

CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO ATRAVÉS DE TÉCNICAS NÃO-DESTRUTIVAS

Célia Manuela Costa Pereira Sampaio

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Ana Maria Magalhães Ribeiro
Sarmento Teixeira de Bastos

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À evolução científica,
Que contribua para a evolução da Humanidade.

A felicidade surge quando o teu trabalho e as tuas palavras te beneficiam a ti e aos outros.

Buddha

AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação constituiu para mim uma mais-valia nesta fase do meu percurso académico. Representando o meu primeiro grande contacto com o ambiente laboratorial e a execução de um programa consideravelmente abrangente, desde a sua origem à sua conclusão. Levar a cabo este trabalho requereu a participação de pessoas de diversas competências e a mobilização de espaços e materiais. Passo a agradecer às pessoas que generosamente contribuíram para a sua concretização.

Agradeço sinceramente à minha orientadora, a Professora Doutora Ana Maria Bastos, pela disponibilidade, partilha de conhecimentos, compreensão, apoio e boa disposição com que pautou o acompanhamento deste trabalho, facultando muito o seu progresso. Pude também contar com a cooperação indispensável e oportuna dos docentes da Secção de Materiais de Construção, nomeadamente a Professora Doutora Madalena Maria Teles e o Professor Doutor Luís Filipe Juvandes.

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a prestável colaboração em tempo e meios do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) e do Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST), nas pessoas da Eng.^a Paula, da Patrícia, do Sr. Fernando, do Manuel do Gil e do Cláudio.

Agradeço o incentivo incondicional, a tolerância e o bom exemplo que recebo da minha Mãe, assim como a presença de toda a minha família e amigos.

Por fim, agradeço ao Zé Pedro pelo ininterrupto apoio emocional e intelectual.

RESUMO

As técnicas não-destrutivas de ensaio revelam-se de grande importância na observação estrutural pela capacidade de caracterização dos materiais, detecção e identificação de danos e patologias, afirmando-se cada vez mais como ferramenta essencial para avaliação e controlo da segurança das estruturas.

Neste trabalho, descrevem-se os ensaios não-destrutivos de “pull-off”, esclerómetro e ultra-sons. Aplicaram-se esses ensaios não-destrutivos e confrontaram-se os seus resultados com os de ensaios destrutivos. O objectivo patente foi caracterizar a sua eficiência e fiabilidade.

Os ensaios foram realizados em provetes de betão de composição conhecida e cura controlada, e em carotes cilíndricas retiradas de uma obra existente.

PALAVRAS-CHAVE: ensaios não-destrutivos, observação estrutural, caracterização mecânica, betão.

ABSTRACT

Non-destructive testing techniques are of major importance for structural observation, evaluation of materials properties, detection and identification of deterioration and pathologies. They are increasingly used for inspection and security control of concrete structures.

In this work non-destructive tests of pull-off, Schmidt rebound hammer and ultrasonic are described. These non-destructive tests were performed in concrete probes and their results were compared with testing techniques of destructive nature. The goal was to evaluate their efficiency e reliability.

Tests were conducted in concrete probes of known composition and controlled cure, and in cylindrical cores of an existent construction.

KEYWORDS: non-destructive methods, structural observation, mechanical characterization, concrete.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS	1
1.2. IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	2
1.3. APLICAÇÕES DOS MÉTODOS NÃO-DESTRUTIVOS, IAEA (2002)	3
1.4. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DESTRUTIVOS	3
1.5. OBJECTIVOS	4
1.6. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	4
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS	5
2.2. ENSAIO DO MARTELO DE SCHMIDT OU DO ESCLERÓMETRO	5
2.3. ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO DIRECTA, “PULL-OFF”	9
2.4. ENSAIO DE ULTRA-SONS	11
2.4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	12
2.4.2. MODOS DE TRANSMISSÃO DAS ONDAS ULTRA-SÓNICAS	12
2.4.3. FACTORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIÇÕES DA VELOCIDADE DE IMPULSO	15
2.4.4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DOS ULTRA-SONS	18
2.4.4.1 Qualidade do betão	18
2.4.4.2 Uniformidade do betão	18
2.4.4.3 Detecção de defeitos	19
2.4.4.4 Detecção de vazios	19
2.4.4.5 Estimativa da profundidade de uma fissura	19
2.4.4.6 Avaliação da espessura de uma camada de betão de qualidade diferente	25
2.4.4.7 Identificação de modificações nas propriedades do betão	27
2.4.4.8 Determinação do módulo de elasticidade do betão	27
2.4.4.9 Avaliação da resistência do betão	28
2.4.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SONS	28

3. ESTUDO EXPERIMENTAL	29
3.1. METODOLOGIA	29
3.2. MODELOS DE ENSAIO	30
3.2.1. AGREGADO	30
3.2.2. BETÃO	30
3.2.2.1 Modelo de laje em betão armado	34
3.3. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	36
3.3.1. ENSAIO COM O ESCLERÓMETRO	36
3.3.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”	37
3.3.3. ENSAIO DE ULTRA-SONS”	42
3.3.3.1 Ensaio em cilindros	42
3.3.3.2 Ensaio em carotes cilíndricas	44
3.3.3.3 Ensaio em prismas	44
3.3.3.4. Ensaio no modelo de laje	45
4. TRATAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	
4.1. ENSAIO COM O ESCLERÓMETRO	49
4.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”	51
4.3. ENSAIO DE ULTRA-SONS	56
4.3.1. ENSAIOS EM CILINDROS	56
4.3.2. ENSAIOS EM CAROTES CILÍNDRICAS	58
4.3.3. ENSAIOS EM PRISMAS	60
4.3.4. ENSAIOS NO MODELO DE LAJE	62
5. CONCLUSÃO	65
5.1. PONDERAÇÕES FINAIS	65
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	66
Bibliografia	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Ensaio do Esclerómetro	5
Fig. 2 – Funcionamento do Esclerómetro (IAEA, 2002)	6
Fig. 3 – Método do “Pull-off”	9
Fig. 4 – Ensaio de ultra-sons.	11
Fig. 5 – Transmissão Directa.	13
Fig. 6 – Transmissão Indirecta.	13
Fig. 7 – Determinação da velocidade do impulso pelo método de transmissão indirecta.	14
Fig. 8 – Transmissão semi-directa.	15
Fig. 9 – Modelo proposto por Bungey (1989).	20
Fig. 10 – Modelo equidistante (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)	22
Fig. 11 – Curva obtida com tempos de propagação (T_i) e distância (S_i) (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007).	23
Fig. 12 – Modelo linear (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007)	24
Fig. 13 – Curva obtida com tempos de propagação (T) e distancia (x) (Pinto, Medeiros e Padaratz, 2007))	25
Fig. 14 – Método indirecto para determinar a profundidade da deterioração (G. I. Crawford, 1997)	26
Fig. 15 – Representação gráfica do método de Faury	31
Fig. 16 – Ensaio de abaixamento da primeira amassadura.	32
Fig. 17 – Moldes com betão fresco da primeira amassadura.	32
Fig. 18 – Ensaio de abaixamento da segunda amassadura.	33
Fig. 19 – Moldes com betão fresco da segunda amassadura	34
Fig. 20 – Armadura e molde da laje.	35
Fig. 21 – Molde da laje com betão fresco.	35
Fig. 22 – Cubo Fixo para Ensaio do Esclerómetro.	36
Fig. 23 – Curvas de correcção fornecidas para o ângulo de teste.	37
Fig. 24 – Prisma menor (#2) com pastilhas para ensaio de “pull-off”	38
Fig. 25 – Arrancamento das pastilhas.	38
Fig. 26 – Prisma maior com pastilhas para ensaio de “pull-off”	39
Fig. 27 – Ensaio de Compressão de Cubos	40
Fig. 28 – Ensaio de Flexão de Prisma.	40
Fig. 29 – Ensaio de Tracção por Compressão (Tomaz, 2009).	41
Fig. 30 – Ensaio de ultra-sons em cilindros	42
Fig. 31 – Ensaio do módulo de elasticidade em compressão	43

Fig. 32 – Ensaio de ultra-sons por transmissão indirecta em prisma fissurado	45
Fig. 33 – Ensaio na laje por transmissão directa no sentido longitudinal.....	45
Fig. 34 – Grelha desenhada na laje para aplicar o método de transmissão indirecta	46
Fig. 35 – Ensaio por transmissão indirecta antes da fissuração	46
Fig. 36 – Carregamento da laje.....	47
Fig. 37 – Representação do ensaio de ultra-sons na laje para detectar fissura lateral.....	47
Fig. 38 – Evolução no tempo dos valores de $f_{cm,cubo}$ estimados pelo ensaio de “pull-off”.....	49
Fig. 39 – Pastilhas A e B e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 23º Dia.....	51
Fig. 40 – Pastilhas C e D e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 23º Dia	52
Fig. 41 – Pastilhas A e B e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 32º dia	52
Fig. 42 – – Pastilhas C e D e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 32º dia	53
Fig. 43 – Pastilha A e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia.....	54
Fig. 44 – Pastilhas B e C e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia	54
Fig. 45 – Pastilhas D e E e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia	54
Fig. 46 – Resistência do betão à tracção obtida por diferentes ensaios.....	55
Fig. 47 – Evolução da velocidade de impulso no tempo.....	56
Fig. 48 – Evolução do módulo de elasticidade no tempo.....	57
Fig. 49 – Relação da velocidade de Impulso com a resistência à compressão	59
Fig. 50 – Relação da velocidade de impulso com a resistência à compressão	59
Fig. 51 – Correlação entre ($f_{c,ensaio}$) e ($f_{c,U.S.}$)	60
Fig. 52 – Curva e Equação Segundo o Modelo Linear, com 3 pontos.....	61
Fig. 53 – Curva e Equação Segundo o Modelo Linear, com 2 pontos.....	61
Fig. 54 – Curva e Equação Segundo o Modelo Linear, com 3 pontos.....	62
Fig. 55 – Relação entre o Tempo de Impulso e a Posição do Transdutor.	63
Fig. 56 – Curva e equação segundo o modelo equidistante aplicado à laje.....	64

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Efeito da dimensão do provete na transmissão do impulso (IAEA, 2002)	16
Quadro 2 – Relação entre a velocidade do impulso e a qualidade do betão (Whitehurst, 1951)	18
Quadro 3 – Resistência média do betão à compressão em cubos, $f_{cm,cubo}$, da primeira amassadura	50
Quadro 4 – Resistência média do betão à compressão em cubos, $f_{cm,cubo}$ da segunda amassadura	50
Quadro 5 – Resultados do ensaio de “pull-off”	51
Quadro 6 – Valores estimados da resistência à tracção	55
Quadro 7 – Módulo de elasticidade na primeira amassadura	57
Quadro 8 – Módulo de elasticidade da segunda amassadura	58
Quadro 9 – Valores para o módulo de elasticidade do ensaio em compressão e da equação do EC2.	58
Quadro 10 – Resultados do ensaio de transmissão directa na laje.	63

SÍMBOLOS

$f_{ctm,p}$ - valor médio da resistência à tracção obtida no ensaio “pull-off”

$f_{cm, cubo}$ - resistência média do betão à compressão em cubos

h - profundidade da abertura

x - distância do transdutor à abertura

T_f - tempo de propagação com fissura

T_c - tempo de propagação sem fissura

L_i - distância percorrida pela onda

h - profundidade da abertura

V - velocidade da onda de propagação

E - módulo de elasticidade

ν - coeficiente tracção por compressão

F - carga

L - comprimento da linha de contacto do provete

d - dimensão da secção transversal designada

$E_{cm,U.S}$ - módulo de elasticidade médio do betão obtido no ensaio de ultra-sons;

f_{cm} - resistência à compressão média do betão

ν - coeficiente de Poisson

ρ - densidade

v - velocidade do impulso

f_{cr} - resistência à tracção por compressão

$f_{c,U.S.}$ - resistência à compressão estimada a partir do ensaio de ultra-sons

INTRODUÇÃO

1.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

O betão é, há mais de meio século, um dos materiais mais utilizados na construção. Sendo um material heterogéneo, cuja qualidade é condicionada pelas propriedades dos vários constituintes e pelas condições de fabrico, é muito pertinente controlar as suas características, avaliando se são adequadas ao uso a que se destina.

Não só a engenharia civil como outras áreas científicas e industriais empregam ensaios não-destrutivos na análise de materiais. Estes métodos começaram por aplicar-se a metais, tendo o seu emprego no betão sido desenvolvido de forma lenta. Isto deve-se à heterogeneidade característica deste material que conduz a uma grande variabilidade dos resultados tornando a sua interpretação e análise particularmente complexa.

As técnicas não-destrutivos de ensaio permitem uma avaliação rápida, *in situ* e sem danos, surgindo como uma alternativa, menos dispendiosa a nível de custo e de tempo, aos ensaios destrutivos. Os ensaios não-destrutivos aplicados ao betão endurecido vão desde os que não causam quaisquer danos no betão, aos semi-intrusivos como os ensaios de “pull-out” e “pull-off”, em que a superfície testada requer reparação.

As propriedades do betão que podem ser conhecidas através dos ensaios não-destrutivos incluem a densidade, módulo de elasticidade, resistência à penetração, dureza superficial, absorção, a maturidade, entre outras. Através de ensaios não-destrutivos é também possível a caracterização das armaduras no que respeita à sua localização, dimensões e espessura de recobrimento. Em alguns casos, é também possível avaliar a qualidade do material e a integridade estrutural, detectando vazios e fissuras.

A determinação directa das propriedades mecânicas tais como a resistência à compressão, à flexão ou à tracção requer que as amostras de betão sejam testadas destrutivamente. Os ensaios não-destrutivos foram desenvolvidos no sentido de medir outras propriedades do betão, a partir das quais se estimam as suas propriedades mecânicas.

As técnicas não-destrutivas podem ser aplicados tanto a estruturas recém-construídas como a estruturas antigas. Nas estruturas novas, as principais aplicações serão o controlo de qualidade e o esclarecimento de dúvidas acerca da qualidade dos materiais ou da construção. Nas estruturas existentes, servirão para avaliar a sua integridade e adequação estrutural.

Os testes não-destrutivos são, em geral, precedidos de uma inspecção visual, essencial para a escolha do teste mais adequado a realizar. Um engenheiro civil com experiência será capaz de detectar

possíveis causas para os danos numa estrutura de betão e assim identificar quais os testes não-destrutivos disponíveis poderão ser mais eficazes para a posterior investigação do problema.

1.2. IDENTIFICAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

- Ensaio do Esclerómetro: determinação do índice esclerométrico, usado para avaliar a dureza superficial do betão;
- Resistência à Penetração ou Teste de Windsor: ensaio utilizado para avaliar a resistência à compressão da camada superficial do betão, através da profundidade de penetração de uma sonda com uma certa energia. Permite ainda a avaliação da qualidade e maturidade do betão *in situ* bem como da evolução da resistência de betões jovens;
- Profundidade de Carbonatação: a profundidade de carbonatação do betão é determinada através da utilização de um indicador químico (solução de fenolftaleína) sobre uma superfície recentemente exposta do betão. As zonas alcalinas são identificadas por uma coloração púrpura enquanto que as zonas carbonatadas mantêm a sua cor natural. Quando a profundidade de carbonatação atinge a profundidade das armaduras pode iniciar-se o processo de corrosão;
- Permeabilidade: ensaio destinado a medir o fluxo de um gás ou da água através da superfície do betão. A permeabilidade é um indicador da qualidade do betão superficial e da sua durabilidade;
- Resistividade: a resistividade fornece uma medida da capacidade do betão actuar como um electrólito, possibilitando a corrosão das armaduras nele incorporadas. O ensaio é utilizado para investigar áreas de elevado risco de corrosão identificadas pelo seu potencial eléctrico;
- Radiografia: os raios X podem ser utilizados para examinar o interior de peças de betão, detectar a presença de vazios e zonas de fraca compactação, verificar a continuidade de enchimento de bainhas de pré-esforço, a localização das armaduras, etc; é uma técnica dispendiosa, limitada a zonas relativamente reduzidas da estrutura;
- Ultra-sons: utilizado para medir a velocidade de propagação de ultra-sons no betão, com diferentes finalidades: avaliação do módulo de elasticidade, detecção de vazios e delaminações, fendilhação, zonas de deficiente compactação e outras imperfeições do betão;
- Eco-Impacto: este ensaio envolve a propagação de ondas ultra-sónicas e a medição da energia reflectida das mesmas, fornecendo informação sobre a espessura das peças, a presença de vazios, delaminações e outros defeitos do betão;
- Termografia com infra-vermelhos: permite a identificação de zonas de diferentes temperaturas durante processos de aquecimento ou arrefecimento de uma estrutura; esta técnica é utilizada para avaliar a distribuição da humidade em edifícios, detectar vazios e delaminações na superfície, etc. Este método é, no entanto, sensível às condições de temperatura e humidade ambientais.
- Ensaio de arrancamento por tracção directa, “pull-off”: usado para determinar a resistência superficial do betão à tracção e a aderência de ligação entre materiais, através do arrancamento de um disco metálico colado ao betão: a força de arrancamento é relacionada com as resistências à tracção e à compressão do betão.
- Ensaio de arrancamento, “pull-out”: mede a força necessária para arrancar do betão endurecido uma placa de aço alargada na extremidade inserida no betão enquanto fresco,

que é relacionada com a resistência do betão; fornece ainda informação sobre a maturidade e o desenvolvimento da resistência de uma zona representativa do betão, (CEB-FIB Bulletin N° 17 (2002); A. Bastos, 2008).

1.3. APLICAÇÕES DOS MÉTODOS NÃO-DESTRUTIVOS

- Controlo de qualidade de unidades pré-fabricadas ou de construção *in situ*;
- Esclarecimento de incertezas acerca da conformidade do material fornecido, devido a uma aparente inadequação às especificações;
- Resolução de dúvidas acerca dos procedimentos envolvidos na amassadura, betonagem, colocação, compactação ou cura do betão;
- Monitorização da evolução da capacidade resistente, relativamente à remoção da cofragem, fim de cura, utilização de pré-esforço, aplicação de cargas ou situações da mesma natureza;
- Localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e outros defeitos encontrados numa estrutura de betão;
- Determinação da uniformidade do betão, previamente à extracção de carotes, ensaios de carga ou outros ensaios destrutivos mais caros;
- Conhecimento da posição, quantidade e condições da armadura;
- Determinação da variabilidade do betão, permitindo uma selecção adequada dos locais representativos para aferição da característica em causa; confirmação ou localização de deterioração suspeita do betão, resultando de factores como o excesso de carga, fadiga, fogo, factores ambientais, ataque ou alteração química a nível interno ou externo;
- Avaliação da durabilidade do betão; monitorização da evolução a longo prazo das propriedades do betão; fornecimento de informações sobre parâmetros relevantes com vista a diferentes utilizações de uma estrutura;
- Aumento da confiança nos resultados de ensaios destrutivos quando são realizados em pequeno número (IAEA¹, 2002).

1.4. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DESTRUTIVOS

Os ensaios para a avaliação das propriedades mecânicas do betão envolvem, em geral, a destruição do provete.

Estes ensaios são frequentemente realizados sobre provetes normalizados ou sobre carotes retiradas da estrutura. As carotes, ou tarolos, são levadas para laboratório e submetidas a ensaios, destrutivos ou não-destrutivos que permitem obter as características pretendidas.

Na maioria das análises ou diagnósticos para avaliação da capacidade estrutural, a extracção de carotes é inevitável e frequentemente fundamental. As carotes são cilindros extraídos por perfuração com uma coroa diamantada.

Quer a estrutura a avaliar seja nova, quer seja antiga, a extracção de carotes para ensaios de caracterização mecânica do betão, envolve custos que podem condicionar o número de carotes a extrair, o que numa estrutura de grandes dimensões pode resultar numa avaliação incorrecta. Nesta

¹ International Atomic Energy Agency

situação, os ensaios não-destrutivos podem ser utilizados, como preliminares a um posterior caroteamento mais criterioso, para eleger as zonas mais representativas da estrutura.

1.5. OBJECTIVOS

Neste trabalho, pretende-se identificar os diversos ensaios não-destrutivos e realizar uma análise crítica sobre a sua fiabilidade e eficiência. Essa análise será baseada na comparação dos resultados obtidos em ensaios não-destrutivos com os obtidos através de ensaios destrutivos, cujos resultados podem ser relacionados.

Assim, reuniram-se informações acerca das técnicas e equipamentos utilizados em cada ensaio, suas vantagens e desvantagens, limitações e aplicações.

Os ensaios não-destrutivos sujeitos a experimentação laboratorial foram os do esclerómetro, do “pull-off” e dos ultra-sons. Esta selecção justifica-se quer pela popularidade dos métodos, quer pela disponibilidade de meios dos laboratórios utilizados.

Os métodos utilizados não são de carácter inovador, surgem sim, na continuação dos estudos efectuados no âmbito dos ensaios não-destrutivos aplicados ao betão. As análises comparativas apoiaram-se em relações presentes em regulamentos reconhecidos.

1.6. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 do presente trabalho, faz-se uma introdução ao tema da dissertação, identificam-se os diversos ensaios não-destrutivos e apresenta-se uma breve descrição das suas possíveis aplicações. Também neste capítulo se apresentam os objectivos da dissertação e descreve-se a sua estruturação.

O capítulo 2 refere-se ao estado da arte, onde se descrevem de forma detalhada os três ensaios não-destrutivos sujeitos a experimentação laboratorial: indicam-se as suas aplicações comuns, os métodos aplicados e as vantagens e limitações dos ensaios.

No capítulo 3, aborda-se a metodologia aplicada nos ensaios laboratoriais efectuados, detalhando-se as técnicas e os instrumentos empregados, assim como as relações e equações utilizadas.

O tratamento de dados e análise de resultados faz-se no capítulo 4. Aqui os valores obtidos nos diferentes ensaios aparecem sobre a forma de quadros e gráficos acompanhados da respectiva análise.

Os capítulos 3 e 4, estão subdivididos de forma idêntica, sendo cada subcapítulo referente aos ensaios não-destrutivos. A informação dos subcapítulos dedicados aos ultra-sons, apresentando maior diversidade de ensaios, encontra-se organizada por tipo de provetes ensaiados, nomeadamente cilindros, carotes cilíndricas, prismas de betão simples e uma laje de betão armado.

No capítulo 5, passa-se às considerações finais do trabalho que incidem na crítica aos ensaios realizados e outras observações, terminando com recomendações para estudos futuros.

O trabalho é acompanhado de anexos onde se encontram os dados obtidos nos vários ensaios realizados e que deram origem às análises apresentadas.

ESTADO DA ARTE

2.1. NOTAS INTRODUTÓRIAS

O estado da arte descreve ensaios não-destrutivos utilizados na experimentação laboratorial do presente trabalho: o esclerómetro, o “pull-off” e os ultra-sons. Esta selecção justifica-se quer pela popularidade dos métodos quer pela disponibilidade de meios dos laboratórios utilizados.

A seguir, apresenta-se a informação em que se basearam os procedimentos e interpretações levados a cabo. A pesquisa fez-se em diversos documentos sobre investigações precedentes, dissertações e guias sobre os métodos não-destrutivos no betão e outros assuntos com eles relacionados.

2.2. ENSAIO DO MARTELO DE SCHMIDT OU DO ESCLERÓMETRO

Em 1948, o Engenheiro suíço Ernest Schmidt desenvolveu um martelo para testar a dureza do betão baseando-se no princípio do ressalto, Malhotra (1976). Este princípio assenta no facto de que o ressalto de uma massa elástica depende da dureza da superfície com a qual a massa colide (IAEA, 2002).



Fig. 1 – Ensaio do Esclerómetro

O esclerómetro permite avaliar a dureza superficial do betão, através do valor do índice esclerométrico, com o qual se estabelece uma relação com a resistência à compressão do betão. Este instrumento é fácil de usar e permite obter um grande número de leituras num curto período de tempo. No entanto, deve fazer-se uma avaliação cuidadosa dos resultados, sendo aconselhado proceder-se à calibração do martelo para cada tipo de betão estudado, garantindo maior precisão.

O método do esclerómetro é um dos testes não-destrutivos mais utilizados para estimar, *in situ*, a resistência à compressão do betão. O esclerómetro permite que, rapidamente e a baixo custo, se conheça a qualidade e uniformidade do betão, informação que pode ser muito útil antes de se proceder a testes destrutivos em grande número, tais como o caroteamento. A possibilidade de se realizar rapidamente um vasto número de leituras em tempo reduzido, permite que em poucas horas sejam analisadas grandes áreas expostas.

O esclerómetro pode ser utilizado tanto em laboratório como *in situ*. Trata-se de um martelo em aço, ligado a uma mola em tensão. Quando é largado, embate num percutor em contacto com a superfície do betão. A distância entre o percutor e o martelo após a repercussão é medida numa escala linear instalada no corpo do aparelho chamado índice esclerométrico. Esse valor (índice esclerométrico) indica a resistência superficial do betão, valor que aumenta com a sua resistência, permitindo assim estimar esta propriedade.

O teste pode ser realizado com o esclerómetro orientado horizontalmente ou verticalmente, para cima ou para baixo, ou em qualquer ângulo intermédio. Se o ângulo do teste for alterado, para o mesmo betão, o índice esclerométrico será diferente, e requer uma correcção para cada ângulo testado. Esta diferença deve-se a acção da gravidade na massa do martelo (IAEA, 2002). As curvas fornecidas pelo fabricante do esclerómetro para corrigir essa diferença são baseadas em amostras normalizadas de cubos. O seu uso não é recomendado, pois os materiais e condições de teste podem ser diferentes dos utilizados aquando da calibração pelo fabricante.

Independentemente do ângulo, o esclerómetro deve ser firmemente mantido numa posição que permita o percutor embater perpendicularmente na superfície ensaiada. A utilização do esclerómetro faz-se colocando-o sobre a superfície de betão (Figura 2, fase (a)), pressionando-o contra essa superfície e comprimindo a mola (Figura 2, fase (b)), que se solta quando é atingido o ponto máximo de compressão (Figura 2, fase (c)), obtendo-se o valor do índice esclerométrico.

