U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

# REABILITAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE BETÃO APARENTE

**RITA ALEXANDRA MATEUS CATARINO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JULHO 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, 2010*.

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 minha Mãe e ao meu Pai.

Ao Paulo.

Em especial,

à memória dos meus Avós.

*Há pessoas que vêem as coisas como elas são e que perguntam a si mesmas: "Porquê?" e há pessoas que sonham as coisas como elas jamais foram e que perguntam a si mesmas: "Por que não?"*

*Bernard Shaw*

**AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Nuno Ramos, como orientador deste trabalho, dirijo um especial agradecimento pela orientação, disponibilidade e atenção e pelo incentivo e apoio tão imprescindíveis para que a elaboração deste trabalho se tornasse uma realidade.

À Sika Portugal, S.A., na pessoa da Eng.ª Juliana Pires, e à Saint-Gobain Weber Portugal, S.A., nas pessoas do Eng.º Luis Silva e do Eng.º Leonel de Almeida, pela colaboração, atenção e esclarecimentos prestados que em muito contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha mãe e ao meu pai um especial agradecimento, grande parte daquilo que sou devo-lhes a eles. Obrigado pelo constante apoio, incentivo, força e carinho, sempre presentes em cada passo meu.

À minha mãe, simplesmente pela grande mulher que é.

Ao meu pai, simplesmente pela sabedoria, incentivo e força sempre presentes em cada palavra.

Ao Paulo, por ser simplesmente a pessoa que é, por todo carinho, apoio, compreensão, força, por cada sorriso com os quais me contagia de alegria e por acreditar.

Aos meus padrinhos, Sr. Abílio e D. Conceição, e à Tia Avó Cruz pelo sorriso carinhoso com que sempre me recebem e também por tudo aquilo que me ensinaram.

À Amie pelo apoio, pela força e por estar desde sempre ao meu lado.

À minha família e aos meus amigos em geral por todo o incentivo.

Aos meus avós que, embora já não estejam entre nós, me transmitiram, como puderam, os maiores valores de que dispunham. Os seus valores interiores como grandes pessoas que eram e que, para mim, continuarão a ser.

## RESUMO

De uma forma geral, assiste-se hoje em dia, a uma mudança de paradigma no sector da construção civil. A reabilitação assume uma vertente cada vez mais importante neste sector, em detrimento da construção em si.

Há muito que o betão armado deixou de estar associado apenas a uma solução estrutural. Hoje em dia surge muitas vezes como solução arquitectónica, compondo frequentemente a paisagem urbana. O domínio dos conhecimentos na área da reabilitação de superfícies de betão torna-se assim importante.

Nesta área existe já bibliografia publicada e normalização desenvolvidas. A NP 1504, uma importante norma nesta área, abrange já um vasto conjunto de princípios e métodos para a reparação e protecção de estruturas de betão armado. Os produtos existentes no mercado revelam também um esforço por parte dos fabricantes em acompanhar a evolução na área da reabilitação de superfícies de betão aparente. No entanto, é ainda necessário contribuir para a evolução dos conhecimentos já desenvolvidos.

Com a realização deste trabalho pretende-se primeiramente explorar a normalização e bibliografia existente, abordar as metodologias de reparação e protecção destas superfícies, explorar a resposta do mercado às exigências impostas pela normalização. Em paralelo explorar-se-á a adequabilidade, tanto da normalização como dos produtos disponíveis no mercado, aos requisitos estéticos necessariamente impostos a trabalhos de reabilitação de superfícies em betão aparente.


PALAVRAS-CHAVE: Patologias do betão, Reabilitação, Superfícies de betão aparente, Princípios e métodos de reparação e protecção, NP 1504.

## ABSTRACT

In general, we are witnessing today a paradigm shift in the construction industry. Rehabilitation takes an increasingly important aspect in this sector at the expense of actual construction.

There's a long time ago that the concrete is no longer associated only with a structural solution. Nowadays, often arises as architecture solution, compounding the urban landscape. The domain of knowledge in the architectural concrete design rehabilitation thus becomes important.

In this area there is already published literature and standards developed. EN 1504, an important standard in this area already covers a broad set of principles and methods for the repair and protection of concrete structures. The existing products on the market also reveal an effort by manufacturers to monitor developments in the field of rehabilitation of architectural concrete design. However, there's required to contribute to the development of the know-how that already exists.

This work intends to first explore the existing literature and standards, address the methods of repair and protection of these areas, exploring the market response to the standards. In parallel it will explore the suitability, of both standards and products available, to the aesthetic requirements imposed necessarily to the rehabilitation of concrete surfaces works.


KEYWORDS: Concrete pathologies, Rehabilitation, Architectural concrete design, Principles and methods of repair and restoration, EN 1504.

**ÍNDICE GERAL**

**AGRADECIMENTOS** ..... i
**RESUMO** ..... iii
**ABSTRACT** ..... v

# 1. INTRODUÇÃO ..... 1
**1.1. ASPECTOS GERAIS** ..... 1
**1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO** ..... 1
**1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO** ..... 2

# 2. PATOLOGIAS DO BETÃO ARMADO ..... 3
**2.1. INTRODUÇÃO** ..... 3
**2.2. CAUSAS DAS PATOLOGIAS** ..... 3
2.2.1. CAUSAS HUMANAS ..... 4
2.2.2. CAUSAS NATURAIS ..... 6
**2.3. DEGRADAÇÃO DO BETÃO** ..... 8
2.3.1. CAUSAS ESTRUTURAIS ..... 8
2.3.2. CAUSAS FÍSICAS ..... 8
2.3.2.1. Ciclos gelo-degelo ..... 8
2.3.2.2. Acções térmicas ..... 9
2.3.2.3. Cristalização de sais ..... 9
2.3.2.4. Erosão, abrasão e cavitação ..... 9
2.3.2.5. Retracção plástica ..... 10
2.3.3. CAUSAS PROVENIENTES DA ACÇÃO DO FOGO E DE ALTAS TEMPERATURAS ..... 11
2.3.4. CAUSAS QUÍMICAS ..... 11
2.3.4.1. Reacção alcali-inerte ..... 11
2.3.4.2. Agentes agressivos como sulfatos, água pura, sais e soluções ácidas ..... 12
2.3.4.3. Agentes biológicos ..... 13
**2.4. CORROSÃO DAS ARMADURAS** ..... 14
2.4.1. MECANISMO DE CORROSÃO ..... 14
2.4.2. CAUSAS RELACIONADAS COM AGENTES CORROSIVOS ..... 15

2.4.3. CAUSAS RELACIONADAS COM A CARBONATAÇÃO ..... 17

# 3. NP 1504 ..... 19

**3.1. INTRODUÇÃO** ..... 19

**3.2. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO** ..... 19

**3.3. QUADRO ESTRATÉGICO DE GESTÃO DA ESTRUTURA** ..... 21

**3.4. FASES DE UM PROJECTO DE REPARAÇÃO** ..... 23

**3.5. PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE PROTECÇÃO E REPARAÇÃO** ..... 24

3.5.1. PRINCÍPIOS E MÉTODOS RELACIONADOS COM A DETERIORAÇÃO DO BETÃO ..... 27

3.5.1.1. Protecção contra o ingresso (PI) ..... 27

3.5.1.2. Controlo da humidade (MC) ..... 28

3.5.1.3. Restauro do betão (CR) ..... 28

3.5.1.4. Reforço estrutural (SS) ..... 29

3.5.1.5. Aumento da resistência física (PR) ..... 29

3.5.1.6. Aumento da resistência química (RC) ..... 30

3.5.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS RELACIONADOS COM A CORROSÃO DAS ARMADURAS ..... 30

3.5.2.1. Preservação ou restauro da passividade (RP) ..... 30

3.5.2.2. Aumento da resistividade (RI) ..... 32

3.5.2.3. Controlo catódico (CC) ..... 33

3.5.2.4. Protecção catódica (CP) ..... 33

3.5.2.5. Controlo de áreas anódicas (CA) ..... 34

# 4. CASOS PRÁTICOS – PERSPECTIVA EXIGÊNCIAL ..... 37

**4.1. INTRODUÇÃO** ..... 37

**4.2. SUPERFÍCIES EM BETÃO APARENTE DETERIORADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS** ..... 37

4.2.1. ENSAIOS PRELIMINARES ..... 38

4.2.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE PROTECÇÃO E REPARAÇÃO GERAIS ..... 41

4.2.2.1. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção da carbonatação deteriorado pontualmente ..... 51

4.2.2.2. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção dos iões cloreto deteriorado pontualmente ..... 57

4.2.2.3. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção da carbonatação cuja secção está parcialmente deteriorada ..... 59

4.2.2.4. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção dos iões cloreto cuja secção está parcialmente deteriorada ..... 66

4.2.3. ENSAIOS E OBSERVAÇÕES PARA CONTROLO DE QUALIDADE ..... 69

**5. CASOS PRÁTICOS – PERSPECTIVAS DE DESEMPENHO** ..... 71

**5.1. INTRODUÇÃO** ..... 71

**5.2. SOLUÇÕES EXISTENTES NO MERCADO** ..... 71

5.2.1. CASO 1 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DA CARBONATAÇÃO DETERIORADO PONTUALMENTE ..... 71

5.2.2. CASO 2 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DOS IÕES CLORETO DETERIORADO PONTUALMENTE ..... 77

5.2.3. CASO 3 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DA CARBONATAÇÃO CUJA SECÇÃO ESTÁ PARCIALMENTE DETERIORADA ..... 82

5.2.4. CASO 4 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DOS IÕES CLORETO CUJA SECÇÃO ESTÁ PARCIALMENTE DETERIORADA ..... 89

5.2.5. SÍNTESE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS NO MERCADO ..... 96

**6. CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS** ..... 99

**6.1. CONCLUSÕES GERAIS** ..... 99

**6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS** ..... 101

**BIBLIOGRAFIA** ..... 103

**A. ANEXOS** ..... A1

**A.1. FACTORES A TER EM CONTA NA ESTRATÉGIA DE GESTÃO** ..... A2

**A.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS PARA A PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO** ..... A5

**A.3. PREPARAÇÃO DOS SUBSTRATOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE A POSTERIOR APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARAÇÃO** ..... A11

A.3.1. Preparação das armaduras ..... A11

A.3.2. Preparação do substrato de betão ..... A12

A.3.3. Preparação do substrato para a aplicação do revestimento de protecção superficial e inibidores de corrosão ..... A15

A.3.4. Considerações para a aplicação de revestimento activo da armadura ..... A16

A.3.5. Considerações para a argamassa aplicada à mão ..... A16

A.3.6. Considerações para a aplicação do revestimento de protecção superficial ..... A17
A.3.7. Considerações para a aplicação do inibidor de corrosão no betão ..... A17
A.3.8. Considerações para a aplicação da impregnação hidrofóbica ..... A17
A.3.9. Considerações para a aplicação do produto de colagem ..... A18
A.3.10. Considerações para a aplicação de argamassa cofrada ..... A18
**A.4. ENSAIOS E OBSERVAÇÕES PARA CONTROLO DE QUALIDADE** ..... A19

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. – Principais causas relacionadas com a deterioração precoce do betão armado, relacionadas com a fase de execução (adaptado de [1, 2]). ..... 4

Fig. 2.2. – Aparecimento de chochos em viga de betão armado, expondo a sua armadura. ..... 5

Fig. 2.3. – Principais causas e mecanismos de deterioração do betão simples e armado (adaptado de [3, 5]). ..... 6

Fig. 2.4. – Eflorescências provocadas pela evaporação da água à superfície de uma parede de betão armado. ..... 9

Fig. 2.5. – Mecanismo de formação de fissuras por retracção plástica [7]. ..... 10

Fig. 2.6. – Mecanismo de formação de fissuras por retracção plástica [7]. ..... 10

Fig. 2.7. – Laje em betão armado afectada por um incêndio [3]. ..... 11

Fig. 2.8. – Fendilhação devida à reacção álcalis-agregado [7]. ..... 12

Fig. 2.9. – Formação de precipitados pela infiltração e escorrência das águas da chuva na cobertura inacessível (estrutura de betão armado). ..... 12

Fig. 2.10. – Presença de colonização biológica provocando alguma deterioração da viga de betão armado. ..... 13

Fig. 2.11. – Ataque biológico em esgotos [6, 8]. ..... 14

Fig. 2.12. – Processo anódico e catódico do modelo simplificado do mecanismo de corrosão [3]. ..... 15

Fig. 2.13 – Corrosão das armaduras por acção dos cloretos. ..... 16

Fig. 2.14. – Corrosão por picagem provocada por cloretos (adaptado de [8]). ..... 17

Fig. 2.15. – Corrosão por carbonatação (adaptado de [3]). ..... 18

Fig. 2. 16. – Corrosão das armaduras por carbonatação e consequente destacamento do recobrimento em elementos de betão armado. ..... 18

Fig. 3.1. – Interligação entre as diversas partes da NP 1504 (adaptado de [10, 11]). ..... 20

Fig. 3. 2. – Possibilidades para a reparação de um elemento deteriorado. (Adaptado de [5]) ..... 22

Fig. 3.3. – Fases típicas de um projecto de reparação [5]. ..... 23

Fig. 3.4. – Selecção dos sistemas e métodos a adoptar (adaptado de [14]). ..... 24

Fig. 3.5. – Conjugação entre princípios, métodos, sistemas e produtos apresentados na NP 1504. .. 25

Fig. 3. 6. – Princípios e métodos relacionados com os defeitos no betão [5]. ..... 25

Fig. 3.7. – Princípios e métodos relacionados com a corrosão das armaduras [5]. ..... 26

Fig. 3. 8. – Da esquerda para a direita, esquema tipo de: impregnação hidrofóbica, impregnação e revestimento [16]. ..... 27

Fig. 3.9. – Impregnação hidrofóbica [10]. ..... 28

Fig. 3.10. – Restauração do betão [10, 19]. ..... 28

Fig. 3.11. – Reforço com placas coladas em aço ou noutro material adequado [21]. ..... 29

Fig. 3.12. – Princípio geral da realcalinização electroquímica (adaptado de [19]). ..... 31

Fig. 3.13. – Realcalinização electroquímica do betão carbonatado [21,29]..... 31

Fig. 3.14. – Princípio geral da extracção electroquímica de cloretos (adaptado de [19]). ..... 32

Fig. 3.15. – Extracção electroquímica de cloretos [19]. ..... 32

Fig. 3.16. – Protecção catódica por corrente impressa com ânodos localizados [9]. ..... 33

Fig. 3.17. – Protecção catódica pela colocação de ânodos de sacrifício [9]..... 34

Fig. 3.18. – Aplicação de revestimento estanques e aplicação de revestimento activo em armaduras (da esquerda para a direita) [29]. ..... 34

Fig. 3.19. – Aplicação superficial de inibidores de corrosão por migração. Esta aplicação pode ser realizada com rolo, pulverizador ou trincha [19]..... 35

Fig. 4.1. – Casos práticos em estudo. ..... 37

Fig. 4.2. – Equipamento para a determinação do teor de cloretos [3]. ..... 38

Fig. 4.3. – Reacção da fenolftaleína numa carote de betão onde o teste indica que o betão está carbonatado até uma profundidade entre os 1,5 a 2,0 cm [3]. ..... 39

Fig. 4.4. – Medidor de recobrimento [3]..... 39

Fig. 4.5. – Recolha de dados relativos à taxa de corrosão e à resistividade [3]. ..... 40

Fig. 4.6. – Medição da resistividade [3]. ..... 41

Fig. 4.7. – Adequação da escolha dos princípios, métodos, produtos e sistemas ao resultados dos ensaios relativos ao teor de cloretos e à carbonatação presentes no elemento em estudo. ..... 42

Fig. 4.8. – Consideração dos níveis de corrosão das armaduras, determinado através de ensaios, na estratégia da reabilitação do elemento..... 43

Fig. 4.9. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento. ..... 44

Fig. 4. 10. – Evolução da carbonatação com o tempo de exposição e profundidade de carbonatação de provetes pintados e não pintados [14, 36]. ..... 49

Fig. 4. 11. – Permeabilidade ao vapor de água de diferentes tipos de revestimentos por pintura [14, 36]. ..... 49

Fig. 4. 12. – Coeficiente de absorção de água de revestimentos por pintura de base aquosa e de solvente orgânico [14]..... 50

Fig. 4. 13. – Coeficiente de absorção de água de revestimentos por pintura de base aquosa e de solvente orgânico [14]..... 50

Fig. 4.14. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento localmente. ..... 52

Fig. 4.15. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento. ..... 52

Fig. 4.16. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento localmente. ..... 57

Fig. 4.17. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento. ..... 58

Fig. 4.18. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento de forma extensa. 60

Fig. 4.19. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento. ..... 61

Fig. 4. 20. – Cofragem com abertura no topo [31]. ..... 64

Fig. 4. 21. – Pressão exercida sobre a cofragem de uma viga [31]. ..... 65

Fig. 4. 22. – Aplicação de argamassa por injecção em paramentos horizontais [32]. ..... 65

Fig. 4. 23. – Aplicação de argamassa por injecção em paramentos horizontais [32]. ..... 66

Fig. 4.24. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento de forma extensa. 67

Fig. 4.25. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento. ..... 68

Fig. 5. 1. – Corte longitudinal do elemento deteriorado pontualmente pela acção da carbonatação... 72

Fig. 5. 2. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504. ..... 72

Fig. 5. 3. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 1. ..... 73

Fig. 5. 4. – Acabamento da camada final de argamassa fina de impermeabilização (cinzento) [78]... 76

Fig. 5. 5. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504. ..... 77

Fig. 5. 6. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 2. ..... 78

Fig. 5. 7. – Acabamento conferido pela aplicação da impregnação hidrofóbica [79]. ..... 81

Fig. 5. 8. – Corte transversal da secção do elemento parcialmente deteriorada pela acção da carbonatação. ..... 82

Fig. 5. 9. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504. ..... 82

Fig. 5. 10. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 3. ..... 83

Fig. 5. 11. – Acabamento conferido pelo revestimento de protecção [80]. ..... 88

Fig. 5. 12. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504. ..... 89

Fig. 5. 13. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 4. ..... 90

Fig. 5. 14. – Acabamento conferido pelo revestimento de protecção [29, 81]. ..... 95

Fig. A. 1. – Factores a considerar na escolha da estratégia de gestão [5]. ..... A3

Fig. A. 2.– Categorias de produtos e sistemas de protecção e reparação [82]. ..... A7

Fig. A. 3. – Tipos químicos dos produtos e sistemas de protecção e reparação [82]. ..... A8

Fig. A. 4. – Limpeza com escova de aço [31]. ..... A11

Fig. A. 5. – Limpeza por detrás dos varões [31]. ..... A12

Fig. A. 6. – Detecção por percussão e remoção de material desligado [32]. ..... A13

Fig. A. 7. – Limpeza a jacto de areia e ar comprimido [31]. ..... A13

Fig. A. 8. – Remoção do betão por percussão mecânica, por disco para realizar o desbaste do contorno da área a reparar e por jacto com água [32]. ..... A14

Fig. A. 9. – Remoção do betão [52]. ..... A14

Fig. A. 10. – Remoção da camada micro-fissurada [32]. ..... A15

Fig. A. 11. – Argamassa aplicada à mão em camadas [32]. ..... A16

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. – Deteriorações comuns nas estruturas de betão [3]. ..... 7

Quadro 4.1. – Níveis de corrosão associados a valores de referência da taxa de corrosão e da resistividade[3]..... 40

Quadro 4. 2. – Requisitos de desempenho de produtos de reparação não estrutural para restauração do betão [20]..... 53

Quadro 4. 3. – Processos de preparação dos substratos armadura e betão [32, 50]. ..... 54

Quadro 4.4. – Requisitos de desempenho para o revestimento por pintura [20]. ..... 55

Quadro 4. 5. - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica [16]. ..... 59

Quadro 4. 6. - Requisitos de desempenho para o produto de colagem de argamassas em betão endurecido [33]..... 61

Quadro 4. 7. – Requisitos de desempenho de produtos de reparação estrutural para restauração do betão [16]..... 63

Quadro 5. 1. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30]. ..... 74

Quadro 5. 2. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20]. ..... 75

Quadro 5. 3. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16]. ..... 76

Quadro 5. 4. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30]. ..... 79

Quadro 5. 5. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20]. ..... 80

Quadro 5. 6. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16]. ..... 81

Quadro 5. 7. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30]. ..... 84

Quadro 5. 8. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20]. ..... 85

Quadro 5. 9. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20] e pela NP 1504-2[16]. ..... 86

Quadro 5. 10. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16]. ..... 87

Quadro 5. 11. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30]. ..... 91

Quadro 5. 12. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20]. ..... 93

Quadro 5. 13. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16]. ..... 94

Quadro A. 1. – Princípios e métodos apresentados pela NP 1504-9[5]. ..... A5

Quadro A. 2. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para as condições do substrato antes ou depois da preparação [50]. ..... A19

Quadro A. 3. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para a aceitação de produtos e sistemas [50]. ..... A22

Quadro A. 4. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para as condições e requisitos antes ou durante a aplicação [50]. ..... A22

Quadro A. 5. – Ensaios e observações para controlo de qualidade da condição final dos produtos e sistemas endurecidos [50]. ..... A24

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Fórmulas químicas

$e^-$ – electrão;

$CaCO_3$ – molécula de carbonato de cálcio;

$Cl^-$ – ião cloreto;

$CO_2$ – molécula de dióxido de carbono;

$Fe^{2+}$ – ião de ferro;

$Fe(OH)_2$ – hidróxido de ferro (II);

$H^+$ – Ião hidrogénio;

$H_2O$ – molécula de água;

$O_2$ – molécula de oxigénio;

$OH^-$ – ião hidroxilo.

Siglas

A/C – relação água/cimento;

ATE – aprovações técnicas europeias;

CA – controlo das áreas anódicas;

(CC) – argamassas hidráulicas ou betões hidráulico;

CC – controlo catódico;

CP – protecção catódica;

CR – restauração do betão;

EN – norma europeia;

(H) – ligantes hidráulicos;

MC – controlo da humidade;

NP – norma portuguesa;

(PC) – argamassas ou betões poliméricos;

(PCC) – argamassas ou betões com cimento hidráulico e polímeros;

PI – protecção contra o ingresso;

PR – aumento da resistência física;

RC – aumento da resistência química;

RI – Aumento da resistividade;

RP – preservação e restauração da passividade;

SS – reforço estrutural;

Notações escalares latinas

$d_K$ – profundidade média de carbonatação (mm);

$S_D$ – espessura da camada de ar de difusão equivalente (m);

w – coeficiente de absorção de água ($kg/m^2.h^{0,5}$).

Notações escalares gregas

$\Delta$ – deslocamento (mm).

# 1
# INTRODUÇÃO

## 1.1. ASPECTOS GERAIS

Da longa experiência da utilização do betão armado na construção surgem os conhecimentos adquiridos e sustentados sobre as suas variadas patologias e respectivas causas.

Actualmente o betão armado não é apenas seleccionado como uma das principais soluções do ponto de vista estrutural. Hoje em dia, dada a evolução das tendências arquitectónicas, a cor, o aspecto "face à vista" ou "cofrado", a textura, etc. das superfícies de betão aparente surgem muitas vezes como opção, do ponto de vista estético, para o acabamento de qualquer construção. Assim sendo o betão armado, na actualidade, é seleccionado não só pelo seu desempenho estrutural mas pelas suas potencialidades estéticas.

Desta forma, surge a necessidade de reflectir sobre a temática da reabilitação de superfícies de betão aparente, não só focada na reparação e protecção do elemento deteriorado, mas também na integração destes trabalhos na aparência geral da própria construção.

## 1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Seguidamente apresentar-se-ão os objectivos que irão acompanhar a execução deste trabalho:

- Aprofundamento de conhecimentos na área da protecção e reparação de estruturas de betão armado, mais precisamente no que se refere à reabilitação de superfícies de betão aparente;
- Estudo do normativo existente neste âmbito, nomeadamente a NP 1504 "Produtos e Sistemas Para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão Armado", enquadrado de acordo com as principais causas de deterioração do betão e corrosão das armaduras;
- Pesquisa de fontes bibliográficas independentes à norma referida e às recomendações de fabricantes que desenvolvem produtos na área da reabilitação de elementos de betão armado;
- Definição de metodologias de reabilitação de superfícies em betão aparente;
- Exploração da aplicabilidade da norma referida com o recurso à simulação de casos práticos mais comuns;
- Exploração e selecção de produtos no mercado enquadrados no normativo e igualmente articulados com os sistemas desenvolvidos, a partir da NP 1504, para cada caso prático;

- Exploração de considerações e soluções, tanto por parte da NP 1504 como dos produtos existentes no mercado, no âmbito da preocupação do ponto de vista estético, que acompanha qualquer estratégia de manutenção e/ou reabilitação de elementos de betão aparente.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos e quatro anexos:

- Capítulo 1. Introdução: de forma muito sucinta são descritas considerações sobre o tema deste trabalho, sobre os seus objectivos e a sua organização;
- Capítulo 2. Patologias do betão armado: é apresentada uma abordagem sobre as causas mais comuns das patologias do betão armado;
- Capítulo 3. NP 1504: é feita uma introdução à NP 1504, descrevendo os seus objectivos, organização, e principalmente o conjunto de princípios e métodos em que se baseia;
- Capítulo 4. Casos práticos – Perspectiva exigencial: é explorada, neste capítulo, a aplicabilidade da NP 1504 com o recurso à simulação de quatro casos práticos;
- Capítulo 5. Casos práticos – Perspectivas de desempenho: com o recurso à simulação dos mesmos casos, é explorada agora a articulação dos produtos existentes no mercado com os pressupostos apresentados no capítulo anterior;
- Capítulo 6. Conclusões e gerais e desenvolvimentos futuros – de forma geral são apresentadas as conclusões deste trabalho bem como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.
- Anexo A.1.: Factores a ter em conta na estratégia de gestão;
- Anexo A.2.: Princípios e métodos para a protecção e reparação de estruturas de betão;
- Anexo A.3.: Preparação dos substratos e considerações sobre a posterior aplicação dos materiais de reparação;
- Anexo A.4.: Ensaios e observações para o controlo de qualidade.

# 2
# PATOLOGIAS DO BETÃO ARMADO

## 2.1. INTRODUÇÃO

Dos materiais de construção mais conhecidos, o betão e por conseguinte o betão armado, serão talvez os materiais mais utilizados na construção civil. Desde o século XX até aos dias de hoje, o betão armado surge como a solução estrutural mais corrente no parque edificado em Portugal.

A extensa utilização deixa-nos um registo próprio do seu comportamento face ao meio em que está inserido. A sua capacidade de resposta aos diversos agentes agressivos torna-o num material sensível, verificando-se assim o aparecimento de variadas patologias associadas.

Com a mais-valia do seu comportamento estrutural bastante estudado, o betão armado transmite uma grande confiança relativamente à sua resistência e consequentemente à sua durabilidade. No entanto, esta estará ameaçada, transformando-o num material vulnerável, sempre que se despreza a implementação de medidas que previnam a sua deterioração precoce.

É do conhecimento actual que, a concepção do projecto, a sua execução e utilização determinam também o desempenho que as estruturas de betão armado detêm durante o seu ciclo de vida, em níveis de segurança, utilização e aparência mais ou menos desejáveis.

Nos subcapítulos seguintes, far-se-á uma descrição sucinta das patologias e respectivas causas e mecanismos associados que, de uma forma geral, afectam o desempenho do betão armado mais frequentemente.

## 2.2. CAUSAS DAS PATOLOGIAS

A verdadeira natureza e desempenho do betão armado resultam da consonância de dois materiais distintos: o betão e o aço. Esta consonância será sempre melhor conseguida quanto melhor for a qualidade implementada no projecto, na execução, na utilização e na manutenção da estrutura e quanto menor for a sua exposição a agentes agressivos.

A degradação dos elementos de betão armado pode estar então, associada a causas naturais e causas humanas. Estas últimas muitas vezes são responsáveis pela maior exposição dos elementos aos mecanismos associados às causas naturais.

É, no entanto, importante referir que as patologias existentes nestes elementos resultam, na sua generalidade, da actuação conjunta de diversas causas/agentes, que de uma forma continuada promovem e agravam a seu estado de deterioração.

### 2.2.1. CAUSAS HUMANAS

Durante todo o seu ciclo de vida, o desempenho, a durabilidade e as patologias mais ou menos precoces dos elementos de betão armado, também estão muitas vezes relacionadas com falhas humanas. Causas estas, que não são passíveis de encobrir a longo prazo, já que a elas estão associadas anomalias que não só surgem, de uma forma geral, precocemente como frequentemente. As falhas humanas podem estar presentes ao longo de todo o ciclo de vida, nomeadamente nas fases de projecto, execução, utilização e manutenção [1].

As causas mais comuns associadas às patologias que surgem na fase de projecto são as seguintes [1, 2]:

- Modelização inadequada da estrutura e má avaliação das cargas actuantes;
- Disposições inadequadas ao ambiente;
- Elementos de projecto inadequados;
- Falta da compatibilização entre a estrutura e a arquitectura;
- Especificações inadequadas de materiais;
- Pormenorização insuficiente ou errada;
- Detalhes construtivos inexequíveis;
- Erros de dimensionamento.

Já na fase da construção observam-se, de uma forma geral as seguintes causas apresentadas na Fig. 2.1..

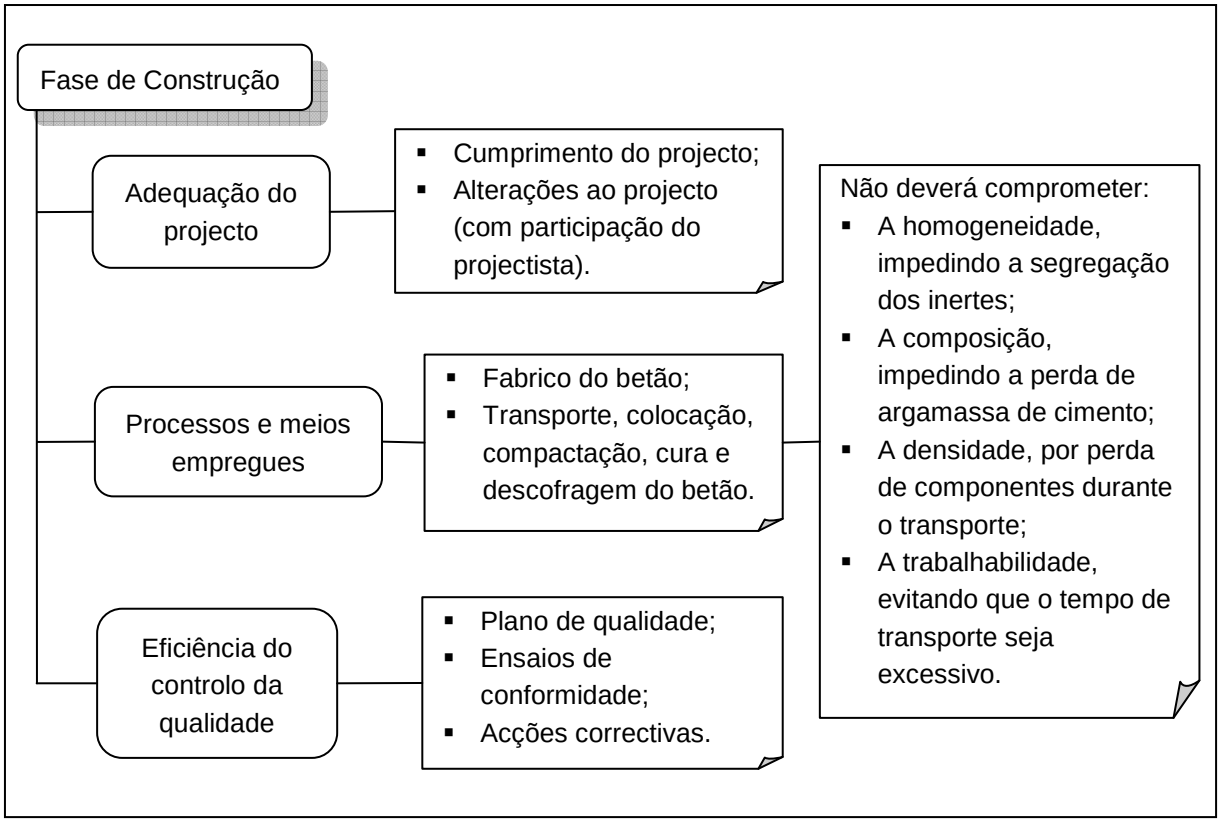



Fig. 2.1. – Principais causas relacionadas com a deterioração precoce do betão armado, relacionadas com a fase de execução (adaptado de [1, 2]).

A colocação, a compactação, cura e a descofragem do betão, quando mal realizadas, contribuem para o mau desempenho do elemento de betão e muitas vezes são responsáveis pelo aparecimento de zonas mais frágeis, fortemente sujeitas ao ataque de agentes agressivos.

Uma compactação mal executada poderá provocar a degradação rápida do betão, por exemplo, nas seguintes situações [2]:

- Aparecimento de chochos ou ninhos de inertes no interior do elemento ou até mesmo superficialmente (Fig. 2.2.);
- Uma camada de recobrimento de espessura inferior ao desejável, comprometendo a protecção dada às armaduras;
- Segregação do betão;
- Expulsão da argamassa de cimento para a superfície.

Fig. 2.2. – Aparecimento de chochos em viga de betão armado, expondo a sua armadura.

Uma cura incorrecta poderá sujeitar o betão à acção de choques térmicos, arrefecendo-o superficialmente de forma brusca, conduzindo à retracção precoce da sua camada superficial. Desta forma, ao surgirem tensões à superfície do betão que não se verificam no seu interior, desenvolver-se-á o aparecimento de fissuras com pouca profundidade e de forma pontual.

Já uma descofragem inadequada poderá provocar no elemento de betão armado a perda da sua planeza e da aparência possivelmente exigida em termos estéticos.

Na fase de utilização poderão surgir alterações estruturais e novas solicitações, para as quais o elemento não foi dimensionado, o que pode originar a sua deterioração.

No que se refere á manutenção, a prática comum é que esta seja realizada apenas quando o grau de degradação dos elementos é, de certa forma, visível ao utilizador. Nestas circunstâncias o betão encontrar-se-á muitas vezes num estado de degradação avançado. No caso de não existir nenhum plano de manutenção, os elementos irão responder às solicitações físico-mecânicas e químicas com a qualidade com que foram projectados e executados, não sendo possível prevenir o aparecimento de anomalias mas sim tratá-las quando se encontram num estado avançado. Posto isto, o ciclo de vida da estrutura será encurtado, o betão armado irá degradar-se de uma forma natural, ficando exposto a agentes agressivos muito mais rapidamente do que seria desejável.

### 2.2.2. CAUSAS NATURAIS

As causas naturais e os mecanismos de deterioração, já muito investigados e documentados, podem subdividir-se em duas vertentes distintas: referentes à degradação do betão e à corrosão das armaduras (Fig. 2.3.) [3, 4]. As causas e os mecanismos referidos podem afectar o betão armado mais frequentemente, como no caso da carbonatação, ou com menor probabilidade como no caso de explosões acidentais. Ainda assim também é possível que o próprio betão armado seja igualmente afectado pela combinação de vários agentes e mecanismos e estes podem ainda ser intrínsecos ou extrínsecos a este.

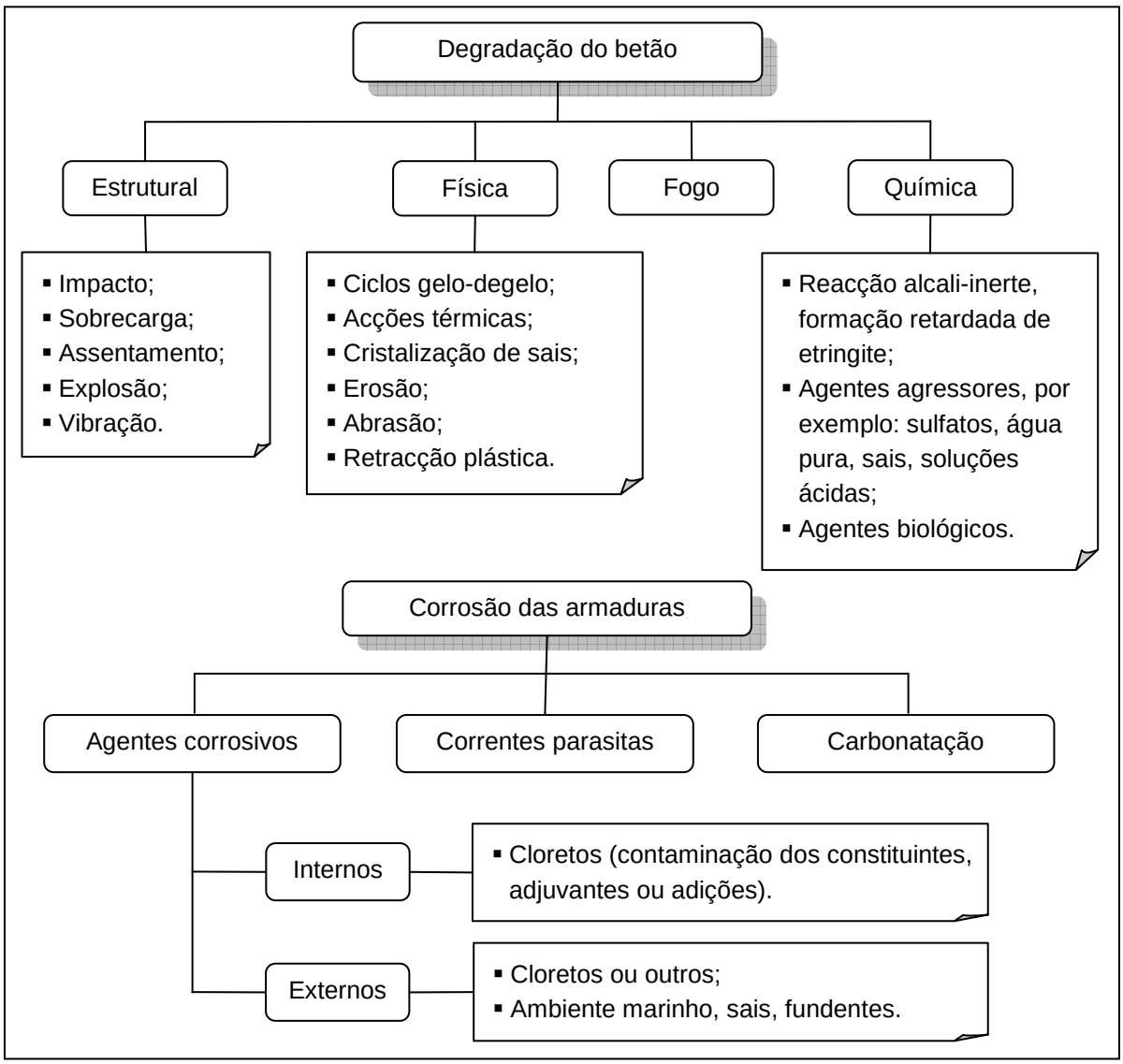



Fig. 2.3. – Principais causas e mecanismos de deterioração do betão simples e armado (adaptado de [3, 5]).

De uma forma geral, é possível associar a cada mecanismo de deterioração anomalias tipo que o elemento de betão armado apresenta face à acção de determinados agentes. O Quadro 2.1. pretende evidenciar as interligações existentes entre agentes, processos ou mecanismos associados e anomalias consequentes.

Quadro 2.1. – Deteriorações comuns nas estruturas de betão [3].

| Natureza do agente | | Processo/mecanismo | Anomalia/defeito |
|---|---|---|---|
| Mecânica | Carga prolongada | Fluência | Deformação permanente, fissuração |
| | Carga cíclica | Fadiga | Deformação excessiva, fissuração, colapso |
| Biológica | Microorganismos | Produção de ácidos | Lixiviação |
| | Organismos, plantas | Deposição de matéria orgânica/sujidade | Degradação do aspecto |
| Química | Ácido | Lixiviação | Desintegração |
| | Água pura | Lixiviação | Desintegração |
| | Sulfato | Formação de etringite e gesso | Expansão, desintegração |
| | Álcali+sílica | Reacção alcali-sílica | Expansão |
| | Álcali+pedra carbonatada | Reacção alcali-pedra carbonatada | Expansão |
| | Dióxido de carbono | Carbonatação generalizada | Despassivação das armaduras |
| | Cloretos | Despassivação local | Corrosão por picada das armaduras |
| Física | Baixa temperatura | Gelo | Desintegração |
| | Variação da temperatura | Expansão | Encurtamento, dilatação. Deformação imposta |
| | Humidade relativa | Retracção ou expansão | Encurtamento, dilatação. Deformação imposta |
| | Temperatura | Gradiente | Deformação (curvatura) |
| | Humidade relativa | Gradiente | Deformação (curvatura) |
| | Gelo+sais de descongelamento | Remoção de calor | Escamação |
| | Depósitos atmosféricos | Deposição de matéria orgânica/sujidade | Degradação do aspecto |
| Uso | Pisoteio, tráfego | Desgaste | Perda de função |
| | Água corrente | Erosão | Danificação da superfície |
| | Água turbulenta | Cavitação | Escavação da superfície |

Nos subcapítulos seguintes serão abordadas as causas e mecanismos de deterioração do betão armado, bem como as anomalias associadas.

## 2.3. DEGRADAÇÃO DO BETÃO

### 2.3.1. CAUSAS ESTRUTURAIS

Os mecanismos de deterioração associados a causas estruturais actuam de forma extrínseca ao betão armado, sujeitando-o muitas vezes a um estado de tensão, de uma forma prolongada ou cíclica, não consonante com a sua capacidade resistente. Desta forma surge então o aparecimento de deformações permanentes ou excessivas com consequentes fissurações e, em último caso, o colapso da estrutura.

Exemplos dessas acções serão:

- Impactos de corpos dotados de uma determinada massa projectados a velocidades imprevistas (como o caso de choques de veículos contra elementos estruturais numa garagem ou impacto de rochedos de grande dimensão que por alguma razão se desprendem e atingem elementos estruturais de edificações);
- Sobrecargas, induzindo no elemento estrutural de betão armado um carregamento extra para o qual não estará preparado, gerando-se assim esforços e deformações superiores aos esperados;
- Assentamentos, como por exemplo, assentamentos diferenciais ao nível das fundações, com o consequente movimento de acompanhamento dos restantes elementos estruturais;
- Explosões acidentais;
- Vibrações oriundas de equipamentos mecânicos e maquinarias industriais e resultantes da acção de sismos.

### 2.3.2. CAUSAS FÍSICAS

#### 2.3.2.1. Ciclos gelo-degelo

A deterioração do betão devida à acção do gelo está directamente relacionada com o processo de transformação de água em estado líquido para o estado sólido. A esta alteração de fase está associado um aumento de volume de cerca de 9%, que pode causar a deterioração do betão, surgindo forças internas superiores à sua resistência à tracção. Como é perceptível esta degradação será tanto mais expressiva quanto maior for a saturação dos poros do elemento de betão.

