de Língua Portuguesa).

Na bibliografia internacional as paredes de alvenaria são classificadas em seis categorias principais: alvenarias históricas, alvenarias não reforçadas, alvenarias confinadas, alvenarias reforçadas, alvenarias armadas e alvenarias pré-esforçadas. No nosso país o tipo de alvenarias mais comum é o das alvenarias não reforçadas, englobando-se nesta categoria as alvenarias históricas.

Assim, tendo em atenção o que foi dito, a classificação das paredes de alvenaria pode ser feita em função de vários parâmetros, tais como, a natureza, dimensão e grau de aparelho dos elementos de enchimento, do tipo de materiais utilizados e da possibilidade ou não de desempenho de funções estruturais [80].

No Quadro 5.1 surge a designação das paredes de alvenaria, em função da natureza e características dos materiais e dos ligantes.

Quadro 5.1 - Designação das paredes de alvenaria [80] e [81]

Designação	Natureza e características dos materiais e dos ligantes
Parede de cantaria	Pedras de cantaria com as faces devidamente aparelhadas, assentes em argamassa ou apenas justapostas.
Alvenaria de pedra aparelhada	Pedras irregulares aparelhadas numa das faces, assentes com argamassa ordinária.
Alvenaria ordinária (correntes)	Pedras toscas, irregulares em forma e dimensões, ligadas com argamassa ordinária.
Alvenaria hidráulica	Pedras ligadas com argamassa hidráulica.
Alvenaria refractária	Pedras ligadas com argamassa refractária.
Alvenaria de pedra seca	Pedras assentes por justaposição, apenas travadas entre si, sem qualquer tipo de argamassa.
Paredes mistas	Paredes de alvenaria e cantaria; de alvenaria e tijolo; de alvenaria com armação de madeira.
Alvenaria de tijolo	Paredes constituídas por tijolo.
Parede de adobe ou Parede de taipa	Paredes construídas com terra.

As paredes de alvenaria de edifícios podem ser divididas em dois grupos principais: as paredes mestras, também designadas por paredes resistentes, e as paredes divisórias ou de compartimentação.

Quadro 5.2 - Classificação das paredes de edifícios [80]

Designação	Função
Paredes mestras ou resistentes: - Interiores - de fachada - laterais	Paredes resistentes, interiores ou exteriores que apresentam, geralmente, grande espessura.
Paredes divisórias ou de compartimentação	Dividem o espaço delimitado pelas paredes mestras.

As paredes resistentes possuem grande espessura, chegando a atingir 0,5 a 1,5 metros. Esta espessura contribui, de forma significativa, para a estabilidade do edifício, uma vez que o seu peso elevado equilibra as eventuais forças horizontais provenientes de elementos estruturais como arcos e abóbadas, da acção do vento e da acção dos sismos. A sua espessura diminui, ainda, o risco de instabilidade à

encurvadura, por redução da esbelteza. São constituidas por materiais heterogéneos, e apresentam uma boa resistência à compressão e uma fraca resistência à flexão e à tracção.

As paredes divisórias ou de compartimentação também possuem uma função estrutural importante, pois ajudam a contraventar o edifício, quando este for sujeito a forças horizontais. Este travamento é materializado através das ligações entre a parede, os pavimentos e a cobertura. A tendência, ao longo do tempo de vida da estrutura, é que estas paredes passem a desempenhar funções resistentes, devido a reajustamentos e reordenamentos da estrutura global dos edifícios.

Dentro deste grupo de alvenarias saliente-se os tabiques, que não suportam cargas e apenas delimitam as divisões.

As paredes de alvenaria, no seu todo, possuem um bom comportamento quando solicitadas à compressão. O mesmo não se pode dizer quando são solicitadas à tracção, à flexão e ao corte.

O comportamento mecânico das paredes é condicionado pela heterogeneidade dos materiais utilizados na sua composição: blocos de pedra, tijolo, argamassa com diferentes propriedades físicas e mecânicas. No entanto, não só os componentes influenciam esse comportamento, mas pode-se referir também a influência:

- da geometria, da rugosidade superficial e da porosidade dos componentes;
- do índice de retracção, do poder de aderência e do poder de retenção de água da argamassa de assentamento;
- da esbelteza, do número e da disposição das paredes de contraventamento;
- das ligações entre paredes;
- do tamanho dos vãos de portas e janelas;
- do enfraquecimento da parede, provocado pela colocação de tubagens;
- da rigidez dos elementos de fundação e da geometria do edifício.

encurvadura, por redução da esbelteza. São constituidas por materiais heterogéneos, e apresentam uma boa resistência à compressão e uma fraca resistência à flexão e à tracção.

As paredes divisórias ou de compartimentação também possuem uma função estrutural importante, pois ajudam a contraventar o edifício, quando este for sujeito a forças horizontais. Este travamento é materializado através das ligações entre a parede, os pavimentos e a cobertura. A tendência, ao longo do tempo de vida da estrutura, é que estas paredes passem a desempenhar funções resistentes, devido a reajustamentos e reordenamentos da estrutura global dos edifícios.

Dentro deste grupo de alvenarias saliente-se os tabiques, que não suportam cargas e apenas delimitam as divisões.

As paredes de alvenaria, no seu todo, possuem um bom comportamento quando solicitadas à compressão. O mesmo não se pode dizer quando são solicitadas à tracção, à flexão e ao corte.

O comportamento mecânico das paredes é condicionado pela heterogeneidade dos materiais utilizados na sua composição: blocos de pedra, tijolo, argamassa com diferentes propriedades físicas e mecânicas. No entanto, não só os componentes influenciam esse comportamento, mas pode-se referir também a influência:

- da geometria, da rugosidade superficial e da porosidade dos componentes;
- do índice de retracção, do poder de aderência e do poder de retenção de água da argamassa de assentamento;
- da esbelteza, do número e da disposição das paredes de contraventamento;
- das ligações entre paredes;
- do tamanho dos vãos de portas e janelas;
- do enfraquecimento da parede, provocado pela colocação de tubagens;
- da rigidez dos elementos de fundação e da geometria do edifício.

5.2.1 Caracterização dos vários tipos de alvenaria

5.2.1.1 Paredes de cantaria

Considerada como a parede de alvenaria mais nobre, envolve o tratamento da pedra, tornando-a lisa ou trabalhada. Este facto resulta num aumento significativo de custos, devido ao material aplicado e à mão-de-obra especializada que é necessário contratar. Por isso as paredes de cantaria eram utilizadas sobretudo em edifícios relevantes como os monumentos e igrejas.

As pedras de cantaria são aparelhadas em todas as faces, excepto na face oposta ao paramento onde era aplicada.

Figura 5.2 - Igreja dos Grilos (Porto): Exemplo de parede de cantaria

O aparelho da pedra pode ser realizado de várias formas. A mais vulgar é o chamado aparelho regular, em que as pedras tinham dimensões fixas, com fiadas com a altura igual e com juntas verticais (em filas alternadas) em correspondência.

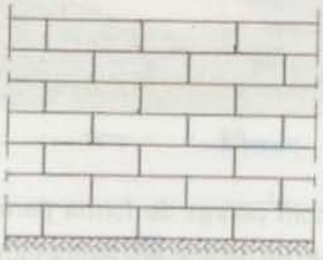


Figura 5.3 - Exemplo de aparelho regular [80]

As variantes surgem, sobretudo, alternando quer o comprimento quer as alturas das pedras.

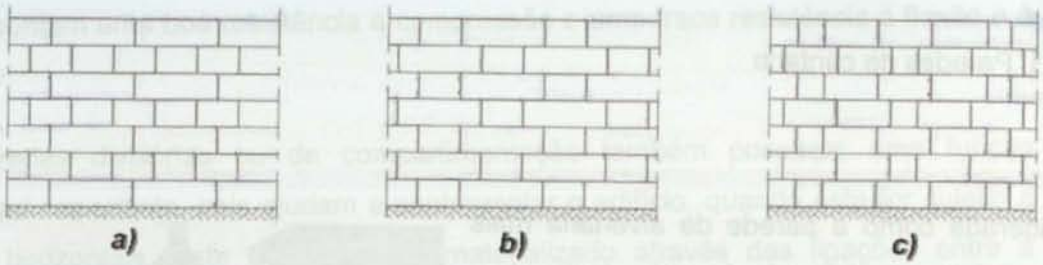


Figura 5.4 - Exemplo de variantes do aparelho regular: (a) Aparelho regular: perpianhos e placas; (b) e (c) idem, variante de perpianhos e placas [80]

Utilizam-se também cantarias nos cunhais de edifícios realizados com paredes de alvenaria e mistas, por forma a melhorar o travamento das paredes.

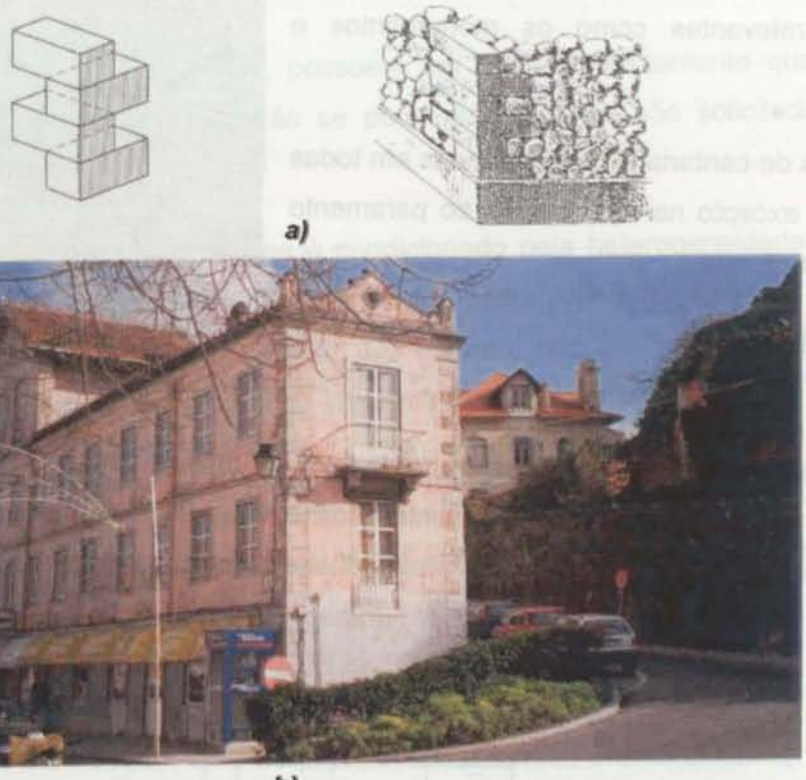


Figura 5.5 - Cunhais de cantaria, com pedras de forma paralelepipédica: (a) representação esquemática; (b) exemplo de edifício em Sintra [80]

A ligação das pedras é realizada com argamassa. No entanto, quando esta não tinha capacidade para garantir a ligação, recorria-se a cavilhas de pedra, de madeira ou metálicas ou recorria-se à fixação através de gatos de ferro.

5.2.1.2 Paredes de alvenaria ordinária

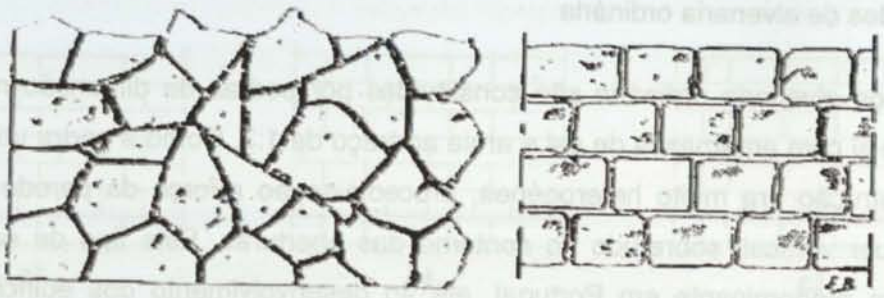
As paredes de alvenaria ordinária são constituídas por pedras de dimensão média, ligadas entre si com argamassa de cal e areia ao traço de 1:3. Como a pedra utilizada na sua construção era muito heterogénea, procedia-se ao reforço da parede, quer horizontal quer vertical, sobretudo no contorno das aberturas. Este tipo de solução estrutural era predominante em Portugal, até ao desenvolvimento dos edifícios de betão armado, a meio do sec. XX.

Figura 5.6 - Edifício realizado em alvenaria ordinária

Além dos edifícios de habitação, este tipo de estruturas era utilizado na construção de muros de vedação.

5.2.1.3 Paredes de alvenaria aparelhada

São caracterizadas pela selecção de pedras de maior rigidez e melhor aspecto que, devidamente aparelhada numa das faces, formavam uma parede com uma superfície praticamente plana. As suas arestas eram trabalhadas com argamassa hidráulica e com pedras pequenas.



a) b)

Figura 5.7 - Paredes de alvenaria aparelhada, representação esquemática: (a) aparelho rústico; (b) aparelho regular [80]

5.2.1.4 Paredes mistas

Há vários tipos de paredes mistas. Era comum a utilização de paredes mistas de cantaria e alvenaria, em que a cantaria era utilizada com dois fins distintos: para efeito decorativo ou para reforço da estrutura, nas zonas mais vulneráveis (por exemplo, nos cunhais e na ligação entre as paredes). A utilização de paredes mistas de alvenaria e tijolo também é usual, sobretudo após a sua aplicação na reconstrução da Baixa Pombalina de Lisboa, após o terramoto de 1755.

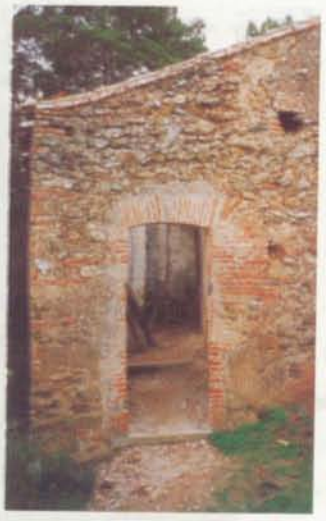


Figura 5.7 - Paredes de alvenaria mista: reforço de construção em alvenaria ordinária, junto a abertura [05]

A utilização de paredes mistas foi acompanhando a evolução das práticas construtivas ao longo dos tempos, ver Quadro 5.3, onde se resume a evolução dos sistemas estruturais, com incidência para a zona de Lisboa, apresentando as suas características construtivas principais (exceptuando os edifícios de betão armado).

Por ordem cronológica, após 1755, surgiram os edifícios *Pombalinos*, os edifícios *Gaioleiros*, que utilizavam como materiais estruturais a alvenaria e a madeira, e os edifícios *de placa*, em que a madeira foi substituída pelo betão (ver Figura 5.8).

Quadro 5.3 - Evolução dos vários sistemas estruturais na cidade de Lisboa [25]

Designação do Edifício, tendo em atenção a sua época de construção	Principais Materiais Estruturais	Características da construção
Anteriores a 1755 (1) e (2)	Alvenaria e madeira	Edifícios construídos com recurso a alvenaria ordinário (apenas os palácios e igrejas, eram construídos em cantaria), com reforço nas zonas de abertura e cunhais. Pavimentos de madeira. Edifícios em alvenaria de adobe e taipa.
Pombalinos **(entre 1755 e 1880) (3)**	Alvenaria e madeira	Estrutura de madeira tridimensional, formada por pórticos contraventados, perpendiculares entre si, com cruzes de Sto. André. As paredes de frontal eram constituídas por alvenaria rebocada. Pavimentos em madeira
Gaioleiros **(entre 1880 e 1940) (4)**	Alvenaria e madeira	A madeira começa a perder o seu papel como elemento estrutural. Progressiva eliminação das diagonais. Remoção das travessas intermédias e prumos mais espaçados. Substituição das paredes interiores por tabiques. Pavimentos em madeira.
De placa **(entre 1940 e 1960) (5)**	Alvenaria e betão	Características idênticas aos edifícios *Gaioleiros*. Substituição dos pavimentos em madeira por lajes finas de betão.
Após 1960 (6) e (7)	Betão armado	–

Nota: A numeração, (..), que acompanha a primeira coluna, serve para relacionar o Quadro 5.3 com a Figura 5.8.

Os edifícios *Pombalinos* caracterizavam-se pela estrutura tridimensional de madeira, designada por *gaiola Pombalina*, embebida nas paredes de alvenaria, constituídas por pedras de pequena dimensão e por elementos cerâmicos assentes com argamassa de cal e areia. As paredes exteriores, constituídas por alvenaria de pedra rebocada, com cerca de 0,5 metros de espessura, eram ligadas à estrutura de madeira por intermédio de peças metálicas pregadas na madeira e chumbadas na alvenaria.

Uma das características inovadoras deste sistema estrutural era a introdução de diagonais de contraventamento, realizadas em madeira, denominadas por "*Cruz de Santo André*".

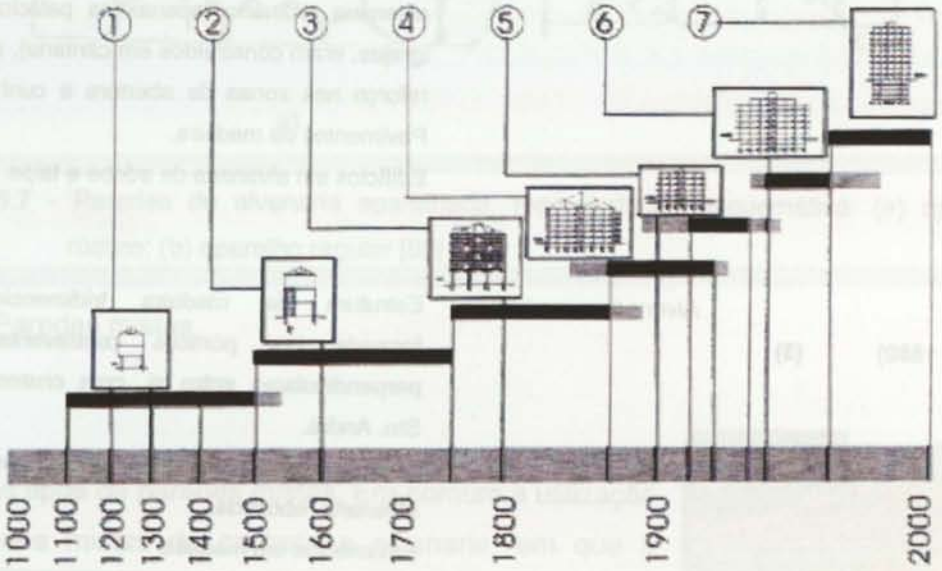


Figura 5.9 - Evolução dos sistemas estruturais correntes na cidade de Lisboa [82]

Nem todas as paredes eram realizadas neste sistema. Aquelas que só possuíam função de delimitação de espaços eram denominadas de *costaneiras* ou *tabiques*. Eram executadas com ripas de madeira pregadas a barrotes verticais, sendo posteriormente rebocadas.

a)

b)

Figuras 5.10 (a) e (b) - Elementos construtivos característicos dos Edifícios *Pombalinos*: Cruz de Sto. André e Paredes em Tabique [05] e [80]

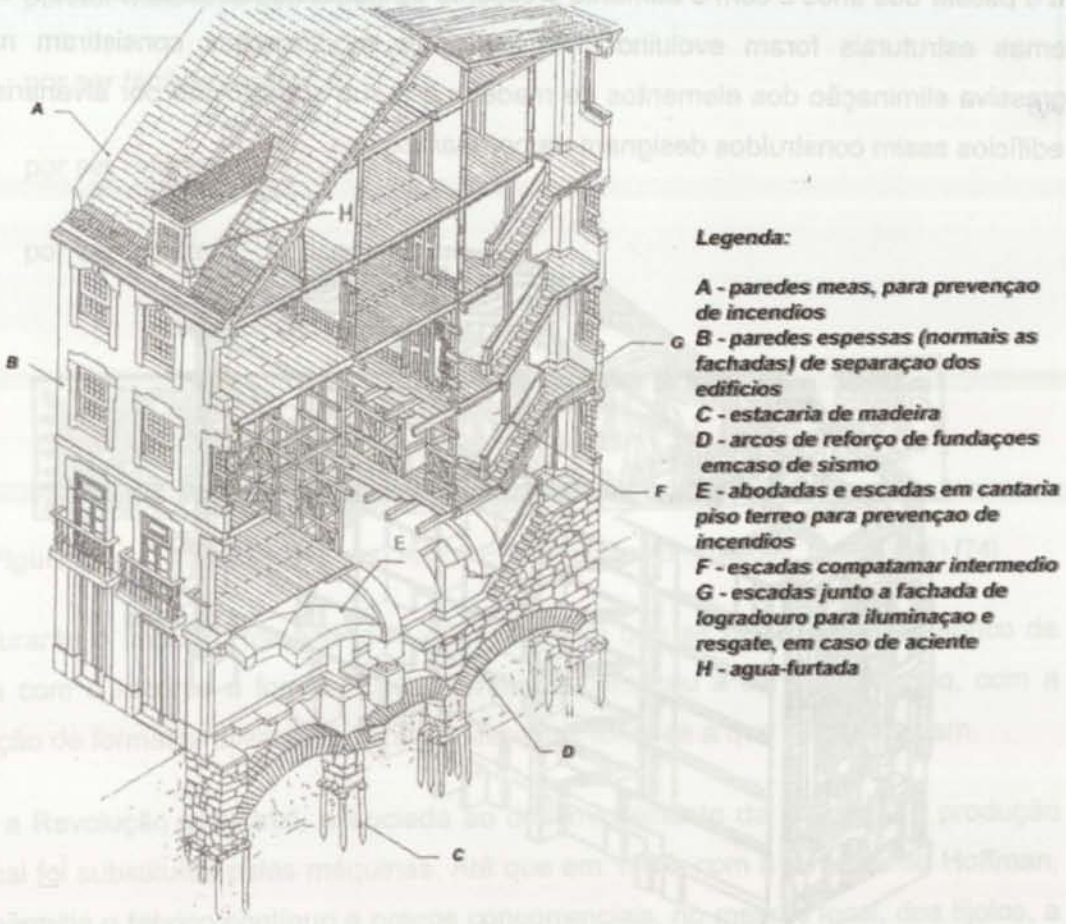


Figura 5.11 - Pormenor da Construção Típica de um Edifício *Pombalino* [80]

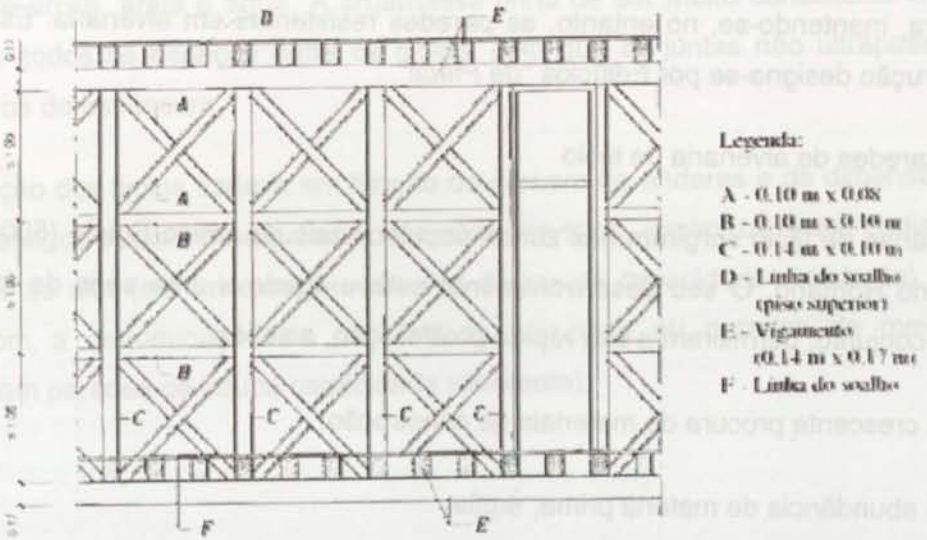


Figura 5.12 - Pormenor da estrutura de madeira da parede em gaiola [80]

Com o passar dos anos e com o aumento crescente da necessidade de construção, os sistemas estruturais foram evoluindo. As principais modificações consistiram na progressiva eliminação dos elementos de madeira e a sua substituição por alvenaria. Os edifícios assim construídos designam-se por *Gaioleiros*.

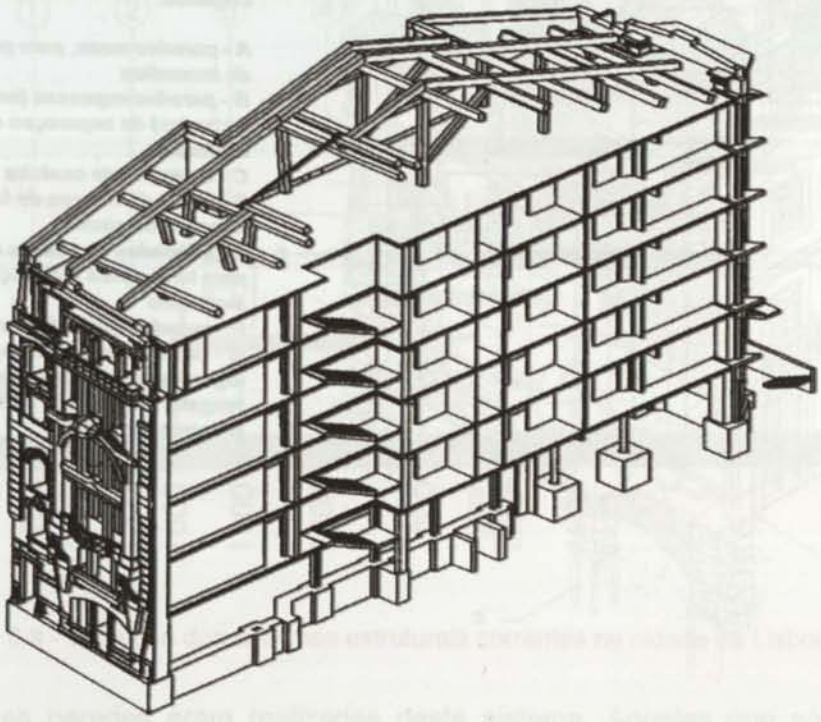


Figura 5.13 - Pormenor da estrutura dos Edifícios *Gaioleiros* [82]

Posteriormente, com a introdução do betão armado no nosso sistema construtivo, substitui-se os pavimentos de madeira por lajes de betão armado de pequena espessura, mantendo-se, no entanto, as paredes resistentes em alvenaria. Este tipo de construção designa-se por Edifícios "*de Placa*".

5.2.1.5 Paredes de alvenaria de tijolo

As alvenarias de tijolo surgiram nas zonas populacionais do antigo Egipto (500 AC) e do Império Romano. O seu desenvolvimento esteve ligado a uma série de factores que, em conjunto, permitiram a sua rápida proliferação, a saber:

- à crescente procura de materiais de construção;
- à abundância de matéria prima, argila;
- ao clima propício à sua secagem;

- por ser mais leve que a pedra;
- por ser fácil de moldar;
- por ser resistente ao fogo;
- por ser moldável.

Figura 5.14 - Fabrico de tijolos no Antigo Egipto (pintura em Thebes, c. 1500 AC) [74]

Foi durante o Império Romano (500 AC - 300 DC) que se desenvolveu o fabrico de tijolos com o recurso a fornos. O seu tamanho começou a ser normalizado, com a adopção de formatos diferentes para as diferentes funções a que se destinavam.

Com a Revolução Industrial, associada ao desenvolvimento da indústria, a produção manual foi substituída pelas máquinas. Até que em 1858, com a fornalha de Hoffman, que permitia o fabrico contínuo a preços concorrenciais, no mesmo local, dos tijolos, a industrialização do sector foi conseguida [74].

As paredes de alvenaria de tijolo eram realizadas com tijolo de burro ou furados, cozidos em fornos a uma temperatura de 900 ºC. A matéria-prima consistia numa mistura de argila, areia e água. A argamassa tinha de ser muito consistente e devia preencher todos os espaços entre os tijolos, pelo que as juntas não ultrapassavam 0,01 metros de espessura.

A disposição dos tijolos variava em função do número de andares e da dimensão dos edifícios antigos e, por consequência, dos vãos previstos. Assim, os tijolos podiam ser colocados ao alto (em tabiques ou paredes de pouca capacidade resistente) ou ao baixo, com a denominação de paredes de um pano ou paredes de meia vez (constituíam paredes de pouca capacidade resistente).

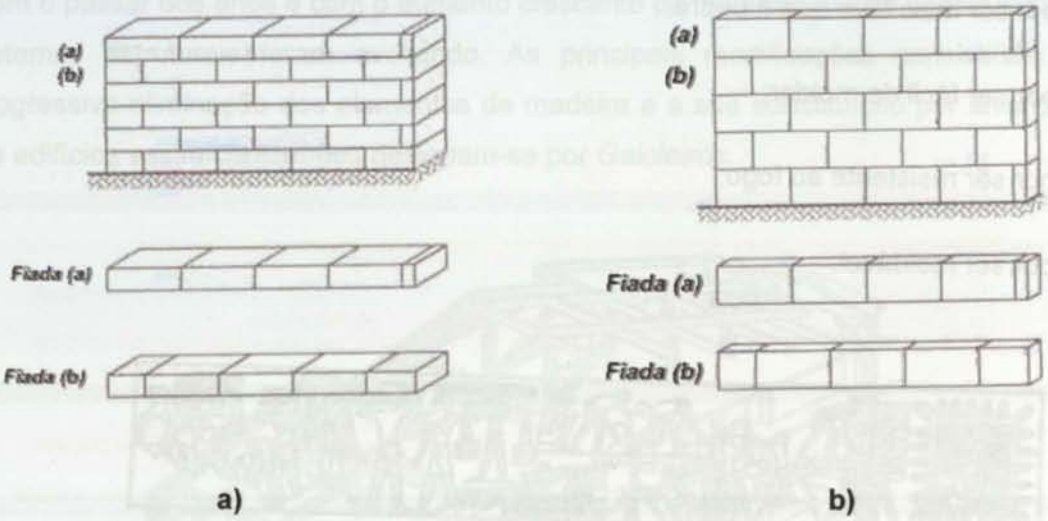


Figura 5.15 - (a) Pano de tijolo ao alto; (b) Pano de meia vez de tijolo [80]

Nas paredes com funções resistentes utilizavam-se associações de tijolos (paredes de uma vez e meia, duas vezes ou superior).

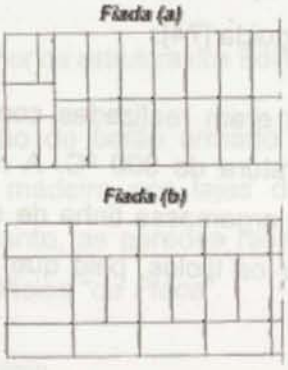


Figura 5.16 - Parede de duas vezes de tijolo: aparelho inglês [80]

Os ângulos entre as paredes eram executados com cuidados especiais, para que ficassem bem travadas.

A utilização de tijolos furados surgiu como forma de melhorar as características higrotérmicas dos edifícios. A sua utilização passou a ser maior do que a dos tijolos maciços (mais resistentes), porque a secagem era muito mais eficaz, por outro lado, permitiu o isolamento térmico e acústico

5.2.1.6 Paredes de taipa e de adobe

A utilização de paredes de terra remonta a mais de 12 000 anos, conhecendo-se a sua utilização na cidade de Jericó. Em Portugal, julga-se que as primeiras casas terão surgido há cerca de 2 500 anos, sendo que a maioria dos exemplares se encontra na zona do Alentejo e Algarve, com utilizações dispersas noutras zonas do país.

A sua utilização é conotada com a arquitectura popular e, de certo modo, à construção em países de poucos recursos económicos.

A parede de taipa é constituída por terra húmida, com características argilosas, comprimida entre taipais de madeira, que eram retirados após a sua secagem completa.

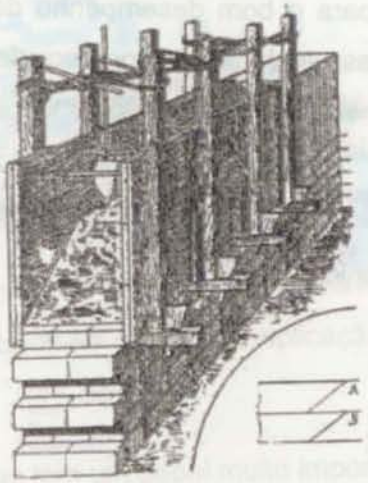


Figura 5.16 - Confecção de uma parede de taipa [80]

Apresentam a vantagem de serem homogéneas e monolíticas, incombustíveis, más condutoras de calor e económicas. A sua principal desvantagem é a de não possuírem estabilidade, quando solicitadas por acções horizontais (vento e sismo) e estaremsujeitas ao ataque de roedores.

As paredes de adobe, também utilizadas desde à muitos séculos, eram constituídas por tijolos de barro amassado com água e cozido ao sol, possuindo uma matéria prima muito diversa: base de argila, composta por misturas arenosas ou calcários.

Em ambos os casos as paredes não assentavam directamente sobre o terreno, devido ao risco de degradação por acção da humidade, sendo os alicerces constituídos por alvenaria corrente.

No final eram rebocadas e caiadas, garantindo deste modo, a sua impermeabilização e durabilidade.

5.2.2 A argamassa

As argamassas, utilizadas como revestimento exterior das paredes de alvenaria, desempenham um papel fundamental na sua protecção, nomeadamente em relação à acção dos agentes agressivos de origem física, química, mecânica e biológica.

Normalmente, os materiais utilizados no seu fabrico estavam relacionados com a própria construção da parede de alvenaria, e com os materiais disponíveis na zona. Deste modo, os revestimentos mais comuns eram realizados com base em areia, cal aérea e, em algumas regiões, com areia e barro.

Um dos factores fundamentais para o bom desempenho da argamassa é que esta deveria ser compatível com a base (alvenaria). Por isso, de entre as características essenciais para o seu comportamento saliente-se [05]

- baixa retracção;
- fraca resistência mecânica;
- boa porosidade;
- boa aderência à base;
- boa trabalhabilidade.

Na inspecção de edifícios existentes, nomeadamente, os mais antigos, é fundamental o conhecimento sobre as características dos materiais empregues, sua composição, a sua função e a técnica de aplicação. Tal facto é essencial para o estudo de qualquer processo patológico e para a elaboração do consequente diagnóstico. Refira-se a utilização de técnicas de ensaio baseadas na difração com raios X e nas análises químicas, mineralógicas e petrográficas, como meio auxiliar de diagnóstico.

As argamassas, utilizadas no reboco e nas juntas, dos edifícios de alvenaria, podem ser realizadas com diferentes materiais:

- cal;
- gesso;

- cal e gesso;
- cal, gesso ou da sua mistura com materiais argilosos;
- cal e materiais com características pozolânicas;
- outros.

Desde sempre a cal foi o material empregue como base de estruturas de alvenaria de pedra, uma vez que se encontra disseminada por todo o planeta.

Os ligantes da argamassa de cal podem ser de dois tipos [85]:

a) A cal aérea: obtida a partir da calcinação do calcário, é constituída por óxido ou hidróxido de cálcio. Endurece lentamente ao ar e não ganha presa dentro de água.

b) A cal hidráulica: obtida por cozedura de calcários argilosos, sendo constituída principalmente por silicatos, aluminatos e hidróxidos de cálcio, ganha presa e endurece ao ar ou na água.

As argamassas que utilizam cimento portland começaram a ser aplicadas no início do século XX. No entanto, constatou-se que a sua aplicação acelera a degradação das pedras.

A composição das argamassas tem um papel muito importante no seu comportamento durante a vida útil de uma estrutura. Existem numerosas misturas, dependendo do tipo de materiais empregues (gesso, cal, materiais argilosos, hidráulicos) e do tipo de materiais áridos (granulometria, tamanho máximo, tamanhos mais abundantes), que têm um papel preponderante [84]:

- na porosidade final da argamassa;
- na dosagem entre o material aglomerante / áridos;
- na inclusão de fibras;
- na incorporação de aditivos nas próprias argamassas.

Assim, constata-se que a compatibilidade das argamassas com os materiais de origem deve ser sempre considerada, através de uma investigação que conduza à composição e características dos ditos materiais originais.

A particularidade de cada obra, faz com que se se estude a composição das argamassas a utilizar, para se obterem bons resultados finais.

Quadro 5.4 - Principais Propriedades da Argamassa das juntas e sua importância

Estado	Propriedade	Importância
Fresco	Fluidez	A argamassa deve deslizar, por forma a que seja capaz de preencher todos os vazios.
	Coesão	A argamassa não deve desintegrar-se; deve aderir aos blocos (pedra / tijolo).
	Retenção	A argamassa não deve perder fluidez enquanto estiver a ser trabalhada; não deve perder água por evaporação para não fissurar enquanto estiver fresca.
Endurecido	Resistência à compressão	A resistência da argamassa está relacionada com a sua durabilidade e a impermeabilidade; apresenta alguma influência na resistência global da estrutura, sobretudo quando as tensões normais são muito altas ou muito baixas; a resistência à compressão também pode ser relacionada com a resistência à tracção e ao corte.
	Módulo de Flexão	Tem relação directa com a deformabilidade da parede;
	Retracção por secagem	Está associada à susceptibilidade de fissuração das juntas de argamassa, devido ao próprio fenómeno de retracção.

5.3 Principais anomalias em paredes de alvenaria

As principais causas que levam à degradação das paredes de alvenaria podem ser divididas do seguinte modo:

- Degradação dos materiais, devido a causas naturais ou forçadas;
- Acção da água:
  - directamente sobre a parede;

- por rotura de canalizações;
- indirectamente, através do terreno.

- Cedência do terreno de fundação;
- Actividade biológica:
  - desenvolvimento de vegetação;
  - agentes biológicos como fungos, térmitas e carunchos;
  - depósito de excrementos;
- Alteração das características estruturais e/ou funcionais do edifício.

Devido às suas características estruturais, constituição e localização, as anomalias detectadas nas estruturas de alvenaria apresentam aspectos diversos. Assim, dividiu-se a apresentação das principais anomalias em dois: as anomalias em paredes resistentes e paredes divisórias. No entanto, como base para este desenvolvimento, apresenta-se, em primeiro lugar, a descrição das principais anomalias das pedras.

Figura 5.18 - Exemplo de estrutura de alvenaria com danos de origem biológica [81]

Figura 5.19 - Deterioração de elementos em pedra

5.3.1 Patologia da pedra

A degradação, das pedras, e consequente perda de coesão, ocorre na maioria das vezes, na sua superfície exposta, até uma dada profundidade [81].

Esta degradação depende de vários factores:

- das suas propriedades intrínsecas: por exemplo, a composição mineralógica, a textura e estrutura interna, a porosidade, as propriedades térmicas e mecânicas;

- dos factores extrínsecos que incluem as condições climatéricas, a composição atmosférica, a localização do objecto na estrutura, o uso, etc.

- da combinação dos factores intrínsecos e extrínsecos.

5.3.1.1 Características intrínsecas das rochas

Como atrás foi referido, é essencial conhecer-se as características intrínsecas das rochas para se perceber o fenómeno da sua degradação.

Composição química:

O conhecimento da sua composição química permite determinar quais os elementos que mais facilmente a podem alterar, através de reacções químicas.

Estrutura interna:

Para se conhecer o seu comportamento, perante uma determinada agressão física, é fundamental saber as proporções dos diferentes materiais constituintes, bem como, a natureza, origem, tamanho do grão e as características dos ligantes.

Dureza superficial:

Fornece uma estimativa da sua resistência, nomeadamente em relação a determinadas agressões de carácter físico, como o vento.

Resistência mecânica:

Para se determinar a resistência mecânica de uma rocha é necessário conhecer o estado de agregação dos minerais que a integram, assim como saber quais os elementos mais e menos rígidos. Conhecer se a estrutura é compacta ou estratificada também é importante para definir esta característica.

Porosidade:

O seu estudo revela-se fundamental, de modo a conhecer-se a sua estrutura capilar interior, incluindo a sua distribuição e o tamanho dos poros.

5.3.1.2 Factores extrínsecos de agressão

Os factores extrínsecos podem ser divididos em três grupos principais:

a) Físicos:
   - Vento;
   - Temperatura;
   - Gelo;
   - Cristalização e hidratação de sais.

b) Químicos:
   - Dissolução e hidrólise;
   - Oxidação e redução.

c) Biológicos:

- Processos biofísicos;
- Processos bioquímicos.

De seguida descrevem-se os factores extrínsecos mais comuns e aqueles que provocam mais danos na pedra.

Vento:

A sua acção sobre a pedra é de origem mecânica, servindo de meio de transporte para as partículas sólidas, que ao serem projectadas provocam a sua erosão.

Por outro lado, a velocidade do vento sobre a superfície influencia a cristalização dos sais, ao aumentar a velocidade de evaporação de água capilar, eliminando a água superficial.

Acções térmicas:

As alterações térmicas também são incluídas nas acções mecânicas devido às alterações de volume como resultado das dilatações e das contracções. Em consequência, esses movimentos podem provocar a rotura da pedra.

O diferencial de temperatura entre a superfície e o interior das pedras origina movimentos térmicos diferentes, provocando tensões, que no limite, podem provocar a separação superficial da camada superior da rocha.

Os locais mais expostos à luz solar e à sombra são os mais susceptíveis.

No entanto, a acção da temperatura é uma acção indirecta, influenciando, sobretudo, a presença de humidade contida nos poros e a solubilidade dos sais e dos gases, acelerando as reacções químicas e facilitando a hidrólise.

Acção do gelo:

A passagem da água para gelo provoca um aumento de volume, na ordem dos 9 %. Tal facto provoca o alargamento dos poros. A resistência ao gelo depende de dois factores: da quantidade de água susceptível de poder gelar e da rede capilar (incluindo neste a distribuição, a forma e a dimensão dos poros).

Cristalização e hidratação dos sais solúveis:

São a causa mais frequente da degradação das pedras. O seu transporte até à superfície é efectuado pelo movimento da água sendo que, aí chegados, cristalizam. A degradação surge pela repetição deste processo de pressão e contracção, devido à ocorrência de eflorescências.

Processos de origem biológica:

De entre os processos biofísicos, relata-se os efeitos das plantas, nomeadamente as raízes, e dos excrementos dos animais.

Os fungos são os seres vivos que provocam os processos bioquímicos mais comuns.

5.3.1.3 Tipos de dano

5.3.1.3.1 Erosão

A erosão ocorre pela acção combinada da chuva e do vento, agravando-se quando estão presentes partículas sólidas. Provocam o desgaste progressivo da pedra promovendo condições favoráveis a outro tipo de ataque. O efeito provocado pela erosão depende da dureza e da resistência superficial da rocha.

5.3.1.3.2 Dissolução

O efeito mais comum da dissolução é o aparecimento de crostas na superfície da pedra. A forma das crostas depende do movimento de humidade no interior da rocha. Se a humidade se movimenta para a superfície exterior, ocorreram eflorescências ou crostas externas. Se a humidade tiver um movimento errante, isto é, para o exterior ou para o interior, produzem-se as crostas internas ou criptoflorescências.

5.3.1.3.3 Desagregação

Corresponde à perda de coesão dos agregados cristalinos que integram a rocha, causado a perda de resistência mecânica e o desmoronamento da sua massa.

A origem da desagregação pode ser devido a:

- Fenómenos de gelo;
- Fenómenos de hidratação de sais;
- Caulinização.

Os primeiros são devido ao aumento de volume. As consequências traduzem-se pela esfoliação superficial da pedra. As superfícies de rotura apresentam-se limpas, sem zonas pulvurentas ou qualquer tipo de coloração.

Os fenómenos de hidratação são a causa de desagregação, devido às elevadas pressões que exercem os sais ao desidratarem-se no interior dos poros, pulverizando a rocha.

A desagregação por caulinização produz-se em duas fases: em primeiro lugar, a hidrólise dos feldspatos, seguindo-se a microdivisão, que implica a intensificação da hidrólise por infiltração de soluções, provocando a lixiviação da rocha. Dá-se, em ambiente de alta temperatura e com abundância de água em rochas graníticas.

Quadro 5.5 - Tipos e caracterização da degradação da pedra de granito

Tipos	Causas	Caracterização da degradação
Desagregação granular		- aumento da rugosidade superficial; - arredondamento das arestas, adoçamento das formas; - perda de pormenores em cantarias e esculturas; - queda de material de granulometria arenosa, pelo simples toque nas superfícies afectadas.
Placas	Ocorre devido à presença de água no interior da rede porosa do granito, que possibilita a transferência rápida e eficaz de soluções salinas, devido a fenómenos ascensionais de capilaridade, a partir do solo ou da chuva. A variação do teor de humidade conduz a ciclos alternados de cristalização e deliquescência, total ou parcial dos materiais de sais solúveis	- são formações pouco espessas (entre 5 e 10 mm), com área compreendida entre a dezena e algumas dezenas de centímetros quadrados; - apresentam forma plana; - vão-se destacando da pedra, acabando por se separar e cair, sendo que na zona da pedra onde a placa se destacou apresentam aspecto de desagregação granular.
Plaquetas		- são formações pouco espessas (menos de2 mm); - pouco duras e pouco compactas; - área inferior a poucos centímetros quadrados; - a pedra afectada apresenta uma superfície com zonas semelhantes a crateras; - vão-se destacando da pedra, acabando por se separar e cair, sendo que na zona da pedra onde a placa se destacou apresentam aspecto de desagregação granular.

Eflorescências	cristalizações de minerais de sais solúveis sobre a superfície das pedras e argamassas devidas à ascensão de soluções salinas a partir do solo, principalmente em colunas e paredes.	- não provocam danos muito importantes na pedra, apesar do aspecto inestético das superfícies; - são do tipo pulverulento, de cor branca ou beije;
Colonização biológica	Exterior: - surgem em zonas húmidas e/ou sombrias, em fendas, fissura, em juntas abertas e em zonas horizontais, devido à permanência de humidade. Interior: - aparecem em zonas com alto teor de humidade.	Exterior: - associadas ao desenvolvimento de líquenes, musgos e plantas (fetos); Interior: - associadas ao crescimento de algas, afectando zonas situadas acima das áreas onde se desenvolvem eflorescências;
Crostas e filmes negros	Surgem devido a índices elevados de poluição atmosférica.	

5.3.2 Descrição das principais anomalias em paredes resistentes

Na continuação da secção anterior, verifica-se que os edifícios realizados em alvenaria de pedra podem sofrer dois níveis de alteração: lenta, resultante de fenómenos naturais, ou mais rápida, originada pela contaminação atmosférica.

A degradação de um edifício não é uniforme, concentrando-se sobretudo em zonas inferiores das fachadas expostas à chuva e em zonas expostas ao sol.

De seguida descrevem-se as anomalias mais usuais que ocorrem em paredes resistentes, geralmente em fachadas de edifícios.

5.3.2.1 Desagregação

A desagregação consiste no desgaste superficial das paredes, provocado, sobretudo, pela acção dos agentes climatéricos, como a variação de temperatura, o vento e a chuva. Outros factores que provocam a desagregação das paredes são a poluição, a infiltração de água e a humidade ascensional, proveniente do terreno. Por isso, é frequente que a desagregação ocorra com mais frequência nos pisos próximo do chão. As acções de vandalismo e os choques, de várias origens, também contribuem para o seu desenvolvimento.

Figura 5.20 - Desagregação de alvenaria fraca: edifício em Santiago do Cacém [80]

5.3.2.2 Esmagamento

Este fenómeno ocorre em zonas em que as cargas aplicadas excedem a capacidade resistente da estrutura. É o caso de locais onde existem cargas concentradas elevadas como, por exemplo, as zonas de apoio de vigas em paredes. Por consequência, o esmagamento ocorre em locais bem definidos da estrutura, onde a tensão instalada excede a capacidade de carga da parede.

5.3.2.3 Fendilhação

O fenómeno da fendilhação ocorre pelo facto de as paredes de alvenaria possuírem uma resistência à tracção e à flexão muito pequena, surgindo nos locais onde a sua capacidade resistente é ultrapassada.

O principal factor que condiciona a existência de fendas, a sua progressão e a dimensão da abertura é a constituição e a qualidade da parede de alvenaria.

A sua ocorrência é distinta e pode dar-se:

- em zonas correntes das paredes;
- em zonas onde existem aberturas (vãos de janelas e portas);
- na ligação entre paredes ortogonais.

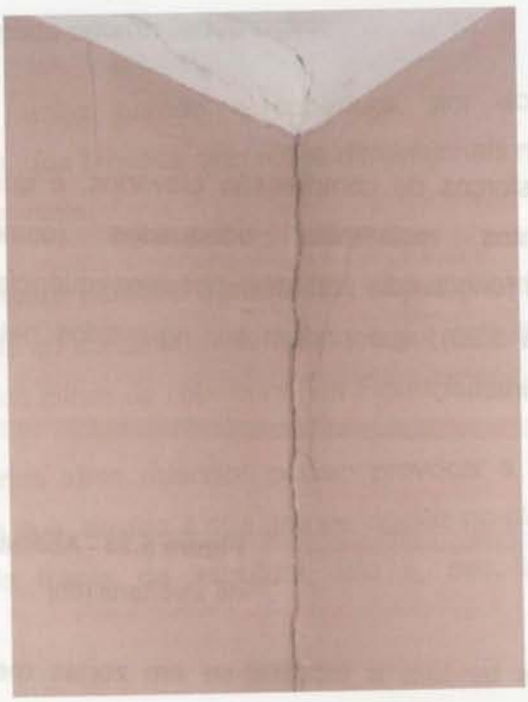
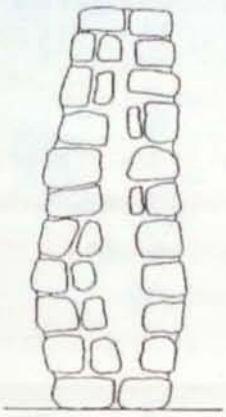


Figura 5.21 – Exemplo da existência de fendas em paredes de alvenaria ortogonais

Uma das principais causas para a sua ocorrência são os assentamentos diferenciais das fundações, que podem provocar fendas que atingem toda a largura da parede, com inclinações perfeitamente definidas.