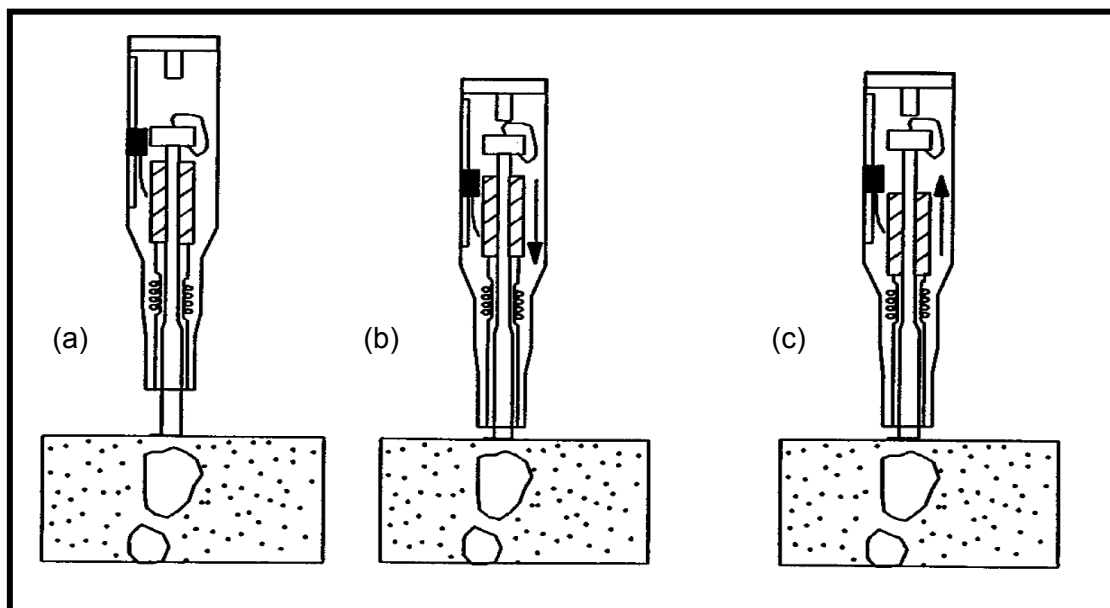


Fig. 2 – Funcionamento do Esclerómetro (IAEA, 2002)

Como o teste apenas mede o ressalto numa certa massa superficial do betão, os resultados reflectem somente a qualidade da superfície e não da profundidade da secção que está a ser testada. Os resultados são assim afectados pela irregularidade da superfície de teste o tipo de agregado e ainda pela idade do betão testado, a sua humidade, o tipo de cimento, a carbonatação bem como um eventual movimento da peça durante o ensaio.

Abaixo, faz-se uma breve explanação de como estes factores afectam os resultados do índice esclerométrico (Crawford, 1997).

- Irregularidades superficiais

A rugosidade da superfície tem um efeito preponderante na precisão dos resultados. Se o teste for realizado numa superfície rugosa, a ponta do percutor poderá causar esmagamento excessivo da mesma, o que resultará na redução do índice esclerométrico medido. Para obter resultados mais precisos, deverá rectificar-se a superfície a testar, tornando-a mais lisa.

- Idade do material testado

A dureza superficial do betão aumenta rapidamente nos primeiros 7 dias, a partir dos quais se verifica um crescimento menor. Contudo, como é conhecido, para o betão curado adequadamente, há um aumento significativo da resistência depois dos 7 dias, devido às reacções de hidratação do cimento.

Deve ter-se especial precaução no caso de se testarem betões com menos de três dias de idade ou com resistência à compressão menor do que 7 MPa, visto que o valor do índice esclerométrico vem demasiado baixo e o erro introduzido é elevado. Nesta situação, o martelo esclerométrico poderá deixar marcas visíveis na superfície do betão aquando do impacto.

- Teor de humidade

O teor de humidade do betão tem um profundo efeito nos resultados do teste esclerométrico. Provetes testados em condições saturadas mas com superfície seca, geralmente mostram índices esclerométricos mais baixos do que os dos provetes secos ao ar (Crawford, 1997).

- Tipo de cimento

O tipo de cimento tem também um efeito significativo no índice esclerométrico, já que, para betões de agregados correntes, a resistência do cimento é um factor determinante na resistência do betão com ele produzido.

- Carbonatação da superfície do betão

O índice esclerométrico é significativamente afectado pela carbonatação superficial do betão. Os valores para um betão carbonatado podem ser 50% superiores aos obtidos num betão não carbonatado. Os efeitos da carbonatação são, em geral, mais severos para os betões mais antigos, onde a espessura carbonatada pode ter vários milímetros de espessura, em casos extremos pode atingir valores superiores a 20mm.

- Tipo de agregado

É genericamente aceite que o índice esclerométrico é afectado pelo tipo de agregado. Para resistências de compressão iguais, o betão produzido com agregado granítico apresenta índices esclerométricos sensivelmente mais altos do que betões com agregado calcário.

Quando se testam zonas onde o agregado grosso se encontra junto à superfície ensaiada, obtêm-se leituras anormalmente elevadas, já que o agregado é muito mais rígido do que a matriz cimentícia. Estes resultados devem ser ignorados no cálculo da média das leituras realizadas.

- Movimento da peça de betão a ensaiar

No caso dos elementos a ensaiar não pertencerem a uma estrutura fixa, como por exemplo pequenos provetes, estes devem ser rigidamente fixos. Qualquer movimento causado pelo impacto do esclerómetro resulta na diminuição do índice esclerométrico.

A correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico é por vezes contestada. Os coeficientes de variação podem estar entre 15 e 30% num vasto número de amostras. Estes desvios consideráveis podem ser reduzidos, desenvolvendo uma relação apropriada para o esclerómetro que tenha em conta as variáveis descritas anteriormente para o betão testado, em vez de recorrer às correlações fornecidas pelo fabricante do esclerómetro (Crawford, 1997).

O esclerómetro não deve ser visto como um substituto para os ensaios de determinação da resistência do betão, mas sim como um método para determinar a uniformidade das estruturas de betão *in situ*, para delinear zonas de qualidade deficiente ou de betão deteriorado e para comparar um betão com outro. Com uma correlação adequada, pode fornecer uma boa estimativa da resistência.

O método e os procedimentos para a determinação do índice esclerométrico em estruturas de betão são descritos na NP EN 12504-2 (2003).

2.3. ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRACÇÃO DIRECTA, “PULL-OFF”

Como já referido, o ensaio de arrancamento por tracção directo, “pull-off”, permite avaliar a resistência do betão à tracção e a aderência entre o betão e outros materiais, através da força de arrancamento de um disco metálico colado no betão. O ensaio é realizado sobre a superfície da estrutura e em qualquer ponto acessível da mesma.

Este ensaio implica o pré-caroteamento da zona onde, posteriormente, se cola uma pastilha de 50 mm de diâmetro, usando uma resina epoxídica. O pré-caroteamento consiste em fazer no betão um sulco circular com o diâmetro da pastilha e aproximadamente 2 cm de profundidade.

Após a cura da resina, utiliza-se um aparelho (exemplar na Figura 3), que efectua o arrancamento da pastilha e fornece o valor da tensão de tracção exercida no arrancamento. Para o arrancamento, enrosca-se um parafuso na pastilha permitindo que o aparelho exerça sobre o conjunto (pastilha, resina e betão) uma força de tracção. Deve garantir-se que a força de tracção se distribui de forma uniforme e perpendicularmente na pastilha; se isso não acontecer, os valores de “pull-off” serão menores do que os obtidos em boas condições de ensaio. As assimetrias na força de tracção podem ser causadas na execução do pré-caroteamento ou aplicação da resina, mas também se o aparelho de ensaio não estiver nivelado. No sentido de minimizar esse efeito, alguns aparelhos fazem um auto-nivelamento relativamente à área a testar.

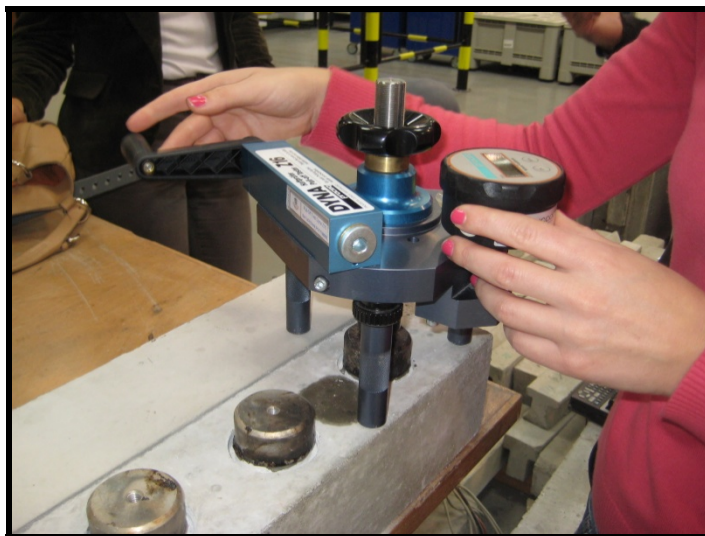


Fig. 3 – Método do “pull-off”

Deve caracterizar-se o modo de ruína ocorrido no arrancamento da pastilha para complementar a análise dos resultados obtidos. Isto faz-se, observando a pastilha e a zona arrancada no betão, identificando quais os componentes em cada parte (pastilha e superfície do betão) e em que quantidade se encontram. Esta observação permite identificar anomalias e validar os resultados do ensaio. Neste trabalho consideram-se apenas dois modos de ruína: rotura que ocorre na superfície de interface resina-betão e rotura por corte do betão.

- Destacamento na superfície de interface resina-betão (ruína pela resina): Após a ruína, observam-se na pastilha resina e possivelmente vestígios de betão pouco significativos. Este tipo de ruína pode indicar que a cura da resina não se fez correctamente ou que o betão é demasiado forte. Os valores associados a este tipo de ruína são considerados inválidos para efeitos de caracterização do betão.
- Rotura por corte do betão (ruína pelo betão): Observa-se na pastilha uma porção de betão com o formato da própria pastilha com espessura variável, mas próxima do valor da profundidade do pré-caroteamento.

O valor obtido através do ensaio de “pull-off” resulta da força de arrancamento dividida pela área da pastilha e pode ser correlacionado com a resistência do betão.

Num estudo levado a cabo por Costa et al. (2005), apresenta-se a expressão (1) que permite estimar o valor da resistência à compressão do betão em cubos a partir do ensaio de “pull-off”:

$$f_{cm,p} = 0,18(f_{cm,cubo})^{2/3} \quad (\text{Costa et al., 2005}) \quad (1)$$

$f_{cm,p}$, valor médio da resistência obtida no ensaio “pull-off”;

$f_{cm,cubo}$, resistência média do betão à compressão em cubos.

A obtenção de valores com recurso a esta equação foi adoptada pelo BSC² e pelo Instituto Alemão de Tecnologia da Construção.

Os valores obtidos neste ensaio devem ser analisados criticamente, pois existem diversos factores que podem conduzir a conclusões erradas. Passa-se à identificação de alguns dos factores que podem influenciar o ensaio de “pull-off” (Juvandes, 1999):

- Estado de deterioração do betão: a existência de micro-fendilhação reduz os valores do “pull-off”;
- Tipo de adesivo utilizado na colagem das pastilhas: o tipo de adesivo pode condicionar o modo de ruína, se esta se dá pelo betão, pelo adesivo ou por ambos;
- Existência ou não de primário: a aplicação de um primário aumenta a coesão interna o que conduz a um incremento do valor do “pull-off”;
- Tratamento das superfícies: em superfícies mais rugosas ou sem aplicações de qualquer primário ou argamassa de regularização, os valores de “pull-off” são bastante mais baixos do que os obtidos com superfícies mais regulares;
- Caroteamento: se o ensaio é efectuado com a realização de pré-caroteamento os valores do “pull-off” são inferiores aos obtidos sem pré-caroteamento;
- Experiência do operador: a experiência do operador também tem influência nos resultados do ensaio;
- Classe do betão.

² British Standard Council

Os factores descritos revelam que o “pull-off” é um ensaio muito susceptível a erros, sendo aconselhável realizar um número suficiente de ensaios que permita o seu despiste. A metodologia usada deve também ser particularmente controlada.

É necessário respeitar o tempo necessário para a cura da resina. Este depende do tipo de resina utilizada e das condições de temperatura e humidade verificadas no local. Assim, o tempo que decorre desde o pré-caroteamento até ao arrancamento da pastilha e obtenção do valor do ensaio de “pull-off” pode variar, sendo geralmente maior ou igual a 48 horas (tempo de cura). A aplicação de primário é recomendada para aumentar a aderência da pastilha ao betão. Este produto deve ser aplicado antes do pré-caroteamento e também requer uma cura semelhante ao da resina, aumentando o tempo de espera.

O “pull-off” não é um método puramente não-destrutivo, já que é necessário proceder à reparação da zona ensaiada, sendo por isso muitas vezes denominado como um método semi-destrutivo.

Este é um ensaio vantajoso no sentido em que pode ser aplicado *in situ* e em estruturas pré-existentes, sendo um método particularmente útil quando se pretende avaliar a aderência entre novas camadas de betão ou materiais de reparação aplicados a betão previamente existente.

A NP EN 1542 (1999) descreve os procedimentos a adoptar na aplicação do método do “pull-off”.

2.4. ENSAIO DE ULTRA-SONS

O ensaio que emprega ultra-sons na caracterização do betão é totalmente não-destrutivo (Figura 4). Determinando o tempo “T” que o impulso de uma onda ultra-sónica demora a percorrer a distância entre dois pontos “D”, obtém-se a velocidade de impulso “V”: $V = D/T$.



Fig. 4 – Ensaio de ultra-sons

A informação obtida através do método dos ultra-sons pode ser utilizada nas seguintes aplicações (IAEA, 2002):

- Determinação da uniformidade do betão numa peça ou entre peças;
- Medição da deterioração das propriedades do betão ao longo do tempo;
- Investigação de danos provocados pelo fogo, congelamento e outros agentes;
- Indicação da qualidade do betão;
- Determinação do módulo de elasticidade do betão mediante uma correlação.

2.4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A interpretação da informação obtida a partir da velocidade dos ultra-sons baseia-se na teoria da propagação de ondas. Segundo esta teoria distinguem-se três tipos fundamentais de ondas criadas quando um meio sólido é perturbado por uma acção vibratória. Estas ondas designam-se como sendo de compressão, transversais e de superfície. As ondas de compressão são as mais rápidas, seguidas pelas ondas transversais e por fim pelas ondas de superfície. A velocidade das ondas depende das propriedades elásticas do meio em que se propagam. Assim, se a densidade do material e a velocidade das ondas forem conhecidas, as propriedades elásticas do material podem ser estimadas. Os instrumentos de ultra-sons utilizados actualmente medem o tempo de chegada da primeira onda, ou seja, da onda de compressão (Naik&Malhotra, 1991). No entanto, geram-se sempre ondas transversais e de superfície, mas que não chegam a causar interferência considerável (Menghetti, 1999).

Os aparelhos de ultra-sons são constituídos por um transdutor electro-acústico ligado a um circuito electrónico, que recebe um estímulo para oscilar mecanicamente, pois o circuito electrónico emite pequenos impulsos eléctricos ao transdutor excitando-o na sua frequência natural. Esta vibração gera os impulsos, transformados em ondas de energia mecânica pelo transdutor-transmissor, que deve estar em contacto com a superfície do betão. Um transdutor receptor similar é acoplado ao provete a uma distância conhecida do transdutor-emissor e a energia mecânica é novamente convertida em impulsos eléctricos da mesma frequência (Carino, 1994).

Deve garantir-se um contacto adequado entre a superfície do betão e as faces dos dois transdutores utilizando um produto de ligação (gel, vaselina, sabão líquido, etc.), partindo do princípio que a superfície já se apresenta suficientemente lisa. Caso o contacto seja parcial, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura porque apenas uma parte do impulso será transmitida directamente ao betão. No entanto, a camada do produto ligante deve ser tão fina quanto possível, para reduzir o erro associado à sua presença. As leituras em cada estação devem ser efectuadas até se obter o valor mínimo de tempo de transmissão.

A metodologia para a medição da velocidade de impulsos ultra-sónicos em estruturas de betão encontra-se normalizada na NP EN 12504-4 (2007).

2.4.2. MODOS DE TRANSMISSÃO DAS ONDAS ULTRA-SÓNICAS

Os ensaios para obtenção da velocidade de propagação dos ultra-sons podem ser realizados em três modos: directo, indirecto e semi-directo. Os modos para obtenção da velocidade de impulso diferem na posição relativa dos transdutores colocados sobre o betão.

- Método de Transmissão Directa

Na transmissão directa os transdutores colocam-se frente-a-frente, em faces opostas (Figura 5). Este é o método mais eficaz, pois a energia de pulso transmitida e recebida é máxima. É utilizado para avaliar características de resistência mecânica e homogeneidade, detecção de discontinuidades no betão e obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.

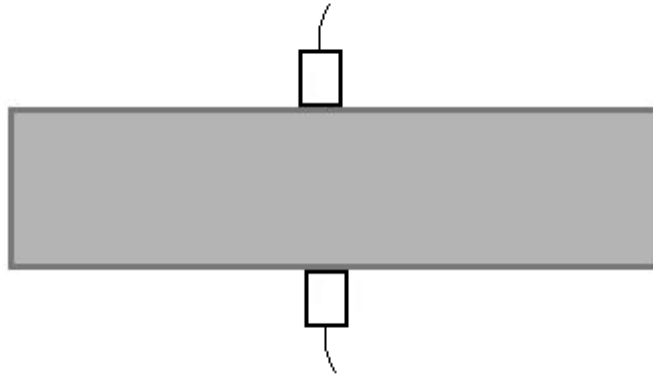


Fig. 5 – Transmissão Directa

- Método de transmissão indirecta

No método indirecto os transdutores colocam-se na mesma face (Figura 6). Este é método menos fiável, pois a intensidade do sinal recebido é significativamente menor do que o recebido no modo directo, propiciando erros. Utiliza-se quando se tem acesso a apenas uma face do objecto em análise, como pode ocorrer em lajes, pavimentos de betão ou barragens.



Fig. 6 – Transmissão Indirecta

Quando os transdutores são colocados próximos um do outro o impulso propaga-se pela camada mais superficial do betão. À medida que os transdutores são afastados, o impulso viaja através de uma camada mais profunda do betão. Se o betão superficial tiver características diferentes do betão em profundidade os valores obtidos podem não ser representativos da peça. Este inconveniente pode, no entanto, ser útil na detecção e estimativa da espessura de uma camada de betão de qualidade diferente. Um betão de características diferentes ao longo da estrutura pode ocorrer devido a erros de construção, mas também a reacções ocorridas posteriormente (Crawford, 1997).

Outra particularidade deste método é a necessidade de se realizar um procedimento especial para determinar a velocidade de impulso. Uma vez que o transdutor não é pontual, desconhece-se o exacto comprimento do caminho percorrido pelo impulso.

A determinação da velocidade de impulso, usando o método indirecto, faz-se alterando a localização do receptor (R_i) em incrementos constantes (exemplo: 15 cm) ao longo de uma linha enquanto a localização do emissor (T) se mantém fixo (Figura 7). A distância entre os dois transdutores é assinalada num eixo horizontal e o correspondente tempo de impulso é assinalado num eixo vertical (Figura 7). A inclinação da recta ajustada a estes pontos é a velocidade de impulso dada pelo método.

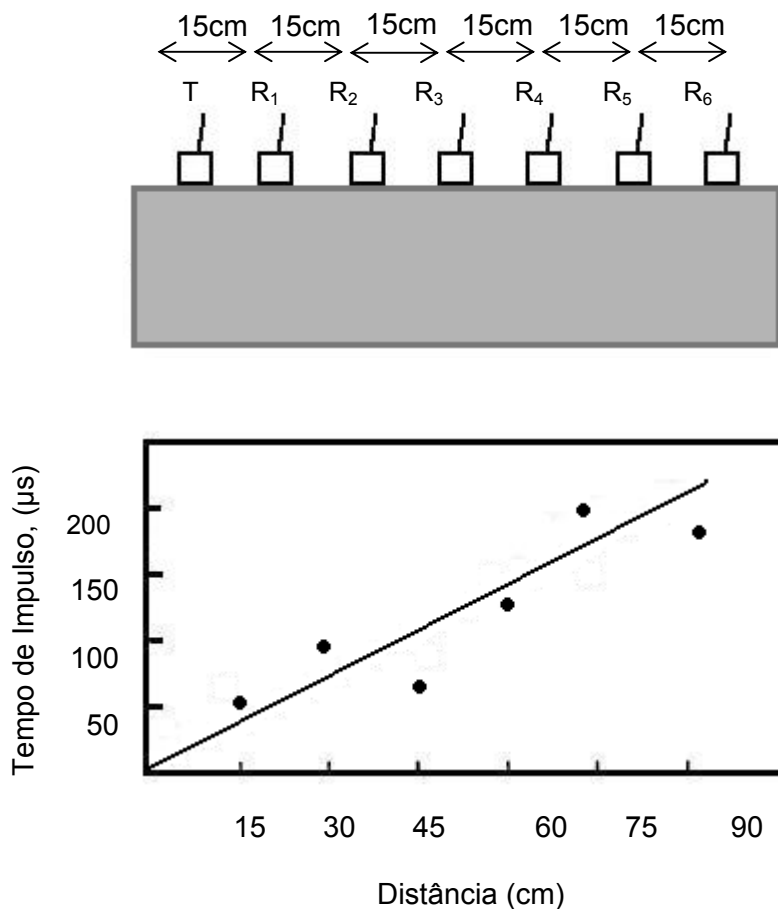


Fig. 7 – Determinação da velocidade de impulso pelo método de transmissão indirecta

- Método de transmissão semi-directa

No método semi-indirecto os transdutores localizam-se em faces perpendiculares do objecto (Figura 8). É útil quando se pretende evitar regiões de armadura, como cantos de pilares e vigas. Fornece o mesmo tipo de informação que o método directo. Deve porém ter-se o cuidado de não afastar demasiado os transdutores para evitar que o impulso transmitido não diminua ao ponto de não ser recebido.

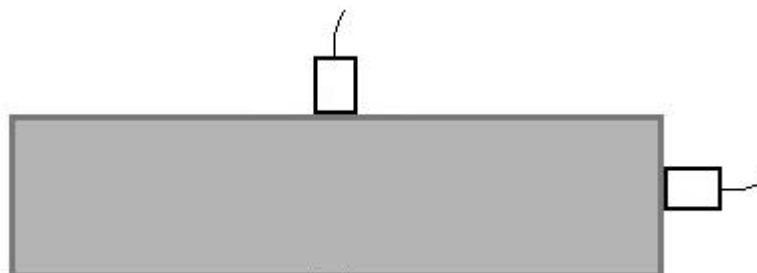


Fig. 8 – Transmissão semi-directa

2.4.3 FACTORES QUE INFLUENCIAM AS MEDIÇÕES DA VELOCIDADE DE IMPULSO

O uso de ultra-sons, para analisar as características do betão ou para detectar e definir a extensão de defeitos internos, deve ser restrito a pessoal qualificado com experiência prévia nos procedimentos de ensaio e na interpretação dos resultados. Deve acautelar-se a tendência para se formar conclusões, partindo apenas dos resultados, já que a análise dos valores obtidos neste ensaio tem que ter em consideração a influência das variáveis que os podem afectar.

- Tipo e dimensão do agregado

Investigadores apontam para que a relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a resistência à compressão varie com as características do agregado. Hamassaki (1986) estudaram vários tipos de agregados para uma mesma mistura de betão, tendo em vista avaliar a sua influência na relação velocidade de propagação/resistência. A conclusão foi que betões com semelhantes resistências à compressão podem ter diferentes velocidades de ondas ultra-sónicas em função do tipo de agregado utilizado.

- Teor de humidade

O teor de humidade tem dois efeitos na velocidade de impulso, um químico e outro físico. Estes efeitos são importantes para estabelecer correlações com a resistência do betão. Entre um provete normalizado de betão, adequadamente curado, e um elemento estrutural constituído pelo mesmo betão, pode haver uma diferença significativa na velocidade de impulso. Uma parte desta diferença é relacionada com o efeito das diferentes condições de cura na hidratação do cimento, enquanto outra parte se deve à presença de água livre nos vazios (IAEA, 2002).

- Temperatura do betão

Verifica-se que, para temperaturas do betão entre 10°C e 30°C, não há influência significativa nos valores de velocidade de impulso obtidos bem como na resistência ou propriedades elásticas do material. Fora do intervalo de temperaturas referido, devem ser feitas correcções à velocidade de impulso (IAEA, 2002).

- Comprimento do percurso

O comprimento do percurso efectuado pelo impulso ultra-sónico deve ser suficientemente longo para não ser significativamente influenciado pela natureza heterogénea do betão, propiciando leituras que se referem apenas ao cimento ou ao agregado. Recomenda-se um percurso mínimo de 100 mm para o betão onde a dimensão máxima do agregado seja de 20 mm ou menor e de 150 mm para betão em que aquela dimensão seja entre 20 mm e 40 mm. A velocidade de impulso geralmente não é influenciada pelas mudanças de percurso, embora o temporizador electrónico possa indicar uma ligeira redução da velocidade com o aumento do comprimento do percurso.

- Dimensões e formato do provete

A velocidade de impulsos de vibração curtos é independente do formato e do tamanho do provete no qual se propagam, excepto se a sua aresta mínima for menor do que um certo valor. Abaixo desse valor, a velocidade de impulso pode ser significativamente reduzida. A grandeza desta redução depende sobretudo da razão entre o comprimento de onda do impulso vibratório e a dimensão da menor aresta do provete, sendo este factor insignificante se essa razão for menos do que a unidade (IAEA, 2002). O Quadro 1 indica a relação entre a velocidade de impulso no betão, a frequência do transdutor e a dimensão mínima da aresta admitida para o provete. Se a dimensão mínima da aresta for menor do que o comprimento de onda ou se for utilizado o método indirecto de transmissão, o modo de propagação altera-se e assim a velocidade medida será diferente. Este facto é particularmente importante no caso dos elementos de betão comparados serem de tamanhos significativamente diferentes.

Quadro 1 – Efeito da dimensão do provete na transmissão do impulso (IAEA, 2002)

Frequência do Transdutor (kHz)	Dimensão mínima admissível da aresta dos provetes (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

- Efeito dos varões de aço

A velocidade de impulso medida em betão armado, quando na proximidade de varões de aço, é geralmente mais alta do que em betão simples com a mesma composição. Isto deve-se ao facto da velocidade de impulso no aço poder ser até duas vezes superior à velocidade no betão. O valor medido da velocidade depende ainda da localização dos varões de aço, do seu diâmetro, da superfície, do seu número e da sua orientação relativamente ao percurso de propagação.

Sempre que possível, as medições devem ser feitas de modo a que o aço não intercepte directamente o percurso entre os transdutores.