Sendo este um agente que actua de forma repetitiva em ciclos de gelo-degelo, a vulnerabilidade do elemento exposto à sua acção aumenta progressivamente, apresentando-se a sua deterioração sob a forma de fendilhação e delaminação, provocando a desintegração do elemento.

Será importante referir que, ao contrário do que é expectável, este fenómeno não se inicia no momento em que as temperaturas atinjam valores próximos dos 0 ºC, dada a grande dispersão dos poros. Apenas um terço da água dos poros congela a temperaturas da ordem dos -30 ºC e apenas dois terços congela a temperaturas da ordem dos -60 ºC [6]. Deste modo a dimensão dos poros e capilares é determinante na resposta do betão armado à acção do gelo.

#### 2.3.2.2. Acções térmicas

A variação de temperaturas a que está exposto, exteriormente, um elemento de betão armado gera um estado de tensões directamente relacionado com as suas restrições de movimento e com a variação da temperatura. Desta forma surgem tensões de tracção e compressão que, associadas à restrição de movimento, originam fendilhação.

#### 2.3.2.3. Cristalização de sais

É um fenómeno idêntico à acção do gelo anteriormente referida. Pode ocorrer quando o elemento entra em contacto com uma solução aquosa de sais numa das faces e noutra face dar-se-á simultaneamente a evaporação da água. Este mecanismo provoca a deposição de sais à superfície do elemento, originando eflorescências, no caso de termos uma velocidade de evaporação baixa, como é visível na Fig. 2.4.. Pelo contrário, se a velocidade de evaporação for alta, a solução não terá a possibilidade de ascender à superfície do elemento e a cristalização dos sais dar-se-á no seu interior, originando criptoeflorescências e por conseguinte a fendilhação do betão. Assim sendo, o principal factor que determina a deterioração do betão pela acção da cristalização dos sais é a sua permeabilidade [6].

Este mecanismo de deterioração é mais expressivo em climas quentes e áridos e sobretudo em situações particulares como estruturas em contacto directo com a água do mar.

Fig. 2.4. – Eflorescências provocadas pela evaporação da água à superfície de uma parede de betão armado.

#### 2.3.2.4. Erosão, abrasão e cavitação

De uma forma geral, a pasta de cimento que compõe o betão possui uma resistência ao desgaste inferior à dos inertes que o compõem. Sendo portanto estes últimos que irão contrariar a progressiva diminuição de massa na zona superficial do betão, associados à [6]:

- Erosão – associada à acção de água corrente, danificando o elemento superficialmente;
- Abrasão – provocada pelo deslizamento superficial e impacto de objectos como ocorre pelo tráfego de veículos e pessoas;
- Cavitação – associada à acção de águas turbulentas que escoam a elevada velocidade.

2.3.2.5. Retracção plástica

Durante a presa do betão, sobretudo na fase inicial, dá-se uma libertação de calor, resultante da reacção exotérmica que se produz. Quando ocorre, posteriormente, o arrefecimento, a velocidade de evaporação é superior à velocidade de exsudação gerando-se tensões internas, devido à contracção do betão, e por conseguinte ocorre a fissuração do elemento, como é possível observar no esquema ilustrado pela Fig. 2.5. e na Fig. 2.6.. Esta fissuração ocorre a muito curto prazo, poucas horas após a betonagem.

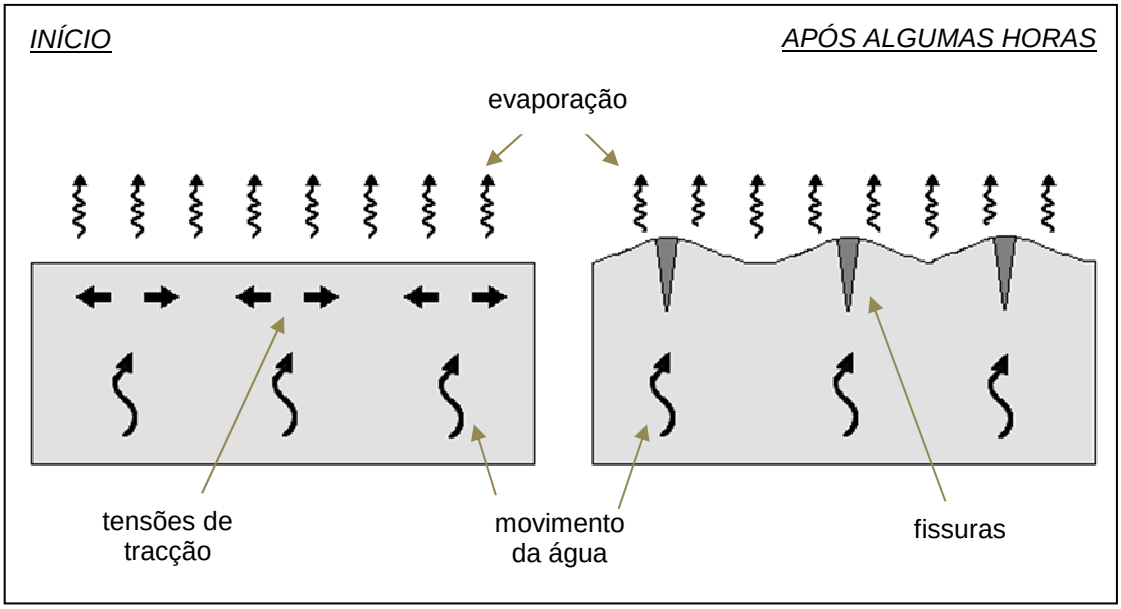



Fig. 2.5. – Mecanismo de formação de fissuras por retracção plástica [7].

Fig. 2.6. – Mecanismo de formação de fissuras por retracção plástica [7].

### 2.3.3. CAUSAS PROVENIENTES DA ACÇÃO DO FOGO E DE ALTAS TEMPERATURAS

A deterioração do betão pela acção do fogo ou de altas temperaturas está directamente associada à constituição da pasta de cimento e aos inertes que o compõem igualmente.

Compostos hidratados como silicatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados são geralmente os constituintes da pasta de cimento. Quando ocorre um acréscimo acentuado da temperatura estes compostos perdem de uma forma progressiva a água quimicamente combinada, passando de hidratados a desidratados. Esta desidratação acompanhada por uma alteração da sua estrutura conduz a uma perda de resistência significativa.

Os inertes, expostos a altas temperaturas, expandem de forma espontânea, com a alteração da sua rede cristalina. Inertes como o granito e o arenito, inertes siliciosos que contêm quartzo, sofrem uma expansão a temperaturas de 573 ºC, e inertes calcários expandem a partir de 700 ºC [6].

A conjunção da reacção da pasta de cimento e dos inertes à acção de altas temperaturas contribui para a degradação do betão por fissuração, lascamento e desintegração superficial e para uma consequente diminuição da sua resistência. Na Fig. 2.7. verifica-se a deterioração do betão pela acção de um incêndio.

Fig. 2.7. – Laje em betão armado afectada por um incêndio [3].

### 2.3.4. CAUSAS QUÍMICAS

#### 2.3.4.1. Reacção alcali-inerte

A degradação do betão provocada pelos álcalis traduz-se na fendilhação do elemento devido a reacções expansivas, cujas substâncias reactivas se encontram contidas nos inertes.

A presença de minerais como a sílica nos inertes que constituem o betão, é a expressão mais comum da deterioração causada pela reacção entre os álcalis e os inertes. Neste mecanismo de deterioração, o ataque dos minerais de sílica pelos hidróxidos alcalinos contidos no betão gera a formação de um gel de silicato alcalino, dotado de uma elevada capacidade de absorção de água. O aumento de volume ou a expansão ocorrida pela hidratação deste gel promove o aparecimento de elevadas tensões internas que conduzem à fendilhação do betão (Fig. 2.8.) [3, 6].

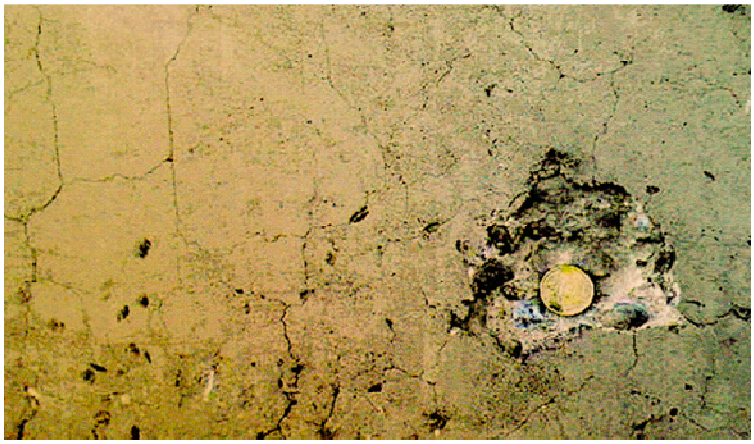


Fig. 2.8. – Fendilhação devida à reacção álcalis-agregado [7].

### 2.3.4.2. Agentes agressivos como sulfatos, água pura, sais e soluções ácidas

Os componentes da pasta de cimento são susceptíveis de serem atacados pelos sulfatos apenas se estes se encontrarem em solução aquosa. De uma forma análoga ao mecanismo de reacção alcali-inerte, com a acção dos sulfatos, uma das formas de deterioração do betão é igualmente a expansão. Esta expansão surge associada à formação retardada de etringite ou sal de Candlot, com um progressivo aumento do volume originando fissurações. Da decomposição dos compostos hidratados da pasta de cimento pelo ataque dos sulfatos, surge ainda outra forma de deterioração, que conduz à perda da resistência do betão.

Águas provenientes da chuva, da condensação do vapor de água, do degelo são denominadas águas puras pelo seu défice em iões, principalmente em iões de cálcio. Quando entram em contacto com a superfície de um elemento de betão originam a sua lixiviação, dissolvendo o hidróxido de cálcio que o compõem. Esta lixiviação origina a formação de precipitados de sílica-gel e alumina-gel, conduzindo posteriormente à formação de eflorescências quando a percolação da água ocorre de forma contínua, como é possível verificar na Fig. 2.9..

Fig. 2.9. – Formação de precipitados pela infiltração e escorrência das águas da chuva na cobertura inacessível (estrutura de betão armado).

Os sais, nomeadamente os sais de magnésio e amónio, associados de forma geral a águas freáticas, águas do mar e efluentes industriais provocam a deterioração do betão por dissolução dos seus constituintes de cálcio da pasta de cimento.

O ataque de soluções ácidas é muito mais nocivo para o betão já que decompõe a pasta de cimento na sua totalidade, originando a deterioração do mesmo. Esta deterioração depende da agressividade do ácido e é mais nociva no caso de soluções correntes em detrimento de soluções estagnadas [3, 6].

#### 2.3.4.3. Agentes biológicos

As zonas porosas de um elemento de betão são muitas vezes propícias ao desenvolvimento de líquenes, musgos, algas, etc. A expansão que acompanha o seu crescimento acaba por provocar a deterioração do betão no local afectado, como está exemplificado na Fig. 2.10..

No entanto, é o ataque químico que se verifica nos esgotos que merece maior atenção. Na generalidade as águas dos esgotos são alcalinas e como tal não atacam o betão. No caso de a temperatura atingir níveis relativamente elevados e pela acção de bactérias, são produzidos agentes nocivos como o ácido sulfúrico. O betão é então deteriorado quer pelo ataque do ácido em si quer pelo ataque dos sulfatos (Fig. 2.11) [6, 8].

Fig. 2.10. – Presença de colonização biológica provocando alguma deterioração da viga de betão armado.

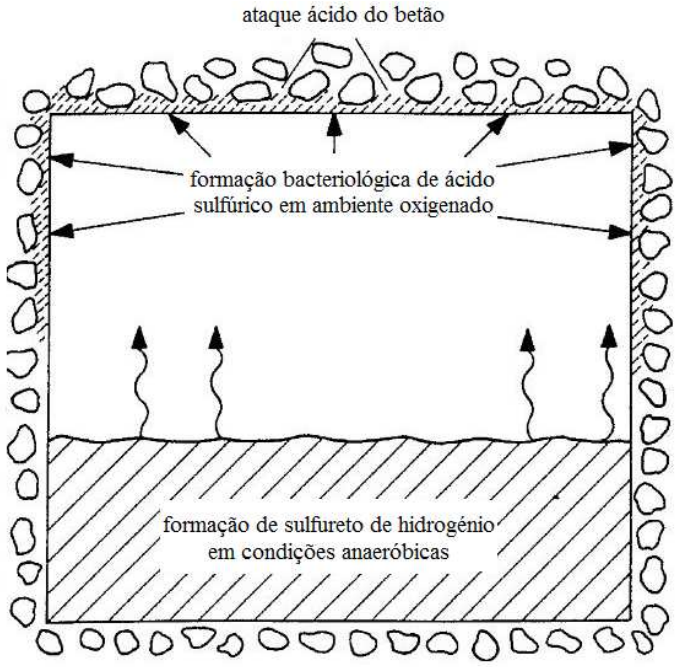



Fig. 2.11. – Ataque biológico em esgotos [6, 8].

## 2.4. CORROSÃO DAS ARMADURAS

Dos mecanismos de deterioração do betão armado, a corrosão das armaduras, será o que mais frequentemente se encontra nestes elementos. Este mecanismo conduz muitas vezes a patologias não só de carácter estético mas, principalmente, a patologias que comprometem o desempenho estrutural do elemento.

As suas causas principais são a acção de agentes corrosivos internos ou externos e a carbonatação, as correntes parasitas são menos frequentes pelo que não serão posteriormente descritas.

### 2.4.1. MECANISMO DE CORROSÃO

O betão, dada a sua composição, ao envolver a armadura, confere-lhe uma protecção física e química. A camada de recobrimento, que a protege fisicamente, gera uma barreira protectora contra elementos agressivos. A capacidade do betão de manter, no seu interior, um meio alcalino permite a formação da camada passiva que protege as armaduras da corrosão.

A corrosão das armaduras pressupõe a exposição das mesmas ao oxigénio em meio aquoso ou em ambientes com humidade relativa elevada. De uma forma simplificada, o mecanismo da corrosão divide-se em dois processos: o processo anódico e o processo catódico [3].

A dissolução do ferro, ou seja a libertação de electrões e a formação de iões $Fe^{2+}$ traduz o processo anódico. Já o processo catódico surge da combinação entre estes electrões com a água ($H_2O$) e o oxigénio ($O_2$), formando iões de hidroxilo ($OH^-$). Posteriormente às reacções secundárias associadas a este mecanismo, os iões de hidroxilo combinam-se com o ferro, produzindo a ferrugem. A Fig. 2.12. e as reacções químicas referidas em (1) e (2) ilustram os processos referidos.

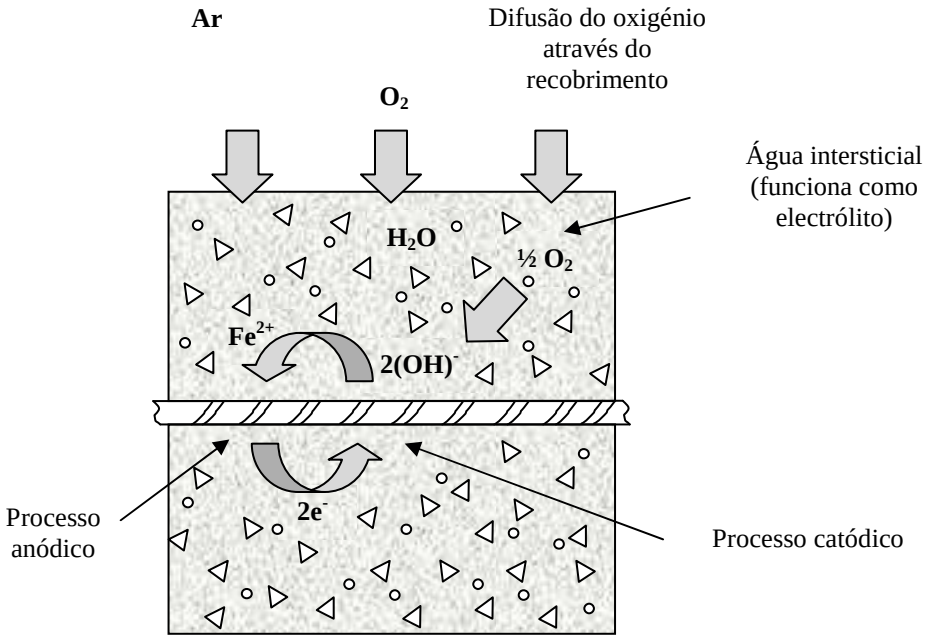



Fig. 2.12. – Processo anódico e catódico do modelo simplificado do mecanismo de corrosão [3].

Reacção química referente ao processo anódico:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\,e^{-} \qquad (1)$$

Reacção química referente ao processo catódico:

$$2\,e^{-} + \frac{1}{2}\,O_2 + H_2O \rightarrow 2(OH)^{-} \qquad (2)$$

### 2.4.2. CAUSAS RELACIONADAS COM AGENTES CORROSIVOS

Os agentes corrosivos, como os cloretos, de origem interna, estão presentes nos inertes naturais ou na água com que estiveram em contacto. Inertes provenientes de zonas onde possam estar em contacto com a água do mar, de forma geral, contêm uma elevada quantidade de sais de cloreto.

De origem externa são considerados os sais de cloreto provenientes, por exemplo, da água do mar ou do ambiente marítimo e de sais descongelantes utilizados em países nórdicos. Em climas amenos e quentes, nas zonas costeiras, a concentração excessiva destes sais torna-se bastante nociva, não apenas pelo contacto directo de elementos com água salgada mas também de elementos em contacto com o ar marinho.

A corrosão por acção dos cloretos, de forma geral, é uma corrosão localizada surgindo frequentemente a corrosão por "picadas" (*pitting*). A camada passivante que protege as armaduras apenas é destruída no caso da concentração de cloretos se tornar excessivamente elevada, conduzindo à corrosão generalizada das armaduras. Este tipo de corrosão atinge uma velocidade elevada, tornando-se assim bastante nociva gerando, simultaneamente, grande diminuição da secção das armaduras [6]. Na

Fig. 2.13. verifica-se o destacamento do recobrimento da parede de betão armado exposta totalmente a ambiente marítimo, como consequência da corrosão das armaduras pela acção dos cloretos.

Corrosão da armadura e destacamento do recobrimento em construção de betão armado à beira mar em zona portuária.

Varão à superfície em estado avançado de corrosão [9].

Fig. 2.13 – Corrosão das armaduras por acção dos cloretos.

A Fig. 2.14. e as fórmulas (1), (2) e (3) elucidam o mecanismo da corrosão por picadas e as reacções químicas associadas.

$$Fe^{2+} + Cl^{-} + 2\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^{+} + Cl^{-} \qquad (3)$$

Este mecanismo ocorre apenas em áreas reduzidas, provocando as “picadas” nos varões de aço, onde a película passiva desaparece. Quando esta película é destruída a armadura fica “exposta” formando-se assim uma região catódica. Os sais de cloreto, contendo iões de cloreto com carga negativa ($Cl^-$) actuam como catalisadores na zona anódica (a picada) e promovem a dissolução do ferro até que as correntes catódicas e anódicas se equilibrem. Os cloretos associar-se-ão aos iões de ferro, numa reacção instável, formando cloreto de ferro, o que obriga à libertação de electrões. Seguidamente o cloreto de ferro irá reagir com os iões de hidróxido ($OH^-$), originando hidróxido de ferro, libertando novamente iões de cloreto. Estas reacções instáveis ocorrem de uma forma cíclica com o consequente formação de ferrugem e com o abaixamento do pH nesta região. Facto este que acaba por agravar ainda mais a corrosão das armaduras, já que promove a destruição da película passiva que as protege.

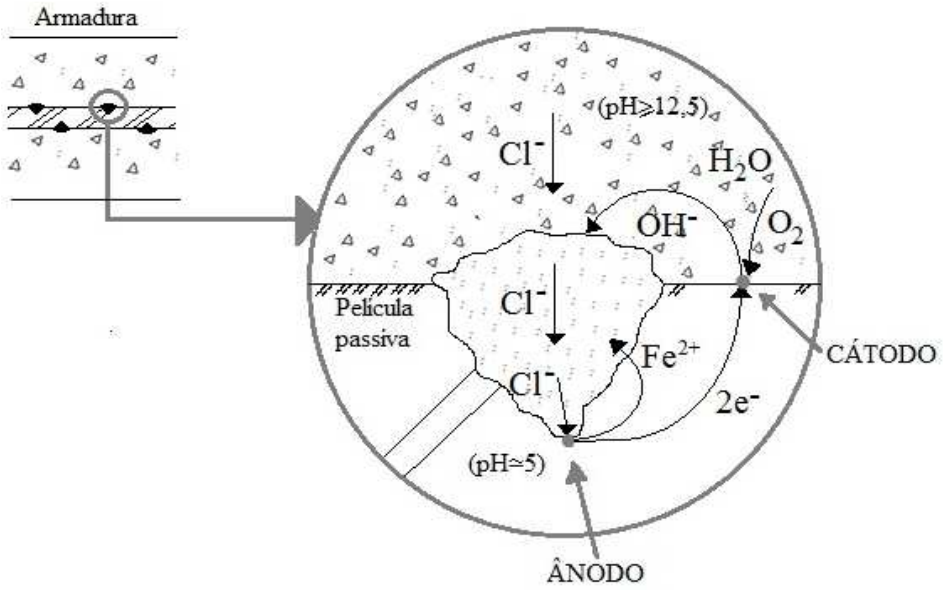



Fig. 2.14. – Corrosão por picagem provocada por cloretos (adaptado de [8]).

### 2.4.3. CAUSAS RELACIONADAS COM A CARBONATAÇÃO

Tal como na corrosão por acção de cloretos a corrosão gerada pela carbonatação induz igualmente a redução do pH do betão. No entanto, a corrosão gerada pela carbonatação afecta as armaduras de uma forma generalizada.

Este tipo de corrosão resulta do contacto do dióxido de carbono ($CO_2$) do ar com o elemento de betão armado. Na superfície do elemento o $CO_2$ irá reagir progressivamente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), um dos compostos hidratados presentes no betão. Este composto é responsável pela manutenção do ambiente alcalino no betão, sendo que a sua presença em elevadas quantidades atenua a progressão da carbonatação. Quando o $CO_2$ se combina com o $Ca(OH)_2$ induz a sua hidratação, formando-se hidróxido de cálcio, como se verifica em (3), baixando consequentemente o pH do meio de 12,5 para 9,4 [3].

Reacção química simplificada que traduz o mecanismo da carbonatação:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad (3)$$

O ataque pela carbonatação gera-se à superfície do elemento de betão, sendo que a frente carbonatada progride do exterior para o interior do elemento até atingir as armaduras, expondo-as à corrosão pela perda da alcalidade e consequente perda da passivação.

A maior difusão do dióxido de carbono no betão está directamente relacionada com a baixa humidade relativa existente nos seus poros, difundindo-se rapidamente. A frente de carbonatação progride mais lentamente quando os poros estão parcialmente saturados e não existe carbonatação do betão em ambiente saturado. No entanto, quanto maior for o teor de humidade relativa maior é a velocidade de corrosão, no caso da carbonatação atingir as armaduras. A Fig. 2.15. esquematiza o mecanismo de corrosão das armaduras pela carbonatação e a Fig. 2. 16. exemplifica-o com o recurso a casos práticos.

Fig. 2.15. – Corrosão por carbonatação (adaptado de [3]).

Ligação entre pilar e viga em betão armado

Viga em betão armado

Fig. 2. 16. – Corrosão das armaduras por carbonatação e consequente destacamento do recobrimento em elementos de betão armado.

# 3

# NP 1504

## 3.1. INTRODUÇÃO

Há mais de dez anos que são reunidos e discutidos todos os conhecimentos técnicos e científicos relativos à protecção e reparação de estruturas de betão. Desde então o Subcomité SC8 do Comité Técnico 104 do CEN – Comité Europeu de Normalização – responsável pelo material betão, tem vindo a preparar uma série de normas referentes à protecção e reparação deste material. Surge neste âmbito a EN 1504 relativa a "Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão". Na actualidade a EN 1504, contemplando as suas dez partes, já transitou para NP EN 1504, na sua totalidade em Setembro de 2009.

## 3.2. OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO

A série NP 1504 tem como objectivo a definição dos produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão, bem como o estabelecimento dos seus princípios, métodos, requisitos, controlo de qualidade e avaliação da conformidade e especificações referentes à aplicação dos mesmos. As partes constituintes da norma, que incluem todos estes aspectos, estão estruturadas da seguinte forma:

- NP 1504-1: Definições;
- NP 1504-2: Sistemas de protecção superficial do betão;
- NP 1504-3: Reparação estrutural e não estrutural;
- NP 1504-4: Colagem estrutural;
- NP 1504-5: Injecção do betão;
- NP 1504-6: Ancoragem de armaduras de aço;
- NP 1504-7: Protecção contra a corrosão das armaduras;
- NP 1504-8: Controlo da qualidade e avaliação da conformidade;
- NP 1504-9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas;
- NP 1504-10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra.

A estas 10 partes estão associadas cerca de 65 diferentes normas, correspondentes aos métodos de ensaios referentes aos requisitos de identificação e desempenho dos produtos e sistemas e ao controlo da sua qualidade e à avaliação da sua conformidade [10]. Na Fig. 3.1. está representada a interligação entre as várias partes da norma.

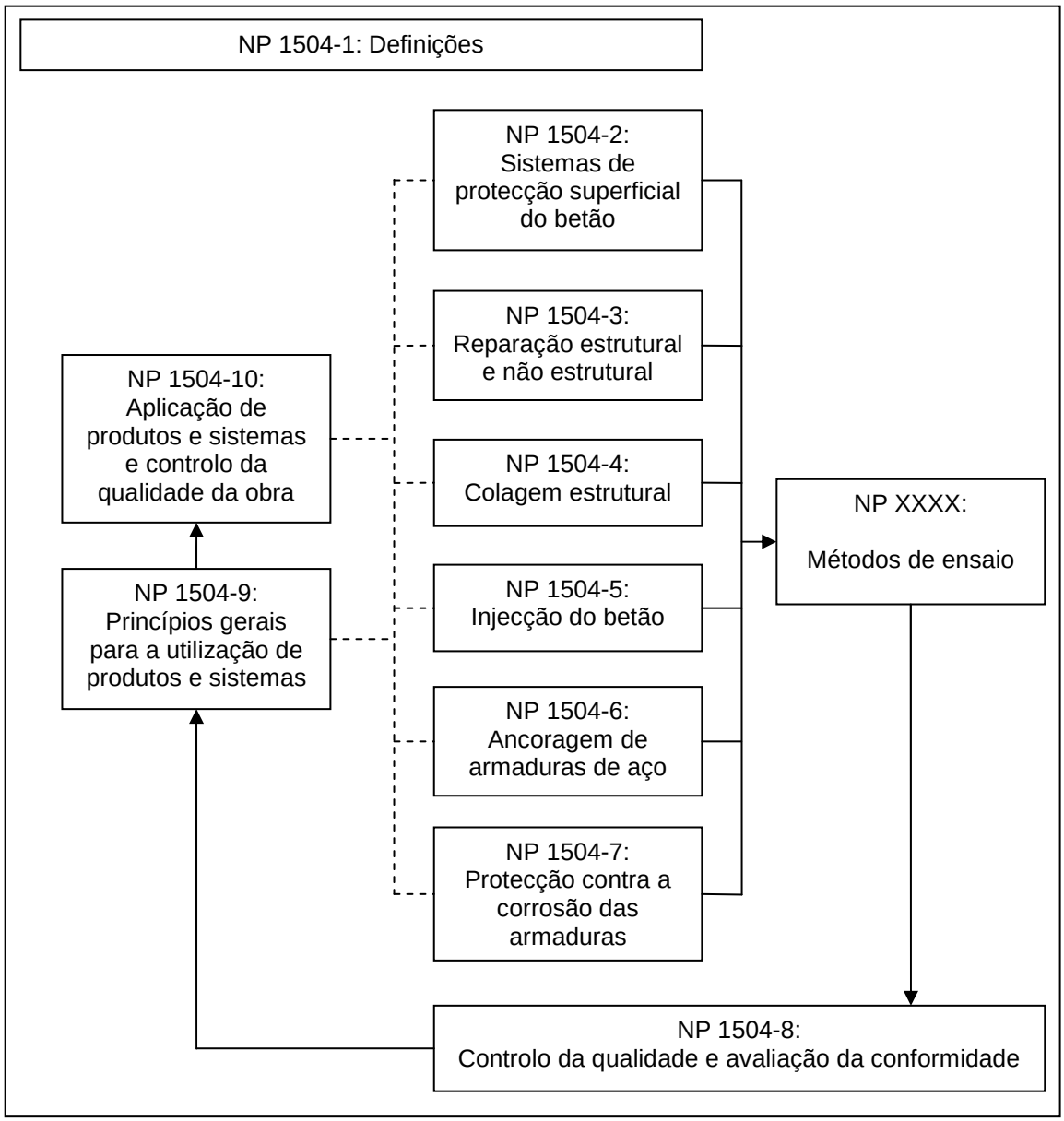



Fig. 3.1. – Interligação entre as diversas partes da NP 1504 (adaptado de [10, 11]).

A primeira parte da NP 1504 contempla as definições de todos os termos aplicados na totalidade das partes e define as principais categorias de produtos e sistemas, bem como os tipos de químicos e principais constituintes dos mesmos.

As partes 2 a 7, inclusive, constituem o cerne da série, referindo-se aos requisitos de identificação e desempenho dos tipos de sistemas e produtos contemplados na norma, bem como os métodos de ensaio a eles associados.

A NP 1504-8[12] resume todos os procedimentos para o controlo da qualidade, que se baseiam na EN ISO 9001[13] , e a avaliação da conformidade dos produtos e sistemas previstos na série NP 1504, contemplando a sua marcação e a sua rotulagem, de acordo com um conjunto específico de ensaios.

As partes 9 e 10 correspondem à aplicação geral e princípios gerais para o uso dos produtos e sistemas definidos nas partes 2 a 7, inclusive.

Nos subcapítulos seguintes far-se-á alusão a todos os aspectos principais e às considerações específicas definidas em cada uma das partes anteriormente descritas.

### 3.3. QUADRO ESTRATÉGICO DE GESTÃO DA ESTRUTURA

A NP 1504, nomeadamente a sua nona parte, define as opções possíveis a considerar na escolha de uma estratégia de gestão da estrutura.

A estratégia de gestão definida pela norma baseia-se no conceito de vida útil da estrutura. Conceito este que pressupõe que a estrutura de betão tenha o desempenho pretendido para um determinado período de tempo. Na realização do projecto do sistema de protecção e reparação há que ter sempre presente também outro parâmetro importante, a vida útil de projecto. Este conceito difere do primeiro, sendo que, com este último, se pretende que a estrutura tenha um período de tempo de serviço adequado às condições de utilização previstas a que estará sujeita.

De acordo com as exigências futuras relativas à vida útil da estrutura assim há que adequar decisões apropriadas, considerando as seguintes possibilidades [5]:

- Não fazer nada e simplesmente monitorizar;
- Reanalisar a capacidade da estrutura, podendo conduzir a uma alteração de funcionamento;
- Prevenir ou reduzir outras deteriorações;
- Reforçar ou reparar e proteger toda ou parte da estrutura de betão;
- Reconstruir ou substituir toda ou parte da estrutura de betão;
- Demolir toda ou parte da estrutura de betão.

A escolha da estratégia a considerar não deverá ser realizada de forma isolada mas sim, tendo sempre em consideração a existência de outras questões não só de cariz técnico pois estas estarão sempre presentes. Os requisitos do proprietário/cliente face ao elemento a tratar e os custos associados à acção que advirá das opções de gestão tomadas são parâmetros geralmente incontornáveis a ter em consideração. A análise das várias opções possíveis em termos de custos iniciais, custos de manutenção, eventual alteração do uso da estrutura e acesso aos locais de trabalhos são também determinantes na escolha a realizar.

Estas possibilidades podem ser consideradas para uma única intervenção na estrutura, realizadas por exemplo, de uma forma bastante evasiva, ou simplesmente realizadas de uma forma menos exaustiva mas cíclica. A norma refere um exemplo, ilustrado na Fig. 3. 2., pressupondo-se um cenário em que um sistema de protecção superficial, que necessita de ser aplicado de forma repetitiva, faz parte da manutenção de uma superfície de betão deteriorada. Neste exemplo são admitidos dois cenários de reparação possíveis: a restauração cíclica do estado inicial do elemento ou a manutenção do estado corrente do elemento.

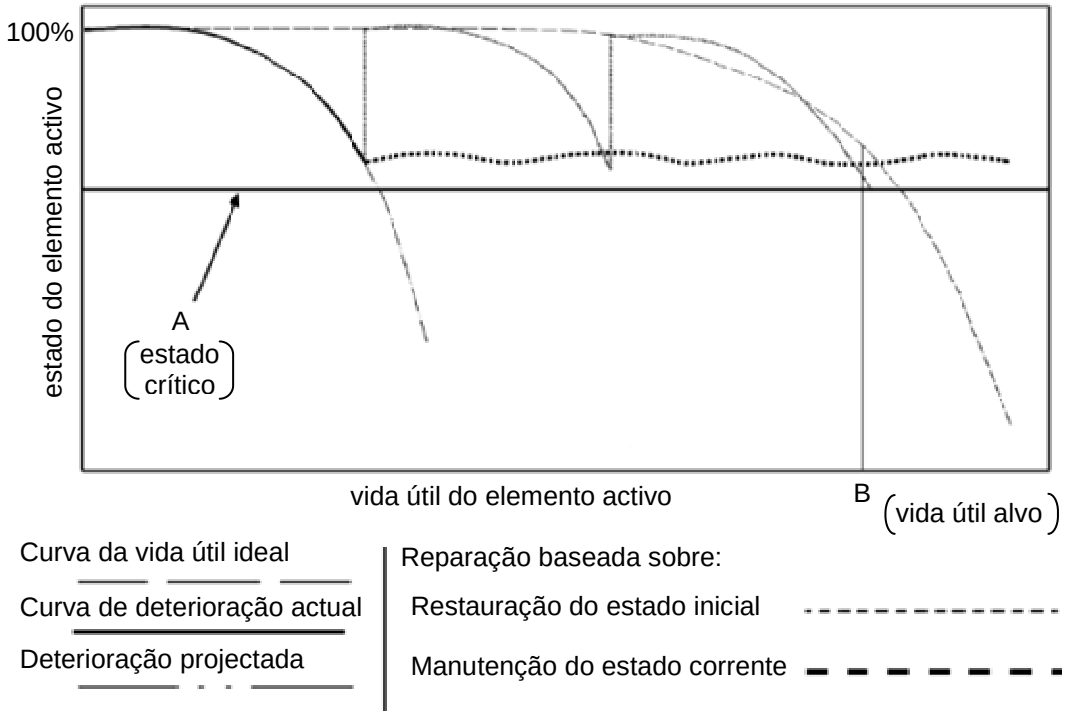



Fig. 3. 2. – Possibilidades para a reparação de um elemento deteriorado. (Adaptado de [5])

Para além dos parâmetros acima referidos, que devem ser tidos em conta na estratégia de gestão do elemento em estudo, as opções anteriormente descritas dependem ainda intrinsecamente de determinados factores. Estes factores estratificam-se em factores de base, factores estruturais, factores ligados à saúde e segurança e factores ambientais (Anexo A.1), os quais a NP refere claramente que não devem ser considerados como totalmente limitativos às decisões a tomar.

Assumindo a vertente contínua do processo de deterioração dos elementos de betão armado, há ainda que incluir considerações relativas a cada factor, aquando da justificação sobre as vantagens das opções técnicas a considerar para a reparação e os seus respectivos custos associados.

De uma forma geral qualquer acto de protecção e reparação conduz ao aumento da vida útil dos elementos e do próprio trabalho efectuado, desde que sejam realizados o seu acompanhamento e a manutenção correctas.

O quadro estratégico de gestão contemplado na série NP 1504 é fundamentado também por outro princípio fundamental: é necessário identificar devidamente as causas iniciais das deteriorações dos elementos para melhor actuar sobre elas. Ou seja, focar a gestão estratégica de protecção ou reparação do elemento, sempre que possível, nas causas que suscitaram a sua deterioração e não no simples tratamento dos sintomas/patologias que apresenta. Só assim é possível promover o sucesso da estratégia implementada. No entanto existirão sempre situações em que, *à priori*, há que assumir que não é de todo possível actuar nas causas, como por exemplo a exposição de elementos a ambientes marinhos. Nestas situações projectar-se-ão os sistemas de reparação e protecção do elemento, de uma forma optimizada, para resistirem às agressões a que estão sujeitos.

Seguidamente serão apresentadas as possíveis fases que deverão constar de um projecto de reparação com base num exemplo especificado pela mesma norma.

### 3.4. FASES DE UM PROJECTO DE REPARAÇÃO

Num cenário em que tecnicamente é necessário proceder à realização de um projecto de reparação, antes de serem apontadas presumíveis causas ou soluções precipitadas para a resolução das patologias presentes nos elementos, é necessário: realizar tantas deslocações aos locais quantas as necessárias; observar a estrutura; recolher dados; organizar a documentação e informações obtidas e estabelecer o estado real da mesma com base no seu historial (incluindo um historial de operações de manutenção no caso de existirem) [5]. A descrição apresentada corresponde a uma primeira abordagem à realização do projecto de reparação.

No sentido de auxiliar a realização de um projecto de reparação, a NP 1504-9[5], propõe, de forma flexível, as fases ilustradas na Fig. 3.3..

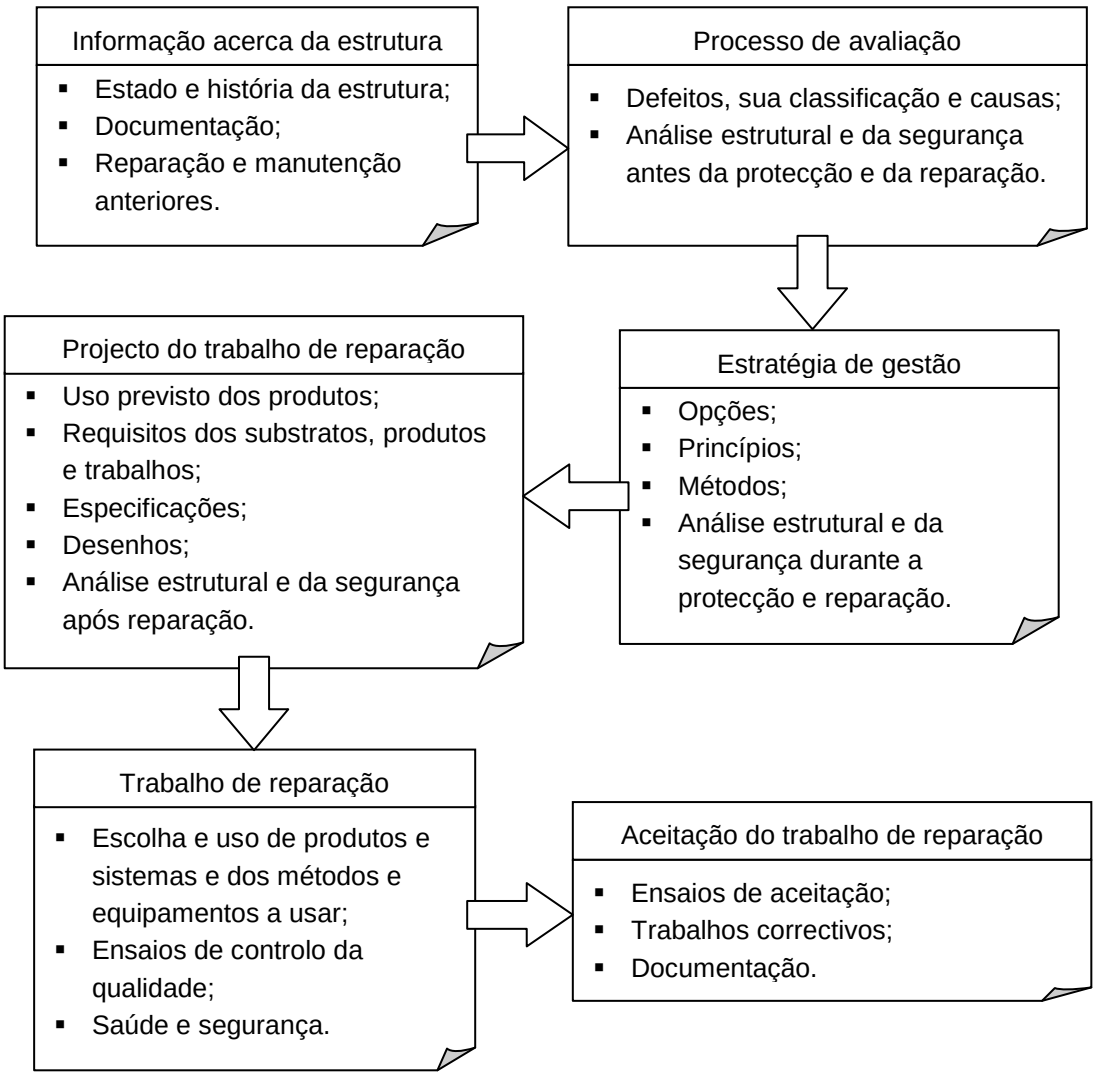



Fig. 3.3. – Fases típicas de um projecto de reparação [5].

Na avaliação dos defeitos e causas de deterioração é adoptada a estratificação definida no capítulo anterior, nomeadamente idêntica à representada na Fig. 2.3.. Sendo sempre a avaliação realizada com a percepção que, a uma determinada anomalia, poderão estar associadas várias causas e não uma única.

Esta avaliação deverá ser sempre conduzida tendo em conta os seguintes aspectos [5]:

- Estado visível da estrutura de betão existente;
- Os ensaios que permitem aferir o estado do betão e das armaduras;
- A concepção original do projecto;
- O ambiente, incluindo a exposição à contaminação;
- A história da estrutura de betão, incluindo a da exposição ambiental;
- As condições de utilização (acções sobre a estrutura);
- Requisitos para utilizações futuras.

A avaliação do estado da estrutura ou dos elementos é determinante na adequação dos meios e estratégias a considerar no projecto e deverá ser realizada o mais próximo da data de início dos trabalhos de protecção e reparação. No caso de ter decorrido um período de tempo significativo entre a execução do projecto e a realização dos trabalhos, é de todo aconselhável a realização de uma nova avaliação do estado da estrutura. Esta avaliação será sempre suportada por ensaios e medições ajustados à situação em estudo, que de uma forma geral poderão ser:

- Medição do recobrimento da armadura e da profundidade de carbonatação;
- Extracção de carotes para análises físicas, químicas e petrográficas;
- Ensaio electroquímico da armadura, por exemplo, por medida do potencial do eléctrodo.