Figura 5.22 - Fendilhação de paredes por assentamento diferencial das fundações [80]



Em paredes sujeitas a esforços de compressão elevados, e que não possuam elementos resistentes adequados (como perpeanhos), pode ocorrer fendilhação vertical e, por consequência, abaluamentos (ver Figura 5.23), que podem ser agravados pela presença de água no seu interior.

Figura 5.23 - Abaluamento de uma parede de alvenaria [80]

É normal que as fendas tendam a localizar-se em zonas menos resistentes da estrutura, traduzindo-se este fenómeno na inflexão da sua direcção, procurando fendas anteriores ou aberturas existentes.

Os vãos das portas e janelas são locais onde surge fendilhação abundante, uma vez que são zonas onde a concentração de tensões é elevada. É comum a aparição de fissuras verticais por falta de resistência dos lintéis superiores ou dos arcos de descarga, originando esforços de flexão elevados. Por outro lado, na ocorrência de sismos, é comum surgir fendas a 45º, resultantes de esforços cortantes elevados.

Figura 5.24 – Fendas características, na ocorrência de sismos

Outras situações onde pode ocorrer fendilhação:

- na ligação entre parede e cobertura, por acção da variação de temperatura, que provoca alterações dimensionais na estrutura, originando fendas horizontais;

- na ligação entre paredes e cobertura, por acção de impulsos horizontais provenientes do abatimento de arcos ou por deficiência de funcionamento estrutural das asnas de cobertura (ver Figura 5.25);

- os fenómenos atrás referidos podem provocar a separação de paredes interligadas que, devido à sua grande rigidez no plano, geram fendas nas zonas mais fracas da estrutura, isto é, nas ligações entre paredes ortogonais.

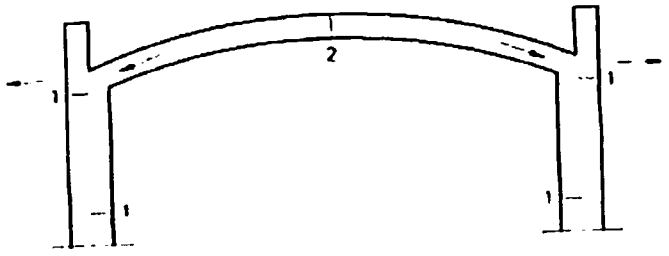


Figura 5.25 - Impulsos laterais, que podem provocar fendas horizontais nas paredes [80]

Na Figura 5.26, apresenta-se o exemplo de um pano de alvenaria de tijolo com duas situações diferentes: no Caso A, a resistência à tracção do componente da alvenaria é superior à resistência à tracção da argamassa, enquanto que no Caso B a resistência à tracção do componente da alvenaria é igual ou inferior à resistência à tracção da argamassa.

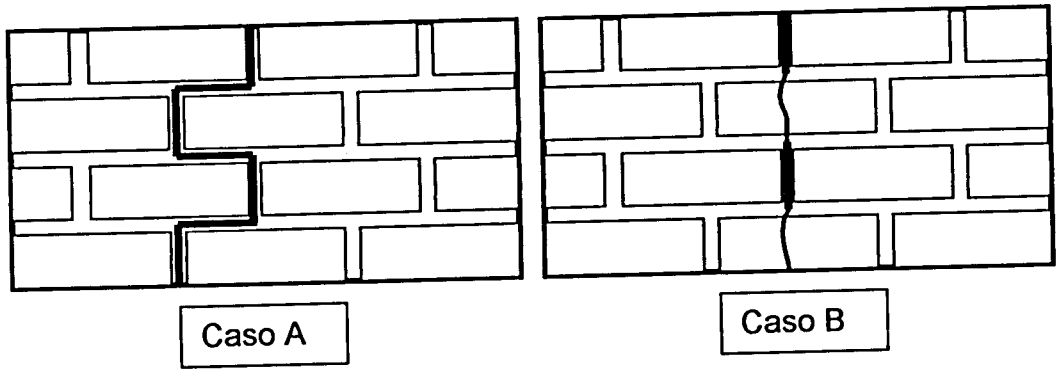


Figura 5.26 - Fissuras verticais em panos de alvenaria

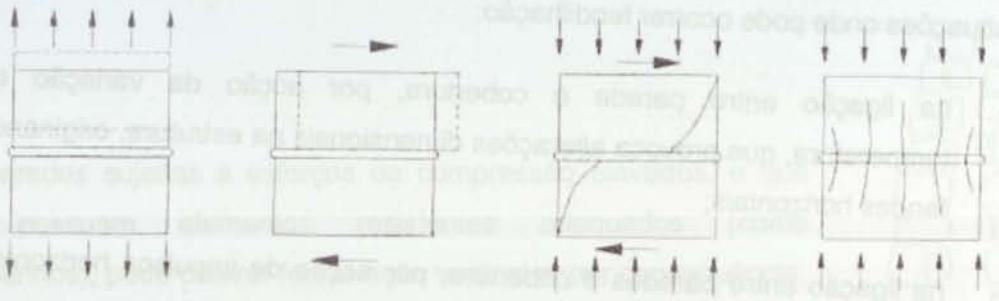


Figura 5.27 – Modos de fendilhação em juntas argamassadas [48]

5.3.2.4 Acção da água

A água é a principal causa de degradação das paredes exteriores, uma vez que a sua infiltração ocorre através das zonas mais frágeis da estrutura, isto é, através das fendas e dos vazios existentes. Normalmente, o seu percurso é feito através das juntas de argamassa, entre as pedras ou os tijolos (ver Figura 5.28).

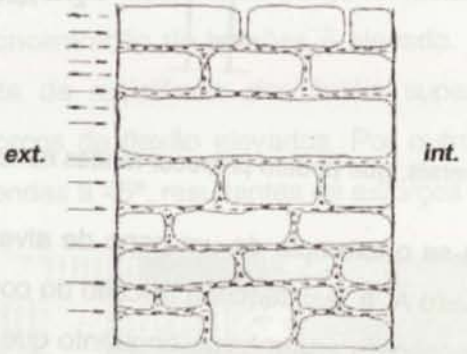


Figura 5.28 - Modelo de comportamento de uma parede de alvenaria em relação à humidade [80]

A ascensão da água pelas paredes (através do terreno) provoca a alteração da estrutura interna da parede, uma vez que vai dissolvendo os sais solúveis existentes. Quando atinge as condições ideais (nível de humidade e temperatura), dá-se a sua evaporação e, consequentemente, a deposição dos ditos sais, ou à superfície ou entre o reboco e o tosco da parede.

Figura 5.29 - Exemplo de estrutura de alvenaria com eflorescências [81]

No primeiro caso, surgem as *eflorescências*. No segundo, ocorrem as *criptoflorencências*, que se traduzem pelo aumento de volume provocado pela cristalização dos sais. A repetição deste processo, nos períodos de secagem e molhagem, leva à rotura da alvenaria (de pedra ou tijolo) que tende a destacar-se em lascas, ou ao empolamento, fendilhação e desagregação dos rebocos existentes.

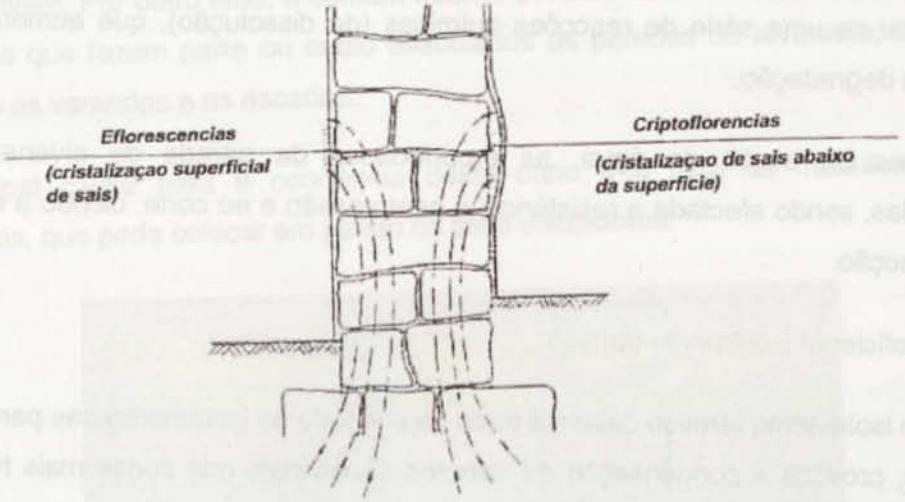


Figura 5.30 – Esquema do mecanismo de formação de eflorescências e criptoflorescências, numa parede de cantaria [80]

Pode resumir-se este fenómeno de desagregação a três zonas distintas:

- uma crosta exterior;

- uma zona adjacente a esta crosta, em que o material se apresenta desagregado e pulverulento;

- uma zona interior, em que a alvenaria pode, ou não, ter alguma alteração.

Figura 5.31 – Edifício em alvenaria apresentando humidade ascensional

Se a água que provoca o dano for de origem agressiva (esgotos, por exemplo), poderá acrescentar-se uma série de reacções químicas (de dissolução), que aumentam os efeitos da degradação.

Resultantes da acção da água, as propriedades da parede de alvenaria são modificadas, sendo afectada a resistência à compressão e ao corte, devido à redução da sua secção.

5.3.2.5 Deficiente isolamento térmico

A falta de isolamento térmico devido à fraca capacidade de isolamento das paredes de alvenaria, provoca a condensação de vapores superficiais nas zonas mais frias das paredes (sobretudo nas zonas onde o isolamento térmico é menor devido à ocorrência de pontes térmicas). Em consequência, surgem manchas negras que correspondem à formação de fungos e bolores. Esta deficiência é agravada se o local não for convenientemente ventilado.

Quanto mais espessas forem as paredes menor é a probabilidade de ocorrência deste tipo de dano.

5.3.2.6 Anomalias por acção de agentes biológicos, em paredes com elementos de madeira

A madeira, como material orgânico, além de todas as acções mecânicas, físicas e químicas, está sujeita ao ataque de agentes biológicos, como os fungos de podridão, térmitas e carunchos, que podem afectar de forma significativa a sua resistência mecânica.

Para que tal ocorra, têm de estar satisfeitas condições para o desenvolvimento de tais organismos, como por exemplo a presença de humidade nas paredes. Por isso, as paredes exteriores estão mais sujeitas a este tipo de degradação.

Para um maior desenvolvimento deste tema deve ser consultado o Capítulo 6, da presente tese.

5.3.2.7 Oxidação dos materiais

A oxidação dos materiais metálicos ocorre de duas maneiras distintas. Por um lado, temos a oxidação das cavilhas e dos gatos metálicos, utilizados no reforço das ligações das pedras de cantaria. O aumento de volume devido à corrosão pode provocar a fractura da pedra, em virtude das tensões de tracção que aí se desenvolvem. Por outro lado, é comum ocorrer problemas de oxidação em elementos metálicos que fazem parte ou estão associados às paredes de alvenaria, como por exemplo as varandas e as escadas.

A principal causa para a ocorrência deste dano é a falta de manutenção das estruturas, que pode colocar em perigo os seus utilizadores.

Figura 5.32 – Degradação de edifício em alvenaria com oxidação de elementos metálicos [81]

5.3.2.8 Degradação geral do edifício

Em Portugal, o parque edificado, correspondente às paredes de alvenaria, é muito antigo e situa-se sobretudo nos centros históricos das grandes cidades e nos aglomerados populacionais mais pequenos. Por isso, o seu estado de conservação é muito mau, o que se traduz pelo abandono e desmazelo dessas zonas. Apresenta-se, de seguida, uma série de danos em elementos não estruturais, que podem, com o seu desenvolvimento, afectar a própria estrutura [80]:

- degradação dos revestimentos e/ou acabamentos exteriores;
- escorrência de águas;
- materiais destacados dos paramentos;
- zona em que as alvenarias se encontrem à mesma;
- fendilhação dispersa dos paramentos;
- degradação das caixilharias exteriores com apodrecimento das madeiras e a corrosão das grades metálicas;
- deficiente conservação das pedras.

5.3.3 Descrição das principais anomalias em paredes divisórias

As anomalias das paredes de compartimentação estão relacionadas com a sua constituição e a sua funcionalidade.

As principais anomalias de origem estrutural estão relacionadas com as modificações do equilíbrio estrutural que se verificam ao longo da vida do edifício. Estas alterações são devidas a dois aspectos principais: por um lado, devido aos assentamentos diferenciais do solo de fundação e, por outro, à grande deformação dos pavimentos de madeira, característicos deste tipo de edifícios. Assim, estas alvenarias, que não possuem características estruturais, ficam sujeitas a um acréscimo de carga elevado, ultrapassando a sua capacidade resistente. Como consequência, é usual surgir abaluamentos, devido à instabilidade provocada pela encurvadura dos tabiques de madeira e esmagamentos com ocorrência de fendas de compressão.

Outro tipo de anomalias muito comuns são as fendilhações com origem em movimentos diferenciais das estruturas, devido a variações dimensionais de origem térmica, por assentamento de fundações e por deformação por flexão dos pavimentos.

Figura 5.33 – Fendas em paredes interiores, resultantes da deformação de lajes

5.3.4 Descrição das principais anomalias em paredes de alvenaria de terra

As principais anomalias deste tipo de alvenaria estão associadas:

- à sua própria utilização que se converte, sobretudo, em acções mecânicas;
- ao contacto com a própria natureza: que se converte em acções físicas, em consequência da água da chuva, do sol, etc.

No entanto, todas as anomalias são condicionadas pelo próprio material e sua constituição, pela função construtiva que o elemento estrutural desempenha e pelas acções que nelas actuam, ao longo da sua vida.

5.3.4.1 Elementos estruturais

As alvenarias de terra estão aptas, sobretudo, para absorver cargas verticais. Por isso, e sendo elementos estruturais verticais, podem sofrer dois tipos de danos: deformações e roturas.

As deformações referem-se a alterações à geometria inicial do elemento estrutural, devido às solicitações que sobre ele actuam, sem atingir a rotura. De entre as causas que estão na sua origem, refira-se:

- assentamentos de apoio;
- impulsos horizontais com origem na acção de outros elementos estruturais, como pavimentos e coberturas, e na acção do terreno;
- excesso de cargas verticais.

No Quadro 5.6, faz-se um resumo das anomalias provocadas por deformação dos elementos:

Quadro 5.6 - Resumo das anomalias provocadas por deformação

Tipo de deformação	Deslocamentos	Abaluamento	Encurvadura
Assentamento de apoio	x		
Impulsos horizontais	x	x	
Excesso de cargas verticais			x

As roturas surgem quando a deformação é muito grande. Há três tipos de rotura mais comuns: as fendas, as fissuras e o desmoronamento.

As fendas podem ser de diversos tipos, de acordo com a forma que adquirem e com a carga que as provocam.

Quadro 5.7 - Origem das fendas e suas principais características

Origem das fendas	Caracterização das fendas
Falta de apoio, devido ao assentamento do terreno de fundação.	Fendas verticais ou em arco de descarga, em função da composição e homogeneidade da parede.
Impulsos horizontais: - verticais em esquinas ou na ligação com paredes perpendiculares; - horizontais por acção dos pavimentos e coberturas.	Os primeiros provocam fendas verticais por esforço transverso. Os segundos provocam fendas horizontais coincidentes com o elemento que provoca o impulso.

Falta de ligação entre os elementos, em paredes heterogéneas.	As fendas surgem entre os diversos elementos que compõem a parede.
Movimentos diferenciais de dilatação e contracção, produzidos por alteração térmica em paredes de grande dimensão e por alteração do teor de humidade em zonas localizadas.	Estes movimentos convertem-se em impulsos e tracções horizontais, pelo que as fendas são idênticas às atrás citadas.

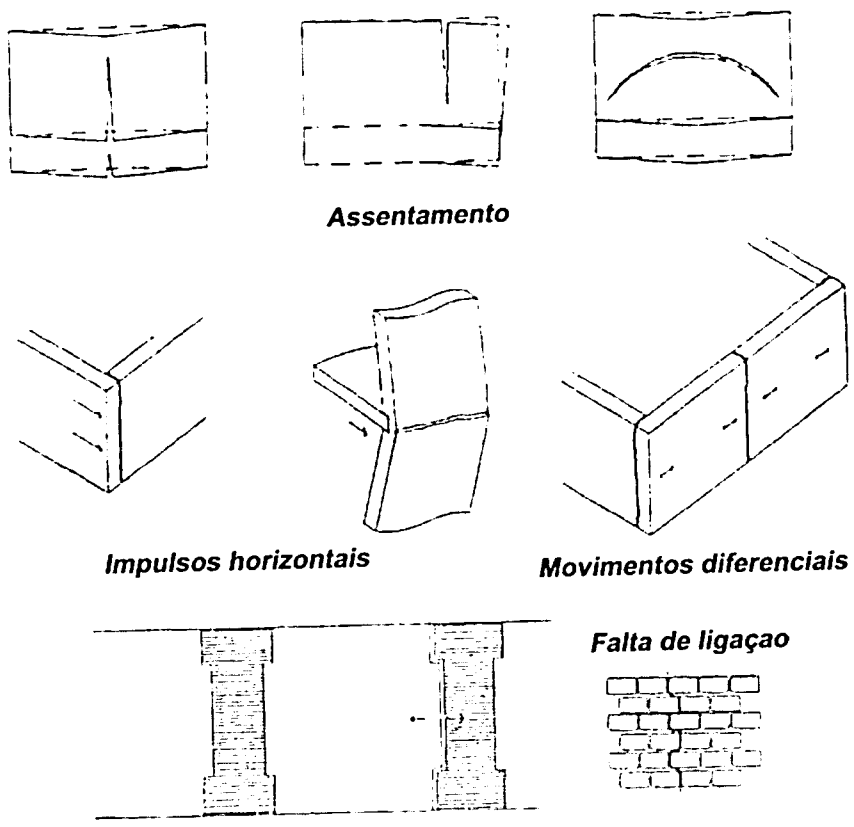


Figura 5.34 – Fendas mais comuns em paredes de alvenaria de terra, por deformação excessiva [55]

As fissuras representam, por assim dizer, a fase inicial das fendas. São consequência das deformações que provocam a curvatura da parede, para fora do seu plano, e surgem na superfície convexa afectando superficialmente a parede, quando essa superfície é diferente do resto da parede (como no caso dos rebocos). A origem das fissuras é idêntica à das fendas, pelo que a sua descrição é igual à atrás citada.

As fissuras podem ser resumidas de acordo com o Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Origem das fissuras em paredes de alvenaria de terra e sua caracterização

Origem das fendas	Caracterização das fendas
Por deslocamento.	Fissuras horizontais que surgem no centro na superfície convexa.
Por abaluamento	Fissuras verticais na parte convexa, normalmente na parte alta das paredes.
Por encurvadura	Fissuras horizontais que surgem no centro na superfície convexa.

O desmoronamento corresponde à perda de massa que constitui a parede por desprendimento. É uma rotura com origem interna, que ocorre devido à falta de coesão da parede e ao esforço de tracção interna que provoca um esforço tangencial rasante, entre a parte que se desprende e a que permanece.

5.3.4.2 Por acção de elementos exteriores

As paredes de alvenaria de terra, estão sujeitas à acção de elementos exteriores que provocam lesões mecânicas ou lesões físicas.

As lesões mecânicas podem ser provocadas devido a:

- erosão mecânica, como consequência de impactos e da abrasão nas partes baixas da parede;
- desprendimento dos rebocos, devido à pequena aderência e aos esforços tangenciais provocados pelas dilatações e/ou contracções;
- fissuras produzidas por dilatações e/ou contracções superficiais, devidas à secagem da parede e, depois, a alterações de temperatura ou humidade.

As lesões físicas mais frequentes são as relacionadas com a humidade e seus efeitos:

- humidade por capilaridade, no arranque das paredes, devido à ausência de drenagem adequada e à falta de aereação;
- humidade de filtração, desde o exterior, sobretudo nas fachadas mais expostas e mais porosas;

- erosão física e consequente deterioração superficial, em consequência da humidade e do gelo.

5.4 Técnicas de Inspecção de Edifícios em Alvenaria

5.4.1 Aspectos gerais

O uso apropriado e racional da análise estrutural, auxilia na definição do estado de segurança da estrutura e na prevenção do seu comportamento futuro.

Para tal, é necessário [86]:

- definir as propriedades mecânicas dos materiais constituintes da estrutura;
- implementar leis constitutivas da degradação dos materiais e de métodos de análise para estruturas danificadas;
- melhorar os critérios de confiança.

A análise de estruturas de alvenaria antigas é uma tarefa difícil. Em primeiro lugar, devido aos meios de estudo do comportamento mecânico, ensaios não destrutivos, *in situ*, ensaios laboratoriais e ferramentas numéricas que modelam o dito comportamento. Por outro, devido às dificuldades inerentes, à aplicação do conhecimento existente. De entre estes aspectos saliente-se [87]:

- desconhecimento à cerca da geometria da estrutura;
- informação sobre o interior dos elementos constituintes da estrutura;
- a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados é difícil e é cara;
- grande variedade dos propriedade mecânicas, devido às técnicas de construção utilizadas e ao uso de materiais naturais;
- alterações significativas na constituição dos elementos estruturais, associada aos longos períodos de construção;
- desconhecimento das fases de construção;
- desconhecimento dos danos existentes na construção;
- os regulamentos e normas não são aplicáveis a este tipo de estrutura.

5.4.2 A Importância da investigação *in situ*

A necessidade de conhecer o estado de uma estrutura de alvenaria, bem como a sua capacidade resistente, é baseada em princípios, que estão na base de qualquer intervenção [86] e [87]:

- a necessidade de avaliar o coeficiente de segurança de uma estrutura;
- a alteração e uso da estrutura;
- a necessidade de avaliar a eficácia de uma determinada técnica de reabilitação aplicada a uma estrutura ou a um material;
- a necessidade de utilizar materiais compatíveis e duráveis;
- análise entre o custo, os meios financeiros disponíveis e os resultados obtidos na intervenção;
- a monitorização a longo prazo do comportamento de uma estrutura ou material.

Os END podem ser úteis na determinação das características dos materiais constituintes da parede de alvenaria e dos seus danos internos, tais como fendas e vazios.

Os ensaios disponíveis, na actualidade, são sobretudo baseados na detecção das propriedades físicas das paredes. De entre os que fornecem as características mecânicas *in situ*, saliente-se os ensaios com recurso a macacos planos de tensão, que são ligeiramente destrutivos. Nestes ensaios a correlação entre os parâmetros medidos e os parâmetros mecânicos é difícil, mas pode fornecer uma resposta qualitativa da estrutura. Os END mais utilizados são os ensaios sónicos (ou ultra-sónicos), os ensaios de radar e termográficos.

No entanto, o uso de END, não é suficiente para diagnosticar, de uma maneira satisfatória, os problemas estruturais [50].

Ainda no que respeita à determinação dos parâmetros relacionados com o comportamento estático da estrutura, a utilização de ensaios semi destrutivos, que requerem uma intervenção, se bem que ligeira, no elemento estrutural revelam-se eficazes. É importante que essas intervenções (perfurações e cortes) tenham uma

dimensão tal, que não afectem a sua integridade estrutural e devem ser projectados de forma a que não existam sinais de intervenção no final dos ensaios.

Apesar de ser necessário que a execução e a interpretação dos dados iniciais seja realizada por técnicos qualificados, é o projectista, ou a sua equipe, que é o responsável pelo diagnóstico e deve [86]:

- estabelecer o projecto de investigação, quer *in situ* quer laboratorial;
- seguir de perto a investigação;
- interpretar e verificar os resultados;
- fazer uso dos dados técnicos recolhidos;
- escolher os modelos apropriados para a análise estrutural;
- elaborar a um diagnóstico, no final do estudo.

Todas estas operações devem ser acompanhadas por técnicos especializados. As alterações constantes da aplicação de materiais, e das técnicas de construção utilizadas, fundamentam este cuidado. Estes dois aspectos, somados às questões específicas quando perante estruturas com elevado significado histórico, fazem com que o conhecimento dos técnicos tenha de abarcar numerosos aspectos e áreas do conhecimento, tais como [87]:

- arqueologia;
- história da Arquitectura e Engenharia Civil;
- planeamento urbano;
- formas estruturais utilizadas e o uso de materiais tradicionais;
- estudo da deterioração dos materiais;
- consolidação e substituição de materiais tradicionais de construção;
- teorias de conservação;
- ética.

A qualidade de qualquer intervenção, resulta da integração destes conceitos pelo responsável pela investigação.

O objectivo das operações de inspecção e avaliação estrutural, deve ser definido antes de se actuar no local, de modo a que não existam custos elevados, acrescidos do risco de se obter muito pouco benefício. Por isso, o nível de investigação deve ser definido com cuidado. Deve ser realizada uma investigação preliminar, para se definir com mais detalhe qualquer investigação posterior, como por exemplo:

- qual a confiança nas hipóteses elaboradas sobre as causas do dano ou da sua evolução;
- o controlo da estrutura antes, durante ou após a intervenção;
- o controlo da eficácia da reabilitação ou reforço da estrutura.

Após a investigação preliminar, deve ocorrer uma segunda fase, na investigação, cujo objectivo será a determinação de todas as propriedades e parâmetros estruturais e mecânicos da estrutura de alvenaria.

É nesta fase que se recorre aos END. Em muitas investigações apenas se recorre a este tipo de ensaios, devido ao facto de estes equipamentos serem relativamente baratos e a sua execução ser relativamente fácil. Refira-se, novamente, que o uso apenas destas técnicas, por si só, pode não ser suficiente.

Os resultados obtidos através destas técnicas são de carácter qualitativo, fornecendo uma avaliação preliminar das características mecânicas da alvenaria. Os dados obtidos devem fornecer informação privilegiada acerca da homogeneidade das características da estrutura, bem como perspectiva a presença de zonas com comportamento anómalo.

5.4.3 Identificação de alguns dos danos mais frequentes em estruturas de alvenaria

a) Danos em torres, pilares e colunas de construções pesadas

O comportamento das cargas, em estruturas de alvenaria pesadas, normalmente, exibem um mecanismo de degradação típico, em que ocorre:

- a formação de fissuras verticais, ou quase verticais, pouco espessas e muito dispersas;

e

- o destacamento localizado de parte dos panos de alvenaria.

Estes danos são, geralmente, devidos ao peso próprio da estrutura e às ligações internas da mesma, e não a fenómenos como a ocorrência de sismos, a deslocamentos de apoio ou a fenómenos de degradação química, física ou mecânica, por exemplo.

Devido ao comportamento da alvenaria, estados de tensão de compressão constantes e elevados, podem causar a degradação gradual da estrutura, devido aos danos que se vão acumulando. Assim, a dita estrutura fica sujeita a estados de deformação excessivos, fomentando a ocorrência de colapsos.

Uma vez que este tipo de estrutura possui um elevado peso, acções como o vento e a variação de temperatura não provocam o aumento substancial de tensão (de corte e de flexão) na base da mesma. No entanto, a sua actuação de forma combinada pode incrementar a possibilidade de ruptura. De facto, próximo da capacidade limite de resistência do material, ciclos alternados de carga e descarga, podem levar a danos por fadiga, que aumentam a possibilidade de falha estrutural.

b) Detecção morfológica da parede de alvenaria

O comportamento estrutural de uma parede de alvenaria pode ser determinado quando se conhecer os seguintes factores [86]:

- a sua geometria;
- as características da parede de alvenaria: se se tratam de paredes simples ou de multi-camadas, a ligação entre os panos de alvenaria, se as juntas estão preenchidas com material de enchimento ou vazias e as características físicas, químicas e mecânicas dos seus componentes (tijolos, pedras, e argamassas);
- as características da parede de alvenaria, agindo como um material compósito.

No caso das paredes com mais de um pano, é difícil identificar as suas características. Estas, por sua vez, influenciam a sua capacidade de carga. Acresce que a resistência característica de um material heterogéneo é difícil de determinar experimentalmente,

uma vez que os parâmetros de deformabilidade, tais como o módulo de Elasticidade, E, e o coeficiente de Poisson, ν, não são representativos da resistência global e da deformabilidade da alvenaria.

Este tipo de paredes não é monolítica, na direcção transversal, o que faz com que se tornem frágeis, particularmente quando a actuam, sobre ela, forças horizontais. O mesmo pode acontecer com forças verticais excêntricas.

A inspecção às paredes de alvenaria, permite definir parâmetros importantes, tais como [86]:

- a percentagem de distribuição de pedra e argamassa;
- a razão entre as dimensões das diferentes camadas;
- a dimensão e distribuição dos vazios no interior da parede.

Estes parâmetros, em conjunto com as propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais, fornecem a possibilidade de descrever, de um modo mais correcto a alvenaria e constituem uma base fundamental para qualquer intervenção de conservação.

c) Caracterização dos materiais

A obtenção de amostras para a caracterização dos materiais que compõem uma parede de alvenaria, deve ser executada de modo a que se provoque o menor dano possível na mesma e que a amostra extraída seja representativa do material existente.

O objectivo destes testes são:

- caracterizar o material, do ponto de vista químico, físico e mecânico;
- detectar a sua origem;
- detectar a sua composição e conteúdo, por forma a obter materiais compatíveis na intervenção de reparação;
- determinar o seu comportamento em relação aos agentes agressivos que compõem os materiais a utilizar no restauro.

5.4.4 Procedimentos de investigação, apropriados para detectar danos

Como já se referiu uma investigação preliminar é conveniente para fornecer indicações acerca da geometria da estrutura, para detectar danos visíveis (fendas, desaprumos, degradação do material, por exemplo), e para identificar os pontos onde devem ser efectuadas observações mais pormenorizadas. De seguida, desenvolvem-se inspecções mais detalhadas, para a identificação das irregularidades detectadas (encurvadura, rotações, etc.). Numa acção conjunta, deve-se conhecer a evolução histórica do edifício, por forma a encontrar explicações para os sinais de danos e degradação detectados no edifício.

Deve ser dada especial importância à inspecção e desenho da fendilhação encontrada. A sua interpretação correcta pode constituir uma grande ajuda para perceber o estado de degradação da estrutura, as suas causas possíveis e o tipo de inspecção que deve ser desenvolvida.

Os detalhes geométricos, que por serem complexos e de difícil interpretação, através dos procedimentos usuais, têm de ser alvo de uma inspecção específica. O conhecimento da geometria exacta da estrutura é fundamental para que se proceda à avaliação correcta de uma estrutura.

Muitos autores referem a importância da avaliação de edifícios de alvenaria, recorrendo aos END *in situ*. Os métodos de END podem ser utilizados para diversos fins, tais como [86]:

- a detecção de elementos estruturais escondidos como: pilares, arcos, pavimentos, etc.
- a classificação do tipo de alvenaria e dos seus materiais constituintes, determinando a sua heterogeneidade dentro da própria estrutura;
- a avaliação da extensão dos danos estruturais, em edifícios fissurados;
- a detecção da presença de vazios e fendas, no interior da estrutura;
- a avaliação do teor de humidade e da sua ascensão por capilaridade;
- a detecção da degradação superficial;

- a avaliação e determinação das propriedades físicas e mecânicas dos elementos constituintes de uma alvenaria, tais como as pedras, tijolos, e argamassa.

Quando se detecta uma fissura de relevância para o comportamento estrutural, e se observa que ela possui uma evolução desfavorável (por exemplo, devido a assentamentos de apoio, a variações de temperatura ou a cargas excessivas), deve-se proceder à medição dos deslocamentos ao longo de um determinado período de tempo. É, pois, necessário recorrer à monitorização da estrutura, por forma a seguir a evolução dos danos observados.

Um dos aparelhos mais simples que podem ser utilizados são os fissurómetros.

Outros dos procedimentos utilizados é a utilização de métodos dinâmicos, indicados para a verificação do comportamento e integridade das estruturas. O objectivo principal destes métodos é o controlo do comportamento das estruturas à vibração.

5.4.5 Escolha dos procedimentos de avaliação

A quantidade dos ensaios, *in situ* e laboratoriais necessários, para o conhecimento do edifício, deve ser gerida por parâmetros que devem ser utilizados para definir o tempo e a quantia disponível para executar a inspecção. De entre esses parâmetros salienta-se o valor artístico e cultural do edifício, os recursos disponíveis, o tipo e o nível de danos encontrados, etc. Pode-se, assim, definir o tipo e o nível da inspecção. No entanto, embora em muitos casos os recursos económicos sejam limitativos, é necessário definir um nível mínimo de inspecção.

Como referência, na ausência de risco imediato, a inspecção a uma estrutura de alvenaria deve ser [86]:

- prolongada no tempo e deve fornecer dados para a compreensão da dita estrutura;
- realizada para calibrar modelos mecânicos de comportamento da estrutura ao longo do tempo;
- utilizada para controlar a eficácia da intervenção, através da monitorização do edifício.

5.4.6 Paredes de alvenaria com multi-camadas

Estas paredes possuem uma estrutura complexa. São caracterizadas pela presença de duas ou mais fiadas de elementos de alvenaria (pedra ou tijolo), cujas características mecânicas são relativamente fáceis de determinar, ligadas por argamassa de conteúdo desconhecido. Estas juntas possuem uma resistência à compressão inferior à da pedra e a resistência à tracção é praticamente zero. Assim, o seu comportamento é não linear. Acresce que esta junta, muitas vezes, não é uniforme. Na separação entre as fiadas de blocos podem ocorrer duas situações: ou não existe nada entre elas, ou existe um enchimento, cuja espessura, qualidade e quantidade não se conhece.

Nestas condições, é praticamente impossível obter um modelo credível. Lourenço P., refere três possibilidades para simular o comportamento deste tipo de paredes:

- Um micromodelo detalhado: em que as pedras de travamento e as juntas de argamassa são representadas por elementos contínuos e a interface é representada por elementos descontínuos.

- Um micro-modelo simplificado: em que as pedras de travamento e as juntas de argamassa são representadas por elementos contínuos e a interface é representada por elementos descontínuos.

- Um macro-modelo: em que as pedras, a argamassa e as interfaces são definidas como um meio contínuo.

5.4.7 Técnicas de Controle da Reparação

Apesar de se efectuarem cada vez mais operações de reabilitação e restauro em edifícios de alvenaria, o controle sobre a eficácia das técnicas utilizadas, bem como o comportamento da estrutura ao longo dos anos é feito de forma precária. Muitas vezes, algumas operações de reabilitação/reparação revelam-se ineficazes e inapropriadas.

Antes de se proceder a qualquer acção de reparação/reabilitação/reforço, devem ser efectuados ensaios referentes à determinação das propriedades dos materiais existentes e dos materiais a utilizar, por forma a determinar o grau de compatibilização entre eles.

Com base em testes laboratoriais *in situ* Roca P., Gonzaléz J.L., Onate E. e Lourenço P. propuseram um procedimento experimental, cuja finalidade é fornecer um guia para a selecção correcta das argamassas e das técnicas de injecção a utilizar, indicar métodos de controle da eficácia dessa operação de reparação. Assim, os passos a seguir são os seguintes [90]:

i) inspecção da secção da parede de alvenaria e extracção de amostras contendo material do interior da mesma parede;

ii) caracterização, em laboratório, do material extraído;

iii) caracterização de dois tipos de argamassa;

iv) preparação de modelos físicos que representem a camada interior da parede que vai ser injectada;

v) injecção dos modelos e subsequente inspecção;

vi) teste das amostras injectadas;

vii) escolha da argamassa;

viii) testes de macacos planos, antes da injecção, em pontos escolhidos da parede;

ix) injecção da parede;

x) repetição dos testes de macacos planos, nos mesmos pontos e comparação dos resultados obtidos;

xi) verificação *in situ* da penetração e difusão da argamassa.

Os END podem ser uma ferramenta útil para testar a eficácia deste tipo de reforço. De entre os ensaios mais utilizados, destacam-se os ensaios de radar e os testes sónicos (tomografia), como aqueles em que se obtêm melhores resultados.

5.5 Técnicas Auxiliares de Diagnóstico

5.5.1 Determinação das dimensões geométricas de uma estrutura de alvenaria

Nas estruturas de alvenaria, nomeadamente nos edifícios antigos e de interesse patrimonial, é muito importante a realização do levantamento das suas formas

geométricas. Note-se que, em grande parte das ocasiões, como são edifícios com alguns séculos de existência, não se encontram disponíveis peças desenhadas e muito menos projectos de arquitectura e de engenharia, devidamente cotados. Assim, a obtenção de informação relativa aos aspectos geométricos e dimensionais, à articulação espacial e à localização dos elementos estruturais é essencial e deve ocorrer antes de se proceder à inspecção da estrutura em causa.

Pode-se definir como objectivos principais desta recolha de informação:

- a representação de um edifício;
- a definição das suas características geométricas;
- a individualização do estado de conservação dos seus componentes estruturais;
- o suporte para a realização de projectos de reabilitação estrutural;
- a criação de bases de dados relativas ao levantamento geométrico e dimensional dos edifícios e às intervenções de reabilitação entretanto realizadas.

Os meios disponíveis para a recolha de informação baseiam-se em dois tipos de sistemas [88]:

- Sistemas topográficos
- Sistemas de fotogrametria

As Normas DIN 18723 e ISO 857 fornecem prescrições sobre os procedimentos a realizar, quando se utilizam estes métodos.

5.5.1.1 Sistemas topográficos

O levantamento topográfico é essencial na determinação da planimetria e das dimensões estruturais (secções) de um edifício.

De forma a determinar as cotas altimétricas e planimétricas está disponível instrumentação adequada. Por um lado, utilizando métodos topográficos tradicionais, como o recurso a triangulações, poligonais e intersecções, e por outro, utilizando instrumentação electrónica de precisão com base em sistemas de modelação laser,

designados por distanciómetro laser, apto a determinar ângulos azimutais e zenitais, que permitem a medição de pontos inacessíveis (cotas elevadas) evitando a utilização de miras (sistema tradicional e menos precisos). No entanto, para confirmar resultados é usual recorrer-se à utilização de taqueómetros e de fita métrica.

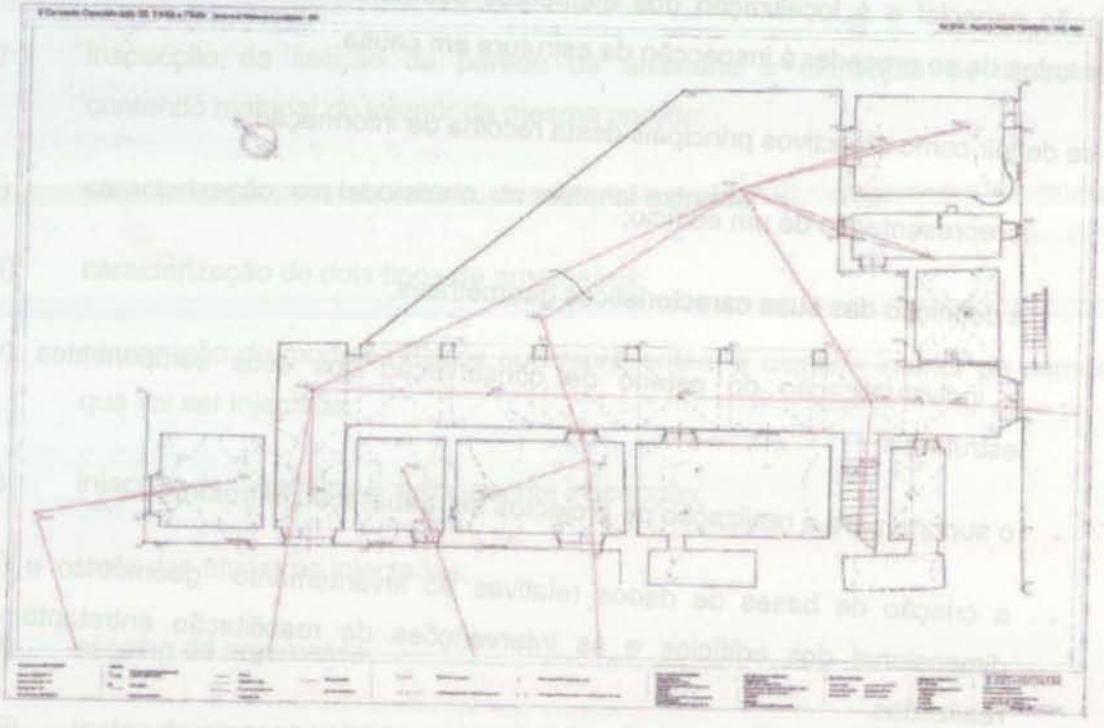


Figura 5.35 - Ilustração de levantamento topográfico de uma estrutura

Através destes aparelhos é possível a produção de peças desenhadas devidamente cotadas, em formatos DXF e DWG, prontas a serem utilizadas em programas de desenho e de cálculo automático de estruturas, constituindo elementos fundamentais, por exemplo, na modelação estrutural.

5.5.1.2 Sistemas fotogramétricos

Consiste na realização de perspectivas de um edifício por meio da medição das coordenadas tridimensionais de pontos pré-definidos, através do tratamento digital das fotografias. Esta técnica está descrita com mais pormenor na secção 5.5.12 do presente Capítulo.

Do mesmo modo, obtêm-se peças desenhadas em formato DXF e DWG, úteis no processamento dos dados obtidos.

Com base no levantamento fotogramétrico realizado, pode-se obter o levantamento material da estrutura, isto é, pode-se localizar e individualizar o tipo de materiais aplicados e localizar zonas de degradação e alteração superficial, através da utilização de cores ou layers diferentes (ver Figura 5.36).

Figura 5.36 - Ilustração de um levantamento fotogramétrico com individualização de materiais diferentes [adapt. www.idesweb.it]

A fotogrametria também permite determinar a verticalidade e nivelamento das estruturas, constituindo um meio de monitorização útil para acompanhar a evolução da estrutura ao longo do tempo.

5.5.2 Auscultação e Estetoscopia

Numa fase de inspecção preliminar, esta técnica expedita é utilizada com o propósito de detectar vazios, fendas e heterogeneidades internas.

A técnica consiste em percutir, com um actuador (martelo, por exemplo), uma determinada zona, analisando-se a resposta (ruído por ressonância) com o auxílio de um microfone ou de um estetoscópio.

A diferença no som provocado pelos vários impactos permite ao técnico detectar heterogeneidades como:

- blocos de materiais diferentes;
- vazios;
- elementos de madeira (no caso de paredes mistas).

Como exemplo, um som oco pode ser interpretado como a existência de vazios ou como a presença de elementos menos rígidos (madeira de tabiques).

É uma técnica expedita que permite inspeccionar, com rapidez, uma determinada superfície, não sendo necessária qualificação específica do técnico. No entanto, é uma

técnica limitada, em que ressalta o facto de só permitir avaliar a camada superficial da parede, não permitindo, com rigor, a definição geométrica das heterogeneidades. No caso de existir destacamento da alvenaria, ou existir humidade na mesma, os resultados não são fidedignos.

5.5.3 Endoscopia

A palavra endoscopia (termo muito utilizado na medicina), provém das palavras gregas "éndon", que significa *dentro*, e "skopein", que significa *olhar*. Assim, todas as técnicas que têm como objectivo a obtenção de informação sobre o interior de uma parede, que de outra forma são inacessíveis a olho nu, estão incluídas neste ponto.

De entre as mais utilizadas, referem-se a utilização de boroscópios e de videoscópios.

A videoscopia é uma técnica de inspecção que consiste na introdução de uma câmara de vídeo (a cores), de reduzida dimensão, em buracos (aproveitando, por exemplo, a extracção de carotes ou feito de propósito), permitindo um estudo detalhado de toda a superfície perfurada. Os resultados obtidos podem ser arquivados para uma análise posterior, permitindo a reposição das condições iniciais, isto é, antes de ser executado o furo.

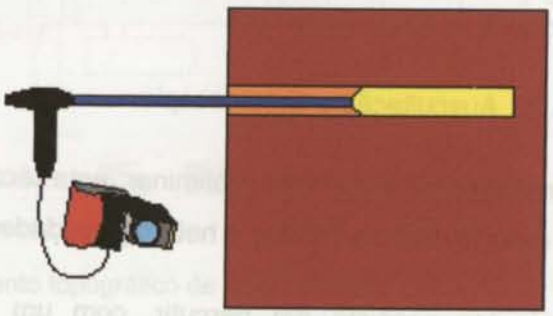


Figura 5.37 - Ilustração de um videoscópio [adapt. www.idesweb.it]

Figura 5.38 - Imagem do interior de uma parede de alvenaria, obtida por intermédio de um videoscópio [adapt.www.idesweb.it]

Figura 5.39 - Procedimento para inspecção de alvenarias com boroscópio: a) abertura de furo; b) introdução do equipamento [45]

O boroscópio baseia-se na mesma técnica. O equipamento consiste numa haste delgada, cuja ponta contém uma objectiva e onde se inclui um ponto de luz. É manobrado por um operador que visualiza, em tempo real as imagens obtidas. Ao equipamento pode ser incorporado uma máquina fotográfica ou uma câmara de vídeo de forma a registar as imagens obtidas.

Da informação que pode ser obtida, saliente-se:

- as características estruturais da estrutura (sobretudo as internas);
- a dimensão das cavidades existentes no interior da alvenaria;
- a análise da propagação das fendas internas e a medição da sua espessura;
- estado de conservação da estrutura.

5.5.4 Ensaio Sónico (Cross-Hole)

A técnica de ensaio é baseada na geração de impulsos sónicos num determinado local da estrutura. Através de um sistema de percussão, ou através de transdutores electrodinâmicos ou pneumáticos, é gerado um sinal que é recebido por um receptor, que pode ser colocado em várias posições.

O tratamento dos dados consiste na análise do tempo que o impulso demora a percorrer a secção do material, entre o emissor e o receptor de sinal, e na análise das ondas de impulso geradas.

Em estruturas de alvenaria, tipicamente heterogéneas, é necessário recorrer a impulsos sónicos, uma vez que as juntas, constituintes da alvenaria, constituem-se como uma barreira impenetrável para as ondas ultra-sónicas.

Os ensaios sónicos podem ser realizados em diversas zonas da estrutura, aplicando o impulso numa das superfícies e recepcionando-o na superfície oposta, ou na mesma superfície. Se existirem buracos na estrutura ou se forem realizados para o efeito, pode-se utilizá-los para realizar testes sónicos do tipo *cross-hole* ou *down-hole* que permitem uma avaliação longitudinal da estrutura, que não é possível obter através da tomografia sónica, identificando as superfícies dos blocos de pedra (ver Figura 3.17).

A velocidade das ondas sónicas é influenciada:

- pela frequência do impacto;
- pelo número de juntas atravessadas: a velocidade tende a diminuir com o aumento do número de juntas;
- pela presença de fissuras,
- pelas características do revestimento superficial: a presença de reboco ou destacamentos, filtrem os componentes de alta frequência do sinal.

De entre a informação que pode ser obtida através da realização deste tipo de ensaio, refira-se [50]:

- a estimativa do módulo de elasticidade da estrutura (índice de qualidade mecânica);
- a determinação das características de homogeneidade das paredes de alvenaria que compõem a estrutura;
- a determinação da homogeneidade de um elemento singular da estrutura;
- a verificação da eficiência da técnica de reparação / reforço utilizada;
- a detecção da presença de fendas, em materiais contínuos.

As principais limitações deste ensaio são:

- o seu custo devido ao elevado número de medições que é necessário executar;
- a elaboração de resultados, devido à heterogeneidade do material;
- a necessidade de calibrar os valores para os diferentes tipos de alvenaria.

5.5.5 Tomografia Sónica

É um método poderoso de obtenção informação sobre o estado de um determinado elemento estrutural, através da interpretação da velocidade das ondas geradas e de mapas de atenuação (enfraquecimento) das mesmas ondas.

A distribuição da velocidade é um indicador das propriedades elásticas do elemento.

Os mapas de atenuação das ondas estão relacionadas com o comportamento não elástico do material e, por isso, com a presença e importância dos danos existentes.

Através de um impacto gerado por um martelo, são geradas ondas mecânicas longitudinais (ondas P), através da secção investigada, sendo recepcionadas por um transdutor piezométrico. O impacto inicial deve produzir energia suficiente para permitir a análise dos resultados.

Quanto maior for a velocidade obtida, melhor é o material inspeccionado, isto é, possui propriedades mecânicas melhores.

Por exemplo, elementos em mármore com boas propriedades mecânicas possuem velocidades de propagação de ondas de mais de 5000 m/s, enquanto que material de enchimento característico, do interior das paredes de alvenaria, apresenta velocidades inferiores a 2250 m/s.

Assim, uma vez que existe uma grande variedade de materiais e, por consequência, com velocidades de propagação de ondas muito distintas, os investigadores/técnicos, consoante os resultados obtidos, ficam na posse de informação que lhes permite uma melhor análise da resistência de um elemento de alvenaria.

A secção da estrutura é dividida numa grelha cuja dimensão está relacionada com a distância entre dois subsequentes pontos de transmissão ou recepção (ver Figura 3.20).