- Razão água/cimento

O aumento da razão água cimento diminui a velocidade de impulso devido à diminuição da densidade e das resistências à compressão e à flexão (Crawford, 1997).

- Aditivos

Os aditivos que se podem utilizar no fabrico do betão influenciam a velocidade de impulso aproximadamente da mesma forma que o teor de humidade.

- Grau de compactação

A densidade do betão diminui quando a compactação é inadequada, diminuindo a velocidade de impulso.

- Cura e idade do betão

Estes factores afectam a velocidade de impulso na mesma proporção que afectam o desenvolvimento da resistência do betão. O betão curado em condições húmidas tem uma velocidade de impulso maior do que um betão curado ao ar. A velocidade de impulso e a resistência são igualmente afectadas pela idade do betão. No entanto, a relação entre a velocidade de impulso e a resistência do betão é independente da sua idade.

- Contacto acústico

Já se referiu a importância de contacto entre os transdutores e o betão. Se esta for negligenciada serão obtidas leituras erróneas.

2.4.4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DOS ULTRA-SONS

Descrevem-se as diversas informações que se podem inferir sobre o betão utilizando o método dos ultra-sons.

2.4.4.1 Qualidade do betão

No seguimento da investigação nesta área estabeleceram-se valores da velocidade de propagação de impulso ultra-sónico como um indicador de qualidade do betão (Quadro 2).

Quadro 2 – Relação entre a velocidade de impulso e a qualidade do betão (Whitehurst, 1951)

Velocidade de impulso (m/s)	Qualidade do Betão
> 4570	Muito Boa
3660 a 4570	Boa
3050 a 3660	Questionável
2130 a 3050	Baixa
< 2130	Muito baixa

O autor do estudo que conduziu à elaboração da tabela acima indicada, Whitehurst (1951), adverte que estes valores foram estabelecidos com base em ensaios num betão com uma densidade de aproximadamente 2400 kg/m^3 . Mais do que os limites presentes na tabela, a comparação mais significativa para aferir sobre a qualidade de um betão, será a que toma como referência a velocidade registada em zonas da estrutura em análise identificadas como sendo de boa qualidade (Whitehurst, 1951).

2.4.4.2 Uniformidade do betão

Heterogeneidades e variações na qualidade no betão causam variações na velocidade de impulso. As medições da velocidade proporcionam meios para detectar essas anomalias devendo, para isso, estabelecer-se pontos de medição que cubram um volume representativo da estrutura a analisar.

O número de pontos a testar depende das dimensões da estrutura, da precisão requerida e da variabilidade do betão. Note-se que em casos em que o comprimento do percurso é o mesmo ao longo do estudo, o tempo medido pode ser utilizado para analisar a uniformidade sem necessidade de fazer a conversão dos valores para velocidade. Esta técnica é particularmente útil para estudos em que as medidas são feitas por transmissão indirecta.

2.4.4.3 Detecção de defeitos

Quando um impulso ultra-sónico se propaga através do betão e entra em contacto com uma interface betão-ar, o primeiro impulso a alcançar o transdutor-receptor contorna a periferia do defeito, aumentando o tempo necessário para a transmissão do impulso.

Este efeito pode ser empregue na detecção de defeitos como vazios, fissuras e outros cujas dimensões sejam da ordem dos 100 mm de diâmetro ou de profundidade. Os defeitos com dimensões muito reduzidas têm pouco ou nenhum efeito nos tempos de transmissão.

O método dos ultra-sons é pouco eficaz quando aplicado à detecção de fissuras nas estruturas, porque as faces fissuradas encontram-se muitas vezes suficientemente próximas para permitirem que o impulso de energia passe imperturbado pela fissura. Isto verifica-se em pilares fissurados carregados verticalmente onde exista compressão suficiente para manter a fissura fechada. Igualmente, se o betão estiver rodeado de água, a fissura preenchida por água torna-se indetectável já que a energia ultra-sónica viaja através do líquido (BS³ 1881-203, 1986).

2.4.4.4 Detecção de vazios

Para detectar a presença de vazios é aconselhável desenhar uma grelha na superfície do betão com os seus pontos espaçados de forma a corresponderem aproximadamente ao tamanho do vazio. A medição com ultra-sons nos pontos da grelha permite identificar o vazio, medindo o tempo de transmissão dos impulsos quando aquele se encontra directamente no percurso do impulso. O tamanho do vazio pode ser estimado, assumindo que o impulso percorre o menor caminho entre os transdutores e o contorno do vazio. Estas estimativas só são validas quando o betão à volta da cavidade é uniformemente denso.

2.4.4.5 Estimativa da profundidade de uma fissura

Para estimar a profundidade de uma fissura, desenvolveram-se vários modelos (Andrade, 2007), que utilizam a transmissão dos ultra-sons de forma indirecta. Nesta forma de transmissão, visto os transdutores não serem pontuais, não se conhece, com precisão o caminho percorrido pela onda.

O modelo proposto por Bungey (1989) e o modelo proposto pela BS 1881: Part 203 (1986) estimam a profundidade de uma fissura “h” com base num valor estimado do percurso “x” que pode não corresponder ao percurso real, introduzindo imprecisão no método.

Em alternativa, Pinto e tal. (2007), desenvolveram dois métodos (o equidistante e o linear) para serem utilizados na obtenção da profundidade de uma fissura, com ultra-sons, a partir de leituras indirectas. Ambos fornecem uma estimativa da velocidade, utilizando um método gráfico a partir de várias leituras.

³ British Standard

- Modelo proposto por Bungey (1989)

A estimativa da profundidade de uma fissura pode ser obtida, medindo o tempo de transmissão ao longo da fissura, colocando os transdutores na disposição esquematizada na Figura 9. Os transdutores (receptor e emissor) são colocados a uma distância x em lados opostos da fissura e equidistantes da mesma.

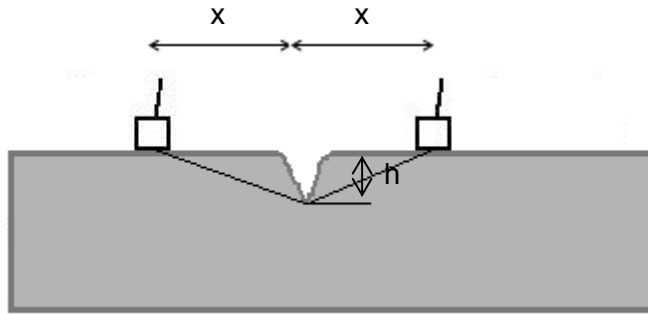


Fig. 9 – Modelo proposto por Bungey (1989)

Para calcular a profundidade da fissura “ h ” deve conhecer-se a velocidade de propagação de impulso para o betão íntegro, “ V_c ”. Assume-se que o percurso sem a fissura, “ L_c ”, é:

$$L_c = 2x \quad (2)$$

Calcula-se o percurso desviado pela fissura, “ L_f ”:

$$L_f = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V_c} \quad (3)$$

Sendo, o tempo de propagação sem a fissura, “ T_c ”:

$$T_c = \frac{2x}{V_c} \quad (4)$$

e o tempo de propagação com a fissura, “ T_f ”:

$$T_f = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V_c} \quad (5)$$

Tomando a mesma velocidade “ V_c ” para os casos com e sem a fissura, igualando-se as equações (4) e (5) de forma a eliminar “ V_c ” chega-se a:

$$h = \left(\frac{x}{T_c} \right) \sqrt{T_f^2 - T_c^2} \quad (6)$$

h , profundidade da fissura;

x , distância do transdutor à fissura;

T_f , tempo de propagação com fissura;

T_c , tempo de propagação sem fissura.

A estimativa apresentada acima apenas é válida, admitindo que a velocidade de impulso é a mesma numa peça com fissura e numa de betão íntegro (Medeiros, 2007). Esta suposição pode levar a erros, pois o impulso que contorna a abertura desloca-se numa região do betão diferente do impulso que se desloca próximo da superfície no betão íntegro, existindo também incerteza relativamente à extensão do percurso do impulso.

- Modelo proposto pela BS 1881: Part 203 (1986)

O modelo descrito na BS 1881: Part 203 (1986), descreve um procedimento idêntico ao anterior, sendo, no entanto, efectuadas leituras para posições sucessivamente afastadas da fissura. Desta forma, não é necessário estimar o valor da velocidade.

O procedimento consiste em posicionar o emissor e o receptor simetricamente em relação à fissura, a uma distância “ x ”, e anotar o tempo de propagação “ T_1 ”. Em seguida, deslocam-se o emissor e o receptor agora equidistantes da fissura de “ $2x$ ” e anota-se o tempo de propagação “ T_2 ”. Admitindo que o impulso percorre o menor caminho entre os dois transdutores, através do betão, contornando a fissura com a mesma velocidade “ V ”, obtém-se por modificação da equação (5), a equação (7) onde “ T_1 ” é dado por:

$$T_1 = \frac{2\sqrt{x^2 + h^2}}{V} \quad (7)$$

O tempo de transmissão “ T_2 ” medido com o dobro da distância entre transdutores, pode ser expresso como uma modificação da equação (2.4) na equação (2.6), onde “ T_1 ” é obtido por:

$$T_2 = \frac{2\sqrt{4x^2 + h^2}}{V} \quad (8)$$

Tomando a mesma velocidade “ V ”, e igualando as equações (7) e (8) de forma a eliminar “ V ”, tem-se:

$$h = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (9)$$

Pode fazer-se uma generalização da equação (9), tomando distâncias múltiplas de “x” para os tempos “T₁” e “T₂”. Como exemplo sendo “a” e “b” múltiplos de x, com a<b, vem:

$$h = x \sqrt{\frac{b^2 T_1^2 - a^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (10)$$

Burgey (1989) afirma que aberturas superficiais podem ser estimadas com estes dois modelos com uma precisão de ± 15% devido a erros inerentes às leituras pelo modo de transmissão indirecto.

- Modelo equidistante

Neste modelo, posicionam-se os transdutores equidistantes à abertura superficial fazendo-se pelo menos 3 leituras indirectas, conforme a Figura 10. Para cada “xi”, obtém-se o tempo de propagação “Ti”.

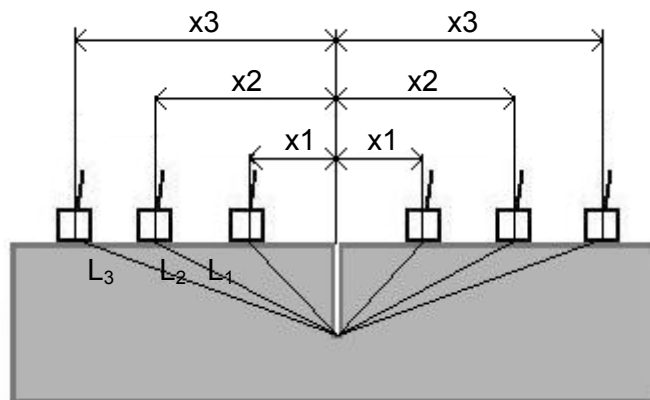


Fig. 10 – Modelo equidistante (Pinto et al., 2007)

Sabendo que o tempo de propagação da onda “T” é igual à distância percorrida “Li” dividida pela velocidade da onda “V”, tem-se:

$$T_i = \frac{2L_i}{V} \quad (11)$$

$$L_i^2 = x_i^2 + h^2 \quad (12)$$

L_i , distância percorrida pela onda;

h , profundidade da abertura;

V , velocidade da onda de propagação;

Substituindo a equação (12) na equação (11), tem-se:

$$T_i = \frac{2\sqrt{x_i^2 + h^2}}{V} \quad (13)$$

Isolando-se “xi”:

$$x_i^2 = \frac{T_i^2 V^2}{4} - h^2 \quad (14)$$

Esta expressão pode ser representada graficamente relacionando x_i^2 com $T_i^2/4$, onde a inclinação da recta é dada pelo quadrado da velocidade “V” e a intersecção com o eixo das ordenadas, pelo quadrado da profundidade “h”, conforme a Figura 11.

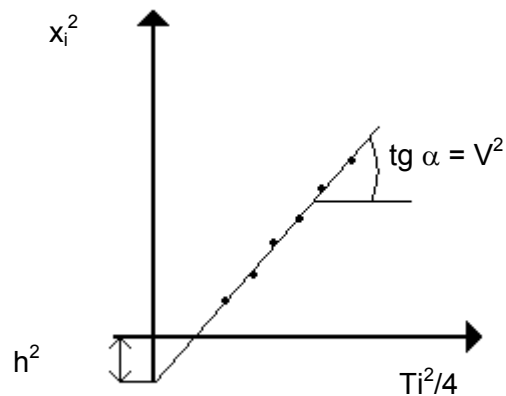


Fig. 11 – Curva obtida com tempos de propagação (T_i) e distância (x_i) (Pinto et al., 2007)

- Modelo Linear

O modelo linear é uma variação do modelo não linear que pode ser utilizado quando a abertura ocorre próxima de uma face da peça, onde não há condições para se fazer leituras equidistantes. Neste caso, fixa-se o transdutor-emissor num lado da abertura, movendo-se o transdutor-receptor do outro lado, conforme a Figura 12.

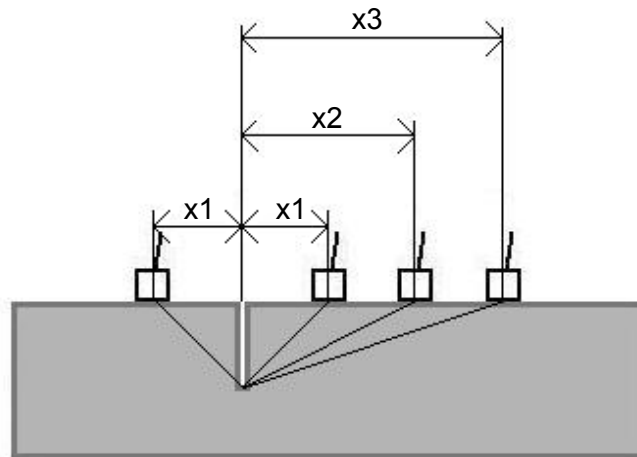


Fig. 12 – Modelo linear (Pinto et al., 2007)

Sabendo-se que o tempo de propagação da onda “T” é igual à distância percorrida “L” pela onda de velocidade “V”, tem-se as seguintes equações.

$$T_1 = \frac{2L_1}{V} \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{V} \quad (16)$$

$$T_i = \frac{L_1 + L_i}{V} \quad (17)$$

$$L_i = \sqrt{h^2 + x_i^2} \quad (18)$$

$$x_i^2 = V^2 \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right)^2 - h^2 \quad (19)$$

A equação (19) pode ser representada graficamente pela Figura 13.

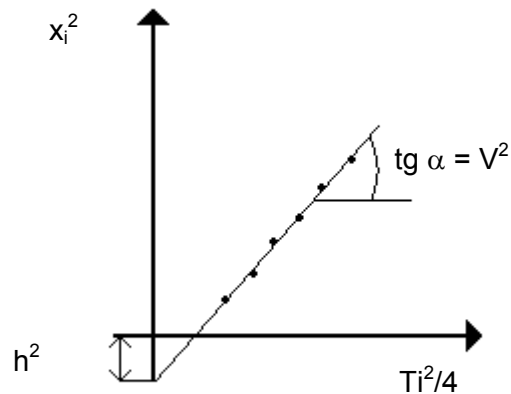


Fig. 13 – Curva obtida com tempos de propagação (T) e distancia (x) (Pinto et al., 2007)

2.4.4.6 Avaliação da espessura de uma camada de betão de qualidade diferente

Para estimar a espessura de camadas de betão de qualidade diferente utiliza-se o método de transmissão indirecta, descrito no ponto 2.3.2. O transmissor, T, permanece fixo e o receptor vai ser colocado em pontos sequencialmente mais distantes, alinhados no mesmo plano e equidistantes entre si.

A velocidade de impulso através da camada superior do betão “ V_A ” e da camada inferior “ V_B ” são indicadas pelas diferentes inclinações das rectas que relacionam a distância dos transdutores com os tempos de impulso (ver Figura 14, em que se usa a distância de 15cm).

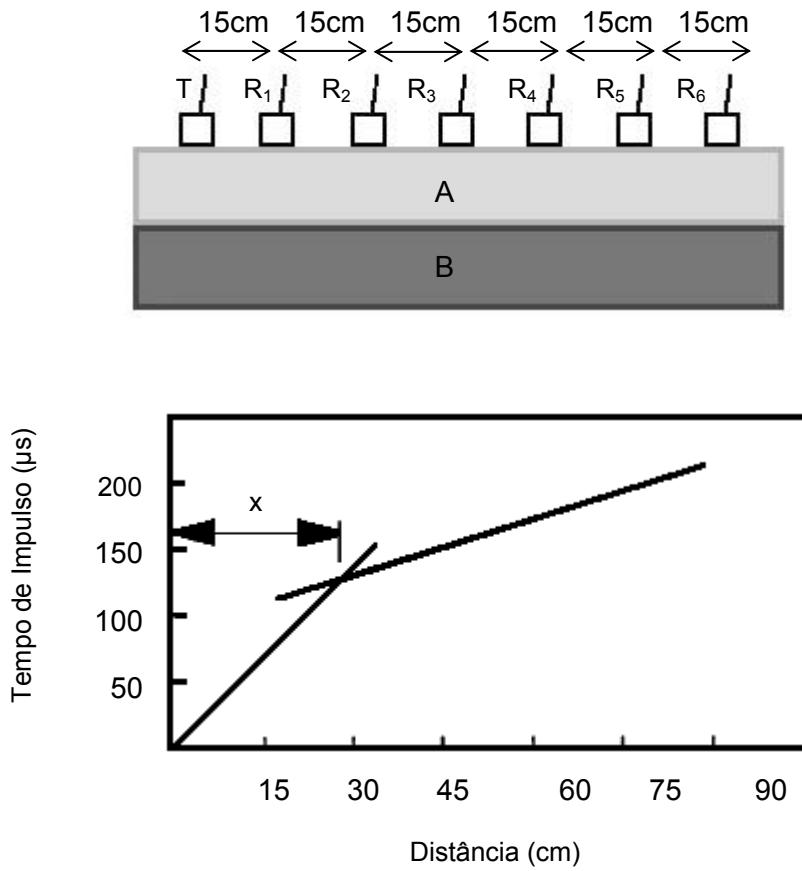


Fig. 14 – Método indirecto para determinar a profundidade da deterioração (Crawford, 1997)

A distância “x” (onde a inclinação muda – Figura 14) é medida e a espessura e da camada superior é calculada segundo a equação (20).

$$e = \left(\frac{x}{2}\right) \times \left[\frac{(V_B - V_A)}{(V_B + V_A)}\right]^{1/2} \quad (\text{Crawford, 1997}) \quad (20)$$

2.4.4.7 Determinação de modificações nas propriedades do betão

Medições da velocidade de impulso são particularmente úteis para seguir o processo de endurecimento do betão durante as primeiras 36h. Nesse período ocorrem rápidas mudanças na velocidade de impulso que estão associadas a mudanças físico-químicas na estrutura da pasta de cimento, sendo necessário fazer medições em intervalos de 1 a 2h se se pretende acompanhar estas mudanças. Ao longo da cura do betão, estes intervalos podem ser prolongados para 1 dia ou mais após o período inicial de 36h (IAEA, 2002).

O ensaio de ultra-sons tem a vantagem de poder ser aplicado ao longo do tempo na mesma peça, já que, sendo um método não-destrutivo, a peça permanece inalterada após cada medição.

A determinação de modificações a partir de ensaios de ultra-sons também se aplica a outros materiais. Como exemplo, cita-se os estudos de Begonha (2001) em que a velocidade de impulso em rochas naturais como o granito é utilizada no estudo da sua caracterização.

2.4.4.8 Determinação do módulo de elasticidade do betão

A relação entre o módulo de elasticidade e a velocidade de um impulso ultra-sónico que atravessa um meio isotrópico elástico de dimensões infinitas é dada pela equação (21).

$$E = \frac{\rho v^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{IAEA, 2002}) \quad (21)$$

E , módulo de elasticidade (MPa)

ν , coeficiente de Poisson

ρ , densidade (N/m^3)

v , velocidade de impulso (km/s)

Se os valores de “ ν ” e “ ρ ” forem desconhecidos, é possível utilizar a equação acima para determinar o valor de “ E ” de provetes, para um grande número de formatos e tamanhos. Isto porque a velocidade de impulso não é significativamente afectada pelas dimensões dos provetes, excepto quando uma ou mais das dimensões laterais é pequena relativamente ao comprimento de onda do impulso (IAEA, 2002)

Embora a equação (21) tenha sido desenvolvida para meios isotrópicos elásticos, o seu uso no betão tem apresentado resultados satisfatórios.

2.4.4.9 Avaliação da resistência do betão

Como referido em 2.4.1, a velocidade de propagação de ultra-sons é um indicador da qualidade do betão, a qual é geralmente expressa em termos de resistência. No entanto, não é possível estabelecer uma correlação satisfatória entre a resistência à compressão em provetes normalizados cúbicos ou cilíndricos e a velocidade de propagação aplicável a diferentes tipos de betão.

A resistência do betão é influenciada por um número de factores intrínsecos ao betão, a sua idade, condições de cura, condições de humidade, proporções da mistura, tipo de agregado e tipo do cimento. Assim, uma correlação entre a velocidade de impulso e a resistência do betão, para cada tipo de betão em estudo, tem de ser estabelecida experimentalmente através de ensaios de um número suficiente de amostras para uma análise estatística dos resultados.

2.4.5. VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE DOS ULTRA-SONS

O método de ultra-sons é um meio excelente para conhecer a uniformidade do betão, identificar defeitos e avarias, bem como detectar eventuais modificações das propriedades do betão ao longo do tempo.

O procedimento de ensaio é simples e o aparelho de teste fornece directa e imediatamente os resultados da medição; o equipamento é portátil e fácil de usar, tanto *in situ* como em laboratório.

Como ensaio verdadeiramente não-destrutivo, permite a realização de diversos testes sobre um mesmo provete, sem qualquer deterioração, num curto espaço de tempo, tendo adquirido grande popularidade na engenharia estrutural.

Os seus resultados podem, no entanto, ser influenciados por um grande número de factores, pelo que é difícil definir correctamente a exactidão deste ensaio.

Para avaliar as propriedades resistentes do betão, através da sua velocidade de impulso, é importante estabelecer correlações prévias através de ensaios em laboratório, em betões de características conhecidas, antes de se realizarem medições *in situ* em estruturas.

ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1. METODOLOGIA

A experimentação laboratorial foi realizada no sentido de avaliar a eficácia dos métodos não-destrutivos na caracterização das propriedades mecânicas do betão.

O Programa Experimental desenvolveu-se sobre:

- provetes normalizados, de betão simples, de diferentes dimensões: cúbicos, cilíndricos e prismáticos;
- um modelo de laje em betão armado;
- carotes extraídas de uma estrutura existente.

Os provetes normalizados e o modelo de laje foram produzidos em laboratório. Para isso realizaram-se duas misturas de betão com composição semelhante e caracterização prévia dos seus constituintes.

Foram realizados ensaios não-destrutivos: ultra-sons (determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons); esclerómetro (determinação do índice esclerométrico) e arrancamento por tracção directa, “pull-off”. Os ensaios destrutivos realizados foram: ensaios normalizados para avaliação das resistências à compressão, à tracção e à flexão e do módulo de elasticidade, para aferição dos resultados obtidos nos ensaios não-destrutivos.

Os ensaios não-destrutivos englobaram:

- Ensaios com o esclerómetro, realizados em cubos, em várias idades do betão, com comparação dos seus valores com os obtidos no ensaio para determinação da resistência à compressão, também em cubos;
- Ensaios de “pull-off”, realizados em prismas, cujos resultados foram comparados com os correspondentes obtidos nos ensaios de compressão de cubos, de flexão em prismas e ensaio brasileiro em cilindros;
- Ensaios de “ultra-sons” sobre cilindros, utilizando o método de transmissão directa, para estimar o módulo de elasticidade do betão, em diferentes idades, que foi comparado com o módulo de elasticidade obtido em ensaio de compressão. Caracterizou-se ainda a evolução do valor da velocidade de propagação dos ultra-sons durante o processo de cura do betão até aos 30 dias. Este ensaio foi também realizado sobre carotes, relacionando a velocidade de impulso com a sua resistência à compressão e a massa volúmica, e ainda

sobre um prisma de betão simples e no modelo de laje de betão armado, utilizando os métodos de transmissão directa e indirecta, através dos modelos equidistante e linear. Realizaram-se várias leituras no modelo de laje, em diferentes direcções e percursos, antes e depois de ser carregada, para estimar a profundidade de fissuras. Estas leituras realizaram-se com os objectivos de identificar o início da fendilhação, analisar o efeito da presença das armaduras na velocidade do impulso e estimar a profundidade de fissuras.

O programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção, LEMC, e no Laboratório de Estruturas, LABEST, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

3.2. MODELOS DE ENSAIO

A composição do betão, o seu teor de humidade, as condições de cura e de compactação tem uma grande influência nos resultados dos ensaios não-destrutivos, como referido anteriormente. Assim, para controlar todos os aspectos do seu fabrico e constituição, os provetes de betão foram produzidos no LEMC especificamente para este trabalho. Os constituintes do betão foram escolhidos com o objectivo de representar um betão de características normais para aplicação em obras correntes.

3.2.1. AGREGADO

Começou-se por analisar a composição granulométrica e massa volúmica das areias e britas utilizadas, procedendo aos ensaios descritos na NP EN 933-1 e NP EN 1097-6, respectivamente.

Os ensaios utilizados na determinação da massa volúmica do agregado escolhido foram o do Cesto e o do Picnómetro consoante a fracção granulométrica em análise. Os resultados apresentam-se no Anexo 1.

A análise granulométrica foi efectuada com o recurso aos peneiros com aberturas referentes à Série Base + Série 1. O procedimento de ensaio utilizado foi lavagem e peneiração. Os resultados dos ensaios são apresentados no Anexo 2 sob a forma de tabela e através da representação gráfica dos resultados de cada amostra. Na composição do betão, utilizou-se uma areia fina com agregado máximo de 2 mm, uma areia fina 0/2. A mesma simbologia será aplicada para identificar as outras areias e britas utilizadas, nomeadamente: uma meia-areia 0/4, uma brita 5/10 (dimensões máxima e mínima) e uma brita 10/19. O cimento utilizado foi do tipo CEM I 42,5 R C cuja ficha técnica se apresenta no Anexo 3.