Estes ensaios deverão contribuir não só para a avaliação do estado dos elementos mas também para a avaliação do seu futuro desempenho, ou da sua adequabilidade com os sistemas e produtos a utilizar na reabilitação, devendo sempre que possível ser documentadas e arquivadas para posteriores avaliações.

A análise estrutural propriamente dita não é abordada nesta série, sendo objecto de regulamentação específica, realçando-se apenas a sua grande importância na totalidade do processo de avaliação.

Nos subcapítulos que se seguem serão abordados os princípios, métodos, produtos e sistemas referentes ao projecto de reparação. Todas as questões relacionadas com as fases subsequentes serão descritas de uma forma mais exaustiva posteriormente.

## 3.5. PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE PROTECÇÃO E REPARAÇÃO

Da convergência entre o estado actual dos elementos e o estado pretendido à posteriori, em consonância com os objectivos das medidas a tomar e com os requisitos funcionais, assim serão definidos os sistemas e métodos a utilizar para a protecção e reparação dos elementos, Fig. 3.4..

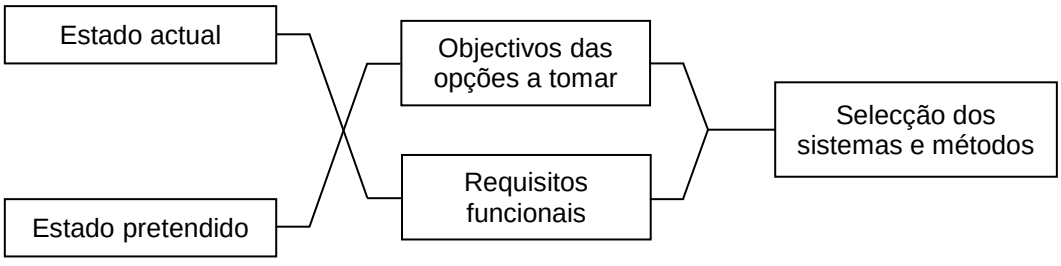



Fig. 3.4. – Selecção dos sistemas e métodos a adoptar (adaptado de [14]).

Na série NP 1504 é estabelecido um conjunto de princípios e métodos passíveis de serem adoptados para a reparação e protecção de estruturas de betão, separadamente associados aos defeitos do betão e à corrosão das armaduras. São referidos igualmente métodos cujos requisitos e aplicações não são especificados pela referida série, o que de todo não induz directamente a sua ineficácia.

A cada princípio estão associados vários métodos e para cada método é possível adequar produtos ou sistemas, Fig. 3.5.. Os sistemas surgem da conjugação de dois ou mais produtos aplicados de forma sucessiva ou conjunta. Aos produtos em si, que correspondem a tipos químicos, podem ainda estar associados os seus constituintes principais.

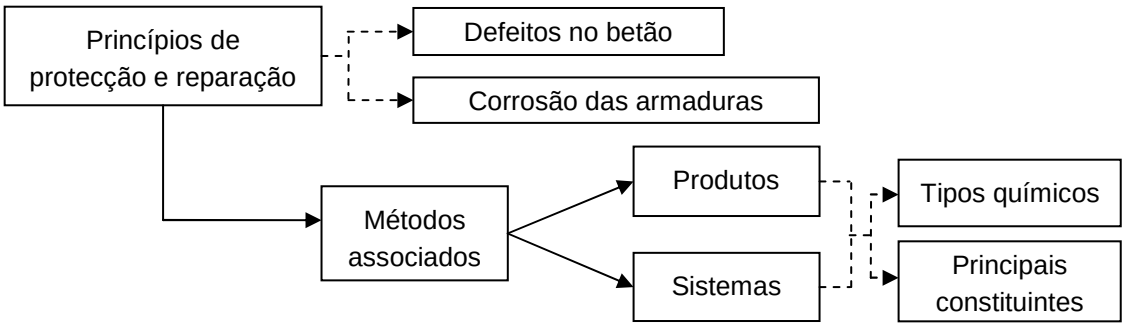



Fig. 3.5. – Conjugação entre princípios, métodos, sistemas e produtos apresentados na NP 1504.

São portanto especificados seis princípios relacionados com os defeitos do betão e cinco com a corrosão das armaduras. Os esquemas apresentados nas Fig. 3. 6. Fig. 3.7. representam a estruturação dos vários métodos existentes para os possíveis princípios de protecção e reparação.

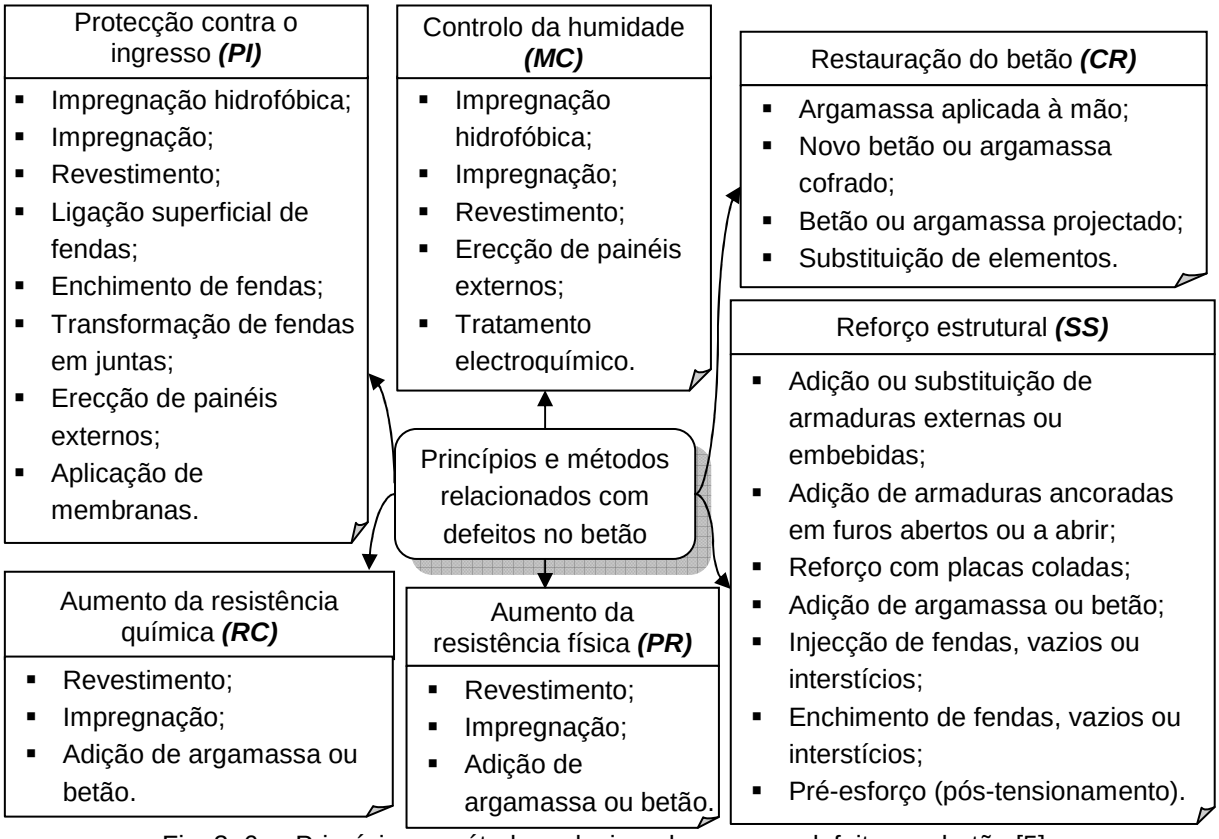



Fig. 3. 6. – Princípios e métodos relacionados com os defeitos no betão [5].

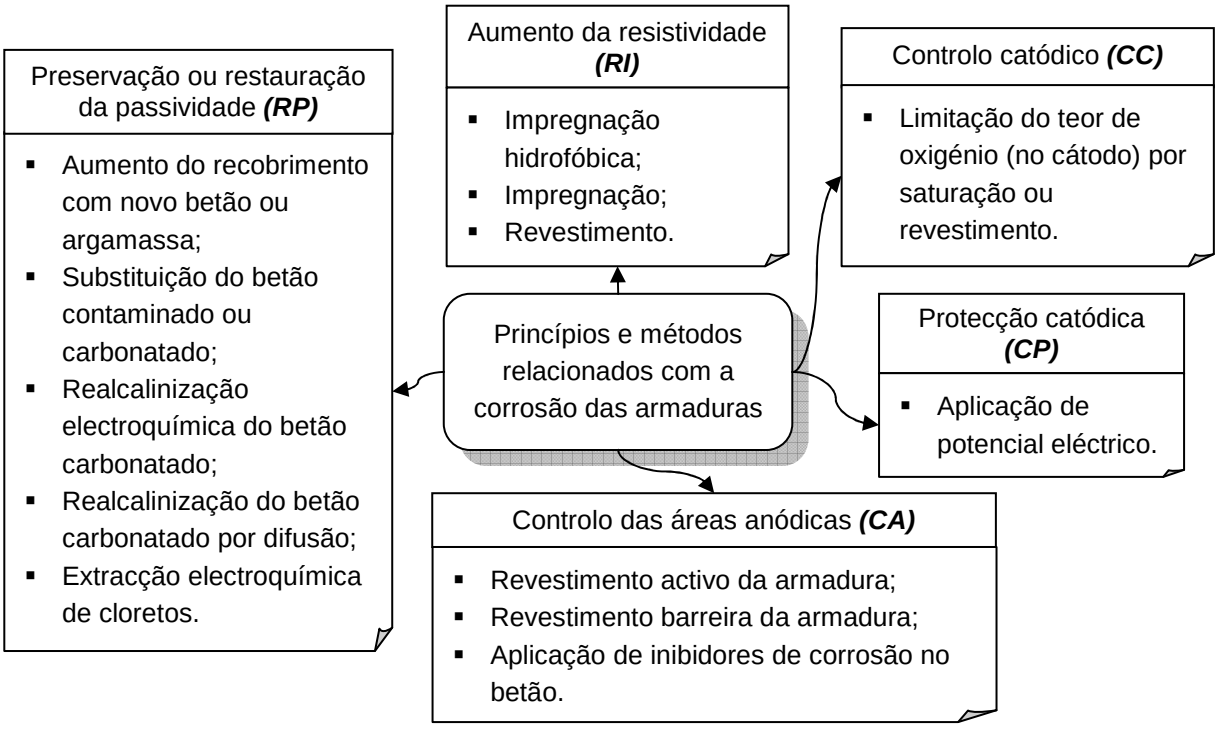



Fig. 3.7. – Princípios e métodos relacionados com a corrosão das armaduras [5].

No Anexo A.2 estão presentes todos estes princípios com a estruturação e numeração apresentadas pela NP 1504-9[5] bem como a sua interligação com as restantes partes da série NP 1504.

A escolha dos princípios e métodos deverá ser centrada não só nas patologias que o elemento apresenta e as suas causas associadas, como também na compatibilidade entre produtos e sistemas e entre produtos e sistemas e o substrato onde irão ser aplicados.

Da variedade de anomalias passíveis de estarem presentes nos elementos de betão armado, muitas vezes surge a necessidade de realizar a combinação entre alguns métodos anteriormente descritos. No entanto, é necessário assegurar a compatibilidade dos mesmos, sendo possível que, da sua junção surjam efeitos indesejáveis, como por exemplo:

- Possível aumento da carbonatação como consequência da aplicação de sistemas de impregnação para reduzir o teor de humidade;
- A resistência ao gelo e a aderência do betão pode ser diminuída pela utilização de revestimentos que possivelmente retenham a humidade;
- Acréscimo ou aparecimento de tensões de tracção nos elementos devido à aplicação de pós-esforço;
- Possível fragilização dos aços de pré-esforço, surgimento de reacções álcalis-agregado, a diminuição da resistência ao gelo devido ao aumento do teor de humidade e corrosão de elementos adjacentes como consequências da utilização de métodos electroquímicos [5].

Seguidamente serão descritos de forma sucinta os princípios apresentados. Primeiramente surgirão os princípios associados aos defeitos no betão e posteriormente à corrosão das armaduras.

### 3.5.1. PRINCÍPIOS E MÉTODOS RELACIONADOS COM A DETERIORAÇÃO DO BETÃO

#### 3.5.1.1. Protecção contra o ingresso (PI)

Os métodos referentes a este princípio complementam muitas vezes a aplicação de outros métodos, actuando sobretudo como uma barreira física em relação à penetração de agentes agressivos. Pelo tratamento superficial do elemento aplicando os métodos descritos na Fig. 3. 6. promove-se a redução da sua porosidade e da sua permeabilidade. A consideração da aplicação deste princípio é relativamente importante, tendo em conta que o estado de degradação da camada superficial do elemento agrava a sua fragilidade/exposição a agentes agressivos. Antes de tomar a opção de aplicar os métodos associados a este princípio, há ainda que aferir até que ponto as anomalias que surgem superficialmente no elemento não serão a expressão visível de possíveis patologias existentes no seu interior.

Um dos métodos previstos para este princípio é a impregnação hidrofóbica, designada pela NP 1504-9[5] como um tratamento do betão destinado a produzir uma superfície repelente à água. Geralmente não há alteração da sua aparência porque não existe uma película contínua superficial no elemento, os seus poros não são preenchidos, mas a superfície interior dos poros e capilares fica revestida.

Quando é aplicada uma impregnação, a porosidade superficial do elemento fica reduzida, consequentemente, os poros e capilares ficam parcialmente ou completamente preenchidos.

Pode ainda ser aplicado um revestimento para conferir protecção contra o ingresso no elemento de betão a reparar. Neste caso o revestimento irá produzir uma camada superficial contínua sobre a superfície do betão. Terão espessuras compreendidas entre 0,1 mm e 5,0 mm, podendo em determinadas situações, atingir espessuras superiores a 5,0 mm. São consideradas películas finas até 1,0 mm de espessura ou espessas com espessuras compreendidas entre 1,0 mm e 5,0 mm [16].

A Fig. 3. 8. ilustra os esquemas tipo da impregnação hidrofóbica, da impregnação e do revestimento.

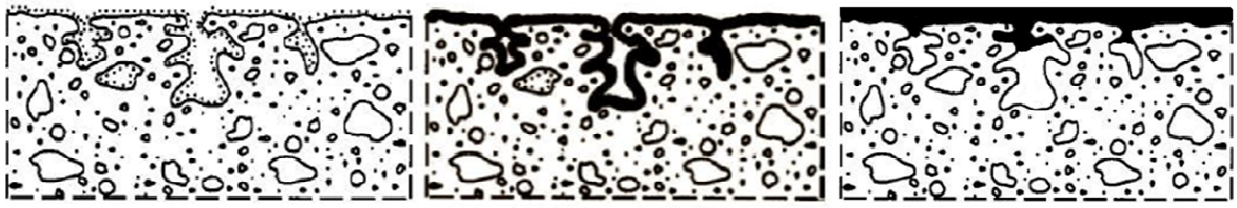


Fig. 3. 8. – Da esquerda para a direita, esquema tipo de: impregnação hidrofóbica, impregnação e revestimento [16].

Os requisitos referentes às impregnações, impregnações hidrofóbicas e revestimentos estão descritos na NP 1504-2[16]. Já os requisitos referentes aos produtos e sistemas para enchimento de fendas estão definidos na NP 1504-5[17]. Todos os requisitos referentes aos produtos e sistemas a aplicar nos restantes métodos propostos para este princípio (ver Fig. 3. 6.) não são definidos na série NP 1504.

#### 3.5.1.2. Controlo da humidade (MC)

A humidade pode potenciar o aparecimento e agravamento de anomalias nos elementos de betão, pelo que o seu controlo se torna eficaz nessas circunstâncias. No entanto, para permitir que a humidade existente no interior do elemento evapore, os sistemas para o controlo da humidade aplicados na sua superfície deverão ser permeáveis ao vapor de água. Este método é utilizado, por exemplo, para controlar reacções adversas como a reacção álcalis-agregado e ataque por sulfatos. Na Fig. 3.9. é possível observar-se a aplicação de uma impregnação hidrofóbica para o controlo da humidade.

Os requisitos para os produtos e sistemas aplicados em métodos como erecção de painéis externos e tratamento electroquímico, referentes a este princípio, não se encontram definidos na série NP 1504.

Fig. 3.9. – Impregnação hidrofóbica [10].

#### 3.5.1.3. Restauração do betão (CR)

Este método é utilizado para casos em que o betão se encontre deteriorado, podendo ser realizada com o recurso à aplicação à mão ou moldando betão ou argamassas fluidas ou à aplicação de betão projectado (Fig. 3.10.). A primeira opção está contemplada na NP 1504 e a projecção de betão é referenciada pela EN 14487-1[18].

Aplicação de argamassa à mão.

Projecção de betão em muro de suporte.

Fig. 3.10. – Restauração do betão [10, 19].

Os materiais a aplicar, de acordo com este princípio, manualmente, com recurso a cofragens ou por projecção deverão cumprir todos os requisitos previstos pela NP 1504-3[20].

### 3.5.1.4. Reforço estrutural (SS)

O reforço estrutural é utilizado em situações em que a deterioração do betão é tão significativa que o elemento já perdeu parte da sua capacidade resistente. É necessário ter sempre em atenção a possibilidade dos métodos aplicados imporem ao elemento a reparar novos estados de tensão. Estes métodos poderão passar pelo reforço com placas coladas, em aço ou de compostos armados com fibra de vidro, ou a aplicação de pré-esforço. Alguns exemplos são apresentados nas Fig. 3.11..

Reforço com folha de fibras de carbono.

Reforço de um pilar de betão armado com aplicação de tecido de fibra de carbono.

Reforço de elementos estruturais com chapas de aço.

Fig. 3.11. – Reforço com placas coladas em aço ou noutro material adequado [21].

Os métodos previstos para este princípio encontram-se definidos no ponto 4 do Quadro A. 1. (Anexo A.2.).

### 3.5.1.5. Aumento da resistência física (PR)

Antes de proceder ao aumento de resistência física proporcionada pela aplicação de revestimentos, de impregnações e da adição de argamassa ou betão há que identificar a causa física que estará na origem da patologia, seja ela provocada pela abrasão, pelo impacto, pela erosão, etc.. Só assim a sua aplicação conduzirá ao aumento da resistência física do elemento.

#### 3.5.1.6. Aumento da resistência química (RC)

Em determinadas situações é possível que ocorra o ataque químico ao elemento de betão. Nestes casos há que proceder à identificação dos químicos que potenciaram o ataque ambiental recorrendo às normas EN 206-1[22] e EN 13529[23]. Posto isto há que adequar os métodos, produtos e sistemas aos químicos identificados.

Os requisitos para os produtos e sistemas a aplicar no aumento das resistências física e química são definidos pelas partes 2 e 3 da NP 1504.

### 3.5.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS RELACIONADOS COM A CORROSÃO DAS ARMADURAS

#### 3.5.2.1. Preservação ou restauro da passividade (RP)

Para este princípio, de acordo com a Fig. 3.7. são definidos cinco métodos diferentes, utilizados em situações em que as armaduras estejam já despassivadas ou em processo de despassivação.

O "Aumento do recobrimento com betão ou argamassa" sugere a execução de uma camada adicional nesses materiais que acabará por conferir um acréscimo de protecção à armadura passivada. Se o betão está altamente contaminado ou num nível de carbonatação avançado, poderá ser viável a remoção de toda a zona carbonatada e a posterior restituição por betão novo ou argamassa, como prevê o método "Substituição do betão carbonatado ou contaminado". Nestes casos dever-se-á também considerar a hipótese de combinação deste método com o princípio "Protecção contra o ingresso", realizando uma protecção superficial, por exemplo, contra o ingresso de cloretos. A hipótese da possível contaminação dos materiais de reparação pelo betão carbonatado também deverá ser avaliada. Os materiais a aplicar, tanto para o aumento do recobrimento como para a substituição de betão contaminado, deverão cumprir todos os requisitos previstos pela NP 1504-3[20].

Na "Realcalinização electroquímica do betão carbonatado" é conferida à armadura um acréscimo de protecção contra a corrosão, aumentando a alcalinidade do betão, sem ser propriamente necessário que a armadura já esteja despassivada [24]. Este método baseia-se na aplicação de uma corrente temporária num circuito fechado cujo cátodo (ligado ao pólo negativo) é a armadura e o ânodo (conectado ao pólo positivo) é composto por uma malha metálica introduzida num electrólito. O electrólito geralmente utilizado é o carbonato de sódio, embora também possa ser utilizado o carbonato de potássio [25]. A solução alcalina de carbonato de sódio penetra no betão por electroosmose, provoca a electrólise da água e promove a geração de iões $OH^-$, o que induz o aumento do pH do betão e restitui a passividade das armaduras [26]. Muitas vezes torna-se necessário cobrir toda a zona a tratar com plásticos, fixando-os com a ajuda de peças de madeira. A duração associada a este tipo de tratamento geralmente é de três a sete dias [25]. O princípio geral deste método está exemplificado na Fig. 3.12. e a sua ilustração prática consta na Fig. 3.13..

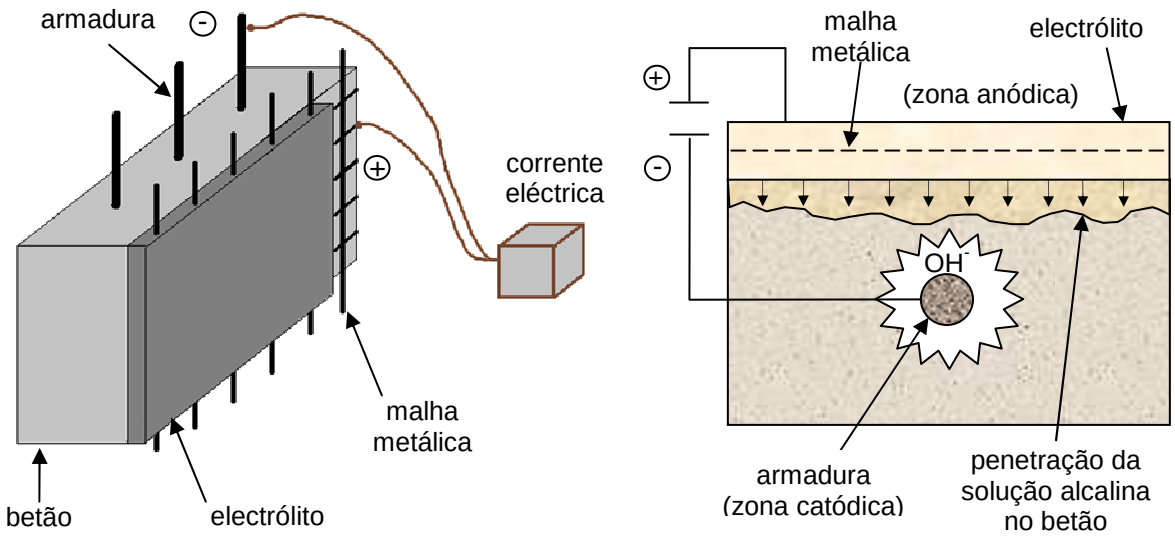



Fig. 3.12. – Princípio geral da realcalinização electroquímica (adaptado de [19]).

Fig. 3.13. – Realcalinização electroquímica do betão carbonatado [21,29].

A experiência prática na aplicação desta técnica é ainda pequena, cerca de dez anos, ainda assim já foi possível comprovar determinados efeitos indesejáveis como o aparecimento das reacções álcalis-agregado que promove a degradação do betão [25, 26].

Segundo a NP 1504-9[5] a experiência na "Realcalinização do betão carbonatado por difusão" não é muito elevada e as diversas abordagens existentes surgem associadas a determinadas zonas da Europa. De uma forma geral é realizada através do revestimento da superfície carbonatada do betão por argamassas ou betões cuja base cimentícia é altamente básica. O elemento carbonatado é realcalinizado por difusão.

Como no método que envolve a realcalinização electroquímica do betão, a "Extracção electroquímica de cloretos" também não pressupõe que as armaduras estejam já despassivadas, potenciando em qualquer situação o aumento da alcalinidade reduzindo o teor em iões cloreto electroquimicamente [27]. A remoção dos cloretos é realizada pela aplicação de uma corrente electroquímica temporária

que, ao extrair os iões cloreto, promove a repassivação das armaduras. A duração associada a este tipo de tratamento geralmente é de seis a sete semanas. O método baseia-se na aplicação de uma corrente impressa directamente à armadura e ao eléctrodo colocado na superfície do betão, normalmente uma malha de titânio, associada à aplicação de um electrólito, por exemplo, uma solução aquosa na sua forma mais básica [25]. Desta forma os iões cloreto acabam por migrar do interior, zona catódica, para o exterior, zona anódica, como é esquematizado na Fig. 3.14..

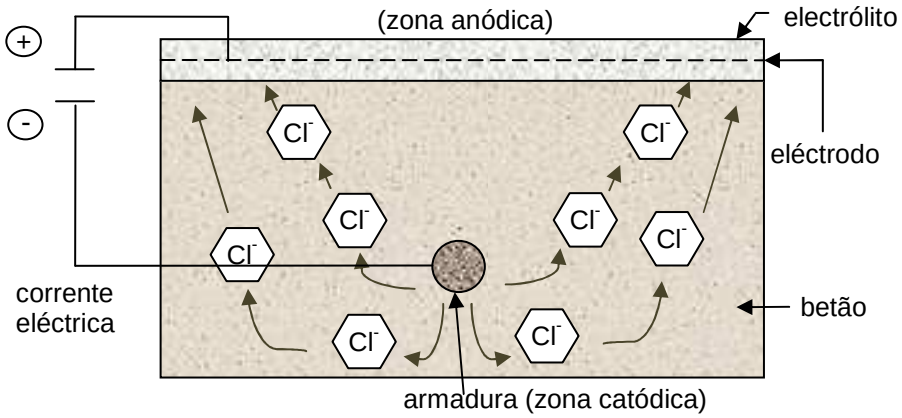



Fig. 3.14. – Princípio geral da extracção electroquímica de cloretos (adaptado de [19]).

Na Fig. 3.15. é possível observar a extracção electroquímica de cloretos aplicada a uma estrutura em betão armado por projecção do electrólito, constituído por uma pasta de celulose embebida, com o intuito de manter a humidificação da superfície.

Fig. 3.15. – Extracção electroquímica de cloretos [19].

### 3.5.2.2. Aumento da resistividade (RI)

Este princípio baseia-se no seguinte pressuposto: o decréscimo do teor de humidade tende a aumentar a resistividade do betão, a um nível tal, que a taxa de corrosão se torna insignificante [5]. O princípio pressupõe a utilização de métodos que implicam a aplicação de tratamentos superficiais como as impregnações hidrofóbicas ou não e revestimentos, que podem aumentar a resistividade do betão. A consideração deste princípio é apenas possível em situações onde haja a garantia que o betão não absorve água proveniente de outras origens. Há ainda que referir que o aumento da resistividade não é aconselhável sempre que esta comprometa totalmente a saída de água do betão.

Os requisitos para os produtos e sistemas a aplicar para todos os métodos previstos neste princípio são definidos pela parte 2 NP 1504.

### 3.5.2.3. Controlo catódico (CC)

O objectivo do controlo catódico é a inactivação dos cátodos pela limitação do acesso do oxigénio a todas as zonas passíveis de sofrer corrosão. Com esta inibição a possibilidade de corrosão estará então restringida. Os produtos e sistemas referentes a este princípio não constam na série NP 1504.

### 3.5.2.4. Protecção catódica (CP)

Quando a contaminação por cloretos ou a carbonatação da armadura são já muito expressivas este princípio surge como um dos mais indicados para o controlo da corrosão. Através da passagem de uma corrente contínua de baixa intensidade, de um ânodo exterior, através do betão, para o aço tornando o seu potencial mais negativo (catódico). Desta forma é possível prevenir ou eliminar a corrosão das armaduras.

A protecção catódica pode ser realizada por corrente impressa, com a colocação de uma malha que envolve o elemento recoberta com material cimentício ou com ânodos localizados, ou por ânodos de sacrifício como os ânodos de zinco e alumínio [9]. Nas Fig. 3.16. e Fig. 3.17. estão exemplificados alguns métodos de protecção catódica.

A protecção catódica, nomeadamente pela aplicação de corrente eléctrica, é definida na EN 12696[28] e é descrita como eficaz no caso de ser acompanhada por acções de monitorização e manutenção adequadas. Pode ser aplicada independentemente do nível de contaminação de cloretos e reduz a contaminação do betão.

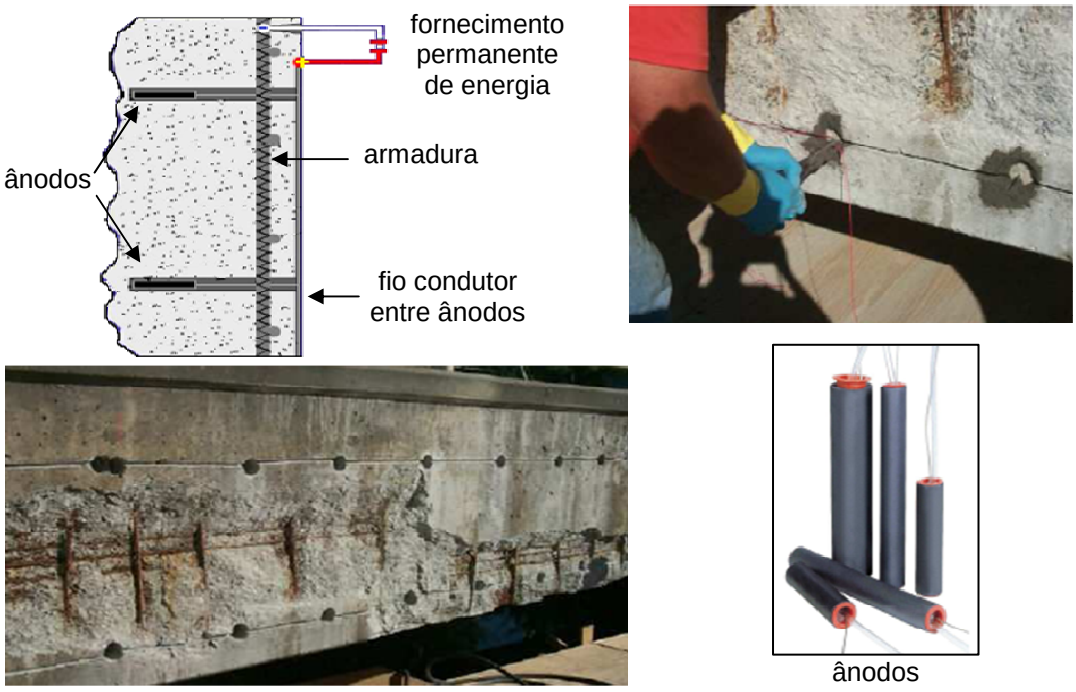



Fig. 3.16. – Protecção catódica por corrente impressa com ânodos localizados [9, 19].

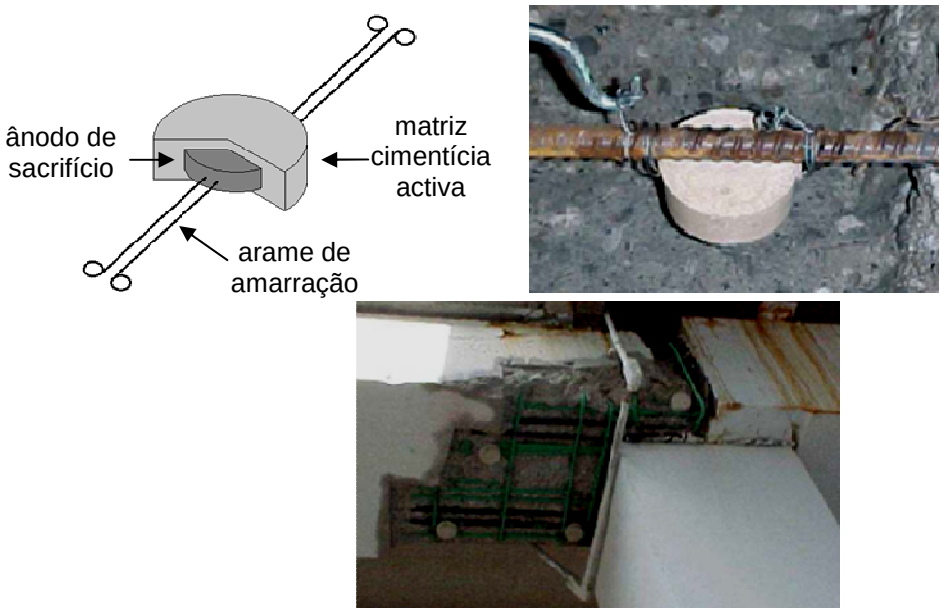



Fig. 3.17. – Protecção catódica pela colocação de ânodos de sacrifício [9, 19].

3.5.2.5. Controlo de áreas anódicas (CA)

Este princípio só é eficaz se a armadura for devidamente tratada de modo a ficar isenta de corrosão. A formação de áreas anódicas pode ser controlada pela aplicação localizada de revestimentos activos directamente nas armaduras ou pelo seu revestimento completo, formando uma cápsula, ou ainda pela aplicação de inibidores de corrosão no betão.

De uma forma geral existem então revestimentos activos e revestimentos estanques (Fig. 3.18.). Os primeiros contêm pigmentos electricamente activos que podem fornecer protecção catódica localizada ou funcionar como inibidores. Já os revestimentos estanques isolam a armadura da água dos poros envolventes [5].

Fig. 3.18. – Aplicação de revestimento estanques e aplicação de revestimento activo em armaduras (da esquerda para a direita) [29].

Os revestimentos à base de resinas epoxídicas, considerados estanques, revelam uma boa aderência à superfície do aço, uma boa resistência a temperaturas extremas (gelo e calor de hidratação) e ainda uma boa resistência à difusão de vapor de água, dos iões cloreto e dos gases.

Os inibidores da corrosão aplicados no betão podem ser classificados como:

- Inibidores anódicos: reduzem a velocidade da reacção anódica;
- Inibidores catódicos: evitam que as reacções catódicas ocorram;
- Inibidores mistos: têm um efeito barreira, actuando nas duas reacções.

É possível também classificar os inibidores como orgânicos, baseados de uma forma geral em aminas e ésteres solúveis, e inorgânicos, baseados, geralmente, no nitrito de cálcio (inibidor anódico) [26].

Estes inibidores podem ser aplicados directamente na superfície de um elemento de betão (Fig. 3.19.) ou adicionado durante a amassadura do betão, como adjuvante.

Os requisitos para produtos e sistemas referentes aos revestimentos activos e barreira das armaduras constam da NP 1504-7[30], já para a aplicação de sistemas e produtos inibidores no betão não existe nenhuma EN ou ETA (Aprovações Técnicas Europeias).

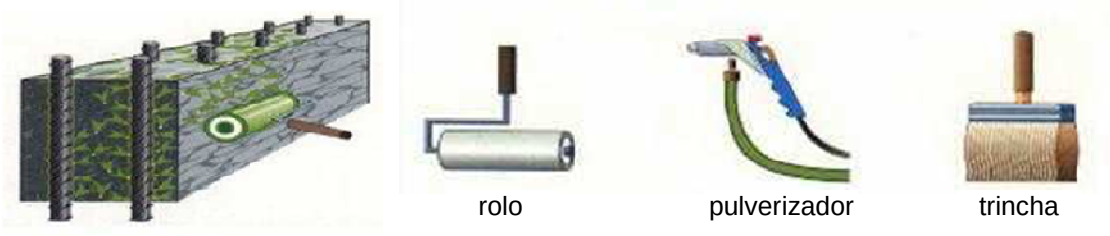



Fig. 3.19. – Aplicação superficial de inibidores de corrosão por migração. Esta aplicação pode ser realizada com rolo, pulverizador ou trincha [19].

# 4

# CASOS PRÁTICOS – PERSPECTIVA EXIGÊNCIAL

## 4.1. INTRODUÇÃO

Com este capítulo pretende-se explorar a aplicabilidade da NP 1504 simulando casos práticos mais comuns, tendo também em consideração questões do ponto de vista estético. Esta aplicabilidade cinge-se não só às escolhas de princípios e métodos para a reabilitação de um determinado elemento de betão deteriorado, como também às considerações e requisitos a reter aquando da aplicação dos próprios sistemas e produtos seleccionados. De uma forma geral, serão apresentadas metodologias para a reabilitação de superfícies aparente sem que a integridade estrutural do elemento esteja comprometida. Será tida em consideração, para além da NP 1504, bibliografia sobre esta temática.

## 4.2. SUPERFÍCIES EM BETÃO APARENTE DETERIORADAS PELA CORROSÃO DE ARMADURAS

Nos subcapítulos seguintes serão abordadas as metodologias referentes à reabilitação de superfícies de betão à vista cujas patologias verificadas na superfície do elemento estão directamente relacionadas com a corrosão das armaduras no seu interior. Como já foi referido anteriormente, no Capítulo 2, as causas da corrosão das armaduras são variadas. No entanto apenas serão abordadas as metodologias referentes à corrosão pela acção de cloretos e por carbonatação. Relativamente à deterioração do betão considerar-se-á dois cenários: deterioração apenas localizada, visualizando-se o destacamento do betão, e deterioração avançada originando a perda parcial da secção do elemento inicial. Assim sendo ter-se-á então quatro casos de estudo nos quais se centrará a aplicação da NP 1504 (Fig. 4.1). A escolha destes exemplos, tanto ao nível das causas para a corrosão das armaduras como da própria gravidade de deterioração do elemento é justificada pela frequência de situações idênticas verificadas na prática corrente das acções de reabilitação.

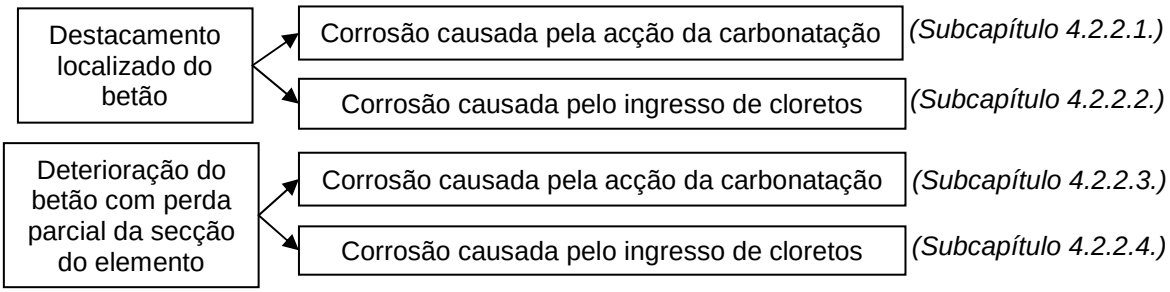



Fig. 4.1. – Casos práticos em estudo.

### 4.2.1. ENSAIOS PRELIMINARES

Na realização da inspecção preliminar ao elemento em estudo, passível de reabilitação, são utilizados auxiliares de diagnóstico como o fissurómetro, o esclerómetro, o medidor de humidade, etc.. No entanto, para reforçar o diagnóstico é necessário realizar ensaios preliminares adequados às patologias em estudo.

Antes de estabelecermos qualquer metodologia para a reparação do elemento é necessário realizar estes ensaios. Hoje em dia, existem muitos ensaios que, além de beneficiarem de novas tecnologias, são sobretudo ensaios não destrutivos ou, pelo menos, induzindo no elemento técnicas pouco intrusivas.

De toda a variedade de ensaios possíveis para a situação em causa, destacam-se então, aqueles que serão viáveis na realização de uma inspecção preliminar do elemento:

- Determinação *in situ* do teor de cloretos;
- Determinação da profundidade de carbonatação de betões;
- Medição da espessura do recobrimento;
- Avaliação da taxa de corrosão das armaduras pela técnica da resistência de polarização;
- Avaliação do risco de corrosão activa das armaduras através da medição da resistividade do betão.

O ensaio "Determinação *in situ* do teor de cloretos" é justificado pela necessidade de aferir a presença ou não de cloretos no elemento de betão e, em caso afirmativo, determinar o seu teor. Neste ensaio são retiradas amostras de pó pela furação do elemento, em zonas e profundidades estratégicas, como por exemplo, à superfície do elemento e perto das armaduras. Parte das amostras é posteriormente dissolvida numa solução ácida, na qual é colocado um eléctrodo ligado a um aparelho que faz directamente a leitura da percentagem de cloretos presente na amostra (Fig. 4.2.). A norma NP EN 206[22] fixa o teor máximo de cloretos presentes no betão armado em 0,4% de ião cloro em relação ao peso de cimento [3].

Fig. 4.2. – Equipamento para a determinação do teor de cloretos [3].

A realização do ensaio "Determinação da profundidade de carbonatação de betões" é necessária para aferir em que medida a frente carbonatada já atingiu ou não as armaduras no interior do elemento, promovendo a sua corrosão. Este ensaio é realizado com o recurso a equipamentos de furação, como

um berbequim com percussão e a uma solução alcoólica de fenolftaleína que será usada com indicador de pH. Os furos são realizados novamente em zonas estratégicas, com uma profundidade igual ou superior a 1 cm, limpos e em seguida molhados com a solução referida com o auxílio de um aspersor. Como a solução alcoólica de fenolftaleína é um indicador para pH básicos, onde se observar a mudança de coloração do furo para a cor carmim o betão não está carbonatado. Se o betão mantiver a sua coloração normal até determinada profundidade, então está carbonatado em toda essa profundidade, como se verifica na Fig. 4.3. [3].

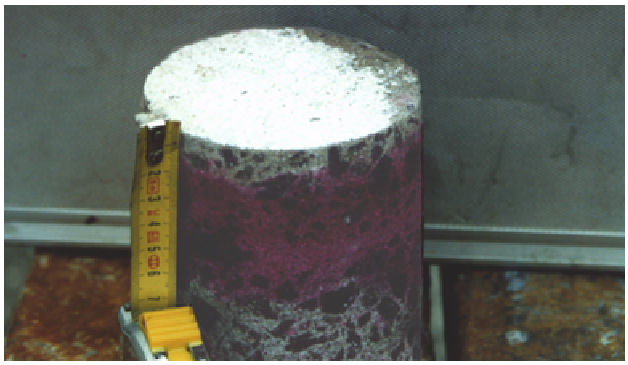


Fig. 4.3. – Reacção da fenolftaleína numa carote de betão onde o teste indica que o betão está carbonatado até uma profundidade entre os 1,5 a 2,0 cm [3].

A medição do recobrimento do elemento de betão é necessária mesmo que, em cota parte, o recobrimento já se tenha destacado. Ao longo do elemento é possível que a espessura de recobrimento, por erros de execução, seja variável, ao ponto de expor as armaduras mais à superfície. Nestas circunstâncias essas armaduras terão uma predisposição inicial para a corrosão, ao invés do que aconteceria se a espessura de recobrimento fosse tal que lhes desse uma maior protecção quer à carbonatação quer ao ingresso de cloretos. O medidor de recobrimento (Fig. 4.4.) utilizado neste ensaio, permite não só medir o recobrimento como as dimensões da armadura e a detecção da posição e da direcção das mesmas.