Normalmente a distância entre os locais de ensaio é de 200 mm, em função do tipo de estrutura.

A refracção, devido à existência de camadas com propriedades diferentes (como por exemplo, o módulo de elasticidade), faz com que o percurso das ondas seja muito importante.

Podem ser utilizados mapas de atenuação, cuja base de cálculo se baseia não só na velocidade sónica mas também em outras características da transmissão do sinal, tais como a sua amplitude e frequência.

A comparação entre a resistência e o estado de tensão, determinados a partir dos resultados obtidos no ensaio, permite que se faça o mapeamento das zonas de risco, de extrema utilidade quando se está a proceder à análise das zonas a reabilitar/reforçar.

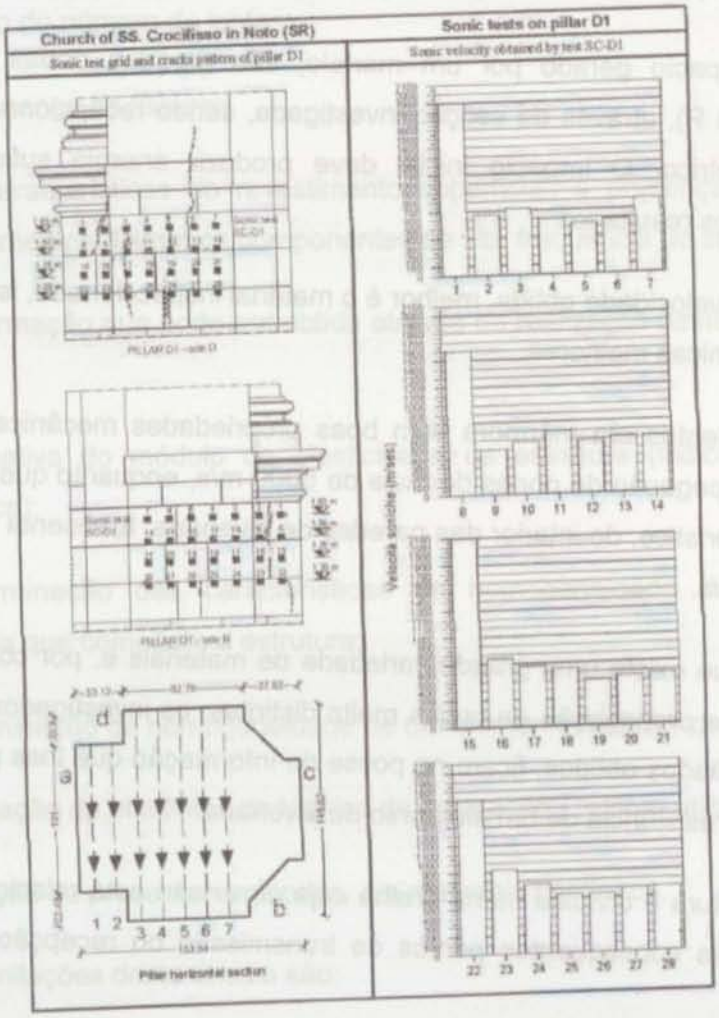


Figura 5.40 – Tomografia sónica: exemplo de saída de resultados [86]

O campo de aplicação deste método é vasto:

- reconhecer e localizar diferentes tipos de alvenarias;
- identificar a morfologia da secção com relevo para a detecção de danos internos, tais como vazios e fendas;
- controlar a eficácia de diferentes técnicas de reabilitação, em alvenarias danificadas;

5.5.6 Ensaio Ultra-Sónico

As ondas ultra-sónicas são utilizadas, sobretudo, em estruturas contínuas, uma vez que as juntas porosas, constituintes da alvenaria, constituem-se como uma barreira impenetrável para as ondas ultra-sónicas.

Ensaio mencionado nos capítulos anteriores, é indicado para a determinação do Módulo de Elasticidade da estrutura, bem como para a detecção de vazios e heterogeneidades internas.

5.5.7 Impulso Mecânico

A técnica consiste na aplicação de um impulso mecânico na alvenaria, com auxílio de um percutor devidamente calibrado. Assim, o impulso transmitido à estrutura é função da massa do martelo. As ondas induzidas (ondas de tensão) são reflectidas, quer pela superfície oposta quer pela presença de descontinuidades internas, e são captadas por acelerómetros (receptores) colocados na alvenaria.

O objectivo é determinar a velocidade de propagação da onda, função do trajecto percorrido e do tempo de reflexão da primeira onda de propagação.

É uma técnica não destrutiva e permite a detecção de vazios e heterogeneidades internas. Permite ainda determinar o Módulo de Elasticidade do material.

Os impulsos gerados são de baixa frequência.

Apresenta como principais vantagens:

- fácil de realizar;
- avalia a uniformidade do meio a inspeccionar, detectando vazios e fendas;

- equipamento e realização do ensaio tem custos moderados;
- é uma técnica não destrutiva.

Como limitação, apresenta:

- equipamento difícil de transportar;
- necessita de equipamento independente para gravar o tempo de chegada da onda,
- não existe correlação entre os resultados e as propriedades dos materiais;
- analise de resultados é complicado.

5.5.8 Impacto - Eco

Ao contrário da técnica anterior o impulso é gerado por um actuador composto por uma haste de aço com uma ponta esférica. O sinal é recebido por um transdutor de recepção de deslocamentos piezométrico, de forma cónica.

Os deslocamentos, na zona de impacto, correspondem à chegada das ondas reflectidas pela superfície oposta do elemento, bem como das sucessivas reflexões. O registo das ondas é efectuado com o auxílio de um PC portátil equipado com software específico desenvolvido para o efeito, sendo obtida a frequência das ondas através da Transformada Rápida de Fourier. Desta forma, o pico do espectro de amplitude corresponde à frequência predominante da estrutura [25].

Este ensaio permite a avaliação da integridade dos elementos de alvenaria, nomeadamente com a determinação do módulo de elasticidade do material.

5.5.9 Radar (GPR)

Este ensaio, de reduzido custo e rapidez de execução, permite a inspecção de grande número de locais e, por consequência, a compilação dos dados de toda a estrutura em análise.

A calibração dos aparelhos é realizada através da reflexão das ondas numa chapa de aço, localizada a uma determinada distância da superfície. A velocidade obtida é utilizada para relacionar o tempo de reflexão, com a espessura do elemento alvo da

inspecção. Se se pretender maior precisão pode-se medir duas velocidades distintas, uma na superfície e outra no interior do elemento de alvenaria.

A frequência dos transdutores é determinante na análise das estruturas de alvenaria. Observa-se que os transdutores utilizam frequências electromagnéticas elevadas, entre 100 MHz e 1 GHz), emitidas através de uma antena com impulsos de muito curta duração (0,5 a 5 μs). Assim, frequências na ordem dos 500 MHz são recomendados para a inspecção de estruturas com maior espessura (300 mm), enquanto que transdutores com frequência na ordem dos 900 MHz são utilizados na inspecção de paredes com menor espessura (150 mm, aproximadamente) [89].

A investigação é baseada na reflexão das ondas electromagnéticas, a partir das superfícies de contacto entre materiais com constantes dieléctricas distintas, por forma a que os danos existentes no interior da estrutura possam ser detectados.

A detecção dos danos é realizada através da saída de resultados, nomeadamente pela presença de reflexões hiperbólicas. Por exemplo, a velocidade é maior em paredes secas do que em paredes com humidade.

A utilização desta técnica é indicada:

- para a detecção de zonas danificadas no interior das paredes de alvenaria, bem como a presença de humidade;
- para a validação da sua espessura, composição e homogeneidade;
- para a detecção da presença de elementos metálicos, utilizados por exemplo na ligação de blocos de pedra de cantaria (designados por "gatos") e de elementos de madeira.

5.5.10 Termografia

Como já se referiu a análise termográfica é baseada na condutividade térmica dos materiais. Para melhor caracterizar esta propriedade, os termogramas devem ser realizados em diferentes condições térmicas, isto é, de dia (aquecimento da estrutura) e de noite (arrefecimento da estrutura).

A radiação térmica é recolhida por um aparelho sensível à radiação infra-vermelha, transformando-se em sinais eléctricos, que por sua vez, são convertidos em imagens com coloração diferente, impressas em papel fotográfico.

Figura 5.41 – Termografia: exemplo de parede com humidade [adap. www.idesweb.it]

Uma das principais vantagens do método é que o ensaio decorre sem o contacto com a superfície a avaliar, factor importante quando se está a analisar paredes de edifícios históricos de alto valor patrimonial, que não permitem (pela existência de pinturas, por exemplo) a recolha ou até o contacto com a superfície de teste.

Esta técnica pode ser utilizada para [88]:

- determinar a constituição das paredes de alvenaria, localizadas atrás do reboco;
- detectar a presença de elementos estruturais "escondidos" e eventuais anomalias construtivas;
- detectar a presença de materiais diferentes;
- detectar descontinuidades, cavidades e danos;
- localizar destaques do reboco
- avaliar o estado de conservação da alvenaria;
- determinar a existência de pontes térmicas
- detectar a presença de humidade, capilar, de condensação e de infiltração;
- localizar condutas no interior da parede.

Com a realização de inúmeros testes utilizando esta técnica obtêm-se algumas conclusões, de índole prática, que são interessantes de relatar:

- as cavidades de grande dimensão surgem de uma forma nítida, quer a preto quer a branco, de acordo com as condições térmicas de tomada de dados;

- as cavidades de menor dimensão nem sempre aparecem e são, muitas vezes, confundidas com outro tipo de descontinuidades, como por exemplo as de origem térmica;

- a utilização de termogramas coloridos ajuda na interpretação dos resultados;

- as diferenças higrométricas entre os diferentes blocos de alvenaria é uma das principais razões para o aparecimento de anomalias que podem conduzir a conclusões erradas. Por exemplo, a humidade provoca o aumento da energia de absorção, originando a presença de manchas pretas nos termogramas, catalogadas como superfícies frias;

- é essencial a repetição de medições em condições térmicas diferentes para a identificação de vazios, que se caracterizam pela radiação elevada, em condições de boa exposição solar, por fraca radiação em condições térmicas piores.

5.5.11 Ensaios para determinar a resistência superficial da alvenaria

Tal como foi referido na secção 3.4.9 desta dissertação, algumas técnicas associadas ao ensaio de estruturas de betão armado podem ser utilizadas na obtenção da resistência das paredes de alvenaria. No entanto, é necessário ter em atenção que os sistemas estruturais são diferentes, ressaltando que uma parede de alvenaria se caracteriza por uma grande heterogeneidade, quer superficial quer em profundidade. Por consequência, esta técnica não deve ser aplicada em alvenarias com grande heterogeneidade. Deve se recorrer a outras técnicas, aptas para detectar essas heterogeneidades e só depois, se possível, recorrer a esta técnica.

De entre os ensaios possíveis de utilizar saliente-se o Esclerómetro de Schmidt, o Ensaio de Penetração (pistola de Windsor) e o Ensaio de Arrancamento (Pull-Off). Todas estas técnicas encontram-se descritas no Capítulo 3, pelo que aqui só se referirá alguns aspectos particulares destas técnicas.

5.5.11.1 Esclerómetro

O Ensaio do Esclerómetro é utilizado quando se pretende uma avaliação qualitativa da tensão de compressão das argamassas ou da resistência superficial das pedras ou tijolos. Os resultados obtidos devem estar relacionados com os obtidos através de ensaios mecânicos ou experimentalmente em amostras do mesmo material, sendo

que a pressão aplicada deverá ser inferior à aplicada em elementos de betão armado. A explicação resume-se a que a resistência da alvenaria é inferior. Antes de se proceder à realização do ensaio a superfície deve ser rectificada com uma pedra abrasiva. A determinação do índice esclerométrico é realizada através da média de 12 medições, excluindo os valores máximo e mínimo obtidos.

Figura 5.42 - Ensaio de esclerómetro (instrumentação diferente) em paredes de alvenaria [adapt. www.idesweb.it]

Este ensaio encontra-se Normalizado pelas Normas ASTM C 805, BS 1881: Part.202, DIN 1048 - prEN 12398.

5.5.11.2 Ensaio de Penetração

Em relação ao Ensaio de Penetração, apesar da técnica ser diferente, as limitações são as mesmas, nomeadamente sobre se o local de ensaio é representativo de toda a estrutura em análise.

5.5.11.3 Ensaio de Arranque (Pull-Off)

No Ensaio de Arrancamento, a dimensão do equipamento do equipamento, nomeadamente do aro metálico e a profundidade da cravação) depende do tipo de material que constitui a alvenaria, assim como a forma dos provetes arrancados, que, por sua vez, condiciona o tipo de resistência medida (ver Figura 3.62). Esta técnica não é aplicável a alvenarias de junta seca, uma vez que o provete se degrada.

Figura 5.43 -Ensaio de arrancamento, numa parede de alvenaria [adapt. www.idesweb.it]

5.5.12 Fotogrametria

A técnica de fotogrametria permite a obtenção, a partir de fotografia, de modelos, bi ou tri dimensionados dos elementos em estudo.

A tomada de fotografias deve ser realizada a partir de posições diferentes, devendo-se garantir, no entanto, que existe intersecção de parte ou totalidade da área captada e que os ângulos entre as posições de fotografia devem estar espaçados entre si de mais de 30º.

As fotografias obtidas são introduzidas num computador e posteriormente tratadas com programa específico, em que todos os pontos e linhas que se pretendem modelar são mantidos (ver Figura 5.44).

Por fim, faz-se o processamento das coordenadas tridimensionais dos pontos através de um algoritmo, disponível no software de apoio.

O resultado obtido pode ser introduzido num programa de desenho assistido por computador.

A fotogrametria além de fornecer o suporte geométrico da inspecção, verifica as irregularidades que existem na superfície de uma estrutura, revelando-se útil na determinação da posição de fissuras e na medição do desaprumo dos elementos verticais.

Figura 5.44 – Fotogrametria, exemplo de tratamento de imagem com software específico [81]

5.5.13 Extracção de carotes

A extracção de amostras, provenientes da realização de carotes, nas zonas mais representativas de uma estrutura de alvenaria, permite uma melhor compreensão das suas propriedades estruturais.

É particularmente útil em estruturas de alvenaria compostas por duas fiadas, ou mais, regulares de pedra ou tijolo, separadas por uma zona preenchida com material (argamassa) heterogéneo e irregular.

A operação de caroteamento deve ser realizada com o auxílio de uma serra (com cabeça de corte em diamante). As carotes obtidas poderão, desta forma, ser sujeitas a ensaios laboratoriais. De entre os testes mais comuns, saliente-se os que permitem determinar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos tijolos, pedras e argamassa.

Figura 5.45 – Extracção de carotes [81]

Os buracos podem ser aproveitados para proceder a investigações adicionais (inspecção visual ou com câmara de vídeo, dilatómetro, medições sónicas), que auxiliam na caracterização das propriedades mecânicas da alvenaria, nomeadamente verificando no local, as dimensões dos blocos, o tipo de material que os constitui, o material das juntas e dos enchimentos (se for o caso).

A recolha dos carotes permite, com a devida preparação e rectificação, a obtenção de provetas que posteriormente podem ser ensaiadas em laboratório para a determinação, por exemplo, do modelo de elasticidade, da resistência à compressão (recorrendo ao ensaio de compressão e ao ensaio de compressão diametral).

De mesma forma que no betão armado, os resultados mais precisos obtêm-se utilizando provetes em que a sua altura corresponde ao dobro do diâmetro. No caso de ensaios de compressão uniaxial e diametral (ensaio brasileiro) o diâmetro deve ser igual à altura.

Figura 5.46 - Imagem do interior do furo realizada após a extracção de carote. Inspecção visual do interior da estrutura [81]

Esta técnica é também utilizada para avaliar as características estruturais das fundações em alvenaria.

A extracção de carotes complementa os ensaios atrás citados e servem para confirmar de uma maneira fidedigna e precisa os resultados obtidos.

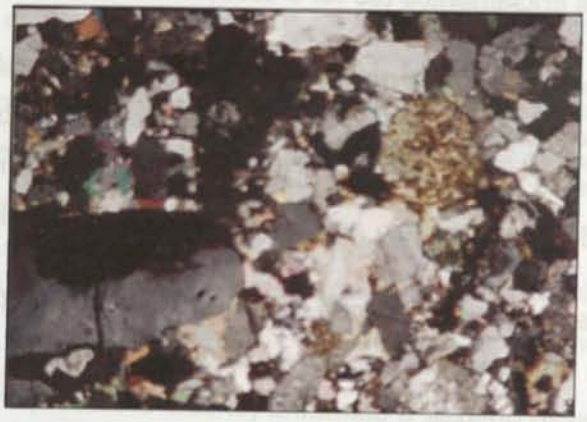


Figura 5.47 - Imagem obtida através da análise petrográfica de um alvenaria [adapt. www.idesweb.it]

Quadro 5.9- Ensaio de carotes em paredes de alvenaria e ensaios complementares laboratoriais [25]

Designação	Descrição	Equipamento	Dados obtidos
Carotagem	Retirada de uma amostra cilíndrica de pequeno diâmetro, em pontos representativos da estrutura	Caroteadora com ϕ 100 mm para as zonas das juntas.	Recolha de amostras para inspecção visual e realização de ensaios laboratoriais para identificação da constituição e determinação das características resistentes e de deformabilidade.
Análise Petrográfica de Argamassas	Análise em microscópio electrónico de lâminas delgadas do material obtidas por retificação e polimento de amostras retiradas de carotes. Ver secção 3.5.2, da presente tese.	Caroteadora Serra de corte do material Serra de precisão e rectificação automática. Estufa e microscópio electrónico	Identificação da natureza e tipo de componentes utilizados no processo de fabrico dos materiais. Identificação das reacções químicas e da microestrutura.
Ensaio de compressão simples Norma ASTM C39, 1999 Norma EN 12390-6, 2000	Recolha de amostras em forma de carotes e procedimento de ensaio de acordo com especificação do LNEC. Normalização dos valores das tensões, considerando a geometria dos provetes ensaiados.	Caroteadora Máquina de corte de alvenarias e de rectificação nos topos Prensa e restante equipamentode ensaio à compressão das carotes	Avaliação das propriedades mecânicas do material (tensões e deformabilidade).
Ensaio de compressão diametral de carotes (método Brasileiro) Norma ASTM C496, 1996 Norma EN 12390-6, 2000	Extracção de carotes e ensaio à compressão, aplicando o carregamento diametralmente (perpendicular ao eixo).	Equipamento de compressão de carotes	Permite obter a tensão de rotura à tracção e à compressão da alvenaria.
Ensaio de corte de carotes ASTM C 496, 1996	Serra-se uma carote segundo dois planos paralelos, obtendo-se dois discos com diâmetro igual ao diâmetro da carote. Ensaio de cada um dos discos à compressão aplicada no seu centro, sendo os discos colocados horizontalemnte e apoiados num anel metálico com diâmetro inferior.	Equipamento de corte (serra) Disco metálico com diâmetro inferior ao da carote Equipamento de compressão de carotes	Permite obter a tensão de rotura à tracção e à compressão da alvenaria.

5.5.14 Macacos Planos de Tensão

Este ensaio, realizado *in situ*, destaca-se como sendo o ensaio que permite obter uma informação credível sobre as características mecânicas de uma estrutura de alvenaria: a sua deformabilidade, resistência e estado de tensão.

Este método é semi destrutivo, pois é necessário introduzir o macaco plano na parede de alvenaria. Normalmente, esta operação é executada através da remoção da argamassa da junta. Depois de realizado, o aparelho pode ser facilmente removido, repondo-se as condições iniciais, isto é recolocando a argamassa retirada.

O grau de confiança nos resultados obtidos por este método, deve-se sobretudo ao facto de ele ser realizado sem provocar qualquer interferência nas condições reais em que as características mecânicas da estrutura serão determinadas, e na dimensão da superfície alvo de ensaio, cujo comportamento irá ser testado.

A técnica de ensaio foi organizada por forma a fornecer respostas acerca da [50]:

- medição do estado de tensão da estrutura;
- determinação das características de deformabilidade e de resistência;
- determinação da tensão de corte ao longo da camada de argamassa.

O ensaio possui duas variantes, com finalidades diferentes. Assim:

- o ensaio com macacos planos simples é utilizado para determinar, *in situ* o estado de tensão;
- o ensaio com macacos planos duplos é utilizado para estimar o módulo de elasticidade e a capacidade resistente à compressão.

Este ensaio está normalizado segundo o RILEM LUM 90/2 D.2 e ASTM C 1196 (macacos planos simples) e RILEM LUM 90/2 D.3 e ASTM C 1197 (macacos planos duplos).

5.5.14.1 Medição do estado de tensão

A determinação do estado de tensão é baseada na tensão libertada pelo plano de corte, normal à superfície da parede.

Os procedimentos de ensaio são os seguintes:

i) são referenciados dois pontos de referência, na superfície da parede, medindo-se a distância inicial (d_i) entre eles;

ii) realiza-se um corte perpendicular à superfície da parede, determinando-se a tensão libertada através do fecho da junta. A distância entre os dois pontos de referência (d) será menor;

iii) procede-se ao posicionamento do macaco plano (de pequena espessura), introduzindo-se, gradualmente, uma pressão, que vai anular a convergência de pontos; os incrementos variam com o tipo de alvenaria sendo que aumentos sucessivos de 0.05 MPa constituem um valor comum.

Nestas condições, a pressão (p) no interior do macaco é igual ao estado de tensão pré-existente, na direcção normal ao plano de corte. O valor obtido deve ser corrigido por um coeficiente que depende da razão entre a área do macaco plano e a área de corte.

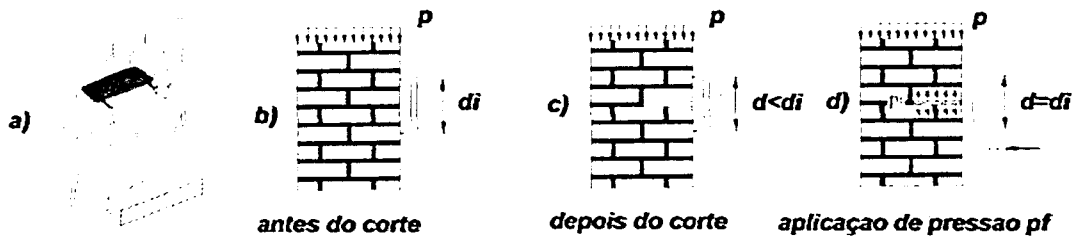


Figura 5.48 – Macacos planos de tensão: procedimentos de ensaio [88]

O valor do estado de tensão (σ), no local de ensaio, é dado pela expressão:

$$\sigma = p.K_m.K_a$$

em que,

p = pressão do líquido;

K_m = constante do macaco plano, que deve ser determinada em laboratório (<1);

$K_a = A_j / A_c$, quociente entre a área do macaco plano e a superfície de corte (<1).

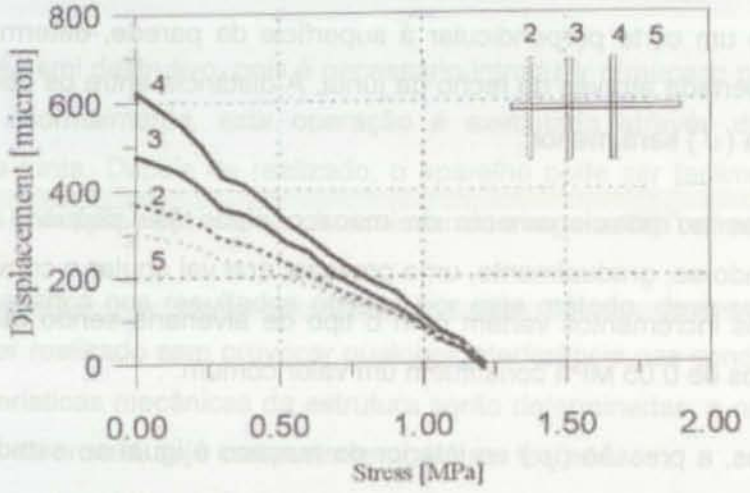


Figura 5.49 – Macacos planos simples: exemplo de saída de resultados

5.5.14.2 A geometria e os macacos planos

Em paredes de alvenaria de tijolo, o plano de corte pode ser facilmente executado na junta de argamassa, entre duas camadas de tijolo. Neste tipo de estrutura, utilizam-se macacos planos rectangulares, com dimensões de 40 x 20 cm.

Em elementos estruturais como arcos, pilares ou abóbadas, também se utilizam macacos de reduzidas dimensões.

Em paredes de alvenaria de pedra, com camadas de argamassa pouco espessas, utilizam-se técnicas de corte diferentes. O corte é executado com recurso a discos de aço, com cabeças de corte em diamante, e a forma do macaco plano deve ser idêntica (segmentos circulares com comprimento de 32 cm, profundidade de 12 cm e espessura de 3 mm).

Observe-se o recurso a formas diferentes dos macacos, na análise de alvenarias, realizada com pedras muito heterogéneas (ver Figura 3.67).

5.5.14.3 Determinação da deformabilidade e resistência

Se estivermos na presença de um material isotrópico (que apresente as mesmas propriedades em todas as direcções) e homogéneo, as configurações de ensaio atrás mencionadas permitem determinar as suas características de deformabilidade.

No caso de parede de alvenaria, em que os materiais constituintes se apresentem como altamente anisotrópicos, é aconselhável introduzir algumas alterações ao método de ensaio.

Assim, é executado um segundo corte, paralelo ao primeiro, inserindo-se um segundo macaco plano, a uma distância de aproximadamente 50 cm, um do outro [50]. Os dois macacos planos delimitam uma amostra de alvenaria, de apreciáveis dimensões, na qual se introduzirá uma tensão de compressão uniaxial. As medições realizadas, feitas através de aparelhos próprios para aferir a tensão (LVDTs), tornam possível a obtenção de informação completa acerca deformação axial e transversal da amostra.

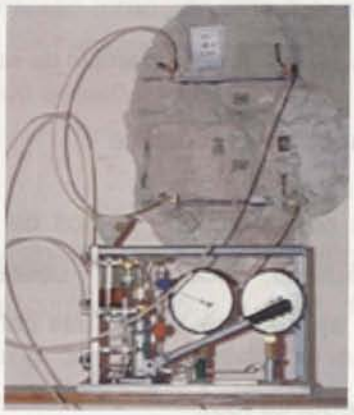


Figura 5.50 – Ensaio com macacos duplos [81]

Devem ser analisados vários ciclos de carga, com um aumento gradual dos níveis de tensão, por forma a determinar o módulo de deformabilidade da alvenaria, sujeita ou não, a solicitações.

O incremento de carga deve ser executado até que surjam as primeiras fissuras, por forma a se determinar o limite de resistência da alvenaria, através da extrapolação das curvas de tensão-extensão. O efeito do confinamento lateral da amostra, pode ser levado em consideração través da calibração do teste, feita em laboratório.

O aparecimento de fendas, próximo do estado limite, não significa que a estrutura fique fragilizada, uma vez que a sua reparação é fácil e a estrutura permanece com a mesma condição que possuía antes do ensaio.

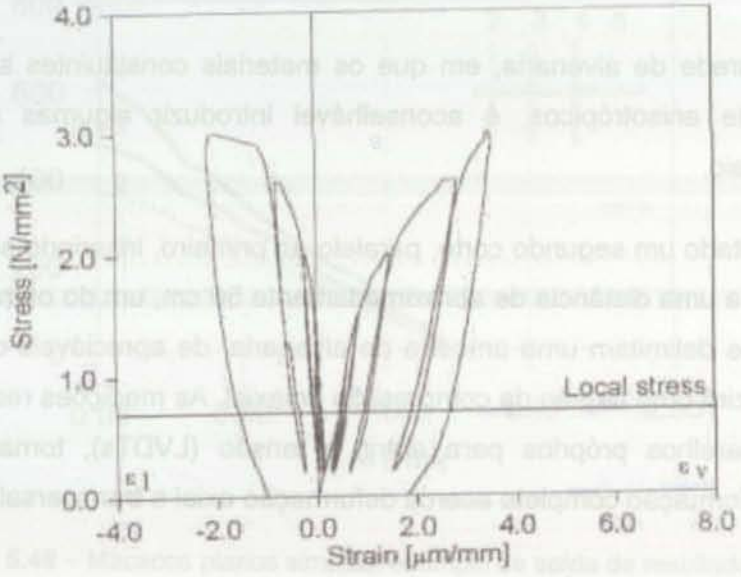


Figura 5.51 – Macacos planos duplos: exemplo de saída de resultados

5.5.14.4 Teste de corte na camada de argamassa

A técnica utilizada nos ensaios com macacos planos de tensão, combinada com a utilização de macacos hidráulicos, pode ser utilizada para determinar as características de resistência da argamassa, entre duas camadas de pedra de tijolos.

O procedimento de ensaio é o seguinte [50]:

Extrai-se um(a) tijolo/pedra do centro da amostra de alvenaria, delimitada pela presença dos dois macacos planos, inserindo-se no seu lugar um macaco hidráulico (do mesmo tamanho). A força de corte será aplicada através deste macaco. Esta técnica permite determinar a resistência de corte máxima e residual da argamassa.

Realizando vários ensaios, com diferentes níveis de força, na direcção perpendicular à junta, pode-se determinar o ângulo de fricção e a coesão da alvenaria. Por isso, este teste revela-se importante no estudo da resistência de alvenarias ao movimento sísmico.

No final do teste são removidos os macacos instalados na alvenaria, recolocando a argamassa e o(a) tijolo/pedra no seu lugar, retornando à sua condição inicial (mecânica e visual).

Todas as fases de ensaio têm de ser devidamente calibradas em laboratório, através de variados ensaios com grande amostragem de alvenaria.

5.5.14.5 Limitações dos testes com macacos planos de tensão

- dificuldade de interpretação dos resultados, quando o reposicionamento das distâncias através da ajuda dos macacos não é feito com sucesso;
- resultados não credíveis quando as forças são pequenas;
- incerteza na interpretação dos resultados quando o material é heterogéneo ou muito fraco;
- resultados incertos, quando a tensão existente acima do corte é insuficiente, em contraste com a pressão fornecida pelo macaco plano;
- tempo de preparação do ensaio é demorado.

5.5.15 Dilatómetro

Executados em buracos, previamente realizados na estrutura, estes ensaios permitem obter um conhecimento mais correcto sobre o valor do módulo de elasticidade do material de enchimento interno de uma parede de alvenaria; é considerada uma técnica semi-destrutiva.

A utilização dos testes com macacos planos, para a determinação das características de deformabilidade, só fornecem dados sobre a camada superficial da alvenaria. Por seu lado, os testes com dilatómetros têm a vantagem de fornecer essas características, não só do exterior mas também do interior da parede de alvenaria. Para tal, é necessário executar um furo, com aproximadamente 25 cm, no qual se introduz o dilatómetro. Aplica-se uma pressão hidrostática uniforme na superfície do furo, medindo-se a deformação obtida, e, por consequência, o módulo de deformabilidade da mesma.

Como a porção de alvenaria ensaiada é muito pequena, os valores obtidos nestes ensaios são menos representativos do que os obtidos através dos macacos planos.

Figura 5.52 – Ensaio com dilatómetro: equipamento [44]

No entanto, esta técnica é muito útil pois determina a diferença entre a deformabilidade no interior e no exterior da parede de alvenaria.

Figura 5.53 – Realização de ensaio com dilatómetro [44]

Este ensaio também é utilizado para determinar as características de deformabilidade das estruturas de fundação.

É comum a aplicação desta técnica, em conjunto com os ensaios sónicos e de cross-hole, uma vez que todos requerem a execução de buracos para a realização do ensaio.

5.5.16 Caracterização das Pedras

De entre os ensaios laboratoriais de caracterização das pedras refira-se, por serem os mais utlizados:

a) Ensaios petrofísicos

- Ensaios para a determinação da densidade aparente:
- Porosidade livre às 48 horas: reconhecimento da distribuição volumétrica dos poros
- Absorção de água por capilaridade.

Os dois últimos são úteis para determinar o grau de meteorização das pedras, com a consequente formação de poros. Realizados em provetes cilíndricos.

b) Caracterização mineralógica

- Difracção de raios X (DRX): corresponde à identificação qualitativa das principais fases cristalinas dos elementos de prova.
- Microscopia electrónica de varrimento (MEV): descrição morfológica dos estratos e micro-análise, através da dispersão de energia, dos elementos presentes.

5.5.17 Análise Dinâmica

A utilização de métodos dinâmicos de análise, realizados *in situ*, constitui uma ferramenta eficaz para verificar o comportamento estrutural e a integridade de uma estrutura.

A investigação dinâmica pode ser executada de acordo com os seguintes procedimentos [50]:

a) através da análise dos dados obtidos pela resposta do edifício a forças dinâmicas aplicadas continuamente à estrutura (tráfego urbano, sinos a tocar, vento, etc.). A obtenção dos dados para análise, é feita através da instalação de uma rede de acelerómetros, em zonas diversas da estrutura. O ensaio consiste na gravação, em tempo real, de vibrações e o seu processamento através da Transformada Rápida de Fourier. A vantagem do método é a facilidade de transporte e manuseamento do equipamento e o facto de não afectar o normal funcionamento da estrutura, sendo possível executá-lo em estruturas em pleno uso. Esta análise é realizada em termos da amplitude e frequência obtida, definidas através dos picos avaliados através de técnicas de análise espectral.

b) sujeitando o edifício a testes de vibração, com a aplicação de forças de pequena intensidade, por forma a não afectar a integridade da estrutura. A recolha dos dados é feita em termos dos deslocamentos, velocidade e aceleração obtidas, medidas com recurso a acelerómetros. Esta análise permite a identificação do comportamento dinâmico da estrutura, através da avaliação dos parâmetros modais (frequência natural, modos de vibração, coeficientes de amortecimento). O conhecimento destes parâmetros permite a computação da resposta estrutural para qualquer acção dinâmica, se se repetir estes testes por um dado período de tempo, pode-se avaliar as possíveis, variações dos parâmetros modais. Estas variações podem estar associadas a modificações na integridade estrutural do edifício, relacionadas com a degradação do mesmo.

Figura 5.54 - Ensaio dinâmico : aplicação de forças de impacto

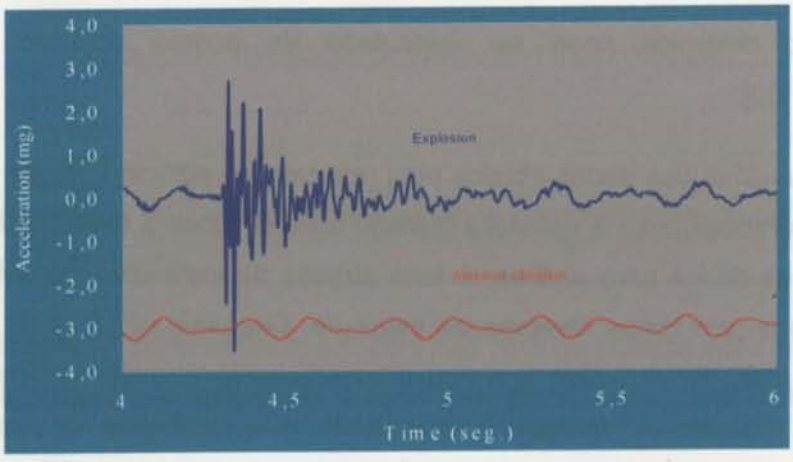


Figura 5.55 - Ensaio dinâmico : exemplo de saída de resultados com software específico

A grande dificuldade que os ensaios dinâmicos, realizados *in situ*, estão relacionados com a grande complexidade estrutural dos edifícios, e em particular os realizados com paredes de alvenaria devido à interacção entre os componentes estruturais e não estruturais, e à sua ligação ao exterior (apoios), e às variações de temperatura dentro do mesmo edifício.

5.5.18 Ensaios de caracterização de juntas

As juntas de ligação, nas paredes de alvenaria, caracterizam-se por serem locais frágeis, que afectam, de forma significativa, a sua resistência, comportamento em serviço e durabilidade.

A resistência da ligação depende de vários factores, interrelacionados, que afectam directamente o desenvolvimento da ligação (por exemplo, a superfície de absorção da pedra/tijolo, a estrutura porosa, a composição da argamassa, a retenção de água na argamassa e a condição de cura) ou indirectamente (por exemplo, a textura da superfície da pedra/tijolo e o operário que executou o trabalho). Os parâmetros que têm mais influência sobre a resistência e a boa ligação nas juntas são a qualidade da argamassa e a capacidade de absorção superficial da alvenaria.

As forças de tracção nas juntas caracterizam-se por serem:

- de pequena intensidade;
- dispersas;
- dependentes do tipo de teste efectuado.

No Quadro 5.10 apresenta-se um resumo dos ensaios, *in situ*, para avaliação das características da argamassa utilizadas nas juntas. As técnicas aqui apresentadas são semi-destrutivas, uma vez que ou necessitam a execução de furos na alvenaria, ou a recolha de fragmentos de argamassa.

Quadro 5.10 - Descrição dos ensaios existentes para definir as propriedades das argamassas [25]

Designação	Descrição	Equipamento necessário	Dados obtidos	Observações
Extracção de uma hélice de argamassa	Consiste na execução de um furo perpendicular à superfície de junta, com a cravação de uma hélice de fixação até esta ter penetrado num determinado comprimento de referência. O arranque da hélice, por tracção, correspondendo a força necessária a uma tensão de rotura ao corte.	Berbequim de percussão, com broca de 4,5 mm. Ancoragens retro-tie e acessório de cravação. Peça e dispositivo de arrancamento.	Força de arranque da hélice	Determinação *in situ* da resistência à compressão da argamassa, desde que se disponha de resultados de ensaios de calibração.
Espessura do risco	Traçado de um risco em linha recta ao longo de uma junta de argamassa, com uma ponta de aço mantendo a pressão constante. Medição da espessura do risco em pontos equidistantes ao longo do risco. Relação entre a média das espessuras medidas com o valor da tensão de compressão da argamassa, através da pressão aplicada.	Pistão com diâmetro de 20 mm, em ponta de aço. Manómetro. Câmara de pressão Régua guia Placa de alumínio para suporte do equipamento.	Espessura do risco Pressão aplicada no traço	Obtenção da tensão de compressão em função da pressão aplicada e da espessura do risco, por calibração prévia do equipamento. Permite, em conjunto com o ensaio de tracção de fragmentos de argamassa, estimar a resistência à compressão da alvenaria.
Tracção de fragmentos de argamassa	Recolha de fragmentos de argamassa, 4, com dimensão aproximada à da gravilha e colagem com resina dos seus extremos a dois blocos de argamassa muito resistente. Aplica-se uma força de tracção ao conjunto, para provocar o afastamento do conjunto.	Resina muito resistente. Dois blocos de argamassa muito resistente. Sistema de aplicação e medição da força de tracção.	Tensão de tracção da argamassa	Permite, em conjunto com o ensaio da medição da espessura de risco, estimar a resistência à compressão da alvenaria.

A resistência das juntas às forças de tracção tem alguma influência na rigidez inicial da parede de alvenaria. No entanto, o seu efeito é desprezado quando a mesma parede se encontra próximo do estado limite último de resistência (incluindo deformação), a menos que a tensão normal seja muito pequena.

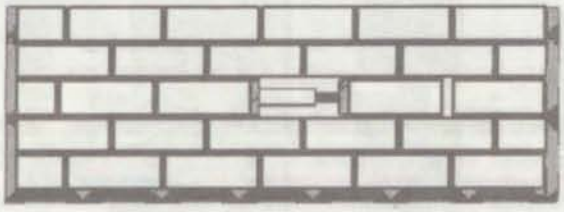


Figura 5.56 – Representação esquemática de um ensaio *in situ de* juntas argamassadas

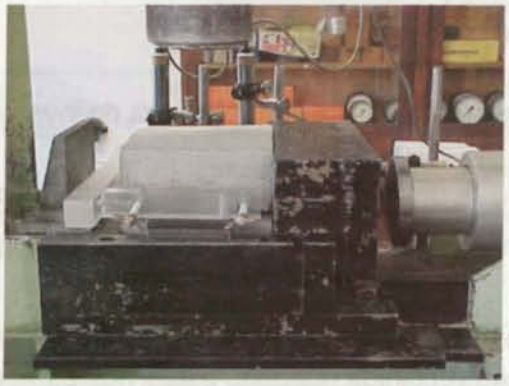


Figura 5.57 – Ensaio laboratorial de juntas argamassadas

5.5.19 Ensaios de Arranque

Estes ensaios são realizados *in situ* e são utilizados na avaliação da resistência das ligações entre elementos de madeira e destes à alvenaria, isto é, são aplicados em paredes de alvenaria mista, características dos edifícios *Pombalinos*.

Figura 5.58 - Ensaio de arranque *in situ* para a caracterização das ligações madeira/alvenaria [adapt. www.oz-diagnostico.pt]

5.5.20 Associação e complementaridade de técnicas de investigação

A utilização de mais do que um método de ensaio, tal como no betão armado, permite ao inspector dissipar dúvidas quando está a investigar uma determinada estrutura.

Como primeiro critério de escolha está o objectivo que se pretende obter com a inspecção e a informação recolhida. Depois, estão razões económicas, uma vez que alguns dos ensaios são caros. Chama-se a atenção para a combinação de ensaios expeditos (esclerómetro, por exemplo), com ensaios mais elaborados como os macacos planos ou o dilatómetro.

De seguida é apresentado um Quadro resumo sobre a combinação de várias técnicas de inspecção, com referencia para o tipo de informação que pode ser obtida inicialmente e em complemento, de acordo com a sequência dos ensaios.

A aplicação conjunta de testes sónicos e de macacos planos duplos, pode fornecer, no futuro, uma correlação entre a velocidade sónica e o módulo de elasticidade.

Quadro 5.11 - Complementaridade de técnicas de inspecção de paredes de alvenaria [25]

Técnica Principal	Informação pretendida	Técnica Complementar	Informação Complementar
Auscultação **Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico** **Radar** **Cross-hole** **Tomografia Sónica**	Detecção de heterogeneidades, incluindo a determinação da sua dimensão.	**Boroscopia** **Termografia**	Visualização/Identificação da sua natureza /vazios, destacamento da alvenaria, elementos de madeira, etc.). No caso da boroscopia poderá haver recolha de amostras.
Boroscopia	Detecção de uma zona deteriorada.	**Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico** **Radar** **Cross-hole** **Tomografia Sónica**	Investigação da extensão dessa zona no elemento.
Resistografia	Detecção de heterogeneidades.	**Termografia** **Radar** **Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico**	Identificação da sua natureza (metal, vazio, elemento de madeira).
Radar	Detecção de heterogeneidades.	**Tomografia** **Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico**	Confirmação e validação dos resultados obtidos pelas duas técnicas.
Termografia	Detecção de elementos de madeira.	**Penetração Pilodyn (ver Capítulo6)**	Caracterização da madeira.
Carotes **Macacos Planos**	Calibração da resistência para medições mais expeditas in situ.	**Esclerómetro** **Penetração** **Pull-Out**	Obtenção das características que o ensaio expedito permite avaliar.
Carotes **Macacos Planos**	Determinação do módulo de elasticidade	**Identificação Dinâmica**	Confirmação dos resultados obtidos nos ensaios.
Impulso mecânico **Ensaios Sónicos** **Radar** **Tomografia**	Avaliação global do estado da estrutura e da dispersão dos materiais com piores características resistentes.	**Carotes** **Macacos Planos** **Dilatómetro**	Avaliação da resistência/deformabilidade. Obtenção de dados para extrapolar os resultados com segurança.
Boroscopia **Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico** **Radar** **Cross-Hole** **Tomografia**	Selecção dos locais onde há incertezas e que devem ser analisados	**Carotes** **Macacos Planos**	Ensaios realizados nesses locais para avaliação dessa resistência.

Carotes **Macacos Planos**	Resultados dos ensaios inconclusivos ou aparentemente inexplicáveis	**Boroscopia** **Radar** **Tomografia**	Inspecção para compreensão dos resultados dos ensaios.
Caracterização dinâmica **Carotes** **Macacos planos**	Calibração dos parâmetros elásticos	**Ensaios Sónicos** **Impulso Mecânico**	Ensaios de calibração dos métodos em que as técnicas se baseiam.

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira

6. Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira

6.1 Introdução

A madeira foi, provavelmente, o primeiro material estrutural utilizado pelo homem. Possui uma grande versatilidade, que lhe permite resistir tanto a esforços de tracção como a esforços de compressão.

Observa-se nos últimos anos a uma cada vez maior utilização da madeira como material estrutural. De entre as razões que fundamentam a sua crescente utilização refira-se a questão ambiental, uma vez que a sua utilização tem um impacto ambiental reduzido, por ser um material reutilizável, proveniente de fontes renováveis.

A sua tecnologia foi evoluindo, surgindo novos produtos que ampliaram, de forma significativa, o seu campo de aplicação, assim como se foi complementando com outros materiais estruturais, o que permitiu melhorar as suas prestações.

A preocupação actual de restaurar e preservar o património habitacional e histórico acarreta custos elevados, que em muitas ocasiões é imperativo controlar e minimizar.

Todas as estruturas devem ser alvo de inspecções periódicas. Assim, da mesma forma que outros materiais estruturais, também as estruturas de madeira devem ser avaliadas.

De entre os objectivos principais da inspecção a elementos estruturais de madeira, refira-se :

- a identificação da origem de eventuais anomalias (agentes de degradação e condições propícias ao seu desenvolvimento);
- a quantificação da resistência e da rigidez dos elementos de madeira;
- a detecção de pontos da estrutura que requeiram reforço ou substituição;
- a recomendação de medidas que impeçam a recorrência dos problemas.

6.2 Caracterização da madeira

A madeira existe sob formas e qualidade muito variadas, sendo, normalmente, dividida

em duas classes principais [92]:

- Resinosas: grupo de espécies de árvores florestais pertencentes ao grupo botânico das gimnospérmicas, caracterizadas por apresentarem folhagem perene e em forma de agulhas ou escamas; sendo que em Portugal as mais comuns são o Pinheiro Bravo (*pinus pinastra*) e o Pinheiro Manso (*Pinus pinea*).

- Folhosas: grupo de espécies de árvores angiospérmicas dicotiledóneas que se caracterizam por apresentarem folhas planas e largas e flor; as mais vulgares em Portugal são o Sobreiro (*Quercus suber*), o Azinho (*Quercus ilex*) e o Eucalipto (*Eucaliptus globulus*).

Cada espécie devido às suas características anatómicas, apresenta propriedades muito diferentes, como se pode comprovar na Figura 6.1.

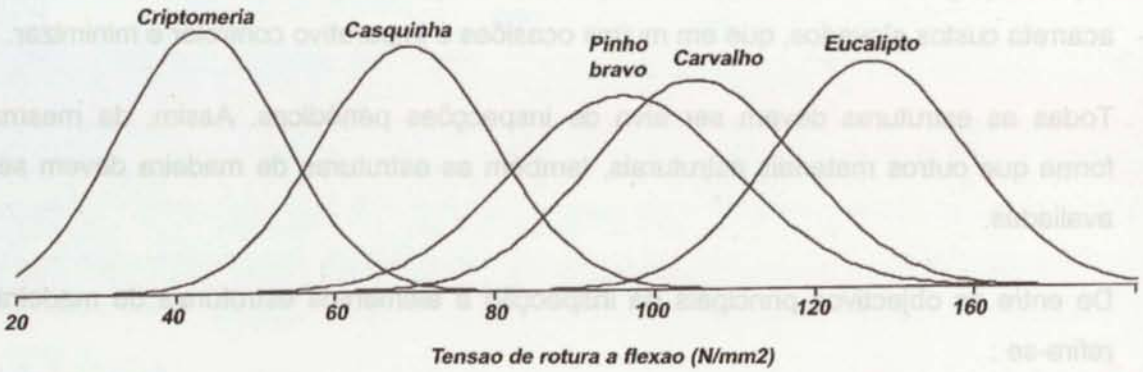


Figura 6.1 - Variação da tensão de rotura à flexão estática para diversas espécies florestais [93]

A anisotropia que caracteriza as madeiras, bem como a heterogeneidade da estrutura fibrosa, faz com que as suas características sejam distintas dos restantes elementos estruturais.

A heterogeneidade da madeira é devida à disposição alternada de dois tipos diferentes de elementos resistentes:

. o *anel de Primavera*: mais duro, menos denso e menos resistente;

. o *anel de Outono*: mais escuro, mais denso e 10 vezes mais resistente.