3.2.2. BETÃO

A composição do betão, as quantidades dos agregados mencionados, assim como de água e cimento, foi obtida através do método de Faury. Este método tem em consideração a influência das condições de compactação do betão, da forma do agregado, do efeito de parede e da razão água/cimento, de forma a conseguir a máxima compactação dos componentes sólidos (Faury, 1958). As curvas granulométricas e a curva que indica as percentagens de agregado e cimento (m+c) a utilizar segundo

o método de Faury estão representadas na Figura 15, através de um gráfico que relaciona a percentagem de passados acumulados com a abertura quadrada dos peneiros.

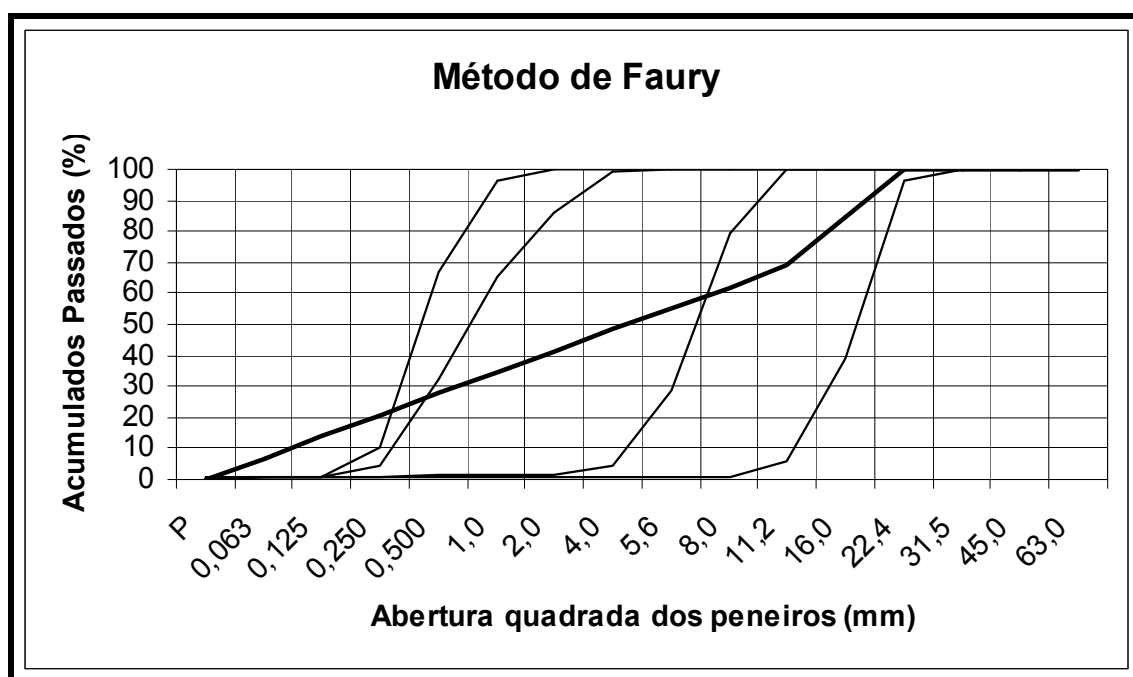


Fig. 15 – Representação gráfica do método de Faury

As percentagens, indicadas pelo método de Faury, para cada um dos agregados foram:

- Areia Natural 0/2: 15%
- Areia Natural 0/4: 20%
- Brita 5/10: 15%
- Brita 10/9: 50%

As quantidades utilizadas para a amassadura de 25 litros de betão foram:

- Areia Natural 0/2: 7,25 kg
- Areia Natural 0/4: 9,75 kg
- Brita 5/10: 7,26 kg
- Brita 10/9: 21,75 kg
- Cimento, CEM I 42,5: 15 kg
- Água: 6,5 l

No ensaio de abaixamento do betão fresco (NP EN 12350-2, 2006), obteve-se um abaixamento de 13 mm (Figura 16).



Fig. 16 – Ensaio de abaixamento da primeira amassadura

Durante a amassadura acrescentou-se progressivamente água à mistura e verificou-se uma boa trabalhabilidade antes de se adicionar toda a água. A mistura levou 6,5 litros de água, menos um litro do que o total previsto.

A primeira amassadura, foi realizada no dia 29 de Setembro de 2009, com o intuito de aferir procedimentos para a amassadura definitiva, a realizar posteriormente. Encheram-se 6 moldes (Figura 17) dos quais, 4 cubos e 2 cilindros cujas dimensões estão de acordo com a NP EN 12390-2 (2003). Os cubos tinham 150 mm de aresta e os cilindros 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.



Fig. 17 – Moldes com betão fresco da primeira amassadura

A identificação dos provetes fez-se através de números associados ao nome do sólido geométrico respectivo, os cubos foram numerados de 1 a 4 e os cilindros de 1 a 2. A simbologia adoptada para fazer referência a cada um deles é, por exemplo, para o cubo com o número 1: cubo #1.

Na segunda amassadura, realizada no dia 19 de Outubro de 2009, todos os procedimentos e normas considerados mantiveram-se, bem como a composição do betão. Detectou-se um erro no cálculo das quantidades dos agregados utilizados na primeira amassadura, que foi corrigida na segunda.

As quantidades utilizadas para a segunda amassadura, de 220 litros foram:

- Areia Natural 0/2: 58,3 kg
- Areia Natural 0/4: 77,4 kg
- Brita 5/10: 58,3 kg
- Brita 10/9: 194 kg
- Cimento, CEM I 42,5: 70 kg
- Água: 36,5 l

Nesta mistura obteve-se um abaixamento de 4 mm (Figura 18).



Fig. 18 – Ensaio de abaixamento da segunda amassadura

Note-se que durante esta amassadura, houve a necessidade de aumentar a quantidade de água à mistura para melhorar a sua trabalhabilidade. Quando se adicionaram os 33 litros indicados pelo método de Faury a mistura apresentava um abaixamento de 2 mm, pelo que se acrescentaram 3,5 litros, contabilizando um volume total de água de 36,5 litros, para o qual se obteve um abaixamento de 4 mm.

Preencheram-se os moldes de 12 cubos de 150x150x150 mm, 4 cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, 2 prismas menores de 100x100x500 mm, 1 prisma maior de 150 x 150 x 550 e uma laje em betão armado de 1000x1000x100 mm. Os cubos foram numerados de 4 a 16, os cilindros de 3 a 6 e os prismas menores de 1 a 2 (Figura 19).



Fig. 19 – Moldes com betão fresco da segunda amassadura

3.2.2.1. Modelo de laje de betão armado

O modelo de laje continha uma armadura de flexão na face inferior nas duas direcções, com uma malha aproximadamente quadrangular. Procedeu-se à compensação da menor altura útil da camada inferior da armadura, de modo a obter a mesma capacidade resistente à flexão nas duas direcções. Assim, a armadura é constituída por dez varões \varnothing 8 mm na direcção correspondente à maior altura útil e por onze varões \varnothing 8 mm na direcção ortogonal, configurando a percentagem geométrica de armadura de 0,6 % (Figura 20).

A laje foi instrumentada com três extensómetros eléctricos montados por colagem nos varões assinalados por nº 3, 4 e 5 (Figura 20), nas posições identificadas pela linha a tracejado na mesma figura. Posteriormente, foram soldados aos terminais dos extensómetros os cabos eléctricos de ligação a um sistema de aquisição (Ponte extensométrica, P-3500) para medição das extensões durante o ensaio da laje (Figura 21). A medição da evolução das extensões nas armaduras destinou-se a identificar aproximadamente o início da fendilhação, de modo a avaliar a capacidade do método de “ultra-sons” para detectar esse momento.

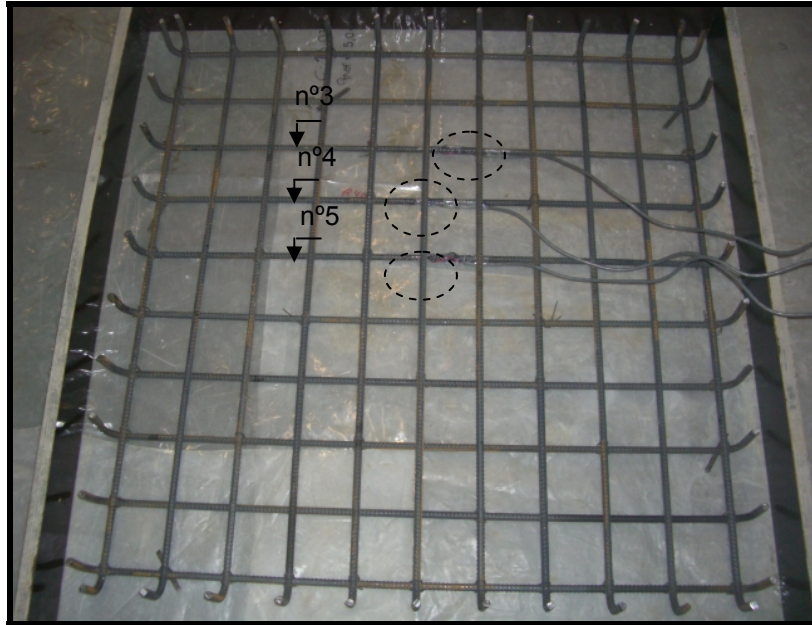


Fig. 20 – Armadura e molde da laje



Fig. 21 – Molde da laje com betão fresco

Todos os moldes foram descofrados às 24 horas de idade com êxito. A cura dos provetes foi feita numa câmara com humidade (H) e temperatura (T) controladas ($H=95\pm 5\%$; $T=20\pm 0,5C^\circ$). Durante este período, os provetes foram retirados da câmara de cura apenas durante o tempo necessário para a realização dos ensaios, que não se estendia para além das duas horas.

3.3. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

3.3.1. ENSAIO COM O ESCLERÓMETRO

Os ensaios com o esclerómetro foram realizados em cubos da primeira e da segunda amassadura, desde as primeiras idades do betão até depois dos 28 dias de cura. Foram ensaiados dois cubos para cada. Após serem testados, ambos os cubos, foram ensaiados à compressão segundo a NP EN 12390-4 (2003). Assim as estimativas da resistência à compressão do ensaio do esclerómetro puderam ser comparadas com os resultados do ensaio destrutivo. Os resultados dos dois ensaios encontram-se no Anexo 6.

Os cubos para o ensaio com esclerómetro foram colocados numa prensa, que exerceu uma força de 7 toneladas sobre os provetes garantindo assim a sua imobilização (Figura 22).



Fig. 22 – Cubo Fixo para Ensaio do Esclerómetro

O esclerómetro utilizado foi o “Proceq Schmidt Hammer”. Segundo as indicações do fabricante, este aparelho fornece o valor da resistência à compressão em cubos, $f_{ck,cubo}$, com dimensões de 150x150x150 mm, em cubos entre os 14 e os 56 dias de idade. Para esse efeito, o esclerómetro vem acompanhado de um conjunto de curvas que permitem estimar a resistência à compressão do betão a partir do valor do ressalto que o aparelho fornece e do ângulo de aplicação do aparelho sobre a superfície (Figura 23).

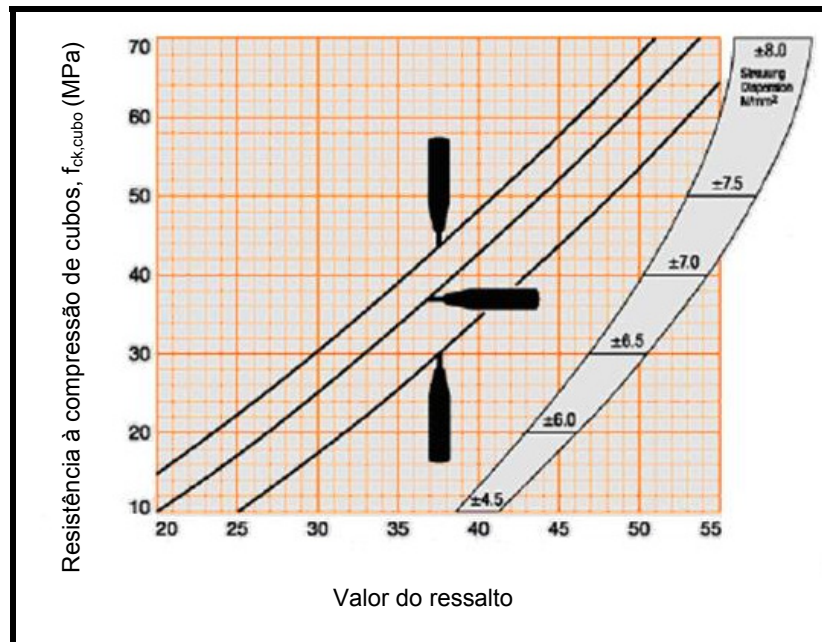


Fig. 23 – Curvas de correção fornecidas para o ângulo de teste

O teste foi realizado sempre com o aparelho na horizontal e ortogonalmente à superfície do provete. Após a leitura do valor do ressalto fornecido pelo esclerómetro esse foi corrigido através dos valores correspondentes à curva de ângulo 0° .

3.3.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”

Os ensaios de “pull-off” foram realizados nos prismas por apresentarem faces planas com área suficiente para a utilização do aparelho de arrancamento. O prisma menor (#2), foi primeiro pré-caroteado, introduzindo-se na sua superfície um sulco circular com 50 mm de diâmetro e com uma profundidade de aproximadamente 1,5 cm. Antes desta operação, o betão foi perfurado no ponto que viria a constituir o centro do sulco, para evitar desvios durante o pré-caroteamento. O pré-caroteamento fez-se cortando progressivamente o betão com o formato indicado até atingir a profundidade pretendida. O pó e outros detritos, provocados por estas operações, foram removidos da superfície do provete. Seguidamente aplicou-se uma resina epoxídica na superfície pré-caroteada e sobrepôs-se a pastilha com 50 mm de diâmetro. Este processo foi repetido para quatro pastilhas (Figura 24).

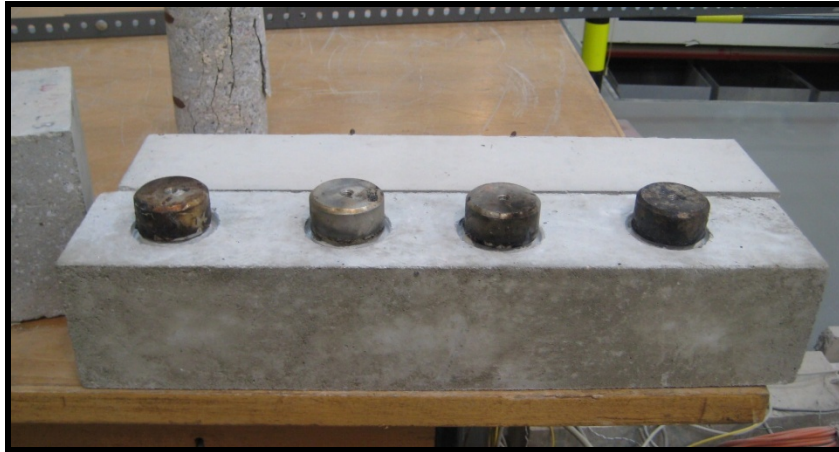


Fig. 24 – Prisma menor (#2) com pastilhas para ensaio de “pull-off”

Esta preparação realizou-se ao 21º dia de cura, tendo o provete permanecido depois em laboratório a temperatura e humidade ambiente, para que se efectuasse a cura da resina. A cura fez-se em 48 horas. Decorrido esse tempo, procedeu-se ao arrancamento da pastilha utilizando o aparelho de arranque “Proceq Dyna Z16” (Figura 25). Este aparelho não tem auto-nivelamento, é de nivelção manual, através do ajuste do comprimento dos apoios. É um aparelho que fornece directamente o valor da resistência superficial.

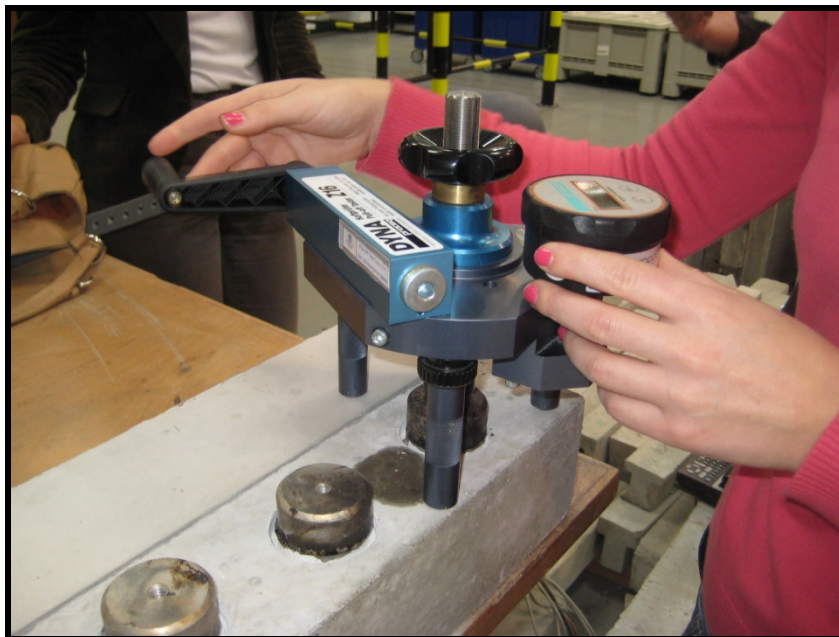


Fig. 25 – Arrancamento das pastilhas

A cada pastilha arrancada correspondeu um valor da resistência superficial do betão e um modo de ruína.

O mesmo provete voltou a ser submetido a este ensaio numa face adjacente, tendo sido pré-caroteado no 28º dia e submetido ao arrancamento das quatro pastilhas de “pull-off” quatro dias depois para

garantir uma melhor cura do que a primeira. Desta vez não se furou o betão antes do pré-caroteamento, porque no primeiro ensaio verificou-se que a resina entrou pelo furo no centro da superfície de arrancamento, facto que terá influenciado os valores obtidos no primeiro ensaio. Assim, o pré-caroteamento foi efectuado utilizando uma forma com 50 mm de diâmetro, permitindo a condução do aparelho com o disco de esmeril sem desvios e sem o referido furo.

Foi realizado um terceiro ensaio de “pull-off”, desta vez com o prisma maior (150x150x550 mm). Nos ensaios anteriores uma das pernas do aparelho tinha de ser apoiada num elemento exterior ao provete, mas neste, o aparelho ficou totalmente apoiado sobre a superfície do prisma, excluindo este factor como possível causa de desvio da força de tracção exercida pelo aparelho de arrancamento. Manteve-se a não furação do provete como parte do pré-caroteamento. Devido aos ensaios anteriores terem fornecido valores mais baixos do que o esperado, procurou-se aumentar a aderência entre a cola e o betão através da aplicação de um primário.

A aplicação do primário fez-se no 36º dia do betão, tendo sido antecedida de uma cuidadosa limpeza do provete. O pré-caroteamento realizou-se passadas 24 horas sobre a aplicação do primário, altura em que se colaram cinco pastilhas ao provete usando resina epoxídica (Figura 26).



Fig. 26 – Prisma maior com pastilhas para ensaio de “pull-off”

O ensaio de arrancamento foi realizado no 51º dia do betão, 15 dias após a colocação das pastilhas, porque a cura da resina fez-se muito lentamente, em particular em três das pastilhas. A resina utilizada nessas foi a mesma dos ensaios anteriores, nas duas pastilhas restantes aplicou-se uma resina idêntica, mas de uma nova embalagem.

Os resultados do ensaio de “pull-off” foram comparados com os do ensaio de resistência à compressão, à flexão e à tracção por compressão diametral, também conhecido como ensaio brasileiro. Todos estes ensaios procuram caracterizar a resistência à tracção do betão, embora apenas o ensaio de “pull-off” envolva forças de tracção simples.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em cubos conforme a NP EN 12390-4 (2003) (Figura 27). O ensaio de flexão foi realizado nos mesmos prismas testados pelo ensaio de “pull-off” segundo a NP EN 12390-5 (2003) (Figura 28). O ensaio brasileiro foi executado em cilindros como descrito na NP EN 12390-6 (2003) (Figura 30). Os valores obtidos nestes ensaios encontram-se no Anexo 5.



Fig. 27 – Ensaio de compressão de cubos



Fig. 28 – Ensaio de flexão de prismas

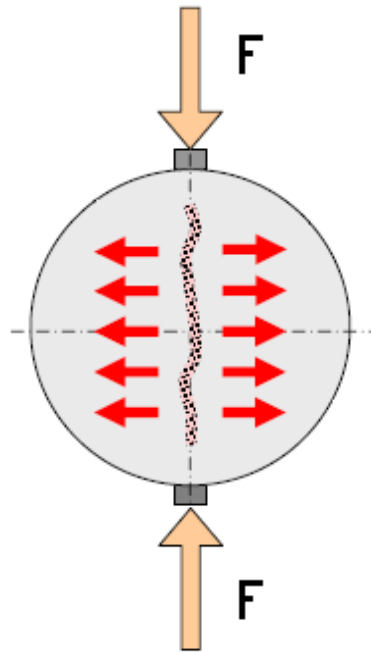


Fig. 29 – Ensaio de tração por compressão (Tomaz, 2009)

A resistência à tração do betão foi estimada a partir dos resultados do ensaio de compressão de cubos (aplicando a expressão (1)) do ensaio de flexão (através do equilíbrio de forças) e a partir do ensaio brasileiro (através da equação (22)).

$$f_{cr} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (\text{NP EN 12390-6, 2003}) \quad (22)$$

f_{cr} , resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F , carga máxima (N);

L , comprimento da linha de contacto do provete (mm);

d , dimensão da secção transversal (mm).

Os valores do ensaio de “pull-off” do prisma maior foram obtidos ao 51º dia de idade do betão, assim como os do ensaio da resistência à flexão do prisma e do ensaio brasileiro. Os valores do ensaio de resistência à compressão em cubos foram obtidos ao dia 46º de idade do betão.

3.3.3. ENSAIO DE ULTRA-SONS

O ensaio de ultra-sons foi o mais extensivamente utilizado, tendo sido realizado sobre a laje, em prismas e em cilindros. Foram também testadas várias formas de transmissão das ondas ultra-sónicas, em dois aparelhos diferentes.

Para as leituras do ensaio de ultra-sons utilizaram-se dois aparelhos sendo o mais utilizado o “Tico Proceq Ultrasonic Instrument” com os transdutores a 54kHz de frequência. Funcionando a pilhas, permite a introdução da distância entre os transdutores, fornecendo o tempo de transmissão do impulso, em microssegundos, e a velocidade de propagação do mesmo, em metros por segundo. A informação é recebida após alguns segundos de processamento entre cada leitura. A superfície de contacto dos transdutores é circular com diâmetro igual a 50 mm.

O outro aparelho de ultra-sons aplicado foi o “C.S.I-B.V Concrete Tester CCT-4”, os seus transdutores têm uma superfície de contacto com 20 mm.. Funcionando ligado à corrente fornece de forma contínua o tempo de transmissão do impulso, em microssegundos.

3.3.3.1. Ensaio em cilindros

Os ensaios de ultra-sons em cilindros foram feitos por transmissão directa (Figura 30), com o intuito de estimar o seu módulo de elasticidade através da equação (21) (Pág. 27) e também para acompanhar a evolução dos valores da velocidade de propagação dos ultra-sons ao longo do tempo, desde os 3 dias de idade do betão.

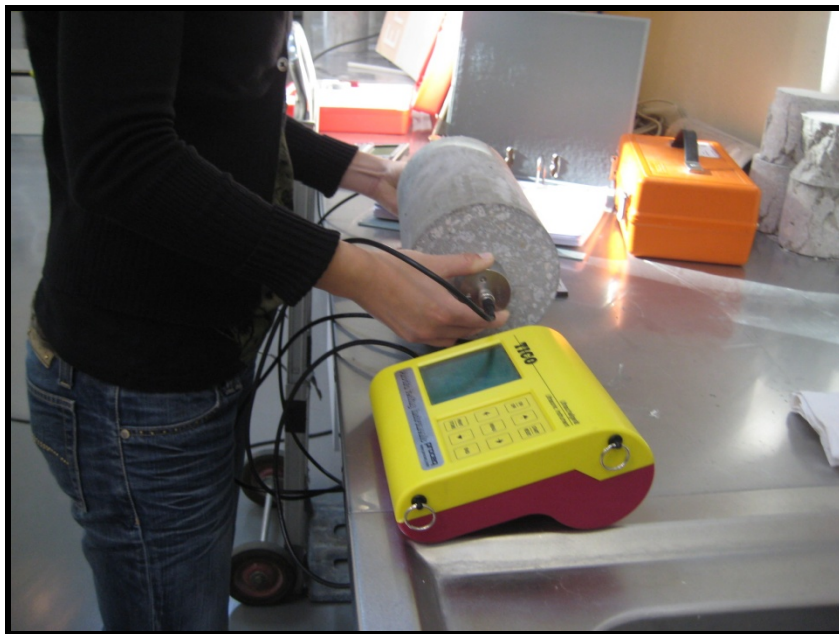


Fig. 30 – Ensaio de ultra-sons em cilindros

Os valores do módulo de elasticidade dos cilindros, obtidos através do método de ultra-sons, foram comparados com os correspondentes resultados determinados a partir de ensaios em compressão. No Anexo 7 apresentam-se os resultados destes ensaios. Os dois ensaios foram realizados em dois cilindros nas diferentes idades do betão ao longo dos 28 dias de cura, tanto na segunda como na primeira amassadura.

Na determinação do módulo de elasticidade em compressão, os cilindros foram ensaiados numa prensa de compressão servo controlada da série 315, MTS (Figura 31), sendo submetidos a ciclos de carga/descarga segundo o procedimento detalhado no Anexo 8.



Fig. 31 – Ensaio do módulo de elasticidade em compressão

Neste ensaio, os níveis de carga aplicados variaram entre 1/3 e um 1/10 da força máxima de rotura. Quando o ensaio para determinação do módulo de elasticidade em compressão foi realizado, desconhecia-se a resistência à compressão dos cilindros, tendo-se adoptado o valor daquela resistência em cubos, previamente determinado.

O módulo de elasticidade do betão, estimado pelo ensaio de ultra-sons (equação (21)) foi relacionado com a resistência à compressão dos cilindros através da equação (23), no sentido de averiguar a coerência dos valores.

$$E_{cm,U.S} = 22 \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \quad (\text{Eurocódigo 2}) \quad (23)$$

$E_{cm,U.S}$, módulo de elasticidade médio do betão obtido no ensaio de ultra-sons;

f_{cm} , resistência à compressão média do betão.