Fig. 4.4. – Medidor de recobrimento [3].

A "Avaliação da taxa de corrosão das armaduras pela técnica da resistência de polarização" em um ensaio realizado sobretudo em betões carbonatados ou com um elevado teor de cloretos. Neste ensaio é utilizado um equipamento munido de dois sensores que, de uma forma geral, realizam a medição da resistividade do betão e da taxa de corrosão. Entende-se como taxa de corrosão a quantidade de corrosão verificada por unidade de superfície e referida a um intervalo de tempo específico [3]. Os sensores são então colocados em contacto com a superfície do elemento e é realizada também uma ligação às armaduras (Fig. 4.5.).

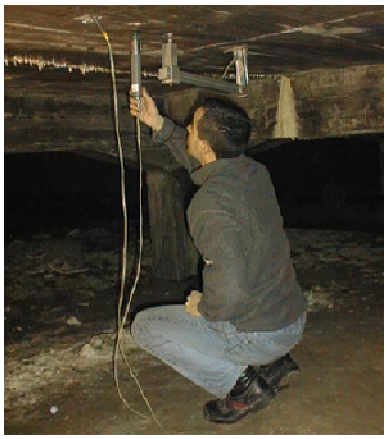


Fig. 4.5. – Recolha de dados relativos à taxa de corrosão e à resistividade [3].

Pelos valores obtidos relativamente à taxa de corrosão e à resistividade é possível aferir o nível de corrosão das armaduras com base no Quadro 4.1..

Quadro 4.1. – Níveis de corrosão associados a valores de referência da taxa de corrosão e da resistividade [3].

| Princípio | Valores de referência | Nível de corrosão |
|---|---|---|
| Taxa de corrosão ($\mu A/cm^2$) | < 0,1 | Desprezável |
| | 0,1 – 0,5 | Baixo |
| | 0,5 – 1,0 | Moderado |
| | > 1,0 | Elevado |
| | Fronteira convencional entre o aço no estado activo ou passivo ≅ 0,1 a 0,2 $\mu A/cm^2$ | |
| Resistividade (kΩ.cm) | > 100 – 200 | Taxas de corrosão muito baixas, mesmo em betão carbonatado ou contaminado com cloretos |
| | 10 – 100 | Taxas de corrosão baixas a altas |
| | < 10 | A resistividade não é um parâmetro relevante para a taxa de corrosão |
| | Fronteira convencional entre regiões passivas e activas ≅ 200 a 400 kΩ.cm | |

O ensaio de "Avaliação do risco de corrosão activa das armaduras através da medição da resistividade do betão" permite detectar as áreas onde a corrosão já está presente e aquelas onde está prestes a verificar-se mesmo que não haja sinais superficiais de corrosão, tudo isto sem que seja necessário destruir a superfície do elemento. Para isto utiliza-se um equipamento constituído por quatro eléctrodos colocados na superfície do betão e realiza-se a medição da resistividade (Fig. 4.6.). Baixas taxas de corrosão estão associadas a valores de resistividade superiores a 12 kΩ.cm e taxas de corrosão elevadas estão associadas a resistividades inferiores a 5 kΩ.cm.

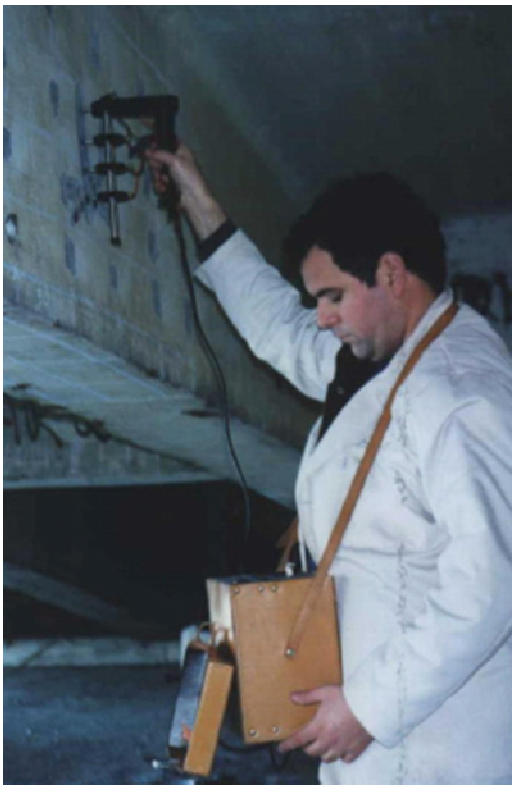


Fig. 4.6. – Medição da resistividade [3].

### 4.2.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE PROTECÇÃO E REPARAÇÃO GERAIS

A escolha destes princípios e métodos de protecção e reparação terão que ter em consideração o ambiente em que se localiza o elemento, por exemplo um ambiente marítimo, e também o diagnóstico efectuado a partir dos resultados da inspecção e dos ensaios preliminares. Assim sendo, de acordo com a análise dos resultados referidos, há que adequar os princípios e métodos a uma de duas hipóteses:

- Corrosão das armaduras por carbonatação e posterior deterioração do betão;
- Corrosão das armaduras pela acção dos iões cloreto e posterior deterioração do betão.

Os ensaios com maior relevância para esta ponderação serão a "Determinação *in situ* do teor de cloretos" e a "Determinação da profundidade de carbonatação de betões". A Fig. 4.7. representa, de uma forma esquemática, a adequação das escolhas dos princípios, métodos, materiais e sistemas face ao resultado dos ensaios preliminares.

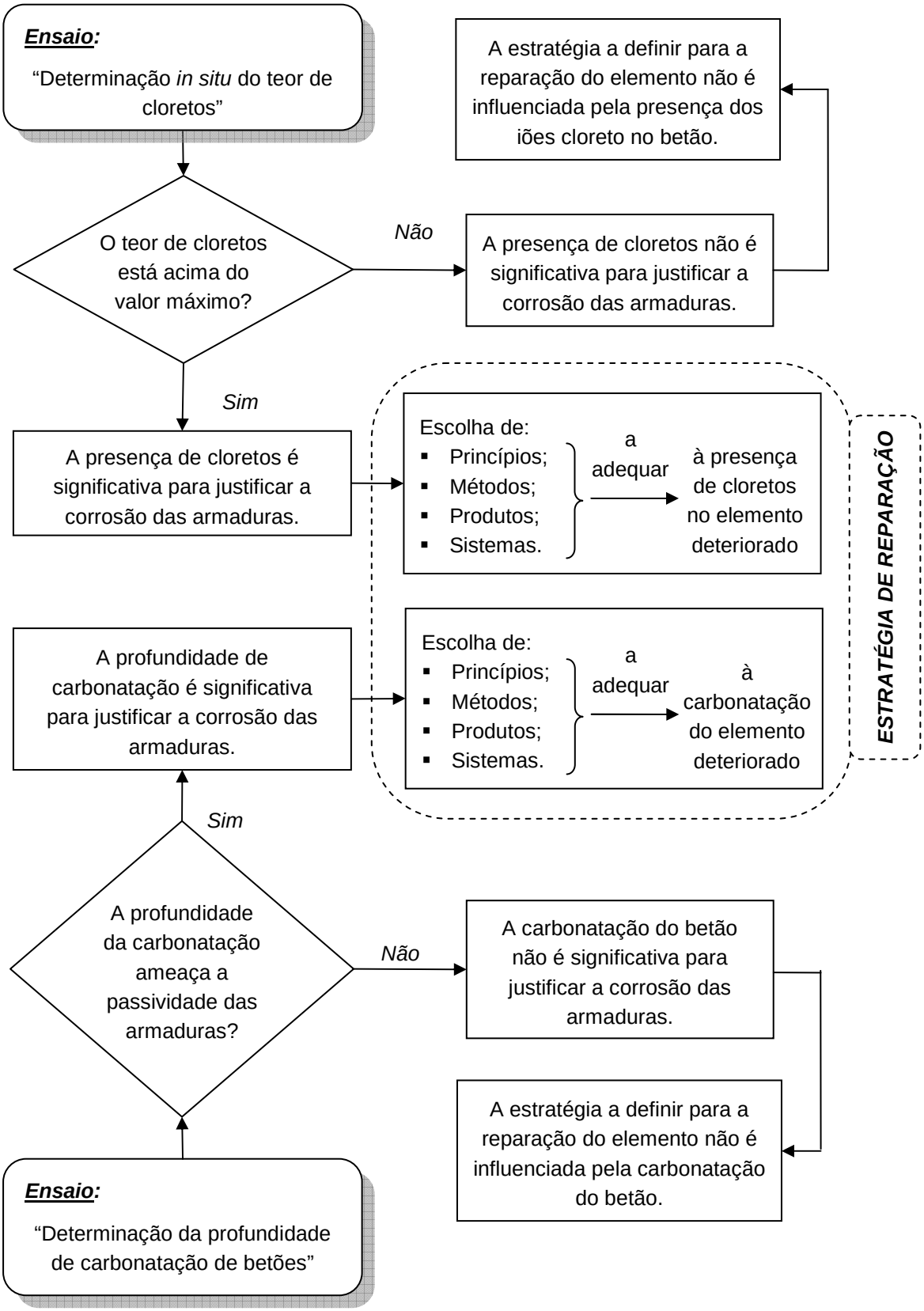



Fig. 4.7. – Adequação da escolha dos princípios, métodos, produtos e sistemas ao resultados dos ensaios relativos ao teor de cloretos e à carbonatação presentes no elemento em estudo.

Os ensaios de "Medição da espessura do recobrimento", "Avaliação da taxa de corrosão das armaduras pela técnica da resistência de polarização" e "Avaliação do risco de corrosão activa das armaduras através da medição da resistividade do betão" são ensaios de suporte ao diagnóstico e às estratégias de reparação, que permitem averiguar o estado, mais ou menos avançado, da corrosão das armaduras em zonas onde a deterioração do betão não o demonstra. No caso de ser detectada a corrosão activa das armaduras ao longo do elemento, mesmo em zonas onde o betão não esteja ainda deteriorado, poder-se-á optar por realizar uma intervenção no elemento mais exaustiva e extensa. Desta forma é possível aumentar a durabilidade de todo o sistema de reabilitação bem como do próprio elemento. Esta consideração é importante quer seja a presença de cloretos ou a carbonatação a causa principal da deterioração do betão e da corrosão das armaduras (Fig. 4.8.).

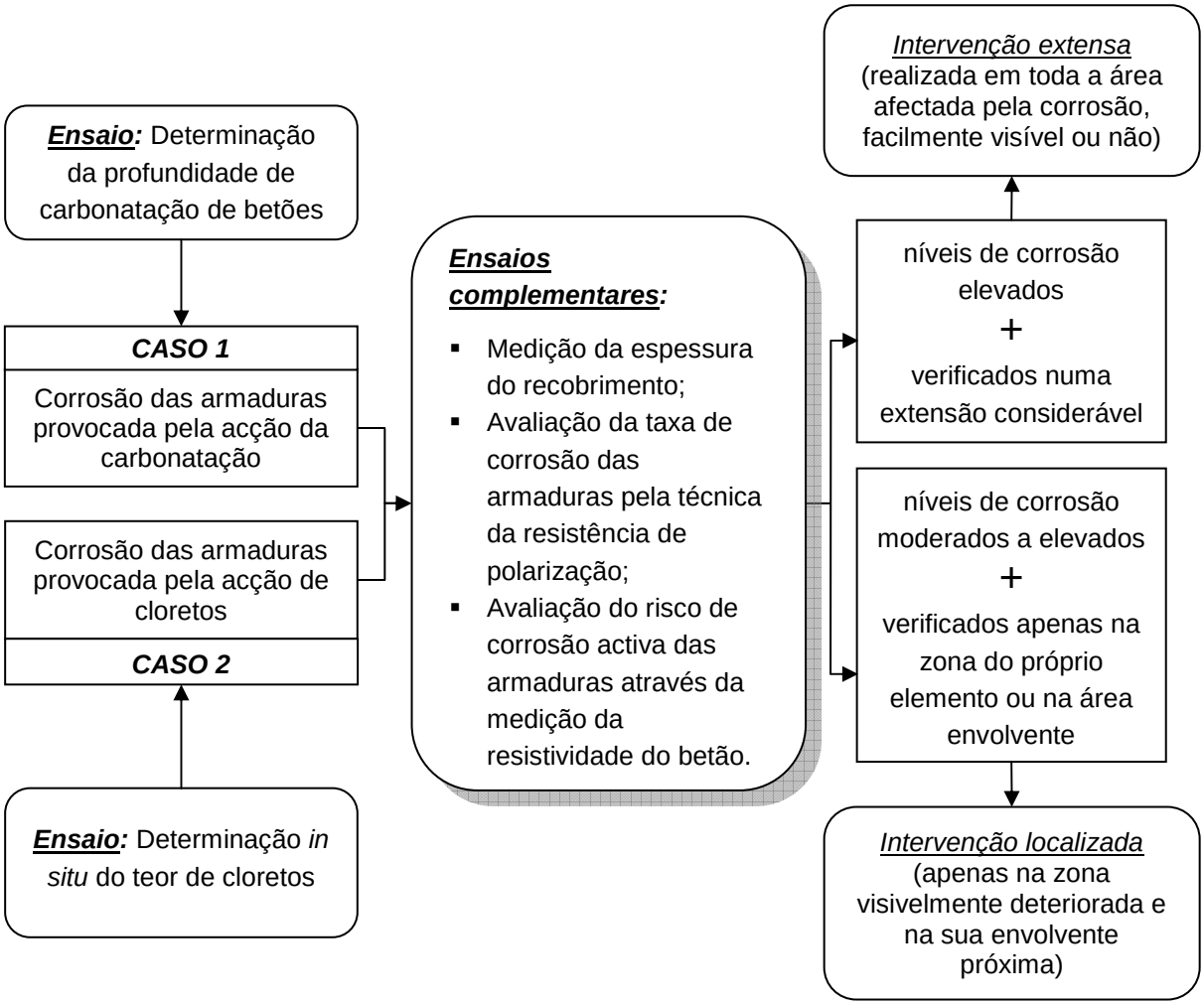



Fig. 4.8. – Consideração dos níveis de corrosão das armaduras, determinado através de ensaios, na estratégia da reabilitação do elemento.

De acordo com a série NP 1504 é possível estabelecer, de uma forma geral, um conjunto de princípios e métodos a ter em conta na reabilitação deste elemento, quer estejamos na presença de iões cloreto ou de carbonatação. Os princípios e métodos são idênticos, existindo posteriormente sistemas e produtos mais adequados a uma situação e a outra. A escolha destes princípios e métodos é baseada nas opções descritas na Fig. 3. 6. e na Fig. 3.7..

Desta forma poderemos ter os seguintes princípios associados à estratégia de reabilitação, segundo a NP 1504 e a bibliografia referida [5, 14, 26, 31, 32, 33]:

- Controlo das áreas anódicas (corrosão das armaduras);
- Preservação ou restauração da passividade (corrosão das armaduras);
- Reforço estrutural (deterioração do betão);
- Restauração do betão (deterioração do betão);
- Protecção contra o ingresso (deterioração do betão);
- Aumento da resistividade (corrosão das armaduras);
- Controlo da humidade (deterioração do betão).

Estes princípios surgirão interligados na sequência apresentada na Fig. 4.9.. De forma geral teremos numa primeira fase o tratamento directo das armaduras corroídas, posteriormente a reparação do betão deteriorado e por último a aplicação de protecções superficiais [5, 14, 26, 31, 32, 33].

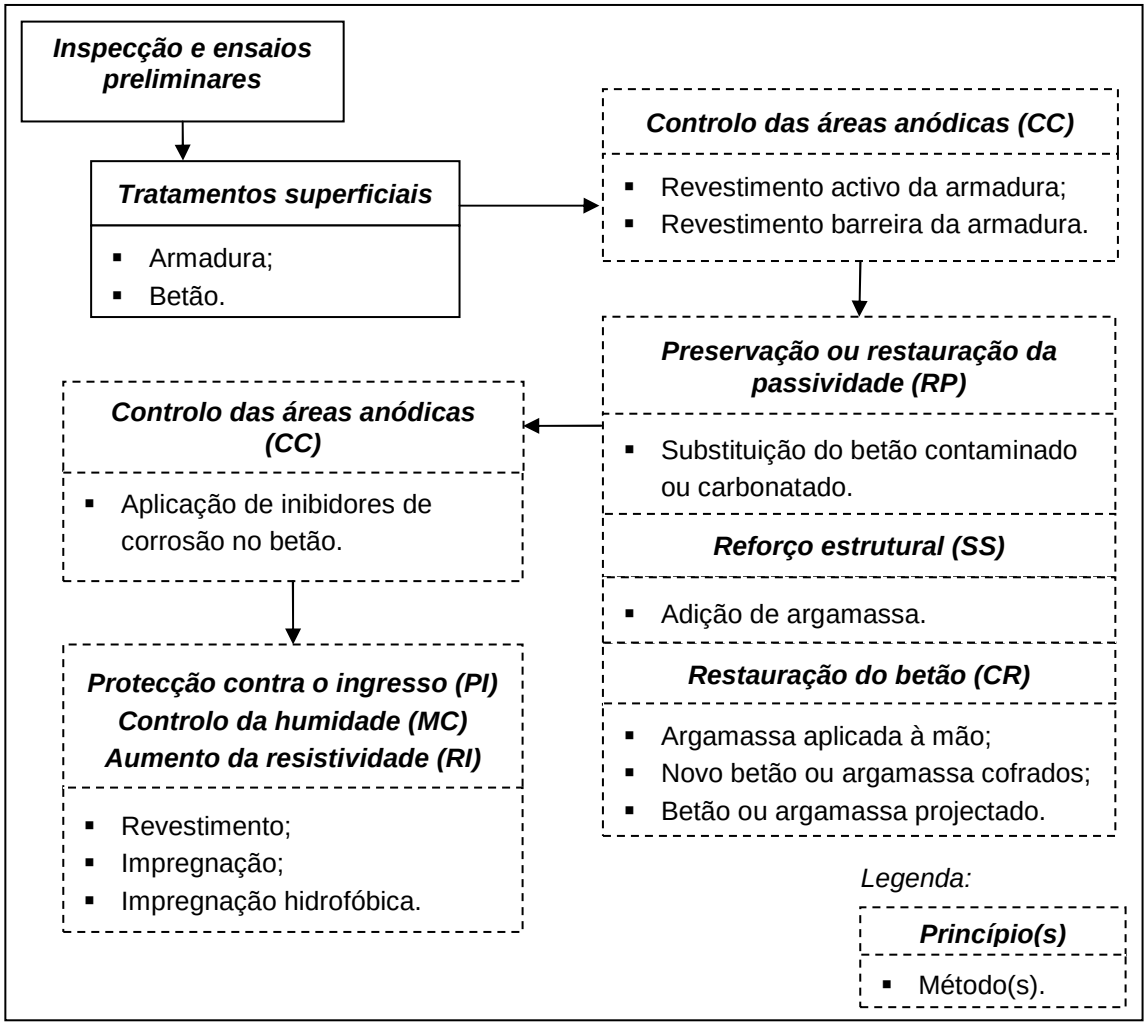



Fig. 4.9. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento.

Assumindo os pressupostos apresentados relativos ao estado de deterioração do elemento e às suas causas e considerando [5, 26, 32, 33], após o tratamento das superfícies surge, em primeiro lugar a aplicação de produtos que conferem protecção contra a corrosão das armaduras, aplicados tanto em situações em que a corrosão é provocada pela acção da carbonatação como pela acção dos cloretos. Nomeadamente revestimentos activos ou revestimentos barreira. Os revestimentos barreira impõem um maior cuidado no tratamento das armaduras antes da aplicação e durante a sua própria aplicação [26]. Se tal não for conseguido o desempenho do revestimento ficará desde logo comprometido. A característica de desempenho destes produtos obrigatória para todas as utilizações, segundo a NP 1504-7[30], é a "Protecção contra a corrosão", definida pelo método de ensaio presente na EN 15183[49]. Aceitar-se-ão todos os produtos que satisfaçam, de acordo com o método de ensaio referido, o seguinte requisito: as zonas revestidas não exibem corrosão e se a ferrugem, sob o revestimento após a remoção deste, é inferior a 1mm.

Numa fase posterior, e com o intuito de restaurar o elemento, surge a aplicação de argamassas à mão ou argamassas e betão cofrados, com o intuito igualmente de substituir o betão contaminado [5, 31, 32, 33]. Os requisitos de desempenho para estes produtos constam da NP 1504-3[20], sendo alguns obrigatórios para todas as utilizações e alguns apenas para certas aplicações. De acordo ainda com esta norma as argamassas ou betões podem ser classificados como estruturais, de classe R4 ou R3, e não estruturais, de classe R2 ou R1. Esta classificação está relacionada com o desempenho dos produtos em relação às seguintes características[20]:

- Resistência à compressão;
- Teor de cloretos;
- Aderência;
- Retracção impedida/expansão;
- Resistência à carbonatação (durabilidade);
- Módulo de elasticidade.

Estas características de desempenho são válidas para qualquer campo de utilização de qualquer produto, seja ele classificado como estrutural ou não estrutural. Os princípios "Restauração do betão" e "Reforço Estrutural" englobam igualmente a aplicação de argamassas ou betões estruturais ou não estruturais, sendo que a sua selecção dependerá da escolha da estratégia de reabilitação, adequada ao grau de deterioração do elemento e ao ambiente em que se insere [5].

Estes materiais de reparação podem também ser classificados como: argamassas poliméricas (PC), argamassas com cimento hidráulico e polímeros (PCC) e argamassas hidráulicas (CC) [34]. Tendo propriedades e comportamentos diferentes, a sua escolha será apropriada a diferentes tipos de aplicações. No Quadro 4. 2. é possível observar as propriedades mecânicas típicas destes materiais de reparação. De uma forma geral, as propriedades mecânicas das argamassas com cimento hidráulico e polímeros tendem a estar entre as propriedades das argamassas poliméricas e hidráulicas.

Quadro 4. 2. – Propriedades mecânicas típicas das argamassas de reparação [34].

| Propriedades | Argamassa polimérica (PC) | Argamassa com cimento hidráulico e polímeros (PCC) | Argamassa hidráulica (CC) |
|---|---|---|---|
| Resistência à compressão (MPa) | 50 - 100 | 30 - 60 | 20 - 50 |
| Resistência à tracção (MPa) | 10 - 15 | 5 - 10 | 2 - 5 |
| Módulo de elasticidade à compressão (GPa) | 10 - 20 | 15 - 25 | 20 - 30 |
| Coeficiente de dilatação térmica (/ºC) | 25 – 30 $x10^{-6}$ | 10 – 20 $x10^{-6}$ | 10 $x10^{-6}$ |
| Absorção de água (% em massa) | 1 - 2 | 0,1 – 0,5 | 5 - 15 |
| Temperatura máxima de serviço (ºC) | 40 - 80 | 100 – 300 | < 300 |

As argamassas poliméricas, argamassas de ligantes orgânicos, têm na sua base resinas termoendurecíveis de poliéster ou de epóxido, tendo, após o seu endurecimento, as seguintes características principais [35]:

- Resistência mecânica: varia em função do tipo de formulação. As resistências à flexão e à tracção diminuem e a resistência à compressão aumenta com a introdução de cargas na sua formulação;
- Aderência aos suportes: normalmente elevada (superior a 2MPa);
- Retracção durante a cura: é baixa, muito inferior à dos materiais cimentícios. Por norma as formulações de poliéster apresentam uma retracção superior à das formulações de epóxido;
- Módulo de elasticidade: não apresentam comportamentos lineares, dependendo da formulação e das cargas utilizadas. Ao aumento da percentagem de cargas utilizadas na sua formulação está associado um aumento do módulo de elasticidade;
- Extensão na rotura: pode variar entre 1,5 a 5%. A introdução de cargas na sua formulação pode reduzir muito este valor;
- Coeficiente de dilatação térmica: é muito superior ao dos materiais cimentícios. Esta diferença é importante em uniões de substratos em que a espessura da camada de resina seja superior a 1mm, como no caso de revestimentos de piso, podendo ocorrer a rotura na sua interface;
- Resistência química: são resistentes à água, aos ácidos não oxidantes e álcalis, gasolina, entre outros;
- Resistência à temperatura: geralmente não sofrem alterações até aos 50 – 70ºC. As resinas epóxido têm maior resistência à temperatura do que as de poliéster;
- Comportamento a longo prazo: as resinas epóxido são as que apresentam maior durabilidade, quer em presença de água, quer sujeitas à fadiga.

As argamassas à base de ligantes orgânicos não conseguem promover a passivação das armaduras, pelo que é aconselhável a protecção das mesmas com o recurso a tratamentos anticorrosivos. Para

aplicações não estruturais são utilizadas argamassas de ligante poliéster, sendo as argamassas de ligante epoxídico recomendadas para as seguintes utilizações [35]:

- Argamassas de reparação de estruturas em que seja necessário uma cura rápida (trabalhos marítimos, por exemplo);
- Reparações de pequenas espessuras (< 3cm) ou zonas angulosas (destacamento de betão devido à corrosão);
- Selagens e ancoragens de elementos metálicos submetidos a elevados esforços de tracção com redução dos comprimentos de amarração e execução e reparação de juntas de estradas.

As argamassas hidráulicas e as argamassas com cimento hidráulico e polímeros são argamassas à base de ligantes inorgânicos, geralmente o cimento portland. O seu campo de aplicação é amplo, podendo ser utilizadas como materiais para reconstituição de elementos deteriorados ou como materiais para tratamentos superficiais. As principais características requeridas a estes materiais de reparação são as seguintes [35]:

- Resistência mecânica igual ou superior à do substrato: pela baixa relação A/C, resultante da utilização de adjuvantes redutores da água de amassadura. Da baixa razão A/C resulta uma resistência ao ingresso de iões cloreto e à carbonatação, pela baixa permeabilidade, capilaridade e porosidade do material;
- Reduzida retracção ou ligeira expansão: pela adição de cal ou gesso por exemplo, ou adjuvantes expansivos. Assim sendo é garantida a ligação permanente ao substrato e a eliminação de fissuras de retracção;
- Boa aderência aos materiais cimentícios: resultante da afinidade química, da ausência de exsudação e retracção;
- Facilidade de aplicação: pela elevada fluidez e utilização de inertes e pela tixotropia.

Às argamassas com cimento hidráulico e polímeros, a incorporação de polímeros na sua constituição permite uma melhoria da resistência à fissuração por retracção. De uma forma geral, a presença de polímeros permite o controlo do desenvolvimento da fissuração associada à retracção plástica, sendo que a permeabilidade desta camada diminui. A estas argamassas estão geralmente associadas as seguintes vantagens: aumento da capacidade de adesão ao suporte, aumento da resistência física, química e à abrasão.

A compatibilidade entre os materiais de reparação e o substrato existente é importante para assegurar a qualidade e durabilidade da reabilitação do elemento deteriorado. Entre outros factores a compatibilidade dimensional, que traduz a capacidade do material de reparação de resistir a variações de volume sem perda de aderência ao substrato, surge como o factor mais importante. A falta de compatibilidade dimensional está muitas vezes na origem de patologias precoces em trabalhos de reparação, associadas por exemplo a [34]:

- Tensões resultantes de retracção excessiva sobretudo em argamassas hidráulicas e argamassas com cimento hidráulico e polímeros;
- Expansão excessiva em algumas argamassas de retracção controlada;
- Excessiva dilatação térmica seguida de um arrefecimento brusco durante o processo de cura.

As dimensões, forma e espessura da área a reparar, o módulo de elasticidade, a capacidade resistente e a fluência são igualmente parâmetros que influenciam a compatibilidade dimensional.

A compatibilidade estrutural e mecânica é outro dos factores a ter em conta, à qual estão associados os seguintes parâmetros principais: a resistência (à compressão, tracção e flexão), o módulo de elasticidade (à compressão, tracção e flexão), a tensão de aderência e o coeficiente de dilatação térmica. Para argamassas utilizadas em reparações não estruturais os dois últimos parâmetros são determinantes. Assumindo as resistências mecânicas e os módulos de elasticidade maior importância na selecção de argamassas a utilizar em reparações estruturais [34].

De uma forma geral é recomendado que a resistência mecânica e a tensão de aderência do material de reparação sejam iguais ou superiores à do substrato onde será aplicado. Já o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica devem ser semelhantes ao do substrato a reparar [34].

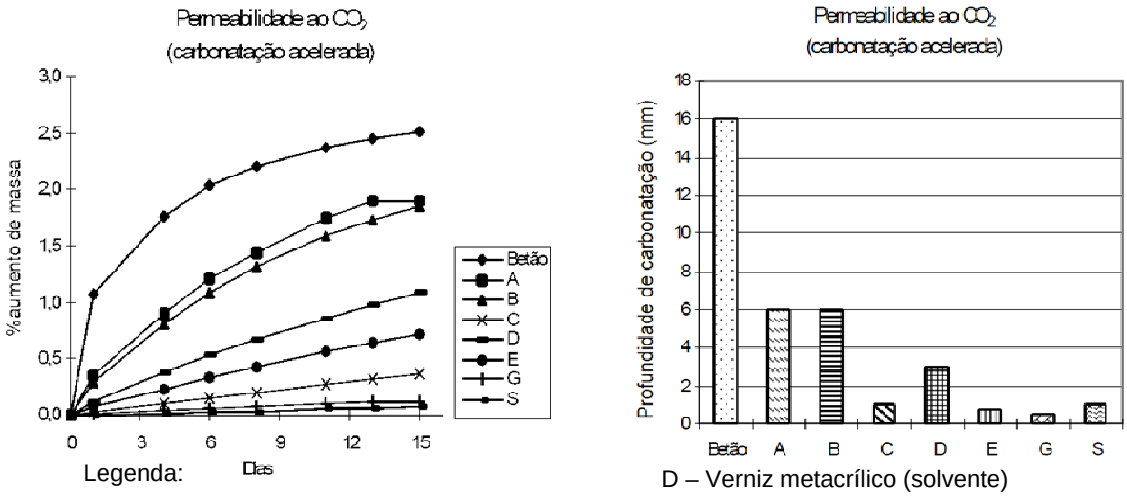
A compatibilidade química, por último, é um factor igualmente importante, sendo essencial que seja assegurada entre os materiais de reparação e o substrato, caso contrário assiste-se a uma precoce deterioração dos materiais. Argamassas à base de ligantes inorgânicos serão mais compatíveis com substratos de betão armado, por afinidade química [35].

Posteriormente, em situações em que se preveja a necessidade de conferir um acréscimo de protecção contra a corrosão das armaduras, como por exemplo no caso de uma exposição significativa à acção de iões cloreto, aplicar-se-á um inibidor de corrosão em todo o elemento já reparado [5, 26, 32, 33]. Na presença de carbonatação a aplicação deste tipo de produtos é, geralmente, dispensável. Como já foi anteriormente referido não existe documentação técnica que refira requisitos de desempenho a exigir para este tipo de produtos.

Numa fase final serão aplicados produtos que conferirão uma protecção superficial ao elemento reabilitado [5, 14, 32, 33]. Estes elementos poderão ser impregnações hidrofóbicas, impregnações e revestimentos segundo a NP 1504-2[16]. Para conferir uma protecção ao elemento contra a acção da carbonatação é usual a selecção de revestimentos [32, 33]. Para estes produtos, neste âmbito de aplicação, são definidas para todas as utilizações, pela NP 1504-2[16], o conjunto das seguintes características de desempenho:

- Permeabilidade ao $CO_2$;
- Permeabilidade ao vapor de água;
- Absorção capilar;
- Aderência por arrancamento.

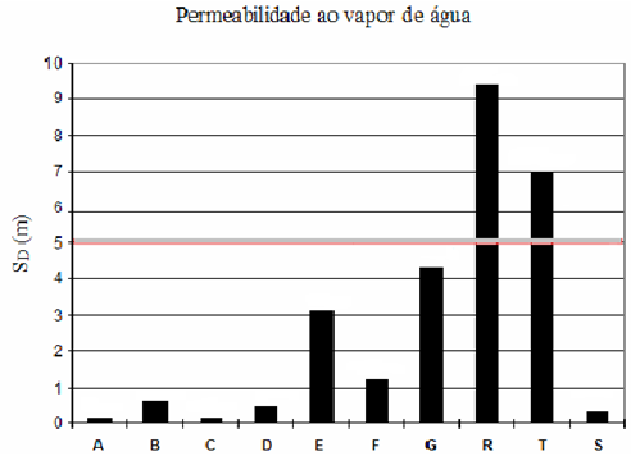
A permeabilidade ao dióxido de carbono é determinada de acordo com a EN 1062-6[56] que define que a espessura da camada de ar de difusão equivalente, $S_D$, terá que ser superior a 50 m. A Fig. 4. 10. apresentam um conjunto de provetes com e sem revestimento sujeitos à carbonatação, observando-se a redução da mesma com a aplicação dos revestimentos [36].




Legenda:
A – Tinta acrílica lisa (aquosa)
B – Tinta acrílica modificada lisa (solvente)
C – Tinta acrílica text. (aquosa)
D – Verniz metacrílico (solvente)
E – Tinta metacrílica lisa (solvente)
G – Tinta metacrílica lisa (solvente)
S – Tinta acrílica lisa (aquosa)

Fig. 4. 10. – Evolução da carbonatação com o tempo de exposição e profundidade de carbonatação de provetes pintados e não pintados [14, 36].

Uma característica que poderá contribuir para o aparecimento de defeitos no revestimento por pintura é a permeabilidade ao vapor de água. Situações em que existe retenção de água por detrás do revestimento conduzem ao aparecimento de empolamentos e destacamento do substrato [36]. Esta propriedade é determinada através das EN ISO 7783-1 e 2[37], sendo o revestimento classificado em: classe I ($S_D \leq 5$ m, permeável ao vapor de água), classe II (5 m $\leq S_D \leq$ 50 m) e classe III ($S_D >$ 50 m, não permeável ao vapor de água) [16]. Um $S_D \leq 5$ m é normalmente aceite para situações em que se pretenda manter o equilíbrio hídrico entre o betão e o meio ambiente. A Fig. 4. 11. apresenta a permeabilidade ao vapor de água de diferentes tipos de revestimentos por pintura.

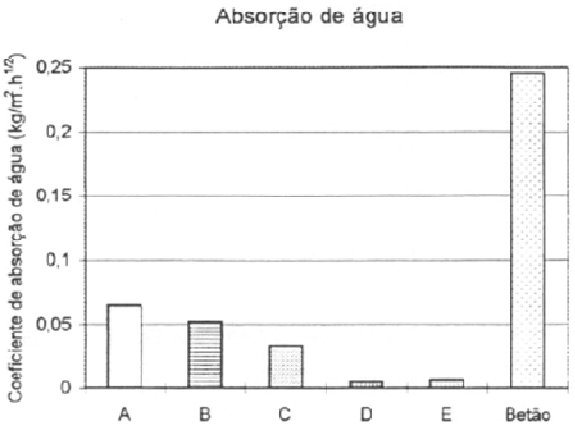



Legenda:
A – Acrílica (aquosa)
B – Acrílica modificada (solvente)
C – Acrílica (aquosa) text.
D – Verniz metacrílico (solvente)
E – Metacrílica (solvente)
F – Borracha clorada (solvente)
G – Metacrílica (solvente)
R – Epoxídica (2 componentes)
T – Epoxídica (2 componentes)
S – Acrílica (aquosa)

Fig. 4. 11. – Permeabilidade ao vapor de água de diferentes tipos de revestimentos por pintura [14, 36].

A absorção capilar é determinada pela EN 1062-3[37] tendo um valor como aceitável inferior a 0,1 kg/m$^2$.h$^{0,5}$, e inferior a 0,01 kg/m$^2$.h$^{0,5}$ em ambientes com a presença de iões cloreto [16, 34]. Esta característica traduz a capacidade, por parte do sistema de protecção, de evitar a penetração de água no

estado líquido. De uma forma geral, revestimentos de base aquosa possuem maior afinidade entre a sua película e a água, como se verifica pela Fig. 4. 12. [14].

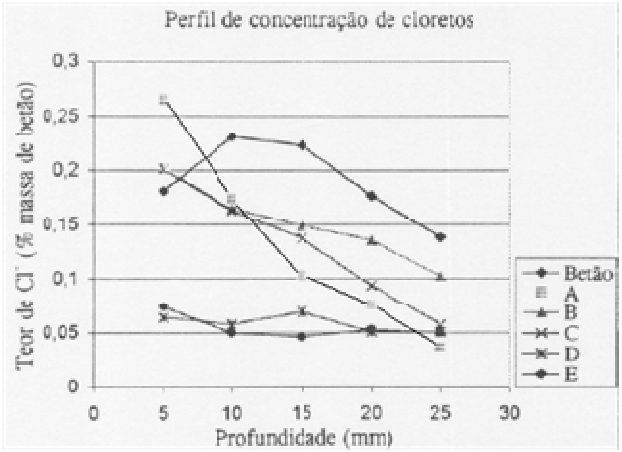



Legenda:
A – Acrílica lisa (aquosa)
B – Acrílica modificada lisa (solvente)
C – Acrílica (aquosa) text.
D – Verniz metacrílico (solvente)
E – Metacrílica lisa (solvente)

Fig. 4. 12. – Coeficiente de absorção de água de revestimentos por pintura de base aquosa e de solvente orgânico [14].

A aderência por arrancamento é determinada pela EN 1542[39] correspondendo a requisitos de sistemas flexíveis ou suportando fissurações, sistemas rígidos e com ou sem tráfego.

No caso do elemento estar sujeito à acção dos iões cloreto é usual a aplicação de impregnações hidrofóbicas ou revestimentos [14, 32]. As impregnações hidrofóbicas podem reduzir a absorção de água do betão de 70 a 90%, estando esta redução directamente ligada à resistência à penetração dos cloretos [14]. Já os revestimentos por pintura comportam-se de forma mais variável, dependendo da sua constituição, como é possível verificar na Fig. 4. 13.




Legenda:
A – Acrílica lisa (aquosa)
B – Acrílica modificada lisa (solvente)
C – Acrílica (aquosa) text.
D – Verniz metacrílico (solvente)
E – Metacrílica lisa (solvente)

Fig. 4. 13. – Coeficiente de absorção de água de revestimentos por pintura de base aquosa e de solvente orgânico [14].

De acordo com [14] é possível concluir pela análise das Fig. 4. 12. e Fig. 4. 13. que os produtos mais permeáveis à água são também os mais permeáveis aos iões cloreto.

De uma forma geral, na estratégia de reabilitação dos quatros casos em estudo, ter-se-á presente a necessidade de conferir ao elemento características do ponto de vista estético muito semelhantes ao seu aspecto original. A série NP 1504 não define características e requisitos impostos aos produtos de protecção superficial com uma preocupação estética, estabelecendo princípios e métodos cujos produtos conferissem ao elemento um acabamento idêntico, por exemplo, à aparência de "face à vista" ou de "superfície cofrada". Posto isto neste capítulo, a alusão a esta questão estará condicionada às considerações da série NP 1504 para os produtos e sistemas seleccionados.

Seguidamente apresentar-se-á, de forma mais exaustiva, uma estratégia de reabilitação do elemento em causa para cada uma das quatro situações distintas:

- Corrosão localizada do elemento provocada pela acção da carbonatação;
- Corrosão localizada do elemento provocada pela penetração de cloretos;
- Corrosão generalizada do elemento provocada pela acção da carbonatação;
- Corrosão generalizada do elemento provocada pela penetração de cloretos.

#### 4.2.2.1. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção da carbonatação deteriorado pontualmente

Tendo em conta que, após a realização dos ensaios referidos na Fig. 4.7. e na Fig. 4.8., são obtidos os seguintes resultados:

- Verifica-se o destacamento do recobrimento acompanhado da exposição das armaduras do elemento, pontualmente;
- A profundidade de carbonatação atinge as armaduras, sendo que toda a espessura de recobrimento está carbonatada, sobretudo nas proximidades da zona onde o betão está deteriorado. Em zonas onde o betão não está deteriorado, ao longo do elemento, a profundidade de carbonatação não ameaça a passividade das armaduras;
- O nível de corrosão das armaduras é moderado a elevado, mas detectado apenas na zona onde a deterioração do betão é visível e também na sua envolvente próxima, os princípios e métodos de protecção e reparação serão aplicados ao elemento de forma localizada.

Os princípios e métodos de protecção e reparação serão aplicados ao elemento de forma localizada (Fig. 4.14.). Dos princípios e métodos descritos na Fig. 4.9. ir-se-ão seleccionar, segundo a NP 1504 e a bibliografia referida [5, 14, 26, 31, 32, 33], os seguintes:

- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de revestimento activo da armadura;
- Preservação ou restauração da passividade – por substituição do betão contaminado ou carbonatado;
- Restauração do betão – argamassa aplicada à mão;
- Protecção contra o ingresso – pela aplicação de revestimento por pintura;
- Aumento da resistividade – pela aplicação de revestimento por pintura.

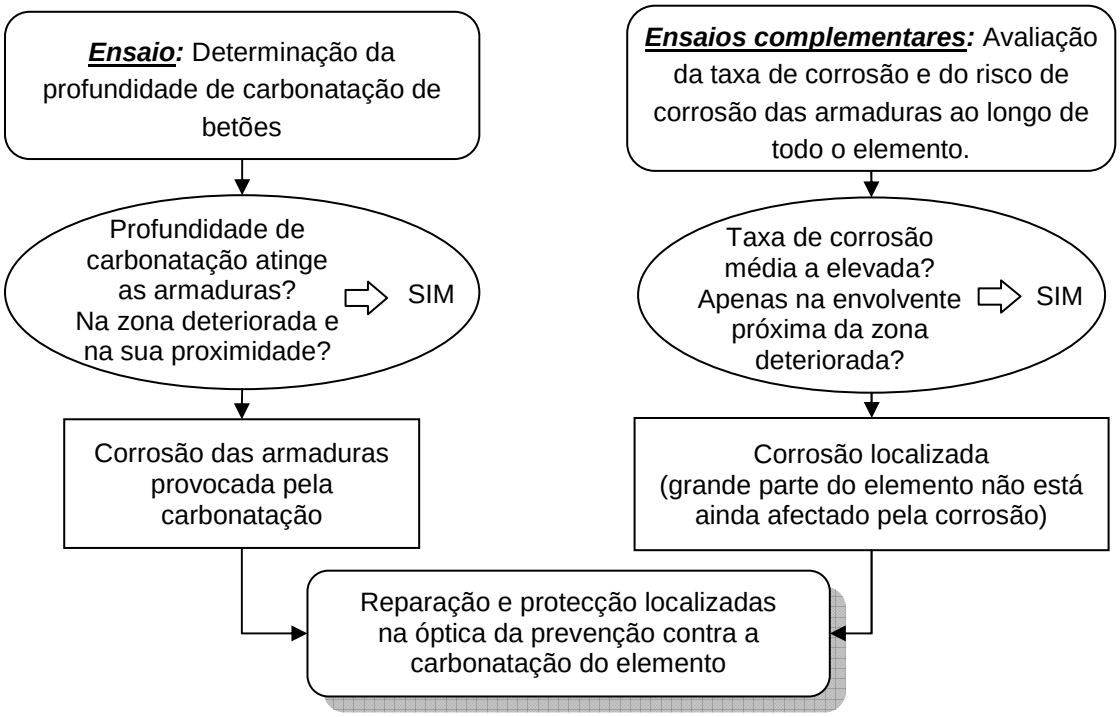



Fig. 4.14. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento localmente.