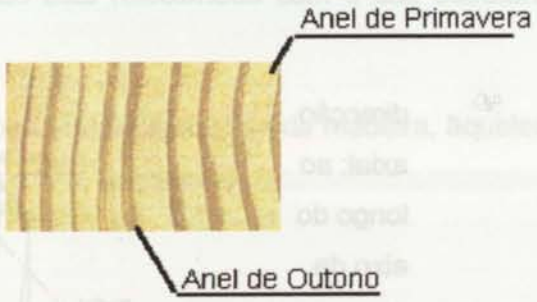


Figura 6.2 - Heterogeneidade da madeira

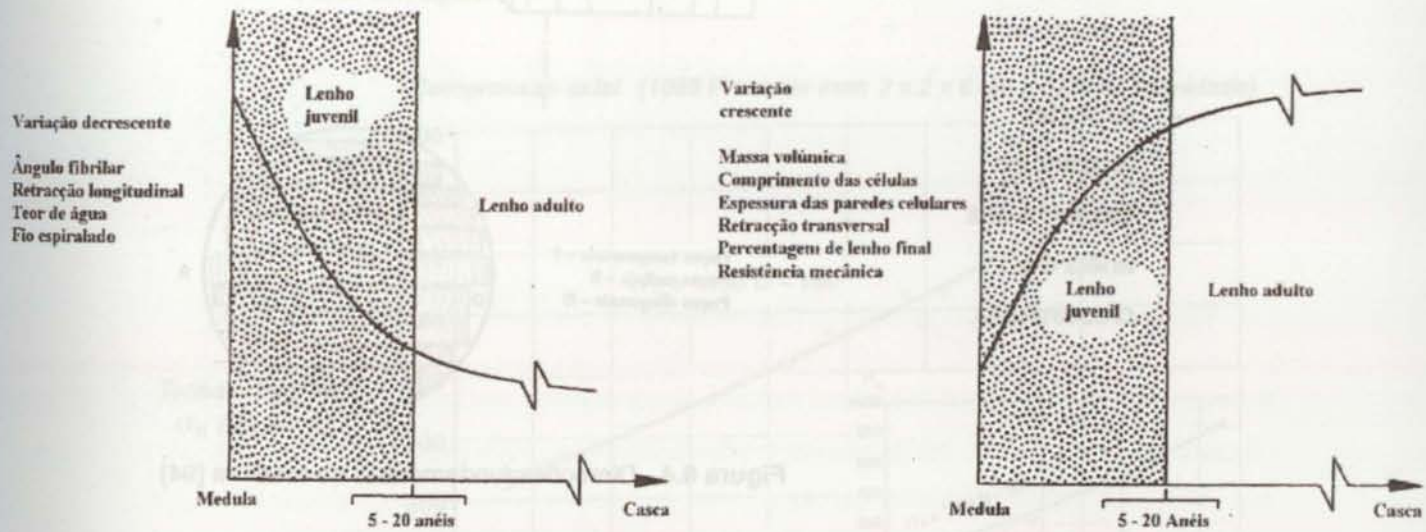


Figura 6.3 - Variação de propriedades na transição lenho juvenil/lenho adulto [93]

A constituição e a orientação das fibras da madeira, conferem-lhe um comportamento fisico-mecânico variável, existindo três direcções diferentes:

- direcção axial: ao longo do eixo da árvore;
- direcção radial: do centro para a periferia;
- direcção tangencial: tangente aos anéis de crescimento.

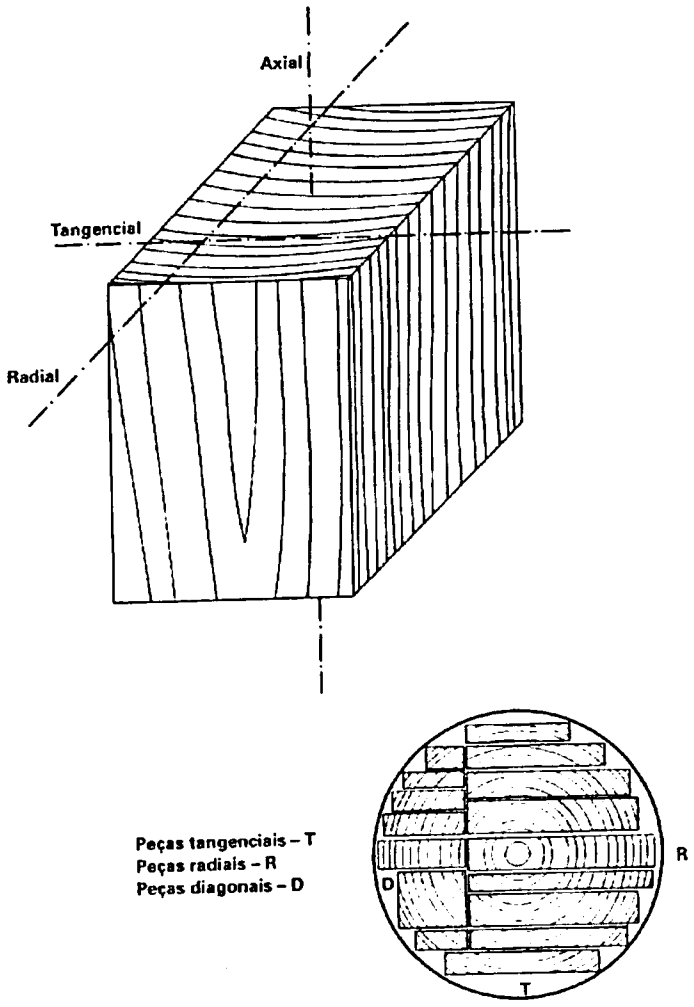


Figura 6.4 - Direcções fundamentais da madeira [94]

Assim, as características dos elementos de madeira dependem de factores intrínsecos e externos, pelo que a determinação das suas propriedades e comportamento se revela mais complexa e difícil, quando comparada com os outros materiais estruturais.

As características da madeira são ainda condicionadas por outros factores, como, por exemplo [95]:

- as condições de crescimento das árvores;
- o clima;
- a composição e humidade do solo;
- a densidade de povoamento,

que originam diferenças na espessura da camada de crescimento, que por sua vez, influenciam as propriedades da madeira.

A madeira é um material higroscópico, sendo capaz de captar a humidade do vapor de ar. A maior ou menor apetência de captação está relacionada com a sua estrutura celular.

De entre os factores que influenciam o comportamento mecânico da madeira, aqueles que assumem maior relevo são [94]:

- a densidade;
- a inclinação do fio;
- a presença de defeitos;
- o teor em água.

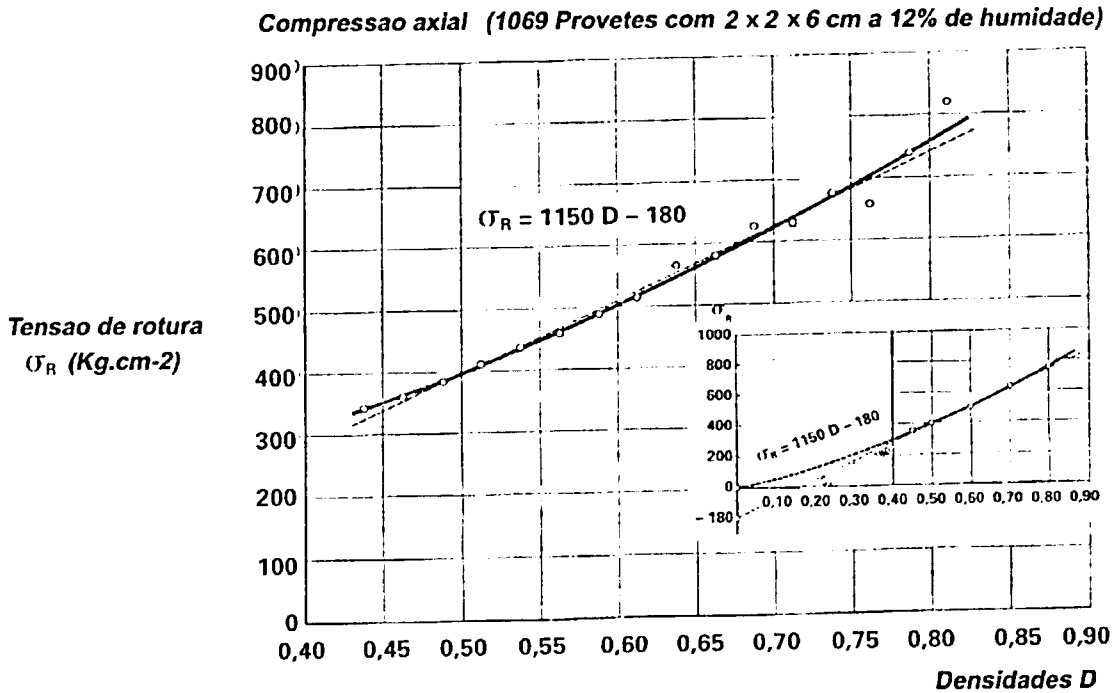


Figura 6.5- Curva média correspondente à relação entre as tensões de rotura em compressão axial e as densidades, com uma humidade de 12 %. Pinho bravo (Mata Nacional de Leiria) [94]

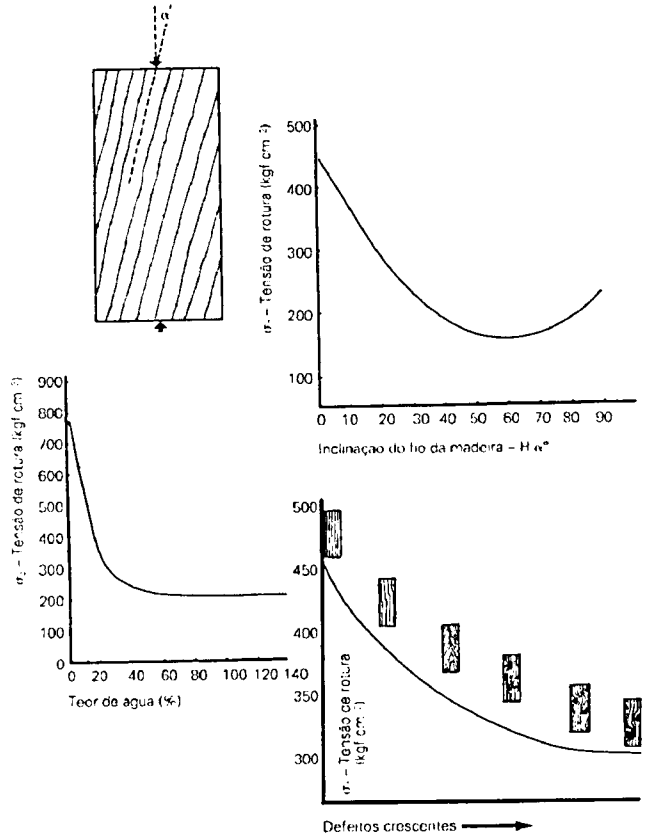


Figura 6.6 - Incidência de defeitos na resistência da madeira à compressão axial [94]

A madeira como material estrutural natural, é constituída por uma matriz de celulose (fibras) e lenhina (cola), contendo ainda água, amido e açúcares. Este facto faz com que dela se possam alimentar certas plantas e insectos. Por isso, ela degrada-se por acção de agentes biológicos, tais como, os fungos, as bactérias e os insectos xilófagos.

A susceptibilidade das madeiras ao ataque dos agentes biológicos, depende, sobretudo, da espécie florestal que a produziu. Os factores que condicionam essa diferença entre as várias espécies são [96]:

- a densidade, a espessura das camadas anuais e a percentagem de lenho de Outono: camadas anuais menores e maior percentagem de lenho de Outono provocam o aumento da densidade do elemento;

- o diâmetro e o tipo de poros: o diâmetro dos poros condiciona o tamanho dos ovos que são depositados e a dimensão das larvas;

- a quantidade de cerne: geralmente o cerne (parte interior dos troncos), que possui uma resistência mecânica superior, é composto por tecidos

vegetativamente "mortos", pelo que a sua composição é diferente da do borne (parte exterior do tronco);

- o teor em substâncias nutritivas (açucares e amido), em substâncias tóxicas ou repelentes (taninos, resinas gomas, etc.) e em água.

6.2.1 A madeira como material estrutural. Vantagens e desvantagens

Os elementos estruturais em madeira oferecem as seguintes vantagens:

- grande resistência, sobretudo se o esforço actuante, actua adequadamente na direcção das fibras;
- material com pouco peso: fácil manipulação, transporte, montagem, etc.;
- a baixa condutividade térmica e estrutura fibrosa fazem com que seja um material, com um comportamento ao fogo, aceitável;
- bom isolante térmico;
- avisa antes do colapso.

De entre as desvantagens cite-se:

- a vulnerabilidade a ataques bióticos e abióticos;
- limitação geométrica, devido à estrutura arbórea;
- anisotropia.

6.3 Factores de degradação de estruturas de madeira

A madeira, sendo um material estrutural natural, isto é, orgânico e não sujeito a processos construtivos, tem uma composição complexa, composta por carbono, hidrogénio, oxigénio e azoto, em conjunto com as ditas substâncias orgânicas. Assim, está sujeita à decomposição da sua estrutura molecular, o que conduz à desintegração estrutural e sua consequente destruição, não apenas devido à acção de agentes físicos, químicos e mecânicos, mas também devido a agentes biológicos, quer actuando isolada quer simultaneamente.

Pode-se, assim, dividir em três grandes grupos, os danos que ocorrem em estruturas

de madeira:

- de origem biológica: relacionados com organismos xilófagos;
- de origem não biológica: relacionados com a exposição a intempéries e fogo;
- de origem estrutural.

Fazendo uma abordagem mais específica, pode-se dividir as causas que afectam as estruturas de madeira em três grupos:

a) ao nível dos materiais:

a.1 - biodegradação;

a.2 - alteração volumétrica;

a.3 - incompatibilidade nas ligações com outros materiais.

b) ao nível do elemento estrutural:

b.1 - fissuração;

b.2 - comportamento reológico;

b.3 - alteração da forma geométrica.

c) ao nível das ligações:

c.1 - inadequação geral de resistência e rigidez;

c.2 - perda de eficiência;

c.3 - escorregamentos diferidos no tempo.

O primeiro passo que se dá para intervir num edifício, com o objectivo de conhecer o seu estado e definir qual o nível de intervenção, é a sua inspecção. Antes de esta se efectuar, devem-se conhecer os processos patológicos característicos das estruturas de madeira.

O conteúdo de água de um elemento de madeira está na base da divisão estabelecida para as classes de risco de aplicação (ver Quadro 6.1). O risco de ataque biológico

depende da localização da peça de madeira. Para além destes factores, a conservação do material está também ligada à sua durabilidade natural e à sua impermeabilidade, na medida em que estas de lhe conferem protecção.

Se se determinar a classe de risco e se a madeira for devidamente preparada e utilizada, sendo submetida a um tratamento preservador quando necessário, a probabilidade de surgirem casos graves de degradação de origem biótica, causada por fungos, carunchos ou térmitas, é bastante reduzida.

Quadro 6.1 - Classes de risco de aplicação de madeira maciça [97], [98] e [99]

Classes de risco	Situações gerais de serviço	Exposição à humidade	Teor de água de madeira	Principais agentes biológicos
1	sem contacto com o solo, sob coberto (exemplo: pavimentos)	Nenhuma	20 % no máximo	Carunchos Térmitas
2	Sem contacto com o solo, sob coberto mas com risco de humidificação. (exemplo: estruturas de cobertura)	Ocasional	Ocasionalmente > 20 %	Carunchos Térmitas Podridão castanha
3	Sem contacto com o solo, não coberto. (exemplo: caixilharia)	Frequente	Frequentemente > 20 %	Carunchos Térmitas Podridão castanha Podridão branca
4	Em contacto com o solo ou água doce. (exemplo: fundações)	Permanente	Permanentemente > 20 %	Carunchos Térmitas Podridão castanha Podridão branca Podridão mole
5	Na água salgada (exemplo: pontões)	Permanente	Permanentemente > 20 %	Xilófagos marinhos

Ao longo deste capítulo serão enunciados e discutidos os problemas que afectam este tipo de estruturas e suas principais consequências.

6.3.1 Danos de origem biológica

A principal causa da deterioração da madeira são os agentes biológicos (fungos, térmitas e caruncho). Assim, importa identificá-los e conhecer os seus mecanismos de acção, por forma a estabelecer medidas preventivas adequadas e eficazes. Existem vários tipos de agentes biológicos que podem afectar as estruturas de madeira. A cada tipo, estão ligados organismos com modos de actuação distintos que, por sua vez, também provocam consequências diferentes nas estruturas. Por isso, é necessária a sua correcta identificação, para posteriormente se intervir de modo adequado.

Os grandes grupos de agentes xilófagos podem ser classificados da seguinte maneira [100]:

- fungos xilófagos;
- insectos de origem larvar (ou caruncho);
- insectos sociais (ou térmitas);
- outros insectos;
- xilófagos marinhos.

No Quadro 6.2 apresentam-se as condições de humidade necessárias para o desenvolvimento de bolores e fungos, factores preponderantes para a degradação dos elementos estruturais de madeira. Constata-se que os bolores começam-se a desenvolver em elementos que possuam um teor de humidade superior a 15 % e os fungos, que provocam a diminuição da capacidade resistente da madeira, para valores superiores a 20 %.

6.3.1.1 Fungos xilófagos

Os fungos são vegetais que vivem de forma saprófita, isto é, que se alimentam de elementos mortos, ou de forma parasita, alimentando-se de substâncias de outros animais ou vegetais, com quem vivem em união. A sua presença pode ser detectada pela coloração anormal da madeira (presença superficial), pela degradação do material ou pela presença de insectos xilófagos que os acompanham.

Quadro 6.2 - Condições de humidade necessárias para o desenvolvimento de bolores e fungos [101]

Humidade relativa [%]	Colonização	Crescimento	Produção de esporos	Perda de resistência
0-14	Nenhuma	Nenhum	Nenhuma	Nenhuma
15-19	Bolores com esporos (poucas espécies)	Muito lento	Desprezável	Nenhuma
20-24	Bolores, esporos	Lento	Mínima	Nenhuma
	Podridão castanha, rizomorfos	Lento	Lenta	Muito lenta
25-29	Bolores, esporos	Moderado	Moderada	Nenhuma
	Podridão castanha, rizomorfos	Moderado	Nenhuma	Lenta
	Podridão castanha, micélio	Lento	Nenhuma	Lenta
	Podridão branca, micélio	Muito lento	Nenhuma	Muito lenta
30-49	Bolores, esporos	Rápido	Prolífica	Nenhuma
	Podridão castanha, rizomorfos	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão castanha, micélio	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão branca, micélio	Lento	Limitada	Lenta
	Podridão castanha, esporos	Rápido		
	Podridão branca, esporos	Lento		
50-89	Bolores, esporos	Rápido	Prolífica	Nenhuma
	Podridão castanha, rizomorfos	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão castanha, micélio	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão branca, micélio	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão castanha, esporos	Rápido		
	Podridão branca, esporos	Rápido		
90-160	Bolores, esporos	Rápido	Prolífica	Nenhuma
	Podridão castanha, rizomorfos	Lento	Limitada	Lenta
	Podridão castanha, micélio	Lento	Limitada	Lenta
	Podridão branca, micélio	Rápido	Limitada	Rápida
	Podridão castanha, esporos	Lento		
	Podridão branca, esporos	Rápido		
>160	Não possível	Nenhum	Mínima	

Um dos aspectos mais importantes é a sua dependência da humidade. Estudos revelaram que o conteúdo mínimo de humidade na madeira que permite o seu

desenvolvimento, é de cerca de 18 a 20 %. Por consequência, estruturas que possuam um valor superior estão expostas a um ataque por fungos. Pelo contrário, naquelas que tiverem um valor inferior, a acção dos mesmos torna-se impossível ou pouco provável. O grau de humidade óptimo situa-se entre 35 e 50 %.

Os fungos xilófagos podem ser divididos em dois grandes grupos: no primeiro temos os bolores e os fungos cromogénios e no segundo os fungos de podridão.

O bolor e os fungos cromogénios alimentam-se de substâncias de reserva da madeira e não produzem degradação nas paredes celulares da mesma, pelo que não afectam as suas propriedades mecânicas. São facilmente detectados pela alteração da coloração da madeira tomando a superfície de madeira mais escura. Também poderá formar-se uma espécie de tufo de algodão, designado por proliferação de algodão, transparente ou com tonalidades que vão desde o branco ao negro, sendo que as mais características são os azulados.

Embora não sejam perigosos são reveladores de um maior risco a que uma determinada estrutura está exposta, pois criam condições ideais para que se desenvolvam fungos de podridão.

Os fungos de podridão são aqueles que provocam maiores danos na madeira. Ao alimentarem-se dos componentes das paredes celulares, podem chegar a destruir completamente uma estrutura. O seu efeito traduz-se na perda de densidade e de resistência, acompanhados por alterações na coloração da madeira. Numa fase inicial não é fácil detectar a sua presença, pois ela restringe-se ao interior da estrutura. Com o seu desenvolvimento acentua-se a alteração de cor e a madeira começa a perder peso. Numa fase terminal, pode-se chegar à destruição total da estrutura, com a perda completa das suas propriedades mecânicas.

A podridão pode classificar-se em 3 tipos:

- podridão castanha ou cúbica;
- podridão branca ou fibrosa;
- podridão branda ou mole.

A podridão cúbica é a mais grave e perigosa, e produz-se através de fungos que se alimentam preferencialmente de celulose, deixando um resíduo de cor castanho escuro, formado principalmente por lenhina. Ao secar a peça, o material tende a

gretar, formando uma estrutura de pequenos cubos ou prismas que se desintegram facilmente entre os dedos, como se fosse pó.

Figura 6.7 - Danos produzidos por fungos de podridão castanha [100]

A podridão branca é produzida por fungos que se alimentam preferencialmente de lenhina. A madeira afectada toma um aspecto esbranquiçado devido ao complexo celulósico resultante, apresentando um aspecto fibroso. Também se pode designar por podridão corrosiva ou desfibrilante. Atacam mais as madeira da espécie frondosas que as da espécie conífera.

A podridão branda ou mole é originada por fungos interiores e atacam principalmente a celulose das paredes secundárias. A madeira afectada tem um aspecto final esponjoso, parecido com queijo fresco. Este tipo de podridão surge quando o teor de humidade é muito elevado, quer no ambiente quer na própria madeira.

Resumindo, os sintomas mais importantes de elementos de madeira atacados por fungos de podridão são:

- perda de resistência, com possível desagregação da madeira;
- som oco, ou alteração do som, quando se golpeia a madeira;
- descoloração da madeira, que pode ser mais clara ou mais escura, dependendo do tipo de fungo que a ataca;
- odor a mofo;
- possível presença de insectos que infectam a madeira atacada por fungos;

6.3.1.2 Insectos de origem larvar ou carunchos

A sua principal característica é que se alimentam da madeira na sua fase larvar, sendo que os mais conhecidos pertencem à ordem dos *coleópteros*, vulgarmente conhecidos por caruncho. Ao alimentarem-se, criam galerias na madeira, diminuindo a sua capacidade resistente. A zona da madeira particularmente afectada por estes insectos é o borne. O período de tempo em que ocorre esta fase larvar varia com o tipo de insectos. Após este período, as larvas vão-se aproximando do exterior criando orifícios de saída que indicam, por consequência, a sua presença. De entre os xilófagos coleópteros saliente-se os *anóbidos*, os *ceranbícios*, os *líctidos* e os *curculiónidos*.

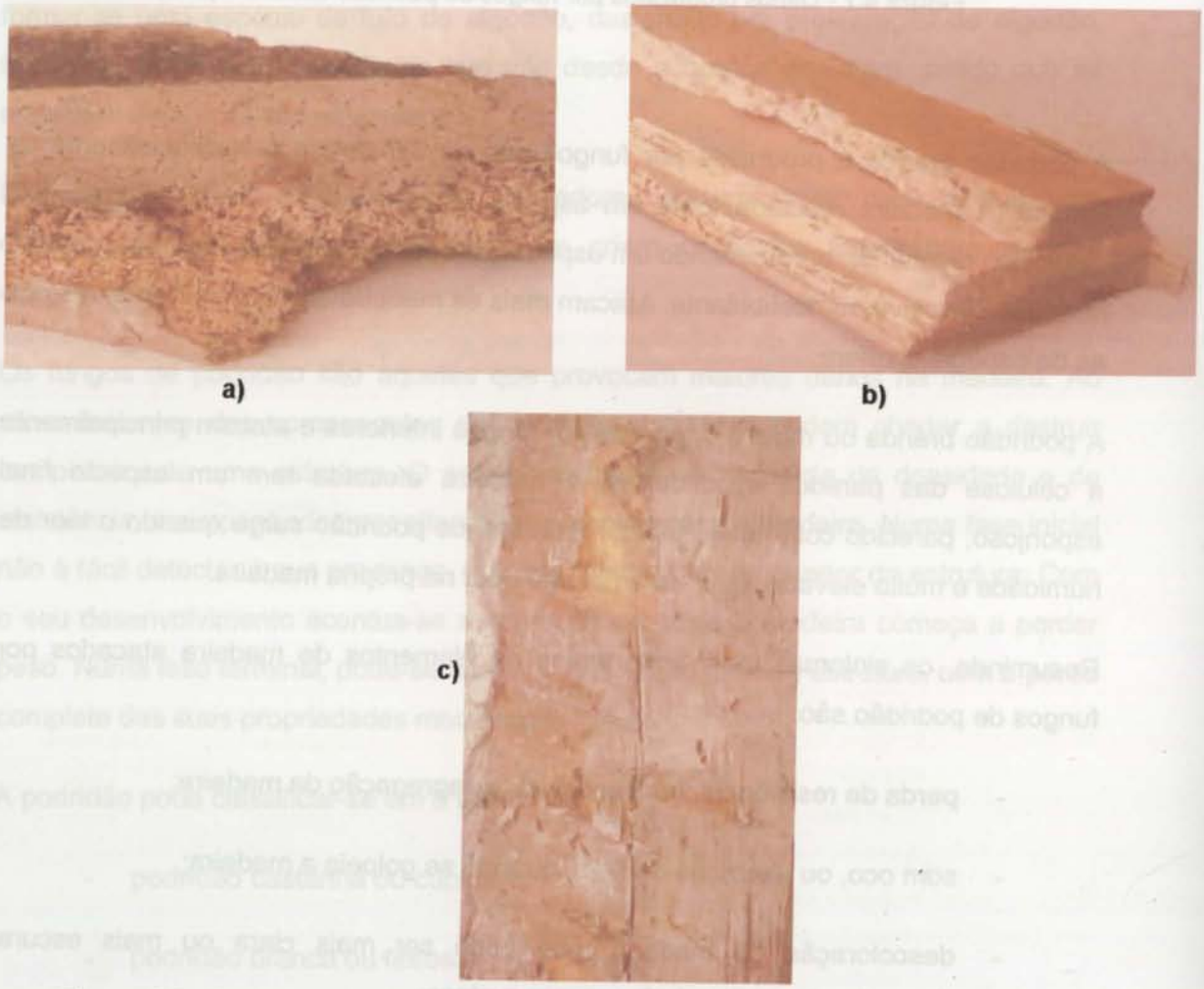


Figura 6.8 - Danos produzidos por: (a)anóbidos, (b)líctidos e (c) cerambícidos [100]

Os sintomas mais comuns que podem indiciar que um elemento em madeira foi atacado por insectos são:

- pequenos orifícios na superfície da madeira. Deve-se observar se são de origem recente e se existe serrim na sua proximidade (factor que indica actividade);

- túneis perto da superfície;

- existência de larvas no interior das peças atacadas;

- irregularidade na superfície do elemento;

- ruídos provocado pelas larvas ao roer a madeira.

6.3.1.3 Insectos sociais ou térmitas

As térmitas são insectos da ordem *Isoptera* que possuem uma organização social avançada. Constituem-se como um agrupamento de indivíduos em que os diferentes tipos ou castas desempenham diferentes funções no desenvolvimento das colónias.

Pode-se classificar as térmitas segundo dois tipos principais, de acordo com a postura dos ninhos:

- térmitas subterrâneas: criam os ninhos no subsolo;

- térmitas de madeira seca: criam os ninhos na madeira.

As térmitas subterrâneas, espécie *Reticulitermes lucífugos (Rossi)*, a mais comum em Portugal [102] têm o ninho no solo e quase sempre fora dos edifícios atacados. O seu ataque é feito subterraneamente, onde podem formar ninhos secundários. Há três factores essenciais para a sua sobrevivência: a escuridão, uma temperatura moderada e relativamente constante e humidade permanente, condições que o solo possui.

Como se disse, necessitam de uma percentagem de humidade relativa do ar de cerca de 95 a 100 % (ar quase saturado). Na sua actividade recolhem terra húmida, com a qual recobrem os canais ou galerias que constróem na madeira, para garantir a conservação dessa humidade.

Na madeira abrem galerias paralelas à direcção das fibras, deixando uma capa exterior intacta, que oculta a actividade interior. Os danos originados são característicos, as galerias. Estas servem como passagem entre as diversas peças de madeira, onde se mantém, através da sua acção, um grau de humidade elevado.

Normalmente, necessitam de vários anos para provocar danos perigosos para um edifício.

Figura 6.9 - Danos produzidos por térmitas [100]

As térmitas de madeira seca, espécie *Criptotermes brevis (Walker)*, presentes apenas na ilha da Madeira [102], desenvolvem-se muito lentamente, especialmente em vigas de cobertura, em móveis e em armários. A sua necessidade de humidade corresponde a um nível na ordem dos 15 %, que é o limite máximo necessário à sua actividade (ataque).

A sua capacidade de destruição é elevada, sendo que se detectaram estruturas de cobertura com danos significativos, ao fim de um ou dois anos.

6.3.1.4 Outros insectos

Estão incluídos os insectos da ordem *Hymenoptera*, cuja acção em estruturas de madeira é menor para o tipo de madeira utilizada em edifícios ou na construção.

Relate-se, como exemplo, a vespa da madeira (*sirícidos*) que ataca as coníferas quando são cortadas, incorporando-se posteriormente nos edifícios. De qualquer modo não voltam a atacar a madeira seca. As larvas caracterizam-se por formar galerias com secção circular, com diâmetros de 4 a 7 mm, e com um comprimento de 20 a 45 cm.

6.3.1.5 Xilófagos marinhos

Os danos mais importantes em estruturas de madeira, em contacto com a água marinha, são produzidos por moluscos e crustáceos. Distinguem-se pela forma do ataque, pelas diferenças anatómicas e pelo aspecto que tem a madeira degradada.

Os moluscos, produzem uma degradação no interior da madeira que não é visível, enquanto que os crustáceos desenvolvem uma degradação superficial, pelo que visível.

Os moluscos utilizam a madeira como alimento, junto com substâncias orgânicas dissolvidas na água. Produzem galerias de 10 a 12 mm de diâmetro. As paredes das galerias aparecem cobertas por uma capa de caliça.

Os crustáceos actuam em massa e a destruição causada pode ser de grande significado. Abrem galerias com comprimento inferior a 1 cm, com diâmetro de 2mm, ficando a madeira toda crivada por estas galerias. Como a separação entre elas é muito pouco espessa, parte-se com grande facilidade devido ao impacto da água. Assim, ao fim de algum tempo, forma-se uma nova superfície de ataque, sendo que, simultaneamente, se produz uma diminuição da resistência do elemento de madeira, por perda de secção. O desgaste anual, em profundidade, varia de 3 a 6 cm.

Quadro 6.3 - Resumo de alguns dos danos mais comuns, de origem biológica [94]

Defeito	Definição	Causas principais	Consequências tecnológicas	Ocorrência mais frequente
Azulado	Mancha provocada por colonização de fungos cromogéneos	Invasão do lenho por hifas do fungo, associada a digestão de células *parenquimatosas*, sobretudo dos, sobretudo dos raios	Desvalorização da madeira, devido à alteração cromática e certa modificação do comportamento físico, mecânico e tecnológico.	Madeiras de todo Pinheiros e Choupos.
Podridão	Biodegradação micótica de componentes fundamentais da substância lenhosa (lenhina e / ou celulose)	Ataque de fungos e outros microorganismos (bactérias) que se nutrem de constituintes químicos da substância lenhosa ou provocam efectiva erosão da parede celular.	Perda de peso e de dureza com a progressiva diminuição de resistência mecânica, bem como frequente modificação de textura e cor do material.	A infecção pode acorrer na árvore, durante a exploração da madeira ou no seu processamento tecnológico, bem como durante o seu desempenho funcional.
Podridão incipiente	Alteração cromática, sem modificação perceptível de propriedades físicas e mecânicas da madeira	Reacção natural dos constituintes químicos do lenho a acções enzimáticas de fungos xilóvoros	Alteração de cor da madeira	Ocorre, sobretudo, em madeiras húmidas ou com elevados teores de água-

Podridão alveolar Cardido	Podridão caracterizada pela definição de pequenos alvéolos ou bolsas revestidas por enfeltrado micelar branco	Fase avançada do ataque de fungos do ardido (*Phellinus pini; Ph. Torulosus*)	Progressiva destruição da madeira, por sistemática decomposição da lenhina.	Cerne das resinosas e cerne do eucalipto.
Podridão cúbica	Podridão que em fase avançada se caracteriza por fendimentos ortogonais mais ou menos planos, definindo cubos de consistência friável	Podridão provocada por *Serpula lacrymans*	Total inutilização da madeira. Gravíssima contaminação de madeiras aplicadas em edifícios e ambientes de certo modo confinados.	
Podridão fibrosa	Podridão que em fase avançada se caracteriza por aspecto fibroso de fácil desagregação do lenho.	Destruição causada por *Coriolus* versicolor em madeiras em contacto com o solo, bem como por *Ungulina annosa* em pinhos e *Trametes trabea* em eucalipto	Aparente desfibração da madeira, com perda de resistência mecânica	Ataque frequente ao cerne de diversas árvores: por exemplo carvalhos, azinheiras, sobreiros.
Podridão branca	Podridão caracterizada por decomposição de todos os componentes fundamentais da substância lenhosa (lenhina e celulose), reduzindo-a a um resíduo acizentado	Biodegradação fúngica	Completa ruína da madeira	
Podridão castanha	Tipo de podridão produzida por fungos que atacam sobretudo a celulose, deixando um resíduo castanho friável de lenhina não atacada	Característica do ataque de *Poria sp.*	Ruína progressiva da madeira	Madeira em obra e / ou construção (pontes, caixilharia, etc.)

Podridão lamelar	Podridão que na fase terminal se caracteriza por fendimentos mais ou menos paralelos próximos, frequentemente com massas intercalares brancas	Degradação frequentemente no colo e cerne de árvores	Completa ruína da madeira	Cárie de certas folhosas.
Podridão mole	Degradação provocada por certos microfungos que decompõem sobretudo a lamela média da parede celular das fibras	Ataques de *Phialophora hoffmannii* e *Chaetomium globosus* a resinosas	Amolecimento e perda de resistência mecânica das madeiras	Longa permanência da madeira a drásticas condições de conservação.
Podridão seca	Tipo de podridão que confere à madeira aspecto ressequido independente da fissuração	Ataque de certos fungos, nomeadamente de *Serpula lacrymans*	Completa ruína da madeira	Carpintarias de edifícios em contacto mais ou menos directo com alvenarias ou fundações mal isoladas de focos de humidade.
Podridão húmida	Tipo de podridão que confere à madeira aspecto humedecido, independentemente da natureza da destruição	Ataque de fungos, nomeadamente *Coniophora puteana*, caracteristicamente cúbica e castanha.	Destruição completa do lenho, ficando reduzido a resíduo pulvurento	Frequente emcaves e minas, reconhecido como a principal causa de ruína das madeiras nas galerias subterrâneas.
Bolor	Designação corrente de fungos que se desenvolvem na superfície das peças e de outras substâncias orgânicas, conferindo-lhe aspecto laniginoso ou mucilaginoso	Formações vegetativas e reprodutivas de fungos (hifas e esporos) que crescem na superfície de madeira excessivamente húmida.	Conspurcação das peças, que pode ser removida por escovagem ou aplainamento, ocasionando custos acrescidos de preparação.	Madeiras verdes ou húmidas

Madeira carunchosa Madeira carcomida Madeira picada	Madeira atacada por insectos xilófagos ou lenhícolas, caracterizada por galerias, furos ou picos e serrim, devido à sua actividade, sobretudo na fase larvar.	Infestação por insectos que se desenvolvem na madeira durante a maior parte da sua vida.	Mais ou menos graves ou total destruição das zonas mais vulneráveis das peças de madeira (sobretudo o borne).	Principalmente madeiras secas, aplicadas em construção de edifícios (estruturas e carpintarias, decoração e pavimentos), mobiliário, ornatos, obras de arte, etc. .
Madeira bichada	Madeira atacada por insectos não exclusivamente Coleópteros, mas de outras Famílias, que provocam ataques subcorticais, praticam galerias profundas ou superficiais e ruínas cavernosas, totalmente destruidoras do material lenhoso.	Infestação de insectos das Famílias *Isoptera*, *Sericida*, *Platipodida*, *Teredinida* e *Quelurida*, etc. que depredam mais ou menos intensamente a madeira, frequentemente utilizando-a sobretudo como abrigo ou substrato de cultura de fungos para nutrição própria.	Ruína de progressiva gravidade, com sucessiva afectação de suas propriedades, transformando-a num resíduo mais ou menos grosseiro ou numa estrutura bastante fragilizada. Com frequência, alguns deles veiculam agentes de infecção que decompõem o material.	Infestações mais frequentes em madeiras redondas e em fases iniciais de processamento tecnológico e madeiras em serviço em condições de alto risco (húmidas, imersas em águas salobras, longamente parqueadas em condições inadequadas, etc.).
Insecto perfurador	Xilófago que penetra nas peças de madeira em profundidade, sobretudo no estado verde.	*Criocephalus polonicus*	Profunda depreciação das madeiras, quer pelo larvado em toda a espessura, quer pela veiculação de agentes cromogéneos ou lenhívoros (fungos).	Árvores resinosas de povoamentos percorridos por fogos. Toragem parqueda de resinosas.

Térmita	Insecto social Isóptero.	Colonização pela formiga branca (*Reticulitermes lucifugus*)	Total depredação da madeira, incapaz de qualquer desempenho, por ficar reduzida a um resíduo terroso friável.	Madeiras aplicadas quando em contacto com o solo, com alvenarias ou fundações húmidas, mesmo quando colocadas secas.
Xilófago marinho	Fauna subaquática que depreda madeiras imersas em águas salobras ou salgadas	Moluscos (*Teredo*) e Crustáceos (*Limnória e Querula*) que perfuram mais ou menos profundamente as madeiras, galerias por vezes revestidas de película calcárea.	Ruína mais ou menos intensa da madeira e consequente afectação de seu desempenho funcional.	Madeiras submersas em estuários, zonas portuárias e madeiramentos de construção naval.

6.3.2 Danos de origem não biológica

De entre os agentes destruidores não biológicos, citem-se os agentes atmosféricos ou meteorológicos, os agentes químicos e o fogo.

6.3.2.1 Agentes atmosféricos ou meteorológicos

O sol e a chuva constituem os principais agentes atmosféricos ou meteorológicos. O seu campo de actuação é a superfície de elementos de madeiras, situados no exterior das estruturas, e a sua protecção.

Os agentes atmosféricos, produzem nas estruturas as seguintes anomalias:

- A luz solar, que actua sobretudo através dos raios ultravioletas e infravermelhos, provoca alterações na camada superficial exposta. Tradicionalmente a acção dos raios ultravioleta provoca o escurecimento da superfície: primeiro tende para o castanho e posteriormente toma a tonalidade cinzenta, característica da madeira "velha". No entanto, tal acção não se traduz na perda de qualquer propriedade mecânica.

- A acção da chuva provoca a deslavagem do material alterado pela luz solar da superfície e a posterior exposição da madeira subjacente.

- Pode ocorrer a aparição de fendas superficiais associadas aos ciclos de humidificação e secagem de grande amplitude.

É precisamente a rápida alteração do teor de húmidade da camada superficial das estruturas de madeira que está associada à deterioração produzida pelos agentes atmosféricos.

A diferença de humidade entre o interior e a camada superficial tende a aumentar o volume da peça. Tal facto resulta num aumento de tensão da estrutura, o que provoca a existência de curvaturas e fendas.

Os raios infravermelhos provocam uma degradação indirecta na madeira. O aumento superficial da temperatura é responsável pelo aparecimento de fendas na superfície exposta, o que acarreta a subida de resina à superfície. O teor de humidade dos elementos estruturais em madeira é função directa da sua temperatura. A superfície exposta sofre um processo de aquecimento que origina uma perda de humidade superficial. Como o interior da peça se mantém mais frio, o teor de humidade local é diferente. Esta diferença de teor de humidade traduz-se no aparecimento de tensões, uma vez que a superfície tende a contrair-se ao diminuir o teor de humidade por acção do calor. No entanto, esta contracção é dificultada pela parte interior da peça, o que provoca o aparecimento das fendas.

A humidade, por si só, não degrada a madeira, uma vez que a variação da resistência mecânica e a variação dimensional das peças, associadas a variações do seu teor de água, são reversíveis. No entanto, se a sua durabilidade natural for baixa, e em associação, não for efectuado qualquer tratamento preventivo, a estrutura tende a tornar-se susceptível ao ataque dos fungos e/ou térmitas. Acresce que, a exposição a humidade elevada não só implica uma perda transitória de resistência mecânica, como amplia os fenómenos de fluência da madeira, podendo acarretar grandes deformações sob a acção de cargas.

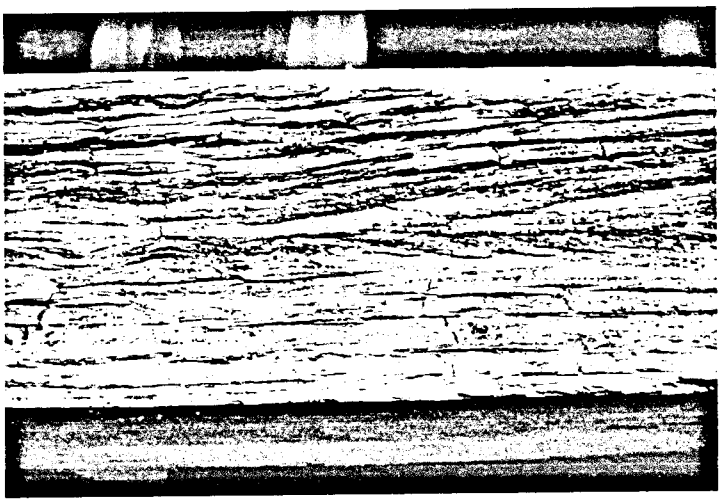


Figura 6.10 - Efeito da radiação solar: fotodegradação

6.3.1.2 Produtos químicos

A acção de agentes químicos sobre as estruturas de madeira traduz-se, normalmente, por simples alteração da sua cor. A madeira é muito resistente aos agentes químicos. No entanto, sofre alteração pela acção de ácidos fortes, por lexívias alcalinas e até por detergentes. Por exemplo, a cal afagada, em estado fresco, pode exercer uma acção corrosiva se ficar muito tempo em contacto com a madeira.

Enquanto que os ácidos afectam a celulose e não actuam sobre a lenhina, as substâncias alcalinas actuam de forma contrária, isto é, provocam a degradação da lenhina, o que pode conduzir a uma perda da resistência e consistência da mesma.

Foram detectadas estruturas de madeira deterioradas pela acção de produtos químicos em zonas industrializadas altamente contaminadas.

6.3.1.3 Acção do fogo

A madeira, bem como os seus produtos derivados, é constituída por celulose e lenhina, que por sua vez são compostas por carbono, hidrogénio e oxigénio. São estes componentes que tornam a madeira combustível.

Constata-se que quando a madeira se encontra exposta a um incêndio em pleno desenvolvimento, apresenta um comportamento de características muito favoráveis para a estrutura. Inicialmente, produz-se uma combustão rápida da superfície da madeira, originando uma capa carbonizada. Por baixo dessa capa existe uma outra,

onde se produz a pirólise da madeira e, finalmente, debaixo desta última aparece madeira que não é afectada pelo fogo.

A capa carbonizada é seis vezes mais isolante que a própria madeira. Assim, o interior da peça mantém-se frio e, por consequência, as suas propriedades físicas e mecânicas permanecem inalteradas. Na grande maioria dos casos, a perda da capacidade portante da estrutura deve-se à redução da sua secção.

A combustão dos elementos em madeira depende da relação entre a superfície e o volume da peça. Quanto maior for esta relação (por exemplo, em peças de pequena esquadria) mais fácil é a ignição e mais rápida é a propagação da chama. A existência de fendas também incrementa os efeitos do fogo. Quanto mais elevada for a densidade do elemento de madeira, menor é a possibilidade de começar um incêndio e a combustão é mais lenta. O teor de humidade é outro factor que influi no comportamento de uma estrutura de madeira ao fogo.

Um aspecto importante que está relacionado com os incêndios é o intervalo de tempo que decorre entre o fogo e as obras de reparação. Assim, a água utilizada na sua extinção, e a que surge através de coberturas afectadas pelo incêndio, por exemplo, pode desencadear um processo de podridão.

6.3.3 Danos de origem estrutural

A deterioração que uma estrutura de madeira pode sofrer, devido a causas relacionadas com a estabilidade e a resistência, resultantes da utilização e de erros humanos, pode resumir-se nos seguintes grupos:

- secção insuficiente para as cargas actuantes, ou alteração das acções como resultado de uma mudança de ocupação do edifício;
- deformações elevadas devidas ao efeito da fluência em peças colocadas ao serviço, sem o período correcto de secagem, e roturas a longo prazo;
- rotação dos apoios, resultado de retracções da madeira e falta de solidez do material de encastramento na zona de entrega;
- falhas nas uniões, devidas ao dimensionamento incorrecto ou a peças mal desenhadas, com possível incremento da deformação;
- contraventamento insuficiente, que pode conduzir à ruína ou à perda de

verticalidade de parte da estrutura.

Em geral, a maioria destes danos manifesta-se pouco tempo após a entrada ao serviço da estrutura.

6.3.3.1 Secção insuficiente

A secção insuficiente de um elemento provoca uma deformação excessiva da peça e serve como testemunho para a detecção prévia da anomalia. Normalmente, esta deformação, sobretudo devido às condições de apoio, é facilmente detectada à vista desarmada em vigas de madeira.

O valor de l/300, em que l é o vão da estrutura, é um valor tido como referência para a flecha de estruturas bem dimensionadas.

Se a madeira colocada em obra estava verde, as deformações devidas à fluência aumentam substancialmente, pelo que se pode esperar flechas 1,6 vezes maiores. Este efeito da fluência explica o porquê de às vezes se detectarem peças com deformações muito exageradas em relação às cargas que sobre ela actuam.

6.3.3.2 Deformações excessivas e roturas a longo prazo

Este ponto está relacionado com o anterior. Devido à colocação em obra de peças verdes o efeito de fluência elevado conduz a deformações exageradas.

A resistência da madeira depende também da duração das cargas que sobre ela actuam. Constata-se que, sob a acção de cargas de curta duração, ela apresenta uma capacidade maior do que perante cargas permanentes.

6.3.3.3 Uniões

As uniões constituem pontos críticos, porque, normalmente, os projectos não apresentam pormenorização adequada das mesmas, e por outro lado, o seu próprio dimensionamento é descurado. Quando se está a inspeccionar uma estrutura de madeira é importante ter acesso aos elementos de projecto que fazem referência ás uniões, de forma a verificar-se em obra se foram cumpridas as indicações dos projectistas. Normalmente, os danos relacionados com as uniões surgem logo no início da vida útil da estrutura. Também se podem detectar falhas na assemblagem de peças de madeira, em construções de tipo tradicional.

Por vezes, estes problemas são provocados pela degradação local na zona da

ligação, devido à podridão, por exemplo.

6.3.3.4 Roturas Locais

Por vezes, encontram-se peças isoladas partidas, dentro de um conjunto estrutural em bom estado e sem deformações visíveis. Nestes casos, é possível que a rotura se deva a defeitos da própria madeira, tais como a existência de um nó ou um grupo de nós, que diminuem de forma significativa a qualidade da madeira. Se não é um caso extensivo a outras zonas da estrutura e não existirem grandes deformações nas outras peças, não constitui uma situação preocupante.

6.3.3.5 Contraventamento insuficiente

Em estruturas antigas, os defeitos por falta de contraventamento podem ser relevantes, sobretudo se se tratarem de estruturas compostas por pilares e elementos de cobertura., com mais de um piso.

6.3.3.6 Fendas por secagem

Em peças de grande dimensão a existência de fendas devido à secagem são inevitáveis. Em peças inteiriças (que contenham o coração da peça no centro da secção) a diferença de contracção entre a direcção radial e tangencial, provocará o aparecimento de fendas na superfície da peça. A contracção da madeira durante a seca dos seus elementos, pode originar a rotação da peça, como consequência do crescimento, ligeiramente em espiral, das fibras de madeira.

6.3.4 Factores de crescimento

Os factores de crescimento mais comuns, em elementos de madeira são a existência de nós, o desvio de fibras, a curvatura do tronco, fendas, etc., que fazem com que o elemento de desenvolva de forma irregular, dando lugar a uma série de alterações que podem influir directamente na sua resistência.

Quadro 6.4 - Factores que provocam a alteração da madeira [104]]

Factores	Dano provocado
Abióticos	
Factores crescimento	Fibra torcida; madeira entrelaçada; curvatura do tronco; nós; fendas; crescimento anormal.
Factores climáticos	Descoloração; fendas; perda de faculdades mecânicas; envelhecimento (cor cinzenta).
Produtos químicos	Alteração da cor
Fogo	Carbonização; perda de resistência, podendo chegar à destruição.
Uso mecânico	Fadiga e perda de resistência; deformação e problemas nas ligações.
Bióticos	
Bactérias (Bolores)	Ligeira alteração das propriedades, com pouca importância.
Fungos de podridão	Decomposição da madeira, com importante perda de peso e de resistência.
Fungos cromogéneos	Alteração da cor e ligeira perda de resistência. Predisposição frente a novos ataques.
Insectos xilófagos	Perfuração e perda de massa. Diminuição da resistência, podendo chegar à destruição total.
Xilófagos marinhos	Idêntico ao dos insectos.

6.4 A inspecção em estruturas de madeira

Qualquer inspecção a uma estrutura, não deve incidir apenas sobre uma anomalia detectada, devendo permitir uma apreciação do estado global do edifício em causa.