Os cilindros foram ensaiados à compressão para se obter a sua resistência, segundo a NP EN 12390-3 (2003). Este ensaio foi feito na primeira amassadura nos cilindros #1 e #2 e na segunda amassadura no

cilindro 3#, aos 28 dias de cura. Os valores da resistência à compressão obtidos encontram-se no Anexo 7. Procedeu-se à comparação dos valores do módulo de elasticidade obtidos pela equação (23) e pelo método de determinação do módulo de elasticidade por compressão para averiguar a sua coerência.

3.3.3.2. Ensaio em carotes cilíndricas

No decurso deste trabalho, o LEMC extraiu um grande número de carotes de uma obra, para determinação da resistência à compressão, de acordo com a NP EN 12504-1 (2003), cujos resultados foram facultados para o presente estudo e se apresentam no Quadro 1 do Anexo 9.

Realizaram-se ensaios de transmissão directa nestes cilindros, antes destes serem destruídos nos ensaios de compressão, com a intenção de averiguar a relação entre os valores obtidos pelo ensaio de ultra-sons e a sua resistência à compressão.

Este foi o único material utilizado do qual não se conhece a composição exacta e que não foi executado em laboratório. Conhece-se, no entanto, a dimensão do agregado máximo de cada provete, a sua massa volúmica, a existência de varões de aço e no caso de existirem, o seu diâmetro.

Sabendo a massa volúmica e a velocidade de impulso das carotes, estimou-se o seu módulo de elasticidade, a partir da equação (21) (Pág. 27). A partir deste valor e através da equação (23) do EC2, estimou-se a resistência à compressão das carotes. Avaliou-se a correlação entre esse valor e o da resistência à compressão obtido pelo ensaio destrutivo de compressão das carotes. Os valores que serviram de base a essa correlação encontram-se no Quadro 2 do Anexo 9.

3.3.3.3. Ensaio em prismas

Os ensaios de ultra-sons foram realizados nos dois prismas menores, por transmissão directa, utilizando-se os dois aparelhos disponíveis.

Os ensaios por transmissão indirecta foram realizados no sentido de detectar a profundidade de uma fissura, realizada de modo controlado em laboratório no prisma #1. A fissura, com profundidade média de 4,15 cm e abertura de 3,1 mm foi realizada a toda a largura do provete (Figura 32). O modelo escolhido para estimar a profundidade da fissura foi o equidistante (Figura 9, Pág. 23). Esta escolha pretendeu eliminar o erro associado à estimativa do valor da velocidade de impulso no betão íntegro que se verifica no modelo proposto por Bungey (1989).



Fig. 32 – Ensaio de ultra-sons por transmissão indirecta em prisma fissurado

O ensaio de ultra-sons pelo modelo equidistante foi realizado ao 35º dia de idade do betão, os transdutores colocaram-se a 50 mm, 100 mm e 150 mm da fissura.

A estimativa da profundidade da fissura foi realizada pelos modelos equidistante, de acordo com a sua representação gráfica da Figura 10. Os gráficos foram realizados com recurso ao “Microsoft Excel”. As equações das rectas, obtidas por regressão linear dos pontos, foram calculadas no “Microsoft Excel”. Assim, nas equações do tipo “ $y=mx+b$ ”, dadas pela aplicação do modelo, “ m ” é o quadrado da velocidade de impulso e “ b ” o quadrado da profundidade da fissura.

3.3.3.4. Ensaio no modelo de laje

Na laje, o método de ultra-sons foi aplicado por transmissão directa e indirecta. A transmissão directa fez-se no sentido longitudinal da laje (Figura 33), em três pontos, um a meia altura e os outros dois junto da extremidade superior e inferior. Estas leituras fizeram-se com o intuito de detectar diferenças na velocidade de impulso devido à presença de armadura.

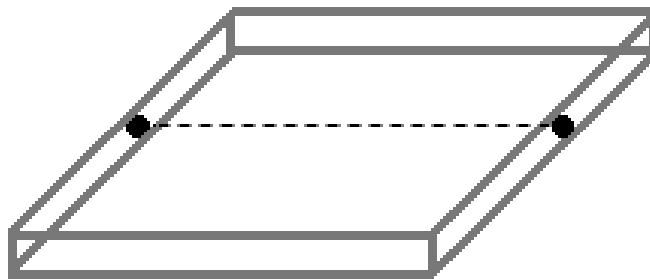


Fig. 33 – Ensaio na laje por transmissão directa no sentido longitudinal

A transmissão indirecta fez-se pelos modelos equidistante e linear com o auxílio de uma grelha desenhada na laje (Figura 34). Este ensaio foi realizado antes e depois de iniciada a fendilhação, para se detectar a influência das fissuras nas leituras de ultra-sons (Figura 35).



Fig. 34 – Grelha desenhada na laje para aplicar o método de transmissão indirecta



Fig. 35 – Ensaio por transmissão indirecta antes da fissuração

A laje foi apoiada continuamente em dois lados e submetida a uma carga linear a meio do vão, aos 45 dias de idade (Figura 36). As condições de apoio e de aplicação da carga foram definidas de modo a que a fendilhação se produzisse apenas numa direcção, com vista a facilitar a detecção do início de fendilhação e a localização das fissuras através do ensaio de ultra-sons.

A carga foi exercida através de um actuador servo-hidráulico comandado por computador. O carregamento foi realizado em controlo de deslocamento, à velocidade de 1 mm/s até à carga de 90 kN. Foram feitas leituras de ultra-sons e de extensómetros durante o processo de carregamento. Após o descarregamento, realizaram-se as leituras de ultra-sons pelo modelo equidistante e linear.



Fig. 36 – Carregamento da laje

Este ensaio foi repetido, aos 80 dias de idade, até se atingirem os 120 kN de carga na laje, de forma a obterem-se fissuras maiores, já que os dados obtidos no primeiro ensaio variaram pouco relativamente aos obtidos na laje não fissurada.

Efectuaram-se, depois do segundo carregamento, leituras indirectas numa fissura que se formou na face lateral da laje e que se propagou ao longo da face inferior (Figura 37). A fissura tinha aproximadamente 2 mm de espessura e 7 cm de profundidade. Aplicou-se o modelo equidistante para estimar a profundidade dessa fissura, com os transdutores a distâncias entre 5 a 35 cm, a intervalos de 5 cm.

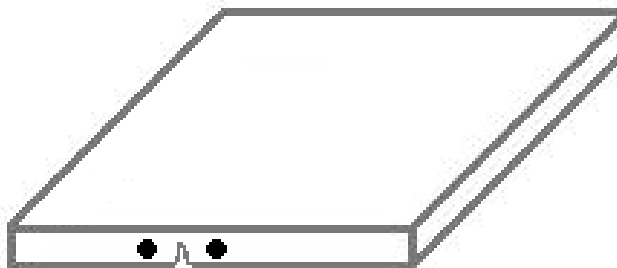


Fig. 37 – Representação do ensaio de ultra-sons na laje para detectar fissura lateral

TRATAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. ENSAIOS COM O ESCLERÓMETRO

Os valores médios da resistência à compressão em cubos foram determinados em diferentes idades ao longo da cura do betão. Os seus valores são apresentados no Anexo 6. A Figura 46 expressa o crescimento dos valores obtidos pelo ensaio do esclerómetro com os dias de cura para a primeira e para a segunda amassadura.

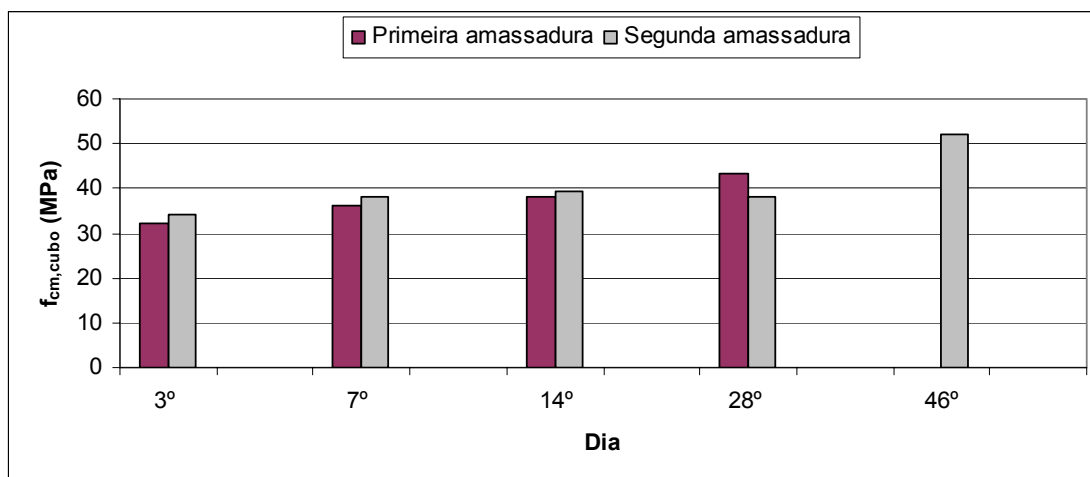


Fig. 38 – Evolução no tempo dos valores de $f_{cm,cubo}$ estimados pelo ensaio de “pull-off”

Na primeira amassadura comparam-se os valores estimados de $f_{cm,cubo}$ com os valores obtidos pelo ensaio de compressão de cubos (Quadro 3). Ambos os ensaios foram realizados ao 7º e ao 28º dia.

Quadro 3 – Resistência média do betão à compressão em cubos, $f_{cm,cubo}$, da primeira amassadura

Dia	$f_{cm,cubo}$ (MPa)		Desvio
	Método do Esclerómetro	Ensaio de compressão	
7º	44	47	-6,4%
28º	52	46	13,0%

Na segunda amassadura realizaram-se os mesmos ensaios ao 7º, 14º, 28º e 46º dias de cura, tendo-se efectuado uma análise análoga (Quadro 4).

Quadro 4 – Resistência média do betão à compressão em cubos, $f_{cm,cubo}$ da segunda amassadura

Dia	$f_{cm,cubo}$ (MPa)		Desvio
	Método do Esclerómetro	Ensaio de compressão	
7º	46	43	7,0%
14º	48	46	3,3%
28º	46	45	1,7%
46º	60	49	21,8%

Os valores estimados pelo método do esclerómetro apresentam desvios muito reduzidos, a menos do correspondente ao 46º dia de cura da segunda amassadura (21,8%); este desvio encontra-se, no entanto, dentro dos limites espectáveis para este método (entre 15 e 30%).

4.2. ENSAIO DE “PULL-OFF”

Os ensaios de “pull-off” realizaram-se no prisma menor (#2) e no prisma maior; cada pastilha foi identificada com uma letra. Os valores obtidos nos ensaios para cada pastilha podem ser observados no Quadro 5, onde também se caracteriza o modo de ruína ocorrido que condiciona a validade do ensaio.

Quadro 5 – Resultados do ensaio de “pull-off”

Provete	Dia	Ponto	Ensaio de “Pull-off” (MPa)	Modo de Ruína	Validade
Prisma Menor (#2)	23°	A	1,19	Pela resina	Inválido
		B	1,22	Idem	Idem
		C	1,15	Idem	Idem
		D	0,75	Idem	Idem
	32°	A	0,80	Idem	Idem
		B	1,30	Pelo betão	Idem
		C	0,98	Idem	Idem
		D	Nulo	-	Idem
Prisma Maior	51°	A	Nulo	-	Idem
		B	2,33	Pelo betão	Idem
		C	3,66	Idem	Válido
		D	1,48	Idem	Inválido
		E	3,47	Idem	Válido

No ensaio efectuado no dia 23°, os resultados fornecidos pelo aparelho de arrancamento foram muito baixos, sendo que se esperava, para um betão que atingiu valores de $f_{cm,cubo}$ de 46 MPa aos 14 dias, resultados do ensaio de “pull-off” na ordem dos 2 MPa. Verificou-se que a resina apresentava uma cura insuficiente, sendo este o motivo mais forte para os baixos valores obtidos. Além deste aspecto também se constatou que a resina entrou pelo furo efectuado antes do pré-caroteamento, como se pode observar nas Figuras 39 e 40. Nos ensaios seguintes, esse furo não foi realizado, tendo sido utilizada uma forma para realizar a mesma função. Em todas as pastilhas, a ruína aconteceu pela cola. As quantidades de betão presentes eram vestígias e por isso os valores foram considerados inválidos.

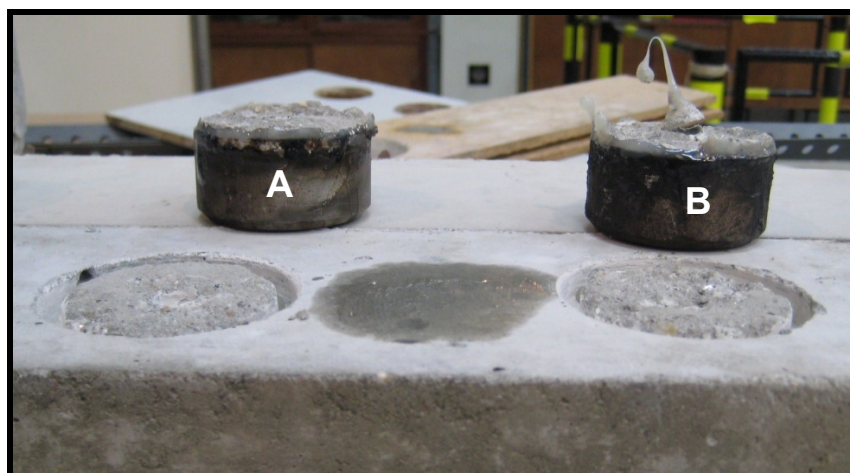


Fig. 39 – Pastilhas A e B e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 23º Dia

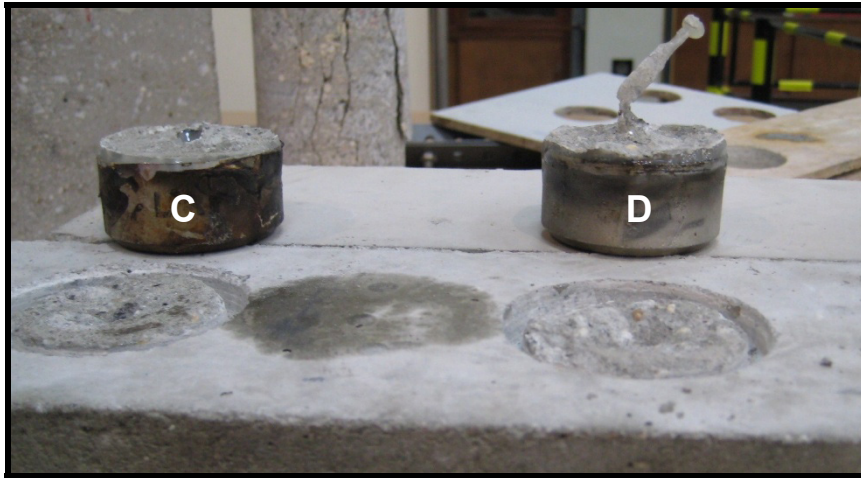


Fig. 40 – Pastilhas C e D e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 23º Dia

Os ensaios realizados ao 32º dia de idade também foram inválidos, apresentando valores inferiores aos do primeiro ensaio. Embora se tenha efectuado uma cura de 4 dias, o dobro do tempo da primeira, a ruína voltou a dar-se pela cola dando sinais de cura insuficiente. Houve uma excepção na pastilha “B” onde a rotura se deu pelo betão (a pastilha apresentava cerca de 1 cm de betão do provete) (Figura 41). Ainda assim o valor de “pull-off” na pastilha “B” foi considerado inválido por ser demasiado baixo. Tal resultado pode ser explicado pela presença de esforços de flexão durante o arrancamento. Efectivamente, para se exercer o arrancamento através de forças de tracção puras o aparelho tem de estar completamente nivelado, o que pode não ter acontecido. Um possível desvio pode ter ocorrido devido a uma das pernas do aparelho não estar sobre o prisma ensaiado. O valor do “pull-off” para a pastilha “D” foi nulo, pois deu-se a cedência da resina aquando do arrancamento, devido também a uma insuficiente cura (Figura 42).



Fig. 41 – Pastilhas A e B e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 32º dia

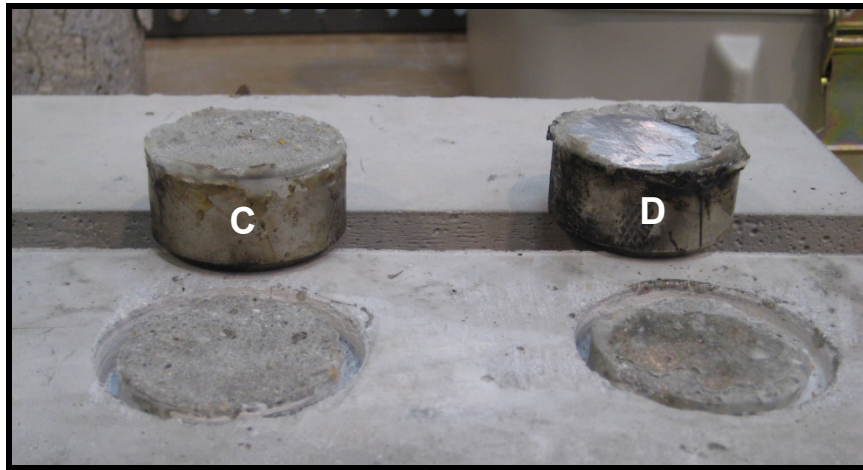


Fig. 42 – Pastilhas C e D e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 32º dia

No terceiro ensaio realizado procurou-se mitigar as condições susceptíveis de falsear resultados. A superfície do provete foi desgastada através de um disco de esmeril até se expor o agregado e aplicou-se um primário para promover a aderência entre o betão e a resina. O tempo de cura da resina foi de 15 dias e todas as pernas do aparelho de arrancamento estavam apoiadas na superfície do prisma. Verificou-se que em três pastilhas (A, B e C) a resina não adquiriu a dureza das outras duas (D e E). As três primeiras foram coladas com a mesma resina dos ensaios de “pull-off” realizados no prisma menor (#2) e as outras duas com uma resina com a mesma composição, mas de uma embalagem nova. Suspeita-se da integridade da primeira resina utilizada devido à má cura ocorrida nos ensaios anteriores e consequentemente da invalidez dos resultados obtidos em que foi utilizada.

Durante o arrancamento da pastilha “A” (Figura 43) a resina cedeu pelo que não se obteve qualquer valor para esse ensaio. Nas restantes pastilhas a ruína ocorreu pelo betão. No entanto, na pastilha “B” (Figura 44), o parafuso utilizado para acoplar o aparelho de arrancamento à pastilha não pôde ser completamente enroscado na pastilha, talvez por empenamento da pastilha derivado de uso prévio, pelo que se considerou esse valor inválido. A pastilha “D” evidencia o arrancamento de uma grande porção de betão (aproximadamente 2 cm) (Figura 45), mas verificou-se que a pastilha foi colada com um certo desvio relativamente à zona de pré-caroteamento o que terá desviado a força exercida durante o arrancamento, podendo-se assim justificar que o valor obtido para esta pastilha seja o menor dos quatro.

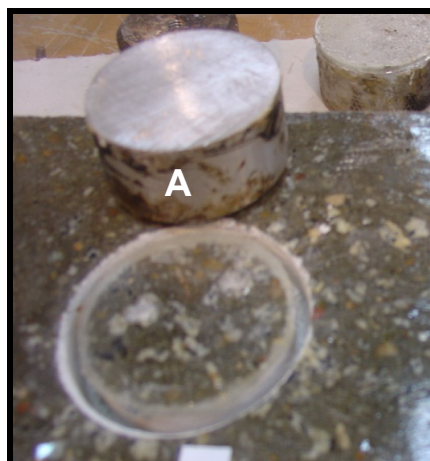


Fig. 43 – Pastilha A e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia

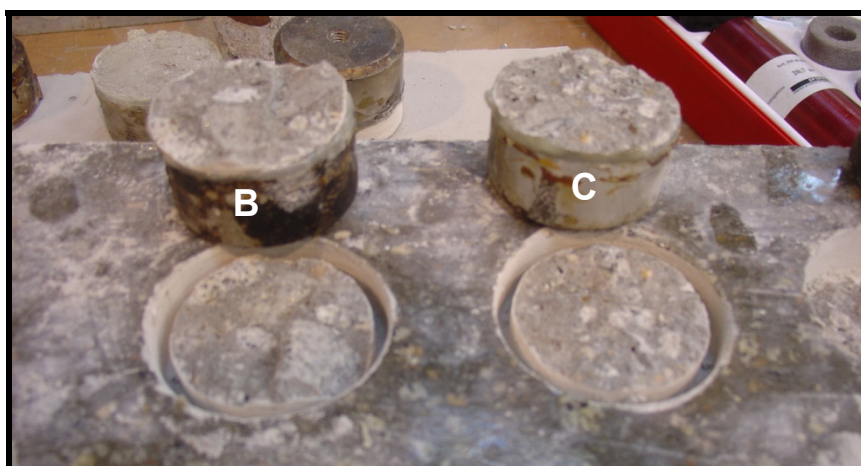


Fig. 44 – Pastilhas B e C e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia

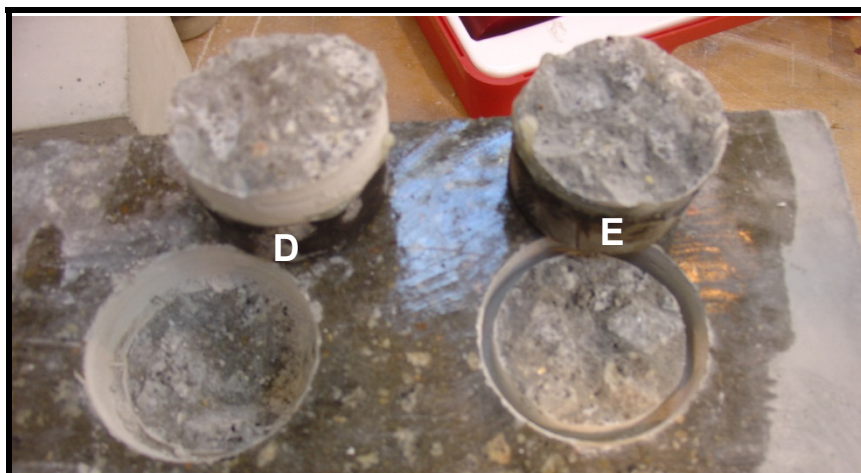


Fig. 45 – Pastilhas D e E e betão após arrancamento, ensaio de “pull-off” ao 51º dia

No conjunto dos ensaios, apenas os resultados de “pull-off” das pastilhas “C” e “E” foram considerados válidos e são esses a que se referem os resultados obtidos.

No Quadro 6 apresenta-se o valor da resistência à tracção superficial (média de dois resultados válidos) obtida a partir do ensaio de “pull-off”; o valor da resistência à tracção do betão determinada a partir dos resultados dos ensaios destrutivos: flexão e ensaio brasileiro; o valor determinado pela equação (1) (Pág. 13) na qual a resistência à compressão é a obtida por ensaio de compressão de cubos (Anexo 5). No mesmo quadro, exprime-se o desvio do ensaio de “pull-off” relativamente aos outros ensaios. As diferenças relativas entre os valores de resistência á tracção do ensaio de “pull-off” e os ensaios destrutivos com que foi comparado estão graficamente representados na Figura 46.

Quadro 6 – Valores estimados da resistência à tracção

Estimativa	Resistência à Tracção (MPa)	Desvio do Ensaio de "Pull-off"
Ensaio de "Pull-off"	3,57	-
Ensaio de Flexão	4,48 (3,67)*	-20,3% (2,7%)**
Ensaio Brasileiro	3,75	-4,8%
Equação (1) (Pag	2,42	48,0%

* - valor corrigido da resistência à tracção simples obtido a partir da resistência à tracção por flexão (REBAP).

** - desvio correspondente ao valor corrigido

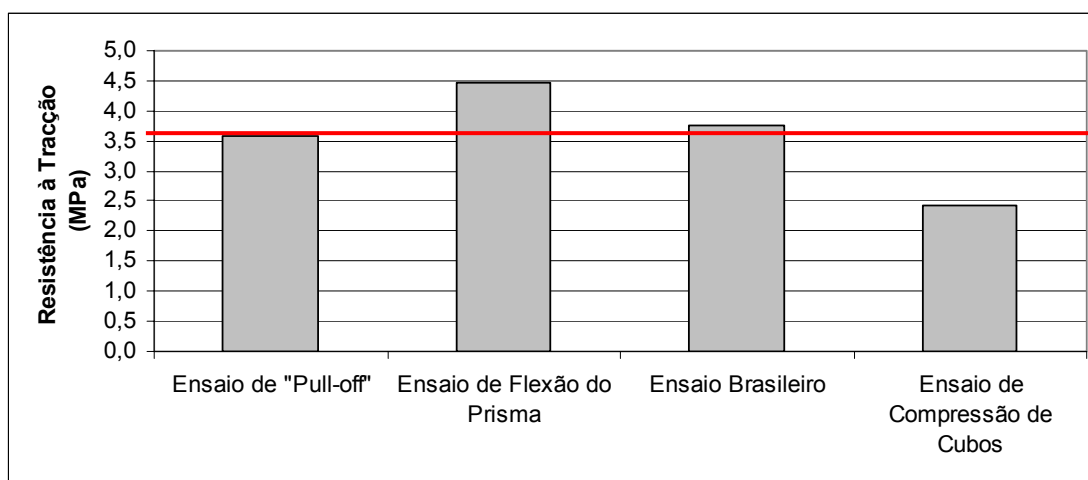


Fig. 46 – Resistência do betão à tracção obtida por diferentes ensaios

Analisando o Quadro 4 e da Figura 26 pode afirmar-se que:

- Os resultados obtidos no ensaio brasileiro são aqueles que mais se aproximam dos do ensaio de “pull-off”;
- O valor obtido no ensaio de flexão do prisma corresponde à resistência à tracção por flexão, portanto necessariamente superior à resistência do betão à tracção simples, obtida pela técnica “pull-off”. Efectivamente, segundo o REBAP (comentário ao Artº 16), os valores da resistência à tracção por flexão podem ser relacionados com os valores da resistência à tracção simples multiplicando estes valores pelo coeficiente:

$$0,6 + \frac{0,4}{\sqrt[4]{h}}$$

, sendo “h” a altura do elemento expressa em metros, REBAP (1983). Procedendo, neste caso, em ordem inversa, determinou-se o valor corrigido da resistência à tracção simples e o respectivo desvio (entre parênteses no Quadro 4), agora muito reduzido;

- Os valores obtidos por aplicação da equação (1) com base na resistência à compressão de cubos apresentam, no entanto, desvios elevados em relação ao valor obtido pelo ensaio de “pull-off”. Estes desvios podem ser devidos não só à resistência à compressão ter sido obtida 6 dias antes do ensaio de “pull-off”, como também, à natureza empírica da equação (1).
- Por fim, embora tendo em conta o reduzido número de ensaios realizados, parece poder concluir-se que o ensaio de “pull-off” é um ensaio não-destrutivo eficaz para avaliar a resistência à tracção do betão.