Na Fig. 4.15. é possível verificar o encadeamento entre os princípios acima descritos a aplicar na estratégia de reabilitação do elemento segundo [5, 14, 26, 31, 32, 33]. A qualidade de todo o sistema de reparação será directamente proporcional à qualidade das intervenções associadas à preparação das superfícies para receber esse sistema, sejam elas a superfície da armadura ou do próprio betão.

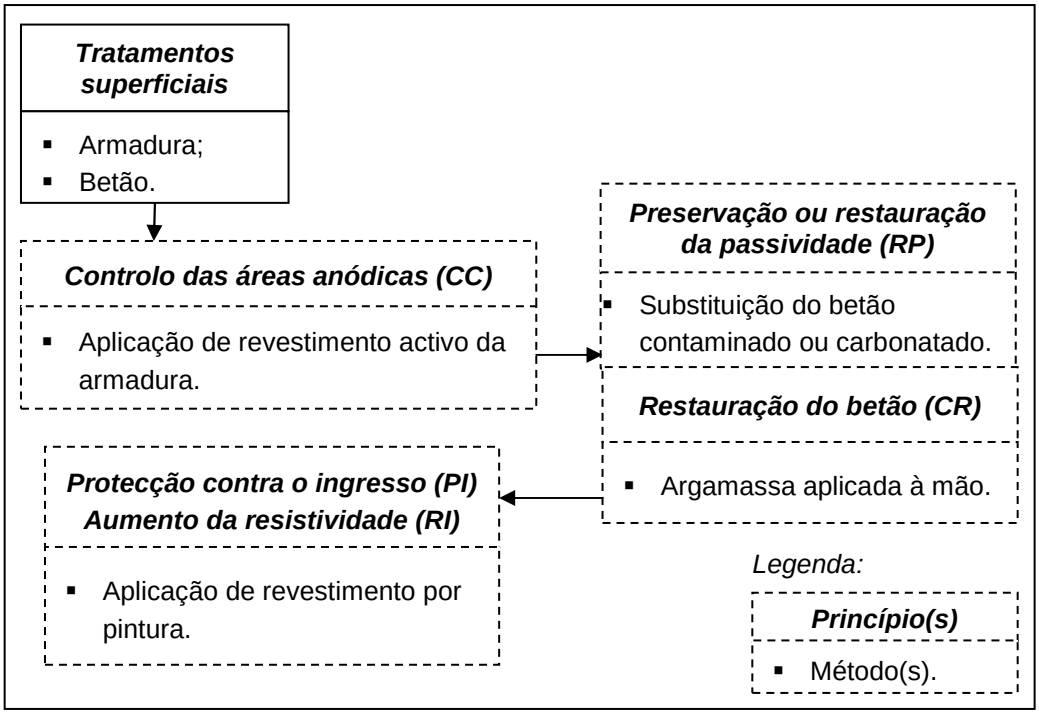



Fig. 4.15. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento.

O controlo das áreas anódicas será realizado pela aplicação de revestimento activo na armadura tendo em conta que a sua utilização se torna mais eficaz e durável, sendo que os revestimentos barreira exigem, por norma, um maior cuidado e controlo da sua aplicação para se tornar igualmente eficazes.

Os requisitos de desempenho a serem satisfeitos pelo revestimento activo das armaduras estão relacionados com as seguintes características de desempenho: protecção contra a corrosão, temperatura de transição vítrea e adesão ao corte (aço revestido sobre betão). A protecção contra a corrosão é verificada pela EN 15183[40], sendo que a aceitação dos resultados será possível se as zonas revestidas não exibirem corrosão e se a ferrugem sob o revestimento, após remoção deste a partir do bordo da placa seja inferior a 1mm. A temperatura de transição vítrea, verificada pela EN 12614[41], tem que ser pelo menos 10 ºK acima da temperatura de serviço. Os resultados referentes à adesão ao corte entre o aço revestido e o betão, verificados pela EN 15184[42], serão aceites se a tensão de aderência determinada com as barras revestidas seja inferior ou igual a 80% da tensão de aderência de referência determinada sobre barras não revestidas, para um deslocamento de 0,1 mm [30].

Posteriormente proceder-se-á à aplicação de argamassa de reparação à mão com o intuito de restaurar o elemento de betão e substituir o betão contaminado por carbonatação. Poder-se-ia aplicar betão ao invés da argamassa, mas sendo uma deterioração do betão pouco profunda (não comprometendo a sua funcionalidade estrutural) não será necessária a utilização de betão. Esta argamassa, de acordo com a NP 1504-3[20], deverá cumprir os requisitos expostos no Quadro 4. 3..

Quadro 4. 3. – Requisitos de desempenho de produtos de reparação não estrutural para restauração do betão [20].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos | |
|---|---|---|---|
| | | Classe R2 | Classe R1 |
| Resistência à compressão(*) | EN 12190[43] | ≥ 15 MPa | ≥ 10 MPa |
| Teor de cloretos(*) | EN 1015-17 [44] | ≤ 0,05 % | |
| Aderência(*) | EN 1542[39] | ≥ 0,8 MPa [(b)] | |
| Expansão/retracção impedidas (não aplicável no caso de ciclos térmicos) (*) | EN 12617-4 [45] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] ≥ 0,8 MPa [(b)] | Sem requisito |
| Resistência à carbonatação(*) | EN 13295[46] | Sem requisito [(c)] | |
| Módulo de elasticidade | EN 13412[47] | Sem requisito | |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos com chuva) | EN 13687-2 [48] | Resistência de colagem após 30 ciclos [(a)] ≥ 0,8 MPa [(b)] | Inspecção visual após 30 ciclos [(d)] |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos a seco) | EN 13687-4 [49] | Resistência de colagem após 30 ciclos [(a)] ≥ 0,8 MPa [(b)] | Inspecção visual após 30 ciclos [(d)] |

*(Continuação do Quadro 4.3.)*

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos | |
|---|---|---|---|
| | | Classe R2 | Classe R1 |
| Resistência ao deslizamento | EN 13036-4 [50] | Classe I: > 40 unidades ensaiadas molhadas<br>Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas<br>Classe III: > 55 unidades ensaiadas molhadas | |
| Coeficiente de dilatação térmica (para argamassas e betões poliméricos) | EN 1770[51] | Valor declarado | |
| Absorção capilar | EN 13057[53] | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | Sem requisito |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como produtos de reparação não estrutural no âmbito dos princípios RP e CR e métodos apresentados na Fig. 4.12., pela EN 1504-3[20].

(a) – Valor médio com nenhum valor individual inferior a 75% do requisito mínimo. A largura média máxima permitida é ≤ 0,05 mm, com nenhuma fissura ≥0,1 mm e ausência de delaminação.

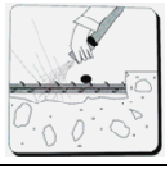
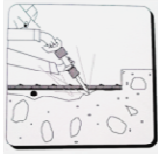
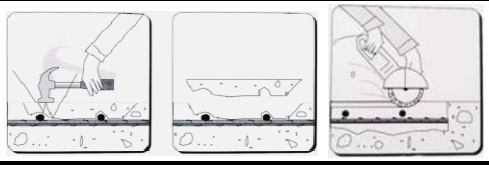
(b) – Não é requerido o valor de 0,8 MPa quando ocorre rotura coesiva no material de reparação. Se esta ocorrer requere-se uma resistência à tracção mínima de 0,5 MPa.

(c) – Não é apropriado para a protecção contra a carbonatação, a menos que o sistema de reparação inclua um sistema de protecção superficial contra a carbonatação (NP 1504-2[16]).

(d) – A largura média máxima permitida é ≤ 0,05 mm, com nenhuma fissura ≥0,1 mm e ausência de delaminação.

Antes da aplicação de qualquer produto referido é necessário proceder à preparação do substrato, armadura e betão, de acordo com os processos indicados no Quadro 4. 4..

Quadro 4. 4. – Processos de preparação dos substratos armadura e betão [32, 52].

| Processos de preparação | | Substrato | |
|---|---|---|---|
| | | Armadura | Betão |
| Limpeza |  | Aplicável | Aplicável |
| Desbaste |  | - | Aplicável |
| Remoção do betão |  | - | Aplicável |

Para a aplicação do revestimento activo é necessário realizar a preparação das armaduras a tratar, que consiste na sua limpeza. A extensão desta preparação será tanto maior quanto maior for a necessidade de proteger as armaduras contra a corrosão. A descrição da preparação deste substrato consta do Anexo A.3.1..

Antes da aplicação da argamassa de reparação há que realizar igualmente a preparação do substrato, passando esta pela limpeza, desbaste e remoção de betão existente na superfície a reparar do elemento. Esta preparação seguirá em conjunto com a preparação das armaduras anteriormente descrita e está descrita igualmente no Anexo A.3.2..

No seguimento da preparação das superfícies realizar-se-á a aplicação do revestimento activo das armaduras, cujas considerações de aplicação constam do Anexo A.3.4..

Após a aplicação do revestimento activo das armaduras proceder-se-á à aplicação da argamassa de reparação à mão, respeitando o tempo de espera imposto pelo produto anterior. Esta aplicação terá que respeitar as seguintes fases: a colagem do produto de reparação ao substrato, a própria aplicação do produto e por último a sua cura, descritas em pormenor no Anexo A.3.5..

Posteriormente proceder-se-á à aplicação de um revestimento por pintura com o objectivo de impedir o reingresso de dióxido de carbono e aumentar a resistividade do elemento prevenindo uma posterior carbonatação. Os requisitos de desempenho para um revestimento a aplicar por pintura num elemento sujeito à acção da carbonatação, após a sua reabilitação, estão descritos no Quadro 4.5..

Quadro 4.5. – Requisitos de desempenho para o revestimento por pintura [20].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos |
|---|---|---|
| Retracção linear (apropriada para sistemas com espessuras de aplicação ≥ 3mm) | EN 12617-1[52] | ≤ 0,3 % |
| Coeficiente de expansão térmica (para revestimentos com espessura ≥ 1mm) | EN 1770[51] | Sistemas rígidos para aplicação no exterior: $\alpha_T \leq 30x10^{-6}\ K^{-1}$ |
| Aderência pelo método da quadrícula | EN ISO 2409[55] Largura de incisão de 4 mm | Valor da quadrícula ≤ GT 2 |
| Permeabilidade ao $CO_2$ (*) | EN 1062-6[56] | Permeabilidade ao $CO_2$ $s_D > 50$ m |
| Permeabilidade ao vapor de água (*) | EN ISO 7783-1[57] EN ISO 7783-2[58] | Classe I: $s_D \leq 5$ m (permeável ao vapor de água) Classe II: 5 m ≤ $s_D$ ≤ 50 m Classe III: $s_D > 50$ m (não permeável ao vapor de água) |
| Absorção capilar e permeabilidade à água (*) | EN 1062-3[38] | $w < 0,1\ kg/m^2.h^{0,5}$ |

*(Continuação do Quadro 4.5.)*

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos |
|---|---|---|
| Aderência após compatibilidade térmica ciclos de aquecimento e chuva | EN 13687-2[48] | Após o ciclo térmico:<br>a) Ausência de bolhas, fissuração ou delaminação;<br>b) Satisfazer os valores limite para ensaio de arrancamento ($N/mm^2$). |
| Envelhecimento, 7d a 70 ºC | EN 1062-11:2002[59] | |
| Resistência ao choque térmico | EN 13687-5[60] | |
| Resistência do revestimento à fissuração do substrato<br>7d a 70 ºC para sistemas à base de resinas<br>Radiações UV e humidades para sistemas à base de dispersão | EN 1062-7[61] | As classes requeridas deverão ser definidas pelo projectista de acordo com a EN 1062-7[61] tendo em conta o clima, a largura e o movimento das fendas. Após o ensaio não podem ocorrer quaisquer roturas. |
| Aderência por arrancamento (*) | EN 1542[39] | Satisfazer os valores limite para ensaio de arrancamento ($N/mm^2$) |
| Reacção ao fogo após aplicação | EN 13501-1[62] | Euroclasse |
| Aderência ao betão húmido | EN 13579[63] | Após a carga:<br>a) Sem bolhas (EN ISO 4628-2[64]), sem fissuração (EN ISO 4628-4[65]) e sem delaminação (EN ISO 4628-5[66]);<br>b) Resistência ao arrancamento (satisfazer os valores limite em $N/mm^2$). |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como revestimentos de protecção por pintura no âmbito dos princípios PI e RI, pela EN 1504-2[16].

A preparação do substrato para a aplicação do revestimento por pintura resume-se apenas à limpeza do mesmo, como descrito no Anexo A.3.3..

Os requisitos a considerar agora na aplicação deste revestimento estão relacionados com o armazenamento dos produtos em si e com o instante da sua aplicação, descritos no Anexo A.3.6..

4.2.2.2. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção dos iões cloreto deteriorado pontualmente

Após a realização dos ensaios referidos nas Fig. 4.7. e Fig. 4.8., a presença de cloretos é verificada acima do limite máximo e o nível de corrosão das armaduras é moderado a elevado, mas detectado apenas na zona onde a deterioração do betão é visível e também na sua envolvente próxima. É igualmente visível o destacamento do recobrimento de onde em onde acompanhado da exposição das armaduras à superfície. Assim sendo os princípios e métodos de protecção e reparação serão aplicados ao elemento de forma localizada (Fig. 4.16.).

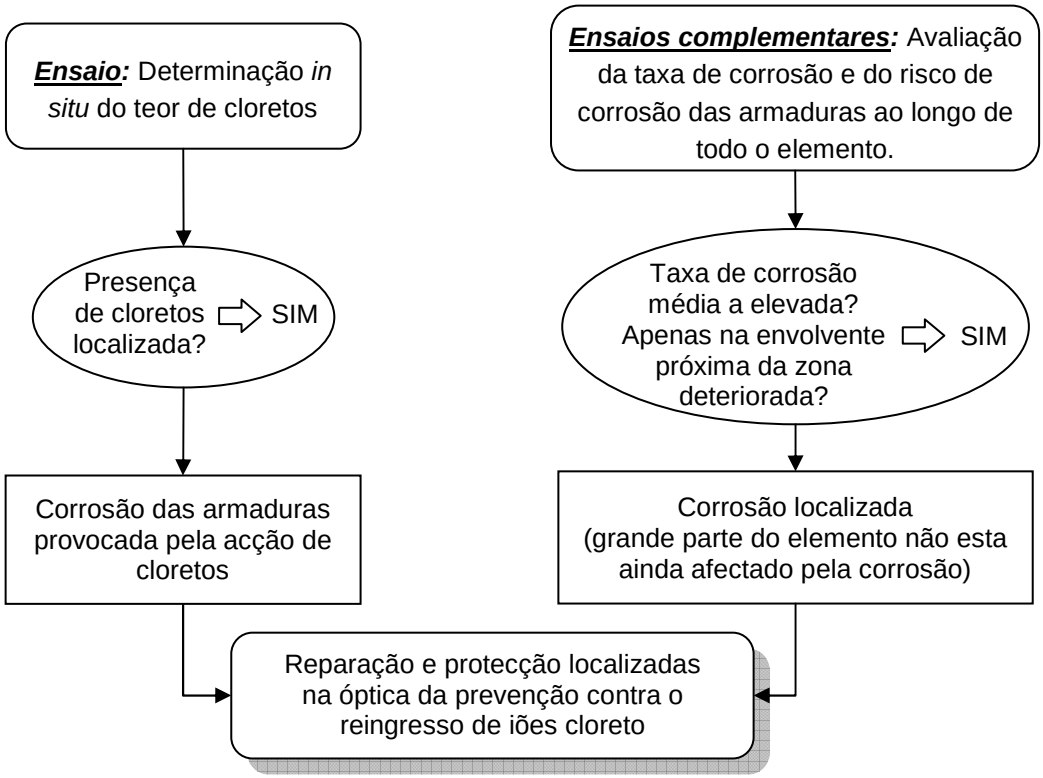



Fig. 4.16. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento localmente.

Dos princípios e métodos descritos na Fig. 4.9. ir-se-ão seleccionar, segundo a NP 1504 e a bibliografia referida [5, 14, 26, 31, 32, 33], os seguintes:

- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de revestimento activo da armadura;
- Preservação ou restauração da passividade – por substituição do betão contaminado ou carbonatado;
- Restauração do betão – argamassa aplicada à mão;
- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de inibidores de corrosão no betão;
- Protecção contra o ingresso – pela aplicação de impregnação hidrofóbica;
- Controlo da humidade – pela aplicação de impregnação hidrofóbica;
- Aumento da resistividade – pela aplicação de impregnação hidrofóbica.

O sistema a aplicar na reparação deste elemento, segundo [5, 14, 26, 31, 32, 33], está descrito na Fig. 4.17.. Seguindo a óptica de uma reparação localizada e contribuindo para a prevenção do

reingresso de cloretos aplicar-se-ão, para além dos produtos referenciados no subcapítulo anterior, um inibidor de corrosão, para reforçar a protecção contra a corrosão das armaduras, e uma impregnação hidrofóbica, ao invés de um revestimento por pintura, como protecção superficial. Esta impregnação hidrofóbica será aplicada no âmbito também do princípio controlo da humidade (MC), ao contrário da protecção superficial seleccionada no caso anterior. A consideração deste princípio é importante na presença de ambientes com iões cloreto. Como já foi referido anteriormente, a absorção de água por parte de um revestimento de protecção está directamente relacionada com o ingresso de iões cloreto [14].

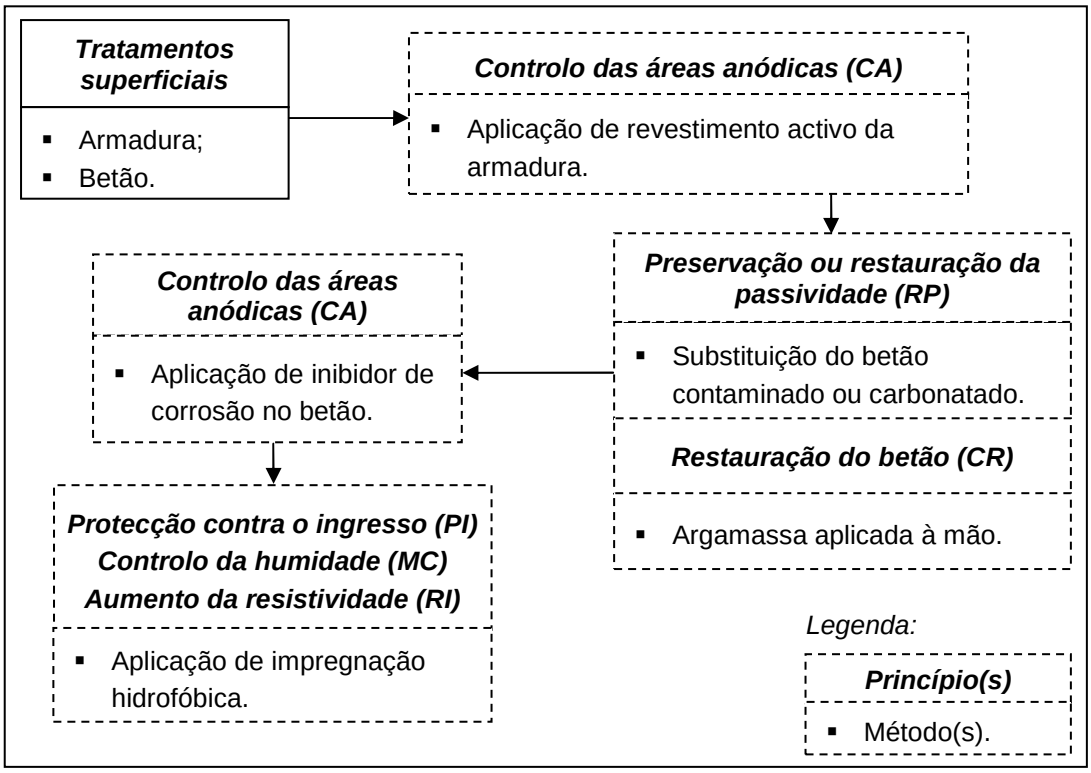



Fig. 4.17. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento.

As considerações relativas ao tratamento dos substratos e às aplicações do revestimento activo das armaduras e de argamassa aplicada à mão, bem como os requisitos de desempenho para os produtos utilizados são idênticos aos definidos no ponto 4.2.2.1., constando no Anexo A.3.. Excepto na remoção do betão para a aplicação de argamassa. Quando o betão está contaminado por cloretos deverá ser removido num mínimo de 20 mm à volta de toda a armadura [52].

Após a aplicação de argamassa de reparação procede-se então à aplicação de um inibidor de corrosão cujo objectivo é conferir ao elemento uma maior protecção contra o reingresso de iões cloreto, limitando a formação de zonas anódicas mantendo assim a passividade das armaduras. Como já foi referido anteriormente todos os requisitos para produtos e sistemas referentes a este método não se encontram definidos em normas europeias, pelo que a descrição geral da preparação da superfície e da sua própria aplicação constam do Anexo A.3.3. e A.3.7, respectivamente.

Finalmente, após a aplicação do inibidor de corrosão proceder-se-á à aplicação de uma impregnação hidrofóbica, com o objectivo de impedir o ingresso de iões cloreto limitando o teor de humidade do

elemento. Os requisitos de desempenho para uma impregnação hidrofóbica a aplicar num elemento sujeito à acção dos iões cloreto, após a sua reabilitação, estão descritos no Quadro 4. 6..

Quadro 4. 6. - Requisitos de desempenho para a impregnação hidrofóbica [16].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos |
|---|---|---|
| Profundidade de penetração (*) | EN 1766[67] – Ensaio de penetração em cubos de betão de 100 mm C(0,70) EN 13579[63] – tratamento com agente hidrofóbico | Classe I: < 10 mm<br>Classe II: ≥ 10 mm |
| Absorção de água e resistência aos álcalis (*) | EN 13580[68] | Taxa de absorção:<br>< 7,5% comparada com o provete não tratado<br>< 10% após imersão numa solução alcalina |
| Velocidade relativa de secagem (*) | EN 13579[63] | Classe I: > 30%<br>Classe II: > 10% |
| Difusão de iões cloreto (a) | Sujeito a normas nacionais (Especificação do LNEC E 468 – Revestimentos por pintura para protecção do betão armado contra a penetração de cloretos. Método de ensaios e requisitos.) | |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como impregnações hidrofóbicas no âmbito dos princípios PI, MC e RI, pela EN 1504-2[16].

(a) – Quando a absorção capilar da água é < 0,01 kg/m$^2$.h$^{0,5}$, não é expectável a difusão de iões cloreto.

A preparação do substrato para a aplicação da impregnação hidrofóbica resume-se apenas à limpeza do mesmo, como referido no Anexo A.3.3. Os requisitos para a sua aplicação constam no Anexo A.3.8..

4.2.2.3. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção da carbonatação cuja secção está parcialmente deteriorada

Os princípios e métodos a utilizar na reparação deste elemento baseiam-se nos resultados obtidos dos ensaios descritos na Fig. 4.7. e na Fig. 4.8., tendo-se verificado as seguintes questões:

- As armaduras localizadas mais próximas da superfície do elemento estão totalmente expostas, tanto varões longitudinais como transversais (cintas ou estribos), verificando-se uma perda parcial da secção do elemento;
- A profundidade de carbonatação atinge zonas para lá da localização das armaduras, sendo que toda a espessura de recobrimento está carbonatada e é maior perto das zonas onde a secção do elemento está deteriorada;
- O nível de corrosão das armaduras é elevado e detectado ao longo de todo o elemento numa extensão considerável.

Posto isto os princípios e métodos de protecção e reparação serão aplicados ao elemento de forma extensa (Fig. 4.18.).

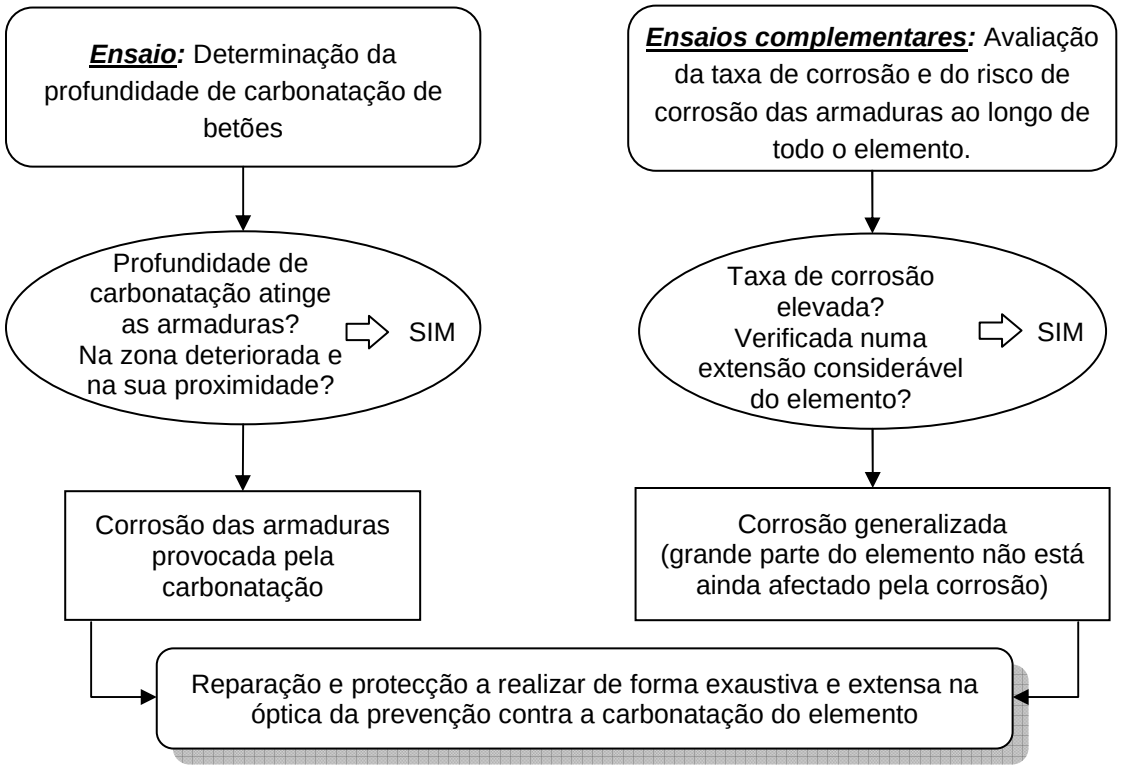



Fig. 4.18. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento de forma extensa.

Dos princípios e métodos descritos na Fig. 4.9. ir-se-ão seleccionar, segundo a NP 1504 e a bibliografia referida [5, 14, 26, 31, 32, 33], os seguintes:

- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de revestimento activo da armadura;
- Preservação ou restauração da passividade – por substituição do betão contaminado ou carbonatado;
- Reforço estrutural – Adição de argamassa;
- Restauração do betão – Aplicação de nova argamassa cofrada;
- Protecção contra o ingresso – pela aplicação de revestimento por pintura;
- Aumento da resistividade – pela aplicação de revestimento por pintura.

Estes princípios e métodos seleccionados segundo [5, 14, 26, 31, 32, 33] estão apresentados na Fig. 4.19.. Em relação ao caso apresentado no subcapítulo 4.2.2.1., a selecção apresentada difere apenas na opção da aplicação de argamassa cofrada em detrimento de argamassa aplicada à mão, com o intuito de restituir a secção original do elemento. Para além da argamassa utilizar-se-á também um produto de colagem para promover a aderência entre o substrato e o material de reparação. Tanto a argamassa como produto de colagem estão abrangidos pelos princípios restauração do betão (CR) e reforço estrutural (SS), mesmo que a integridade estrutural do elemento não esteja comprometida.

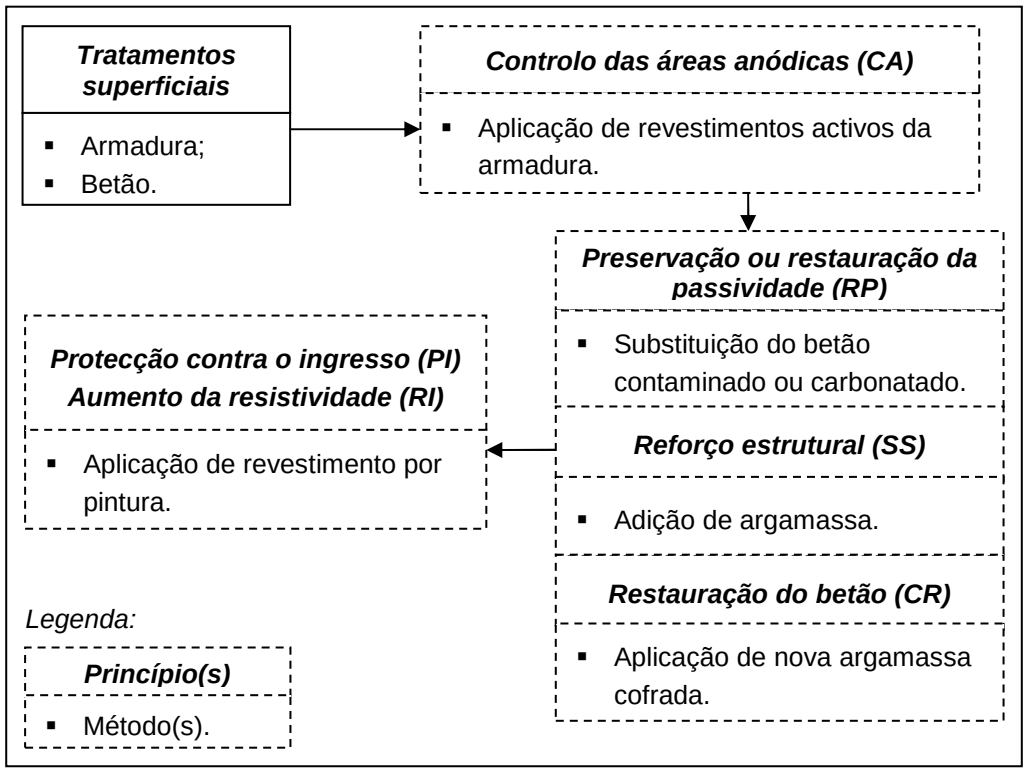



Fig. 4.19. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento.

Todas as considerações referentes ao revestimento activo da armadura são idênticas às descritas no ponto 4.2.2.1., quer em termos de requisitos quer relativos à sua própria aplicação.

Seguidamente aplicar-se-á um produto de colagem entre o substrato, betão endurecido, e a nova argamassa. Sendo que será necessário adicionar uma quantidade considerável de argamassa, neste caso cofrada, para reconstruir a secção do elemento, a aplicação do produto de colagem é importante para garantir a aderência dos dois materiais, a durabilidade e a qualidade do elemento reparado. Os requisitos de desempenho referentes a este produto de colagem constam do Quadro 4. 7..

Quadro 4. 7. - Requisitos de desempenho para o produto de colagem de argamassas em betão endurecido [77].

| Características de desempenho | Betão ou argamassa de referência (EN 1766[67]) | Método de ensaio | Requisitos |
|---|---|---|---|
| Módulo de elasticidade em flexão | - | EN ISO 178[67] | ≥ 2 000 N/mm$^2$ |
| Resistência à compressão (*) | - | EN 12190[41] | ≥ 30 N/mm$^2$ |
| Resistência ao corte (*) | - | EN 12615[68] | ≥ 6 N/mm$^2$ |
| Tempo aberto (*) | MC (0,40) | EN 12189[69] | Valor declarado ± 20% |

*(Continuação do Quadro 4.7.)*

| Características de desempenho | Betão ou argamassa de referência (EN 1766 [67]) | Método de ensaio | Requisitos |
|---|---|---|---|
| Tempo de trabalhabilidade (*) | - | EN ISO 9514 [72] | Valor declarado (depende do ambiente de utilização e da quantidade do produto mas no geral é um tempo mais curto do que o tempo de vida útil) |
| Módulo de elasticidade em compressão (*) | - | EN 13412[47] | ≥ 2 000 $N/mm^2$ |
| Temperatura de transição vítrea (*) | - | EN 12614[41] | ≥ 40 ºC |
| Coeficiente de dilatação térmica (*) | - | EN 1770[51] | ≤ $100x10^{-6}/K$ |
| Retracção total para os produtos de colagem estrutural (*) | - | EN 12617-1[57] ou EN 12617-3[73] | ≤ 0,1 % |
| Aptidão para aplicação em superfícies verticais e intradorsos | - | EN 1799[74] | O material não deve escoar mais de 1 mm quando apertado sobre uma espessura de menos de 3 mm |
| Aptidão para aplicação em superfícies horizontais | - | EN 1799[74] | A área do produto no fim do ensaio não deve ser inferior a 3000 $mm^2$ (60 mm de diâmetro) |
| Aptidão para aplicação e a cura em condições ambientais particulares (*) | MC (0,40) | EN 12636[75] | Para betão fresco sobre betão endurecido o ensaio de arrancamento deve provocar uma rotura no betão |
| Aderência (*) | MC (0,40) | EN 12636[75] | Para betão fresco sobre betão endurecido o ensaio de arrancamento deve provocar uma rotura no betão |
| Durabilidade (temperatura e humidade) (*) | MC (0,40) | EN 13733[76] | Após exposição a ciclos térmicos ou a um ambiente caracterizado por calor húmido, a carga de corte por compressão de rotura dos provetes de betão fresco sobre betão endurecido não deve ser inferior á mais fraca resistência à tracção do betão colado ou betão inicial |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como produtos de colagem de argamassa sobre betão endurecido no âmbito do método adição de argamassa (princípio SS), pela EN 1504-4[77].

Para a aplicação do produto de colagem a preparação do substrato deverá corresponder à sua limpeza, desbaste e remoção do betão. Os requisitos a ter em conta na sua preparação são idênticos aos definidos para a aplicação de argamassa à mão no ponto 4.2.2.1. e Anexo A.3.. Aquando da sua aplicação será necessário verificar-se um conjunto de considerações, apresentadas no Anexo A.3.9.

Todos os requisitos do fabricante devem ser cumpridos dando-se especial atenção ao seguinte aspecto: os materiais de reparação devem ser aplicados dentro do período do "pot-life" do produto de colagem, caso contrário em vez de este promover a colagem entre o betão e a nova argamassa, acabará por inviabilizar a mesma [31].

Em seguida aplicar-se-á a argamassa de reparação cofrada. Esta argamassa poderá ser uma argamassa estrutural, não porque esteja comprometido o desempenho estrutural do elemento em si, mas porque a sua utilização surge da necessidade de reconstituir a secção do elemento. Assim sendo, a argamassa estrutural cofrada e o produto de colagem, aplicado anteriormente, terão que trabalhar em conjunto com o betão existente de forma a que o elemento final, depois de reparado, responda o melhor possível a todas as solicitações como um elemento monolítico. Os requisitos para a argamassa cofrada encontram-se definidos no Quadro 4. 8..

Quadro 4. 8. – Requisitos de desempenho de produtos de reparação estrutural para restauração do betão [16].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos | |
|---|---|---|---|
| | | Classe R4 | Classe R3 |
| Resistência à compressão (*) | EN 12190 [43] | ≥ 45 MPa | ≥ 25 MPa |
| Teor de cloretos (*) | EN 1015-17 [45] | ≤ 0,05 % | |
| Aderência (*) | EN 1542[39] | ≥ 2,0 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Expansão/retracção impedidas (não aplicável no caso de ciclos térmicos) (*) | EN 12617-4 [45] | Resistência de colagem após ensaio (a) | |
| | | ≥ 2,0 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Resistência à carbonatação (*) | EN 13295 [46] | $d_k$ ≤ betão de controlo (MC(0,45)) | |
| Módulo de elasticidade (*) | EN 13412 [47] | ≥ 20 GPa | ≥ 15 GPa |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos com chuva) | EN 13687-2 [48] | Resistência de colagem após ensaio (a) | |
| | | ≥ 2,0 MPa | ≥ 1,5 MPa |

*(Continuação do Quadro 4.8.)*

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos | |
|---|---|---|---|
| | | Classe R4 | Classe R3 |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos a seco) | EN 13687-4 [49] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 2,0 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Resistência ao deslizamento | EN 13036-4 [50] | Classe I: > 40 unidades ensaiadas molhadas<br>Classe II: > 40 unidades ensaiadas secas<br>Classe III: > 55 unidades ensaiadas molhadas | |
| Coeficiente de dilatação térmica (para argamassas e betões poliméricos) | EN 1770[51] | Valor declarado | |
| Absorção capilar | EN 13057[53] | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | |

[(*)] – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como produtos de reparação estrutural no âmbito dos princípios RP, CR e SS e métodos apresentados na Fig. 4.12., pela EN 1504-3[20].

[(a)] – Valor médio com nenhum valor individual inferior a 75% do requisito mínimo. A largura média máxima permitida é ≤ 0,05 mm, com nenhuma fissura ≥ 0,1 mm e ausência de delaminação.

A preparação do substrato a realizar para a aplicação de argamassa cofrada segue os princípios referidos para a preparação do substrato referente à argamassa a aplicar à mão, descritos no ponto 4.2.2.1. e Anexo A.3.2.. Posto isto na fase de aplicação da própria argamassa cofrada, dever-se-á respeitar as considerações descritas no Anexo A.3.10..

De uma forma geral, para a aplicação de argamassa cofrada existem duas possibilidades para realizar a sua cofragem. O primeiro método sugere a realização de cofragens com uma abertura no topo, o cachimbo, de forma a permitir o lançamento da argamassa para o seu interior (Fig. 4. 20.). Posteriormente, após a cura da argamassa e a remoção da cofragem a saliência correspondente à abertura da cofragem será removida.

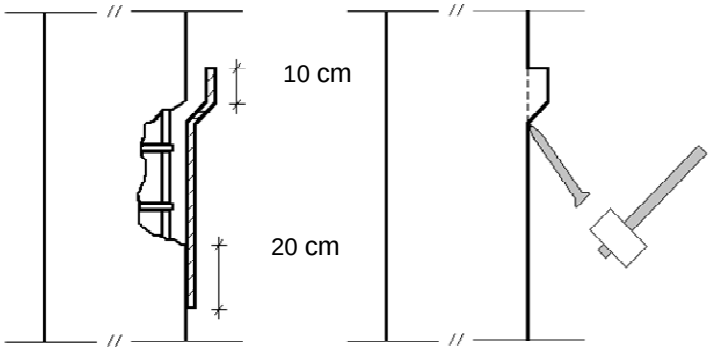



Fig. 4. 20. – Cofragem com abertura no topo [31].

A cofragem deverá ser rígida e estanque sendo muito bem apertada contra o suporte para suportar a pressão a que estará sujeita e para promover a pressão necessária ao produto de reparação contra o substrato, permitindo a sua "respiração" normal [31]. A pressão possivelmente necessária a aplicar numa cofragem está exemplificada na Fig. 4. 21..

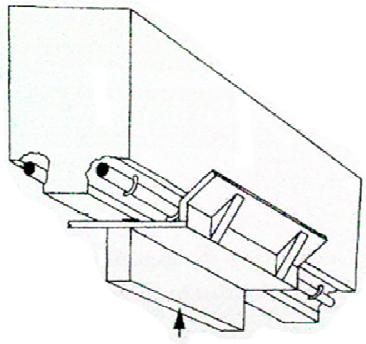


Fig. 4. 21. – Pressão exercida sobre a cofragem de uma viga [31].

O segundo método pressupõe a utilização de uma cofragem mais rígida e estanque, que a anterior em que a argamassa é colocada para o seu interior por injecção. Estas cofragens terão que suportar pressões da ordem de 1 bar, permitindo a compactação do material de reparação. Esta compactação é conseguida através do aperto correcto do material de reparação contra o substrato promovido pela pressão exercida após o enchimento completo da cavidade. Perante paramentos a reabilitar na vertical, este enchimento deverá ser realizado de baixo para cima, sempre no sentido ascensional. No caso de paramentos horizontais deverá ser realizado de uma extremidade para outra (Fig. 4. 22. e Fig. 4. 23.).

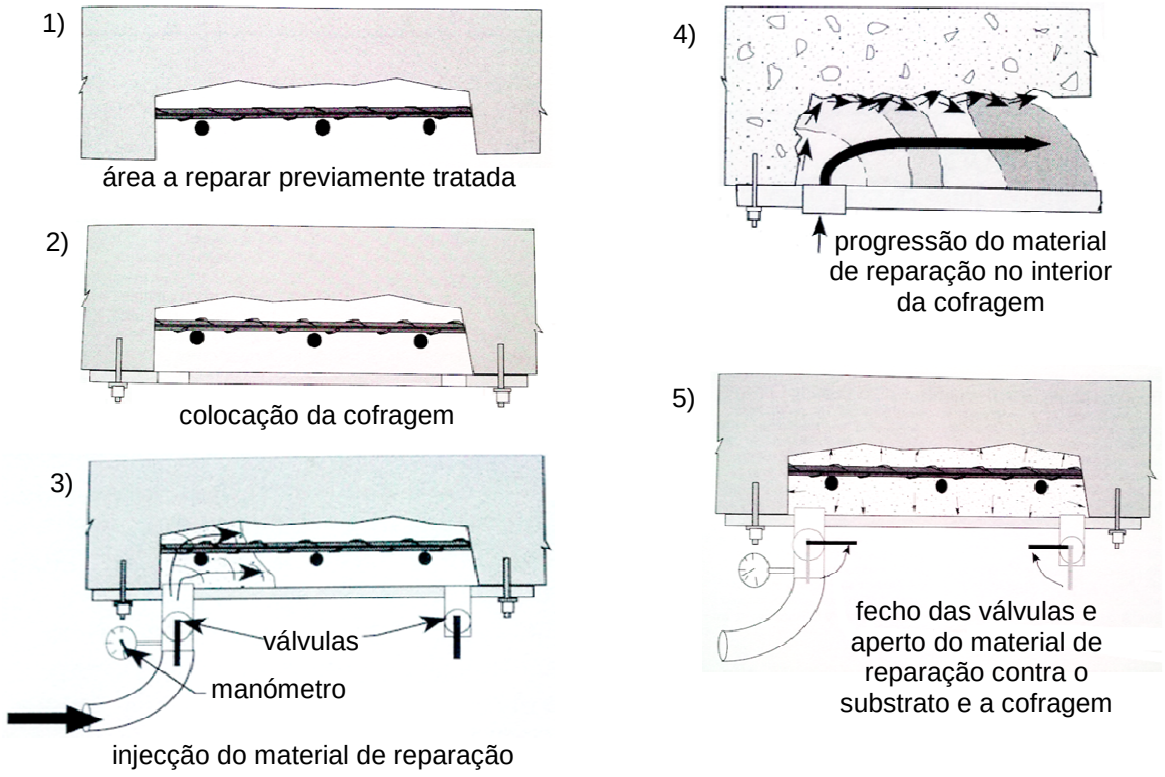



Fig. 4. 22. – Aplicação de argamassa por injecção em paramentos horizontais [32].