Qualquer acção de inspecção/intervenção em estruturas de madeira existentes pode ter como motivação as seguintes razões:

a) operações de manutenção, que envolvam acções de conservação/reparação;

b) deterioração das capacidades resistentes da estrutura, que levam a operações mais vastas de conservação e reabilitação, envolvendo a reparação, o reforço e mesmo a substituição de elementos estruturais;

c) operações de reconversão e/ou requalificação, que podem levar ao reforço, reorganização e alteração das estruturas de madeira.

No caso concreto da madeira, e uma vez que, devido a aspectos construtivos, o seus elementos estruturais se encontram, geralmente, em coberturas e pavimentos, deve-se, compreender o comportamento global do edifício e a interacção entre os diversos materiais e os elementos estruturais. Uma vez que a madeira possui características especiais, nomeadamente o seu comportamento perante a humidade, o objectivo do investigador passará pela necessidade de eliminar esses focos de humidade e pela criação de barreiras ao progresso da degradação ou a futuras reinfecções/reinfestações da madeira.

Devido a estas especificidades, na altura da tomada de decisões, o projectista deve dispor de uma análise prévia completa. Para obter esta análise é necessário proceder à inspecção da estrutura, que por sua vez deve ser executada de forma faseada:

1º - Uma inspecção preliminar;

2º - Uma inspecção detalhada e diagnóstico;

3º - Análise estrutural.

A avaliação/inspecção do tipo e alcance das intervenções depende do tipo de acção e do programa que lhe está subjacente. De qualquer forma, é essencial que se disponha de informação prévia, que deve constar de um estudo de diagnóstico completo,

devendo este incluir:

- levantamento arquitectónico rigoroso;
- levantamento construtivo completo, incluindo a tipificação e a organização estrutural;
- levantamento e registo de anomalias estruturais e não estruturais, nomeadamente de deformações, roturas, fendilhações, etc.;
- identificação e caracterização exaustiva dos materiais estruturais presentes na obra, recorrendo ao reconhecimento visual, a ensaios no local e a testes laboratoriais. Caso seja de particular interesse, pode-se recorrer à datação da estrutura (investigação dendrocronológica), a partir da qual é possível saber a data em que as peças foram extraídas das espécies de madeira;
- elaboração de relatório de diagnóstico completo, incluindo identificação de causas directas e indirectas de anomalias e apresentação genérica de medidas destinadas a eliminá-las, bem como ás suas causas.

Assim, deve ser garantido o acesso visual a todos os elementos de madeira, que permitirá a observação pormenorizada dos mesmos, bem como a recolha de amostras, se tal se julgar necessário. Sempre que for detectada qualquer anomalia deve ser recolhida toda a informação possível para análise, não esquecendo que a recolha de dados em diversos locais é essencial para que se chegue, com eficácia e certeza, a conclusões sobre a origem da anomalia, permitindo apresentar soluções correctas.

Inicialmente, de entre as acções preliminares a tomar para a recolha de dados sobre a estrutura a ser inspeccionada, destacam-se os dados sobre a idade e história do edifício. Como dados históricos a ter em consideração destacam-se os processos construtivos, a sua posterior ocupação, as alterações ao projecto inicial, as acções de manutenção, entretanto preconizadas, as reparações efectuadas e os tratamentos a que a estrutura foi sujeita. Todos estes dados serão uma ajuda importante na interpretação do funcionamento da estrutura, na caracterização dos materiais e na avaliação da sua capacidade resistente.

Saliente-se, ainda, as questões relacionadas com a preservação do edifício, bem como do seu interesse histórico e artístico, que deverão ser tidos em linha de conta. Por vezes, esses aspectos são limitadores na definição de soluções construtivas e

métodos de tratamento da madeira, bem como da definição das técnicas de inspecção e reforço a utilizar.

Numa segunda fase procede-se à inspecção detalhada aos locais, assinalados na fase preliminar, anotando e identificando os danos encontrados e as suas características, com recurso à utilização de técnicas específicas de diagnóstico de elementos de madeira.

Eventualmente, existe uma fase posterior de inspecção que complementa as duas anteriores e que se desenvolve na primeira parte da obra, onde se identificam e inspeccionam as zonas que permaneceram ocultas, seguindo as regras estabelecidas na fase anterior.

Quando se torna necessário recorrer à análise estrutural, procede-se ao cálculo de uma série de elementos representativos da estrutura, de acordo com os critérios seguidos pela regulamentação existente - Eurocódigo 5 - em que o objectivo principal é a avaliação da segurança estrutural e posterior determinação dos níveis mínimos de intervenção.

Resumindo, a intervenção em estruturas de madeira envolve o conhecimento do material, das causas e processos da sua degradação e dos materiais e técnicas de reparação e reforço disponíveis, a compreensão do papel que desempenham as estruturas de madeira no conjunto da edificação e a identificação dos pontos críticos em que cada tipo de intervenção se revela essencial.

6.4.1 Inspecção preliminar

O objectivo principal de uma inspecção preliminar é fornecer ao técnico/investigador uma ideia global do problema, bem como proporcionar-lhe matéria para que consiga estabelecer um plano pormenorizado de inspecção, que seja adequado ao tipo de construção existente e ao seu estado geral. Pode-se subdividir a investigação preliminar em três acções fundamentais, no âmbito da avaliação de uma estrutura [104]:

- o inventário das anomalias (deformações, roturas, manchas, etc.);
- a observação do estado dos diversos elementos de madeira, nomeadamente, avaliando o risco de um ataque por agentes físicos, químicos, mecânicos e biológicos;

- a distinção dos diversos tipos de madeira empregues. Destaca-se aqui, a necessidade de distinguir entre espécies Folhosas e Resinosas, que logo permite concluir sobre a maior ou menor susceptibilidade de degradação, por acção de cada um dos agentes biológicos, e em particular sobre a maior ou menor percentagem de borne presente.

É usual o recurso a testemunhos de pessoas que possam estar ligadas ao edifício em questão, tais como zeladores, frequentadores, assíduos ou não, e até a vizinhos. Em princípio, toda a informação recolhida deve ser considerada útil e deve ser verificada em obra.

De uma forma mais detalhada, segue-se uma listagem de dados e informações importantes que devem ser estudados:

- idade da construção;
- materiais empregues nos elementos estruturais, onde se inclui o tipo de madeira empregue;
- tipo de construção;
- peças desenhadas originais (se possível, com as dimensões das peças de madeira utilizadas);
- ocupação e uso do edifício ao longo da sua vida útil;
- obras e reparações efectuadas;
- incidências importantes (incêndios, por exemplo);
- tipo de terreno;
- assentamentos de apoio;
- roturas na cobertura;
- danos provocados por agentes xilófagos em edifícios próximos;
- etc.

Neste ponto, descrevem-se as linhas gerais desta fase de inspecção, que termina com um relatório sobre o estado de conservação do edifício. O relatório deve incluir quer

dados de origem biótica quer abiótica e, se necessário, com informação relativa à sua capacidade estrutural. Deve ainda incluir recomendações para a actuação no projecto ou em obra.

6.4.1.1 Reconhecimento visual exterior

Esta inspecção varia com o tipo de edifício vistoriado, nomeadamente com aspectos como: a sua altura, o tipo de madeiras empregue, a facilidade de acesso à cobertura, a forma do mesmo, etc. O objectivo desta inspecção é a detecção de fontes de humidade e a possível entrada de água da chuva no edifício. De seguida, faz-se o relato dos defeitos que aparecem com mais frequência.

6.4.1.1.1 Fachadas e pátios

A fachada que corresponde aos ventos mais dominantes é aquela que requer mais atenção, pois a água da chuva terá uma maior incidência sobre ela. O estado do revestimento, o aparecimento de deformações e a presença de fissuras nas fachadas indicam a presença de humidade, que se transmite para o interior da estrutura. Em edifícios com revestimento em azulejos ou outro material similar, a observação das juntas indica se a água tem ou não fácil acesso ao seu interior.

O surgir de fendas inclinadas e a falta de esquadria nos vãos de fachada (janelas, por exemplo) indicia, geralmente, problemas nas fundações por assentamento de terreno.

Por outro lado, junto a elementos de fachada salientes, como cornijas ou balcões (pequenas varandas), locais onde se pode acumular águas, deve-se ter um cuidado especial, pois esse excesso de água pode provocar a sua deterioração e facilita a entrada de água no interior do edifício.

Figura 6.11 - Aspecto de caixilharia exterior

6.4.1.1.2 Coberturas

A visão exterior da cobertura de um edifício permite descobrir se existem deformações irregulares ou anómalas, que podem indiciar problemas estruturais.

A rotura ou o fecho de ventilações é outro ponto a ter cuidado, devido à incidência que esta tem sobre a humidade relativa do interior da estrutura.

A entrada de pássaros pode também provocar outro tipo de degradação e deterioração dos elementos de madeira.

Figura 6.12 - Cobertura de madeira com deformações irregulares e com presença de vegetação

A localização de zonas com humidade deverá ser confrontada aquando da inspecção ao interior do edifício.

6.4.1.2 Flechas em lajes

Deve-se anotar se existem flechas elevadas na estrutura, pois estas podem indiciar a existência de cargas permanentes excessivas. Estas flechas estão na origem da fendilhação das paredes divisórias sobre essas lajes.

6.4.1.3 Reconhecimento da estrutura

O reconhecimento de uma estrutura destina-se a determinar os danos provocados por agentes xilófagos, por forma a ser avaliada a sua repercussão no comportamento estrutural. Este reconhecimento também deve permitir a identificação da espécie de madeira, a sua qualidade e geometria, de modo a determinar a sua capacidade importante.

Neste reconhecimento deve-se prever:

- o planeamento da inspecção: permite, após uma primeira visita preliminar, agir com eficácia. Por outras palavras, o inspector deve ter objectivos bem delineados;
- iluminação: deve-se prever a existência de luz, directa ou artificial;

- acesso à estrutura: o acesso a todas as zonas do edifício. Quando tal não é possível, por exemplo, vigas e barrotes que estejam ocultos, deve-se proceder à remoção de parte do recobrimento para se fazer uma amostragem desses elementos estruturais. A zona onde se procederá a esta inspecção deverá ser uma zona de risco;

- acesso e limpeza da zona: para permitir uma inspecção e posterior acção de tratamento curativo, se necessário;

- peças desenhadas e croquis: fundamentais para a sinalização das zonas afectadas, dos elementos estruturais que apresentem patologias, dos locais inspeccionados, e daqueles onde se executam os registos fotográficos, etc. Devem conter, assim, todas as informações que serão, posteriormente, registadas de forma ordenada.

6.4.1.3.1 Pontos críticos de um elemento de madeira

A degradação de um elemento de madeira começa na sua zona mais frágil, isto é, na zona com mais probabilidade de ser alvo de ataque. Geralmente, são sempre as superfícies que estão expostas ao ar. Por consequência, a deterioração de um elemento de madeira faz-se sempre de fora para dentro.

Outras zonas críticas são os topos dos elementos. O plano de corte é transversal à direcção das fibras, apresentando uma grande porosidade e capacidade de absorção de água. Esta maior capacidade de retenção de humidade facilita o desenvolvimento de fungos de podridão.

Exemplos de zonas críticas, nos elementos de madeira:

Topos das vigas, no apoio com muros ou paredes;

. Zonas de vigas expostas ao ar;

. Juntas e uniões de peças;

. Extremidade inferior dos elementos verticais de suporte.

6.4.1.3.2 Zonas de risco

Como se referiu, a inspecção a zonas de risco de ataque numa estrutura de madeira é fundamental. Estes locais estão ligados a fontes de humidade que permitem o

desenvolvimento de fungos que facilitam a acção dos agentes xilófagos. Se a madeira se encontrar em bom estado nestas zonas, é praticamente certo que no resto da estrutura também estará. Pelo contrário, se essa zona estiver danificada, também se terá de proceder à verificação de toda a estrutura. Eis uma relação desses locais:

- Elementos em contacto ou próximos do solo:

  Todas as peças que se desenvolvam a partir da fundação ou da soleira, apresentam um risco de serem alvo de ataque de podridão. Também constituem um local de passagem de térmitas, pelo que se detecta facilmente um ataque nestes locais.

  Locais próximos de carpintarias exteriores, de caves ou pisos térreos, tais como as portas, são zonas de possível detecção de térmitas.

- Sótãos:

  Nestes locais é normal que as condições ambientais sejam muito húmidas. A podridão e os ataques anóbidos são característicos desses locais.

Figura 6.13 - Sótão de uma habitação com ataque biológico evidente

- Apoios de vigas e outros elementos em muros e paredes

  Refira-se os apoios das vigas e barrotes que suportam as lajes. Geralmente, as paredes de fachadas têm uma grande capacidade de absorção e retenção de água, que posteriormente a transmite para os elementos interiores através, por exemplo, das vigas e barrotes citados. A situação ainda é pior se à cota de apoio desses elementos existirem, no exterior, cornijas ou outros elementos salientes, capazes de absorver elevadas quantidades de água.

Figura 6.14 - Apoio de uma viga de madeira em parede de fachada

- Zonas de passagem de condutas de água: W.C. e cozinhas

As proximidades de condutas sanitárias e de locais húmidos, tais como as casas de banho e cozinhas, são zonas onde é comum encontrar-se danos provocados pelo elevado teor de humidade, zonas de podridão.

Este efeito é maior em edifícios mais antigos onde a instalação de redes de drenagem e de abastecimento de água é posterior à execução dos mesmos e em que a sua localização não foi a melhor.

Figura 6.15 - Pavimento de madeira sob WC, com presença de humidade abundante

- Coberturas

É o local onde, se não existir manutenção, se dá a maior entrada de água no edifício. Obviamente, a sua inclinação é um factor preponderante, sendo que as coberturas planas apresentam um risco superior às inclinadas. Acresce as execuções de remates mal efectuadas, onde se incluem falhas nas impermeabilizações e nos remates das mesmas.

Quando não se consegue aceder à parte interior das coberturas, deve-se

recorrer a material de apoio, tal como espelhos colocados em barras extensíveis.

Roturas em telhas devido à acção do vento ou a obstrução das caleiras de evacuação de águas pluviais, provocam a entrada de água. Se esta humidade se mantiver ao longo de muito tempo, originará processos de podridão.

Falta de ventilação das coberturas pode provocar a condensação de água, com eventuais consequências.

- Carpintaria exterior

Defeitos em vãos exteriores executados em carpintaria, tais como, portas e janelas, podem permitir a entrada de água no interior com os consequentes danos em pavimentos e, posteriormente, no vigamento que lhe dá apoio.

Figura 6.16 - Pormenor de carpintaria exterior deteriorada

6.4.2 Inspecção detalhada e diagnóstico

Após o primeiro passo dado com a inspecção preliminar, com a detecção de possíveis zonas com anomalias, o técnico/investigador tem necessidade de avaliar a gravidade dos problemas, de estimar as condições da estrutura e de estabelecer medidas curativas para a mesma, isto é, o seu tratamento e/ou possível reforço.

A avaliação das anomalias e a determinação da capacidade resistente da estrutura passa pela necessidade de:

- Identificar os factores de degradação;
- Avaliar a degradação causada;
- Quantificar a secção útil dos elementos afectados;

- Identificar a espécie e a qualidade da madeira;
- Conhecer a sua resistência mecânica e estabelecer valores de cálculo adequados à verificação das condições de segurança da estrutura.

O tratamento posterior e os métodos a utilizar dependem da identificação correcta dos factores de degradação da estrutura, que influenciam, também, a progressão e o risco de propagação a outros elementos estruturais.

6.4.2.1 Degradação do material

Sendo que os agentes biológicos, em particular os fungos de podridão, as térmitas e os carunchos, são os principais causadores de degradação e sabendo nós as suas condições de desenvolvimento (ver Quadro6.2), é essencial a correcta e eficaz identificação do tipo de madeira empregue na construção.

6.4.2.2 Caracterização da madeira empregue - propriedades mecânicas

Nos dias de hoje, a durabilidade natural de uma determinada espécie florestal é conhecida. Por outro lado, verifica-se que os valores da sua resistência mecânica, em termos médios, variam consideravelmente. Acresce o facto de, por ser um material natural, a madeira apresentar uma variabilidade elevada, consoante a massa volúmica e a presença e gravidade de nós, fendas, bolsas de resina e outros defeitos que cada elemento possa apresentar.

É essencial uma classificação dos elementos de madeira, que permitirá atribuir-lhes uma dada classe de qualidade e consequentemente um valor de resistência mecânica.

Outro aspecto importante é a determinação do teor de água da madeira, uma vez que ele influencia directamente a resistência da mesma. O teor em água não é constante e é reversível, isto é, se a presença de humidade provoca a diminuição da capacidade resistente de um determinado elemento estrutural, a secagem do mesmo permite que ele recupere a resistência inicial. Deve-se ter uma particular atenção a situações passageiras, em que a presença de elevados índices de humidade podem provocar, sob a acção de cargas, deformações prejudiciais. Elementos de grandes dimensões podem demorar muito tempo até que atinjam o equilíbrio com as novas condições ambientais envolventes.

Em relação a outros tipos de materiais, a extracção de amostras de madeira da estrutura para análise laboratorial faz-se apenas com o objectivo de identificação

rigorosa da espécie de madeira empregue, ou para detectar uma eventual redução das propriedades do material, através de provetes pequenos, o que poderá ser importante em alguns casos de degradação (térmica ou química, por exemplo). Devido à variabilidade natural, própria do material, e à importância dos defeitos nos elementos estruturais, a determinação rigorosa das características mecânicas teria de ser efectuada com um grande número de amostras, com secção transversal próxima dos elementos estruturais, o que, na realidade, é incomportável. Acresce que é muito difícil englobar, num número de provetes reduzido, a eventual degradação biológica da madeira em todas as suas variantes de tipo e gravidade.

A avaliação de uma estrutura de madeira assenta sobretudo num bom conhecimento do material, pois permite direccionar a inspecção de molde a colher toda a informação necessária a uma interpretação correcta das observações efectuadas. Como já se referiu, existem técnicas que, recorrendo a material básico de inspecção, nos permitem identificar correctamente a situação. Também existem técnicas auxiliares de diagnóstico capazes de fornecer toda a informação necessária, bem como complementar a inspecção preliminar. Alguns desses equipamentos já estão a ser correntemente utilizados, enquanto que outros se encontram numa fase experimental ou de desenvolvimento.

Nenhuma destas técnicas deve ser utilizada individualmente, já que cada uma delas avalia um determinado aspecto do material, salientando-se a importância do conhecimento efectivo do comportamento do material e das técnicas de ensaio e diagnóstico utilizadas, por parte do investigador. A sua experiência profissional é, talvez, o mais importante a ter em conta aquando da inspecção a uma estrutura de madeira.

6.4.2.3 A classificação visual

A classificação visual da madeira em função do seu aspecto exterior, foi o método mais utilizado para tomar decisões sobre as suas qualidades mecânicas.

As normas existentes (NP ENV 1995-1-1), relativas à classificação visual, contêm uma série de recomendações sobre a forma de medir e avaliar certas particularidades presentes, num elemento estrutural de madeira (por exemplo, os nós, a inclinação das fibras, as fendas, o aspecto do cerne, etc.). Em função destas particularidades, determina-se a sua influência na resistência global da peça, pois a presença de uma descontinuidade ou a alteração da estrutura normal do elemento podem levar à perda da sua capacidade resistente. Assim, os elementos de madeira são separados por

classes de qualidade, permitindo o seu loteamento por forma a obter lotes de madeira mais homogéneos.

Resumindo, o campo de aplicação da observação visual permite [102]:

- a classificação do elemento, no grupo de madeiras a que pertence (Resinosas/Folhosas);
- a determinação da percentagem de borne e de cerne;
- a identificação do tipo de degradação biológica (fungos, carunchos ou térmitas);
- a qualidade do elemento de madeira, com base na presença ou ausência de defeitos: nós, fio inclinado, etc.
- a detecção de alguma rotura mecânica ou deformação excessiva;
- a detecção de manchas no elemento estrutural, indiciadoras da presença de humidade.

Constata-se que estas normas são consideradas conservadoras e anti-económicas, pois os valores obtidos indicam valores de resistência inferiores, em cerca de 50 %, do valor real.

Estas discrepâncias estão associadas à variabilidade dos elementos de madeira, atrás referida, e ao facto da classificação visual depender da pessoa que a está a efectuar.

A determinação da extensão dos ataques e a quantificação da secção residual, são factores limitativos da inspecção visual [102].

6.5 Técnicas de inspecção em elementos de madeira

Pode-se dividir estas técnicas de inspecção em dois campos distintos. Um grupo, onde estão as técnicas que se baseiam na inspecção visual da superfície, complementado com a detecção em zonas não visíveis, para determinar a gravidade do dano.

No outro grupo estão incluídos outros métodos não destrutivos, apoiados em tecnologias mais sofisticadas e que empregam equipamento especial, tais como sistemas de transmissão de ultra-sons, ensaios mecânicos não destrutivos, análise de

vibrações e resistógrafos, que se orientam para a determinação das propriedades mecânicas dos elementos de madeira. Ainda neste grupo, existem métodos para a determinação da actividade dos agentes xilófagos, mediante a identificação de sons, mas a sua aplicação prática ainda é diminuta.

6.5.1 Técnicas de inspecção tradicionais

Baseiam-se na validação directa, quer visual quer táctil, das zonas de madeira degradada. Em primeiro lugar, procuram-se os sinais que possam ser deixados pelos agentes xilófagos na superfície, tais como orifícios de saída, presença de serrim, cortes, etc., de acordo com o referido na identificação do agente de degradação. Deve-se proceder a uma inspecção detalhada dos edifícios, especialmente nas zonas de risco atrás referidas e, em alguns casos, deverá ser necessário retirar o recobrimento para a inspecção dessas zonas.

Faz-se, de seguida, a enumeração das técnicas, meios e instrumentos que se podem utilizar neste tipo de inspecções, e menciona-se a sua função e utilidade. A sua utilização depende de cada situação específica e do grau de detalhe que se queira obter.

a) Caderno de notas e lápis

Devem-se registar todas as notas e observações por escrito. Estas devem ser detalhadas por forma a serem utilizadas mais tarde. Assim, é possível rever e ampliar as anotações. Recomenda-se a realização de pequenos croquis e plantas que ajudam na localização dos elementos inspeccionados e das zonas que têm danos.

b) Lanterna ou foco de luz portátil

Muito útil para as zonas que se encontrem mal iluminadas, onde não se consiga ver com clareza a degradação da madeira. Acresce que a maior parte dos agentes xilófagos actuam em locais escuros (buracos, sótãos, etc.).

c) Medidores de humidade (Humidímetros)

O teor de humidade nos elementos de madeira e estruturas que lhes dão apoio, é um dos factores mais importantes para o desenvolvimento dos agentes xilófagos, condicionando ainda as suas propriedades mecânicas (ver Figura 6.17). Estes aparelhos permitem determinar o teor de humidade com rapidez e eficácia. No entanto a identificação da madeira aplicada e o desconhecimento de um tratamento de

preservação anterior, podem conduzir a erros de leitura.

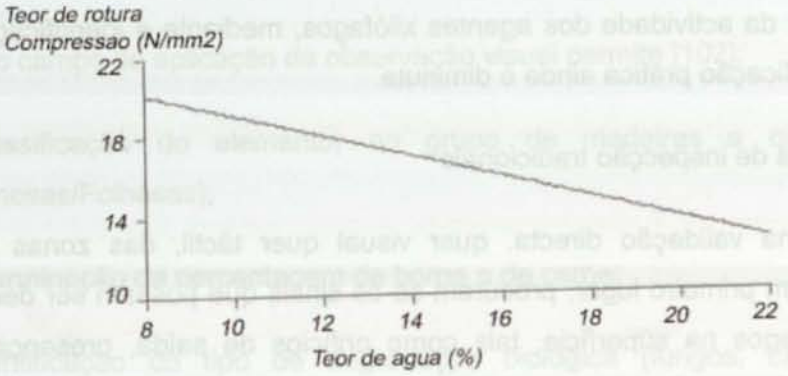


Figura 6.17 - Influência do teor de água na resistência da madeira [102]

d) Lupa

A utilização de lupas de aumento (dez vezes) é de grande utilidade para a observação de danos provocados pelos agentes xilófagos.

e) Espelhos

Quando não se consegue inspeccionar zonas de difícil acesso, a utilização de espelhos e de varetas extensíveis porta-espelhos é muito útil. Por exemplo, em zonas por debaixo de pavimentos ou coberturas.

f) Auscultação ou estetoscopia

O som produzido ao golpear um elemento estrutural, permite estimar se ele se encontra ou não sob carga. Um som "surdo" (brando, suave e sem repercussão) indica que a peça pode não estar em carga e que provavelmente possua danos. Pelo contrário, um som claro e tenso revela que a peça se encontra sob tensão. Por outro lado, o golpe de um martelo sobre a superfície, detecta as zonas atacadas no interior quando produz um som vazio.

Como auxiliar útil desta técnica costuma-se utilizar um microfone colocado no local ou um estetoscópio

Figura 6.18 - Inspecção preliminar, utilizando a percussão de um martelo para detectar sons diferentes

Esta técnica não exige qualquer qualificação do operador. No entanto, a experiência facilita na identificação dos sons escutados.

É uma técnica muito útil na detecção de elementos de madeira, embebidos em paredes de alvenaria, por exemplo nos edifícios *gaioleiros*, utilizados na baixa de Lisboa.

É, no entanto, uma técnica limitada, permitindo apenas uma análise superficial da estrutura. Resumindo as limitações desta técnica [102]:

- algumas características do elemento estrutural fazem com que o som emitido possa induzir o técnico em erro, tais como: secções transversais diferentes, teores de água, situações de apoio ou interacção com outros elementos;
- não é possível determinar a extensão da degradação ou a qualidade do elemento;
- só é aplicável para secções inferiores a 9 cm de espessura.

g) Formão e chave de fendas

O formão permite detectar rapidamente se existe degradação, por debaixo da superfície externa da madeira. Em zonas de pouca espessura, permite conhecer a profundidade do ataque. Com a ajuda de chave de fendas podem-se retirar amostras de madeira atacadas para a posterior identificação dos agentes xilófagos.

h) Furador

Uma máquina de furação de pilhas ou eléctrica, de dimensões reduzidas e com brocas de pequeno diâmetro (3 a 6 centímetros), permite conhecer a profundidade e extensão do ataque, sem necessidade de eliminar toda a zona destruída. A parte da madeira extraída permite observar o seu estado. É muito útil na determinação do estado de elementos de madeira em zonas ocultas ou de difícil acesso.

i) Pincéis e brochas

Úteis para a limpeza de zonas de inspecção.

Figura 6.19 - Utilização de materiais de limpeza para por a descoberto elemento estrutural de madeira

j) Azuela

Utiliza-se para eliminar zonas de madeira degradadas. Aplicam-se na preparação e realização de tratamentos curativos, ainda que sirvam para comprovar o alcance do ataque xilófago.

k) Câmara fotográfica

Importante para comprovar e registar os danos nas zonas afectadas.

l) Vestuário e calçado

Recomenda-se a utilização de vestuário adequado (cómodo e resistente) e em alguns casos o uso de máscara, óculos e calçado protectores.

m) Endoscópio

Este dispositivo permite aceder a zonas ocultas, por meio de um tubo que incorpora espelhos, lentes e lanterna. Introduz-se entre as fissuras de um soalho, por exemplo, e

permite analisar o que está na parte de trás do mesmo. Existem alguns que utilizam um tubo flexível de fibra óptica com cerca de dois milímetros de diâmetro e um metro de comprimento

n) Outras ferramentas

Incluídas na diversidade de ferramentas úteis nesta fase de inspecção, refira-se, entre outros, os pé-de-cabra, maços, martelos pneumáticos, etc.

A sua utilidade está ligada ao: levantamento de soalho, abertura de tectos falsos, à descoberta de zonas ocultas de madeira, etc.

o) Meios auxiliares

Neste ponto refira-se a existência de meios auxiliares, que ajudam na realização dos trabalhos acima descritos, tais como, as escadas e os andaimes.

p) Extracção de carotes (Recolha de amostras)

Com o auxílio de alguns dos utensílios, atrás citados, é possível proceder à recolha de pequenas carotes que podem ser muito úteis na [102]:

- controlo da variação da degradação em profundidade;
- identificação de espécies de madeiras em laboratório;
- detecção da actividade biológica no interior do elemento.

No entanto, esta técnica tem um carácter destrutivo, embora, pelas dimensões da carote, não afecte a resistência da estrutura. Existe a necessidade de voltar a tapar o orifício criado, devendo esta operação ser executada com cuidados acrescidos para não criar um local de fácil deterioração, por se encontrar exposto.

Este tipo de técnica está limitado à extracção de carotes com, no máximo, 10 a 20 cm de comprimento.

6.5.2 Técnicas especiais de inspecção

São descritas as técnicas de inspecção que se inserem no segundo grupo, atrás mencionado. A maioria dessas técnicas são utilizadas na avaliação das propriedades mecânicas, mediante a medição da velocidade de propagação de ultra-sons ou de ondas de tensão, provocadas por impactos que fazem vibrar a peça (ultra-sons e

vibrações). Outras destinam-se a determinar a densidade da madeira, como por exemplo o resistógrafo, o pylodin e a densimetria, mediante a utilização de raios gama.

A dendocronologia e o método do carbono 14, utilizam-se para a determinação da idade da madeira. Por fim, refira-se a técnica de detecção acústica para determinar a presença e actividade de insectos xilófagos.

Algumas técnicas aqui referidas estão já em aplicação generalizada, enquanto que outras estão ainda numa fase de investigação.

Refira-se, no entanto, que a utilização destas técnicas não evita a observação visual e a utilização de ferramentas tradicionais, que junto com a experiência do técnico, são considerados elementos fundamentais na avaliação e inspecção de estruturas de madeira.

Todas as técnicas aqui descritas são baseadas em métodos não destrutivos, que apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais de caracterização da madeira: possibilidade de avaliar a integridade estrutural de uma peça sem a extracção de carotes, a facilidade de manipulação, uma boa relação custo/benefício, uma maior rapidez de análise e grande versatilidade.

De entre as técnicas mais importantes refiram-se:

1) Ultra-sons;

   Métodos de avaliação por ultra-sons:

   a) Métodos de eco

   b) Métodos de transmissão

   c) Métodos de ressonância

2) Métodos de vibração induzida;

3) Resistógrafo;

4) Medição da densidade superficial (Pylodin);

5) Radiografia/ Raios Gama;

6) Termografia;

7) Ground Penetrating Radar (G.P.R.)/Micro ondas

8) Datação da madeira;

9) Detecção acústica de insectos xilófagos.

Registe-se a utilização destes ensaios para aquilatar a qualidade, o estado de conservação e a resistência mecânica dos elementos de madeira em diversas etapas, desde árvore, passando pela produção, laboração e aplicação em obra.

Do mesmo modo que em outros sistemas construtivos, a utilização de combinação de várias técnicas não destrutivas, como meio de se obter resultados mais credíveis, pode ser muito útil, tirando partido da complementaridade da informação obtida.

A maior parte destes ensaios tem por finalidade a avaliação do grau de degradação de elementos estruturais. Esta avaliação tem como objectivo quantificar a resistência dos elementos e estabelecer o estado de confiança, de segurança e de expectativa de vida útil da estrutura em causa. No entanto, por serem ensaios realizados *in situ*, existem uma série de dificuldades na sua aplicação e estudo, a saber:

- Inacessibilidade a partes do elemento estrutural, onde a deterioração é mais crítica (secções escondidas, zonas enterradas, etc.);
- Distribuição heterogénea do teor de humidade, em função da sua localização;
- Mudanças sazonais de temperatura, que podem gelar a água na madeira;
- Interferências causadas por elementos anexos, especialmente se estão interligados;
- Descontinuidades localizadas causadas pela degradação, por cavidades de insectos ou por danos mecânicos;
- Elementos com degradação diferenciada entre si;
- As estruturas de madeira (sobretudo as mais antigas) têm a superfície rugosa o que, em conjunto com a erosão provocada pelo passar dos anos, faz com que se torne difícil ligar sensores ou até provocar uma excitação.

6.5.2.1 Ultra-sons

O princípio de aplicação dos ultra-sons, em estruturas de madeira, baseia-se na

relação que existe entre a velocidade de propagação longitudinal da onda e as propriedades elásticas do meio que atravessa.

Assim, o objectivo principal da utilização desta técnica é a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, deduzido a partir da velocidade de propagação das ondas e da densidade do material. A partir da sua determinação, pode-se deduzir o módulo de elasticidade estático e estimar a resistência do elemento.

Também se utiliza na avaliação do estado da estrutura de madeira, relacionando a velocidade de transmissão transversal à peça, para estimar a perda de capacidade resistente devida a danos de origem xilófaga.

Os ultra-sons são ondas acústicas com frequências que se encontram acima da zona audível. No caso da madeira, a banda de frequências utilizada compreende-se entre os 20 kHz e 1 MHz. A utilização de frequências baixas deve-se à elevada atenuação da onda provocada pela estrutura interna da madeira.

6.5.2.1.1 Métodos de avaliação através de ultra-sons

São três os métodos de aplicação dos ultra-sons:

a) Métodos baseados no eco

São realizados com a utilização de um só aparelho que emite e recebe os sinais. As ondas ultra-sónicas emitidas são reflectidas na face oposta do elemento inspeccionado. No caso de, na sua trajectória, encontrarem vazios ou fissuras, produz-se um eco que se representa graficamente num osciloscópio.

Este sistema não é o mais adequado para materiais heterogéneos como o betão e a madeira. Neste caso, as ondas seriam reflectidas em todas as superfícies limites e nos poros e fendas, produzindo-se uma dispersão em todas as direcções.

b) Métodos de transmissão

São os mais adequados para avaliar estruturas de madeira. Utilizam-se dois aparelhos, um emissor e um receptor. A frequência utilizada é muito menor que a utilizada nos métodos baseados no eco, por forma a se conseguir um alcance maior dos impulsos e para se poder eliminar ou diminuir a influência, no resultado final, das irregularidades do material. As ondas mais largas rodeiam mais facilmente os obstáculos que as ondas mais curtas. A pressão sonora é máxima na direcção axial do

aparelho e diminui nas direcções oblíquas, com o aumento do ângulo. Neste método, as descontinuidades nos elementos (fissuras ou vazios) têm por consequência o aumento do tempo que demora uma onda a chegar ao receptor, uma vez que o caminho seguido é maior ao ter de circundar o obstáculo.

c) Métodos de ressonância

Exige uma equipe completa e só se aplica em laboratório, em amostras de grandes dimensões. Consiste na excitação da frequência própria do material, mediante um emissor electrodinâmico de oscilações. Devido ao fenómeno de ressonância, produz-se um forte aumento da amplitude de oscilação.

As constantes elásticas, tais como o módulo de elasticidade longitudinal transverso, são obtidas através da frequência de ressonância, da densidade e das dimensões da amostra.

No caso da madeira, velocidade de propagação longitudinal na ordem de 4,5 km/s e perpendicular, na ordem de 1,50 km/s supõem comprimentos de onda na ordem de 10 e 3,3 cm, respectivamente.

6.5.2.1.2 Factores que influenciam a velocidade de propagação

Apesar de factores como a densidade e o módulo de elasticidade da madeira terem grande influência na velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, outros factores como o teor de humidade, a temperatura e o nível de tensão, ainda que de uma maneira menos significativa, foram estudados.

Assim, o teor de humidade influencia ligeiramente a velocidade de propagação de ultra-sons. Por cada incremento de 1% de humidade, produz-se uma diminuição da velocidade de aproximadamente 0,80 %, seguindo uma relação linear entre 5 e 30 % de teor de humidade [105].

Em relação à temperatura constata-se que o seu aumento reduz a velocidade de propagação. Por outro lado, esta influência é tanto maior quanto maior for o teor de humidade. É por isso que alguns aparelhos incluem sondas de temperatura e humidade, para levar em conta estes fenómenos.

Por fim a velocidade de propagação também varia em função da tensão aplicada [106].

6.5.2.1.3 Metodologia de ensaio

As leituras podem ser efectuadas utilizando os aparelhos dispostos sobre a mesma linha de acção (Método directo) ou não (Métodos semi directo e indirecto). Se se pretender determinar o módulo de elasticidade da peça o mais adequado é posicionar os aparelhos nos topos da peça.

Como eles, normalmente, não se encontram visíveis, recorre-se a uma leitura oblíqua, colocando os aparelhos na face da peça inclinados com um ângulo de 45º, Figura 6.19. Os aparelhos mais apropriados para fazer as medições em elementos de madeira são os do tipo cónico, que não necessitam de material de acoplamento (ligação). Para garantir o contacto é necessário realizar uma pequena perfuração ou incisão, na qual se aloja a ponta do aparelho de medida. Se não se tiver este cuidado, poderá existir uma maior perda de sinal e o alcance do ensaio será menor.

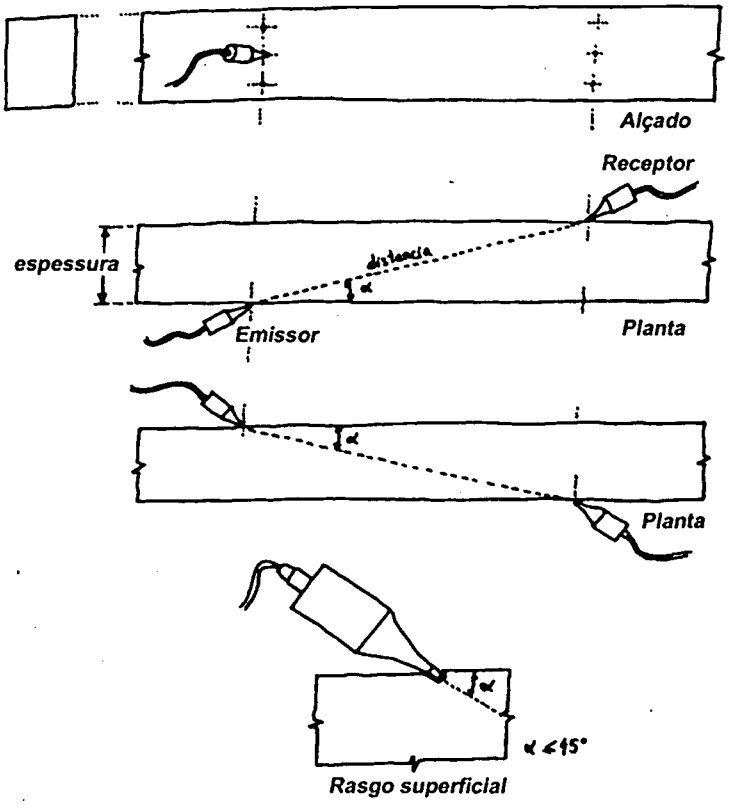


Figura 6.20 - Ensaios com ultra-sons: Medição obliqua [100]

Caso não se proceda à dita perfuração, deve-se utilizar um gel, cuja função é a de permitir a transmissão da onda elástica em boas condições, entre a sonda e o elemento a inspeccionar.

Os aparelhos disponíveis no mercado os mais conhecidos são:

- *Sylvatest*: aparelhagem portátil utilizada na medição do tempo de transmissão de ultra-sons com aparelhos cónicos, com sonda de temperatura e teor de humidade, especificamente desenvolvida para estruturas de madeira (Figura 6.21). Pode ser aplicada em peças até 5 metros de comprimento, e inclui um programa de processamento de dados,

para estimar o módulo de elasticidade, resistência à flexão e qualidade da madeira. Para isso, necessita que o material a ensaiar seja alvo de uma calibração prévia.

- *PUNDIT (Portable Ultrasonic Digital Indicatins Tester)*; aparelho portátil com um gerador de impulsos com uma frequência de 54 Hz. Mede o tempo com uma precisão de décimas de microsegundo. Os aparelhos são de forma cilíndrica, com uma superfície de contacto de 5 cm de diâmetro. Para a ligação entre o aparelho e a superfície de madeira, utiliza-se uma camada de vaselina.

Figura 6.21 - *Sylvatest*: aparelhagem portátil para a medição do tempo de transmissão de ultra-sons [adapt. www.boviar.com]

6.5.2.1.4 Resultados obtidos com esta técnica

As correlações que se obtêm entre a velocidade de propagação na direcção longitudinal, com as propriedades mecânicas da madeira, resultam em coeficientes na ordem de 0,63 a 0,85, aproximadamente [105].

Observa-se ainda que as medições por ultra-sons alcançam uma precisão maior, quando são utilizadas em conjunto com os parâmetros de classificação visual. Assim, obtiveram-se coeficiente de correlação na ordem dos 0,80, combinando a classificação segundo a norma DIN 4074 e o módulo de elasticidade obtido por ultra-sons, mediante uma análise de regressão múltipla [107].

A medição da velocidade de propagação de ultra-sons, segundo a direcção transversal da peça, foi utilizada para detectar a existência de madeira deteriorada, obtendo-se valores de velocidade inferiores às da madeira sã [108].

6.5.2.2 Métodos de vibrações induzidas (ondas de choque)

Este método é baseado nos mesmos princípios que a técnica dos ultra-sons, relacionando a velocidade de propagação de uma onda, neste caso provocada por um impacto, com o módulo de elasticidade e a densidade. Em complemento, efectua-se uma análise do amortecimento das vibrações, recorrendo a um osciloscópio.

O procedimento de realização do método é o seguinte: introduz-se na peça de madeira um esforço mecânico, através da utilização de um martelo ou outro meio semelhante. A onda propaga-se e procede-se à detecção do seu sinal em dois pontos, ao longo do seu trajecto. Quando a onda alcança o primeiro acelerómetro, coloca-se em funcionamento um medidor de tempo. Quando alcança o segundo acelerómetro o contador pára, surgindo num visor o tempo decorrido, em microsegundos.

Existem aparelhos em que o elemento em que se realiza o impacto tem incorporado um acelerómetro. Esse aparelho é denominado martelo electrónico ou martelo de impulsos.

Se num elemento de madeira existirem degradações no seu interior ou possuir vazios, a velocidade de propagação será diferente e o tempo determinado reflectirá essa perturbação, em relação a elementos de madeira sã.

Resumindo, a utilização de ensaios com ondas de choque permite [102]:

- A estimação das propriedades mecânicas, em função da velocidade de propagação da onda (ver Figura 6.22);

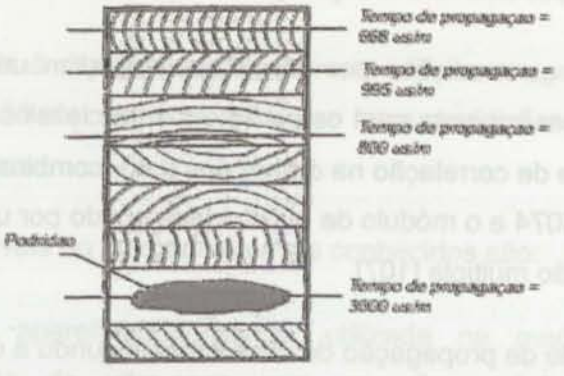


Figura 6.22 - Propagação de ondas de choque: tempo de propagação em função da orientação das fibras [102]

- A obtenção de um perfil de variação longitudinal, detectando zonas degradadas ou apresentando defeitos internos (fissuras ou fendas).

As principais limitações do ensaio são:

- A necessidade de estarem acessíveis duas superfícies opostas dos elementos de madeira;
- *In situ*, os topos não estão acessíveis, tornando-se inviável o ensaio longitudinal à peça;
- Forte dependência da direcção de propagação da onda.

Tal como no ensaio de ultra-sons, a presença de água, o tipo de madeira e a direcção do ensaio condicionam os resultados obtidos, existindo a necessidade de se calibrar os aparelhos.

6.5.2.3 Resistógrafo

O *Resistograph®* é um aparelho que permite uma análise não destrutiva da qualidade da madeira, incluindo informação sobre a formação de cavidades no interior do elemento alvo do ensaio. Isto é realizado através da medição da resistência da madeira à perfuração por meio de uma broca, relacionando-a com a densidade da madeira, sendo capaz de detectar os anéis de crescimento, ao encontrar diferenças de densidade entre a madeira de Verão e da Primavera.

A broca possui um diâmetro pequeno (aproximadamente 3 mm) e um comprimento máximo de 1500 mm. A resistência à penetração é medida enquanto a broca roda e vai penetrando no interior da estrutura, a uma velocidade constante. O acréscimo de energia consumida pelo aparelho, por forma a manter a velocidade constante, é determinado de forma electrónica, e é tomado como um valor relativo para a medição da dita resistência de penetração. O perfil fornecido pelo *Resistograph®* é um gráfico, em que a coordenada *xx* indica a profundidade que a broca penetra, em mm, e a coordenada *yy* indica a energia consumida pelo aparelho. A área situada sob a curva representa a medida da densidade aparente do elemento estrutural (madeira) que foi perfurado, e, por consequência, proporciona avaliação à sua qualidade e à possibilidade de a utilizar.

Figura 6.23 - Aparelhos que compõe o *Resistograph®* [adapt. www.rinntech.com/]

Ensaios realizados demonstraram que é muito útil [102]:

- na detecção de defeitos internos, tais como, fendas, vazios ou bolsas de degradação biológica;
- na determinação do perfil de densidade, ao longo de elementos de madeira;
- na estimação da sua massa volúmica média dos elementos, mediante a sua calibração para a espécie, o teor de água e a velocidade;
- na estimativa da secção residual;
- na estimativa da resistência, através da correlação existente para cada espécie de madeira, entre a massa volúmica e as propriedades mecânicas.

No entanto, o aparelho não fornece informação sobre a resistência mecânica do material.

Em complemento a esta técnica, o buraco do furo pode ser utilizado para permitir o acesso a zonas onde a inspecção visual não consegue chegar.

Figura 6.24 - Ensaio de uma estrutura em madeira, utilizando o *Resistograph®* *[adapt. www.oz-diagnostico.pt/]*

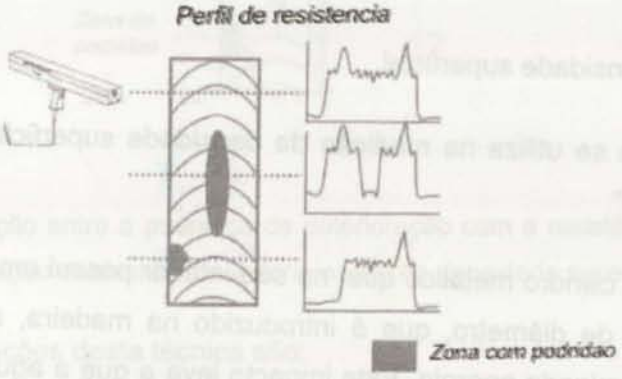


Figura 6.25 - Ensaio com o *Resistograph®* .Relação entre várias situações possíveis de encontrar em elementos de madeira e a resistência à furação [102]

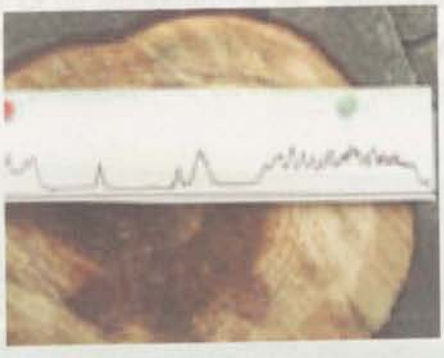


Figura 6.26 - Ensaio com o *Resistograph®* .Exemplo de uma saída de resultados [adapt. www.rinntech.com/]

Através da utilização de aparelhos do tipo boroscópio, que, introduzidos na dita furação, permite-nos fazer registos em vídeo e registos fotográficos, para fornecer e mostrar o estado e a actividade biológica (existência de térmitas, por exemplo) do interior da estrutura.

De entre as limitações que esta técnica possui, citem-se:

- a profundidade máxima de ensaio é 40 cm;
- a orientação dos anéis de crescimento, a presença de lenho juvenil e a estrutura interna da madeira podem influenciar os resultados obtidos (perfis de resistência);
- o furo efectuado pode constituir-se como um ponto de entrada de agentes de degradação da madeira.

6.5.2.4 Medição da densidade superficial

Existe um aparelho que se utiliza na medição da densidade superficial da madeira, denominado de "Pylodin"

O *Pylodin* consiste num cilindro metálico que, no seu interior possui um pino metálico, com cerca de 2,5 mm de diâmetro, que é introduzido na madeira, através de um impacto com uma determinada energia. Este impacto leva a que a agulha penetre na superfície de madeira, permitindo o registo da profundidade.

Verifica-se que a penetração na madeira é inversamente proporcional à dureza, na direcção transversal. A profundidade de penetração do pino pode constituir uma medida da intensidade e profundidade da degradação da madeira, devido a fungos de podridão.

Figura 6.27 - Aparelho de medição da resistência superficial: Pylodin

Este aparelho revelou-se de muita utilidade para a [102]:

- Determinação da massa volúmica média do elemento, relacionada com a dureza média determinada no ensaio;
- Avaliação da presença de degradação superficial;
- Estimação da secção residual;

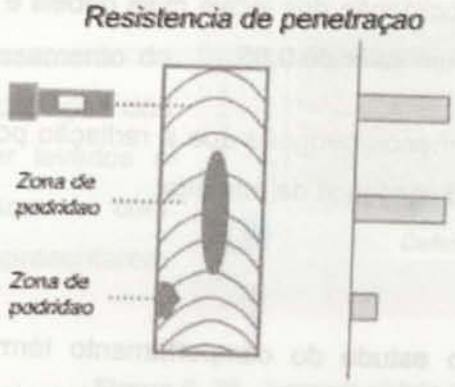


Figura 6.28 – Relação entre a presença de deterioração com a resistência à penetração, na realização de ensaios de determinação da densidade superficial [102]

As principais limitações desta técnica são:

- A profundidade máxima do ensaio é 10 cm;
- A partir dessa +profundidade não se consegue determinar bolsas de degradação no interior do elemento;
- A influência de variações naturais da madeira (lenho de Primavera e lenho de Outono).