4.3. ENSAIO DOS ULTRA-SONS

4.3.1. ENSAIOS EM CILINDROS

No gráfico seguinte (Figura 47) observa-se o crescimento do valor da velocidade de propagação de ultra-sons com a idade do betão, evidenciando a sua capacidade de acompanhar o processo de maturação do betão, sobretudo nas idades mais jovens, como aliás já é referido por alguns experimentadores (Crawford, 1997). A partir do 27º dia parece notar-se, no entanto, uma estabilização dos valores de velocidade de impulso. O mesmo acontece com valores do módulo de elasticidade obtidos por compressão dos mesmos cilindros (Figura 48).

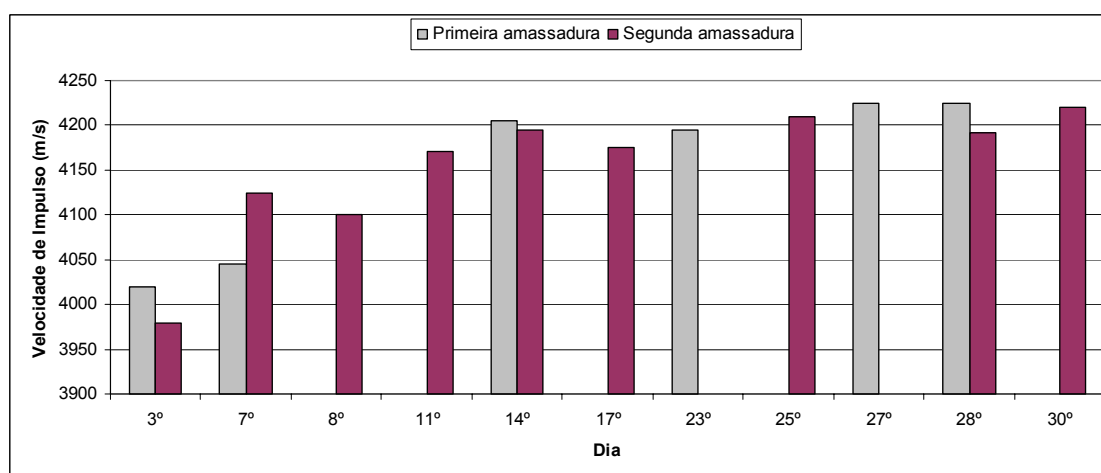


Fig. 47 – Evolução da velocidade de impulso no tempo

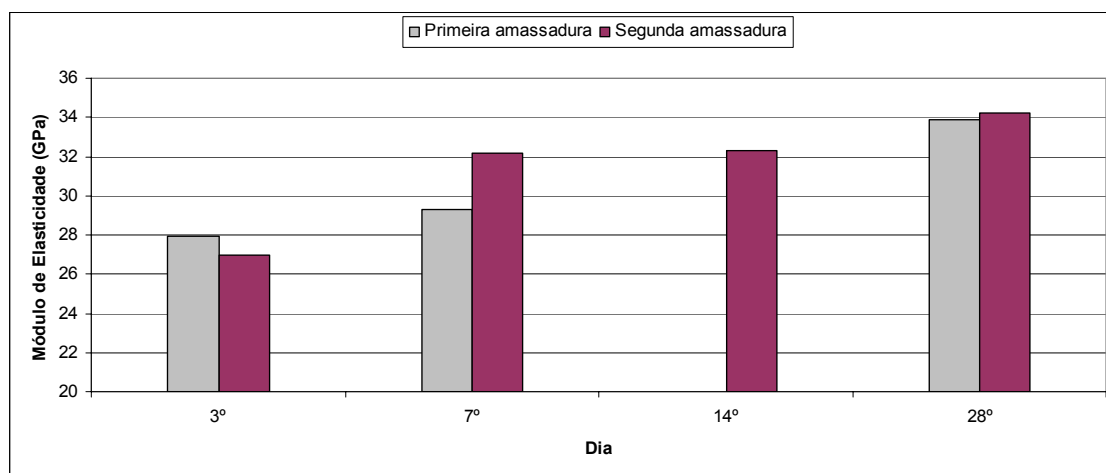


Fig. 48 – Evolução do módulo de elasticidade no tempo

Pela análise das Figuras 47 e 48 verifica-se que os valores de módulo de elasticidade ao 3º dia, do betão da primeira amassadura, são superiores aos da segunda amassadura, o mesmo se verificando em relação às velocidades medidas no ensaio de ultra-sons.

No 7º dia de idade do betão, a tendência inverte-se e o módulo de elasticidade apresenta-se maior nos cilindros da segunda amassadura, diferença que é acompanhada pela velocidade de impulso.

Os valores do módulo de elasticidade dos cilindros, média de dois provetes, obtidos por compressão dos cilindros da Figura 48, encontram-se também nos Quadros 7 e 8, para a primeira e segunda amassadura respectivamente. Esses valores são relacionados com o módulo de elasticidade obtido a partir da velocidade de impulso fornecida pelos ensaios de ultra-sons, através da equação (21) (Pág.27). Ambos os quadros mostram o desvio da estimativa do ensaio de ultra-sons relativamente ao ensaio de compressão em ciclos de carga/descarga.

Quadro 7 – Módulo de elasticidade na primeira amassadura

Dia	Módulo de Elasticidade (GPa)		Desvio da Estimativa
	Estimativa dos Ultra-Sons Equação (21)	Ensaio de Compressão	
3º	27,50	34,25	24,5%
7º	29,30	34,67	18,3%
28º	33,90	37,85	11,6%

Quadro 8 – Módulo de elasticidade da segunda amassadura

Dia	Módulo de Elasticidade (GPa)		Desvio da Estimativa
	Estimativa dos Ultra-Sons	Ensaio de Compressão	
	Equação (21)		
3º	33,58	26,94	24,6%
7º	36,07	32,15	12,2%
14º	37,40	32,29	15,8%
28º	40,01	34,20	17,0%

O desvio máximo obtido para a estimativa do módulo de elasticidade pelo método de ultra-sons foi de 24,6%. Os restantes desvios situaram-se entre os 11 e os 19% tanto na primeira como na segunda amassadura.

No Quadro 9, mostram-se os valores do módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio de compressão e os determinados por aplicação da equação (23), expressão do E.C.2 que relaciona a resistência à compressão dos cilindros com o seu módulo de elasticidade.

Quadro 9 – Valores para o módulo de elasticidade obtidos no ensaio de compressão e da equação (23) do EC2

Cilindro	$f_{cm,cil}$ (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	
		Obtido do ensaio de compressão	Obtido da equação (23)
Primeira amassadura	51,4	33,9	36,0
Segunda amassadura	48,9	34,2	35,4

Analisando o Quadro 9, verifica-se que o ensaio de determinação do módulo de elasticidade em compressão fornece valores coerentes com os obtidos a partir do valor de resistência dos cilindros, pela equação apresentada pelo E.C 2.

4.3.2. ENSAIOS EM CAROTES CILÍNDRICAS

A relação entre a velocidade de impulso obtida e a resistência à compressão em cilindros, determinada por ensaios de compressão dos carotes, é a expressa na Figura 49.

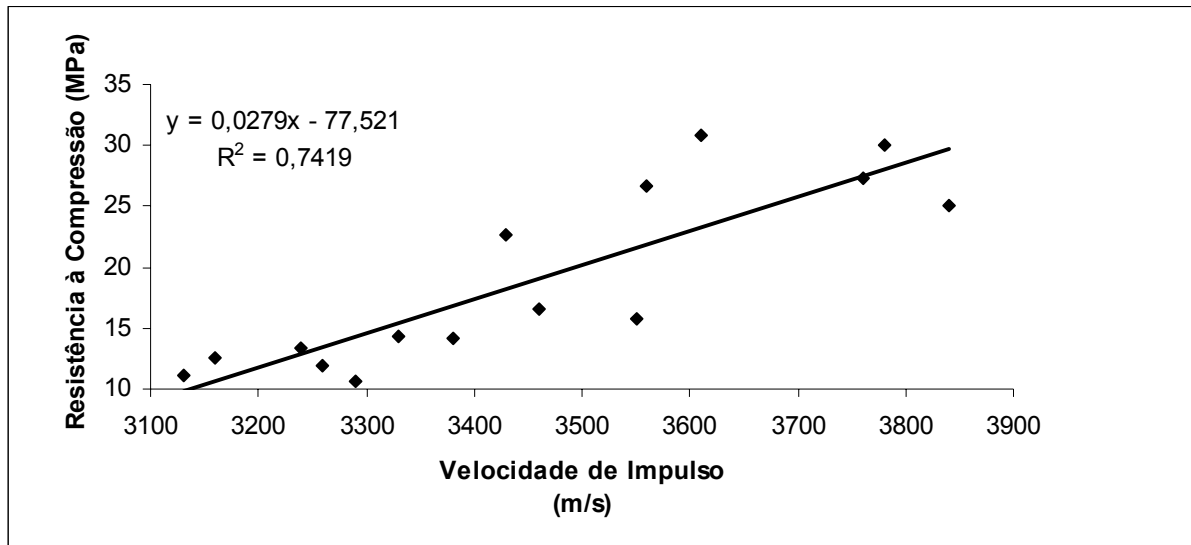


Fig. 49 – Relação da velocidade de impulso com a resistência à compressão

A relação entre a velocidade de impulso e a massa volúmica das carotes é a expressa na Figura 50.

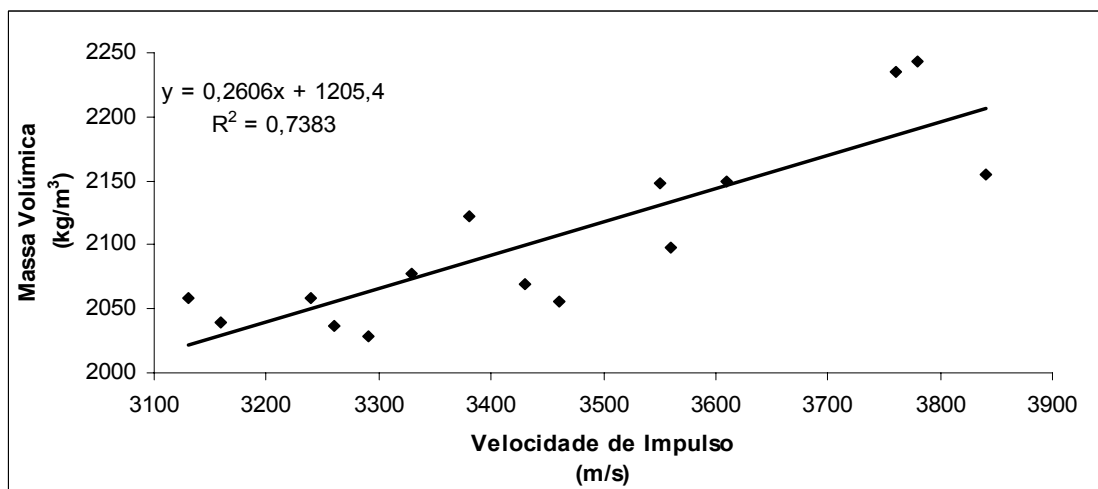


Fig. 50 – Relação da velocidade de impulso com a massa volúmica

Os ensaios de ultra-sons realizados nas carotes e as propriedades conhecidas das mesmas encontram-se no Anexo 9. As Figuras 49 e 50 mostram que a velocidade de impulso tende a aumentar com a resistência à compressão e com a massa volúmica.

Para estabelecer as relações dos valores de velocidade de impulso obtidos com a massa volúmica só se incluíram os valores das carotes sem aço, pois a presença de aço, material muito mais denso, adulteraria esta relação. Os três provetes contendo aço apresentaram os valores mais elevados de velocidade de impulso. O percurso das ondas de ultra-sons fez-se possivelmente através do aço, que é um material com um módulo de elasticidade maior que o do betão e através do qual as ondas se propagam mais rapidamente.

Através da massa volúmica e da velocidade de impulso medida nas carotes, determinou-se o seu módulo de elasticidade, pela equação (21) (Pág. 27). A partir deste valor, e utilizando a equação (23) do EC2, estimou-se a resistência à compressão das carotes ($f_{c,U.S.}$). A correlação entre esse valor e o da resistência à compressão obtida pelo ensaio destrutivo das carotes ($f_{c,ensaio}$) é mostrada na Figura 51.

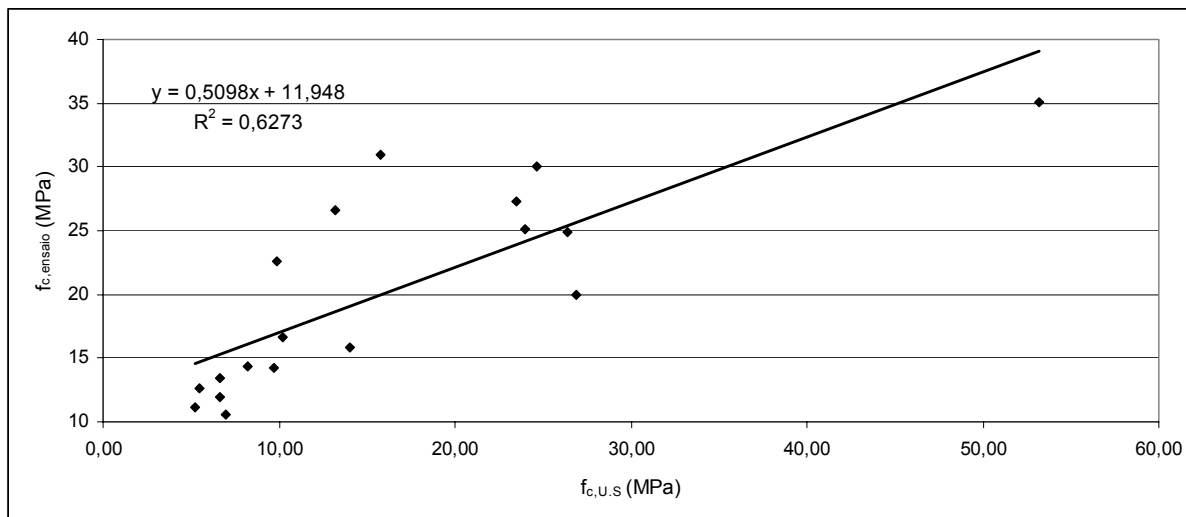


Fig. 51 – Correlação entre ($f_{c,ensaio}$) e ($f_{c,U.S.}$)

A correlação obtida no gráfico da Figura 51 é pouco significativa, mas deve ter-se em conta que a obtenção dos valores de resistência à compressão estimados a partir do ensaio de ultra-sons são o resultado da utilização de duas equações, sobrepondo-se duas estimativas. No entanto, considera-se esta informação relevante para o trabalho, mediante os dados obtidos dos ensaios realizados nos provetes.

4.3.3. ENSAIOS EM PRISMAS

A detecção da profundidade da fissura fez-se através da aplicação do método equidistante, utilizando três estações de leitura, ou seja, três posicionamentos dos transdutores. Os valores obtidos nesse ensaio encontram-se no Anexo 10, onde o Quadro 1 se refere ao aparelho de ultra-sons “Tico Proceq Ultrasonic Instrument” e o Quadro 2 se refere ao aparelho “C.S.I-B.V Concrete Tester CCT-4”. A seguir, apresentam-se as curvas obtidas pela aplicação do modelo linear, a sua equação de correlação linear e a estimativa da profundidade da fissura respectiva, em centímetros. A estimativa da profundidade da fissura faz-se determinando o valor da raiz de “b” (em que a equação de correlação é “ $y=mx+b$ ”).

- Estimativa da Profundidade da Fissura com o “Tico Proceq Ultrasonic Instrument”

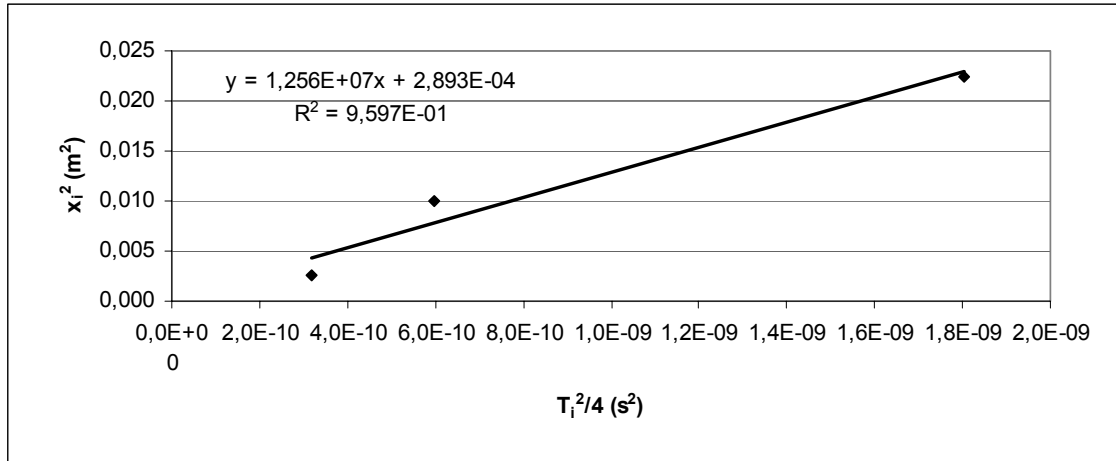


Fig. 52 – Curva e equação segundo o modelo linear com 3 pontos

A profundidade real da fissura é de 4,15 cm e a equação deste gráfico indica que a profundidade da fissura foi de: 1,70 cm. Note-se que os três pontos que lhe dão origem não se encontram perfeitamente alinhados. Se se considerar apenas os dois últimos pontos obtém-se o gráfico da Figura 53, em que a profundidade de fissura já é estimada em: 6,16 cm. Assim, como o valor real da profundidade da fissura se encontra dentro do intervalo que é possível criar a partir dos dados obtidos, considera-se que este método forneceu uma estimativa relativamente próxima da situação real. Uma melhor aproximação poderia ser obtida através da realização de um número mais elevado de medições a diferentes distâncias da fissura.

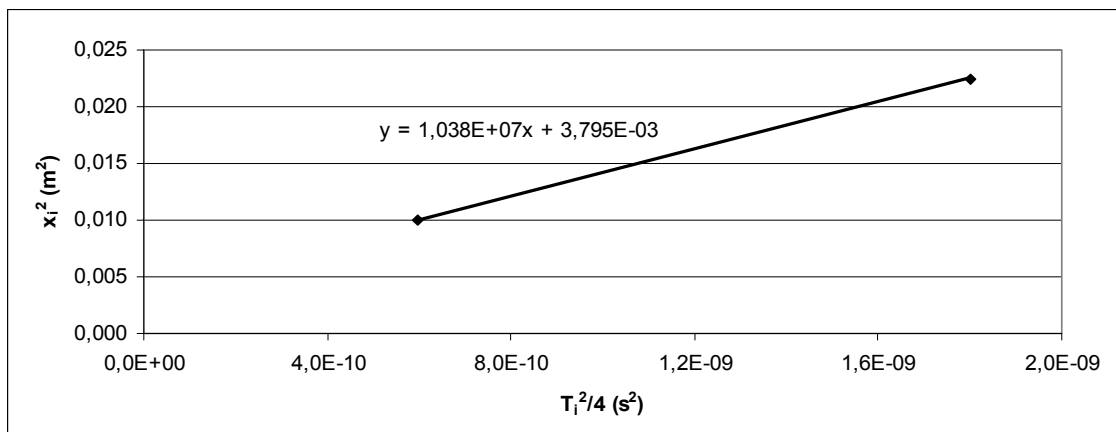


Fig. 53 – Curva e equação segundo o modelo linear, com 2 pontos

- Estimativa da profundidade da fissura com o “C.S.I-B.V Concrete Tester CCT-4”

Aplicando o mesmo método, mas o aparelho “C.S.I-B.V Concrete Tester CCT-4”, a estimativa da profundidade da fissura foi de: 3,51 cm (Figura 54). Esta foi a estimativa mais próxima do valor real da fissura, o que se deve possivelmente ao facto dos transdutores terem uma menor área de contacto (20 mm de diâmetro) proporcionarem uma redução dos erros introduzidos pelo aparelho “Tico Proceq Ultrasonic Instrument”, cujos transdutores, por terem diâmetro de 50 mm, não possuem grande sensibilidade para leituras espaçadas de 50 mm.

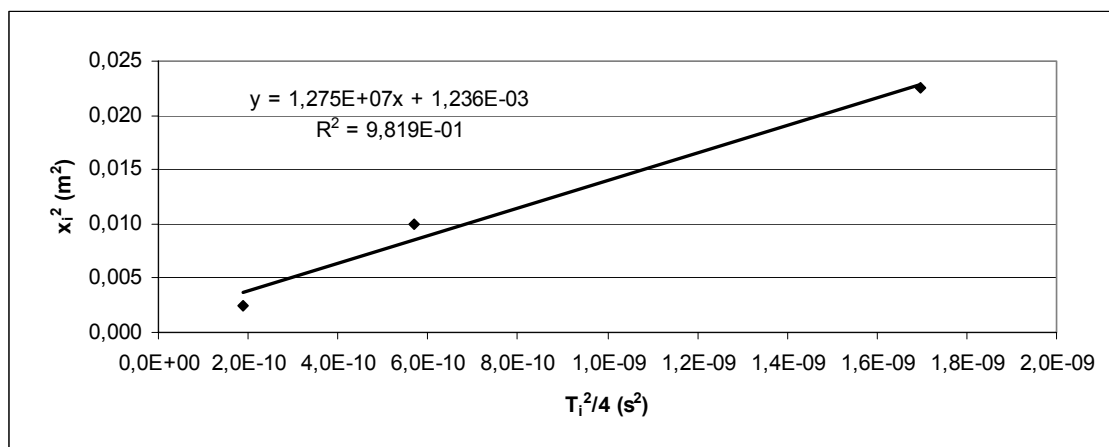


Fig. 54 – Curva e equação segundo o modelo linear, com 3 pontos

4.3.4. ENSAIOS NA LAJE

As leituras efectuadas por transmissão indirecta, estacionando nos vértices da malha desenhada sobre a sua superfície, apresentaram, antes e depois da fendilhação, valores muito próximos, não sendo possível identificar a presença das fissuras. Este resultado pode dever-se à distribuição das fendas, muito próximas e de espessura muito reduzida.

As leituras feitas por transmissão directa, no sentido longitudinal da laje (1 metro) realizaram-se em três pontos colineares. O inferior é o que se situa ao nível da armadura da laje, o médio está a meia altura da espessura e o superior junto do seu topo, na zona sem armadura.

As medições efectuadas na laje antes de fendilhar, foram muito próximas umas das outras, rondando os 245 microssegundos nas três posições referidas. Os valores obtidos na laje após a fendilhação apresentam-se no Quadro 10.

Sendo a espessura da laje de 10 cm, fez-se corresponder à posição inferior a cota 0, à média o valor 5 cm e à superior, 10 cm. A relação entre essas posições e o tempo de impulso está expressa na Figura 55.

Quadro 10 – Resultados do ensaio de transmissão directa na laje

Posição dos Transdutores	Distância (cm)	Tempo de Impulso (μs)
Inferior	0	246,2
Média	5	270,8
Superior	10	245,3

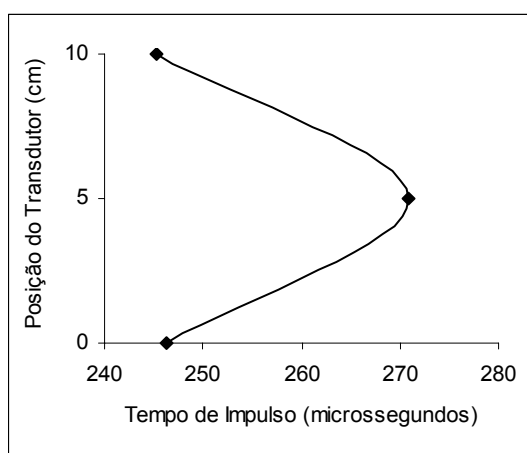


Fig. 55 – Relação entre o tempo de impulso e a posição do transdutor

O tempo de impulso obtido para a posição superior é idêntico ao obtido para a laje não fendilhada, o que está de acordo com o facto de não ter ocorrido fendilhação nesta zona. Na posição média o tempo de transmissão aumenta porque os ultra-sons terão contornado as fissuras existentes. Na posição inferior, fendilhada e armada, o tempo de propagação é próximo do betão não fendilhado, porque, apesar da existência de fissuras, a propagação dos ultra-sons terá ocorrido predominantemente através do aço. Note-se que os valores do tempo de propagação de impulso correspondem à média de um conjunto de medições efectuadas até à sua estabilização.

As leituras feitas pelos extensómetros, durante o carregamento, encontram-se no Anexo 11. Estas permitiram detectar o início da fendilhação, pois a partir desse momento o aparelho de ultra-sons passou a mostrar leituras nulas e muito díspares. Este fenómeno pode estar relacionado com perturbações provocadas por outras vibrações associadas à libertação de energia, geradas no betão, durante abertura das fissuras. Quando a laje foi descarregada, voltou a ser possível obter leituras de ultra-sons válidas.

Os modelos lineares e equidistantes foram também aplicados na laje, revelando valores idênticos antes e depois da fendilhação. Desta forma, confirmaram-se as afirmações acerca da impossibilidade de detectar fissuras de pequena espessura ou fissuras muito próximas, como se observou no modelo da laje.

Após a descarga, as fissuras de menor espessura deixaram de ser visíveis a olho nu. Apenas a fissura que se abriu a meio vão, no segundo carregamento da laje, permaneceu aberta, com uma espessura de aproximadamente 2 mm e uma profundidade de cerca de 7 cm.

A análise da fissura, através do modelo equidistante, permitiu estimar uma profundidade para a fissura de 6,89 cm (Figura 56). Os valores que deram origem ao gráfico encontram-se no Anexo 12. Dada a proximidade dos valores, a estimativa obtida por este método foi excelente.