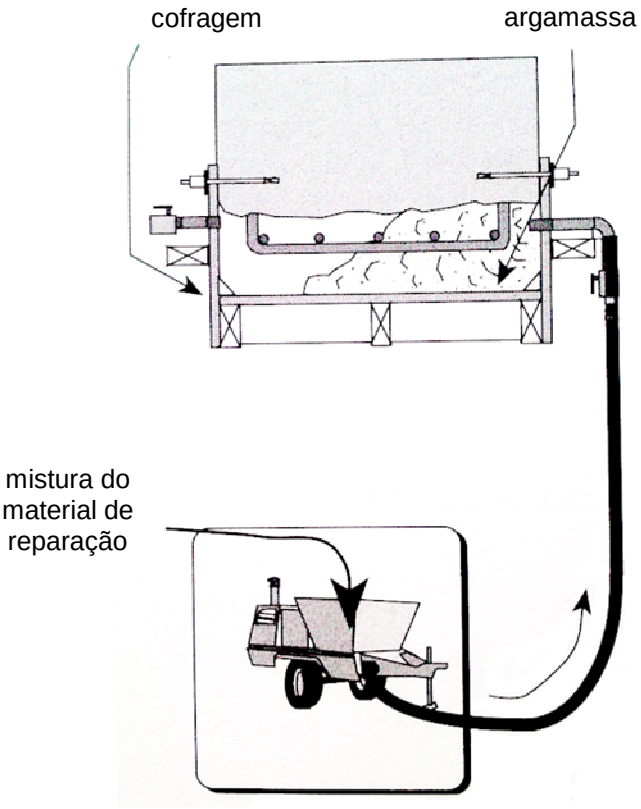



Fig. 4. 23. – Aplicação de argamassa por injecção em paramentos horizontais [32].

Posteriormente à aplicação da argamassa estrutural, aplicar-se-á por pintura um revestimento com o objectivo de promover uma protecção contra a carbonatação do elemento reparado, aumentando a sua resistividade. Este revestimento terá que cumprir os requisitos já descritos no ponto 4.2.2.1. e no Anexo A.3. tanto para o produto em si, como para a preparação do substrato e a sua aplicação.

#### 4.2.2.4. Princípios e métodos de protecção e reparação do elemento sujeito à acção dos iões cloreto cuja secção está parcialmente deteriorada

Para a reparação deste elemento os princípios e métodos a utilizar serão idênticos aos descritos no ponto 4.2.2.2., recorrendo-se à aplicação de argamassa cofrada ao invés de argamassa aplicada à mão.

A escolha dos princípios e métodos basear-se-ão nos resultados obtidos dos ensaios descritos na Fig. 4.7. e na Fig. 4.8., tendo-se verificado as seguintes questões:

- As armaduras localizadas mais próximas da superfície do elemento estão totalmente expostas, tanto varões longitudinais como transversais (cintas ou estribos), verificando-se uma perda parcial da secção do elemento;
- A presença de cloretos é verificada acima do limite máximo, sobretudo nas zonas onde o betão está gravemente deteriorado;
- O nível de corrosão das armaduras é elevado e detectado ao longo de todo o elemento numa extensão considerável.

Assim sendo aplicar-se-ão os princípios e métodos de protecção e reparação para restituir a secção do elemento em toda a sua extensão, justificável pelo esquematizado na Fig. 4.24..

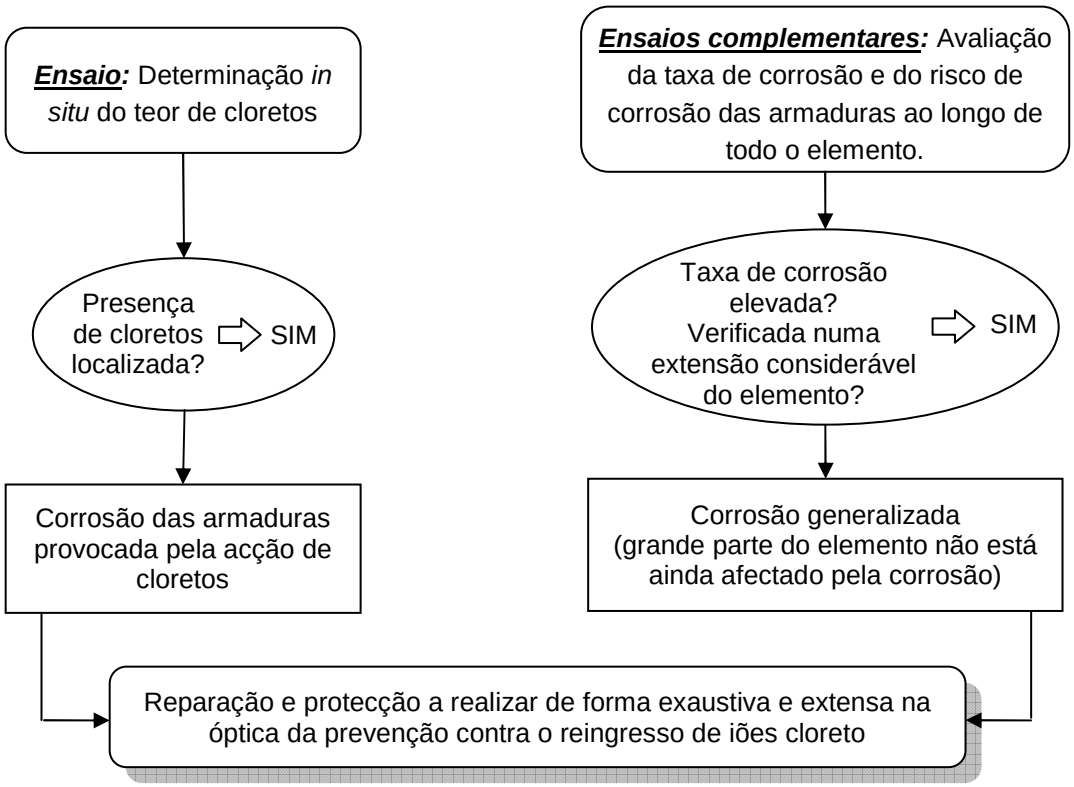



Fig. 4.24. – Justificação para a realização da reparação e protecção do elemento de forma extensa.

Dos princípios e métodos descritos na Fig. 4.9. ir-se-ão seleccionar, segundo a NP 1504 e a bibliografia referida [5, 14, 26, 31, 32, 33], os seguintes:

- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de revestimento activo da armadura;
- Preservação ou restauro da passividade – por substituição do betão contaminado ou carbonatado;
- Reforço estrutural – Adição de argamassa;
- Restauro do betão – Aplicação de nova argamassa cofrada;
- Controlo das áreas anódicas – pela aplicação de inibidores de corrosão no betão;
- Controlo da humidade – pela aplicação de revestimento por pintura;
- Aumento da resistividade – pela aplicação de revestimento por pintura.

Na Fig. 4.25., está representado o sistema a aplicar na reparação deste elemento segundo [5, 14, 26, 31, 32, 33], na óptica de uma reparação generalizada a toda a sua secção, contribuindo para a prevenção do reingresso de cloretos. Assim, considerou-se a aplicação de argamassa cofrada, em semelhança com o descrito no subcapítulo anterior, e a aplicação de um revestimento por pintura no âmbito dos princípios PI, MC e RI, de acordo com o referido no subcapítulo 4.2.2.2. relativamente à presença de iões cloreto.

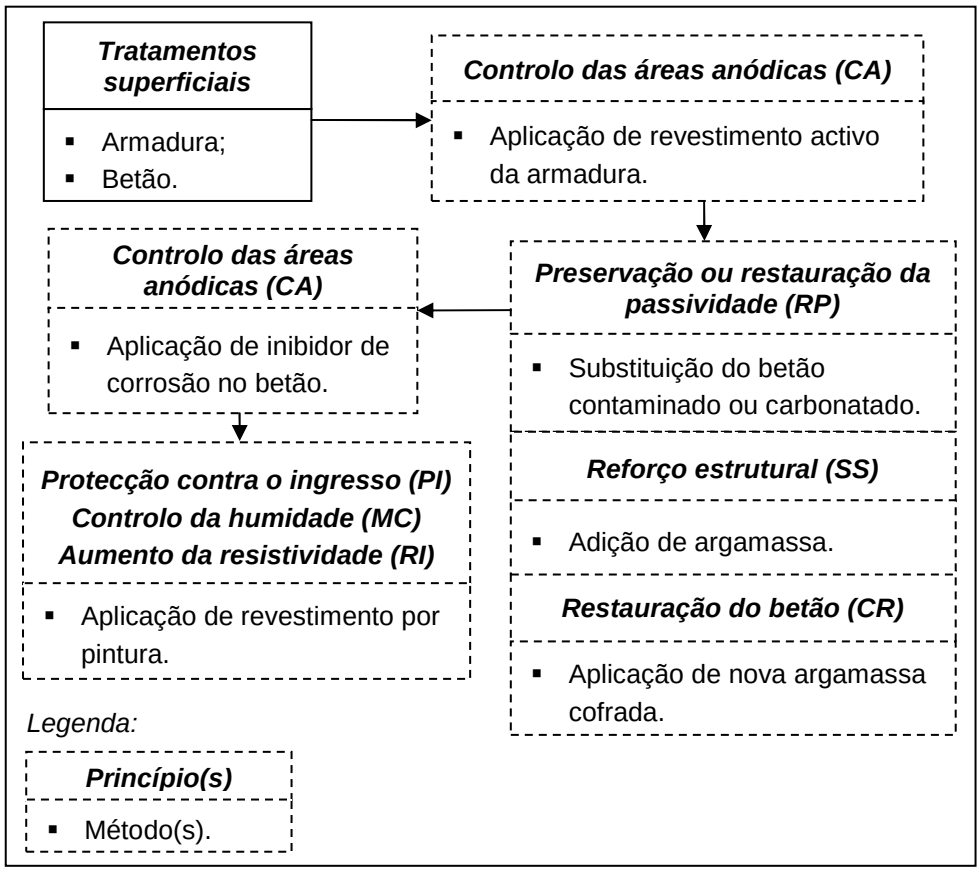



Fig. 4.25. – Princípios e métodos passíveis de serem considerados na estratégia da reabilitação do elemento.

Primeiramente aplicar-se-á o revestimento activo nas armaduras, cujos produtos, tratamento do substrato e a própria aplicação seguem os requisitos definidos no ponto 4.2.2.1. e Anexo A.3.. Em seguida aplicar-se-á o produto de colagem e a argamassa estrutural cofrada, cujos requisitos seguem o descrito no ponto 4.2.2.3. e Anexo A.3., tanto para os produtos em si, como a sua própria aplicação e preparação de substratos (betão e armadura). Com a nuance descrita no ponto 4.2.2.3 relativa à remoção do betão em torno das armaduras. A aplicação de um inibidor de corrosão do betão será efectuada de acordo com o referido em 4.2.2.2. e Anexo A.3.. Por último segue-se a aplicação de um revestimento por pintura cujos requisitos para a sua própria aplicação e preparação do substrato são idênticos aos definidos no ponto 4.2.2.1. e Anexo A.3. com excepção dos requisitos de desempenho referentes ao produto em si. Nesta circunstância ter-se-á que verificar todos os requisitos definidos no Quadro 4.5. conjuntamente com um último requisito referente à difusão dos iões cloreto, cujos métodos de ensaio e características de desempenho estão sujeitos às normas e regulamentos nacionais.

Em todos os sistemas apresentados nos subcapítulos 4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.2.3, 4.2.2.4, é possível considerar-se a aplicação de uma argamassa de barramento ou de nivelamento posteriormente à aplicação da argamassa de reparação. Esta argamassa é aplicada com o intuito de conferir uma camada de acabamento antes da aplicação de revestimentos de protecção ou impregnações com o objectivo de regularizar a superfície em si, podendo também corresponder a exigências do ponto de vista estético. Características do ponto de vista estético, referentes tanto a estas argamassas como aos produtos de protecção superficial, não são mencionadas na série NP 1504.

### 4.2.3. ENSAIOS E OBSERVAÇÕES PARA CONTROLO DE QUALIDADE

Antes, durante e após a execução dos trabalhos de reparação há que proceder a alguns ensaios e observações para o controlo da qualidade das propriedades do substrato, das condições para a aplicação dos produtos e sistemas e das suas propriedades finais depois de aplicados. No Anexo A.4. encontram-se descritos os ensaios e as observações a realizar para a reparação do elemento em estudo, de acordo com os métodos e princípios estabelecidos para as quatro diferentes situações especificadas nos pontos anteriores. A aplicação de inibidores de corrosão no betão não consta de todos estes quadros porque, como referido anteriormente, não existe normalização para tal.

# 5

# CASOS PRÁTICOS – PERSPECTIVAS DE DESEMPENHO

## 5.1. INTRODUÇÃO

No seguimento do capítulo anterior, onde foi explorada a aplicabilidade da NP 1504, com a simulação de quatro casos práticos comuns, explorar-se-á agora a sua articulação com os sistemas e produtos disponíveis no mercado, tendo também em consideração questões do ponto de vista estético. Esta articulação será realizada para os quatro casos de estudo e será o mais adequada possível às considerações descritas no capítulo anterior relativas a princípios e métodos a aplicar em cada caso.

De todos os fabricantes existentes no mercado foram seleccionados quatro, a Saint-Gobain Weber, a BASF, a Mapei e a Sika. As suas recomendações, sistemas e produtos serão então articulados da melhor forma possível aos trabalhos de reabilitação em estudo.

## 5.2. SOLUÇÕES EXISTENTES NO MERCADO

São várias as soluções de sistemas de produtos existentes na indústria química que possibilitam a reabilitação dos elementos referidos no capítulo anterior. Contudo, nem todos os produtos se encontram ainda em conformidade com a NP 1504, dada a sua recente transição para Norma Portuguesa. No entanto, existem produtos há muito desenvolvidos pela indústria química no âmbito da reabilitação de elementos de betão, recomendados pelos fornecedores como adequados para este tipo de trabalhos de reabilitação.

Nos subcapítulos seguintes apresentar-se-ão para cada caso de estudo abordado no capítulo anterior segundo a NP 1504, soluções de sistemas existentes no mercado.

### 5.2.1. CASO 1 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DA CARBONATAÇÃO DETERIORADO PONTUALMENTE

A Fig. 5. 1. pretende representar, em corte longitudinal, um elemento tipo sujeito à deterioração em causa. A esquematização deste elemento irá acompanhar igualmente a esquematização do sistema de produtos de reparação e protecção seleccionada para este caso.

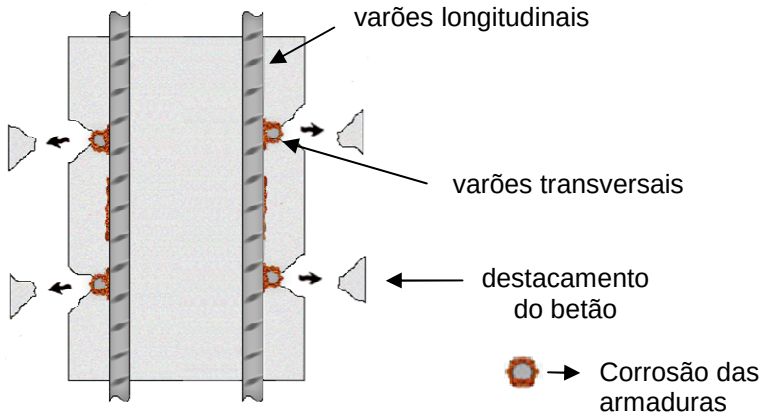



Fig. 5. 1. – Corte longitudinal do elemento deteriorado pontualmente pela acção da carbonatação.

Das soluções presentes no mercado o sistema seleccionado para a reparação e protecção deste elemento é facilmente articulado no sistema apresentado na Fig. 4.15. (baseado apenas na NP 1504 e na bibliografia referida). O conjunto de produtos seleccionado é fornecido e recomendado pela Saint-Gobain Weber [78] e está esquematizado na Fig. 5. 2., sendo que todos os produtos se encontram já em fase de enquadramento na NP 1504.

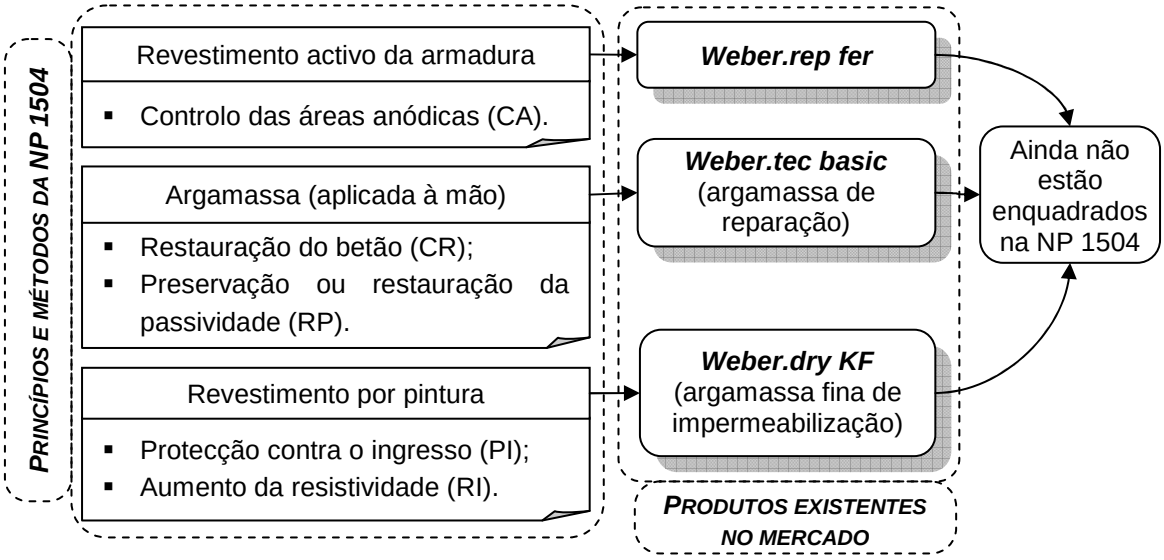
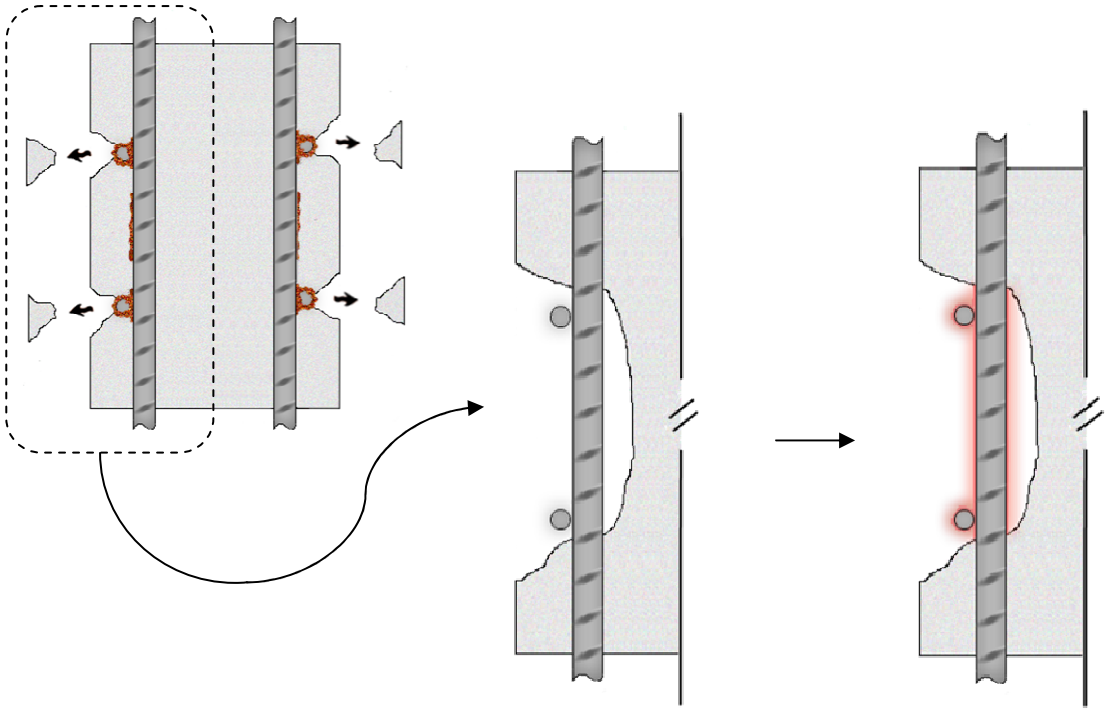


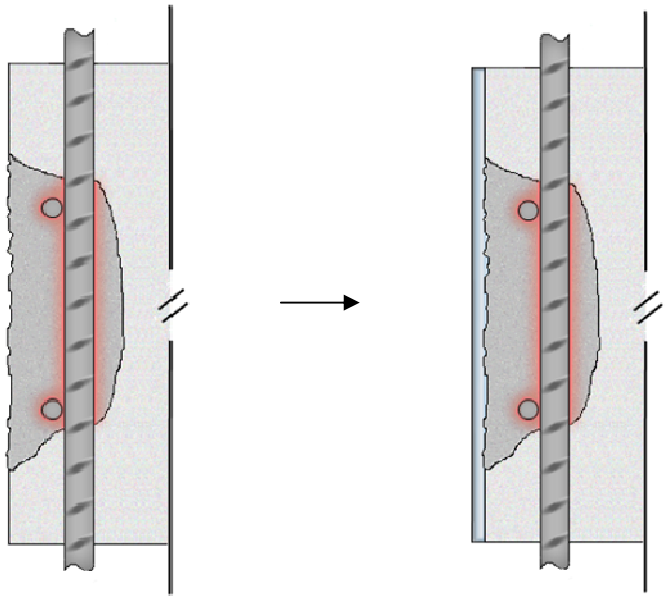

Fig. 5. 2. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504.

Na Fig. 5. 3. é possível observar a sequência de trabalhos a realizar para a reparação e protecção deste elemento, onde constam a aplicação dos produtos acima referidos.



1) Tratamento das superfícies (armaduras e betão)

2) Aplicação do revestimento anticorrosivo



3) Aplicação da argamassa de reparação não estrutural

4) Aplicação da argamassa fina de impermeabilização

Fig. 5. 3. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 1.

O primeiro produto a aplicar após o tratamento das superfícies é o Weber.rep fer. Segundo a sua ficha técnica é um revestimento anticorrosivo das armaduras, conferindo-lhe protecção contra a corrosão. Deverá ser aplicado sobre as armaduras com trincha ou pincel em camadas espessas. No Quadro 5. 1. estão apresentadas as prestações deste produto bem como os requisitos impostos pela NP 1504-7[30] para produtos que promovam a protecção contra a corrosão das armaduras.

Quadro 5. 1. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30].

| | Características essenciais para produtos de protecção contra a corrosão das armaduras | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-7[30] | Prestações da protecção anticorrosiva das armaduras (ficha técnica) |
|---|---|---|---|---|
| NP 1504-7 | Protecção contra a corrosão (*) | EN 15183 [40] | As zonas revestidas não exibem corrosão e a ferrugem sobre o revestimento, após a remoção deste a partir do bordo da placa é < 1mm | Não consta na ficha técnica do produto |
| Ficha técnica do produto | Prestações (Valores obtidos em ensaios) | Aderência em ferro | - | > 0,5 MPa |
| | | Resistência aos álcalis | - | até pH = 12 |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como revestimentos activos das armaduras no âmbito do princípio controlo das áreas anódicas, pela NP 1504-7[30].

Tendo em consideração que, à data, este produto ainda não está adequado à série NP 1504 seria espectável que não dispusesse de informação, na sua ficha técnica, que fosse ao encontro dos requisitos definidos pela sétima parte da mesma série. No entanto, apresenta um conjunto de prestações, relativas à protecção anticorrosiva, devidamente justificadas por ensaios laboratoriais.

Seguidamente é aplicado, nas zonas a reparar do elemento, o Weber.tec basic, uma argamassa de reparação não estrutural. Segundo a sua ficha técnica, entre outras aplicações, é utilizada para retoques e defeitos em betão. Os seus dados técnicos, bem como os requisitos impostos pela NP 1504-3[20] para argamassas não estruturais estão referidos no Quadro 5. 2..

Quadro 5. 2. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-3 Classe R2 | Prestações da argamassa de reparação não estrutural (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Resistência à compressão (*) | EN 12190 [43] | ≥ 15 MPa | > 30 MPa (aos 28 dias) |
| Teor de cloretos (*) | EN 1015-17 [44] | ≤ 0,05 % | Não consta na ficha técnica do produto |
| Aderência (*) | EN 1542 [39] | ≥ 0,8 MPa | 1,0 (aos 28 dias) |
| Expansão/retracção impedidas (não aplicável no caso de ciclos térmicos) (*) | EN 12617-4 [45] | Sem requisito | Não consta na ficha técnica do produto |
| Resistência à carbonatação (*) | EN 13295 [46] | Sem requisito | Não consta na ficha técnica do produto |
| Módulo de elasticidade | EN 13412 [47] | Sem requisito | 20 GPa (aos 28 dias) |
| Absorção capilar | EN 13057 [53] | Sem requisito | $\cong$ 0,8 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípio 3 (CR), método 3.1 e do princípio 7 (RP), método 7.2 (ver Anexo A.2.), pela EN 1504-3[20].

Da análise do Quadro 5. 2. verifica-se que, apesar do produto ainda não estar enquadrado na série NP 1504, as suas propriedades vão ao encontro de algumas propriedades requeridas para a aplicação de argamassas não estruturais, neste caso de classe R2, no âmbito dos princípios e métodos referidos no subcapítulo 4.2.2.1..

Após a aplicação desta argamassa de reparação, weber.dry KF, é aplicada à trincha em todo o elemento uma argamassa fina de impermeabilização para conferir protecção superficial ao elemento. Esta argamassa foi seleccionada para esta finalidade porque, dentro dos produtos compatíveis com este sistema, adequa-se da melhor forma possível à protecção requerida em termos dos princípios: protecção contra o ingresso (PI) e aumento da resistividade (RI), definidos no subcapítulo 4.2.2.1.. As suas propriedades bem como os requisitos impostos pela NP 1504-2[16] para os revestimentos de protecção encontram-se no Quadro 5. 3..

Quadro 5. 3. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-2[16] para revestimentos | Prestações da argamassa de impermeabilização (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Permeabilidade ao $CO_2$ (*) | EN 1062-6[56] | Permeabilidade ao $CO_2$ $s_D > 50$ m | Não consta na ficha técnica do produto |
| Permeabilidade ao vapor de água (*) | EN ISO 7783-1[57] EN ISO 7783-2[58] | Classe I: $s_D \leq 5$ m (permeável ao vapor de água) Classe II: 5 m $\leq s_D \leq$ 50 m Classe III: $s_D > 50$ m (não permeável ao vapor de água) | Não consta na ficha técnica do produto |
| Absorção capilar e permeabilidade à água (*) | EN 1062-3[38] | $w < 0{,}1$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$ | Não consta na ficha técnica do produto |
| Aderência por arrancamento (*) | EN 1542[39] | ≥ 0,8 N/mm$^2$ | 1,5 N/mm$^2$ |
| Ficha técnica do produto — Prestação: Impermeabilidade (Valores obtidos em ensaios) | - | - | Até 10m de coluna de água |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito dos princípios PI e RI referidos pela EN 1504-2[16].

Como seria espectável, da análise do Quadro 5. 3., tendo em conta que o produto não esta ainda enquadrado na série NP 1504, apresenta prestações que justificam a sua capacidade de conferir impermeabilidade, embora não sejam as mesmas que são requeridas pela NP 1504-2[16]. Em termos estéticos, este produto permite um acabamento comum de uma argamassa fina aplicada à trincha, uniforme em todo o elemento, de cor branco ou cinza (Fig. 5. 4.), semelhante ao tom da superfície de betão aparente. Para além de um acabamento realizado com trincha permite igualmente realizar acabamentos com palustra ou com esponja, conferindo-lhe texturas diferentes.

Fig. 5. 4. – Acabamento da camada final de argamassa fina de impermeabilização (cinzento) [78].

### 5.2.2. CASO 2 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DOS IÕES CLORETO DETERIORADO PONTUALMENTE

A ilustração da deterioração deste elemento sujeito à acção dos iões cloreto é idêntica à apresentada na Fig. 5. 1.. O sistema de produtos seleccionado para esta reabilitação está de acordo com o sistema apresentado na Fig. 4.17. (baseado apenas na NP 1504 e na bibliografia referida). Esta solução de reabilitação está esquematizada nas Fig. 5. 5. e Fig. 5. 6. correspondendo a produtos fornecidos e recomendados pela BASF [79].

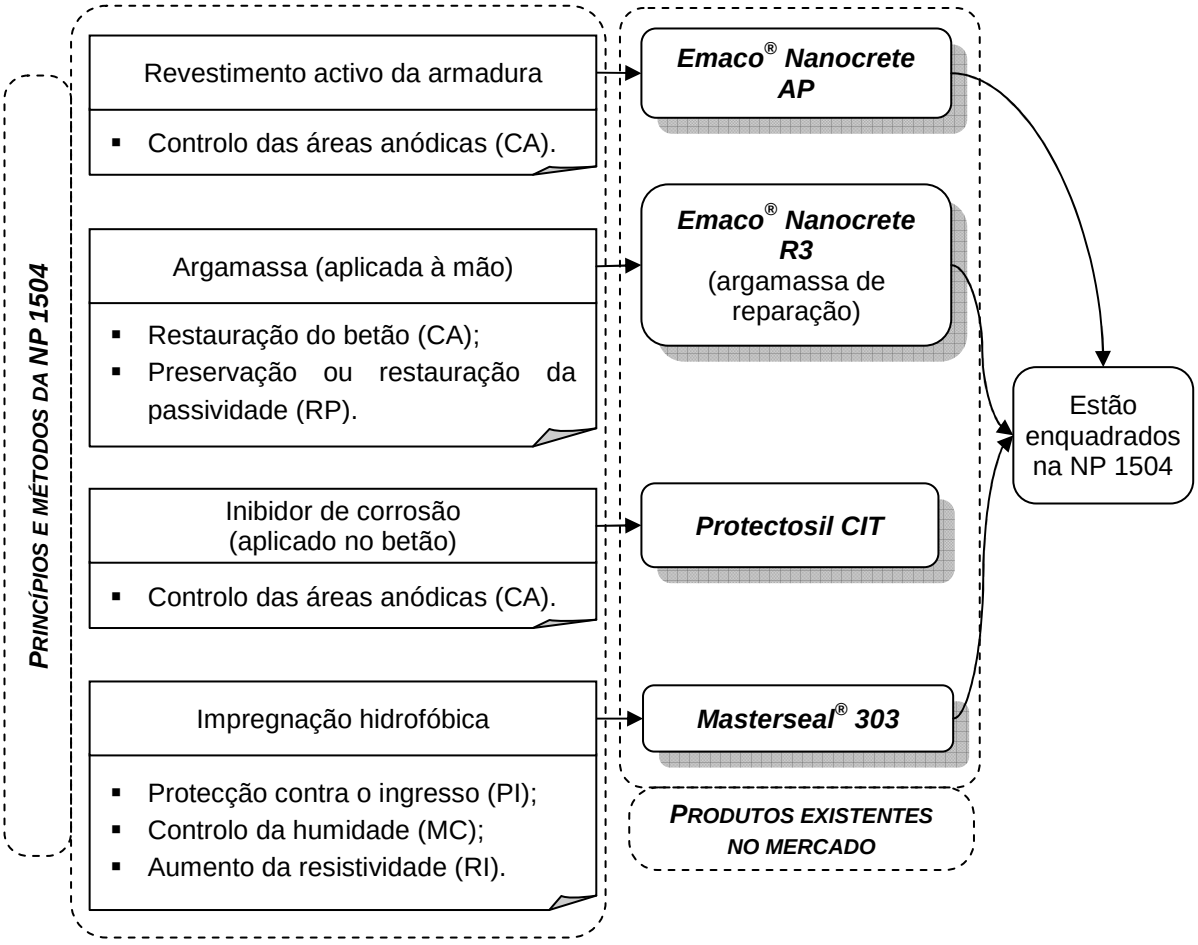



Fig. 5. 5. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504.

Analisando a Fig. 5. 5. verifica-se que todos os produtos que compõem este sistema já estão enquadrados na NP 1504, à excepção do Protectosil CIT por não existir normalização aplicável a este tipo de produtos.

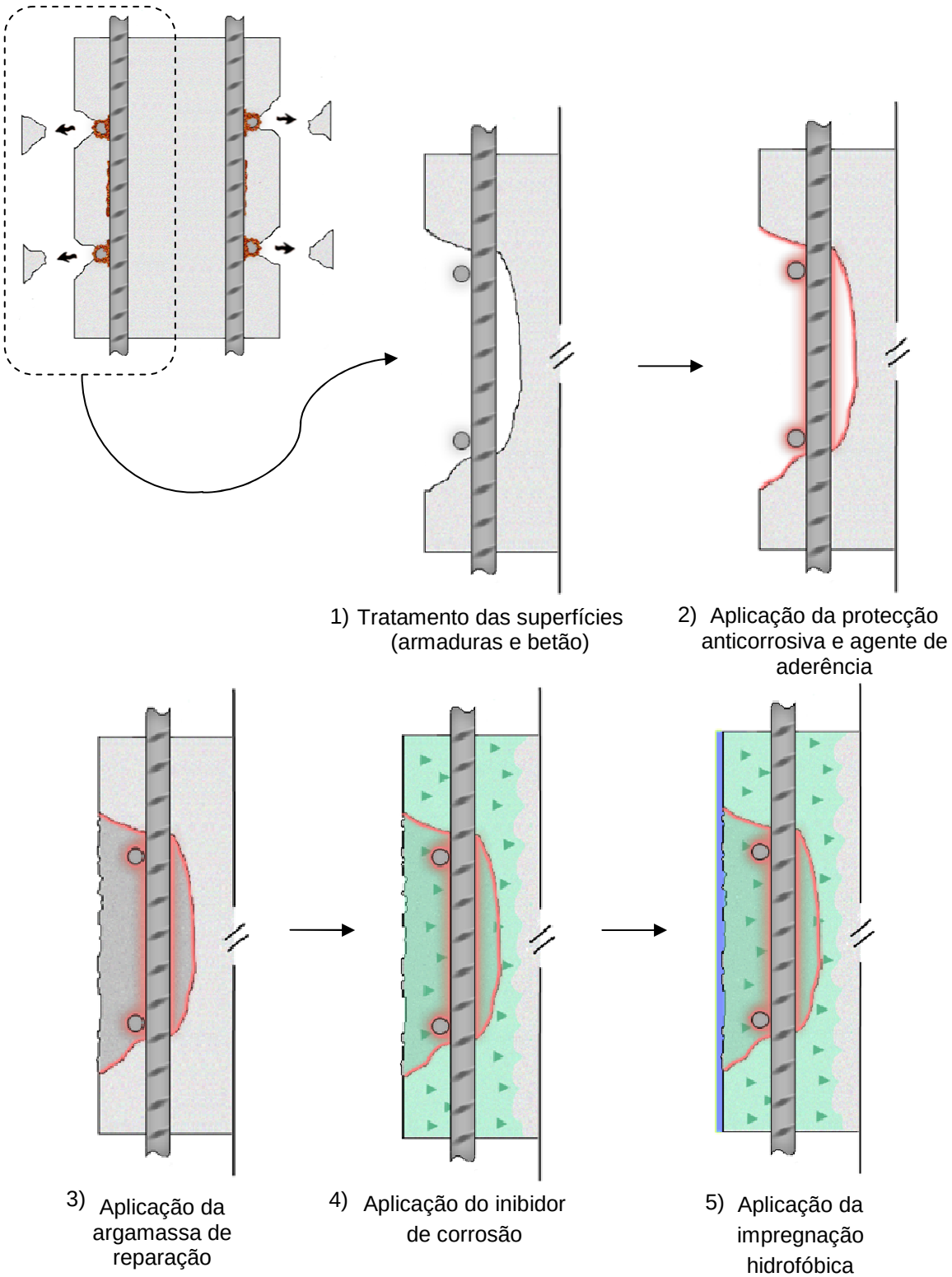



Fig. 5. 6. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 2.

De acordo com a Fig. 5. 5. o primeiro produto a aplicar, na armadura e na superfície de betão, após o tratamento das superfícies, é o Emaco® Nanocrete AP. Segundo a sua ficha técnica confere uma protecção anticorrosiva às armaduras, promovendo igualmente aderência das superfícies em betão armado às argamassas de reparação. No Quadro 5. 4. estão presentes as propriedades que constam na ficha técnica deste produto, bem como os requisitos de desempenho impostos pela EN 1504-7[30] para revestimentos activos da armadura que lhe conferem protecção contra a corrosão.

Quadro 5. 4. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30].

| | Características essenciais para revestimentos activos da armadura (protecção contra a corrosão das armaduras) | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-7[30] | Dados relativos à protecção anticorrosiva e agente de aderência (ficha técnica) |
|---|---|---|---|---|
| NP 1504-7 | Protecção contra a corrosão (*) | EN 15183[40] | As zonas revestidas não exibem corrosão e a ferrugem sobre o revestimento, após a remoção deste a partir do bordo da placa é < 1mm | Resultados aceites |
| | Temperatura de transição vítrea | EN 12614[41] | Pelo menos 10 ºK acima da máxima temperatura de serviço | Não consta na ficha técnica do produto |
| | Aderência ao corte (aço revestido sobre betão) | EN 15184[42] | O critério de aceitação é a tensão de aderência para um deslocamento $\Delta$ = 0,1 mm. Aceita-se o resultado do ensaio se a tensão de aderência determinada com as barras revestidas é ≤ 80% da tensão de aderência de referência determinada sobre barras não revestidas. | Resultados aceites |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como revestimentos activos das armaduras no âmbito do princípio controlo das áreas anódicas (CA), pela EN 1504-7[30].

Como se verifica pelo Quadro 5. 4. o produto referido cumpre os requisitos impostos pela NP 1504-7[30]. Na sua ficha técnica é também referido que este produto cumpre os requisitos impostos pela NP 1504-3[20] relativos à aderência ao suporte. No entanto, não é mencionada qualquer referência à NP 1504-4[77], referente aos requisitos impostos aos produtos de colagem para argamassas aplicadas sobre betão endurecido (Quadro 4. 7.).

Posteriormente aplicar-se-á o Emaco® Nanocrete R3, uma argamassa estrutural de classe R3, PCC (argamassa com cimento hidráulico e polímeros), pela NP 1504-3, reforçada com fibras. Entre outras aplicações é utilizada para a reparação de zonas degradas em betão como testeiras de varandas, arestas de vigas e pilares à mão. Os seus dados técnicos bem como as exigências definidas pela NP 1504-3[20] estão apresentados no Quadro 5. 5..

Quadro 5. 5. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-3[20] Classe R3 | Resultados dos ensaios para a argamassa de reparação (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Resistência à compressão (*) | EN 12190[43] | ≥ 25 MPa | Classe R3 |
| Teor de cloretos (*) | EN 1015-17[44] | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % |
| Aderência (*) | EN 1542[39] | ≥ 1,5 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Expansão/retracção impedidas (não aplicável no caso de ciclos térmicos) (*) | EN 12617-4 [45] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 1,5 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Resistência à carbonatação (*) | EN 13295 [48] | $d_k$ ≤ betão de controlo (MC(0,45)) | em conformidade |
| Módulo de elasticidade | EN 13412 [47] | ≥ 15 GPa | ≥ 15 GPa |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos com chuva) | EN 13687-2 [48] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 1,5 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos a seco) | EN 13687-4 [49] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 1,5 MPa | ≥ 1,5 MPa |
| Absorção capilar | EN 13057 [53] | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípio 3 (CR), método 3.1 e do princípio 7 (RP), método 7.2, pela EN 1504-3[20].

Pelos dados técnicos do produto, apresentados no Quadro 5. 5., facilmente se verifica que o produto está de acordo com a NP 1504-3[20].

Na sua sequência é aplicada o Protectosil CIT, um inibidor de corrosão aplicado em todo o elemento, promovendo um acréscimo de protecção ao reingresso de iões cloreto. Como já foi referido anteriormente, não existe normalização que imponha requisitos de desempenho aplicáveis aos produtos inibidores de betão. No entanto este produto, na sua ficha técnica, refere a realização de ensaios segundo o protocolo de ensaio da U.S. Federal Highways Administration para vigas de betão armado fissurado. Os ensaios realizados e resultados obtidos foram:

- Inibição da corrosão, com o resultado: redução de 99% da corrosão para provetes de betão fissurados sem corrosão pré-existente e redução de 92% da corrosão para provetes de betão fissurados com corrosão pré-existente;
- Redução da penetração de cloretos segundo a ASTM 1152, com resultado: diminuição considerável da penetração de cloretos em todas as profundidades ensaiadas (12,5 mm, 32 mm, 50 mm e 69 mm).

Posteriormente será aplicado o Masterseal® 303, uma impregnação hidrofóbica segundo a NP 1504-2[16], como protecção superficial do elemento reabilitado. Os seus dados técnicos, bem como os requisitos impostos pela NP 1504-2[16] para este tipo de produtos constam do Quadro 5. 6..

Quadro 5. 6. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-2[16] | Resultados dos ensaios para a impregnação hidrofóbica (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Profundidade de penetração (*) | EN 1766[67] – Ensaio de penetração em cubos de betão de 100 mm C(0,70) EN 13579[63] – tratamento com agente hidrofóbico | Classe I: < 10 mm<br>Classe II: ≥ 10 mm | Classe I |
| Absorção de água e resistência aos álcalis (*) | EN 13580[68] | Taxa de absorção:<br>< 7,5% comparada com o provete não tratado<br>< 10% após imersão numa solução alcalina | em conformidade |
| Velocidade relativa de secagem (*) | EN 13579[63] | Classe I: > 30%<br>Classe II: > 10% | Classe I |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como impregnações hidrofóbicas no âmbito dos princípios PI, MC e RI, pela EN 1504-2[20].

De acordo com o Quadro 5. 6., verifica-se que o produto cumpre os requisitos impostos pela NP 1504-2[20], sendo classificado com impregnação hidrofóbica de classe I. Esta impregnação é incolor, pelo que dará ao elemento uma cor e textura muito semelhantes à da argamassa aplicada anteriormente, mas com um aspecto um pouco mais brilhante (Fig. 5. 7.). Argamassa essa de cor cinza, semelhante à cor da superfície de betão aparente.