6.5.2.5 Radiografia/Raios gama

Esta técnica é utilizada para medir a densidade de um material, emitindo uma radiação através da peça, da qual se conhece o coeficiente de absorção, medindo-se, na outra face, a energia recebida.

A detecção de defeitos internos pode ser inferida pela diferença entre a medição numa secção sã e a obtida numa secção defeituosa.

Esta técnica foi utilizada, por exemplo, na avaliação de poste de madeira de linhas de telecomunicação, como técnica complementar à inspecção visual. O dispositivo empregue consistiu num aparelho portátil com uma fonte radioactiva, colocada no interior de uma caixa de aço, para proteger o operário. Este dispositivo é acoplado a um aparelho que se desloca ao longo do poste, levando um detector no lado oposto, unido com firmeza, ao dito carro. A densidade relaciona-se com a resistência e o coeficiente de correlação obtido foi da ordem dos 0,60, utilizando apenas esta técnica. O valor aumentou quando se combinou esta técnica com a inspecção visual (existência de nós, humidade, localização dos locais mais débeis e idade do poste), o coeficiente de correlação obteve um valor de 0,85.

Este tipo de radiação revela-se menos perigosa que a radiação por raios x, uma das primeiras técnicas aplicadas no diagnóstico da madeira.

6.5.2.6 Termografia

A termografia tem por base o estudo do comportamento térmico dos diferentes materiais. Assim, através da medição da radiação térmica de uma determinada superfície, após estar exposta a uma fonte de calor (por exemplo a exposição solar ou um projector de luz,) é possível identificar a presença quer de materiais diferentes quer de heterogeneidades.

A medição dessa radiação é feita por equipamentos sensíveis a radiação ultravioleta, que a converte em sinais eléctricos que correspondem a determinadas cores que são impressas em fotografia.

No caso da madeira, esta técnica é indicada para a detecção de elementos de madeira que se encontram embebidos em paredes de alvenaria mista (ver Figura3.44).

A principal limitação deste método refere-se ao facto de que só se obtêm bons resultados na camada superficial da estrutura (em poucos centímetros de profundidade).

6.5.2.7 Ground Penetrating Radar (G.P.R.)

O GPR é uma técnica não destrutiva que utiliza ondas electromagnéticas, com frequências na ordem dos 300 MHz a 300 GHz, na avaliação de um determinado material. Os sistemas GPR actuam emitindo séries de pequenos impulsos, estimando a distância dos objectos a partir do tempo que demora a detectar reflexos. As

reflexões ocorrem quando as ondas electromagnéticas passam e um material para outro, com propriedades eléctricas diferentes. A intensidade da reflexão depende da diferença dessa propriedades, entre os materiais.

Esta técnica aplica-se sobretudo em materiais não condutivos, tal como a madeira.

Releva-se uma técnica que oferece bons resultados na localização de defeitos internos, tais como vazios e fendas.

A avaliação, o processamento do sinal obtido e a interpretação dos resultados devem ser levados a cabo por pessoas com experiência, por apresentarem alguma complexidade.

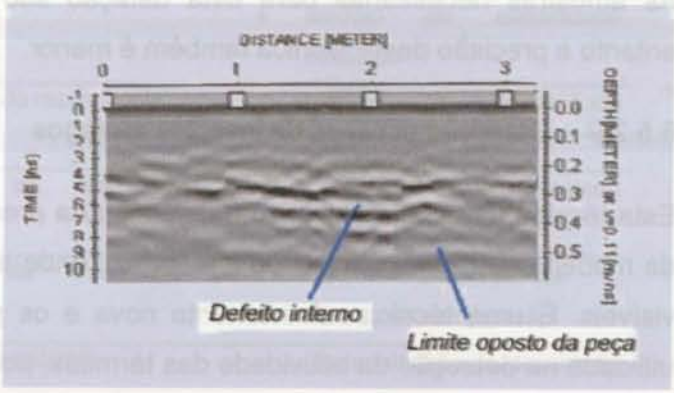


Figura 6. 29 - Imagem obtida por GPR [adapt. Muller W., 2002]

6.5.2.8 Datação da madeira

Para determinar a idade de um elemento de madeira podem ser utilizadas duas técnicas diferentes: a dendrocronologia e o carbono 14.

A dendrocronologia baseia-se num fenómeno biológico específico da madeira e necessita de várias amostras com características particulares. O resultado obtido é de elevada precisão [109]. O método baseia-se no estudo das sequências dos anéis de crescimento das árvores. Assim, da peça a datar extraem-se testemunhos cilíndricos, segundo a direcção radial, por forma a medir e registrar a espessuras dos anéis. Esta espessura varia com diversos factores, dos quais se refere o clima. A característica fundamental é que a resposta da árvore é semelhante, em exemplares mais ou menos distantes entre si. O gráfico que representa a espessura dos anéis, em ordenada, em relação aos anos, em abcissas, denomina-se de curva dendrocronológica, e compara-se com outras curvas de idade conhecida até que alcançar uma sincronização que seja significativa.

Uma limitação deste método é que não pode ser aplicado a qualquer espécie, em virtude de não possuírem anéis.

A radiodatação é um método físico-químico que se aplica a qualquer peça orgânica.

Esta técnica consiste na medição da radioactividade do carbono 14, dos restos biológicos, como meio de estimar o tempo decorrido desde este cessou a sua actividade vital.

A concentração de carbono 14 nos seres vivos é semelhante à atmosférica e a partir do seu fim de vida ela começa a diminuir por desintegração.

As amostras necessárias para esta datação são menores que as anteriores. No entanto a precisão desta técnica também é menor.

6.5.2.9 Detecção acústica de insectos xilófagos

Esta técnica tem como objectivo a detecção da presença de insectos xilófagos dentro da madeira, em fases iniciais de infestação, onde ainda não existem sinais exteriores visíveis. É uma técnica relativamente nova e os primeiros estudos mostram a sua utilidade na detecção da actividade das térmitas, podendo inclusive detectar-se a zona onde elas se encontram [110].

Na Europa foi desenvolvido um aparelho portátil, com o mesmo objectivo. O estudo denominado INADEC (Insect Acoustic Detection) consiste na colocação de receptores acústicos que funcionam do domínio do audível (100 Hz-25 kHz) que transmitem o sinal a um módulo de recepção, amplificação e filtração que limitam a banda de frequências compreendidas entre 1 kHz e 20 kHz. A sinal é digitalizado e pode ser armazenado num DAT (Digital Audio Tape), ou ser enviado directamente para um computador portátil, para posteriormente ser processado. Este sinal é depois comparado com outros sinais padrão, processados em condições controladas.

Pode detectar a actividade de térmitas e cerambícidos, a distâncias de 2 metros dentro da mesma peça.

Quadro 6.5 - Resumo dos ensaios não destrutivos em estruturas de madeira

Ensaios Não Destrutivos	Medição efectuada	Propriedade a estimar
Inspecção visual	Avaliação visual dos defeitos e da massa volúmica	• Presença de defeitos • Anéis de crescimento • Tensão de flexão
Ultra-sons	Alteração dos parâmetros da onda (incluindo a velocidade)	• Teor de água • Detecção de defeitos • Módulo de elasticidade dinâmico
Vibração induzida	Frequência de ressonância	• Módulo de elasticidade estático
Resistógrafo	Avaliação da resistência à penetração	• Determinação da densidade superficial
Medição da densidade superficial	Avaliação da resistência ao impacto	• Determinação da dureza • Tensão de compressão
Raios Gamma	Absorção de radiação	• Determinação da densidade da peça • Detecção de defeitos
Termografia	Medição da radiação térmica	• Detecção de elementos de madeira e de heterogeneidades no material
G.P.R. / Micro ondas	Avaliação da reflexão de ondas electromagnéticas	• Detecção de defeitos internos, como vazios e fendas • Densidade
Datação da madeira		• Determinação da idade do elemento
Detecção acústica de insectos xilófagos	Auscultação	• Detectar a actividade de insectos xilófagos

7. Técnicas de Ensaio em Estruturas Metálicas

7.1 Introdução

A utilização do aço como material estrutural remonta a mais de 1000 anos. No entanto, é com a Revolução Industrial que se dá o grande incremento na sua utilização. Apesar da sua utilização em Portugal não ter sido grande, quando comparada com países como os Estados Unidos, a Inglaterra e a Alemanha, países com grandes reservas de aço, verifica-se nos últimos anos um aumento significativo dos edifícios que recorrem a este tipo de estruturas.

Os edifícios realizados com estruturas metálicas, estão associados à ideia de modernidade, inovação e vanguarda, traduzidos em obras de grande expressão arquitectónica.

A este facto estão associadas, não só a linguagem estética, mas também vantagens construtivas, que fazem das estruturas metálicas elementos estruturais a ter em consideração: redução do tempo de construção, pré-fabricação, racionalização do uso de materiais e mão-de-obra, aumento da produtividade, flexibilidade de utilização, competitividade com outros materiais, etc.

Outro campo de utilização em que as estruturas metálicas apresentam características que as tornam competitivas em relação a outros materiais, é o sector do reforço e reabilitação de estruturas. Assim, é comum observar-se a sua utilização [112]:

- em obras de intervenção de carácter provisório, destinadas a garantir a segurança da estrutura, enquanto não são realizados os trabalhos de intervenção de carácter definitivo;

- em obras de reparação, que ao contrário das anteriores, tem carácter definitivo;

- em obras de reforço, em que não existem danos estruturais mas sim a necessidade de dotar a estrutura de resistência suficiente para fazer face a novas utilizações (por exemplo, cargas mais elevadas, reforço sísmico em estruturas antigas);

- obras de reestruturação, em que há uma modificação parcial ou total dos espaços, volumetria e da estrutura resistente (por exemplo, obras de

ampliação ou de inserção de novas estruturas no interior da existente).

O aço, em relação a outros materiais estruturais, apresenta uma grande vantagem: o facto de ser um material não natural, isto é, sujeito a um processo de fabrico. Assim, sendo um material homogéneo, fabricado segundo normas e regras perfeitamente definidas, permite um conhecimento muito mais eficaz das suas características e propriedades. Por consequência, o risco de má execução ou má fabricação é bastante menor.

No entanto, as estruturas metálicas sofrem processos de degradação, cuja origem está relacionada com causas de diversas origens [113]:

- degradação das propriedades dos materiais;
- erros de projecto ou concepção;
- durabilidade;
- acções mecânicas;
- defeitos de fabrico;
- defeitos de protecção.

Assim, o papel da inspecção em estruturas metálicas, como meio de acompanhamento, de prevenção, de controlo de qualidade e de diagnóstico é essencial e obedece a algumas especificidades, inerentes ao material em causa.

O aço é utilizado em múltiplas situações, em meios ambientes distintos, sujeitos a esforços diferentes, com elevado número de patologias e causas, pelo que requer avaliações correctas, executadas por pessoas devidamente qualificadas e com experiência suficiente.

7.2 O aço como material estrutural

As estruturas metálicas são quase todas fabricadas com materiais férreos. De entre estes materiais destacam-se o ferro e o aço.

Como atrás se frisou, para estudar os processos patológicos do material deve-se conhecer previamente as suas características. Neste caso, a utilização destes

materiais foi condicionada pela disponibilidade dos mesmos, que por sua vez estava condicionada pelo nível de conhecimento dos métodos de obtenção, em cada época da história.

O ferro e o aço são materiais estruturais cuja origem é muito antiga. Porém, o seu emprego era reduzido, devido a dificuldades de produção. O rendimento era muito pequeno o que fazia com que fosse considerado um material estrutural caro.

A diferença entre o aço e o ferro consistia em que o aço, após atingir uma temperatura elevada era esfriado com água, ou outro líquido, ficava muito duro, enquanto que o ferro não endurecia. Este facto devia-se à presença, em grande quantidade, de carbono.

Inicialmente, as primeiras estruturas metálicas foram feitas em ferro fundido (que era um desenvolvimento técnico do ferro esponjoso, obtido, normalmente, com o aumento de temperatura).

A primeira ponte metálica foi construída, em 1779, por Abraham Darby III, sobre o rio Severn em Coalbrookdale. O primeiro edifício metálico, uma fábrica têxtil, foi construída em 1801 em Selford, Manchester.

Figura 7.1 - Imagem, à época, da ponte de Coalbrookdale (adapt. www.ironbridge.org.uk]

Figura 7.2 - Imagem, actual, da ponte de Coalbrookdale [adapt. www.ironbridge.org.uk]

No entanto, e em consequência dos acidentes registados, em virtude da grande fragilidade do ferro fundido, incrementada pela pouca resistência à tracção, foi

progressivamente abandonado o seu uso. O desenvolvimento técnico permitiu a introdução de um novo tipo de elemento: o ferro forjado. Com menos teor de carbono, reduzido por oxidação, este material revelou-se dúctil com resistência à tracção e à compressão idêntica.

A primeira estrutura em ferro forjado, de grande envergadura, foi a ponte Britannia, no estrito de Menai, terminada em 1826.

Figura 7.3 - Imagem, da ponte de sobre o estreito de Menai, projectada por Thomas Telford [adapt. www.napier.ac.uk]

Em 1855, Bessemer patenteou o fabrico do aço, que consistia na oxidação, por intermédio de oxigénio do ar, para permitir a eliminação de impurezas e da presença de carbono. Em 1878, Thomas conseguia a eliminação do fósforo e do enxofre, elementos químicos responsáveis pelo aumento da fragilização do aço, diminuindo a sua tenacidade [55].

Figura 7.4 - Imagem, da ponte de Firth of Forth [adapt. www.alba2001.home.concast.net]

O aço foi empregue como material estrutural, em construções de grande dimensão, pela primeira vez em 1850, em Viena numa ponte sobre o Danúbio. No início da sua utilização destaca-se a ponte de Firth of Forth, em 1890, quer pela sua envergadura (deteve o recorde de maior vão durante mais de 30 anos), quer por ter sido uma ponte em que só se utilizou o aço.

Neste último século o aço foi, sem dúvida, o material férreo mais utilizado. Por isso, neste Capítulo referente às estruturas metálicas, a base de todo o trabalho é o aço. No entanto cada um possui características distintas.

Como atrás se referiu, os sistemas construtivos em aço, apresentam vantagens que os tornam competitivos, na construção civil. Esta competitividade passa pela sua utilização em obras que vão desde edifícios de habitação e comércio, a pontes e viadutos, passando por edifícios de grande altura, terminais rodoviários, pavilhões industriais e desportivos, etc.

De entre as vantagens significativas cite-se:

- Resistência: o aço é um material resistente e apresenta um bom comportamento (sobretudo quando trabalha à tracção). A relação entre a resistência e o peso faz com que se utilize em estruturas importantes como edifícios altos e pontes;

- Uniformidade: através do controle dos processos de fabrico, os elementos em aço apresentam uma configuração uniforme o que permite que, a nível dos ensaios, a amostragem necessária seja menor do que em outras estruturas (por exemplo, as paredes de alvenaria);

- Durabilidade: se existir uma manutenção cuidada as estruturas em aço têm um período de vida elevado;

- Ductilidade: a capacidade de uma estrutura se deformar sem perder as propriedades mecânicas, faz dos elementos em aço materiais dúcteis, ideais para zonas sísmicas, por exemplo;

- Tenacidade: é a capacidade que um material tem de absorver energia em grande quantidade, pois um material tenaz caracteriza-se por possuir grande resistência e ductilidade;

- Uniões: os elementos em aço têm uma grande facilidade de se ligarem através de soldadura, de parafusos ou de rebites;

- Possibilidade de serem fabricados em estaleiro com grande precisão (na ordem dos milímetros), evitando o desperdício;

- Rapidez de montagem e facilidade no seu manuseamento, o que torna os

prazos de execução menores;

- Possibilidade de executar peças de aço com as mais diversas formas e tamanhos, nomeadamente: perfilados (estão disponíveis em diversas formas, tais como I, L, H e U), laminados, saldados, tubulares (de forma circular, quadrada e rectangular);

- As estruturas metálicas podem ser utilizadas em diversos tipos de estruturas o que faz com que tenham uma grande flexibilidade. São especialmente úteis em obras de reabilitação, adaptação e ampliação;

- Montagem e desmontagem de estruturas, permitindo a sua reutilização;

- Como as peças metálicas são mais leves e ocupam um volume menor, em relação, por exemplo, a elementos de betão armado, as suas fundações são menores;

- Garantia de qualidade do material, por se tratar de um produto industrializado;

- Maior criatividade, pois pode ser explorado de múltiplas formas;

- Os elementos metálicos são compatíveis com outros materiais estruturais (por exemplo alvenaria de tijolo ou pedra, betão armado);

- Necessitam de estaleiros de menores dimensões.

O alumínio, como material estrutural tem a grande vantagem de não ser corrosível. Acresce o facto de possuir um peso próprio três vezes menor que o aço e de não se alterar em nenhuma temperatura.

No entanto, tal como todos os elementos estruturais, também o aço apresenta desvantagens. De entre elas cite-se:

- Custo de manutenção: devido a ser um material susceptível à corrosão, é necessário ter cuidados elevados de manutenção, sobretudo nas zonas húmidas;

- Protecção contra o fogo: a resistência do aço quando sujeito a altas temperaturas diminui significativamente;

- Susceptibilidade à encurvadura: quanto maiores e mais esbeltos sejam os

elementos à compressão, maior é a possibilidade desses elementos sofrerem encurvadura.

7.3 Principais causas da deterioração do aço

O aço apresenta características específicas, quando comparado com outros materiais estruturais, como por exemplo o betão armado e a madeira. Torna-se, assim, essencial reconhecer, interpretar e agir de maneira correcta, por forma a manter o desempenho de qualquer estrutura metálica dentro dos limites de segurança aceitáveis, durante o período de vida útil da estrutura.

Determinar a causa(s) responsável(eis) por um determinado dano é a etapa mais importante e difícil. Não é possível avaliar a funcionalidade, a resistência e a fiabilidade de uma estrutura, assim como quantificar as reparações necessárias, escolher o(s) método(s) mais adequado(s) sem conhecer a patologia responsável pelo dano [114].

O engenheiro ou técnico responsável pela determinação da causa responsável pela deterioração da estrutura metálica, deve ter conhecimentos técnicos que lhe permita saber exactamente quais os procedimentos a ter em conta para a sua correcta identificação. A experiência é, mais uma vez, fundamental.

Desde a fase de concepção até ao final da construção devem ser cumpridas todas as normas e procedimentos de boa construção, de modo a não incorrer em erros construtivos, facilmente detectáveis através de planeamento e fiscalização eficientes.

As patologias aqui abordadas, tal como atrás foi referido, abarcam todas as fases da "vida" do aço [55] e [113]:

- Patologias relativas ao material;
- Patologias relativas à regulamentação;
- Patologias relativas ao projecto;
- Patologias relativas ao fabrico;
- Patologias relativas à montagem;

- Patologias relativas à falta de fiscalização adequada;
- Patologias relativas ao uso inadequado da estrutura;
- Patologias produzidas por causas fortuitas e inexplicáveis.

Pretende-se, neste ponto, fazer um levantamento das patologias mais comuns que ocorrem nos edifícios realizados em estrutura metálica, dando-se particular destaque ao fenómeno da corrosão, aquele que ocorre com mais frequência.

7.3.1 Patologias relativas ao material

Os danos referidos neste ponto dizem respeito às características do próprio material. Assim, os técnicos ligados á inspecção e manutenção das estruturas metálicas devem conhecer o seu processo de fabrico e as suas características mais importantes de forma a interpretar correctamente os danos existentes.

O conhecimento das características principais dos materiais, neste caso do aço, é tão ou mais importante quanto o domínio do cálculo estrutural e dos processos de fabrico, montagem e manutenção deste tipo de estruturas.

7.3.1.1 Material defeituoso

Devido ao avanço da técnica actual e dos meios de inspecção disponíveis é improvável observar danos relativos a material defeituoso. No entanto, se existirem, os técnicos possuem meios para os detectar e identificar.

De qualquer forma, o dono de obra possui meios para assegurar a qualidade do produto, nomeadamente ao poder exigir os certificados de qualidade e documentos de garantia do material.

7.3.1.2 Corrosão

7.3.1.2.1 Introdução

A corrosão, dos processos patológicos que ocorrem nos elementos metálicos, é o mais conhecido.

É um processo natural que consiste na degradação de um material devido à sua reacção com o ambiente que o rodeia. Como consequência, os elementos afectados perdem qualidades essenciais para o seu bom desempenho, tais como, a resistência

mecânica, a elasticidade, a ductilidade e a estética, uma vez que o produto resultante deste processo não possui as características do material original.

Seleccionar um material com inadequada resistência à corrosão pode resultar em danos e perdas económicas importantes:

- Rotura de equipamentos;
- Substituição prematura de elementos estruturais;
- Projectos sobredimensionados para suportar os efeitos da corrosão: aumento de espessuras, diâmetros, etc.;
- Influência no desempenho de máquinas e equipamentos;

Mas, a consequência mais desastrosa seria perda de segurança estrutural, se ela ocorrer em zonas críticas da estrutura.

Assim, ao prever o emprego de estruturas metálicas, é necessário que elas resistam à acção do meio corrosivo, para além de possuir as propriedades mecânicas necessárias para a função para que foi projectada.

7.3.1.2.2 Efeitos da corrosão

Nas estruturas de aço, o efeito da corrosão deve ser avaliado, pois pode enfraquecer ou deteriorar a sua operacionalidade, nomeadamente no que diz respeito à sua capacidade resistente, estabilidade e condições de serviço. Este efeito da corrosão nas estruturas pode causar a perda de secção, a intensificação dos produtos da corrosão nas ligações e os efeitos de entalhe, que provocam o aumento das tensões localizadas.

- a perda de secção de um elemento estrutural, provoca uma diminuição da sua resistência e da rigidez, o que conduz a um incremento dos níveis de tensão e deformação, sem que ocorra qualquer alteração das solicitações. Assim, as tensões de flexão, corte e encurvadura podem ser afectadas. No entanto, a percentagem de redução, considerando os vários tipos de tensão, não é a mesma, dependendo, sobretudo, da localização da corrosão;
- aumento dos produtos de corrosão (ferrugem) pode ser severo, sobretudo nas ligações, pois o aumento da secção pode provocar o aumento das

tensões aí instaladas;

- a corrosão localizada pode provocar entalhes que podem servir de locais de iniciação de fracturas.

7.3.1.2.3 Tipos de Corrosão

Todos os tipos de corrosão envolvem processos electroquímicos. Estes são os mais frequentes e caracterizam-se por necessitarem da presença de água em estado líquido e pela formação de uma pilha ou célula de corrosão, com a circulação de electrões na superfície metálica. A corrosão de origem química não necessita da presença de água, envolvendo temperaturas elevadas, em que o metal tem de estar em contacto com o meio corrosivo.

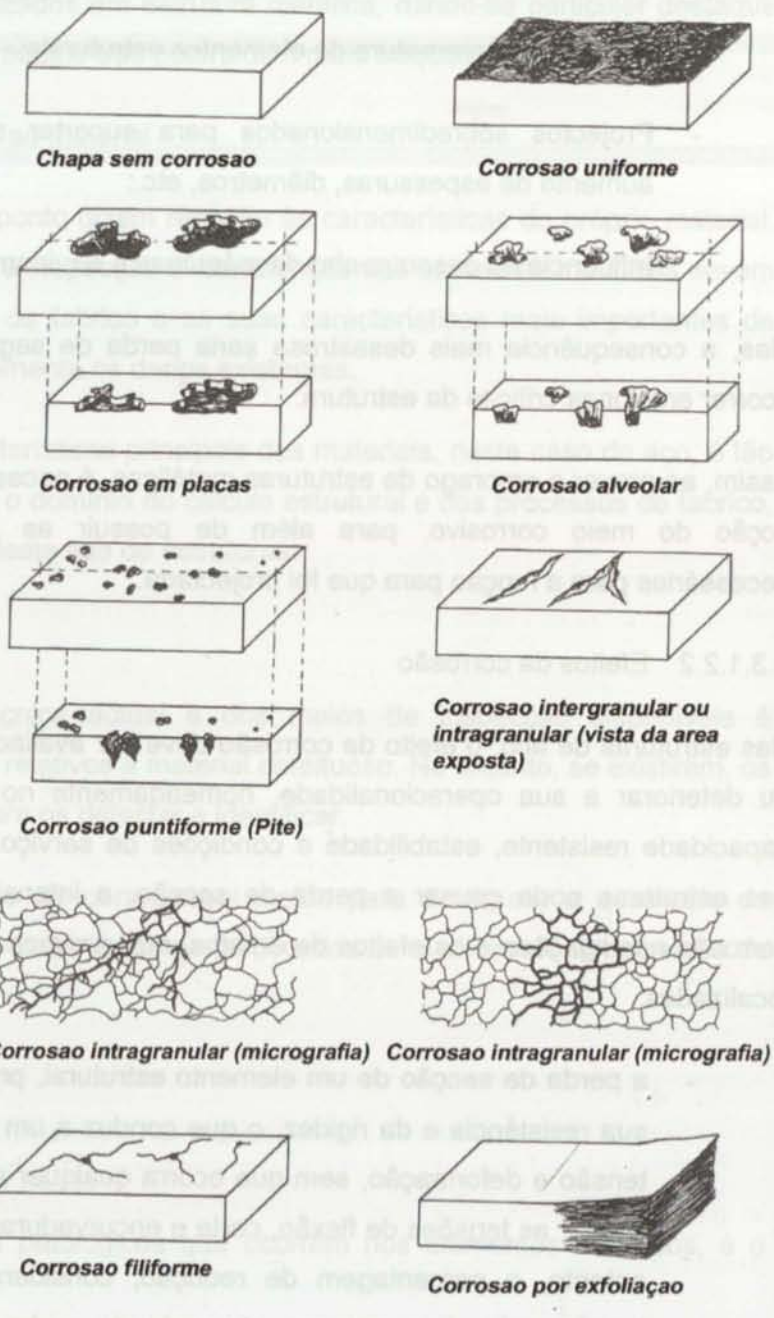


Figura 7.5 - Tipos de corrosão [116]

Existem processos de deterioração de materiais que ocorrem durante o tempo de serviço da estrutura e

que não se enquadram nesta definição de corrosão. Um deles é o fenómeno da corrosão-erosão, em que por acção de um elemento externo, o vento por exemplo, se dá a erosão, com a remoção mecânica de partículas do material.

É um processo eminentemente físico que pode ser acompanhado pela acção simultânea da corrosão, daí o seu nome. Outro factor comum é a corrosão intragranular, que ocorre associada às estruturas sujeitas a grande variação de temperaturas.

Assim, para se realizar uma avaliação correcta de uma estrutura, deve ser conhecido o tipo de corrosão.

7.3.1.2.3.1 Corrosão electroquímica

7.3.1.2.3.1.1 Corrosão uniforme

É o tipo de corrosão mais comum, e consiste na formação de uma camada visível de óxido de ferro (ferrugem), pouco aderente, que se forma em toda a extensão da estrutura. Por outras palavras, a velocidade de corrosão é aproximadamente igual em toda a superfície. Por ser visível, é facilmente controlável. Como ocorre em toda a extensão da peça, implica uma perda, também uniforme, de massa, com a consequente diminuição da secção transversal da peça.

Figura 7.6 - Exemplo de corrosão uniforme [117]

7.3.1.2.3.1.2 Corrosão por picadas

É uma forma de corrosão localizada, que consiste na formação de cavidades de pequena extensão e razoável profundidade. É característica de materiais metálicos que possuem camadas protectoras, e surge quando, por alguma razão,

Figura 7.7 - Exemplo de corrosão por picadas [117]

esta é corrompida, em determinados locais. É altamente destrutiva, devido à perda de massa da estrutura. Ocorre, sobretudo, em locais expostos a meios aquosos, salinos ou com drenagem insuficiente.

7.3.1.2.3.1.3 Corrosão em fendas

Ocorre em locais em que duas superfícies estão em contacto, ou muito próximas (0,025 a 0,1 mm). As estruturas metálicas possuem fendas quando, por exemplo, existem chapas sobrepostas, em juntas rebitadas, em revestimentos com chapas aparafusadas.

Estas fendas podem ser sujeitas à formação de pilhas por aeração diferencial, quando o meio é gasoso, ou à concentração iónica diferencial, quando o meio é aquoso. No primeiro caso, a concentração de oxigénio é maior nas bordas do que no interior da fenda, o que faz com que essa zona se torne numa região anódica. Assim, o processo de corrosão inicia-se na parte mais profunda da fenda, dificultando o acesso ao diagnóstico.

Em geral, esta corrosão afecta pequenas zonas da estrutura.

Figura 7.8 - Exemplo de corrosão em fendas [117]

7.3.1.2.3.1.4 Corrosão filiforme

É um tipo de corrosão que se processa sob filmes de revestimento, especialmente de pintura. O processo de corrosão é idêntico ao da corrosão em fendas, isto é, por diferenças de aeração, provocada por defeito no filme de pintura.

Esta corrosão processa-se sob a forma de filamentos muito finos que se propagam em diferentes direcções sem se cruzarem.

Figura 7.9 - Exemplo de corrosão filiforme [117]

7.3.1.2.3.1.5 Corrosão galvânica

Ocorre devido à formação de uma pilha electrolítica, quando os metais utilizados são diferentes. Este tipo de corrosão é tanto maior quanto mais distantes forem os materiais em relação ao seu potencial electroquímico.

É um tipo de corrosão muito comum na construção civil, nomeadamente nas ligações aparafusadas e nas coberturas, mais precisamente na ligação entre telhas galvanizadas, ou de alumínio, com a estrutura.

Figura 7.10 - Exemplo de corrosão galvânica [117]

7.3.1.2.3.1.6 Corrosão selectiva

São processos em que se forma um par galvânico, devido à diferença de nobreza entre dois elementos de uma liga metálica.

Existem dois tipos principais de corrosão selectiva, a corrosão grafítica e a corrosão por dezincificação.

A corrosão grafítica ocorre em elementos de ferro fundido (tubagens de água e de esgotos, por exemplo).

A corrosão por dezincificação acontece nas ligas de zinco, especialmente nos latões, utilizados nas estruturas dos condensadores, por exemplo.

7.3.1.2.3.1.7 Corrosão intragranular

Ocorre nas estruturas metálicas, devido à difusão de espécies químicas até ao limite dos grãos, provocando fissuras. Como exemplo pode-se citar a difusão de carbono no aço. Essas fissuras podem crescer subitamente, dando origem a falhas catastróficas dos materiais.

7.3.1.2.3.1.8 Corrosão biológica

Diz respeito à corrosão e consequente perda de material causada por microorganismos, É caracterizada por pequenas colónias dispersas. Pode ser

observado, por exemplo, em estruturas de fábricas de conservas alimentícias.

7.3.1.2.3.1.9 Corrosão por correntes parasitas

Ocorre em estruturas metálicas colocadas no subsolo ou imersas em água e é causada por correntes eléctricas provenientes de fontes de corrente contínua ou alternada. Como exemplo dessas estruturas cite-se os postes metálicos das linhas de transmissão.

7.3.1.2.3.2 Corrosão influenciada por factores mecânicos

7.3.1.2.3.2.1 Fragilização pelo hidrogénio

Acontece quando existem átomos de hidrogénio em solução sólida na estrutura cristalina do material. Estes átomos, produzidos durante o processo da corrosão, tendem a difundir-se, na estrutura metálica, para locais de maior concentração de tensões, provocando a redução da tenacidade e da ductilidade da própria estrutura.

7.3.1.2.3.2.2 Corrosão sob tensão

A corrosão sob tensão ocorre quando um material, submetido a tensões de tracção (aplicadas ou residuais), é colocado em contacto com um meio corrosivo específico.

Neste tipo de corrosão formam-se fissuras cuja propagação é lenta, até atingir o tamanho crítico, a partir do qual se pode dar uma ruptura brusca.

7.3.1.2.3.2.3 Corrosão sob fadiga

Designa-se fadiga de um material, o processo em que uma fissura progride a partir da superfície até a fractura, quando o material é submetido a solicitações mecânicas.

Normalmente, a fadiga inicia-se em pontos de imperfeição, à superfície, que são locais que se caracterizam por possuírem concentração de tensões, nomeadamente na base da fissura.

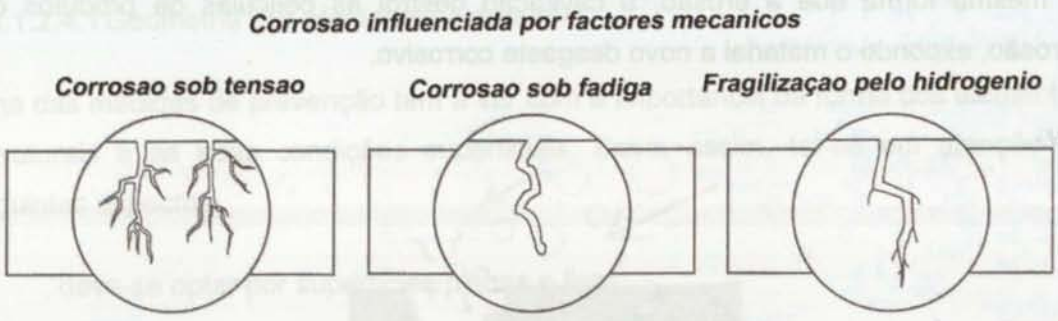


Figura 7.11 - Corrosão influenciada por factores mecânicos [115]

7.3.1.2.3.2.4 Corrosão por vibração

É um processo corrosivo associado ao fluxo turbulento de um líquido. Ocorre quando há redução na área de fluxo.

7.3.1.2.3.2.5 Corrosão - erosão

Designa-se por erosão de um material metálico o desgaste mecânico provocado pela abrasão superficial de uma substância sólida, líquida ou gasosa.

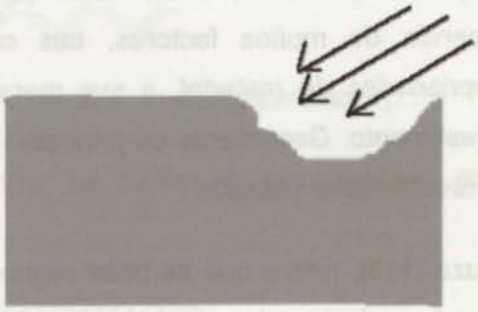


Figura 7.12 - Exemplo de corrosão - erosão [adapt. www.poeton.co.uk]

A erosão provoca o desgaste superficial, removendo as películas protectoras de produtos de corrosão. Por outras palavras, a corrosão provoca uma película de produto de corrosão, o processo erosivo remove-o, expondo a superfície a novo desgaste corrosivo. Assim, o processo corrosivo torna-se mais intenso e rápido, quando combinado com a erosão.

7.3.1.2.3.2.6 Corrosão - cavitação

A cavitação é o desgaste provocado numa superfície metálica, devido a ondas de choque do líquido, oriundas do colapso de bolhas gasosas. Surge em zonas de baixa pressão onde o líquido (fluido) entra em ebulição formando bolhas, as quais ao entrarem em contacto com zonas de pressão mais elevada são destruídas instantaneamente, criando ondas de choque no líquido.

Da mesma forma que a erosão, a cavitação destrói as películas de produtos de corrosão, expondo o material a novo desgaste corrosivo.

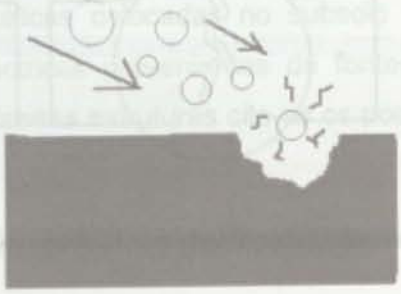


Figura 7.13 - Exemplo de corrosão - cavitação [adapt. www.poeton.co.uk]

7.3.1.2.4 Factores que influenciam a corrosão

O tipo e a quantidade de corrosão que pode ocorrer em qualquer estrutura metálica depende de muitos factores, tais como, a pormenorização dos desenhos, as propriedades do material, a sua manutenção, o ambiente envolvente, e o tipo de revestimento. Geralmente os principais factores são o ambiente do local e o sistema de revestimento utilizado.

Souza [118], refere que as boas regras de concepção estrutural têm de atender aos aspectos relacionados com a protecção contra a corrosão, devendo-se ter em atenção os principais aspectos:

a) A diminuição da possibilidade de criação de condições propícias ao desenvolvimento da corrosão electroquímica;

b) aumento da facilidade de aplicação e das condições para que os eventuais revestimentos adoptados possuam melhor desempenho;

c) A facilidade de inspecção e manutenção.

No sentido de facilitar o escalonamento das medidas de protecção contra a corrosão, segue-se uma listagem das principais medidas divididas segundo três aspectos fundamentais:

I. Geometria;

II. Ligações;

III. Detalhes gerais de concepção.

IV. Técnicas de Ensaio em estruturas metálicas

7.3.1.2.4.1 Geometria dos elementos estruturais

Uma das medidas de prevenção tem a ver com a importância da forma dos elementos estruturais e as suas condições superficiais. Deve, assim, ter-se em atenção os seguintes aspectos:

i) deve-se optar por superfícies planas e lisas;

ii) são preferíveis os elemento que apresentem geometria curva;

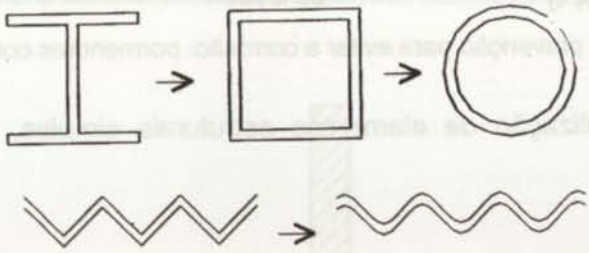


Figura 7.14 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: formas geométricas [117]

iii) sempre que possível deve-se arredondar os cantos e extremidades dos elementos estruturais;

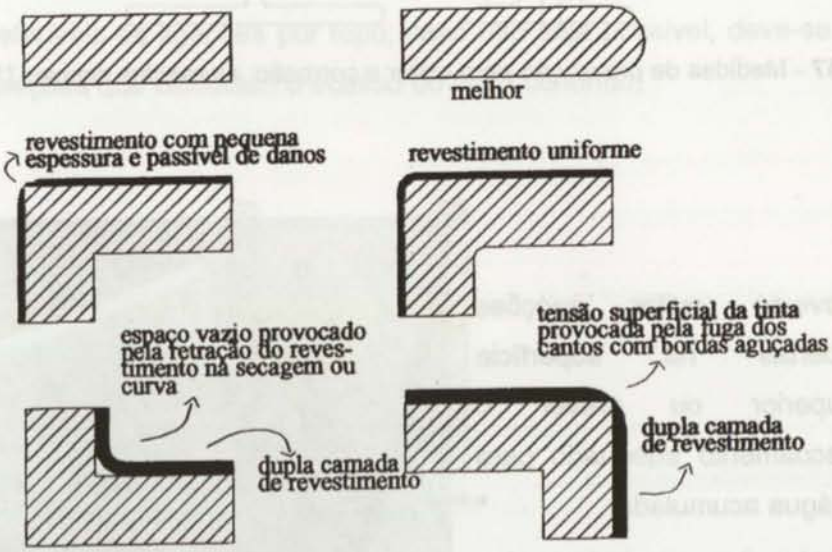


Figura 7.15 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: arredondamento dos cantos [117]

iv) deve-se evitar ângulos obtusos e outros pormenores que dificultem o acesso a regiões localizadas;

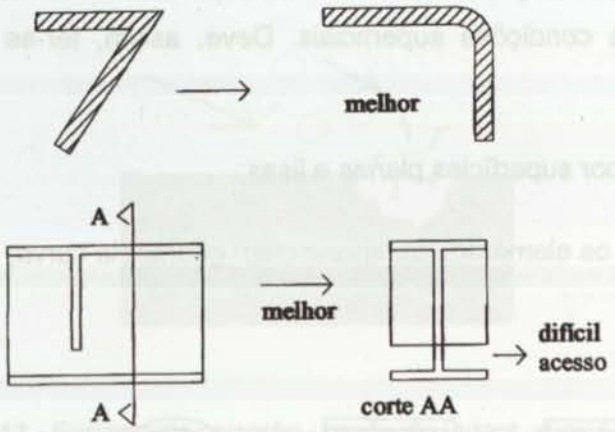


Figura 7.16 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: pormenores construtivos [117]

v) é preferível a utilização de elementos estruturais simples, aos elementos compostos;

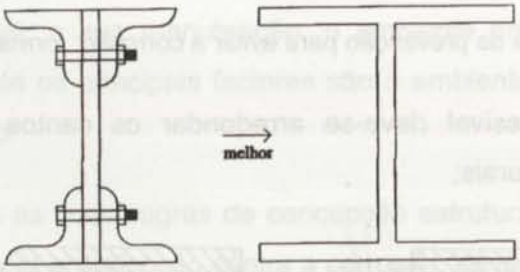


Figura 7.17 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: elementos simples [117]

vi) deve-se evitar secções abertas na superfície superior ou prever o escoamento adequado para a água acumulada;

Figura7.18 - Local de deposição de lixo e humidade [117]

7.3.1.2.4.2 Ligação entre os elementos estruturais

São aqui referidos aspectos de união entre elementos metálicos:

i) As ligações por solda são preferíveis às executadas por parafusos, em relação à origem de descontinuidades;

ii) É preferível o soldadura por cordões contínuos à soldadura descontínua;

iii) Os cordões horizontais, são aqueles que oferecem menor garantia de qualidade;

iv) É preferível o cordão de solda côncavo;

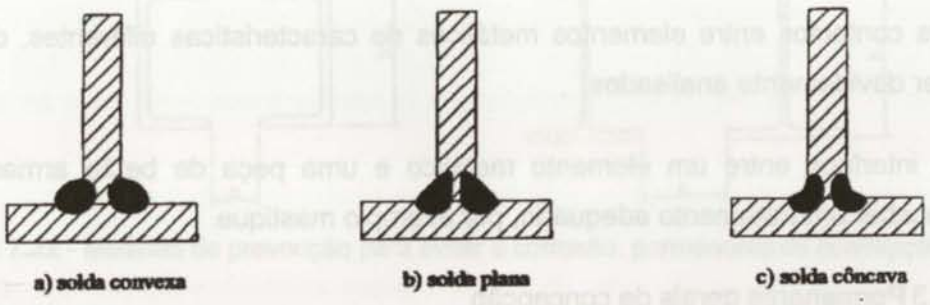


Figura 7.19 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: tipos de cordões de solda [117]

v) São preferíveis as ligações por topo; caso não seja possível, deve-se adoptar configurações que dificultem o acesso do meio contínuo;

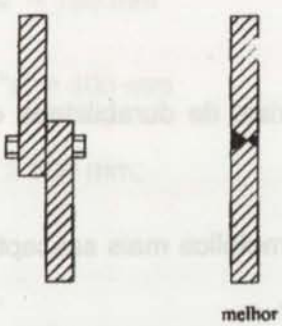


Figura 7.20 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: preferência por ligações de topo [117]

vi) Deve-se evitar que os cordões de solda, bem como chapas intermédias de solidarização, estejam em contacto com o meio corrosivo;

Figura 7.21 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: acumulação de humidade [117]

vii) Deve-se evitar a sobreposição de elementos estruturais; se tal não puder ser evitado, deve-se proteger por vedação ou pintura adequada a fresta gerada;

viii) Os contactos entre elementos metálicos de características diferentes, devem ser devidamente analisados;

ix) A interface entre um elemento metálico e uma peça de betão armado de receber um tratamento adequado, por exemplo mastique.

7.3.1.2.4.3 Pormenores gerais de concepção

Aspectos gerais, quer a nível dos componentes, quer a nível geral:

i) quanto maior for a importância da estrutura, o seu custo de fabrico, dificuldade de montagem e desmontagem de um seu componente, maior deve ser a exigência quanto à utilização de materiais com um desempenho superior relativo à corrosão;

ii) não se deve misturar materiais de durabilidade diferente, em zonas que não possam ser reparadas;

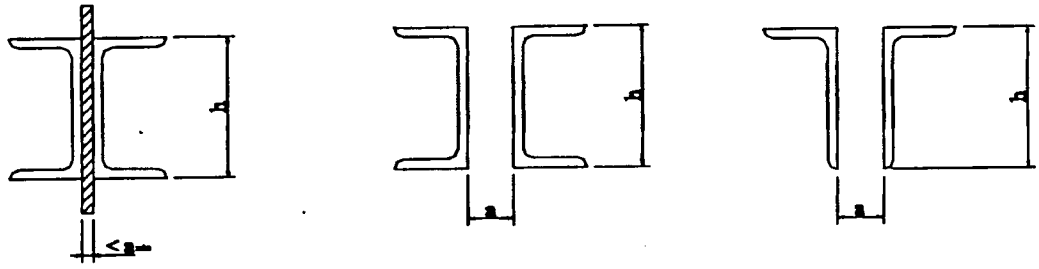
iii) as zonas de uma estrutura metálica mais susceptíveis à corrosão, devem ficar visíveis e acessíveis;

iv) a geometria de uma estrutura metálica deve ser a mais simples e aerodinâmica possível;

v) deve-se evitar a solidarização dos elementos metálicos, sendo que, no caso contrário, pode-se ligá-los por meio de parafusos, por forma a possibilitar o acesso à pintura, antes da sua montagem;

vi) a ligação entre vários elementos de uma estrutura metálica devem obedecer às seguintes regras:

a)



b)

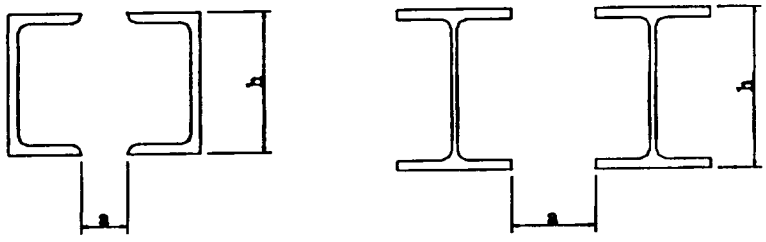


Figura 7.22 - Medidas de prevenção para evitar a corrosão: pormenores de concepção [117]

no caso a)

- se $h < 100$ mm $\Rightarrow$ "a" ≥ 150 mm;

- 100 mm $< h \leq 1000$ mm $\Rightarrow$ "a" cresce linearmente segundo a proporção

  $h = 100$ mm $\Rightarrow$ "a" $= 150$ mm

  $h = 1000$ mm $\Rightarrow$ "a" $= 400$ mm

- se $h > 1000$ mm $\Rightarrow$ "a" ≥ 500 mm;

no caso b)

- se $h < 100$ mm $\Rightarrow$ "a" ≥ 120 mm;

- 100 mm $< h \leq 1000$ mm $\Rightarrow$ "a" cresce linearmente segundo a proporção

  $h = 100$ mm $\Rightarrow$ "a" $= 120$ mm

  $h = 1000$ mm $\Rightarrow$ "a" $= 400$ mm

- se h > 1000 mm $\Rightarrow$ "a" $\geq$ 500 mm;

vii) deve-se diminuir a parcela da estrutura em contacto com o meio mais agressivo;

viii) sempre que possível, aconselha-se a utilização de elementos inclinados, devendo-se evitar a criação de obstáculos ao escoamento do meio agressivo;

ix) a localização de uma estrutura, e sobretudo as ligações existentes, deve ser tal que permita o acesso a todas as suas componentes.

A corrosão aumenta significativamente quando a humidade relativa é superior a 40 %. Ciclos de períodos de chuva / períodos de seca também contribuem para o seu agravamento.

A pintura ou outro tipo de revestimento protector é a primeira medida preventiva contra a corrosão. A sua eficiência está intimamente ligada ao tratamento dado às peças, antes deste tratamento final. Devido à sua importância, devem ser alvo de inspecções periódicas, por forma a garantir a sua eficiência na protecção contra a corrosão.

Em complemento, indica-se uma lista de medidas práticas básicas, que podem contribuir significativamente para melhorar a resistência de uma estrutura metálica à corrosão:

- evitar arestas vivas, rebarbas, gretas ou cavidades;
- em locais onde a água pode ficar retida, prever furos de drenagem
- as cantoneiras devem ser projectadas para permitir o livre fluxo de ar, de forma a acelerar o processo de secagem;
- em regiões catódicas, reduzir a superfície de contacto;
- executar o recozimento de peças para retirar tensões residuais;
- isolar metais distantes, na tabela galvânica. Deve-se evitar que o aço entre em contacto com o cobre, o bronze ou outro metal;
- evitar que as peças fiquem semi-enterradas ou semi-submersas;
- quando as soldas forem compridas, deve-se manter a continuidade do filete, evitando-se cavidades;

- as juntas soldadas trazem menos problemas que as aparafusadas;
- deve-se projectar a estrutura de forma a evitar locais de acesso dificultado ou até impossível, para possíveis operações de manutenção.

7.3.1.3 Rotura frágil

A rotura frágil é um dano que ocorre de repente, sem qualquer aviso prévio, isto é, sem que exista qualquer deformação plástica da estrutura, em níveis de tensão abaixo da tensão de cedência. A rotura frágil, também designada por fractura, ocorre quando um nível, relativamente elevado de tensão é aplicado a um material.