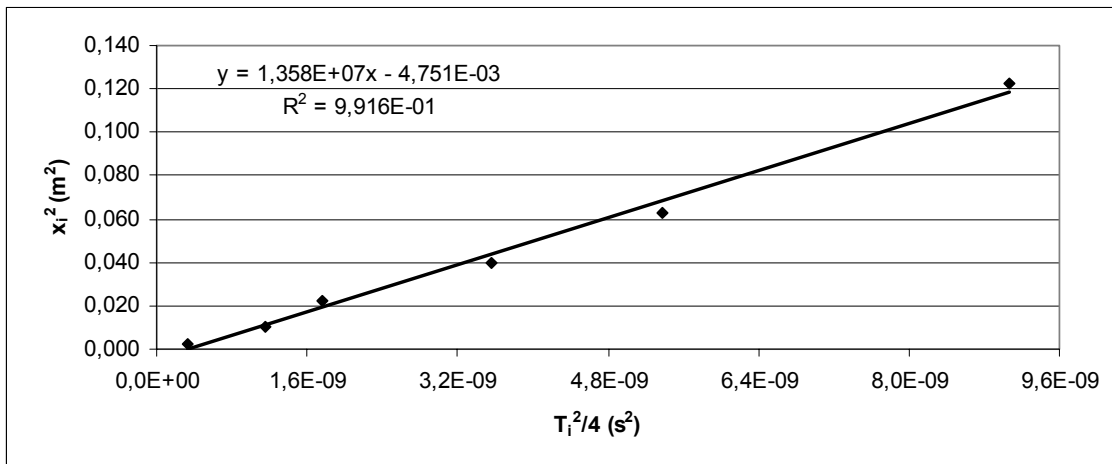


Fig. 56 – Curva e equação segundo o modelo equidistante aplicado à laje

A melhoria da precisão do método, neste ensaio, que foi o último efectuado, deve-se à experiência adquirida nos ensaios anteriores e ainda ao facto de se terem realizado medições num maior número de posições dos transdutores.

CONCLUSÃO

5.1. PONDERAÇÕES FINAIS

As ponderações finais deste trabalho incidem na análise crítica dos ensaios realizados, passando também por considerações de carácter mais pessoal acerca da experiência que constituiu a elaboração do presente trabalho.

O ensaio de ultra-sons surgiu como sendo particularmente sensível à influência do utilizador: a aplicação de uma maior ou menor pressão dos transdutores de ultra-sons altera significativamente os resultados. Este é de facto o ensaio mais complexo no que diz respeito à análise e interpretação dos resultados.

O método de “pull-off” foi o mais difícil de executar satisfatoriamente, já que só dois dos valores obtidos foram validados. Em todos os ensaios fizeram-se rectificações ao método utilizado procurando mitigar as possíveis fontes de erro. Nota-se uma grande relevância na experiência do utilizador para se conseguirem resultados válidos.

O ensaio do esclerómetro revelou-se rápido e simples de utilizar, o que, aliado aos bons resultados obtidos, permite compreender que este ensaio não-destrutivo seja um dos mais divulgados, não obstante o facto de estimar a resistência à compressão do betão, que é uma das propriedades fundamentais na caracterização deste material.

Globalmente, todos os ensaios apresentaram desvios dentro do esperado para o valor das grandezas estimadas, permitindo assim afirmar que, apesar de este ter sido o primeiro contacto da autora do trabalho com estes ensaios e com a experimentação laboratorial em geral, os procedimentos recomendados são completos e fiáveis.

Os ensaios não-destrutivos apresentam-se como uma excelente ferramenta na avaliação qualitativa do betão, fornecendo informações expeditas e de forma não intrusiva sobre as suas características mecânicas, permitindo identificar heterogeneidades entre zonas de uma estrutura de betão. Salienta-se que o aumento do número de leituras obtidas e a combinação de mais do que um tipo de ensaio aumenta a fiabilidade dos resultados obtidos.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Embora os ensaios não-destrutivos sejam utilizados e conhecidos no âmbito da engenharia civil, a sua divulgação deve ser promovida. Neste sentido, o desenvolvimento de estudos que possam aumentar a confiança dos utilizadores destes ensaios, nomeadamente em obra, reveste-se de grande interesse.

Sendo esta dissertação desenvolvida num tempo limitado e debruçando-se sobre diferentes tipos de ensaios, recomenda-se vivamente a realização de ensaios mais numerosos que possibilitem um tratamento estatístico mais completo dos resultados obtidos.

Outra proposta, vai no sentido de se realizarem estudos que incidam na utilização dos ensaios não-destrutivos em ambiente de obra para se perceberem os desafios que daí podem advir e perceber a ordem de grandeza dos desvios assim obtidos. A mais valia destes ensaios está efectivamente no facto das estruturas existentes poderem ser caracterizadas, dentro das limitações referidas, sem que sejam danificadas.

BIBLIOGRAFIA

- Andrade, P. (2007). *Estimativa da profundidade de fissuras no concreto através da utilização do ultra-som e eco-impacto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Bastos, AMS. (2003). *Técnicas experimentais para análise estática de estruturas*. Textos de apoio à disciplina de “Instrumentação e Observação de Estruturas”. Remodelado e actualizado em 2008, FEUP.
- Begonha, A. (2007). *Meteorização do Granito e Deterioração da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade do Porto*, Feup Edições, Porto.
- Bonaldo, E. (2004). *Caracterização do comportamento da ligação entre betões de distinta classe de resistência*. http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3462/3/BE2004EveraldoEtAl_2004.pdf. 09/11/09.
- British Standart BS 1881-203(1986) – Testing concrete
- Bungey, John A. (1989). *Testing of Concrete in Structures*, Surrey University Press, Guildford, UK, 2nd ed.
- Carino, N. J. (1994). *Nondestructive Testing of Concrete: History and Challen*., American Concrete Institute, Detroit
- CEB-FIB Bulletin N°17 (2002). *Management, maintenance and strengthening of concrete structures*. FIP Commision 10.
- Costa, M. J. P. M; Barbosa, R; Juvandes, L. F. (2005). *Análise de aderência das ligações coladas betão-FRP e sua correlação com as propriedades mecânicas do betão*, Trabalho de síntese de Seminário de Materiais e Processos de Construção 2004-2005, FEUP, 56 pp.
- Crawford, G. I. (1997). *Guided to Nondestructive Testing of Concrete*, US Department of Transpostation, Federal Highway Administrarion, Washington.
- E 397.- LNEC. 1993. *Betões – Determinação do módulo de elasticidade em compressão*, norma portuguesa.
- Especificação LNEC E 397-1993 – Betões. Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão.
- Eurocódigo 2. 2004. *Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- Faury. (1958). *Le Beton*. Dunod, Paris.
- Feldman, R. (1977). *Non-Destructive Testing of Concrete*. Canadian Building Digest.
- Frias, J. (2007). *Quando é que se aplicam os testes de superfície pull-off e pull-out?* <http://www.recuperar.com.br/revistas/meuproblema/meuproblema77.pdf>. 09/11/09.
- Hamassaki, L. T. 1986. *Utilização do ultra-som em concreto*, dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- IAEA. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, Vienna.
- Juvandes, L. F. (1999). *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*, tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 361 pp.

- Malhotra, V. M. 1976. *Testing Hardened Concrete: Non-destructive Methods*, ACI Monogr. No. 9, The Iowa State University Press, Ames and American Concrete Institute, Detroit, MI.
- Medeiros, A. (2007). *Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fissuras superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado*, Dissertação de Mestrado, Universidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 158 pp.
- Menghetti, L. C. (1999). *Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 163 pp.
- Naik, T. R.; Malhotra, V. M. 1991. *The ultrasonic pulse velocity method*. In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), *CRC handbook on non-destructive testing of concrete*, 1 ed, Boston, USA, CRC Press.
- Norma Europeia EN 1542 (1999) - Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurement of bond strength by pull-off
- Norma Portuguesa NP EN 1097 (2003) – Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados.
- Norma Portuguesa NP EN 12350 (2002) – Ensaio do betão fresco.
- Norma Portuguesa NP EN 12390 (2003) – Ensaio do betão endurecido.
- Norma Portuguesa NP EN 12504 (2003) – Ensaio do betão nas estruturas.
- Norma Portuguesa NP EN 933 (2000) – Ensaio das propriedades geométricas dos agregados.
- Pécora, J. D. (2004). *Ultra-som*. <http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>. 14/11/09
- Pinto, R. C. A.; Medeiros, A.; Padaratz, I. J. 2007. *Ultrasonic to estimative depth of surface opening cracks*, enviado para publicação no ACI Material Journal.
- REBAP - Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado- Dec. Lei n.º 349-C/83, de 30 de Julho,*, Porto editora, Porto.
- Sá, I; Branco, L; Juvandes, L. F. C. (2005). *Análise da aderência de Ligações coladas entre sistemas de FRP e elementos de Madeira Lamelada Colada – ensaios de “Pull-off”*, Seminário de Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Whitehurst, E. A. 1951. *Soniscopes tests concrete structures*. J. Am. Concrete Inst. Proc.

ANEXOS

ANEXO 1 – MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS

Quadro 1 – Referência da amostra: Brita 10/19

Fracção granulométrica	(mm)	4,0/31,5
Massa da amostra	(g)	6531,0
Percentagem da fracção	(%)	100
ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas	(mg/m^3)	2,67
ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas	(mg/m^3)	2,60
ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	(mg/m^3)	2,63
WA_{24} - Absorção de água	(%)	1,0

Quadro 2 – Referência da amostra: Brita 5/10

Fracção granulométrica	(mm)	0,063/4,0
Massa da amostra	(g)	1350,0
Percentagem da fracção	(%)	100
ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas	(mg/m^3)	2,66
ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas	(mg/m^3)	2,58
ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	(mg/m^3)	2,61
WA_{24} - Absorção de água	(%)	1,3

Quadro 3 – Referência da amostra: Meia Areia 0/4

Fracção granulométrica	(mm)	0,063/4,0
Massa da amostra	(g)	1124,3
Percentagem da fracção	(%)	100
ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas	(mg/m^3)	2,64
ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas	(mg/m^3)	2,62
ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	(mg/m^3)	2,63
WA_{24} - Absorção de água	(%)	0,3

Quadro 4 – Referência da amostra: Areia Fina 0/2

Fracção granulométrica	(mm)	0,063/4,0
Massa da amostra	(g)	1003,0
Percentagem da fracção	(%)	100
ρ_a - Massa volúmica do material impermeável das partículas	(mg/m^3)	2,64
ρ_{rd} - Massa volúmica das partículas secas	(mg/m^3)	2,62
ρ_{ssd} - Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca	(mg/m^3)	2,60
WA_{24} - Absorção de água	(%)	0,6

ANEXO 2 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E ANÁLISE VOLÚMICA

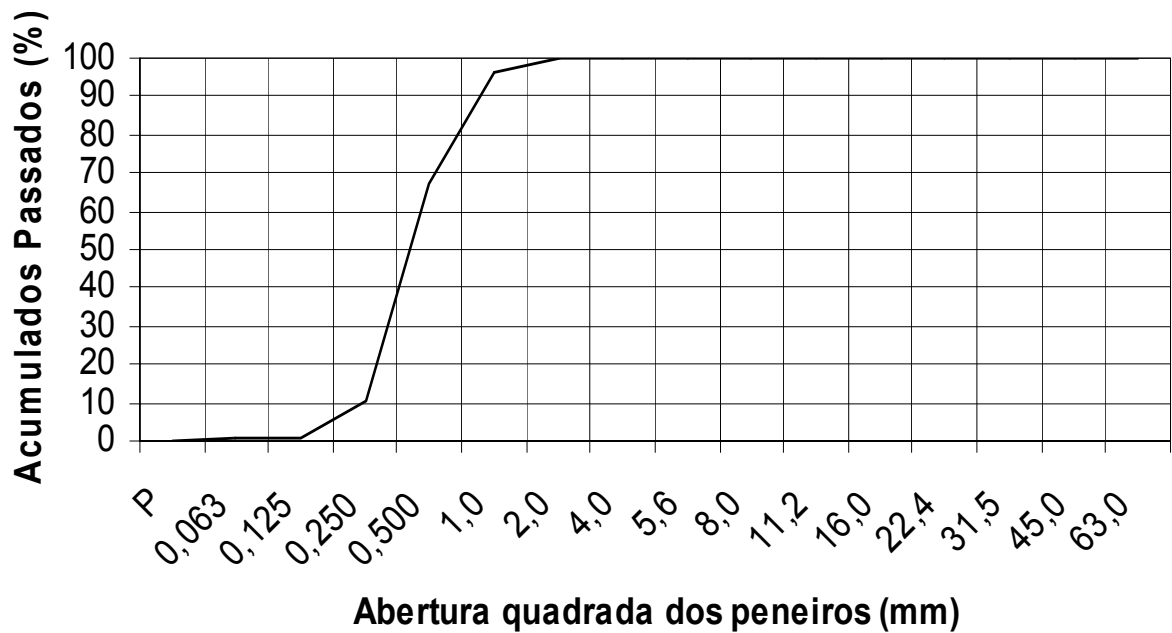
Referência da amostra: Areia Fina 0/2

M1 - Massa total da amostra seca (g):

1003,0

Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (R _i) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
63,0	0,0	0,00	0,00	100,00
45,0	0,0	0,00	0,00	100,00
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
22,4	0,0	0,00	0,00	100,00
16,0	0,0	0,00	0,00	100,00
11,2	0,0	0,00	0,00	100,00
8,0	0,0	0,00	0,00	100,00
5,6	0,0	0,00	0,00	100,00
4,0	0,0	0,00	0,00	100,00
2,0	3,0	0,30	0,30	99,70
1,0	34,0	3,39	3,69	96,31
0,500	292,0	29,11	32,80	67,20
0,250	569,0	56,73	89,53	10,47
0,125	97,0	9,67	99,20	0,80
0,063	4,0	0,40	99,60	0,40
P	1,0	0,10	99,70	0,30

Representação gráfica dos resultados

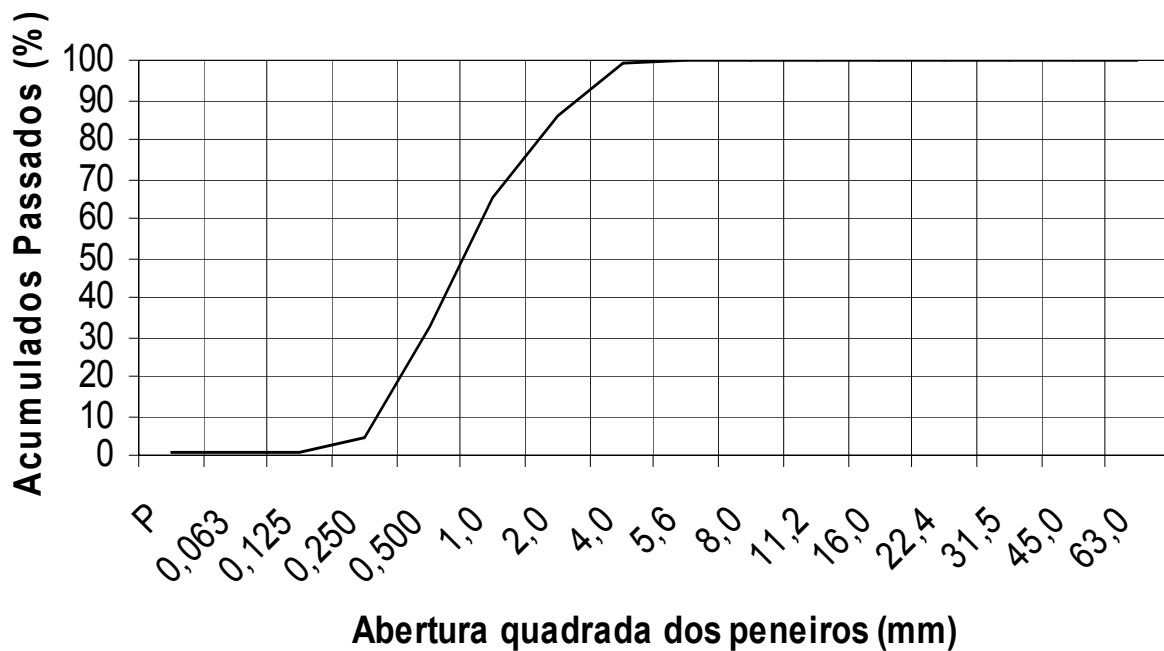


Referência da amostra: Meia Areia 0/4

M1 - Massa total da amostra seca (g): 1143,0

Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (Ri) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
63,0	0,0	0,00	0,00	100,00
45,0	0,0	0,00	0,00	100,00
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
22,4	0,0	0,00	0,00	100,00
16,0	0,0	0,00	0,00	100,00
11,2	0,0	0,00	0,00	100,00
8,0	0,0	0,00	0,00	100,00
5,6	0,0	0,00	0,00	100,00
4,0	12,0	1,05	1,05	98,95
2,0	145,8	12,76	13,81	86,19
1,0	240,5	21,04	34,85	65,15
0,500	373,7	32,61	67,45	32,55
0,250	320,4	28,03	95,49	4,51
0,125	42,7	3,74	99,22	0,78
0,063	3,0	0,26	99,48	0,52
P	0,0	0,00	99,48	0,52

Representação gráfica dos resultados

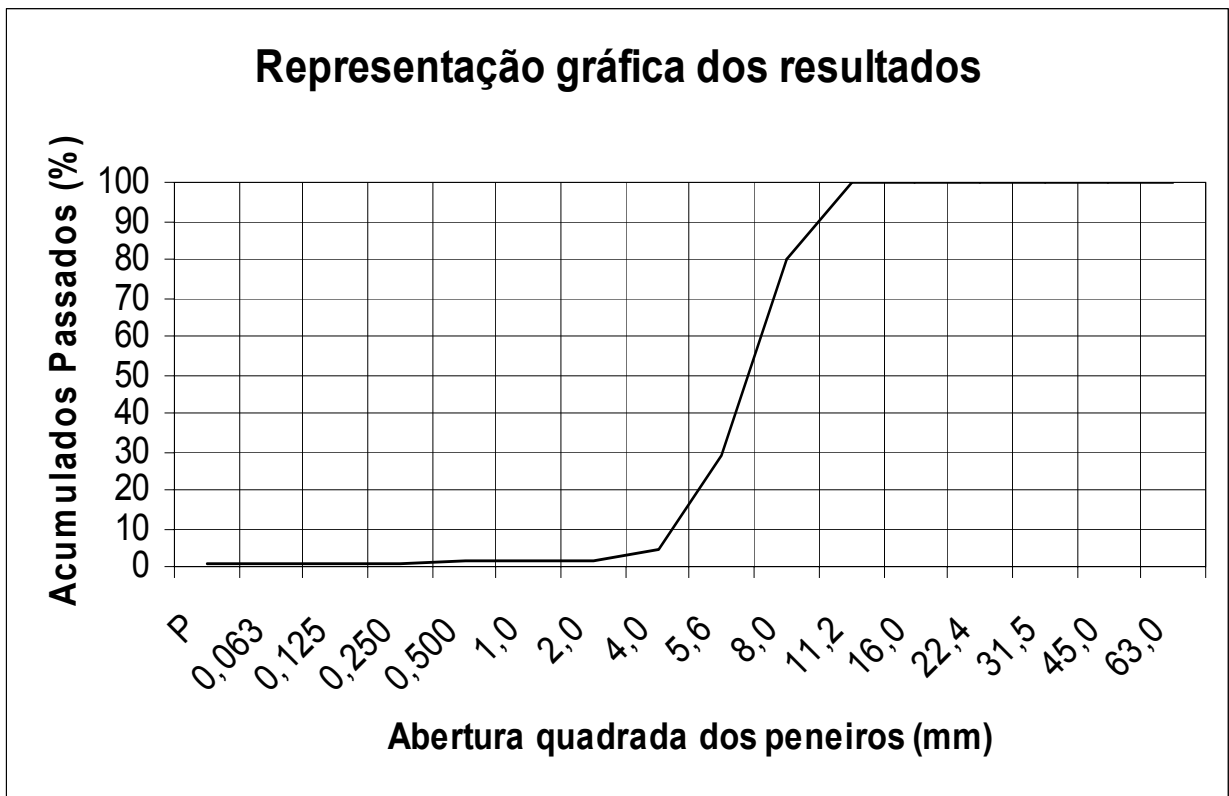


Referência da amostra: Brita 5/10

M1 - Massa total da amostra seca (g):

3030,0

Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (Ri) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
63,0	0	0,00	0,00	100,00
45,0	0	0,00	0,00	100,00
31,5	0	0,00	0,00	100,00
22,4	0	0,00	0,00	100,00
16,0	0	0,00	0,00	100,00
11,2	0	0,00	0,00	100,00
8,0	615	20,30	20,30	79,70
5,6	1536	50,69	70,99	29,01
4,0	741	24,46	95,45	4,55
2,0	90	2,97	98,42	1,58
1,0	9	0,30	98,71	1,29
0,500	3	0,10	98,81	1,19
0,250	3	0,10	98,91	1,09
0,125	4	0,13	99,04	0,96
0,063	4	0,13	99,17	0,83
P	1	0,03	99,21	0,79



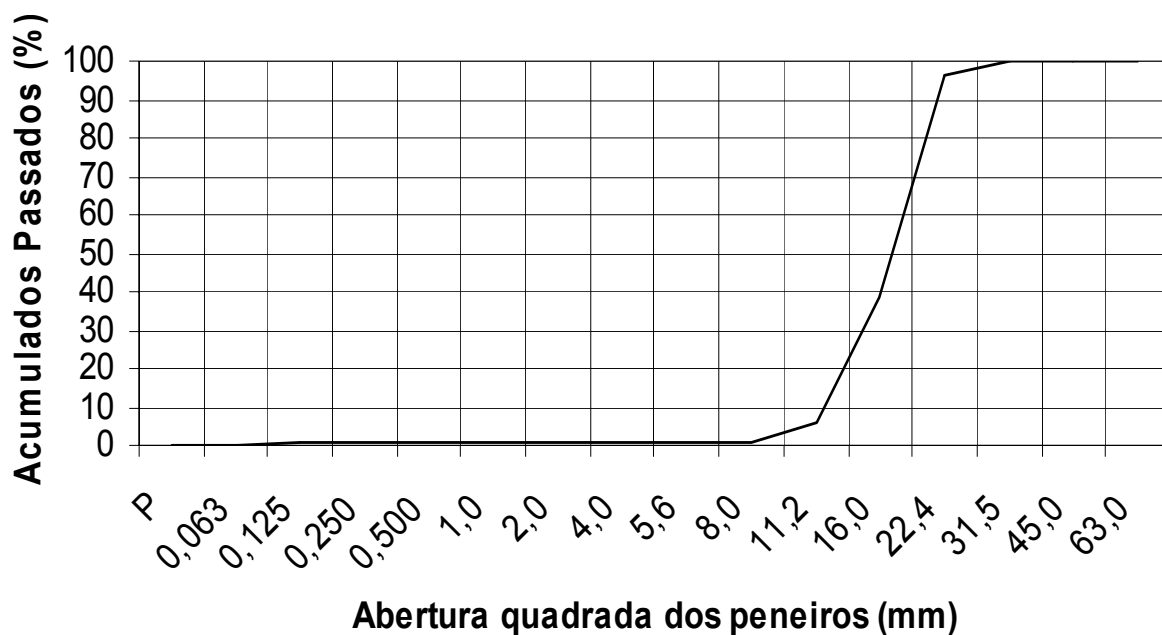
Referência da amostra: Brita 10/19

M1 - Massa total da amostra seca (g):


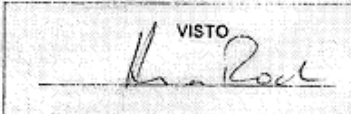

6257

Abertura dos peneiros (mm)	Massa Retida (Ri) (g)	Percentagem Retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)	Percentagem acumulados passados (%)
63,0	0,0	0,00	0,00	100,00
45,0	0,0	0,00	0,00	100,00
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
22,4	222,0	3,54	3,54	96,46
16,0	3624,0	57,71	61,24	38,78
11,2	2083,0	33,17	94,41	5,59
8,0	306,0	4,87	99,28	0,72
5,6	7,0	0,11	99,39	0,61
4,0	1,0	0,02	99,41	0,59
2,0	0,0	0,00	99,41	0,59
1,0	1,0	0,02	99,43	0,57
0,500	1,0	0,02	99,44	0,56
0,250	3,0	0,05	99,49	0,51
0,125	4,0	0,06	99,55	0,45
0,063	5,0	0,08	99,63	0,37
P	2,0	0,03	99,67	0,33