Fig. 5. 7. – Acabamento conferido pela aplicação da impregnação hidrofóbica [79].

### 5.2.3. CASO 3 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DA CARBONATAÇÃO CUJA SECÇÃO ESTÁ PARCIALMENTE DETERIORADA

A deterioração típica deste elemento está esquematizada na Fig. 5. 8.. Este esquema, correspondente a um corte transversal de uma elemento de betão armado, acompanhará igualmente a ilustração do sistema de reparação e protecção seleccionado para este caso.

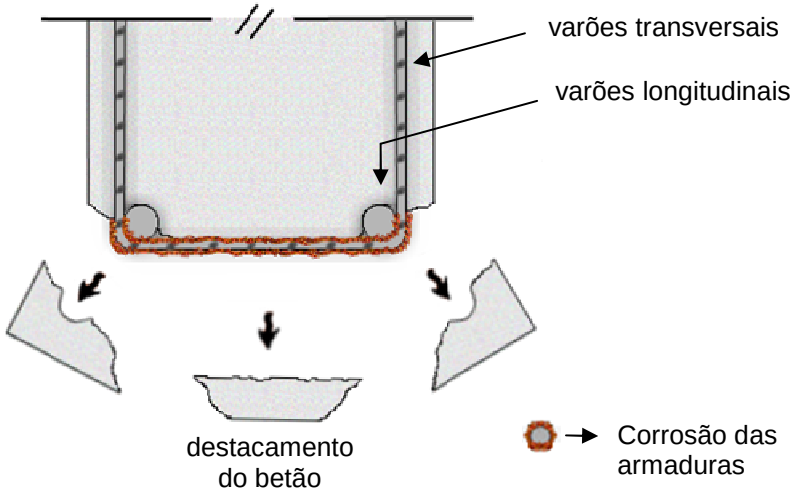



Fig. 5. 8. – Corte transversal da secção do elemento parcialmente deteriorada pela acção da carbonatação.

O sistema seleccionado para a reparação deste elemento é composto por produtos recomendados e fabricados pela Mapei [80], sendo possível a sua articulação com o esquema de princípios e métodos propostos na Fig. 4.19. (baseado apenas na NP 1504 e na bibliografia referida). Na Fig. 5. 9. consta o conjunto de produtos referidos, já enquadrados no âmbito da NP 1504, com excepção do Malech.

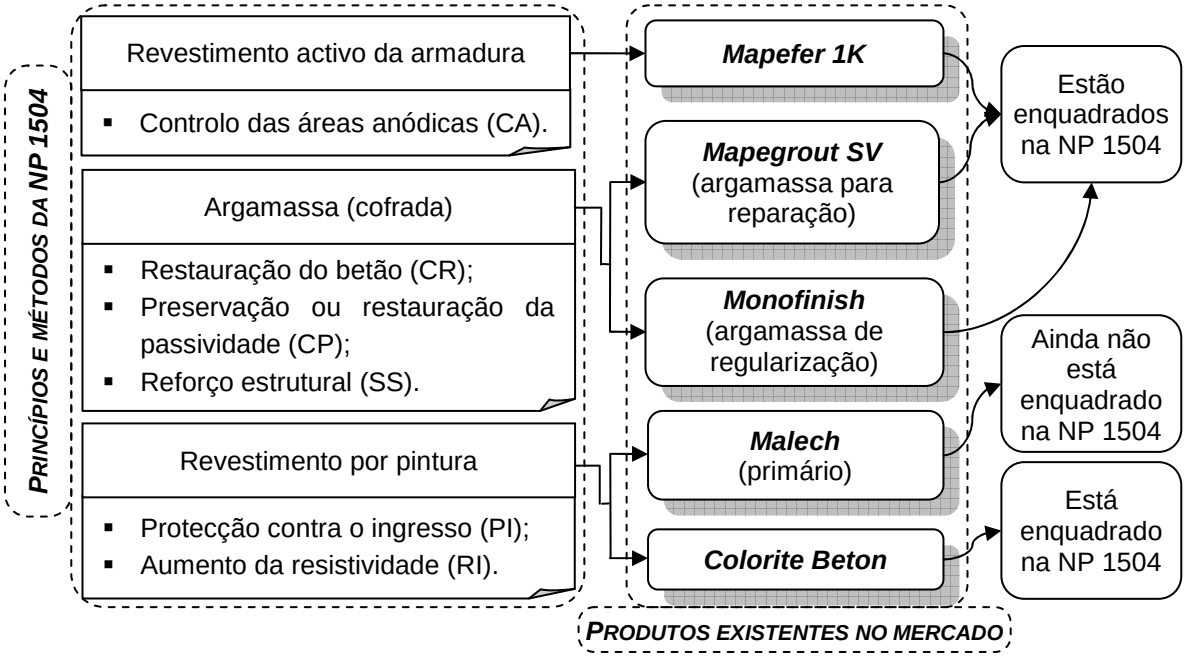



Fig. 5. 9. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504.

A Fig. 5. 10. pretende ilustrar a aplicação destes produtos tendo como base a deterioração esquematizada na Fig. 5. 8..

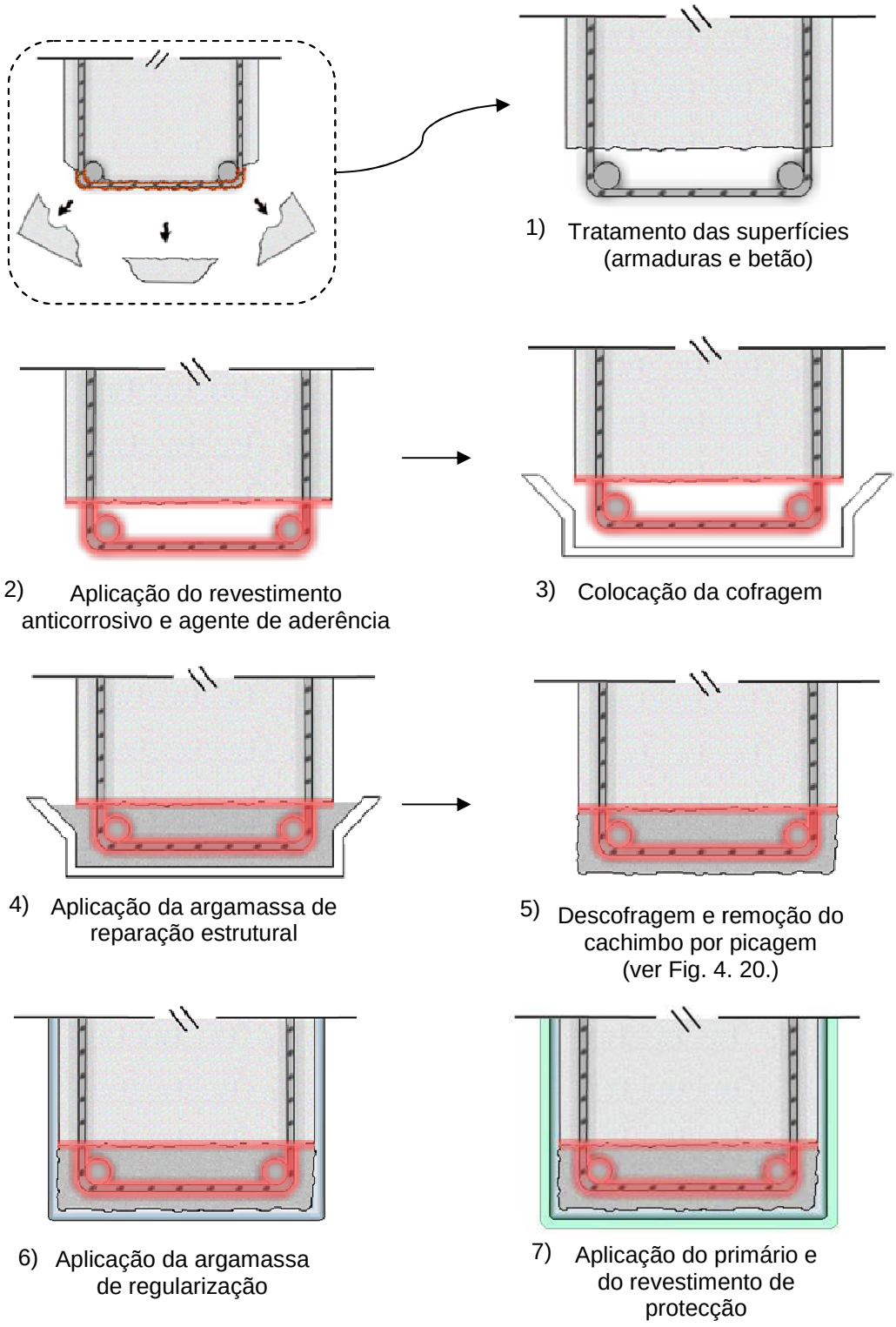



Fig. 5. 10. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 3.

O primeiro produto a aplicar após o tratamento das superfícies é o Mapefer 1K. Segundo a sua ficha técnica é uma argamassa cimentícia anticorrosiva para protecção das armaduras cujos requisitos de desempenho se encontram enquadrados na NP 1504-7[30]. Esta argamassa, aplicada nas armaduras, actua como revestimento activo das armaduras e também como promotor de aderência às argamassas de reparação seguintes. No Quadro 5. 7. constam os dados técnicos deste produto bem como os requisitos impostos pela NP 1504-7[30] para este tipo de produtos.

Quadro 5. 7. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30].

| | Características essenciais para revestimentos activos da armadura (protecção contra a corrosão das armaduras) | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-7[30] | Dados relativos à protecção anticorrosiva e agente de aderência (ficha técnica) |
|---|---|---|---|---|
| NP 1504-7 | Protecção contra a corrosão (*) | EN 15183[40] | As zonas revestidas não exibem corrosão e a ferrugem sobre o revestimento, após a remoção deste a partir do bordo da placa é < 1mm | Resultados aceites |
| | Temperatura de transição vítrea | EN 12614[41] | Pelo menos 10 ºK acima da máxima temperatura de serviço | Não consta na ficha técnica do produto |
| | Aderência ao corte (aço revestido sobre betão) | EN 15184[42] | O critério de aceitação é a tensão de aderência para um deslocamento $\Delta$ = 0,1 mm. Aceita-se o resultado do ensaio se a tensão de aderência determinada com as barras revestidas é ≤ 80% da tensão de aderência de referência determinada sobre barras não revestidas. | Resultados aceites |
| Ficha técnica do produto | Propriedades físicas/ mecânicas | Tensão de aderência EN 1542[39] | - (ensaiado na relação água : cimento = 0,40) | > 2,5 N/mm$^2$ (aos 28 dias) |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como revestimentos activos das armaduras no âmbito do princípio controlo das áreas anódicas, pela EN 1504-7[30].

Da análise do Quadro 5. 7. concluí-se que o produto apresentado esta adequado aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30].

O Mapegrout SV surge neste sistema como argamassa de reparação fluida de retracção controlada para, entre outras aplicações, para reparação de estruturas de betão muito degradadas mediante vazamento em cofragem. Segundo a sua ficha técnica é uma argamassa da classe R4 do tipo CC (argamassas hidráulicas) pela NP 1504-3[20], com uma consistência entre fluida e super fluida. As suas propriedades, bem como as exigências impostas pela NP 1504-3[20] para argamassas estruturais da classe R4 estão descritas no Quadro 5. 8..

Quadro 5. 8. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-3[20] Classe R4 | Resultados dos ensaios para a argamassa de reparação para enchimentos classe R4 (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Resistência à compressão (*) | EN 12190 [43] | ≥ 45 MPa | > 55 MPa |
| Teor de cloretos (*) | EN 1015-17 [44] | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % |
| Aderência (*) | EN 1542[39] | ≥ 2,0 MPa | > 2,0 MPa |
| Resistência à carbonatação (*) | EN 13295 [46] | $d_k$ ≤ betão de controlo (MC(0,45)) | Resultados aceites |
| Módulo de elasticidade | EN 13412 [47] | ≥ 20 GPa | 25 GPa |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos com chuva) | EN 13687-2 [48] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 2,0 MPa | > 2,0 MPa |
| Compatibilidade térmica (ciclos térmicos a seco) | EN 13687-4 [49] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 2,0 MPa | > 2,0 MPa |
| Absorção capilar | EN 13057 [53] | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | < 0,07 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípio 3, método 3.1 e do princípio 7, método 7.2, pela EN 1504-3[20].

Da análise do Quadro 5. 8. concluí-se que o produto apresentado esta adequado aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20].

Após a aplicação desta argamassa de reparação, para promover a regularização da superfície do elemento, aplicar-se-á o Monofinish. Este produto, segundo a sua ficha técnica, é uma argamassa cimentícia da classe R2 do tipo PCC pela NP 1504-3[20] e é também considerado um revestimento pela NP 1504-2[16] no âmbito dos princípios: controlo da humidade e aumento da resistividade, tendo sido este último considerado na estratégia de reabilitação deste elemento. No Quadro 5. 9. estão

presentes as exigências da NP 1504-3 e da NP 1504-2[16] bem como os dados técnicos referidos na ficha técnica deste produto.

Quadro 5. 9. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20] e pela NP 1504-2[16].

| Características essenciais | | Método de ensaio | Requisitos | Resultados dos ensaios para a argamassa de regularização (ficha técnica) |
|---|---|---|---|---|
| NP 1504-3[20] Classe R2 | Resistência à compressão (*) | EN 12190 [43] | ≥ 15 MPa | > 25 MPa (aos 28 dias) |
| | Teor de cloretos (*) | EN 1015-17 [45] | ≤ 0,05 % | ≤ 0,05 % |
| | Aderência (*) | EN 1542[39] | ≥ 0,8 MPa | 2,0 MPa (aos 28 dias) |
| | Módulo de elasticidade | EN 13412 [47] | Sem requisitos | 12 GPa (aos 28 dias) |
| | Compatibilidade térmica (ciclos térmicos com chuva) | EN 13687-2 [48] | Resistência de colagem após ensaio (a) ≥ 0,8 MPa | > 2 MPa |
| | Compatibilidade térmica (ciclos térmicos a seco) | EN 13687-4 [49] | Resistência de colagem após ensaio (a) ≥ 0,8 MPa | > 2 MPa |
| | Resistência ao deslizamento | EN 13036-4 [50] | Classe I, Classe II ou Classe III. | Não consta na ficha técnica do produto |
| | Absorção capilar | EN 13057 | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | < 0,3 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ |
| NP 1504-2 Revestimento | Permeabilidade ao vapor de água (*) | EN ISO 7783-1[57] EN ISO 7783-2[58] | Classe I: $s_D \leq 5$ m (permeável ao vapor de água) Classe II: 5 m ≤ $s_D \leq 50$ m Classe III: $s_D > 50$ m (não permeável ao vapor de água) | $s_D < 0,5$ m Classe I |
| | Absorção capilar e permeabilidade à água (*) | EN 1062-3 [38] | w < 0,1 $kg/m^2.h^{0,5}$ | w = 0,05 $kg/m^2.h^{0,5}$ < 0,1 $kg/m^2.h^{0,5}$ |
| Ficha técnica do produto | Profundidade de carbonatação | EN 13295 [46] | Sem requisitos | Resultados aceites (inferior ao do betão de referência MC 0,45) |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como argamassas não estruturais da classe R2 pela NP 1504-3[20] e no âmbito dos princípios: controlo da humidade (MC) e aumento da resistividade (RI), pela EN 1504-2[16].

Da análise do Quadro 5. 9. concluí-se que o produto referido está de acordo com os requisitos impostos tanto pela NP 1504-3[20] como pela NP 1504-2[16], no âmbito das aplicações mencionadas.

Posteriormente aplicar-se-á o revestimento de protecção em todo o elemento, o Colorite Beton. Este revestimento necessita primeiramente da aplicação de um primário, neste caso o Malech. O Colorite Beton é um revestimento de protecção aplicado por pintura pela NP 1504-2[16], no âmbito dos princípios: protecção contra o ingresso, controlo da humidade e aumento da resistividade. Entre outras aplicações, é utilizado para conferir não só protecção ao suporte cimentício contra a carbonatação, mas também, para manter o efeito "face à vista" ou "cofragem" do elemento ou ainda para homogeneizar a cor do elemento mantendo o aspecto "face à vista" inalterado. Além de estar disponível em quatro tons de cinzento é possível formular cores a partir de amostras utilizando o sistema ColorMap® da Mapei. Desta forma, exigências a nível estético serão possivelmente satisfeitas. As suas propriedades, bem como as exigências referidas pela NP 1504-2[16] estão descritas no Quadro 5. 10. Apresentando uma permeabilidade ao vapor de água de classe I (permeável ao vapor de água), permite manter o equilíbrio hídrico entre o betão e o meio ambiente, ao mesmo tempo que confere a protecção necessária contra a carbonatação (permeabilidade ao $CO_2$ $S_D$ > 50 m), como referido no subcapítulo 4.2.2..

Quadro 5. 10. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-2 [16] para revestimentos | Resultados dos ensaios para o revestimento de protecção (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Permeabilidade ao $CO_2$ (*) | EN 1062-6[56] | Permeabilidade ao $CO_2$ $s_D$ > 50 m | $s_D$ = 412 m |
| Permeabilidade ao vapor de água (*) | EN ISO 7783-1[57] EN ISO 7783-2[58] | Classe I: $s_D \leq 5$ m (permeável ao vapor de água) Classe II: 5 m ≤ $s_D \leq 50$ m Classe III: $s_D$ > 50 m (não permeável ao vapor de água) | $s_D$ = 0,40 m ≤ 5 m Classe I |
| Absorção capilar e permeabilidade à água (*) | EN 1062-3[38] | w < 0,1 kg/m$^2$.h$^{0,5}$ | w = 0,02 kg/m$^2$.h$^{0,5}$ < 0,1 kg/m$^2$.h$^{0,5}$ |
| Aderência por arrancamento (*) | EN 1542[39] | ≥ 0,8 N/mm$^2$ | ≥ 0,8 N/mm$^2$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípios referidos pela EN 1504-2[16].

Fig. 5. 11. – Acabamento conferido pelo revestimento de protecção [80].

### 5.2.4. CASO 4 – ELEMENTO SUJEITO À ACÇÃO DOS IÕES CLORETO CUJA SECÇÃO ESTÁ PARCIALMENTE DETERIORADA

A ilustração apresentada na Fig. 5. 8. é idêntica também à deterioração parcial da secção de um elemento em betão armado provocada pela acção dos cloretos e irá igualmente acompanhar a esquematização do sistema de produtos seleccionado para este caso.

Para a reabilitação deste elemento foram seleccionados produtos recomendados e fabricados pela Sika [29, 81], sendo que alguns deles estão presentes também no sistema Sika® MonoTop®. O conjunto de produtos referido está esquematizado na Fig. 5. 12. bem como a sua articulação com os princípios e métodos da NP 1504 descritos na Fig. 4.25 e a bibliografia referida.

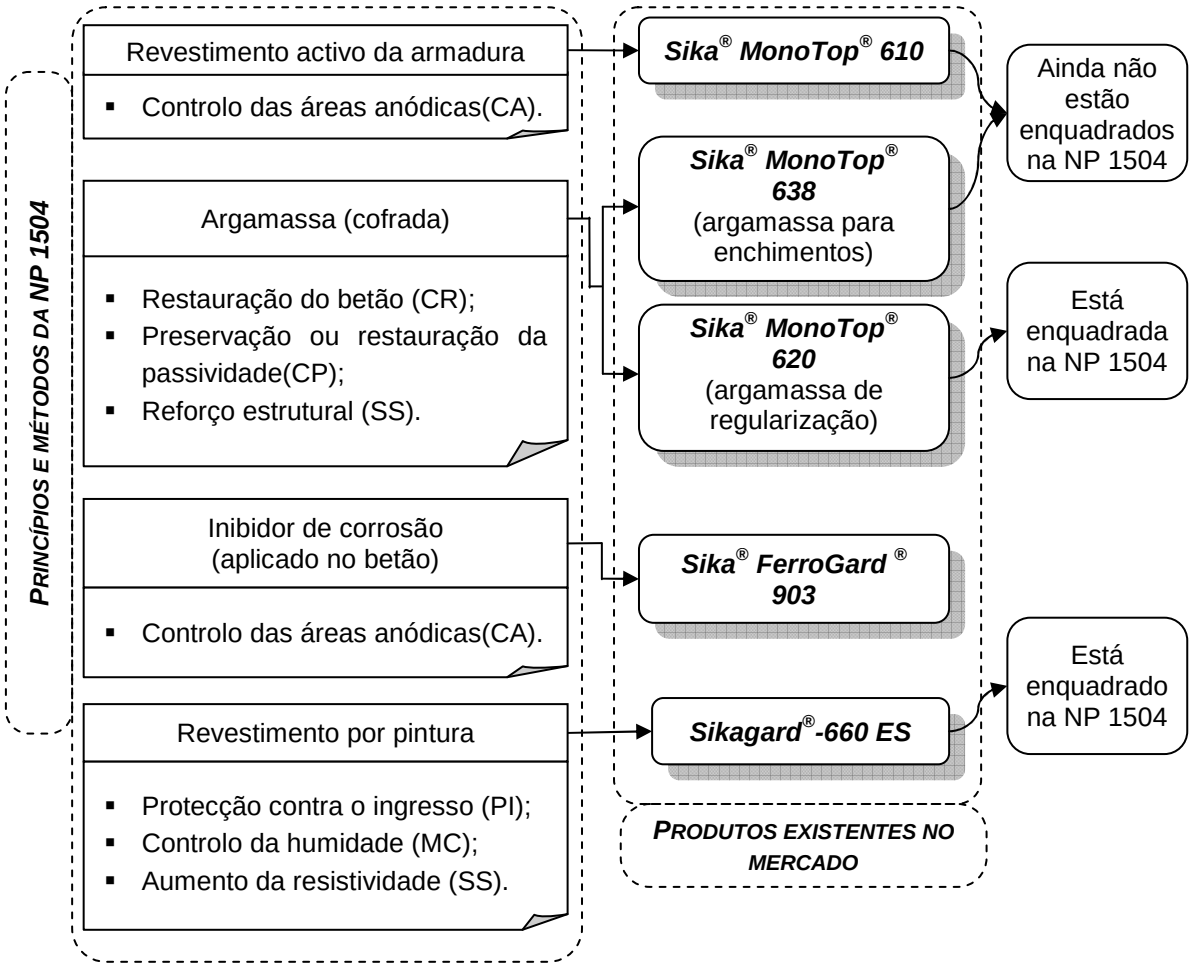



Fig. 5. 12. – Articulação entre os produtos presentes no mercado e os princípios e métodos apresentados pela NP 1504.

Na generalidade, os produtos seleccionados estão já enquadrados na NP 1504, excepto o Sika® FerroGard® 903, cujo tipo de produto não é abrangido por nenhum tipo de normalização existente, o Sika® MonoTop® 610 e o Sika® MonoTop® 638.

A Fig. 5. 13. ilustra a sequência de aplicação dos produtos seleccionados para a reparação e protecção do elemento em estudo.

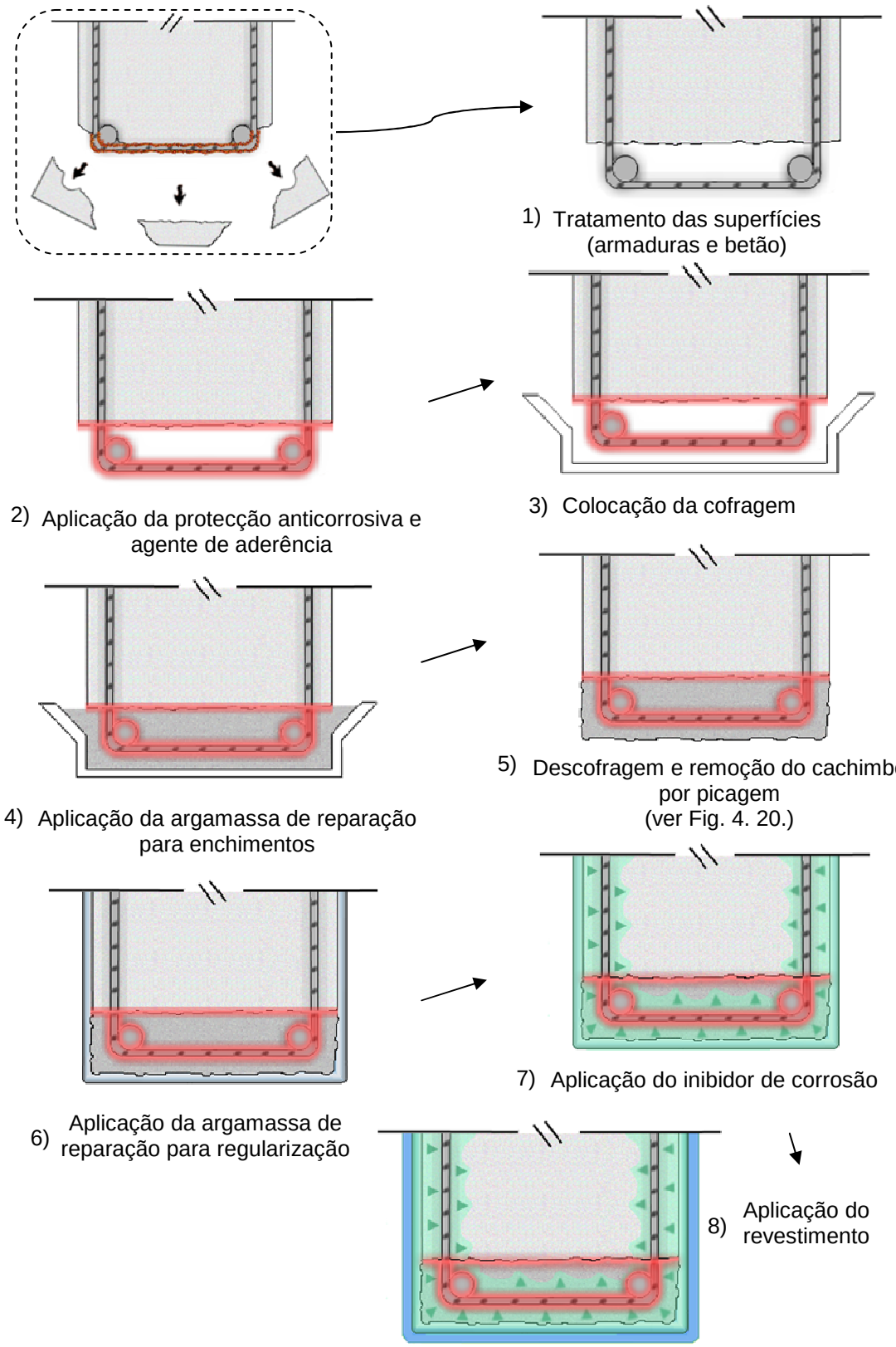



Fig. 5. 13. – Sequência da aplicação de produtos para a reparação e protecção do caso 4.

Após o tratamento das superfícies do elemento (betão e armadura) aplicar-se-á o produto Sika® MonoTop® 610, nas armaduras, promovendo a sua protecção contra a corrosão, e nas superfície de betão, funcionando como agente de colagem para os produtos seguintes. No Quadro 5. 11. estão presentes as propriedades que constam na ficha técnica deste produto, bem como os requisitos de desempenho impostos pela EN 1504-7[30] para revestimentos activos da armadura que lhe conferem protecção contra a corrosão.

Quadro 5. 11. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-7[30].

| Características essenciais para revestimentos activos da armadura (protecção contra a corrosão das armaduras) | | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-7[30] | Dados relativos à protecção anticorrosiva e agente de aderência (ficha técnica) |
|---|---|---|---|---|
| NP 1504-7 | Protecção contra a corrosão (*) | EN 15183[40] | As zonas revestidas não exibem corrosão e a ferrugem sobre o revestimento, após a remoção deste a partir do bordo da placa é < 1mm | Não consta na ficha técnica do produto |
| | Temperatura de transição vítrea | EN 12614[41] | Pelo menos 10 ºK acima da máxima temperatura de serviço | Não consta na ficha técnica do produto |
| | Aderência ao corte (aço revestido sobre betão) | EN 15184[42] | O critério de aceitação é a tensão de aderência para um deslocamento $\Delta$ = 0,1 mm. Aceita-se o resultado do ensaio se a tensão de aderência determinada com as barras revestidas é ≤ 80% da tensão de aderência de referência determinada sobre barras não revestidas. | Não consta na ficha técnica do produto |
| Ficha técnica do produto | Certificados/Boletins de ensaio | Certificado pelo laboratório Químico de Sevillana de Electricidad, o qual confirma as resistências do produto à oxidação, em espessuras de 2 mm, após ser submetido a mais de 500 horas de exposição na câmara de nevoeiro salino, permanecendo inalterado, sem qualquer traço de oxidação. | | |
| | Propriedades físicas/ mecânicas | Resistência à compressão | - | ≅ 45-55 N/mm$^2$ (aos 28 dias) |
| | | Resistência à tracção por flexão | - | ≅ 5,5-7,5 N/mm$^2$ (aos 28 dias) |
| | | Tensão de aderência | - | ≅ 2-3 N/mm$^2$ (aos 28 dias) |
| | | Módulo de elasticidade | - | ≅ 20.000 N/mm$^2$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados como revestimentos activos das armaduras no âmbito do princípio controlo das áreas anódicas, pela EN 1504-7[30].

Apesar de este produto não apresentar na sua ficha técnica qualquer referência ao requisito protecção contra a corrosão (de acordo com a EN 15183[40]), propriedade esta requerida para todos os produtos utilizados como revestimentos activos ou de barreira das armaduras pela EN 1504-7[30], apresenta um boletim de ensaio que comprova a seu desempenho face à oxidação. Na sua ficha técnica constam igualmente propriedades físicas/mecânicas que conferem a este produto o desempenho necessário como agente promotor de aderência aos produtos aplicados na sua sequência. Estas propriedades não são totalmente comparáveis aos requisitos de desempenho impostos pela EN 1504-4[80], para produtos de colagem de argamassa em betão endurecido, sendo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade as únicas propriedades enquadradas. Os requisitos impostos pela EN 1504-4[80] para este tipo de produtos são extensos e exigentes (Quadro 4. 7.), pelo que a sua aplicação se torna possivelmente justificável apenas no âmbito da realização de trabalhos que promovam um reforço estrutural a larga escala no elemento bastante deteriorado.

Seguidamente aplicar-se-á uma argamassa de reparação para enchimentos, o Sika® MonoTop® 638. Esta é uma argamassa autonivelante de grande espessura, à base de cimento e areais grossa, melhorada com resinas sintéticas. Entre outras aplicações, segundo a sua ficha técnica esta argamassa é utilizada para reparações de elementos estruturais por vazamento contido em cofragem, o que corresponde à necessidade de utilização de cofragem para restituir a secção inicial ao elemento deteriorado, sendo as suas propriedades físicas/mecânicas as seguintes:

- Resistência à compressão (aos 28 dias) – 61 $N/mm^2$;
- Resistência à tracção por flexão (aos 28 dias) – 10 $N/mm^2$;
- Tensão de aderência (ruptura pelo betão) – 2 $N/mm^2$;

Analisando o Quadro 4. 8., com os requisitos impostos pela NP 1504-3[20] para produtos aplicados neste âmbito, verificamos que apenas dois deles estão contemplados na ficha técnica desta argamassa. De acordo com os valores apresentados para ambos: resistência à compressão (61 $N/mm^2 \geq 45$ MPa) e tensão de aderência (2 $N/mm^2 \geq 2$ MPa), verifica-se as propriedades referidas se encontram dentro das exigências estabelecidas para uma argamassa estrutural de classe R4, embora não apresente a totalidade das características de desempenho requeridas.

Na sequência é aplicada uma argamassa, Sika® MonoTop® 620, de classe R3 segundo a NP 1504-3[20], com requisitos estruturais. Esta argamassa de reparação, à base de cimento com resinas sintéticas e sílica de fumo, é aplicada para realizar a regularização e/ou nivelamento das superfícies do elemento em estudo. O seu âmbito engloba também alguns dos princípios e métodos da NP 1504-9[5], nomeadamente: princípio 3 (CP), métodos 3.1 e 3.3:

- Restauração do betão (CP) – Argamassa aplicada à mão (Princípio 3, método 3.1 da NP 1504-9);
- Restauração do betão (CP) – Betão ou argamassa projectado (Princípio 3, método 3.3 da NP 1504-9);

Quadro 5. 12. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-3[20].

| Características essenciais | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-3[20] Classe R3 | Resultados dos ensaios para a argamassa de reparação (ficha técnica) |
|---|---|---|---|
| Resistência à compressão (*) | EN 12190 [43] | ≥ 25 MPa | 43,7 MPa |
| Teor de cloretos (*) | EN 1015-17 [45] | ≤ 0,05 % | ≤ 0,01 % |
| Aderência (*) | EN 1542[39] | ≥ 1,5 MPa | 2,1 MPa |
| Expansão/retracção impedidas (não aplicável no caso de ciclos térmicos) (*) | EN 12617-4 [45] | Resistência de colagem após ensaio [(a)] | |
| | | ≥ 1,5 MPa | 2,0 MPa |
| Resistência à carbonatação (*) | EN 13295 [46] | $d_k$ ≤ betão de controlo (MC(0,45)) | $d_k$ = 3,7 mm (em conformidade) |
| Módulo de elasticidade | EN 13412 [47] | ≥ 15 GPa | 22,3 GPa |
| Absorção capilar | EN 13057 [53] | ≤ 0,5 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ | 0,4 $kg.m^{-2}.h^{-0,5}$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípio 3 (CR), método 3.1 e do princípio 7 (RP), método 7.2, pela EN 1504-3[20].

De acordo com os dados apresentados no Quadro 5. 12. as propriedades do produto referido estão de acordo com os requisitos definidos pela NP 1504-3[20].

De seguida é aplicado o produto Sika® Ferrogard® 903, uma impregnação inibidora da corrosão do betão. Esta impregnação, segundo a sua ficha técnica, é aplicada sobre o betão até à saturação, penetrando no elemento e sendo, por conseguinte, atraída para as armaduras. Ao combinar-se com as armaduras retarda o início da corrosão e reduz a velocidade de corrosão. Como já foi referido anteriormente não existe normalização que imponha requisitos de desempenho aplicáveis aos produtos inibidores de betão. Neste contexto, na ficha técnica deste produto são apresentados dois boletins de ensaio referentes a ensaios de desempenho em obra e laboratório que confirmam [80]:

- Penetração > 50 mm (conforme a permeabilidade);
- Redução da corrosão e protecção;
- Durabilidade até 10 anos, ou de 10 a 15 ou mais anos no caso de serem aplicados revestimentos de protecção.

Para finalizar o sistema seleccionado para a reabilitação do elemento em estudo aplicar-se-á um revestimento, como protecção superficial, o Sikagard®-660 ES. De acordo com a sua ficha técnica, é

uma tinta acrílica com, entre outras características, resistência à exposição ambiental e resistência à permeabilidade de cloretos. Este produto está enquadrado na NP 1504-2[16] sendo, como tal, considerado um revestimento de protecção. O seu âmbito de utilização engloba os seguintes princípios e métodos, referidos como importantes para a reabilitação do elemento em estudo na Fig. 4.25.:

- Protecção contra o ingresso (PI) – Revestimento (Princípio 1, método 1.3 da NP 1504-9[5]);
- Controlo da humidade (MC) – Revestimento (Princípio 2, método 2.3 da NP 1504-9[5]);
- Aumento da resistividade (RI) – Revestimento (Princípio 8, método 8.3 da NP 1504-9[5]).

As propriedades referidas pela ficha técnica deste produto, bem como os requisitos impostos pela NP 1504-2[16] para a aplicação de produtos neste âmbito encontram-se apresentadas no Quadro 5. 13.

Quadro 5. 13. – Adequabilidade das características técnicas do produto aos requisitos impostos pela NP 1504-2[16].

| Características de desempenho | Método de ensaio | Requisitos da NP 1504-2[16] para revestimentos | Resultados dos ensaios para o revestimento de protecção |
|---|---|---|---|
| Permeabilidade ao $CO_2$ (*) | EN 1062-6[56] | Permeabilidade ao $CO_2$<br>$s_D > 50$ m | $s_D = 572$ m |
| Permeabilidade ao vapor de água (*) | EN ISO 7783-1[57]<br>EN ISO 7783-2[58] | Classe I: $s_D \leq 5$ m (permeável ao vapor de água)<br>Classe II: $5 \text{ m} \leq s_D \leq 50$ m<br>Classe III: $s_D > 50$ m (não permeável ao vapor de água) | $s_D = 3,4 \text{ m} \leq 5$ m<br>Classe I |
| Absorção capilar e permeabilidade à água (*) | EN 1062-3[38] | $w < 0,1$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$ | $w = 0,003$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$<br>$< 0,01$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$ |
| Aderência por arrancamento (*) | EN 1542[39] | $\geq 0,8$ N/mm$^2$ | $> 2,6$ N/mm$^2$ |

(*) – Requisito imposto a todos os produtos aplicados no âmbito do princípio 1, método 1.3; do princípio 2, método 2.3 e princípio 8, método 8.3, pela EN 1504-2[16].

Apresentando uma absorção capilar de $w = 0,003$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$ compre a recomendação, referida no subcapítulo 4.2.2., para esta propriedade relativamente à penetração de iões cloreto ($w < 0,01$ kg/m$^2$.h$^{0,5}$). Para além destas propriedades a ficha técnica deste produto refere ainda a existência de boletins de ensaio referentes às seguintes propriedades:

- Permeabilidade à água líquida, ao vapor de água e ao $CO_2$;
- Resistência à abrasão;
- Resistência aos álcalis, aderência, permeabilidade à água, carbonatação, permeabilidade aos cloretos e resistência ao envelhecimento.

No que se refere a características do ponto de vista estético, é possível conferir ao produto qualquer cor segundo o catálogo de cores "Tintas de Protecção e Decorativas" do fabricante, com um acabamento que permite manter o aspecto "cofrado" do elemento (Fig. 5. 14.).

Fig. 5. 14. – Acabamento conferido pelo revestimento de protecção [29, 81].

### 5.2.5. SÍNTESE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS NO MERCADO

Na generalidade, a selecção de produtos, apresentada nos subcapítulos anteriores, com base nas recomendações dos fabricantes, está adequada ao definido no subcapítulo 4.2.2., onde apenas foram consideradas a série NP 1504 e a bibliografia encontrada. Adequada não só em termos de produtos seleccionados, como em termos da sua sequência de aplicação e também de acordo com o âmbito de princípios e métodos pré-definidos. No entanto, os produtos seleccionados no subcapítulo 5.2.1. apresentam ainda prestações, nas suas fichas técnicas, que não são idênticas às requeridas pela série referida, o que é justificado pela fase de enquadramento em que os produtos se encontram. Ainda assim é importante frisar que a sua sucessão, em termos de aplicação, é idêntica ao considerado pela NP 1504 e ao disposto na bibliografia referida.

No que se refere a produtos que conferem protecção contra a corrosão das armaduras, nomeadamente, revestimentos activos das armaduras, é possível encontrar no mercado dois tipos de produtos:

- Revestimentos activos aplicados apenas na armadura, conferindo-lhe protecção contra a corrosão;
- Revestimentos activos aplicados na armadura e no substrato de betão a reparar, conferindo não só protecção contra a corrosão das armaduras mas também, quando aplicados sobre o substrato, aderência deste às camadas seguintes.

A NP 1504 prevê a utilização de revestimentos de protecção contra a corrosão e de produtos de colagem de argamassa sobre betão endurecido, na sua sétima e quarta partes respectivamente. No entanto, não assume directamente a possibilidade de a um único produto estarem associados os requisitos de desempenho para ambas as utilizações. Os revestimentos activos que, simultaneamente promovem a aderência entre o substrato e a argamassa a aplicar posteriormente, surgem então como uma solução desenvolvida pelos fabricantes, não contemplada directamente pela série.

De uma forma geral os fabricantes recomendam a utilização de dois tipos de argamassa na reparação de um elemento deteriorado. Assim sendo, numa primeira fase há que aplicar uma argamassa de enchimento, normalmente estrutural (R3 ou R4), cuja trabalhabilidade será adequada ao método de reparação seleccionado. Para uma restauração de betão onde se preveja a aplicação de argamassa à mão, a trabalhabilidade desta argamassa será mais plástica do que a requerida para uma argamassa cofrada, que será mais fluida. É ainda de notar que nas fichas técnicas destes produtos, para além de constar os requisitos de desempenho impostos pela série NP 1504, apenas se assume o campo de aplicação da argamassa em si, sem referir propriamente a sua trabalhabilidade, por exemplo através da apresentação dos resultados do ensaio de abaixamento do cone de Abrams – Slump test. Desta forma surgem no mercado argamassas estruturais com a mesma classificação segundo a NP 1504, R4 por exemplo, mas para campos de aplicações distintos. Em seguida, é recomendada a aplicação de uma argamassa de regularização, normalmente não estrutural (R1 ou R2), com o intuito de nivelar e regularizar a superfície do elemento antes da aplicação dos produtos de protecção superficial. Mais se acrescenta que a NP 1504 não refere directamente a consideração de argamassas de regularização e de nivelamento associadas a princípios de restauração do betão ou reforço estrutural. Assume apenas que, tanto as argamassas não estruturais como estruturais, poderão constar de um sistema de produtos aplicados não só em métodos de restauração do betão como também em métodos de reforço estrutural. Posto isto, todas as recomendações e produtos desenvolvidos pelos fabricantes, relativos às argamassas de reparação, surgem igualmente como uma amplificação das soluções abrangidas pela série NP 1504.

No que se refere aos inibidores de corrosão, no mercado é possível encontrar tanto inibidores que sejam aplicados por difusão no próprio elemento a reparar, como inibidores adicionados durante a amassadura do betão. De uma forma geral, estes produtos são recomendados para conferir uma acréscimo de protecção contra a corrosão das armaduras, sobretudo em elementos sujeitos à acção agentes agressivos, como os iões cloreto. Embora, de acordo com o supramencionado, não exista referente à sua aplicação nenhuma EN ou ETA, para além da garantia dada pelos fabricantes existem documentos publicados pelos mesmos que atestam o seu comportamento e as mais-valias da sua aplicação.

As protecções superficiais desenvolvidas pelos fabricantes englobam variados campos de aplicação, relativos ao ambiente em que se encontra o elemento a reparar e à necessidade de protecção requerida. Para além desta variedade, facilmente se encontram no mercado produtos que, do ponto de vista estético, se enquadram já em variados tipos de acabamentos possivelmente requeridos no âmbito destes trabalhos de reabilitação. É portanto de evidenciar, por exemplo, a versatilidade de um mesmo produto, para além de conferir a protecção ao elemento requerida, conferir um acabamento cuja cor, dentro de uma gama variada, pode ser seleccionada pelo projectista.