A fractura, normalmente inicia-se em locais que apresentem descontinuidades, e que, por consequência, se tornem em locais onde as tensões locais aumentem. De entre esses, refira-se as ligações estruturais soldadas, aparafusadas ou rebitadas, como zonas onde há grandes descontinuidades e grandes alterações na geometria das peças.

A fractura, ou a vulnerabilidade à fissuração, é influenciada pela dureza (tenacidade) do material, pela intensidade das forças aplicadas, pela geometria dos elementos e pelo tamanho, forma e orientação de qualquer fenda ou descontinuidade existente.

Resumindo, as características principais da rotura frágil são as seguintes [114]:

- A rotura produz-se bruscamente, muitas vezes com resultados catastróficos;
- As tensões obtidas pelos métodos de cálculo correntes, nas zonas de rotura, não são elevadas;
- A rotura inicia-se em zonas de concentração de tensões;
- Usualmente ocorre com temperaturas baixas;
- As estruturas soldadas são mais sensíveis à rotura frágil;
- aspecto da superfície de rotura é granular com linhas em forma de espiga, cujos vértices apontam para o local onde se iniciou.

7.3.1.3.1 Factores que influenciam a rotura frágil

Os factores que influenciam a rotura frágil podem ser divididos em três grupos: as propriedades do material, a influência da solda e a espessura dos componentes.

7.3.1.3.2 Propriedades materiais

A dureza do material é função da sua composição química, do historial termo-mecânico e da sua micro-estrutura. A composição química afecta a dureza, uma vez que a adição de um soluto ao metal pode inibir a sua fluidez plástica, tornando a sua resistência maior, mas reduzindo a sua tenacidade á fractura. O tratamento termo-mecânico pode afectar a dureza, pela alteração da composição do material. A micro-estrutura, e em especial a granulometria, do elemento também afecta a dureza. Assim, para um determinado elemento estrutural em aço, a possibilidade de existir fractura, tende a diminuir com o aumento da granulometria. A fractura também varia de forma significativa com a variação da temperatura e das solicitações. Verifica-se que elementos em aço apresentam uma transição de comportamento frágil para dúctil, a uma determinada temperatura, que depende do tipo de material. Por outro lado, verifica-se que a dureza à fractura diminui com o aumento da capacidade de carga.

7.3.1.3.3 Influência da solda

A fendilhação nas soldas é resultado de descontinuidades, tensões residuais e diminuição de resistência e tenacidade, assim como pode acontecer devido a falhas de projecto (cálculo) ou de fabrico.

As descontinuidades mais comuns são a porosidade, a existência de escórias e a fusão incompleta. Os locais onde surgem, são locais onde a probabilidade de concentração de tensões é mais elevada.

Por outro lado, durante as operações de soldadura, a expansão ou contracção da solda e do material de base, produzem tensões residuais significativas, que podem originar fendas. O calor resultante destas operações também é fonte de uma possível fendilhação, uma vez que altera a micro-estrutura do material.

Outro aspecto importante é a facilidade ou dificuldade de se executarem operações de soldadura. Esta última, pode provocar que as ligações não sejam executadas nas melhores condições.

Assim, e como corolário, a disposição e a execução dos cordões de soldadura deve ser tal, que minimize as tensões residuais e os possíveis defeitos.

7.3.1.3.4 Espessura dos elementos estruturais

Elementos estruturais (como, por exemplo, chapas de ligação) mais espessos, tendem a ser mais susceptíveis à ocorrência de fendilhação. Tal acontece, uma vez que durante a sua manufactura, o seu interior arrefece mais devagar do que o das chapas mais finas. O arrefecimento mais lento faz com que a micro-estrutura do elemento apresente uma granulometria maior e, por consequência, com menos dureza. Assim, as operações de soldadura, envolvendo chapas espessas, são mais susceptíveis ao aparecimento da fissuração.

7.3.1.4 Fadiga

A fadiga é um processo de acumulação de danos, causados por ciclos repetidos de carga e de deformação. Os danos por fadiga ocorrem em regiões com tensões concentradas, em que essas tensões localizadas excedem a tensão de cedência do material. Após um determinado número de ciclos de carga, os danos acumulados provocam o início e a propagação de fendas. As pontes e os viadutos, por exemplo, são tipos de estruturas onde este processo é comum.

Tal como na rotura frágil, as fendas devidas a fenómenos de fadiga, ocorrem ou iniciam-se em zonas de descontinuidade, onde as tensões tendem a ser incrementadas, ou em ligações soldadas.

Para prever o comportamento das estruturas em relação a este problema, o Eurocódigo 3 (prEN 1993-1-1, 2003) [119], preconiza o uso das curvas S-N (Stress Number), obtidas experimentalmente para diferentes pormenores construtivos, e nas quais se relaciona a variação de tensão com o n.º de ciclos necessários à formação e crescimento de uma fenda, até um valor crítico, o qual pode provocar o desenvolvimento de um dano num determinado componente estrutural.

O mecanismo da fractura por fadiga, de um componente estrutural, pode-se dividir em três fases [114]:

- o período da iniciação, caracterizado pelo aparecimento de pequenas fissuras, geradas por tensões variáveis ou por defeito de material;
- o período da propagação da fenda, que será tão mais rápido quanto maior for o tamanho inicial da fissura e o nível de tensões instaladas;

- o período de ruptura ou fractura final do componente, quando esta atinge o seu tamanho crítico.

7.3.1.5 Arrancamento lamelar (folheação)

Ocorre, geralmente, em estruturas laminadas. Este fenómeno é devido a inclusão de bolhas de ar ou impurezas na fase de fabrico. Quando as peças passam pelos trens de laminagem elas tomam uma forma alongada, que tende a separar o material em folhas, quando este for solicitado por forças com direcção perpendicular ao seu plano. Como exemplo de locais onde este fenómeno pode surgir, tem-se as placas de topo em vigas, ou placas de base de colunas ou pilares.

7.3.2 Patologias relativas às normas e regulamentos

Os regulamentos e as normas existentes não abrangem todos os casos possíveis. São antes um meio que os projectistas possuem para interpretar e resolver as situações que lhes são colocadas.

No entanto, pode acontecer que, apesar de cumprir todos os preceitos regulamentares, a estrutura sofra um acidente.

Expõem-se a seguida três exemplos de deficiências relacionadas com os regulamentos [55]:

- *Ausência de prescrições sobre as acções* : como atrás se referiu, os regulamentos não cobrem todas as situações. Por exemplo, nada é referido sobre sobrecargas devidas à acumulação de águas pluviais ou de pó/escórias produzidas por certas indústrias.

- *Prescrições inadequadas sobre as acções*: em relação à acção do vento ou da neve, o Regulamento de Segurança e Acções não cobre todas as situações possíveis, existindo deficiências relativamente ao efeito do vento em elementos secundários (madres, platibandas, janelas, etc.). Estudos realizados na Universidade de Ontário, no Canadá, revelaram que ainda não se conhece realmente o efeito da acção do vento sobre os edifícios. Em alguns casos obtiveram-se pressões menores que as preconizadas, mas noutros casos obtiveram-se pressões maiores. Também em relação à acção da neve, em 1978 e 1979, nos estados de Illinois e Wisconsin, nos Estados Unidos da América, muitos edifícios colapsaram. Estudos posteriores revelaram que grande parte dos edifícios

tinham sido dimensionados correctamente, mas que o valor preconizado para a dita acção tinha sido ultrapassado.

Resumindo, de entre as acções actuantes, aquelas em que se detectaram deficiências na sua modelação, ou que nem sequer são tidas em consideração, destacam-se:

- deficiências na modelação da acção do vento;
- deficiências ou omissão na modelação da acção da neve, sobretudo em coberturas leves de pavilhões industriais;
- omissão de cargas devidas à acumulação de água;
- imperfeições.

- *Ausência de definição dos estados limites*: de acordo com o R.S.A., as estruturas devem verificar a segurança em relação aos estados limites últimos e de utilização. Se em relação aos primeiros, os técnicos projectistas só têm de cumprir com as regras definidas, em relação à verificação dos estados limites de utilização, o mesmo não se passa. Há algumas lacunas quanto ao cumprimento desta verificação, uma vez que os critérios são mais subjectivos. Assim, não existem limitações quanto aos deslocamentos horizontais, às vibrações e até quanto à durabilidade (no caso das estruturas metálicas, relativamente à sua protecção).

7.3.3 Patologias relativas à fase de projecto e concepção

A fase de projecto afecta de forma decisiva as fases posteriores, nomeadamente o fabrico e a montagem. Deste modo, assim como o projecto se pode dividir em três fases principais, a recolha de documentação e de normas associadas, o cálculo e as peças desenhadas, podemos subdividir as patologias relacionadas com o projecto em três, de acordo com o atrás citado [55]:

7.3.3.1 Documentação insuficiente

Os regulamentos e as normas existentes são o instrumento que os projectistas possuem para o exercício da sua actividade profissional, desde o projecto até à sua construção. Por isso, deve estar familiarizado com elas, entendê-las, manuseá-las e aplicá-las com correcção. No entanto apesar de existir regulamentação sobre as estruturas metálicas, ela não pode abarcar todas as situações possíveis.

- *Ausência de projecto ou regulamentação insuficiente*: esta situação ocorre sobretudo em obras de pouco significado, em que não existe projecto ou, se existe, é um projecto deficiente, em que não se definem adequadamente as acções, os materiais, as ligações, e em que as verificações de cálculo são limitadas.

- *Ausência de documentação de referência*: quando se pode reutilizar a estrutura metálica, deve constar do processo qual a sua anterior finalidade, o modo e os pressupostos para que foi calculada, de forma a aquilatar da sua real apetência para a nova situação.

- *Ausência de definição das condições da estrutura*: por vezes, na fase de cálculo, dimensiona-se a estrutura para a situação mais favorável, de modo a reduzir os custos, descurando-se as hipóteses mais desfavoráveis que, na realidade, conduzem ao dimensionamento correcto da mesma. Por outras palavras deve-se projectar uma estrutura para as situações mais desfavoráveis.

7.3.3.2 Dimensionamento incorrecto

A fase do dimensionamento surge após a fase da concepção, em que o projectista após analisar diversas hipóteses de cálculo opta por aquela que considera a melhor solução.

É na hora de materializar e comprovar os cálculos que podem surgir erros que constituem causas de futuros danos na estrutura.

- *Erros nas hipóteses de cálculo*: de entre os erros que podem surgir cite-se o projectar de estruturas instáveis, o não considerar todas as acções actuantes (por exemplo, a acção do vento no interior de edifícios abertos), o não considerar as hipóteses mais desfavoráveis de combinação de acções (por exemplo, majorar as acções permanentes no cálculo de uma estrutura metálica de cobertura leve de um edifício) ou de não considerar todos os esforços no cálculo de ligações por exemplo, não considerar o momento flector no cálculo de ligações aparafusadas). A ausência de elementos de contraventamento, quer vertical quer horizontal, ocorre sobretudo em edifícios de pequeno porte, levando ao bambeamento (encurvadura lateral) dos elementos estruturais principais.

- *Erros de cálculo*: são muito diversos, e comuns, os erros que podem surgir nesta fase. Vão desde erros na introdução de dados, até erros de concepção, passando

pela ausência de verificação dos estados limites e pela ausência de cálculo de ligações. Chama-se aqui a atenção às dificuldades inerentes ao uso de programas de cálculo automático, que praticamente dispensam a introdução de dados, por parte do projectista, e cujo produto final é a elaboração de inúmeros desenhos e intermináveis listagens de resultados. A complexidade destes resultados e a falta de interacção projectista/programa de cálculo levam a que não se analisem correctamente os mesmos, deixando de ter controle no que se está a fazer.

Como exemplos de dimensionamento incorrecto, relate-se, erros de consideração sobre os problemas de encurvadura, nomeadamente na adopção de comprimentos de encurvadura correctos, na consideração sobre os planos de encurvadura, e sobre os apoios, de modo a definir os ditos comprimentos de encurvadura.

Por ser um erro muito comum no projecto de estruturas metálicas o cálculo de ligações, quer aparafusadas quer soldadas merece uma referência especial.

7.3.3.3 Ligações

O cálculo dos elementos de ligação de uma estrutura metálica é frequentemente negligenciado, sendo pouco usual que se apresente o seu dimensionamento, modelando a comportamento real da ligação. É normal que os projectistas apresentem, por exemplo, pormenores de ligação soldada para todas as ligações, remetendo para o empreiteiro soluções alternativas (por exemplo, ligações aparafusadas), que são mais difíceis de calcular e requerem conhecimentos aprofundados do seu comportamento. Por outro lado, no dimensionamento das ligações, admitem-se hipóteses muito desfavoráveis, ou encastramento perfeito ou articulação, condicionando economicamente a solução e podendo conduzir a posteriores patologias, como por exemplo, deformações excessivas e deficiente estrutura de contraventamento.

7.3.3.3.1 Ligações aparafusadas

Existem três tipos de problemas relacionados com as ligações aparafusadas:

- ruína da ligação;
- problemas de corrosão;
- detalhe incorrecto.

7.3.3.3.1.1 Ruína da ligação

Tipos de ruína em ligações aparafusadas:

Ruína por cisalhamento do fuste do parafuso: em que o parafuso rompe devido à presença de tensão de corte superior à resistência de cálculo;

Ruína por rompimento da chapa junto ao parafuso: ocorre quando a espessura da chapa é insuficiente para a solicitação a que estará sujeita.

Ruína por esmagamento do fuste do parafuso: semelhante ao cisalhamento do parafuso, provocando uma grande deformação no parafuso. A estrutura poderá sofrer grandes deslocamentos;

Ruína por esmagamento da chapa: neste caso a chapa não chega a rasgar. Porém a deformação pode causar deslocamentos importantes na estrutura;

Ruína por solicitação axial do fuste do parafuso: ocorre quando a tensão instalada é superior à tensão de cálculo, levando ao rompimento do parafuso e possível colapso da estrutura;

Ruína por dobra do parafuso: ocorre normalmente em parafusos longos, quando existem momentos que podem provocar o dobrar do referido parafuso;

Ruína por esmagamento global da chapa de ligação: ocorre quando a tensão normal da chapa é superior à de cálculo, provocando o seu rompimento, em toda a sua secção transversal.

7.3.3.3.1.2 Corrosão das ligações aparafusadas

A corrosão em ligações aparafusadas ocorre devido à presença e acumulação de água de frestas.

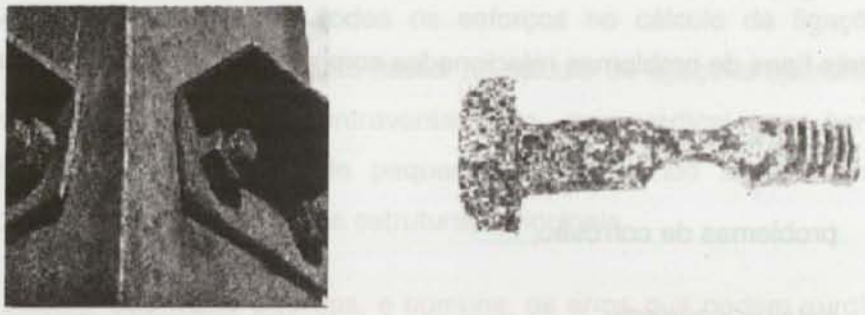


Figura 7.23 - Corrosão em ligações aparafusadas [117]

7.3.3.3.1.3 Detalhe incorrecto

É necessário ao projectista ter em conta, não só os aspectos de cálculo, como os aspectos relacionados com a construção em si. De entre os problemas que surgem em obra refira-se:

- espaçamento necessário para a aplicação de parafusos (ver Figura 7.24);
- localização deficiente dos parafusos, impedindo o seu aperto, tornando-os inacessíveis a operações posteriores de inspecção e manutenção(ver Figura 7.25);

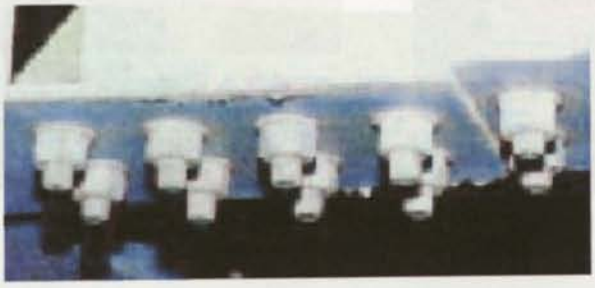


Figura 7.24 - Ligações aparafusadas: parafusos fora da chapa [117]

Figura 7.25 - Ligações aparafusadas: dobragem da chapa para permitir a colocação de parafusos [117]

- erros na furação (ver Figura 7.26);
- erro de cálculo do comprimento ou inclinação das peças (ver Figura 7.27);
- diâmetros errados, quer do furo quer do parafuso;
- desalinhamento da estrutura (ver Figura 7.28);

- parafusos incompatíveis com a ligação;

- falta de aperto do parafuso (ver Figura 7.29).

Figura 7.26 e 7.27 - Ligações aparafusadas: Falta de furo em pilar e Erro de cálculo no comprimento de uma viga [117]

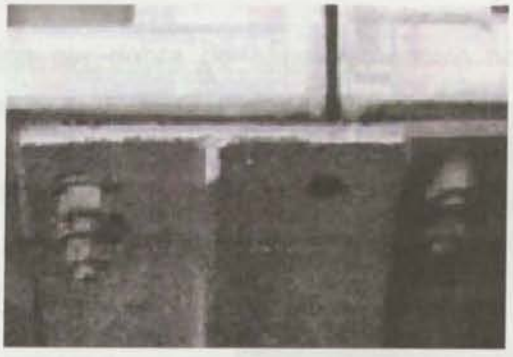


Figura 7.28 e 7.29 - Ligações aparafusadas: desalinhamento geral da estrutura e parafuso com falta de aperto [117]

7.3.3.3.2 Ligações soldadas

Os problemas relacionados com as ligações soldadas estão, sobretudo, relacionados com as operações de soldadura.

Assim de entre os mais comuns, temos:

- Porosidade

Figura 7.30 - Ligações soldadas: ocorrência de porosidade [117]

- Mordeduras

Figura 7.31 - Ligações soldadas: mordeduras [117]

- Inclusão de escórias

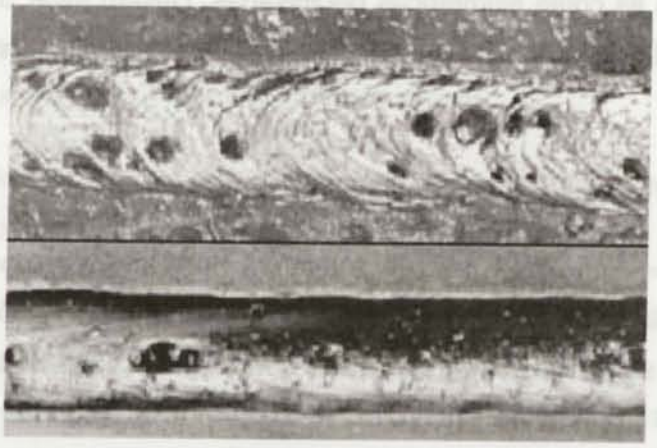


Figura 7.32 - Ligações soldadas: inclusão de escórias [117]

- Falta de fusão

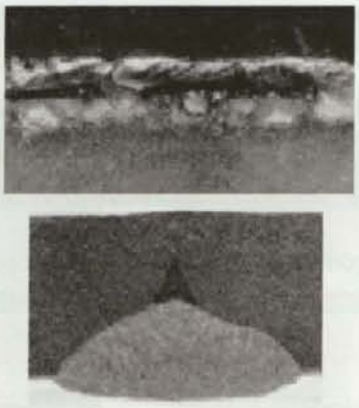


Figura 7.33 - Ligações soldadas: falta de fusão [117]

7.3.3.4 Peças desenhadas incorrectas

A importância das peças desenhadas é tão mais relevante, quanto são elas que vão para a obra. Por outras palavras, o cálculo estrutural pode estar bem feito, mas se as peças desenhadas não estiverem correctas, a obra será construída com incorrecções.

Assim, as peças devem estar definidas de acordo com os cálculos realizados. Nas plantas estruturais deve constar a estrutura, devidamente cotada, devendo ser mencionados os materiais utilizados, as considerações de cálculo que estiveram na base do projecto e as cotas altimétricas necessárias. Devem estar desenhados todos os pormenores necessários à boa execução da estrutura, assim como as suas ligações e apoios.

7.3.4 Patologias relativas à fase de fabrico

Neste ponto citam-se as patologias relacionadas com o fabrico e posterior montagem das estruturas metálicas. Obviamente, os exemplos aqui mencionados, se houver um cuidado mínimo e seguindo as regras de boa construção, são perfeitamente evitáveis, nomeadamente se se cumprir as prescrições do projecto.

7.3.4.1 Descontinuidades de fabrico

De forma a garantir a resistência da estrutura, e por razões económicas, as normas existentes regulam o tamanho e o número de descontinuidades, para o fabrico de estruturas metálicas. De qualquer forma elas existem e estão quantificadas quanto à forma, tamanho, distribuição e localização, de acordo com as normas vigentes.

7.3.4.2 Fabrico não conforme com o projecto e incumprimento de tolerâncias

Acontece quando não é cumprido o projecto e envolve, por exemplo, a alteração dos perfis e das ligações, quer aparafusadas quer soldadas.

O incumprimento das tolerâncias, apesar de não ser grave, leva a que se tenha de adaptar *in situ* a estrutura à situação real.

Os defeitos mais significativos surgem, sobretudo, nas operações de soldadura e incluem fendas no cordão de soldadura, porosidade, escórias, falta de fusão, falta de penetração, etc. (ver ponto 7.3.3.3.2).

7.3.5 Patologias relativas à fase de montagem

A fase de montagem é uma das fases mais críticas do processo construtivo. Segundo as estatísticas, cerca de um terço dos acidentes registados com estruturas metálicas ocorrem nesta fase [55].

A estrutura só está completa quando totalmente montada. No entanto, nesta fase, podem surgir ocasiões em que ela se torne instável, fruto de esquemas construtivos muito diferentes daqueles para que ela foi calculada, por exemplo, situações de estaticidade.

Surge assim a necessidade do projectista, sempre que se justificar, estabelecer esquemas de montagem para evitar situações de rotura.

Além do supracitado, das deficiências detectadas, relate-se a montagem de estruturas metálicas não conformes com o projecto (ver Figuras 7.26 e 7.27).

Um exemplo disso é a montagem de ligações com excentricidades adicionais, em que os projectistas, normalmente calculam as estruturas metálicas como sistemas articulados planos, em que todas as barras que constituem o sistema são bielas, isto é, apenas suportam e transmitem esforços axiais, segundo o eixo da barra. Se existirem excentricidades podem ocorrer patologias graves nas ligações.

Outra situação frequente, em fase de montagem é a acumulação de material de obra sobre a estrutura, provocando o aumento significativo da carga. Sendo que a estrutura, normalmente, ainda não se encontra completa e nos casos em que não esteja montada a estrutura de contraventamento, este facto pode ter consequências catastróficas.

7.3.6 Patologias relativas à falta de fiscalização adequada

A existência de uma fiscalização adequada, evita, ou diminui significativamente, os defeitos existentes na estrutura.

Assim, deve existir um plano eficaz de fiscalização, capaz de coordenar todas as especialidades envolvidas na construção. Esse plano deve incidir, sobretudo, sobre as zonas da estrutura que apresentem uma maior probabilidade de risco.

Das funções que os fiscais devem ter especial cuidado saliente-se :

- Falta de acessibilidade
- Defeitos de montagem
- Defeitos de protecção

7.3.7 Patologias relativas ao uso inadequado da estrutura

Qualquer alteração em relação aos pressupostos de cálculo pode afectar as condições de utilização da estrutura.

De entre os danos, em estruturas metálicas, relativos ao seu uso inadequado cite-se [55]:

Utilização incorrecta da estrutura: diz respeito à alteração do uso da mesma, acompanhada com o aumento significativo da sobrecarga. Como exemplo desta situação, temos a instalação de arquivos em habitações, a instalação de maquinaria que introduz vibrações na estrutura, etc.

Alteração da própria estrutura: tal como o nome indica, surge pela alteração do sistema estrutural. Como exemplo relate-se a introdução de meios pisos (em edifícios comerciais), a colocação de publicidade exterior (que pode provocar a acumúlação de água e acelerar processos de corrosão indesejáveis e a remoção da protecção superficial da estrutura (pintura) e consequente exposição da mesma a agentes corrosivos.

Manutenção insuficiente: para evitar a degradação das estruturas metálicas, devem ser previstas operações de manutenção. De entre as possíveis causas de degradação estrutural, podemos citar:

- a reparação de soldaduras é, muitas vezes, fonte de futuras fendas ou de futuros problemas, em particular se o aço existente tem fraca capacidade para ser local de operações com soldas;

- as ligações articuladas, isto é, que permitem o movimento, se não forem devidamente lubrificadas;

- os revestimentos, incluindo a protecção catódica, que não forem alvo de operações de manutenção podem resultar em corrosão.

7.3.8 Patologias produzidas por causas fortuitas e inexplicáveis.

Entenda-se por causas fortuitas os acontecimentos que têm uma probabilidade muito pequena de ocorrerem. Por causas inexplicáveis entende-se todas aquelas deficiências cuja origem não se consegue determinar. De seguida relatam-se alguns destes casos [55] e [113].

7.3.8.1 Acções não previstas

A presença de solicitações acidentais ou de carácter dinâmico (sismos, vento, etc.), por exemplo, podem provocar a deformação ou até a ruptura de elementos estruturais. Se tal acontecer, ou quando os ditos elementos estruturais, sofram deformação plástica ou encurvadura, pode significar numa redução significativa da sua capacidade resistente. A extensão, natureza e qualquer outro aspecto que possa indiciar uma deformação plástica deve ser anotada e descrita com todo o pormenor, durante os procedimentos de inspecção. Por outro lado, o efeito destes danos no comportamento da estrutura, deve ser avaliado.

7.3.8.2 Assentamentos excessivos

A ocorrência de assentamentos de apoio pode ter consequências gravosas em estruturas. Veja-se o caso de assentamentos em estruturas de edifícios industriais, pela incidência que poderão ter sobre os equipamentos ou pontes rolantes.

7.3.8.3 Impactos

Duas situações distintas serão aqui focadas. Em primeiro lugar, os impactos que surgem ainda em fase de transporte e montagem da estrutura, situação que a acontecer, pode ser alterada. Em segundo lugar, os impactos de veículos em

estruturas, nomeadamente em guardas de protecção, mas também em estruturas propriamente ditas, o que pode levar à perda de capacidade resistente da mesma.

7.3.8.4 Fogo

Em relação à acção do fogo sobre as estruturas metálicas diga-se que existe regulamentação referente à avaliação das suas resistência (prEN 1993-1-2:2002). [120]. Durante um incêndio, as estruturas metálicas estão sujeitas a alteração das suas propriedades mecânicas, surgindo tensões adicionais devido à dilatação (fase de aquecimento) e à retracção (fase de arrefecimento) dos elementos aquecidos [121].

O comportamento das estruturas metálicas caracteriza-se por duas fases distintas: na primeira o aço conserva a sua estrutura cristalina e não se deforma de modo significativo, na segunda a deformação é apreciável, pelo que a estrutura plastifica. Por consequência, no primeiro caso o material comporta-se de uma forma elástica, pelo que pode continuar em serviço, enquanto que, no segundo caso ele não pode ser reutilizado.

7.4 A inspecção de estruturas metálicas

Como nos demais sistemas estruturais, as estruturas metálicas deverão ser sujeitas a acções de inspecção e avaliação. E esta necessidade é tanto maior se se estiver perante um projecto de reabilitação e/ou reforço de uma estrutura.

A execução de uma reparação exige a realização de etapas fundamentais, interrelacionadas entre si e que fazem da inspecção uma peça fundamental na sua persecução [114]:

- encontrar o dano ou deterioração;
- determinar a sua causa;
- avaliar a resistência da construção no seu estado actual e os efeitos que possa ter ocasionado a deterioração, sobre o comportamento em serviço da estrutura;
- avaliar qualitativa e quantitativamente as reparações a fazer;
- eleger um método de reparação adequado ao caso concreto.

No entanto, não é necessário uma intervenção estrutural para que as estruturas metálicas estejam sujeitas a inspecções de rotina.

Acresce que, em casos especiais, elas devem também estar sujeitas a inspecções periódicas detalhadas, a saber:

- se existir o risco elevado de deterioração;
- se se detectar falta de segurança em qualquer elemento estrutural ou ligação;
- se a estrutura fizer parte de um edifício que possua funções importantes no contexto nacional (por exemplo ao nível de segurança ou ao nível de saúde).

7.4.1 A inspecção de rotina

É uma inspecção preliminar, que se realiza numa fase inicial do estudo, e tem como objectivo principal a obtenção de uma visão global do problema.

Na inspecção de rotina prevê-se a avaliação da estrutura metálica no que diz respeito aos danos visíveis e, se existirem, a determinação da patologia que os provocou.

Esta inspecção deve ser efectuada por pessoas com experiência.

Se os danos detectados forem significativos, isto é, tenham importância na resistência e durabilidade da estrutura, o elemento em causa, ou toda a estrutura, deve estar sujeito a uma inspecção detalhada.

O procedimento mais comum a esta inspecção envolve a observação visual, da estrutura de forma a detectar os danos e as deformações existentes. Deve ser dada uma atenção especial aos elementos da estrutura que estão mais sujeitos às acções mecânicas. Também as ligações (aparafusadas, soldadas ou rebitadas) devem ser analisadas com todo o cuidado.

De igual modo, deve-se averiguar se a estrutura apresenta algum dano por corrosão, tendo o cuidado de verificar o estado do sistema de pintura.

O objectivo desta inspecção deve ser determinado tendo em atenção o meio ambiente, sendo direccionado, em primeiro lugar, aos elementos que possuam maior exposição.

Se se detectar um ataque de corrosão, deve-se estimar a perda de material, bem como a sua extensão e profundidade.

A frequência das inspecções de rotina deve ser determinada em função das condições de serviço e utilização da estrutura.

7.4.2 Inspecção periódica e detalhada

Esta inspecção compreende o exame de uma estrutura metálica e todas as acções necessárias à sua execução.

Do mesmo modo que a inspecção de rotina, deve ser efectuada por pessoas com experiência, acrescentando que devem estar aptas a realizarem e interpretarem todos os ensaios necessários à investigação.

As acções a empreender e o seu objectivo, devem ser determinadas de modo a avaliar o estado e o uso da estrutura, as acções de manutenção já realizadas e as medidas relativas aos métodos de inspecção necessários.

O modo de actuação das acções a que a estrutura está sujeita também é um factor a ter em consideração.

A inspecção detalhada pode ser acompanhada da realização de medições com o objectivo de monitorizar e auscultar a estrutura, de modo a avaliar a sua evolução.

O resultado desta inspecção deve ser documentado através de um relatório de inspecção.

Nele devem estar referidas, além da data em que se realizou a inspecção, quais os elementos inspeccionados, o local da mesma, os dados e os resultados obtidos, o nível de degradação encontrado, os danos e sua patologia.

Também deve ser referido quais as medidas de manutenção preconizadas, tais como, reparação, pintura, reforço, soldaduras, etc.

A pessoa que realizou a inspecção deve ser o autor do relatório, avalizá-lo e entregá-lo ao dono de obra.

7.5 Técnicas de Inspecção em Estruturas Metálicas

Um dos meios essenciais para obter uma avaliação correcta é a utilização de métodos de ensaio que fornecem a informação necessária para uma inspecção fiável.

Na detecção de danos, e patologias a eles associadas, nas estruturas metálicas, podem ser utilizados Ensaios Não Destrutivos (END). De entre os mais utilizados faz-se agora uma descrição sobre os seus fundamentos, salientando-se os danos mais importantes para a sua aplicação. No final deste capítulo apresenta-se um quadro, onde se resumem os principais métodos, o seu campo de aplicação e as vantagens, as desvantagens e as limitações de cada um.

A selecção dos métodos de END mais apropriados, para uma determinada inspecção dependem de factores tão distintos como:

- o material de construção;
- a espessura da secção;
- o tipo de dano a inspeccionar;
- o orçamento disponível para a inspecção;
- o nível de conhecimentos do inspector.

Em primeiro lugar, nesta descrição, surge a inspecção visual que apesar de não ser um método propriamente dito, aparece aqui como o elemento base de todos os métodos posteriormente descritos. Pretende-se com isto dizer que a inspecção visual deve ser sempre utilizada como um complemento dos END.

7.5.1 Inspecção Visual

A inspecção visual é imprescindível, especialmente nas inspecções preliminares, pois permite obter um conhecimento global da estrutura a inspeccionar e, por outro lado, detectar os danos.

Para se realizar uma inspecção visual a um determinado elemento estrutural, deve ser dado particular ênfase à observação das descontinuidades e ligações existentes. Assim, deve ser anotado o seu tipo, geometria, tamanho, localização e orientação. No entanto, deve-se também observar com particular atenção outros aspectos

importantes, tais como: a corrosão, a deformação, o alinhamento das peças, a porosidade, etc.

Saliente-se que não deve ser descurada uma inspecção global de toda a estrutura.

De entre as aplicações da observação visual, salienta-se:

- **Inspecção da soldadura**: onde se inclui a inspecção em todas as fases da soldadura, verificando a sua preparação, execução e estado final;

- **Metrologia**: incluindo a medição dos componentes da estrutura e a rugosidade superficial;

- **Monitorização das condições de serviço**: detecção de corrosão, de defeitos e fissuras.

Quando se está a realizar a inspecção visual a uma estrutura, e o acesso a um determinado local é difícil, ou mesmo impossível, recorre-se, usualmente, a sistemas de espelhos, a fibras ópticas com micro câmaras acopladas e a sistemas de iluminação, fazendo com que a imagem desse local surja em oculares ou monitores de televisão.

A fotografia dos locais inspeccionados e dos danos encontrados deve acompanhar esta fase de observação visual.

A utilização de câmaras, combinadas com boroscópios, gravadores de vídeo e processamento de imagem (videoscopia), permite a recolha e armazenamento de dados em tempo real, muito útil para futuras utilizações, como a comparação com outros dados recolhidos em datas diferentes.

7.5.2 Ensaio com líquidos penetrantes

É um método utilizado na detecção e localização de descontinuidades superficiais, tais como fendas (por defeito de fabrico, por fadiga do material, etc.), porosidade, laminação, em materiais isentos de porosidade.

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após efectuar a remoção do líquido da superfície, através de lavagem com água ou utilizando solventes, aplica-se o chamado revelador, que possibilitará a revelação dos locais em que exista alguma descontinuidade. Este método é preciso e de fácil execução.

7.5.2.1 Execução do método

Este método pode ser dividido em seis etapas principais [122]:

a) Preparação da superfície

A superfície tem que estar limpa e seca para se iniciar o ensaio, uma vez que a existência de líquidos e impurezas (rugosidade e ferrugem) podem afectar a fiabilidade dos resultados obtidos.

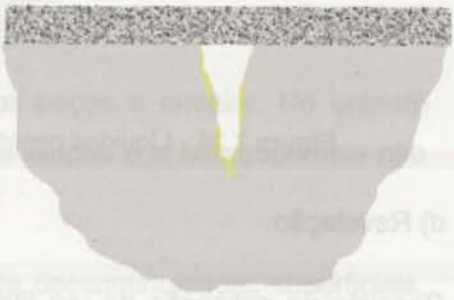


Figura 7.34 - Líquidos penetrantes: preparação e limpeza inicial da superfície [122]

b) Aplicação do líquido penetrante

É a fase que corresponde à aplicação do líquido, designado por penetrante. Normalmente, apresenta a cor vermelha, pois permite uma melhor visibilidade, e forma um filme sobre a superfície. Por capilaridade, que é uma propriedade relacionada com o poder de penetração de um líquido em áreas extremamente pequenas, devido à sua baixa tensão superficial, o penetrante ocupa a descontinuidade. É necessário um certo tempo para que este fenómeno se complete.

O poder de penetração é uma característica fundamental, uma vez que a sensibilidade do ensaio depende do mesmo.

Figura 7.35 - Líquidos penetrantes: aplicação do penetrante [122]

c) Remoção do excesso de penetrante

O objectivo desta fase é a remoção do excesso do penetrante. Essa remoção é feita com recurso a produtos específicos, em função do tipo de líquido utilizado. A superfície deve ficar isenta de qualquer impureza.

Figura 7.36 - Líquidos penetrantes: remoção do excesso de penetrante [122]

d) Revelação

Consiste na aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície.

O revelador mais utilizado é um pó fino branco (talco). O revelador absorve o penetrante revelando as descontinuidades existentes. É necessário algum tempo para que a revelação fique em boas condições.

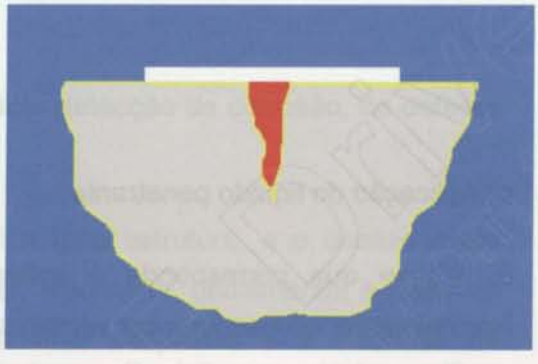


Figura 7.37 - Líquidos penetrantes: aplicação do revelador [122]

e) Avaliação e Inspecção

A inspecção deve ser feita segundo boas condições luminosidade, dependendo estas, do tipo de penetrante utilizado. Se este for visível é necessário luz, se for fluorescente será necessário fazer a inspecção no escuro.

Após a inspecção deve ser elaborado um relatório em que deve constar as condições do ensaio, o tipo de líquido penetrante utilizado e os danos encontrados.

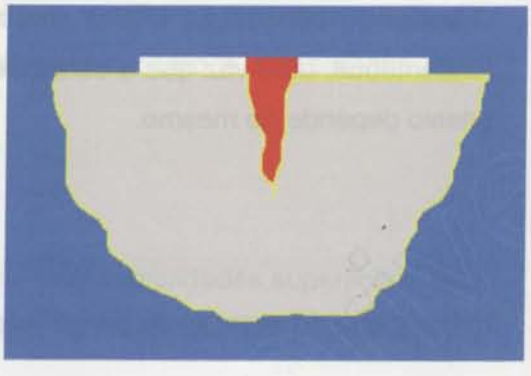


Figura 7.38 - Líquidos penetrantes: absorção do líquido pelo revelador [122]

f) Limpeza final

Engloba a limpeza na zona ensaiada, com a remoção dos produtos utilizados, uma vez que podem afectar etapas posteriores como as operações de soldadura.

7.5.2.2 Vantagens e limitações

O ensaio com líquidos penetrantes é muito simples, quer de ser executado quer de ser interpretado. Assim, o seu executor também requer um período pequeno de aprendizagem.

Não existe limitação para o tamanho e a forma das peças a ensaiar. No entanto chama-se a atenção para que as peças têm de estar limpas e a sua superfície não deve ser nem rugosa nem porosa.

A grande limitação deste método é que ele só detecta descontinuidades superficiais, não podendo existir nenhum material estranho na mesma.

A execução deste ensaio deve ser feita numa faixa de temperatura compreendida entre os 10ºC e os 52 ºC.

7.5.3 Ensaios com partículas magnéticas

É um ensaio utilizado para detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos, bem como na inspecção de cordões de soldadura.

O fundamento do método é baseado na criação de um campo magnético que percorre toda a superfície do material. As linhas magnéticas de fluxo induzido no material, desviam-se da sua trajectória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou sub-superficial (ver Figura 7.39), criando uma região com polaridade magnética, altamente atractiva às partículas magnéticas.

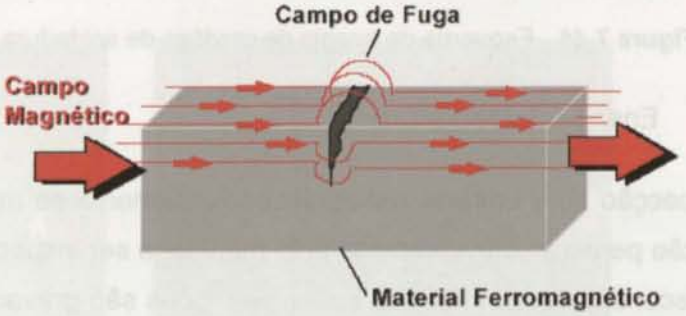


Figura 7.39 - Elemento metálico que contém uma fissura, dando origem a um campo de fuga [123]

No momento em que se provoca essa magnetização na peça, aplicam-se as partículas magnéticas sobre a peça, sendo atraídas ao local da superfície que possui uma descontinuidade, formando, assim, uma clara indicação do defeito existente.

Para que as descontinuidades sejam detectadas, é importante que elas estejam de tal forma, que sejam "intersectadas" pela linha de fluxo magnético induzido. Por consequência, as peças deverão ser magnetizadas em, pelo menos, duas direcções, desfasadas de 90º. Os aparelhos que executam esta tarefa designam-se por Yokes.

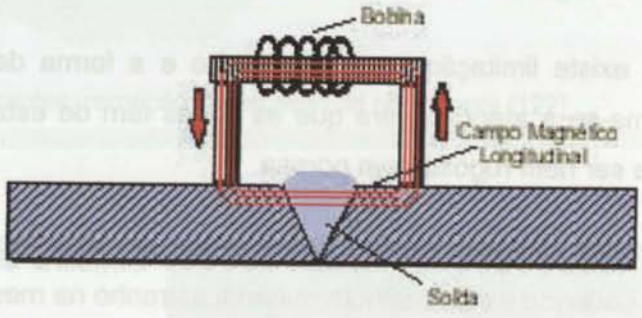


Figura 7.40 - Técnica de inspecção utilizando um Yoke electromagnético [123)

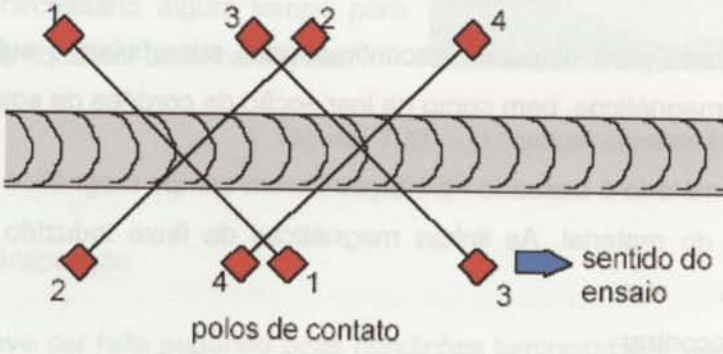


Figura 7.41 - Esquema de ensaio de cordões de soldadura utilizando um Yoke [123]

7.5.4 Ensaios Radiográficos

A inspecção com ensaios radiográficos fundamenta-se na diferença da absorção da radiação penetrante evidenciada pelo material a ser inspeccionado, devido à presença de descontinuidades internas. Estas alterações são gravadas num filme, em sensores radiográficos ou num intensificador de imagem. A descontinuidade existente, surge como uma sombra, com uma densidade fotográfica distinta das zonas sãs.

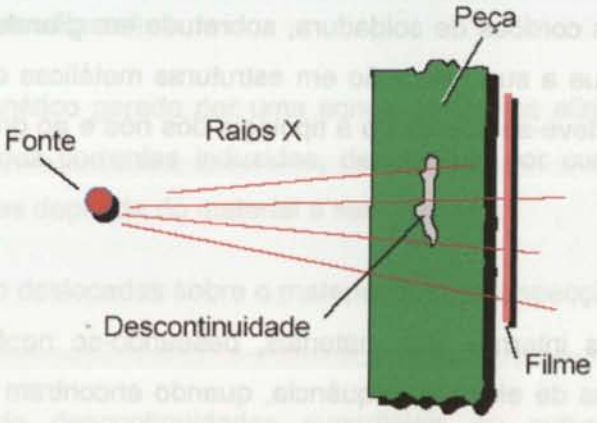


Figura 7.42 - Técnica Geral de Ensaio Radiográfico [124]

De entre as propriedades da radiação penetrante (raios x e raios gama) citem-se três características que são fundamentais para a sua utilização em END [124]:

- deslocam-se em linha recta;
- podem atravessar materiais opacos à luz, sendo parcialmente absorvidos por esses materiais;
- podem ser imprimidos em películas fotográficas, formando imagens.

A avaliação da radiografia é baseada na comparação das diferenças de absorção dos materiais. Normalmente, as regiões mais escuras representam as zonas em que a penetração é mais fácil (zonas pouco espessas ou com descontinuidades).

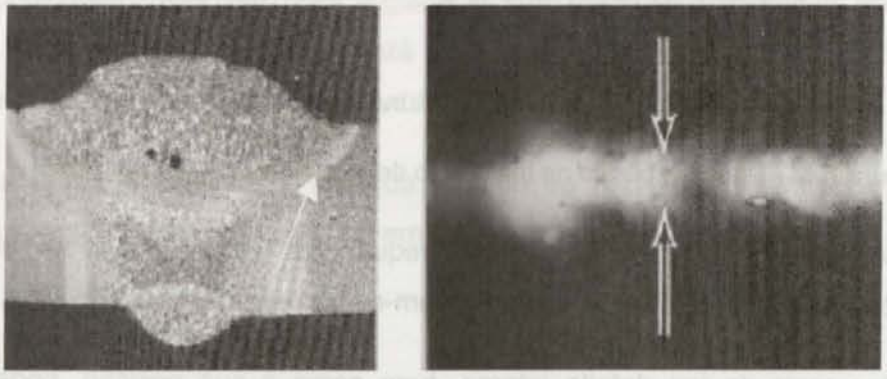


Figura 7.43 - Ensaio radiográfico: cordão de soldadura com porosidade [124]

Nos ensaios radiográficos estão incluídos a radiografia (técnica convencional com raios X), a gamagrafia (que tem como fonte de radiação um componente radioactivo) e a radioscopia (que proporciona uma imagem instantânea da peça a ser inspeccionada).

Utiliza-se na inspecção aos cordões de soldadura, sobretudo em grandes estruturas, caldeiras e tubos, sendo que a sua aplicação em estruturas metálicas de edifícios é muito reduzida. Este facto deve-se sobretudo à tipologia dos nós e ao grande número de ligações angulares.

7.5.5 Ultra - som

Detectam descontinuidades internas dos materiais, baseando-se no fenómeno de reflexão de ondas acústicas de elevada frequência, quando encontram obstáculos à sua propagação, dentro do material.

O impulso ultra-sónico é gerado e transmitido através de um transdutor (emissor), encostado ou acoplado ao elemento a ensaiar. Os impulsos reflectidos por existência de uma descontinuidade, ou pela chegada da onda a uma superfície oposta limite, são captados pelo transdutor (receptor) e são convertidos em sinais electrónicos. Por outras palavras, as ondas percorrem o material alvo de ensaio e são reflectidas nas superfícies, refractadas em interfaces entre dois materiais ou difractadas em vazios ou em torno das descontinuidades existentes.

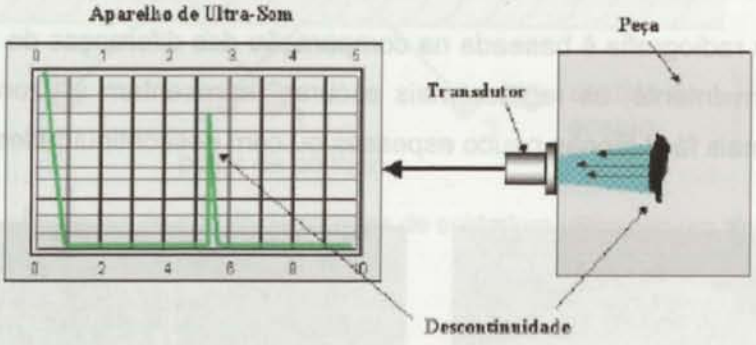


Figura 7.44 - Princípio básico da Inspecção de materiais por ultra-som [125]

Os ultra-sons são ondas acústicas com frequências acima do limite audível. Normalmente, as frequências ultra-sónicas situam-se na casa de 0,50 a 25 MHz.

As dimensões reais de um defeito interno, bem como a sua posição, podem ser determinadas com uma precisão razoável.

Esta técnica também é utilizada para medir a espessura e determinar a corrosão de um qualquer elemento, assim como para a inspecção de soldas.

7.5.6 Correntes Parasitas

O campo magnético gerado por uma sonda ou bobine alimentada por uma corrente alternada, produz correntes induzidas, designadas por correntes parasitas. O fluxo destas correntes depende do material a ser ensaiado.

As bobines são deslocadas sobre o material alvo da inspecção, e detectam fissuras ou descontinuidades.

A presença de descontinuidades superficiais ou sub-superficiais, assim como alterações nas características físico-químicas do material (composição química, granulometria, dureza, têmpera, etc.) alteram o fluxo das correntes parasitas, possibilitando a sua detecção.

É um método limpo e rápido, mas requer tecnologia e prática na realização e interpretação dos resultados obtidos.

7.5.7 Emissão acústica

O fundamento deste método é a detecção de ondas acústicas emitidas por um material, em função de uma força ou deformação. Caso o material possua uma fissura, descontinuidade ou defeito, a sua propagação irá provocar ondas acústicas, detectadas pelo sistema.