Representação gráfica dos resultados



ANEXO 3 – FICHA TÉCNICA DO CIMENTO

	RESULTADOS DO AUTOCONTROLO VALORES MÉDIOS																																																																																				
FÁBRICA: MACEIRA	BOLETIM Nº 11 DATA: 09.01.2009																																																																																				
REFERÊNCIA: Cimento * CEM I 42,5 R Resultados Referentes a NOVEMBRO																																																																																					
ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1] <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th rowspan="3">IDADE</th> <th colspan="4">RESISTÊNCIAS (MPa)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">FLEXÃO</th> <th colspan="2">COMPRESSÃO</th> </tr> <tr> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 dias</td> <td>5,9</td> <td>5,8</td> <td>32,7</td> <td>31,3</td> </tr> <tr> <td>7 dias</td> <td>7,5</td> <td>7,5</td> <td>44,8</td> <td>44,3</td> </tr> <tr> <td>28 dias</td> <td>8,8</td> <td>8,7</td> <td>55,1</td> <td>55,4</td> </tr> </tbody> </table>	IDADE	RESISTÊNCIAS (MPa)				FLEXÃO		COMPRESSÃO		MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL	2 dias	5,9	5,8	32,7	31,3	7 dias	7,5	7,5	44,8	44,3	28 dias	8,8	8,7	55,1	55,4	ANÁLISE QUÍMICA <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PERDA AO FOGO</td> <td>% P F</td> <td>2,61</td> <td>2,43</td> </tr> <tr> <td>RESÍDUO INSOLÚVEL</td> <td>% R.I.</td> <td>1,33</td> <td>1,32</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE SILÍCIO</td> <td>% SiO₂</td> <td>20,36</td> <td>20,39</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE ALUMÍNIO</td> <td>% Al₂O₃</td> <td>5,10</td> <td>4,76</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE FERRO</td> <td>% Fe₂O₃</td> <td>3,12</td> <td>3,15</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE CÁLCIO</td> <td>% CaO</td> <td>62,72</td> <td>62,17</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE MAGNÉSIO</td> <td>% MgO</td> <td>1,81</td> <td>1,90</td> </tr> <tr> <td>SULFATOS</td> <td>% SO₃</td> <td>3,44</td> <td>3,44</td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE POTÁSSIO</td> <td>% K₂O</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ÓXIDO DE SÓDIO</td> <td>% Na₂O</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CLORETOS</td> <td>% Cl</td> <td>0,0120</td> <td>0,0137</td> </tr> <tr> <td>CAL LIVRE</td> <td>%</td> <td>1,62</td> <td>0,98</td> </tr> <tr> <td>N/D (não Dosados)</td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			MENSAL	ANUAL	PERDA AO FOGO	% P F	2,61	2,43	RESÍDUO INSOLÚVEL	% R.I.	1,33	1,32	ÓXIDO DE SILÍCIO	% SiO ₂	20,36	20,39	ÓXIDO DE ALUMÍNIO	% Al ₂ O ₃	5,10	4,76	ÓXIDO DE FERRO	% Fe ₂ O ₃	3,12	3,15	ÓXIDO DE CÁLCIO	% CaO	62,72	62,17	ÓXIDO DE MAGNÉSIO	% MgO	1,81	1,90	SULFATOS	% SO ₃	3,44	3,44	ÓXIDO DE POTÁSSIO	% K ₂ O			ÓXIDO DE SÓDIO	% Na ₂ O			CLORETOS	% Cl	0,0120	0,0137	CAL LIVRE	%	1,62	0,98	N/D (não Dosados)	%		
IDADE		RESISTÊNCIAS (MPa)																																																																																			
		FLEXÃO		COMPRESSÃO																																																																																	
	MENSAL	ANUAL	MENSAL	ANUAL																																																																																	
2 dias	5,9	5,8	32,7	31,3																																																																																	
7 dias	7,5	7,5	44,8	44,3																																																																																	
28 dias	8,8	8,7	55,1	55,4																																																																																	
		MENSAL	ANUAL																																																																																		
PERDA AO FOGO	% P F	2,61	2,43																																																																																		
RESÍDUO INSOLÚVEL	% R.I.	1,33	1,32																																																																																		
ÓXIDO DE SILÍCIO	% SiO ₂	20,36	20,39																																																																																		
ÓXIDO DE ALUMÍNIO	% Al ₂ O ₃	5,10	4,76																																																																																		
ÓXIDO DE FERRO	% Fe ₂ O ₃	3,12	3,15																																																																																		
ÓXIDO DE CÁLCIO	% CaO	62,72	62,17																																																																																		
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	% MgO	1,81	1,90																																																																																		
SULFATOS	% SO ₃	3,44	3,44																																																																																		
ÓXIDO DE POTÁSSIO	% K ₂ O																																																																																				
ÓXIDO DE SÓDIO	% Na ₂ O																																																																																				
CLORETOS	% Cl	0,0120	0,0137																																																																																		
CAL LIVRE	%	1,62	0,98																																																																																		
N/D (não Dosados)	%																																																																																				
ENSAIOS FÍSICOS <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>MENSAL</th> <th>ANUAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Peso Específico (g/cm³)</td> <td>3,14</td> <td>3,15</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Resíduo de Peneiração (%)</td> <td>90 µm</td> <td>0,06</td> <td>0,17</td> </tr> <tr> <td>63 µm</td> <td>0,20</td> <td>0,62</td> </tr> <tr> <td>45 µm</td> <td>1,75</td> <td>2,28</td> </tr> <tr> <td>32 µm</td> <td>5,40</td> <td>7,50</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Superfície Específica de Blaine (cm²/g) [NP EN 196-6]</td> <td>3928</td> <td>3884</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]</td> <td>29,8</td> <td>29,6</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]</td> <td>Início</td> <td>151</td> <td>162</td> </tr> <tr> <td>Fim</td> <td>198</td> <td>217</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]</td> <td>1,19</td> <td>1,18</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Índice de Brancura (0 a 100)</td> <td>29,66</td> <td>29,49</td> </tr> </tbody> </table>			MENSAL	ANUAL	Peso Específico (g/cm ³)		3,14	3,15	Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,06	0,17	63 µm	0,20	0,62	45 µm	1,75	2,28	32 µm	5,40	7,50	Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		3928	3884	Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		29,8	29,6	Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	151	162	Fim	198	217	Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		1,19	1,18	Índice de Brancura (0 a 100)		29,66	29,49																																									
		MENSAL	ANUAL																																																																																		
Peso Específico (g/cm ³)		3,14	3,15																																																																																		
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm	0,06	0,17																																																																																		
	63 µm	0,20	0,62																																																																																		
	45 µm	1,75	2,28																																																																																		
	32 µm	5,40	7,50																																																																																		
Superfície Específica de Blaine (cm ² /g) [NP EN 196-6]		3928	3884																																																																																		
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]		29,8	29,6																																																																																		
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início	151	162																																																																																		
	Fim	198	217																																																																																		
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]		1,19	1,18																																																																																		
Índice de Brancura (0 a 100)		29,66	29,49																																																																																		
OBSERVAÇÕES:																																																																																					
<small>ANUAL - Valor médio dos últimos 12 meses NOTA: todos os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada]</small>																																																																																					
VISTO 	APROVADO 																																																																																				

ANEXO 4 – MÉTODO DE FAURY

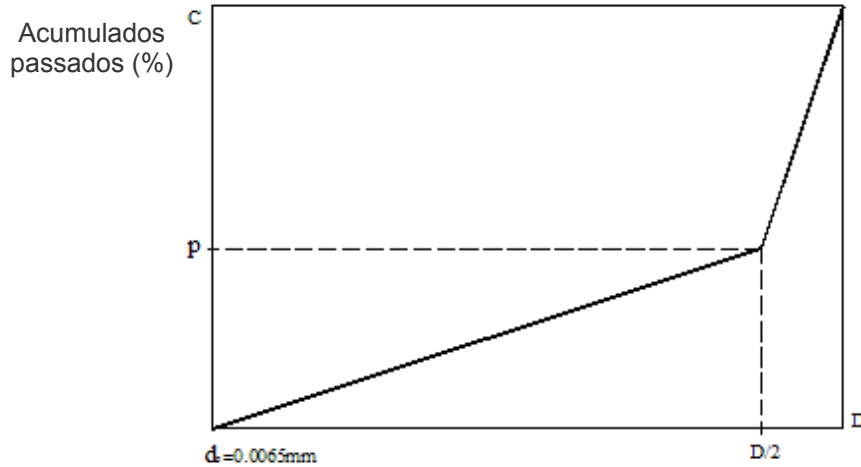


Fig. 1 – Curva de referência de Faury

O eixo das abcissas varia entre 0,0065mm (tamanho mínimo dos grãos de cimento) e D é proporcional à raiz quinta da abertura do peneiro. O eixo das ordenadas tem uma escala linear que representa a percentagem de material acumulado passado.

$$p_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

$p_{D/2}$ – Percentagem de acumulados passados do material de tamanho menos do que $D/2$

A – Parâmetro de Faury relacionado com a natureza e forma do agregado e a energia de vibração

B – Parâmetro de Faury que depende da trabalhabilidade

D – Tamanho do maior peneiro em fica retido o agregado

R – Raio médio do molde, relacionado com o efeito de parede

A definição das percentagens de agregados e cimento na mistura de betão deve levar a uma graduação dos agregados combinados similar à curva de referência de forma a obter-se o máximo de compactidade para o conjunto dos agregados tendo em conta as condições reais de trabalhabilidade e vibração.

Isto é conseguindo respeitar as seguintes condições:

- O módulo de finura da mistura deve ser tão próxima quanto possível daquela da curva de referência,

$$m_o = m_1 p_1 + m_2 p_2 + \dots + m_n p_n, \text{ com:}$$

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$$

m_0 - Módulo de finura da curva de referência

m_1, \dots, m_n - Módulo de finura dos agregados 1, ..., n

p_1, \dots, p_n - percentagem dos agregados 1, ..., n na mistura

- O desvio quadrático médio entre a curva de referência deve ser mínimo.

APLICAÇÃO DO MÉTODO

Partiu-se dos seguintes dados:

$$D_{\text{máx}} = 22,4\text{mm}$$

Massas volúmicos:

$$\text{Cimento (C)} = 3150 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Água (A)} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado (m)} = 2625 \text{ kg/m}^3$$

Dosagem pretendida de cimento:

$$C = 300 \text{ kg/m}^3$$

Arbitrou-se:

$$\frac{R}{D} = 1$$

Como se pretendia um betão mole atribuíram-se os seguintes valores aos parâmetros de Faury:

$$A = 30$$

$$B = 2$$

Obtendo-se:

$$p_{D/2} = 30 + 17\sqrt[3]{22,4} + \frac{2}{1-0,75} = 69,6$$

Fixou-se a seguinte razão água cimento:

$$\frac{A}{C} = 0,5$$

Assumiui-se o seguinte volume de vazios:

$$v_v = 1,5\%$$

Aplicando as condições de aproximação à curva de referência:

$$p_c = \frac{c}{c+m}$$

$$c + m + a + v_v = 1$$

Tem-se que:

$$\frac{300}{3150} + m + \frac{0,5 \times 300}{1000} + 0,015 = 1$$

$$0,52 \times 10^{-2} + m + 0,15 + 0,015 = 1$$

Donde resulta:

$$m = 0,670$$

Então:

$$p_c = \frac{0,0952}{0,0952 + 0,670} = 0,124$$

Finalmente:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1 \\ 4,1 + 5,0p_2 + 8,1p_3 + 9,6p_4 = 2,7 \\ 0,72p_1 + 0,32p_2 = 0,30 \\ p_1 + p_2 + 0,79p_3 + 0,2p_4 = 0,45 \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1 \\ p_1 = 0,20 \\ p_2 = 0,15 \\ p_1 + p_2 + p_3 + 0,06p_4 = 0,69 \end{cases}$$

De onde resultam as seguintes percentagens para cada agregado:

$$\begin{cases} x_1 = 20\% \\ x_2 = 15\% \\ x_3 = 32\% \\ x_4 = 33\% \end{cases}$$

ANEXO 5 – RESULTADO DOS ENSAIOS QUE PERMITEM ESTIMAR A RESISTÊNCIA DO BETÃO À FLEXÃO

Quadro 1 – Ensaio de resistência à compressão em cubos (NP EN 12390-4, 2003)

Dia	Cubo	Peso (kg)	Volume (m ³)	Força máx. (kN)	f _{c, cubo} (MPa)	f _{cm, cubo} (MPa)
46°	#10	150*154*150	8,166	1139	49,5	49,25
	#13	150*152*151	8,144	1121	49,0	

Quadro 2 – Ensaio de resistência à tracção por compressão em cilindros (NP EN 12390-6, 2003)

Dia	Cilindro	L (mm)	d (mm)	F (N)	F _{média} (N)
51°	#4	300	150	294300	294300
	#6			294300	

Quadro 3 – Ensaio de resistência à flexão em prismas (NP EN 12390-5, 2003)

Dia	Proвете	Dimensões (mm)	Força máx. (kN)
51°	Prisma maior	550x150x150	33,62

ANEXO 6 – RESULTADOS DO ENSAIO DO ESCLERÓMETRO

1ª Amassadura

Quadro 1 - Resultados do ensaio do esclerómetro

Dia	7°		14°		28°	
Cubo	#2	#4	#1	#3	#1	#3
Valor do ressalto	35	37	39	34	38	38
	37	38	37	36	39	38
	34	35	36	39	39	39
	42	36	36	34	44	38
	35	38	38	38	40	44
	36	37	39	40	44	40
	37	34	36	35	42	34
	34	34	38	37	47	38
Média	36	36	37	37	42	39

Quadro 2 - $f_{ck,cubo}$ pelo ensaio de compressão e pelo método do esclerómetro

Dia	Cubo	Ensaio de resistência à compressão			Método do Esclerómetro			
		Volume (mm ³)	Peso (kg)	Força Max. (kN)	$f_{cm,cubo}$ (MPa)	Valor do Ressalto	$f_{ck,cubo}^1$ (Mpa)	$f_{cm,cubo}^2$ (Mpa)
7°	#2	150*152*150	8,044	1073	47,0	36	36	44
	#4	150*152*150	8,061	1057	46,5	36	36	44
28°	#1	150*151*150	8,070	1002	44,0	42	46	54
	#3	150*152*150	7,990	1109	48,5	39	41	49

¹ $f_{ck,cubo}$, valor obtido a partir da correlação fornecida pelo fabricante do esclerómetro² $f_{cm,cubo}$, valor obtido através da expressão do Eurocódigo 2: $f_{cm}=f_{ck}+8(\text{MPa})$

2ª Amassadura

Quadro 3 - Resultados do ensaio do esclerómetro

Dia	3°		7°		14°		28°		46°	
Cubo	#15	#16	#15	#16	#11	#12	#7	#8	#10	#13
Valor do ressalto	35	35	39	33	39	38	36	25	44	50
	34	33	37	38	38	36	37	38	41	48
	35	36	38	38	36	36	37	38	42	44
	35	35	36	38	36	35	36	38	43	45
	34	35	37	38	44	37	39	37	44	44
	36	36	36	38	40	37	41	36	48	47
	34	34	40	36	37	36	40	40	48	44
	34	34	35	36	38	39	38	34	41	45
Média	35	35	37	37	39	37	38	36	44	46

Quadro 4 – f_{ck,cubo} obtida pelo ensaio de compressão e pelo método do esclerómetro

Dia	Cubo	Ensaio de Resistência à compressão				Método do Esclerómetro		
		Volume (mm ³)	Peso (kg)	Força (kN)	f _{cm,cubo} (MPa)	Valor do ressalto	f _{ck,cubo} ¹ (MPa)	f _{cm,cubo} ² (MPa)
7°	#15	150*152*150	8,029	990	43,5	37	38	46
	#16	150*152*150	8,081	973	42,5	37	38	46
14°	#11	150*153*150	8,104	1066	46,5	39	41	49
	#12	150*152*150	8,101	1037	45,5	37	38	46
28°	#7	150*151*150	8,95	1025	45,5	38	40	48
	#8	150*152*150	8,066	1031	45	36	36	44
46°	#10	150*154*150	8,166	1139	49,5	44	50	58
	#13	150*152*151	8,144	1121	49	46	54	62

¹f_{ck,cubo}, valor obtido a partir da correlação fornecida pelo fabricante do esclerómetro

²f_{cm,cubo}, valor obtido através da expressão do Eurocódigo 2: f_{cm}=f_{ck}+8(MPa)

ANEXO 7 – RESULTADOS DO ENSAIO DE ULTRA-SONS EM CILINDROS

Quadro 1 – Valores da primeira amassadura

Dia	Cilindro	Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)	Percurso (cm)	*E _c (GPa)	E _{cm} (GPa)	Massa Volúmica (kg/m ³)	**f _{c,cil} (MPa)	f _{cm,cil} (MPa)		
3°	#1	4030	74,4	29,7	27,8	27,5	-	-	-		
	#2	4010	74,8		27,1						
7°	#1	4070	72,9		29,0	29,3		2354,53		-	-
	#2	4020	73,8		29,7						
14°	#1	4200	70,8		31,5	31,4		-		-	-
	#2	4210	70,5		31,2						
23°	#1	4180	71,7		-	-		-		-	-
	#2	4210	70,5		-						
27 ^a	#1	4210	70,5		-	-		-		-	-
	#2	4240	70,0		-						
28°	#1	4210	70,6		33,5	33,9		2355,77		52,5	51,4
	#2	4240	70,1		34,3						

* E_c – Valores obtidos por compressão dos cilindros** f_{c,cil} - Valores de resistência à compressão dos cilindros

Quadro 2 – Valores da segunda amassadura

Dia	Cilindro	Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)	Percurso (mm)	*E _c (GPa)	E _{cm} (GPa)	Massa Volúmica (kg/m ³)	**f _{c,cil} (MPa)	
3°	#3	3990	74,4	297	26,62	26,94	-	-	
	#4	3970	74,9		27,27				
7°	#3	4140	71,8		32,47	32,15		2355,26	-
	#4	4110	72,3		31,84				
8°	#3	4140	71,8		31,71	32,29		2361,41	-
	#4	4250	69,9		32,87				
11°	#3	4150	71,5		-	-		-	-
	#4	4190	70,9		-				
14°	#3	4140	71,8		31,71	32,29		-	-
	#4	4250	69,9		32,87				
17°	#3	4200	70,8		-	-		-	-
	#4	4150	71,5		-				
25°	#3	4210	118,9		-	-		-	-
	#4	4210	118,9		-				
28°	#3	4189	70,9		-	-		-	-
	#4	4195	70,8		-				
30°	#3	4230	70,2	34,29	34,20	2361,11	48,9		
	#4	4210	70,8	34,10					

ANEXO 8 – DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM COMPRESSÃO

OBJECTIVO

O presente ensaio estabelece o método de determinação do módulo de elasticidade em compressão. Os ensaios foram realizados de acordo com a Especificação do LNEC E 397/1993.

PROCEDIMENTOS E EQUIPAMENTO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados sobre provetes cilíndricos de $\text{Ø}150 \times 300 \text{ mm}^3$, submetidos a ciclos de carga/descarga. Os níveis de carga aplicados variaram entre 1/3 e um 1/10 da força máxima de rotura. Os provetes ensaiados foram submetidos a 8 ciclos de carga/descarga: os dois primeiros ciclos foram desprezados considerando-se apenas os resultados dos seis restantes. Os ciclos foram realizados a uma velocidade constante de 0.4 MPa. Os provetes cilíndricos foram instrumentados com transdutores indutivos de deslocamento com um curso de $\pm 2.5 \text{ mm}$ com 0,5 % de linearidade, colocados no eixo de aplicação da carga ou seja na direcção longitudinal. Os transdutores são colocados num dispositivo construído em duralumínio, como se ilustra na Figura 1, devidamente solidarizados ao provete cilíndrico, através de parafusos. Estes devem ser perfeitamente “afiados” de forma a permitir o contacto na face superficial do provete cilíndrico. Este dispositivo de ensaio tem um comprimento de referência l igual a 100 mm. A aplicação da carga axial e a instrumentação com transdutores de deslocamento colocados exteriormente ao provete, para cada ciclo de carga - descarga, origina uma variação de comprimento Δl , sendo o comprimento de referência l , ou seja para cada nível de tensão aplicada obtemos um valor da extensão. Admite-se que o betão tem um comportamento elástico nos intervalos de carga aplicados, sendo possível determinar o valor do módulo de elasticidade através da inclinação da recta σ - ϵ .



Fig. 1 – “Set-up” do ensaio do Módulo de Elasticidade em compressão

EXPRESSÃO DE RESULTADOS

O Modulo de Elasticidade e dado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\Leftrightarrow \frac{Nl}{A\Delta l}$$

em que:

σ - Tensão aplicada

ε - Extensão linear

N- Forca aplicada

l - Comprimento de referencia

A - Secção transversal recta

Δl - Variação de comprimento

ANEXO 9 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ULTRA-SONS NAS CAROTES

Quadro 1 – Resultados do Ensaio de ultra-sons e de resistência à compressão, em carotes

Identificação	Ultra-Sons		Provetes		Agregado	Condições de Humidade	Aço			Massa volúmica (kg/m ³)	Carga máxima de rotura (KN)	Tensão de rotura à compressão (MPa)
	Velocidade (m/s)	Tempo (μs)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Dimensão (mm)		Obs.	nº varões				
								φ (mm)				
P2 B	4160	23,8	99	99	33	Húmida	c/ Aço	1	8	2333	270,3	35,1
P2 C	3760	26,3	99	99	30	Húmida	-	-	-	2235	210,2	27,3
P3 B	3560	27,9	99	99	30	Húmida	-	-	-	2098	193,2	26,6
P3 C	3840	25,8	99	99	35	Húmida	-	-	-	2155	204,6	25,1
P4 B	3160	31,3	99	99	36	Húmida	-	-	-	2040	91,8	12,6
P4 C	3260	30,4	99	99	31	Húmida	-	-	-	2037	97,1	11,9
P5 B	3330	29,7	99	99	26	Húmida	-	-	-	2078	127,6	14,4
P5 C	3460	28,6	99	99	41	Húmida	-	-	-	2056	110,8	16,6
P6 B	3550	27,9	99	99	32	Húmida	-	-	-	2148	173,6	15,8
P6 C	3430	28,9	98	99	25	Húmida	-	-	-	2069	122	22,6
P9 B	3780	26,3	99	99	41	-	-	-	-	2243	237,9	30
P9 C	3610	27,4	99	99	40	-	-	-	-	2149	230,8	30,9
P15 B	3130	31,6	99	99	31	-	-	-	-	2058	85,9	11,2
P15 C	3290	30,1	99	99	34	-	-	-	-	2029	81,6	10,6
V6	3240	30,6	99	99	26	-	-	-	-	2059	103,2	13,4
V7	3380	29,3	99	99	26	-	-	-	-	2122	109	14,2
V8	3690	26,8	98	99	30	-	c/ Aço	2	10 ; 20	2415	154,2	20
V9	3740	3740	99	99	26	-	c/ Aço	2	12	2338	191,9	24,9

Quadro 2 – Valor de resistência à compressão das carotes obtido a partir do ensaio de ultra-sons e do ensaio de compressão

Identificação da carote	Massa Volúmica (kg/m ³)	Velocidade de Impulso (m/s)	E _{cm,U.S} (GPa)	f _{cm,U.S} (MPa)	f _{cm,ensaio} (MPa)
P2 B	2333	4160	36,34	53,23	35,1
P2 C	2235	3760	28,44	23,51	27,3
P3 B	2098	3560	23,93	13,23	26,6
P3 C	2155	3840	28,60	23,96	25,1
P4 B	2040	3160	18,33	5,44	12,6
P4 C	2037	3260	19,48	6,67	11,9
P5 B	2078	3330	20,74	8,21	14,4
P5 C	2056	3460	22,15	10,23	16,6
P6 B	2148	3550	24,36	14,04	15,8
P6 C	2069	3430	21,91	9,85	22,6
P9 B	2243	3780	28,84	24,65	30
P9 C	2149	3610	25,21	15,73	30,9
P15 B	2058	3130	18,15	5,26	11,2
P15 C	2029	3290	19,77	6,99	10,6
V6	2059	3240	19,45	6,63	13,4
V7	2122	3380	21,82	9,72	14,2
V8	2415	3690	29,59	26,86	20
V9	2338	3740	29,43	26,37	24,9

ANEXO 10 – ENSAIO DE ULTRA-SONS NO PRISMA PELO MODELO EQUIDISTANTE

Quadro 1 – Estimativa da Profundidade da Fissura com o “Tico Proceq Ultrasonic Instrument”

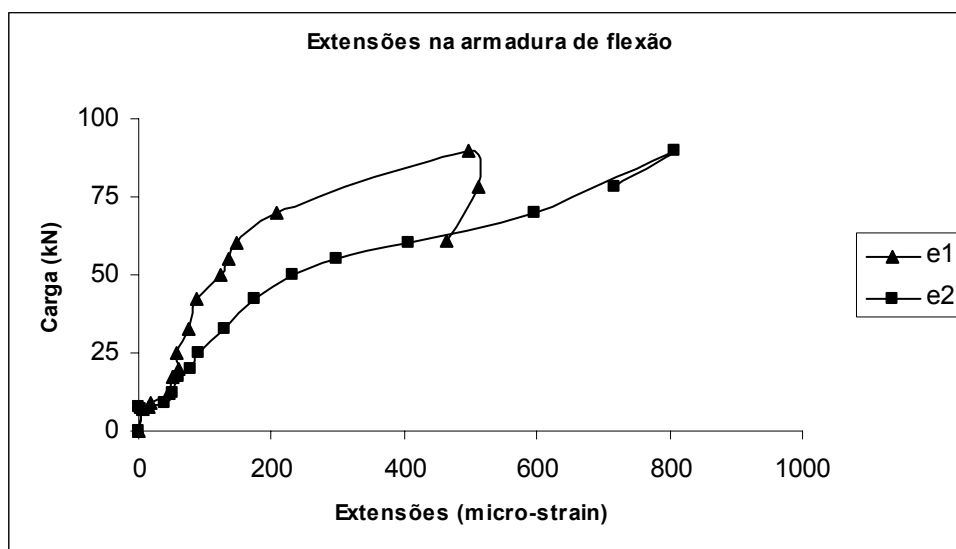
Distância à fissura (cm)	T (μ s)	x_i (m)	T (s)	x_i^2 (m ²)	$T_i^2/4$ (s ²)
50	35,7	0,05	0,0000357	0,0025	3,1862E-10
100	48,9	0,10	0,0000489	0,0100	5,9780E-10
150	84,9	0,15	0,0000849	0,0225	1,8020E-09

Quadro 2 – Estimativa da profundidade da fissura com o “C.S.I-B.V Concrete Tester CCT-4”

Distância à fissura (cm)	T (μ s)	x_i (m)	T (s)	x_i^2 (m ²)	$T_i^2/4$ (s ²)
50	27,4	0,05	0,0000274	0,0025	1,8769E-10
100	47,7	0,10	0,0000477	0,0100	5,68823E-10
150	82,4	0,15	0,0000824	0,0225	1,69744E-09

ANEXO 11 – REGISTO DOS EXTENSÓMETROS NO CARREGAMENTO DA LAJE

Extensómetro		Carga aplicada na laje (kN)
e1	e2	
-6	-337	0
-3	-330	7
-6	-323	7,5
33	-319	9
44	-291	12,5
55	-287	17
73	-277	20
85	-280	25
123	-262	33
170	-250	42,5
225	-215	50
293	-202	55
400	-188	60
590	-130	70
800	160	90
712	175	78
627	126	61
613	93	50
590	57	40
546	6	30
515	-34	21
437	-78	10
361	-137	0
350	-133	0



ANEXO 12 – ENSAIO DE ULTRA-SONS NA LAJE PELO MODELO EQUIDISTANTE

Distância do transdutor à fissura (cm)	T (μ s)	x_i (m)	T (s)	x_i^2 (m ²)	$T_i^2/4$ (s ²)
5	36,65	0,05	0,00003665	0,0025	3,3581E-10
10	67,80	0,10	0,0000678	0,0100	1,1492E-09
15	83,95	0,15	0,00008395	0,0225	1,7619E-09
20	119,35	0,20	0,00011935	0,0400	3,5611E-09
25	146,65	0,25	0,00014665	0,0625	5,3766E-09
35	190,40	0,35	0,0001904	0,1225	9,0630E-09