Este método não deve ser utilizado para determinar o tipo ou dimensão das descontinuidades, mas sim para registar a sua evolução, durante a aplicação de tensões para as quais a estrutura está sujeita, desde que elas sejam suficiente para gerar deformações localizadas, aumentar as proporções do defeito, etc.

Assim, a emissão acústica é utilizada quando se necessita analisar ou estudar o comportamento dinâmico de defeitos em estruturas metálicas complexas.

7.5.8 Termografia

Esta técnica utiliza raios infravermelhos para medir temperaturas ou observar padrões diferenciais de distribuição de temperaturas, com o objectivo de fornecer informação relativa à condição de um componente estrutural. É uma técnica muito útil, pois permite:

- realizar medições sem contacto físico com a estrutura (segurança);

- verificar equipamentos em pleno funcionamento;
- inspeccionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento).

O tratamento dos resultados obtidos permite determinar com eficiência os locais com defeitos, avaliar a espessura dos materiais, fazendo com que se obtenham previsões com segurança, sobre o funcionamento dos mesmos.

7.5.9 Procedimentos para as inspecções

7.5.9.1 Inspecção de fendas

A inspecção *in situ* de fendas em estruturas metálicas, pode ser executada com recurso a vários métodos não destrutivos.

Dos END mais utilizados, para este tipo de estruturas, refira-se:

- a inspecção (observação) visual;
- ensaios com líquidos penetrantes;
- ensaios de partículas magnéticas;
- ensaios radiológicos;
- ensaios com ultra-sons;
- ensaios com correntes parasitas;
- termografia.

A descrição e respectivos fundamentos foram descritos no ponto anterior.

A selecção de um destes métodos, aquando de uma inspecção, depende de um grande número de variáveis, em que se inclui:

- a natureza das descontinuidades;
- a acessibilidade;
- o tipo de ligação e sua geometria;
- o tipo de material;

- a eficácia do método aplicado, bem como a possibilidade de se executarem repetições;

- a qualificação do inspector;

- aspectos económicos.

No caso da inspecção de fendas em estruturas metálicas, são recomendados os seguintes passos:

a) em primeiro lugar, uma inspecção visual, com a ajuda a material de ampliação visual (5 x ou mais);

b) se as fendas são suspeitas e se apresentarem secas, pode ser utilizado o ensaio com líquidos penetrantes, como forma de confirmação. A utilização de métodos como o dos ensaios por ultra-som e os ensaios com partículas magnéticas, pode conduzir a resultados mais credíveis;

c) deve ser assinalada a localização, orientação e comprimento das fendas;

d) devem ser fotografadas todas as fendas, mostrando a sua posição relativamente à estrutura;

e) o inspector deve elaborar um relatório completo de inspecção. Este relatório deve mencionar a identificação e a localização das estruturas avaliadas, a data e o tempo de duração da mesma, as descontinuidades detectadas (onde se inclui indicações sobre a localização, tamanho, orientação e classificação).

7.5.9.2 Inspecção de rebites perdidos

Neste tipo de inspecção deve-se incluir procedimentos por forma a localizar rebites perdidos e/ou deteriorados.

Uma das formas de se avaliar a capacidade de um rebite é proceder a um impacto (por exemplo, através de um martelo), na cabeça do mesmo. A sua eficiência pode ser avaliada pelo som produzido pelo impacto.

Durante uma inspecção, não é necessário verificar toas as ligações rebitadas, e muito menos todos os rebites. Deve ser feita uma amostragem das amostras mais representativas.

7.5.9.3 Inspecção da corrosão

A inspecção à corrosão, em elementos metálicos, é necessárias para [126]:

- o desenvolvimento de novos materiais, incluindo novos agentes preventivos;
- a selecção dos materiais de construção;
- o controlo de qualidade dos materiais e agentes preventivos;
- a monitorização da corrosão;
- a análise dos danos da corrosão.

Os resultados mais representativos e credíveis são obtidos quando o elemento alvo de investigação está em serviço. Para tal devemos recorrer aos ensaios *in situ*.

Nos procedimentos para inspeccionar uma estrutura com corrosão deve-se recorrer a aparelhos apropriados para a sua medição e definição do tipo de corrosão. De entre os mais utilizados encontram-se os medidores da espessura de corrosão, medidores de ultra-sons, máquina fotográfica e martelo de impacto (para rebites).

Sempre que se detecte actividade de corrosão, deve ser referido o tipo, extensão, grau de corrosão e possíveis causas.

De entre os END que podem ser utilizados na inspecção de estruturas que apresentem danos por corrosão e que são os mais utilizados incluem-se a inspecção visual e os ensaios com ultra-sons.

A inspecção visual é uma técnica não destrutiva primária. Deve ser efectuada em todas as zonas susceptíveis por forma a localizar, identificar e determinar a extensão da corrosão. Acresce ainda que devem ser anotadas todas as falhas na pintura de protecção (por ser um eventual indício de uma zona com corrosão).

A utilização de ensaios de ultra-sons é indicada quando se observa que a corrosão pode ter causado uma perda significativa de material, sobretudo em componentes estruturais principais. Os ensaios podem ser realizados, quer através da superfície pintada quer através das zonas danificadas por corrosão.

Estão disponíveis, no mercado, aparelhos (transdutores) de várias formas e tamanhos, o que leva, por exemplo, a que se possa inspeccionar uma determinada estrutura, em que apenas uma superfície esteja acessível.

Por forma a estudar o estado da estrutura, a monitorização da corrosão é um elemento fundamental. Pode-se recorrer a variados métodos, dos quais se destacam [126]:

- a medição do eléctrodo potencial;
- a determinação da perda de peso;
- a medição da resistência;
- a determinação da resistência à polarização;
- a medição de uma emissão acústica;
- ensaios ultra-sónicos.

7.5.9.4 Inspecção de elementos com deformação

Quando, numa inspecção, se detectam elementos estruturais com deformações plásticas ou com encurvadura, deve ser detalhado o tipo e extensão de danos, para que se efectue uma avaliação correcta do efeito do dano apresentado.

Assim, a magnitude de todas as deformações, bem como a sua localização, deve ser anotada e fotografada, assim como a condição dos elementos adjacentes, o seu efeito e operacionalidade na estrutura e a identificação das causas que provocam tal ocorrência.

7.5.9.5 Inspecção de soldaduras

O objectivo deste tipo de inspecção é assegurar a qualidade de soldadura, for forma a que ela assegure de forma correcta a função para que foi projectada. Essa qualidade "mede-se" pela aparência do cordão de soldadura (inspecção visual) e pelos resultados obtidos nos ensaios.

A utilização de técnicas não destrutivas ajuda na certificação dessa qualidade.

Dos métodos atrás citados, os mais utilizados são: a inspecção visual, os líquidos penetrantes, as partículas magnéticas, os ultra-sons e os radiográficos.

A inspecção visual é o método mais utilizado, já que apresenta uma boa relação custo/eficiência. É muitas vezes utilizado como uma primeira aproximação do investigador à avaliação da soldadura, sendo que é através da observação visual que ele determina a utilização de outro método complementar de inspecção. Com este método só se detectam defeitos superficiais.

A radiografia (raios X) é, dos métodos referidos, o mais versátil e aquele que determina com mais eficácia os defeitos na soldadura. Detecta defeitos internos e superficiais, tendo como desvantagem principal as radiações emitidas.

A inspecção por partículas magnéticas é um bom método para detectar fissuras superficiais e em camadas interiores, em qualquer direcção. É mais simples que a radiografia mas está limitado à utilização apenas em materiais ferromagnéticos.

A inspecção com líquidos penetrantes é muitas vezes referida como um prolongamento da inspecção visual. A sua utilização restringe-se à detecção de fissuras superficiais, podendo também ser aplicada em materiais não ferrosos, ao contrário da inspecção com partículas magnéticas.

A inspecção com ultra-sons também é um dos END mais solicitados pela facilidade e abundância de aparelhos de teste. No entanto, a interpretação dos dados obtidos requer técnicos com muita experiência.

Um programa de inspecção de soldaduras, utilizando END, deve reconhecer as limitações inerentes a cada método.

Como regra para este tipo de inspecção deve-se ter em consideração os "cinco P's", adaptando a regra de Hayes [127]:

1. **Processo de selecção**: deve ser direccionado para o objectivo principal da inspecção;

2. **Preparação**: a configuração do ensaio deve ser adequada com o processo de soldadura utilizado na construção;

3. **Procedimento**: deve ser cuidadosamente executado e de acordo com as normas e especificações existentes;

4. **Pré-ensaio**: sempre que possível deve-se realizar um ensaio em condições semelhantes à do ensaio real, por forma a assegurar que o método oferece os resultados desejados;

5. **Pessoal**: as pessoas que realizarão a inspecção devem estar devidamente qualificadas, assim como têm de ser capazes de interpretar os resultados obtidos.

De seguida apresenta-se, no Quadro 7.1, o resumo sobre a utilização destes cinco métodos na inspecção à soldadura.

Quadro 7.1 - Inspecção de soldaduras: métodos mais utilizados [127]

Método de Inspecção	Equipamento necessário	Objectivo do ensaio	Vantagens	Desvantagens	Observações
Visual	Lentes de aumento; Medidor da espessura dos cordões de soldadura; Régua de bolso; Normas e procedimentos de trabalho.	Danos superficiais, tais como, fendas, porosidade, falta de fusão, mordeduras e desalinhamento de cordões.	Baixo custo; Pode ser executado enquanto se desenvolve o trabalho, permitindo a correcção das falhas detectadas; Indica procedimentos incorrectos.	Só se aplica a danos superficiais; Não permite o registo permanente de dados.	Deve ser considerado como o primeiro método de inspecção, qualquer que seja o tipo de inspecção requerida; É o método que permite uma interacção entre o investigador e o executante.
Radiográfica	Aparelhos de raios X ou gama, disponíveis comercialmente; Filmes e unidades de processamento de dados; Equipamento de visão fluorescente.	Danos internos macroscópicos - fissuras, porosidade, vazios, inclusões não metálicas.	Se registadas em filme, fornece uma gravação permanente da inspecção; Apresenta um baixo custo se a inspecção for realizada em ecrã fluorescente.	É necessário um conhecimento do método na escolha dos ângulos de exposição às radiações, no manuseamento do equipamento e na interpretação dos resultados. É necessária precaução, devido às radiações; Não é indicado para inspecções em cordões de soldadura muito finos.	É um método de inspecção referido em muitas normas e especificações; Útil na qualificação dos processos de soldadura; Devido ao seu custo, deve ser limitado às zonas onde outros métodos de inspecção não forneçam resultados credíveis.

Partículas Magnéticas	Equipamento especial; Pó magnético, seco ou líquido; Pode ser fluorescente, se se utilizar equipamento ultra-violeta.	Útil na detecção de descontinuidades superficiais, nomeadamente fissuras.	Fácil utilização; Permite controlar a sensibilidade; Custo relativamente baixo.	- Apenas se aplica em materiais ferromagnéticos; É necessária perícia na interpretação e reconhecimento de dados irrelevantes; Difícil de utilizar em superfícies rugosas.	Não consegue detectar defeitos alongados, paralelos ao campo magnético. Por essa razão deve ser aplicado segundo duas direcções, perpendiculares entre si.
Líquidos Penetrantes	Existe em pacotes comerciais, que contém, entre outros, o líquido e o revelador; Fonte de luz ultra-violeta, se se utilizar líquidos fluorescentes.	Fendas superficiais, não detectáveis à vista desarmada.	Aplicável a materiais magnéticos e não magnéticos; Fácil utilização; Baixo custo.	Só detecta defeitos superficiais; Não deve ser utilizado em superfícies quentes.	Pode fornecer indicações incorrectas se a superfície não estiver limpa.
Ultra-sons	Disponível equipamento comercial.	Falhas superficiais, incluindo as mais pequenas, incapazes de serem detectadas por outros métodos; Útil para detectar delaminações sub-superficiais.	Muito sensível; Permite ensaiar ligações inacessíveis aos métodos radiográficos.	Requer um conhecimento profundo do método para interpretar os resultados obtidos; Ainda não está disponível equipamento para a gravação contínua dos resultados.	O equipamento para o ensaio por ultra-sons, utilizando o método impulso-eco, está muito desenvolvido para a inspecção de soldaduras.

7.5.9.6 Qualificação dos inspectores

De modo a que a inspecção seja credível, o inspector deve possuir qualificação adequada.

Assim, a eficácia dos END depende da capacidade evidenciada do pessoal técnico, nomeadamente para calibrar os equipamentos, para executar os vários métodos, para interpretar os regulamentos e códigos, bem como interpretar os dados obtidos.

Quadro 7.2 - Ensaios Não Destrutivos em Estruturas de Aço

Método	Aplicações	Vantagens	Desvantagens
Inspecção Visual	Detecção de descontinuidades, ou outros danos e ocorrências superficiais	simples, rápido e fácil de executar; baixo custo operacional; equipamentos de baixo custo.	- requer técnicos com experiência e conhecimento em diversas áreas; - adaptado só a inspecções superficiais de uma estrutura.
Líquido Penetrante	Detecção de fissuras superficiais e porosidade.	equipamentos de baixo custo; rápida execução; execução por técnicos com pouca experiência; não há limitação para o tamanho e forma do elemento a ensaiar; detecta fissuras muito finas (da ordem de 0.001 mm de abertura).	- adaptado só a inspecções superficiais de uma estrutura; - requer a limpeza da superfície a inspeccionar, antes e após o ensaio; - revestimento superficial (pintura) pode esconder defeitos; - as superfícies rugosas e porosas podem produzir falsos resultados; - duração do ensaio; - algumas substâncias utilizada nos líquidos penetrantes, podem ser corrosivas.
Partículas Magnéticas	Detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais	baixo custo operacional; fácil execução: pode ser especificada e experimentada a sensividade do ensaio.	- só é aplicável a materiais ferromagnéticos; - não detecta danos internos; - por vezes é necessário proceder à desmagnetização do material; - necessário induzir campos magnéticos em várias direcções para se obterem resultados credíveis.
Ensaios radiográficos	Detecção de descontinuidades superficiais e internas. Inspecção aos cordões de soldadura.	Inspecção com determinação instantânea dos resultados; Apto para todo o tipo do material.	- custo elevado do equipamento; - possibilidade de emissão de radiações perigosas; - difícil execução da inspecção; - é necessário o acesso aos dois lados da peça a ser inspeccionada; - para se obter resultados favoráveis, a descontinuidade deve estar alinhada de forma favorável aquando da aplicação da radiação (sentido transversal ao plano), o que não acontece nos edifícios comuns.
Termografia	Detecção de descontinuidades superficiais	- rápida execução, - custo diminuto, - não necessita de contacto com a peça	- ensaio superficial

Ultra-Sons	Detecção de todo o tipo de descontinuidades	elevada capacidade de penetração, possibilitando a análise de secções espessas; sensível a todo o tipo de descontinuidades (de reduzidas dimensões); ensaio normalizado; determina a espessura e forma dos materiais; a obtenção de dados é imediata, possibilitando a inspecção rápida do elemento; necessidade de acesso apenas a uma das superfícies do elemento a ensaiar.	- elementos de pequenas dimensões e pouco espessos são difíceis de inspeccionar; - necessita de um operador qualificado; - requer algum cuidado na ligação entre os transdutores e o elemento a ser inspeccionado.
Correntes parasitas	Detecção de descontinuidades superficiais e internas	não é necessário proceder à remoção das camadas de revestimento (incluindo a pintura); ensaio muito rápido.	- o ensaio pode ser afectado por vários factores; - as descontinuidades internas (que distem mais de 6 mm da superfície) não podem ser detectadas; - a execução e interpretação dos resultados deve ser realizada por pessoas experientes.
Emissão acústica	Analisa a evolução dos danos numa estrutura	ermite o estudo e o controle da evolução de um defeito (fissuras, por exemplo) quando são aplicadas tensões na estrutura.	- ensaio semi-destrutivo; - a execução e interpretação dos resultados deve ser realizada por pessoas experientes; - não permite determinar com eficácia a localização de descontinuidades.

Quadro 7.3 - Normas Técnicas para os Ensaios Não Destrutivos em Estruturas de Aço

Método	Norma Técnica
Inspecção Visual	
Líquido Penetrante	ASTM E 165
Partículas Magnéticas	ASTM E 709
Ensaios radiográficos	
Ultra-Sons	ASTM E 144 - E 587
Correntes parasitas	
Termografia	
Emissão acústica	

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

8. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

8.1 Considerações Finais

A elaboração deste trabalho constituiu um esforço de compilação de toda a informação que se considerou essencial para qualquer profissional que queira trabalhar na área da reabilitação estrutural.

Foi realizado um esforço, no sentido de integrar investigação dispersa (bem como os resultados finais obtidos) em texto e imagem, abordando, de forma simples e prática, aquelas matérias que afectam directamente esta área de conhecimento. Mais do que fornecer receitas, pretende-se proporcionar o acesso a informação que se encontrava dispersa e só disponível a um restrito número de investigadores e cientistas.

Ao chegar ao final, a primeira constatação que se pode tirar é que esta área envolve um grande número de conhecimentos, abarcando áreas diversas da Engenharia de Estruturas e de outras áreas de conhecimento, tais como, a física, a química, a geologia, a biologia, a história, a estatística, a arquitectura, etc. É fundamental que os responsáveis, aqueles que têm poder de decisão, possuam conhecimentos alargados sobre todas estas áreas de conhecimento ou, situação mais realista, tenham a percepção de que têm de reunir equipas multidisciplinares que dêem resposta às situações com que são confrontados.

No âmbito dos conhecimentos básicos, razão de ser do Capítulo 2 sobre a Patologia das Construções, ressalta o papel essencial da fase de diagnóstico. É nesta fase que mais se faz notar, quer a experiência do técnico, na medida de que é essencial "perceber" o comportamento estrutural da construção, quer da realização de ensaios que permitam a obtenção de resultados precisos que auxiliem na dita compreensão do comportamento estrutural.

A utilização de técnicas de inspecção e de diagnóstico adequadas é um desafio perante o qual o técnico/inspector se coloca em cada avaliação estrutural. Para seleccionar a(s) técnica(s) mais adequada(s) a cada situação é necessário:

1º - Conhecer os métodos de ensaio disponíveis;

2º - Qual o seu campo de aplicação;

3º - Quais os procedimentos de teste;

4º - Como interpretar os dados obtidos.

Para responder a todas estas questões, o Capítulo 3 apresenta os Métodos de Ensaio mais utilizados. Observa-se a grande profusão de ensaios baseados na teoria de propagação de ondas, mecânicas, sonoras e acústicas. Grande parte dos métodos destinam-se a ensaios em estruturas de betão, sendo que alguns foram adaptados a outros sistemas estruturais. Dentro dos ensaios realizados em estruturas de betão, ressalta a profusão de métodos destinados à determinação *in situ* da sua resistência à compressão.

A necessidade de estabelecer regras, quer para os procedimentos de ensaio quer para a interpretação dos resultados obtidos, conduziu ao surgimento de normas, sobretudo Americanas (ASTM) e Britânicas (BS), países na linha da frente do desenvolvimento e aplicação dos END. No entanto, através da revisão bibliográfica efectuada, outros países e mesmo dentro dos países citados (em centros de investigação diferentes), têm os seus próprios procedimentos de ensaio. Parece óbvio que "muita pedra está por partir". Pretende-se, com esta expressão, transmitir a opinião de que há uma necessidade absoluta de parar para fazer uma síntese de toda a informação que vai sendo transmitida à comunidade, sobretudo a científica. Observa-se que dentro de cada método à imensas variantes, quer nos procedimentos de ensaio, quer nos aparelhos de teste, quer nos aparelhos medida, quer na forma como são processados os dados.

Saliente-se ainda a necessidade de, em muitos casos, monitorizar as estruturas por forma a observar e compreender o seu comportamento estrutural. Muitas vezes a monitorização colide com o interesse dos donos de obra, pela necessidade de obter resultados imediatos, com o objectivo do lucro fácil. Este aspecto é gritante nas estruturas antigas, em que esse acompanhamento da estrutura deve ser realizado durante algum tempo (chegando, por vezes, a anos), sob pena de não se obterem resultados fiáveis, que traduzam, na realidade, o seu real comportamento. A téndência de preservação de monumentos e edifícios/construções de elevado interesse nacional e internacional leva a que, em alguns casos, se adopte uma monitorização contínua (mais cara e envolvendo meios mais sofisticados).

Em relação ao que foi explorado nos Capítulos 4, 5, 6 e 7, em que se falou sobre as técnicas de inspecção e diagnóstico específicas a cada tipo de sistema estrutural, sintetizam-se algumas das conclusões que são possíveis extrair:

- É fundamental aos técnicos do sector possuírem um conhecimento alargado sobre as características específicas de cada tipo de sistema estrutural, nomeadamente sobre os materiais de construção aplicados;

- Nos métodos construtivos mais aplicados no nosso país, sobretudo em estruturas de betão armado, ressalta a ideia de que a fase de concepção, projecto e construção é a origem de grande parte dos processos patológicos detectados nas estruturas;

- Acompanhando esta ideia está a preparação deficiente dos profissionais envolvidos em cada uma destas áreas;

- Dentro dos métodos de ensaio, ressalta a ideia de que os elementos estruturais homogéneos, permitem a obtenção de resultados mais fiáveis e precisos facilitando, de sobremaneira, a sua interpretação e posterior diagnóstico.

- Pelo contrário, materiais e estruturas heterogéneas, como as estruturas de alvenaria, e de certa forma, as estruturas de madeira, requerem a utilização de métodos de ensaio específicos, e muitas vezes a utilização de END complementares;

- A combinação de END pode incrementar a precisão dos resultados obtidos. Muitas vezes a utilização de mais do que um método de ensaio é limitada por factores temporais e por factores económicos;

- A utilização de curvas de correlação que relacionem os resultados obtidos com parâmetros e propriedades conhecidas e determinadas em ensaios laboratoriais é essencial para se obterem bons resultados de ensaio; isto é diagnósticos correctos;

- Os END provaram ser um meio eficaz para aquilar da eficiência de obras de reabilitação/reforço, nomeadamente em edifícios de alvenaria (métodos sónicos);

Os Ensaio Não Destrutivos e Semi Destrutivos relevam-se como uma poderosa ferramenta no auxílio dos técnicos para a determinação e prognóstico da deterioração em estruturas. Não só em construções antigas como em construções novas, contribuindo, neste caso, como um poderoso instrumento de avaliação da qualidade dos materiais.

Como um dos objectivos deste trabalho é fazer o estado da arte da Reabilitação Estrutural em Portugal, pretende-se salientar ainda algumas considerações de índole geral, aliás algumas já afloradas ao longo desta dissertação, que serão resumidas por tópicos, por forma a sintetizar a informação que se pretende transmitir:

- O desenvolvimento teórico da Reabilitação Estrutural ainda não tem correspondência efectiva no campo prático, isto é, há um défice muito grande na transposição dos conhecimentos adquiridos em Regulamentação, Normas, Especificações Técnicas, etc.

- Há a necessidade de existir Regulamentação Europeia que uniformize os procedimentos de ensaio e a interpretação dos mesmos.

- Não há nenhuma entidade que atribua certificados de qualidade aos estudos e às posteriores obras de reabilitação realizadas;

- Ainda existe um grande distanciamento entre a comunidade científica e os profissionais do sector, sendo que o único meio de contacto entre todos os envolvidos continuam a ser os Congressos, Seminários, Encontros de Trabalho, que têm uma frequência muito pequena, e são muito pouco divulgados.

- As Universidades e nomeadamente as unidades de pós graduação devem ter um papel fundamental na formação e preparação de técnicos especializados. Como a reabilitação envolve especialistas de distintas áreas de conhecimento, devia ser criado um núcleo (pós graduação) que congregue todos estes interesses e que permitisse uma troca constante de informação tecnológica, de conhecimento e de experiência prática.

- Não existem publicações científicas especializadas sobre este tema, focando aspectos tão importantes como os materiais estruturais empregues, o diagnóstico, os processos patológicos, resultados obtidos através dos programas de investigação, novas técnicas de ensaio, instrumentação disponível, interpretação de resultados de teste, etc.

- Existem poucos estudos no nosso país, que façam o retracto aprofundado sobre as causas dos processos patológicos nas estruturas. Muitas vezes, são utilizados estudos e curvas de correlação oriundas de países

estrangeiros, que se revelam inadequadas aos nossos sistemas construtivos.

8.2 Desenvolvimentos Futuros

Como foi referido na Introdução desta dissertação, a abordagem global realizada leva a que muitas questões importantes não tivessem o desenvolvimento adequado. Obviamente, este é um ponto que poderá ser desenvolvido. Todos os Capítulos de desenvolvimento desta tese, e para ser mais exacto todas as secções de cada capítulo desta tese poderão ser aproveitadas para prosseguir com estudos científicos de elevado interesse. Ao fazer-se o estado da arte da Reabilitação Estrutural, fica aberto o campo à prática, isto é, à transposição de todos os conceitos para a realização de ensaios nos vários tipos de estrutura abordados.

Neste aspecto, a obtenção de curvas de correlação que relacionem as medições realizadas com os END e as propriedades mecânicas dos elementos alvo da inspecção é fundamental. Há aqui um grande vazio de informação. Se para o betão armado já existe algum trabalho realizado, se bem que ainda muito esteja por fazer, nomeadamente no nosso país, para as estruturas de alvenaria e para as estruturas de madeira, praticamente ainda se está na estaca zero. Obviamente que a heterogeneidade destes tipo de construção é um factor limitativo, mas crê-se que constituiria uma ajuda imprescindível para os técnicos envolvidos nesta área.

Aproveitando os conhecimentos adquiridos seria útil confrontar os END, e todas as técnicas e métodos aqui referidos, com as técnicas de reparação, nomeadamente tendo em vista a eficiência e a precisão dessa actividade. O fomento da relação entre o diagnóstico, o prognóstico e a obra feita é a concretização do ciclo que é, no fundo a área da reparação/reabilitação de estruturas.

Ainda relacionado com este aspecto, julga-se de muita utilidade o desenvolvimento de métodos que promovam a avaliação da qualidade das estruturas, nomeadamente construções novas, através da realização de ensaios não destrutivos e semi destrutivos.

A criação de ferramentas de gestão e planeamento que envolvessem todas as áreas da Reabilitação Estrutural, desde a manutenção até à fase de inspecção (diagnóstico e prognóstico) que auxiliem o Dono de Obra na decisão de qual a melhor forma de reabilitar/reparar/reforçar uma dada estrutura, será outra das vertentes a explorar. Nomeadamente, fornecendo informação sobre o meio de inspecção mais eficiente,

sobre a necessidade da monitorização da estrutura, sobre o tempo de vida útil da estrutura, sobre quais os profissionais e empresas mais adequados para a resolução dos problemas, estimando os custos esperados para a realização de uma campanha de ensaios, estabelecendo um período/intervalo de tempo entre cada inspecção, etc. Para ajudar na realização desta ferramenta de gestão poderia ser criada uma base de dados alargada que engloba-se todos os itens referidos no presente trabalho.

A reabilitar é um acto de cultura que deve ser promovido e incentivado.

Referências Bibliográficas

9. Bibliografia

Introdução

[01] Abrantes, V., Freitas, V. e Sousa, M. (1998) - "*Reabilitação de edifícios - Estudo do comportamento e análise técnico-económica das soluções utilizadas nas obras de conservação e reabilitação de 32 empreendimentos*". FEUP/LFC, Porto.

[02] Consulta Internet: www.euroconstruct.com.

[03] INE (2001) - Recenseamento Geral da População e Habitação, 2001, Resultados definitivos. Consulta na Internet: (www.ine.pt/censos2001).

[04] Afonso, F. Paes (??) - "*Potencialidade do Mercado de Reparação e Manutenção face às Características do Parque Edificado*". Seminário Censos 2001, Resultados Definitivos, Painel Habitação. ITIC. Consulta na Internet: (www.ine.pt/censos2001).

[05] Appleton, J. (2003) - "*Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e tecnologias de intervenção*". Edições Orion: ISBN 972-8620-03-9.

[06] Costa, A. (2003) - "*A Qualidade na Construção/Reabilitação e Reforço de Estruturas*". 1º Encontro Nacional de Patologia e Reabilitação de Edifícios: PATORREB 2003; Actas do Encontro, pp.216-237.FEUP, Porto.

[07] Schickert G. (1997) - Consulta na Internet: www.ndt.net/article/civil497/gschic.

Patologia da Construção

[08] Rodrigues, R. C. e Westcot, P. (2003) - "*Um Sistema Pericial de apoio ao Diagnóstico de Patologias em Edifícios*". 1º Encontro Nacional de Patologia e Reabilitação de Edifícios: PATORREB 2003; Actas do Encontro, pp.425-436.FEUP, Porto.

[09] Curso de Conservación y Restauración de Edificios -Tomo 1. Colégio Oficial de Arquitectos de Madrid (COAM), 2ª Edición. ISBN: 84-7740-041-5. Madrid, 1993.

[10] Manual de Evaluación de Estructuras afectadas por Corrosión de la Armadura. Proyecto de Innovación CONTECVET-IN 309021. Geocisa e Instituto de

Ciências de la Construcción "Eduardo Torroja" del CSIC, 2002. Consulta na Internet: www.ietcc.csic.es/publi_elec/.

[11] Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico. ICOMOS Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico, Tradução para Português por Paulo B. Lourenço e Daniel V. Oliveira, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

[12] Antunes, M. e Corvacho, H. (2003) - "*Desenvolvimento de Fichas de Diagnóstico e de Intervenção no Âmbito da Manutenção Correctiva num Sistema Integrado de Manutenção de Edifício de Habitação*". 1º Encontro Nacional de Patologia e Reabilitação de Edifícios: PATORREB 2003; Actas do Encontro, pp.425-436.FEUP, Porto.

[13] Appleton, J. (2002) - "*Estudos de Diagnóstico em Edifícios. Da Experiência à Ciência*". Seminário A Intervenção no Património, Práticas de Conservação e Reabilitação; Actas do Encontro. FEUP, Porto.

[14] Cóias e Silva, V. (??) - "*Revisão de Projectos de Edifícios. Para aumentar a segurança, qualidade e durabilidade e reduzir o impacto ambiental*". Jornal do IGHAPE.

Meios Auxiliares de Diagnóstico Estrutural

[15] Arêde, A. e Costa, A. (2002) - "*Inspecção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas*". Seminário A Intervenção no Património, Práticas de Conservação e Reabilitação; Actas do Encontro. FEUP, Porto.

[16] ACI 318-02 (2002) - "*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*". American Concrete Institute, Farmington Hills.

[17] ACI 437-91 (1991) - "*Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings*". American Concrete Institute, Farmington Hills.

[18] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. E & FN Spon, London, England, pp. 379-385.

[19] Consulta Internet: www.oz-diagnostico.pt.

[20] Sheppard, P.F. (1985) - "*In situ test of shear strength and deformability of an 18th century stone and brick masonry wall*". Proceedings of the 7th IBMaC, Melbourne, pp. 149-160.

[21] Chiostrini, S., Galano, L. e Vignoli, A. (1998) - "*In situ tests and numerical simulations on structural behaviour of ancient masonry*". Monument-98, Workshop on Seismic Performance of Monuments, Lisboa; Portugal, pp. 197-206.

[22] Cóias e Silva, V. (2000) - "*Inspecção e Diagnóstico de Construções Antigas: conhecer antes de intervir*". OZ - Diagnóstico, Levantamento e Controlo de Qualidade em Estruturas e Fundações, Lda., Lisboa.

[23] ACI 228.2R-98 (1998) - "*Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*". American Concrete Institute, Farmington Hills.

[24] Sansalone, M. e Carino, N.J. (1991) - "*Stress Wave Propagation Methods*". Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Capítulo 12. CRC Press, Boca Raton, pp. 275-304.

[25] Cardoso, M.R. (2002) - "*Vulnerabilidade Sísmica de Estruturas Antigas de Alvenaria - Aplicação a um Edifício Pombalino*". Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

[26] Gonçalves, A. (1986) - "*Novos ensaios Não Destrutivos para a determinação da resistência do Betão nas Estruturas*". Memória nº 671, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa pp.34.

[27] ASTM C 597-83 (1983) - "*Standard test method for pulse velocity trough concrete*".

[28] ISO/DIS 8047 (??) - "*Concrete, hardened - Determination of ultrasonic-pulse velocity*".

[29] BS 1881:Part203:1986 (1986) - "*Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*".

[30] RILEM/NDT 1/1972 (1972) "*Testing of Concrete by the Ultrasonic Pulse Method*"

[31] Sansalone, M. e Carino, N.J. (1986) - "*Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*". NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Sept., pp. 222.

[32] Sansalone, M. (1997) - "*Impact-Echo: The Complete Story*". ACI Structural Journal, V. 94, Nº 6, Nov.-Dec., pp. 777-786.

[33] Consulta de Internet: www.official-documents.co.uk/.

[34] Porto, F., Valluzi, M. e Modena, C. (2003) - "*Use of Sonic Tomography for the Diagnosis and the Control of Intervention in Historic Masonry Buildings*". International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003. Berlin. Consulta da Internet: www.ndt.net/article/ndtce03.

[35] Davis, A.G. (1995) - "*Non-Destructive Evaluation of Existing Deep Foundations*". Journal of Performance of Constructed Facilities. ASCE, V.9, Nº 1, Feb., pp.57-74.

[36] Mitchell, T.W. (1991) - "*Radioactive/Nuclear Methods*". Handbook on Non--Destructive Testing of Concrete, Capítulo 10. Edit. V.M. Malhotra e N.J. Carino, CRC Press, Boca Raton, pp. 227-252.

[37] Carino, N.J. (1992) - "*Performance of ElectroMagnetic Covermeters for Non--Destructive Assessment of Steel Reinforcement*". NISTIR 4988, National Institute of Standards and Technology, Set., pp.130.

[38] ASTM C 876 (1991) - "*Standard Test Method for Hall-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Stell in Concrete*". American Society for Testing and Materials. Vol 03-02.

[39] Feliu, S., González, J., Andrade, C. e Feliu, V. (1989) - "*Polarization resistance measurements in Large Concrete Speciments: Mathematical Solution for Unidirectional Current Distribution*". Materials and Structures: Research and Testing, RILEM. V. 22, Nº 129, Maio, pp. 199-205.

[40] Clear, K.C. (1989) - "*Measuring Rate of Corrosion of Steel in Field Concrete Structures*". Transportation Research Record Nº 1211, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 28-37.

[41] Coutinho, J. S. (1998) - "*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*". Tese de doutoramento. FEUP, 392 pp.

[42] SPI (2002) - Emissivity Charts. Consulta na Internet: www.x26.com/library/thermal/emissivity.htm.

[43] Rossi, P.P. (1998) - "*Inspection and Monitoring for the Restoration of Historical Buildings*". Curso de Reparação e Valorização de Edifícios e Conjuntos Históricos, FUNDEC, IST, Lisboa.

[44] Almeida, C. (2000) - "*Análise do Comportamento da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar sob a Acção dos Sismos*". Tese de Mestrado em estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto.

[45] Roque, J. e Lourenço, P.B. (2003) - "*Caracterização Mecânica de Parede Antigas de Alvenaria. Um caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança*". Engenharia Civil, Guimarães, nº 17, pp. 31-42.

[46] ASTM C 1196 (1991) - "*In-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack method*". ASTM Standards.

[47] ASTM C 1197 (1991) - "*In-situ measurement of masonry deformability properties using flat-jack method*". ASTM Standards.

[48] Lourenço, P.B. e Gregorczick, P. (2000) - "*Review on Flat-Jack Testing*". Engenharia Civil, Guimarães, nº 19, pp. 39-50.

[49] Rossi, P.P. e Rossi, C. (1998) - "*Surveillance and Monitoring of Ancient Structures: Recent Developments*". Structural Analysis of Historical Constructions II. Barcelona, pp. 163-177.

[50] Rossi, P.P. (1996) - "*Possibilities of the Experimental Techniques for the Structural Analysis of Historical Constructions*". Structural Analysis of Historical Constructions. Barcelona, pp. 24-45.

[51] Mendes da Silva e Abrantes, V. (2003) - "*Observação, Registo, Controlo e Diagnóstico de Fissuração em Paredes não Estruturais de Alvenaria*". 1º Encontro Nacional de Patologia e Reabilitação de Edifícios: PATORREB 2003; Actas do Encontro, pp.79-88.FEUP, Porto.

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Betão Armado

[52] Andrade, C. e Alonso, C. (1996) - "*Vida útil e vida residual das estruturas de hormigón*". (Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja, Espanha). Prevenção de Corrosão em Estruturas de Betão Armado. Seminário. LNEC, Outubro 1996.

[53] CEB (1992) - "*Durable concrete structures*" CEB, Thomas Telford, pp. 112.

[54] Coutinho, J. S. (1998) - "*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*". Tese de doutoramento. FEUP, pp.392.

[55] Tratado de Rehabilitación. Tomo 3 - Patología y Técnicas de Intervención. Elementos Estructurales. Departamento de Construcción. Universidad Politécnica de Madrid. Texto del Master de Restauración Arquitectónica. ISBN: 84-89150-24-9. Madrid, 1998.

[56] Ripper, T. (1997) -"*Introdução à patologia e observação de estruturas*". *Curso de durabilidade, reparação e reforço de estruturas de betão.* Lisboa.

[57] Ribas, D. e Figueiras, J. (1998) - "*Aferição da qualidade do projecto de estruturas de betão*". Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas - JPEE98. Lisboa, pp. 795-804.

[58] Moreira da Costa, J. (1995) - "*Métodos de Avaliação da Qualidade de Projectos de Edifícios de Habitação*". Tese de doutoramento. FEUP.

[59] Ferreira, R. (2000) -"*Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão*". Tese de Mestrado. Universidade do Minho, pp.246.

[60] Neville, A.M. e Brooks, J.J. (1997) - "*Concrete technology*". Longman, England, pp.438.

[61] Mailvaganam, N.P. (1991) – "*Repair and Protection of Concrete Structures*". CRC Press, Ottawa, pp.473.

[62] Salta, M. (1996) - "*Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas*". Seminário prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado. LNEC, Lisboa, pp.13.

[63] Rede DURAR (1997) - "*Manual de inspección, evaluación y diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado*". Red Tematica XV.B "Durabilidad de la armadura", Programa CYTED, 2ª Ed.

[64] Sampaio, J.C. (1999) - "*Parâmetros a considerar na durabilidade dos betões*". Apontamentos de Mestrado. FEUP, pp.12.

[65] Calavera, J. (1998) - "*Cálculo, Construcción y Patología de Forjados de Edificación*". 4ª edição. INTEMAC, Madrid, pp. 678.

[66] Mills, R. (1987) – "*Mass transfer of gas and water trough concrete*". Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather International Conference. Ed. John M. Scanlon, vol.1, pp.621-633, ACISP-100, Detroit.

[67] E-372 (1993) - "*Água de amassadura para betões. Características e verificação da conformidade*". LNEC, pp.3.

[68] E-373 (1993) - "*Agregados para argamassas e betões. Propriedades e verificação de conformidade*". LNEC, pp.3.

[69] NP ENV 206 (1993) - "*Betão: Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*". IPQ, pp.21.

[70] Gonçalves, A. e Neves, R. (2001) - "*Inspecção do betão nas estruturas. Patologia e Reabilitação da Construção*". I Seminário de Materiais de Construção. Universidade do Minho. ISBN 972-97811-9-2, pp.17-31.

[71] E-378 (1993) - "*Betões. Guia para a utilização de ligantes hidráulicos*". LNEC, pp.11.

[72] Salta, M. (2001) - "*Corrosão em estruturas de betão armado. Patologia e Reabilitação da Construção*". I Seminário de Materiais de Construção. Universidade do Minho. ISBN 972-97811-9-2, pp7-16.

[73] CEB (1990) - "*CEB - FIP Model Code 1990 Design Code*". CEB, Thomas Telford, pp.434.

[74] Monografia CIMNE Nº 65 (2002) - *Evaluación y rehabilitación estructural de edificios*. Possibilidades de las técnicas numéricas y experimentles. Barcelona, pp.340.

[75] BS 1881: Part. 201 (1986) - "*Testing concrete. Guide to the use of non-destructive methods of tests for hardened concrete*". Londres.

[76] Malhotra, V.M. (1976) - "*Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*", American Concrete Institute, Monograph Nº 9, ACI, Iowa State University Press, pp.204.

[77] Evangelista, A. (2002) - "*Avaliação da resistência do Concreto usando deferentes Ensaios Não Destrutivos*". Tese de Doutoramento apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, pp. 239. Consulta Internet: www.coc.ufrf.br/teses/douturado/estruturas/2002/teses.

[78] RILEM NDT 4 (1993) - "*Recommendations for in situ concrete strength determination by combined non-destrutive methods*".

[79] ACI 228.1R-95 (1995) - "*In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*". American Concrete Institute, Farmington Hills.

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Alvenaria

[80] Pinho, F. (2000) - "*Paredes de Edifícios Antigos em Portugal*". Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ISBN: 972-49-1864-5, Lisboa.

[81] Costa, A. (2003) - "*A durabilidade das Estruturas de Alvenaria de Pedra*". Seminário "Qualidade, Durabilidade e Reabilitação de Estruturas", Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu.

[82] SPES (2001) - "*Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado*". Ordem dos Engenheiros, Editado por SPES e GECoRPA, Lisboa.

[83] Ramos, L. e Lourenço, P.B. (2000) - "*Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do Estado de Conservação Estrutural do Quarteirão do Martinho da Arcada* ". Engenharia Civil, Guimarães, nº 7, pp. 35-46.

[84] Luxán, M.P. e Borrego, F. (2002) - "*Morteros Antiguos y la Intervención en el Patrimonio*". Seminário A Intervenção no Património, Práticas de Conservação e Reabilitação; Actas do Encontro. FEUP, Porto.

[85] Teles, M. (2002) - "*Reflexões sobre a composição de Argamassas* ". Seminário A Intervenção no Património, Práticas de Conservação e Reabilitação; Actas do Encontro. FEUP, Porto.

[86] Binda, L. e Saisi, A. (2001) - "*Non Destructive Testing Applied to Historic Buildings: The case of some Sicilian Churches*". Historical Constructions. Guimarães, pp. 29-45.

[87] Lourenço, P.B. (1998) - "*Analysis of Historical Constructions: From Thrust-lines to Advanced Simulations*". Historical Constructions. Guimarães, pp. 91-1116.

[88] Consulta de Internet: www.idesweb.it/

[89] Macchi, G. (2002) - "*Non Destructive Techniques for the Safegurd of the Leaning Tower of Pisa*".Short Course on Experimental Methods in Structural Engineering. Rose School, Pavia.

[90] Binda, L. e Modena, C. (1998) - "*Examples of Intervention in Ancient Constructions*". Strutural Analysis of Historical Construtions II. Barcelona, pp. 259-286.

[91] Croci, G. (??) - "*The Conservation and Structural Destoration of Arquitectural Heritage*". Computational Mechanics Publications.

Técnicas de Ensaio em Estruturas de Madeira

[92] Agricultura (2003) - Ministério da Agricultura, Desenvolvimento Rural e Pescas. Pesquisa Internet: www.dgf.min-agricultura.pt.

[93] Machado, José S. (2002) - "*Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho Bravo, por meio de ultra-sons*". Tese de Doutoramento. Lisboa

[94] Carvalho, Albino de (1996) - "*Madeiras Portuguesas Vol. 1*". Instituto Florestal. ISBN 972-8097-23-9.

[95] Nero, Gaspar - "*Folhas de apoio à disciplina de "Estruturas e Comportamento dos Materiais*". 11º Mestrado em Construção. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

[96] Mateus, Tomás (1978) - "*Condições de aplicação de madeiras em edifícios, tendo em vista minimizar os riscos de ataque por agentes biológicos*". LNEC, Lisboa.

[97] Nunes, Lina (2001) - "*Preservação de madeiras para a Construção: Situação actual e perspectivas futuras*". Lisboa.

[98] NP EN 335-1:1994 (1994) – "*Durabilidade da madeira e de produtos derivados – Definição das classes de risco de ataque biológico – Parte 1: Generalidades*".IPQ.

[99] NP EN 335-2:1994 (1994) - "*Durabilidade da madeira e de produtos derivados – Definição das classes de risco de ataque biológico – Parte 2: Aplicação à madeira maciça*". IPQ.

[100] AITIM (2002) - "*Intervención en Estructuras de Madera*". Madrid.

[101] Morris, P.I. (1998) - "*Understanding Biodeterioration of Wood in Structures*". For. Canada Corp. Pesquisa na Internet: http://www.durable-wood.com/pdfs/biodeterioration.pdf.

[102] Nunes, L., Nobre, T. e Machado, J. S.I. (2000) - "*Degradação e Reabilitação de Estruturas de Madeira. Importância da acção de térmitas subterrâneas*". REPAR 2000 - Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, pp. 167-175.

[103] Rodríguez Boreal, J. (1983) - "*Micosis de la madera cortada y puesta en servicio*". Fundación Conde del Valle de Salazar, E.T.S.I. Montes. U.P. Madrid.

[104] Cruz, H., Machado, S.J. e Nunes, L. (2000) - "*Inspecção e avaliação de estruturas de madeira*". Comunicação apresentada no Seminário "Estruturas de madeira: Reabilitação e Inovação". GECORPA. LNEC. Lisboa.

[105] Sandoz, J.L. (1989) - "*Grading of construction timber by ultrasound*". Wood Sc. Tech.23 pp. 95-108.

[106] Bucur, V. (1979) - " *Le comportament a la rupture du bois massif estudie pour la methode ultrasonique d'impulsion*". Comunicação apresentada ao 4º Congresso Francês de Mecânica. Nancy, 4-7 Setembro a979.

[107] Cecotti, A. e Togni, M. (1996) - "*NDT on Ancient timber beams; assessment of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods*". Proceedings 10 th. International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne.

[108] Rodriguez et al. (1998) - " *Aplication of ultrasonic techniques, as a non destructive method, for the evaluation of timber structures*". Proceedings of 5 th.

World Condference on Tomber Engineering, Montreux, Suissa, Vol. 2, pp. 806-807.

[109] Rodríguez, T. (1997) - "*La dendocronologia y el carbono 14 en la datación de bienes culturales*". AITIM nº 188, pp. 52-57.

[110] Fujii, Y. (1990) - "*Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood*". Forest Produtcs Journal, Vol.40, Nº1, pg. 34-36.

[111] Cestari Bertolini, C. (2000) – "*Problemas de Recuperação: Métodos de Investigação, Tecnologias de Intervenção*". Comunicação apresentada no Seminário "Estruturas de madeira: Reabilitação e Inovação". GECORPA. LNEC. Lisboa.

Técnicas de Ensaio em Estruturas Metálicas

[112] Calado, L. (1997) - "*O aço na recuperação de edifícios*". Patrimonium - Revista da Direcção Geral do Património, Portugal, pp. 20-25.

[113] Cruz, P. e Alvarez, R. (2000) - "*Patologias de Estruturas Metálicas*". REPAR 2000, "Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas", LNEC, 14-17 Junho, Lisboa, pp. 227-236.

[114] Mirambell, E. (2002) - "*Causas de Patología en Estructura Metálica.* Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edifiios, Posibilidades de las técnicas numéricas y experimentales". Monografía CIMNE nº 65, Abril 2002.

[115] Jones, D. (1996) - "*Principles and Prevention of Corrosion*". ISBN 0-13-359993-0 - Prentice Hall, Inc.

[116] Gentil, V. (1982) - "*Corrosão*" - Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro.

[117] Castro, E. (1999) - "*Patologia dos Edifícios em Estruturas Metálicas*". Dissertação para a obtenção do título de Mestre em engenharia Civil. Ouro Petro, 1999.

[118] Souza, U. (1988) - "*O projecto como agente de durabilidade da estrutura metálica*". A construção, Rio de Janeiro, nº 267, pp. 41 a 44.

[119] PrEN 1993-1-3: 2003 - EN 1993-1-3 - Design of Steel Structures, Eurocode 3, European Pre-Standard, CEN, Brussels 2003.

[120] PrEN 1993-1-3: 2002 EN 1993-1-3 - Eurocode 3; Design of Steel Structures, Part 1:2: General rules, Structural Fire Design; European Norm, CEN, Brussels 2002.

[121] Silva, L. e Santiago, A. (2003) - "*Manual de Ligações Metálicas*", CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista- ISBN 972-98376-4-3. Coimbra.

[122] Andreucci, R. (2001) - "*Ensaios por Líquidos Penetrantes*". Publicações Técnicas Abende, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo. Consulta na Internet: www.abende.org.br.

[123] Andreucci, R. (2002) - "*Ensaios por Partículas Magnéticas*". *2ª Edição.* Publicações Técnicas Abende, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo. Consulta na Internet: www.abende.org.br.

[124] Andreucci, R. (2003) - "*Radiologia Industrial*". Publicações Técnicas Abende, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo. Consulta na Internet: www.abende.org.br .

[125] Andreucci, R. (2003) - "*Ensaios por Ultra-Som*". Publicações Técnicas Abende, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. São Paulo. Consulta na Internet: www.abende.org.br.

[126] Mattsson, E. (1989) - "*Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers*". ISBN 0-7458-0686-4 - Ellis Horwood Limited;

[127] Hayes, C. (1997) - "*The ABC's of Nondestructive Weld Examination*". - The Welding Journal, The american Welding Society, May 1997. Consulta na Internet: www.ndt.net/article/0698/hayes.

[128] Moura, C.B. et al. (1986) – "*Fadiga de Estruturas Soldadas*". Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, Portugal.

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000093951