# 6

# CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

## 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

De uma forma geral, considera-se que os objectivos propostos para este trabalho foram alcançados, esperando-se que as suas conclusões sejam úteis a todos os interessados na área da reabilitação de superfícies de betão aparente.

A normalização existente no âmbito da protecção e reparação de elementos de betão armado é, sem dúvida, uma mais-valia para a realização de projectos e trabalhos nesta área. Apesar de extensa e de delicada interpretação, permite a uniformização dos produtos disponíveis no mercado de acordo com os princípios e métodos seleccionados pelo projectista, definindo não só tipos de produtos bem como os seus requisitos de desempenho e considerações sobre a sua aplicação e controlo de qualidade.

Apresentar-se-ão seguidamente as conclusões gerais deste trabalho, relativas à aplicabilidade da NP 1504:

- As várias patologias frequentemente observáveis em elementos de betão armado surgem, de forma geral, da conjunção de várias causas, humanas e/ou naturais. Pelo que desta forma será sempre importante focar a gestão estratégica de manutenção e/ou reparação do elemento, sempre que possível, nas verdadeiras causas da sua deterioração e não só no tratamento das patologias que apresenta. Com o apoio da série NP 1504 é possível equacionar tais trabalhos de reabilitação e/ou de manutenção, numa fase inicial de projecto bem como em situações em que, não tendo sido previsto qualquer plano de manutenção do elemento em si, dado o seu grau de deterioração é necessário intervir;
- Esta série apresenta uma listagem de princípios e métodos que, quando conjugados, permitem estabelecer uma estratégia de reparação e protecção de acordo com as principais causas de degradação dos elementos de betão armado. Assim sendo, e para os casos práticos desenvolvidos, a aplicabilidade da norma referida foi comprovada. No entanto, no que se refere a exigências do ponto de vista estético, requeridas em trabalhos de reabilitação de elementos de betão aparente, a mesma norma não apresenta considerações relativas aos princípios, métodos e produtos que estejam em consonância com tal exigência;
- As recomendações realizadas pela norma referida, para sistemas de reparação e protecção de elementos deteriorados pela acção da carbonatação ou dos iões cloreto, estão em concordância com a bibliografia referenciada sobre esta temática.

Apresentar-se-ão seguidamente as conclusões gerais deste trabalho, relativas à articulação dos sistemas e produtos existentes no mercado com a perspectiva exigencial definida pela NP 1504 e com as considerações definidas pela bibliografia referenciada:

- Existem ainda muitos produtos que se encontram actualmente em fase de adequação à NP 1504, dada a sua recente transição para Norma Portuguesa. No entanto, a estruturação do sistema (produtos e sua sucessão) para reparação e protecção do elemento deteriorado definida pelos fabircantes, está de acordo com as considerações definidas pela NP 1504 e pela bibliografia;
- Dos produtos seleccionados que já estão enquadrados na série referida, para além de na sua ficha técnica estar descrito o conjunto de características de desempenho exigidas, está igualmente definido o conjunto de princípios e métodos no qual o produto é passível de ser aplicado. Desta forma, a selecção dos produtos por parte do projectista, com base na ficha técnica dos mesmos, torna-se bastante intuitiva, desde que seja estabelecido *à priori* quais os princípios essenciais para a estratégia de reparação do elemento;
- De forma geral, as recomendações dos fabricantes envolvidos estão em consonância com o disposto na NP 1504 e na restante bibliografia. Sendo que, fabricantes que comercializem produtos já enquadrados no normativo, dispõem de documentação auxiliar onde definem para cada princípio e método a gama de produtos a eles associados;
- De acordo com os casos práticos estudados, dos sistemas a definir para a reabilitação de elementos sujeitos à acção da carbonatação ou dos iões cloreto devem constar produtos que: promovam a protecção das armaduras contra a corrosão (revestimentos activos ou barreira), reparem a deterioração do betão (argamassas ou betão), promovam a protecção superficial do elemento (impregnações, impregnações hidrofóbicas e revestimentos) e confiram uma protecção adicional à corrosão das armaduras (inibidores de corrosão), sobretudo no caso da presença de iões cloreto;
- No que se refere a produtos que promovam protecção das armaduras contra a corrosão, segundo a bibliografia, é preferível a selecção de revestimentos activos em detrimento da selecção de revestimentos barreira, dadas as exigências a ter em consideração aquando da sua aplicação, para obter os mesmos níveis de desempenho dos dois produtos.
- De acordo com as considerações dos fabricantes, na sua maioria, é comum utilizarem-se, em trabalhos de reparação, argamassas estruturais (R3 e R4) como argamassas de enchimento, e argamassas não estruturais (R1 e R2) como argamassas de nivelamento ou regularização da superfície. A NP 1504 não refere directamente a consideração de uma argamassa de enchimento em conjunto com uma argamassa de nivelamento, apresentando apenas argamassas estruturais e não estruturais a aplicar no âmbito dos princípios: restauração do betão e reforço estrutural;
- Na reparação de elementos sujeitos à carbonatação, tanto os fabricantes como a bibliografia, referem a utilização preferencial de revestimentos por pintura para proteger superficialmente o elemento. De todas as características de desempenho definidas para estes produtos utilizados neste âmbito de aplicação, as mais importantes, segundo a bibliografia, são: a permeabilidade ao dióxido de carbono e a permeabilidade ao vapor de água. Assim, para garantir uma protecção contra a carbonatação é necessário que a permeabilidade ao dióxido de carbono se traduza num $S_D > 50$ m e para promover o equilíbrio hídrico entre o betão e o meio ambiente, prevenindo o aparecimento de patologias recorrentes como empolamentos no revestimento por exemplo, é necessário que a permeabilidade ao vapor de água se traduza num $S_D \leq 5$ m;

- No que se refere à reabilitação de elementos sujeitos à acção dos iões cloreto, tanto os fabricantes como a bibliografia, referem a utilização preferencial de impregnações hidrofóbicas ou de revestimentos por pintura para proteger superficialmente o elemento. Segundo a bibliografia, a absorção capilar dos revestimentos por pintura é determinante no desempenho posterior do produto, devendo de assumir valores inferiores a 0,01 $kg/m^2.h^{0,5}$. De acordo com a mesma referencia as impregnações hidrofóbicas permitem reduções da absorção de água do betão na ordem dos 70% a 90%, redução esta directamente ligada à resistência à penetração dos cloretos. Há ainda que equacionar nestas situações a aplicação de inibidores de corrosão, conferindo ao elemento uma protecção adicional contra a corrosão;
- Considerando agora as exigências do ponto de vista estético, comuns a trabalhos de reabilitação de elementos de betão aparente, os produtos existentes no mercado demonstram já uma crescente preocupação em conferir aos elementos um aspecto idêntico ao original. Existem produtos disponíveis em várias cores, não só em tons de cinzento, que permitem o ajuste da sua cor a amostras do elemento original. Dado o acabamento único conseguido pela cofragem e cura do próprio betão aparente, será expectável que aos produtos de reparação e protecção superficial seja algo complexo conferir ao elemento um acabamento idêntico ao do betão, sem o aspecto de "remendado". Assim sendo, é essencial reflectir, *à priori*, logo na fase de projecto, sobre as exigências do acabamento a requerer ao elemento, considerando sempre a necessidade da sua manutenção e/ou reabilitação. Se o acabamento for definido inicialmente como um revestimento ao qual é exigido desde logo características de protecção superficial, com cores, texturas, tons, etc. disponíveis no mercado, será mais simples promover a integração de trabalhos de manutenção e reparação no aspecto geral do elemento.

## 6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Apesar da normalização existente e do esforço realizado por parte dos fabricantes em adequar os seus produtos à perspectiva exigencial da NP 1504, ainda existe um longo caminho a percorrer para que os princípios, métodos, tecnologias, sistemas, produtos, etc. definidos para a reabilitação de superfícies de betão aparente sejam unânimes e lineares. Sempre numa tentativa de melhoria, apresentam-se algumas sugestões cuja abordagem seria interessante considerar em desenvolvimentos futuros:

- Investigação, a realizar por parte da comunidade científica, ajustada à recente normalização relativa à reparação e protecção de elementos de betão armado. Desta forma será possível recorrer a artigos técnicos actualizados que auxiliem a selecção dos sistemas e produtos adequados as situações reais de deterioração de elementos de betão aparente;
- Definição de considerações e requisitos no âmbito das exigências estéticas por parte do normativo existente. Só assim será possível promover o fabrico de produtos e sistemas orientados também para esta preocupação;
- Maior adequação dos produtos a exigências do ponto de vista estético;
- Investimento na formação de todos os intervenientes nesta área de reabilitação, não só na formação dos engenheiros envolvidos como na formação dos próprios operários da construção civil que realizarão os trabalhos desta especialidade. Só assim será possível aplicar a ampla normalização existente e os produtos a si adequados com qualidade e desempenho optimizados.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Ripper, T.; SouzaV. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. Pini, São Paulo, 2001.

[2] Aroso, M.. *Durabilidade dos betões. Degradação dos betões – causas efeitos. Reparação e reabilitação dos betões. Controlo e garantia da qualidade dos betões.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1991.

[3] Cóias, V. *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. IST PRESS, Lisboa, 2006.

[4] Rodrigues, M. *Introdução à Corrosão do Aço no Betão. Modelos de Comportamento às Acções Agressivas*. Seminário sobre Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Amado, 1997, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[5] NP 1504-9. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições ,Requisitos, controle de qualidade e avaliação da conformidade. Parte 9: Princípios Gerais para a Utilização de Produtos e Sistemas*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2009.

[6] Appleton, J., Costa, A., *Apontamentos da Cadeira de "Reabilitação e Reforço de Estruturas"- Módulo 2: Anomalias e Mecanismos de Deterioração: Mecanismos de Deterioração em Estruturas de Betão Armado.* Instituto Superior Técnico.

[7] Paiva, J., Aguiar, J., Pinho,A.. *Guia Técnico Habitacional*. Volume II, Instituto Nacional de Habitação e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2006.

[8] Coutinho, J.S.. *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 24 Julho, 1998.

[9] OZ DIAGNOSTICO: www.oz-diagnostico.pt. Acedido em Março de 2010.

[10] Raupach, M.. *Concrete Repair According to the new European Standard EN 1504.* RWTH Aachen University, Londres, 2006.

[11] Ribeiro, M. e Gonçalves A.. *Requisitos dos Betões e Argamassas de Reparação. Controle da Qualidade*. Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão, 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[12] NP 1504-8. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 8: Controlo da Qualidade e Avaliação da Conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[13] EN ISO 9001. *Quality Management Systems. Requirements.* CEN, Brussels, 2000.

[14] Rodrigues, M. e Eusébio M.. *Protecção Superficial do Betão Armado com Produtos Orgânicos.* Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão, 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[15] Catarino, J.. *Normalização Europeia no Âmbito da Reparação.* Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão, 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[16] NP 1504-2. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 2: Sistemas de Protecção Superficial do Betão*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[17] NP 1504-5. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições ,Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 5: Injecção do Betão*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[18] NP 14487-1. *Betão Projectado. Parte 1: Definições, Especificações e Conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2008.

[19] Salta, M.. *Prevenção da Corrosão no Betão Armado.* Seminário sobre Materiais em Ambiente Marítmo, 2007, Funchal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[20] NP 1504-3. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições ,Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 3: Reparação Estrutural e não Estrutural*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[21] STAP: www.stap.pt. Acedido em Março de 2010.

[22] NP 206-1. *Betão. Parte 1: Especificações, Desempenho, Produção e Conformidade.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2007.

[23] EN 13529. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Resistance to Severe Chemical Attack.* CEN, Brussels, 2003.

[24] CEN/TS 14038-1. *Electrochemical Realkalization and Choride Extraction Treatments for Reinforced Concrete. Part 1: Realkalization.* European Commitee for Standardization, Technical Specification, CEN, Brussels, 2004.

[25] Vennesland, Ø. *Electrochemical Realkalisation and Chloride Removal.* Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão, 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[26] Salta, M., Fontinha, I.. *Métodos Adicionais de Protecção da Corrosão Utilizando Armaduras Revestidas, Aços Inoxidáveis e Inibidores de Corrosão.* Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão, 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[27] CEN/TS 14038-2. *Electrochemical Realkalization and Choride Extraction Treatments for Reinforced Concrete. Part 2: Choride Extraction.* European Commitee for Standardization, Technical Specification, CEN, Brussels.

[28] EN 12696. *Cathodic Protection of Steel in Concrete.* CEN, Brussels.

[29] Technical Department Construction. *The Repair and Protection of Reinforced Concrete with Sika.In Accordance with European Standard EN 1504.* Sika.

[30] NP 1504-7. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, controle de qualidade e avaliação da conformidade. Parte 7: Protecção Contra a Corrosão das Armaduras*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2008.

[31] Thomaz, R.. *Reparação de Estruturas de Betão Armado com Corrosão.* Seminário sobre Inspecção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão. 2000, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[32] Emmons, P.H.. *Concrete Repair and Maintenance. Problem Analysis. Repair Strategy. Techniques*. R.S. MEANS COMPANY, INC., Kingston, 1993.

[33] Bertolini, L.. *Corrision of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair*. WILEY-VCH., Weinheim, 2005.

[34] Morgan, D.R.. *Compatibility of Concrete Repair Materials and Systems*. Elsevier, Canada, 1995.

[35] Ribeiro, M.. *Processos Tradicionais de Reparação da Corrosão em Estruturas de Betão Armado.* Seminário sobre Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, 1997, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[36] Rodrigues, M.. *Produtos de Pintura para Protecção Superficial do Betão. Metodologias de Avaliação e Selecção.* Seminário sobre Materiais em Ambiente Marítmo, 2007, Funchal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

[37] EN ISSO 7783. *Paints and Varnishes. Determination of Water-vapour Transmission Rate*. CEN, Brussels, 1996.

[38] NP 1062-3. *Tintas e Vernizes. Produtos de Pintura e Esquemas de Pintura a Aplicar em Alvenaria e Betão Exteriores. Parte 3: Determinação e Classificação da Velocidade de Transmissão da Água Líquida*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2001.

[39] EN 1542. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Mesurement of Bond Strength by Pull-off.* CEN, Brussels, 1999.

[40] EN 15183. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Corrision Protection Test.* CEN, Brussels, 2006.

[41] EN 12614. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Glass Transition Temperatures of Polymers.* CEN, Brussels, 2004.

[42] EN 15184. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Shear Adhesion of Coated Steel to Concrete (Pull-out Test).* CEN, Brussels, 2006.

[43] EN 12190. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Compressive Strength of Repair Mortar*. CEN, Brussels, 1999.

[44] EN 1015-17. *Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 17: Determination of Water-soluble Choride Content of Fresh Mortars*. CEN, Brussels, 2000.

[45] EN 12617-4. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Part 4: Determination of Shrinkage and Expansion.* CEN, Brussels, 2002.

[46] EN 13295. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination to Resistance of Carbonation.* CEN, Brussels, 2004.

[47] EN 13412. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Modulus os Elasticity in Compression.* CEN, Brussels, 2002.

[48] EN 13687-2. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Thermal Compatibility. Part 2: Thunder-shower Cycling (Thermal Shock).* CEN, Brussels, 2002.

[49] EN 13687-4. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Thermal Compatibility. Part 4: Dry Thermal Cycling*. CEN, Brussels, 2002.

[50] EN 13036-4. *Road and Airfield Surface Characteristics. Test Methods. Part 4: Method for Measurement of Slip/Skid Resistance of a Surface. The Pendulum Test*. CEN, Brussels, 2003.

[51] EN 1770. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of the Coefficient of Thermal Expansion.* CEN, Brussels, 1998.

[52] NP 1504-10. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, controle de qualidade e avaliação da conformidade. Parte 10: Aplicação de Produtos e Sistemas e Controlo da Qualidade da Obra*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2008.

[53] EN 13057. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Resistance of Capillary*. CEN, Brussels, 2002.

[54] EN 12617-1. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Part 1: Determination of Linear Shrinkage for Polymers and Surface Protection Systems (SPS).* CEN, Brussels, 2003.

[55] EN ISO 2409. *Paints and Varnishes. Cross-cut Test*. CEN, Brussels, 1992.

[56] EN 1062-6. *Paints and Varnishes. Coating Materials and Coating Systems for Exterior Masonry and Concrete. Part 6: Determination of Carbon Dioxide Permeability*. CEN, Brussels, 2002.

[57] EN ISO 7783-1. *Paints and Varnishes. Determination of Water-vapour Transmission Rate. Part 1: Dish Method for Free Films*. CEN, Brussels, 1996.

[58] EN ISO 7783-2. *Paints and Varnishes. Coating Systems for Exterior Masonry and Concrete. Part 2: Determination and Classification of Water-vapour Transmission Rate (Permeability).* CEN, Brussels, 1999.

[59] EN 1062-11. *Paints and Varnishes. Coating Materials and Coating Systems for Exterior Masonry and Concrete. Part 11: Methods of Conditioning Before Testing.* CEN, Brussels.

[60] EN 13687-5. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Thermal Compatibility. Part 4: Resistance to Temperature Shock.*. CEN, Brussels.

[61] EN 1062-7. *Paints and Varnishes. Coating Materials and Coating Systems for Exterior Masonry and Concrete. Part 7: Determination of Crack Bridging Properties*. CEN, Brussels, 2004.

[62] EN 13501-1. *Fire Classification of Construction Products and Building Elements. Part 1: Classification Using Test Data From Reaction to Fire Tests*. CEN, Brussels, 2002.

[63] EN 13579. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Drying Test for Hydrophobic Impregnation.* CEN, Brussels, 2002.

[64] EN ISO 4628-2. *Paints and Varnishes. Evaluation of Degradation of Coatings. Designation of Quantity and Size of Defects, and Intensity of Uniform Changes in Appearance. Part 2: Assessment of Degree of Blistering*. CEN, Brussels, 2003.

[65] EN ISO 4628-4. *Paints and Varnishes. Evaluation of Degradation of Coatings. Designation of Quantity and Size of Defects, and Intensity of Uniform Changes in Appearance. Part 4: Assessment of Degree of Cracking*. CEN, Brussels, 2003.

[66] EN ISO 4628-5. *Paints and Varnishes. Evaluation of Degradation of Coatings. Designation of Quantity and Size of Defects, and Intensity of Uniform Changes in Appearance. Part 5: Assessment of Degree of Flaking*. CEN, Brussels, 2003.

[67] EN 1766. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Reference Concretes for Testing.* CEN, Brussels, 2000.

[68] EN 13580. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Water Absorption and Resistance to Alkali for Hydrophobic Impregnation.* CEN, Brussels, 2002.

[69] EN ISO 178. *Plastics. Determination of Flexural Properties*. CEN, Brussels, 2001.

[70] EN 12615. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Slant Shear Strengh.* CEN, Brussels, 2004.

[71] EN 12189. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Open Time.* CEN, Brussels, 2008.

[72] EN ISO 9514. *Paints and Varnishes. Determination of the Pot Life of Multicomponent Coating Systems. Preparation and Conditioning os Samples and Guidelines for Testing.* CEN, Brussels, 2005.

[73] EN 12617-3. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Part 3: Determination of Early Age Linear Shrinkage for Structural Bonding Agents.* CEN, Brussels.

[74] EN 1799. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Test to Measure the Suitability of Structural Bonding Agents for Application to Concrete Surface.* CEN, Brussels.

[75] EN 12636. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Adhesion Concrete to Concrete.* CEN, Brussels.

[76] EN 13733. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of the Durability of Structural Bonding Agents.* CEN, Brussels.

[77] NP 1504-4. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 2: Colagem estrutural*. Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[78] Saint-Gobain Weber. *O Guia Weber 2010.* Saint-Gobain Weber Portugal, SA, Aveiro, 2010.

[79] BASF. *European Standard EN 1504. A Simplified, Illustrated Guide for all Involved in Concrete Repair.* BASF Construction Chemicals, United Kingdom.

[80] MAPEI: http://www.mapei.pt/. Acedido em Maio de 2010.

[81] Technical Department Construction. *Reparação e Protecção de Betão Segundo os Princípios da EN 1504.* Sika Portugal.

[82] NP 1504-1. *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controle de Qualidade e Avaliação da Conformidade. Parte 1: Definições.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2006.

[83] EN 197-1. *Cement. Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cement.* CEN, Brussels, 2000.

[84] EN 413-1. *Masonry Cement. Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria.* CEN, Brussels, 2004.

[85] EN 459-1. *Building Lime. Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria.* CEN, Brussels, 2001.

[86] NP 1008. *Água de Amassadura para Betão. Especificações para a Amostragem, Ensaio e Avaliação da Aptidão da Água, Incluindo Água Recuperada nos Processos da Indústria de Betão, para o Fabrico de Betão.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2003.

[87] NP 13670-1. *Execução de Estruturas em Betão. Parte 1: Regras gerais.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2007.

[88] NP 13670. *Execução de Estruturas em Betão.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2007.

[89] EN ISO 3274. *Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture: Profile Method. Nominal Characteristics of Contact (Stylus) Instruments.* CEN, Brussels, 1996.

[90] EN ISO 4288. *Geometrical Product Specifications (GPS). Surface Texture: Profile Method. Rules and Procedures of the Assessment of Surface Texture.* CEN, Brussels, 1996.

[91] prEN 14630. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Carbonation Depth in Hardened Concrete by the Phenolphthalein Method.* CEN, Brussels, 2003.

[92] ISO 4677. *Atmospheres for Conditioning and Testing. Determination of Relative Humidity. Part 1: Aspirated Psychrometer Method.* CEN, Brussels, 1985.

[93] EN ISO 2808. *Paint and Varnishes. Determination of Film Thickness*. CEN, Brussels, 1997.

[94] EN 13395. *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods. Determination of Workability. Part 1: Test for Flow Thixotropic Mortars.* CEN, Brussels, 2002.

[95] NP 12504-1. *Ensaios do Betão nas Estruturas. Parte 1: Carotes. Extracção, Exame e Ensaio à Compressão.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2003.

[96] NP 12504-2. *Ensaios do Betão nas Estruturas. Parte 1: Ensaio não Destrutivo. Determinação do Índice Esclerométrico.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2003.

[97] EN ISO 4628-1. *Tintas e vernizes. Avaliação da Degradação de Revestimentos. Designação da Quantidade e Dimensão de Defeitos e da Intensidade das Alterações Uniformes de Aspecto. Parte 1: Introdução Geral e Sistema de Designação.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2005.

[98] EN 12390-8. *Testing Hardened Concrete. Part 8: Depth of Penetration of Water Under Pressure.* CEN, Brussels, 2000.

[99] ISO 7031. *Concrete Hardened. Determination of Permeability.* CEN, Brussels.

[100] EN ISO 2409-6. *Method for Tests for Paints. Part 6: Cross Cut Test.* CEN, Brussels.

[101] EN ISO 4624. *Paint and Varnishes. Pull-off Test*. CEN, Brussels, 1978.

[102] ISO 8047. *Concrete Hardened. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity Testing*. CEN, Brussels.

[103] NP 12504-4. *Ensaios do Betão nas Estruturas. Parte 4: Determinação da Velocidade de Propagação dos Ultra-sons.* Instituto Português da Qualidade, Portugal, 2007.

[104] EN ISO 8501-1. *Preparation of Steel Substrates Before Application of Paints or Related Products. Visual Assessment of Surface Cleanliness. Part 1: Rust Grades and Preparation Grades of Uncoated steel Substrates and of Steel Substrate After Overall Removal of Previous Coatings.* CEN, Brussels, 2001.

# A
# ANEXOS

## A.1. FACTORES A TER EM CONTA NA ESTRATÉGIA DE GESTÃO

As opções a considerar na estratégia de gestão do elemento em estudo dependem ainda de determinados factores: factores de base, factores estruturais, factores ligados à saúde e segurança e factores ambientais (Fig. A. 1).

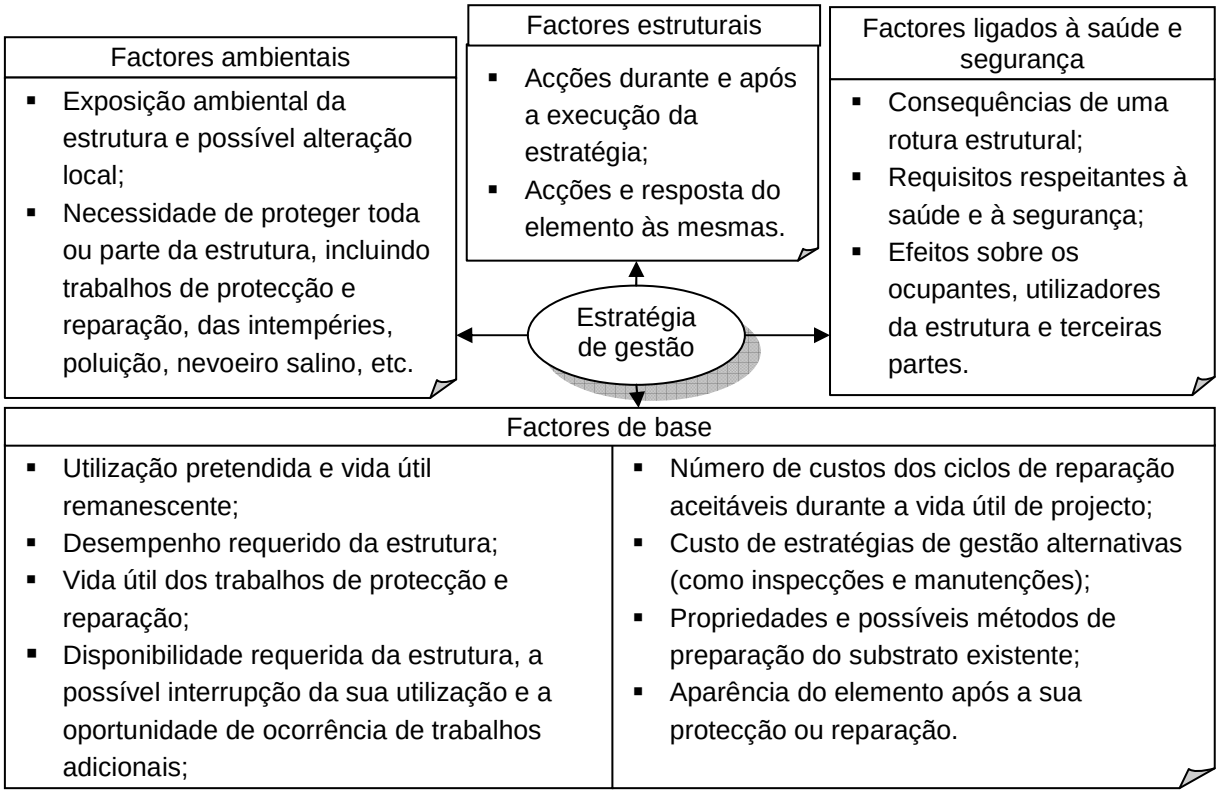



Fig. A. 1. – Factores a considerar na escolha da estratégia de gestão [5].

Em casos específicos em que a deterioração surja de forma prematura é aconselhável a escolha ponderada entre duas das possíveis opções: proteger e reparar na óptica de prolongar a vida útil do elemento até atingir a vida útil de projecto ou proteger e reparar tendo como horizonte um período mais diminuto, a que estão associados custos suplementares subsequentes.

De acordo com a sensibilidade que o tipo de utilizações dos edifícios detêm face aos trabalhos de reparação e protecção, assim há que adequar a estratégia de gestão a implementar. Edifícios como hospitais, escolas, escritórios, etc. poderão ser especialmente sensíveis a questões como o ruído e a poeiras provenientes da execução dos trabalhos.

A nível estrutural há que focar especial atenção em situações em que a reparação do elemento obriga a uma redistribuição de esforços, sobretudo em elementos sujeitos à compressão. Nestes casos não só há que redobrar os cuidados nas quantidades de betão e armadura removidas, como na garantia da execução do escoramento ideal da estrutura e do desempenho posterior da solução escolhida para a reparação do suporte de acordo com as cargas actuantes.

Em termos de saúde e segurança, qualquer que seja a estratégia de gestão escolhida, ter-se-á sempre que ter em conta as consequências advindas do uso de determinados sistemas e processo de reparação e protecção, não só para os utentes e terceiras partes mas também para os trabalhadores. Produtos contendo componentes nocivos ou malcheirosos, geração de ruídos, de poeiras e de vibrações, água ou detritos em suspensão no ar resultantes de processos de reparação, ou movimentos da instalação são exemplos referidos na NP 1504.

## A.2. PRINCÍPIOS E MÉTODOS PARA A PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO

Quadro A. 1. – Princípios e métodos apresentados pela NP 1504-9[5].

| Princípio | Exemplos de métodos baseados nos princípios | Parte relevante da EN 1504 (se aplicável) |
|---|---|---|
| *Princípios e métodos relacionados com defeitos no betão* | | |
| 1. Protecção contra o ingresso ***(PI)*** | 1.1 Impregnação hidrofóbica | 2 |
| | 1.2 Impregnação | 2 |
| | 1.3 Revestimento | 2 |
| | 1.4 Ligação superficial de fendas | (não aplicável) |
| | 1.5 Enchimento de fendas | 5 |
| | 1.6 Transformação de fendas em juntas | (não aplicável) |
| | 1.7 Erecção de painéis externos [a)] | (não aplicável) |
| | 1.8 Aplicação de membranas [a)] | (não aplicável) |
| 2. Controlo da humidade ***(MC)*** | 2.1 Impregnação hidrofóbica | 2 |
| | 2.2 Impregnação | 2 |
| | 2.3 Revestimento | 2 |
| | 2.4 Erecção de painéis externos | (não aplicável) |
| | 2.5 Tratamento electroquímico | (não aplicável) |
| 3. Restauração do betão ***(CR)*** | 3.1 Argamassa aplicada à mão | 3 |
| | 3.2 Novo betão ou argamassa cofrado | 3 |
| | 3.3 Betão ou argamassa projectado | 3 |
| | 3.4 Substituição de elementos | (não aplicável) |
| 4. Reforço estrutural ***(SS)*** | 4.1 Adição ou substituição de armaduras externas ou embebidas | (não aplicável) |
| | 4.2 Adição de armaduras ancoradas em furos abertos ou a abrir | 6 |
| | 4.3 Reforço com placas coladas | 4 |
| | 4.4 Adição de argamassa ou betão | 3, 4 |
| | 4.5 Injecção de fendas, vazios ou interstícios | 5 |
| | 4.6 Enchimento de fendas, vazios ou interstícios | 5 |
| | 4.7 Pré-esforço – (pós-tensionamento) | (não aplicável) |

*(Continuação do Quadro A.1.)*

| Princípio | Exemplos de métodos baseados nos princípios | Parte relevante da EN 1504 (se aplicável) |
|---|---|---|
| *Princípios e métodos relacionados com defeitos no betão (continuação)* | | |
| 5. Aumento da resistência física ***(PR)*** | 5.1 Impregnação hidrofóbica | 2 |
| | 5.2 Impregnação | 2 |
| | 5.3 Adição de argamassa ou betão | 3 |
| 6. Resistência aos químicos ***(RC)*** | 6.1 Impregnação hidrofóbica | 2 |
| | 6.2 Impregnação | 2 |
| | 6.3 Adição de argamassa ou betão | 2 |
| *Princípios e métodos relacionados com a corrosão das armaduras* | | |
| 7. Preservação ou restauração da passividade ***(RP)*** | 7.1 Aumento do recobrimento com novo betão ou argamassa | 3 |
| | 7.2 Substituição do betão carbonatado | 3 |
| | 7.3 Realcalinização electroquímica do betão | (não aplicável) |
| | 7.4 Realcalinização do betão carbonatado | (não aplicável) |
| | 7.5 Extracção electroquímica do betão | (não aplicável) |
| 8. Aumento da resistividade ***(RI)*** | 8.1 Impregnação hidrofóbica | 2 |
| | 8.2 Impregnação | 2 |
| | 8.3 Adição de argamassa ou betão | 2 |
| 9. Controlo catódico ***(CC)*** | 9.1 Limitação do teor de oxigénio (no cátodo) por saturação ou revestimento | (não aplicável) |
| 10. Protecção catódica ***(CP)*** | 10.1 Aplicação de potencial eléctrico | (não aplicável) |
| 11.Controlo das áreas anódicas ***(CA)*** | 11.1 Revestimento activo da armadura | 7 |
| | 11.2 Revestimento barreira da armadura | 7 |
| | 11.1 Aplicação de inibidores de corrosão no betão | (não aplicável) |

No seguimento do quadro anterior surge a Fig. A. 2. onde estão apresentadas as categorias de produtos e sistemas referidos pela NP 1504, bem como os seus objectivos.

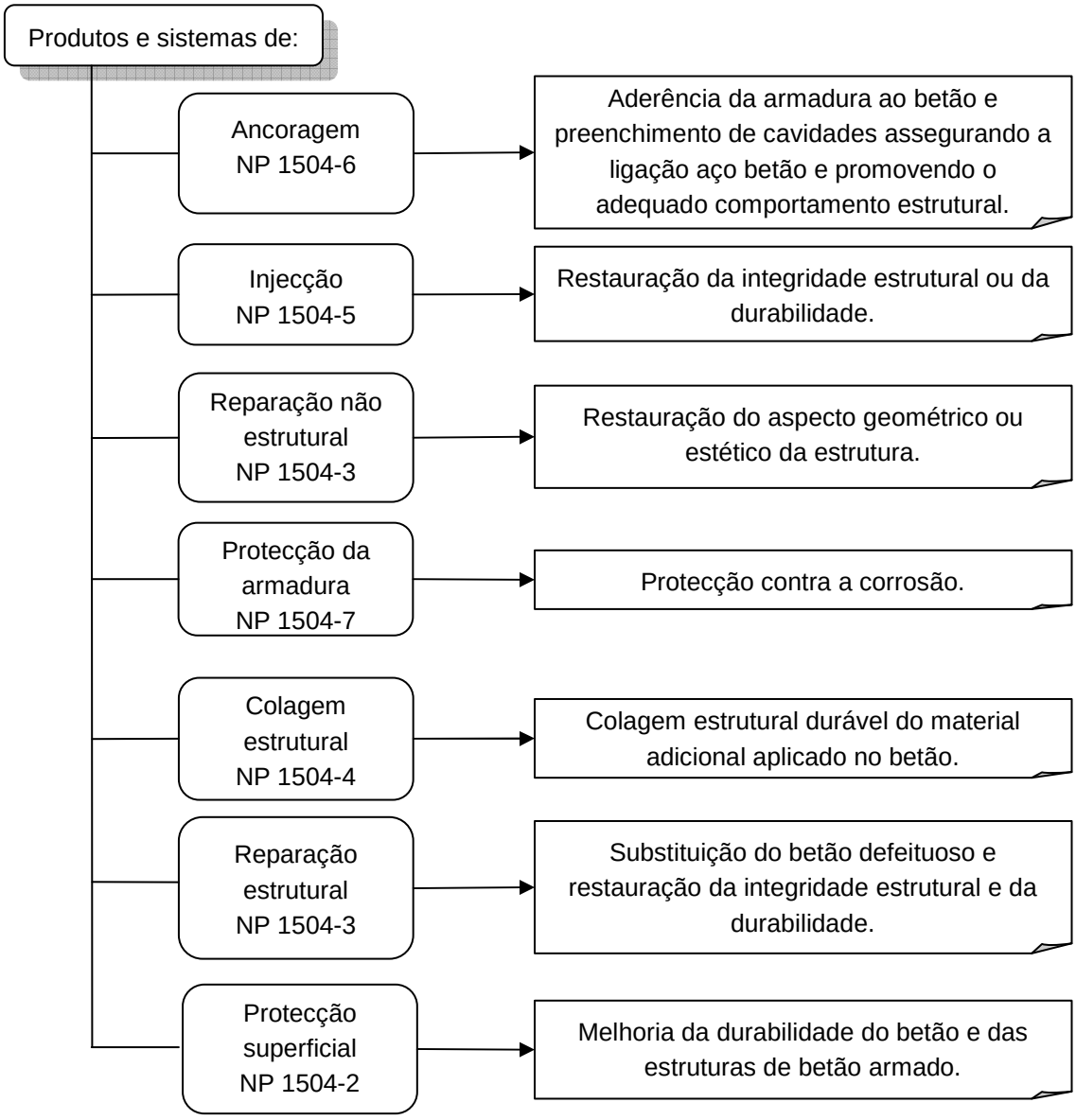



Fig. A. 2.– Categorias de produtos e sistemas de protecção e reparação [82].

Existem ainda, associados aos produtos e sistemas apresentados, os principais tipos químicos existentes. A Fig. A. 3. representa os tipos referidos, bem como a sua definição, de acordo com a NP 1504.

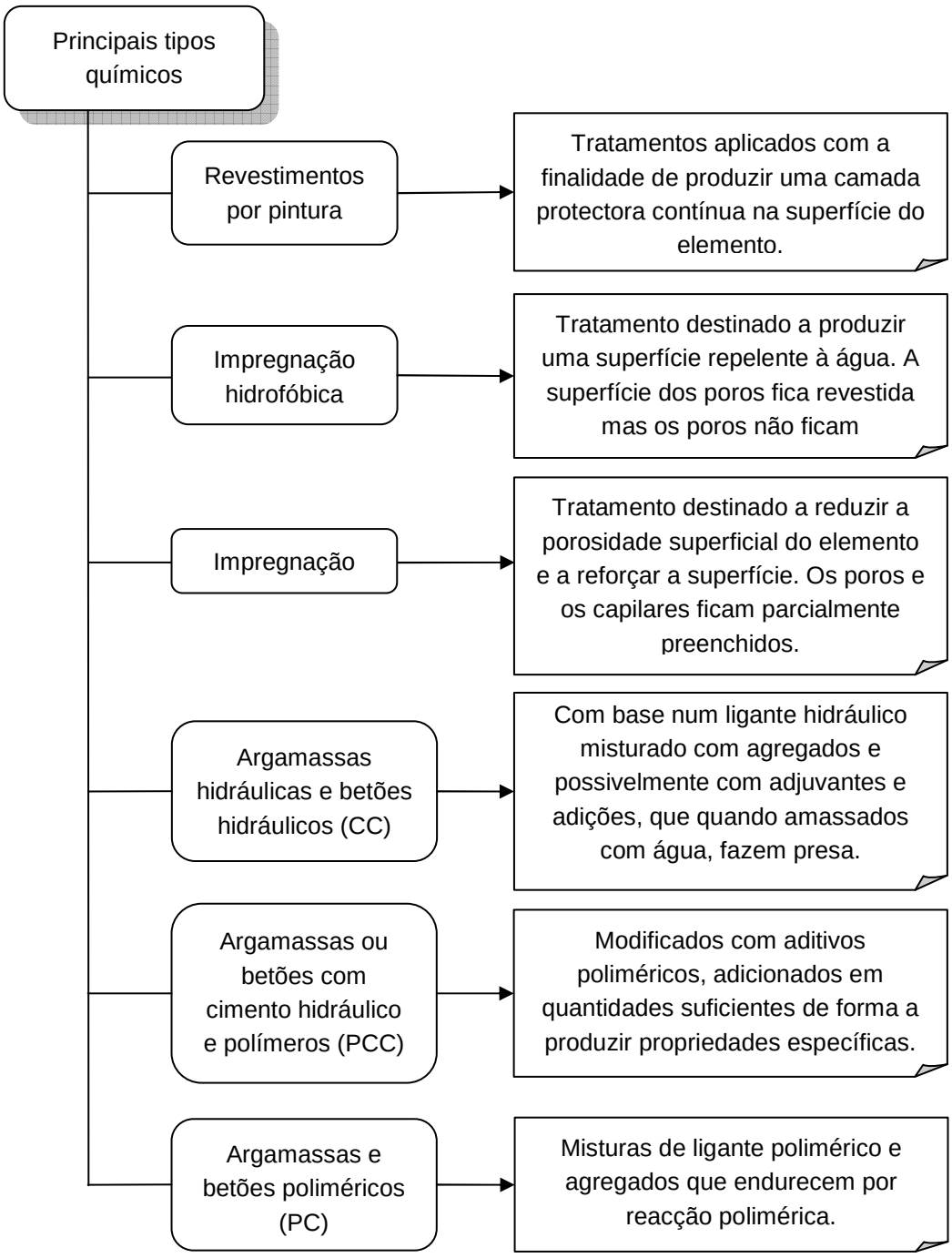



Fig. A. 3. – Tipos químicos dos produtos e sistemas de protecção e reparação [82].

Os produtos e sistemas podem ainda ser compostos por constituintes que lhe conferem determinadas propriedades. Esses constituintes, de forma geral, são:

- Adições: podem ser quase inertes (tipo I) ou pozolânicas ou hidráulicas latentes (tipo II). Podem ser adicionadas aos produtos melhorando certas propriedades ou para obter propriedades especiais;
- Aditivos para ligantes hidráulicos: são adicionados aos ligantes hidráulicos para lhes dar propriedades específicas. Não são nem adições nem adjuvantes;
- Aditivos para reacções poliméricas: não são nem adições nem adjuvantes e dão propriedades específicas aos produtos. Exemplos destes são: plastificantes, aceleradores, pigmentos, etc.;
- Adjuvantes: material adicionado durante a amassadura do betão em quantidade igual ou inferior a 5% da massa de cimento para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido;
- Ligantes hidráulicos (H): Material inorgânico que reage com a água por uma reacção de hidratação que produz um material sólido. São geralmente cimentos, cais de construção ou em combinação com outros cimentos, de acordo com a EN 197-1[83], a EN 413-1[84] e a EN 459-1[85];
- Ligantes poliméricos reactivos: ligantes em geral de dois componentes, uma base reactiva e um endurecedor ou catalizador, e que endurece à temperatura ambiente. São exemplos: Epoxídicos, poliésteres não saturados, acrílicos reticuláveis, etc. [82].

## A.3. PREPARAÇÃO DOS SUBSTRATOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE A POSTERIOR APLICAÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARAÇÃO

### A.3.1. Preparação das armaduras

Antes da aplicação do revestimento activo das armaduras ter-se-á que proceder à preparação da sua superfície. A preparação das armaduras a tratar passará então pela limpeza das mesmas, satisfazendo os seguintes requisitos impostos pela NP 1504-10[52]:

- A ferrugem, a argamassa, o betão, a poeira e qualquer outro material não ligado que comprometa a colagem e contribua para a corrosão das armaduras deverão ser removidos. O betão delaminado e fendilhado deverá ser removido de maneira a expor à superfície todas as armaduras corridas no seu interior;
- As superfícies expostas da armadura deverão ser sempre uniformemente limpas, exceptuando-se os casos em que considerações estruturais não o permitam;
- Os substratos limpos deverão ser protegidos contra possíveis contaminações, exceptuando-se as situações em que a aplicação dos produtos é realizada imediatamente depois da limpeza;
- A limpeza deve ser realizada de forma a não causar danos nas próprias armaduras ou contaminar o betão ou o ambiente adjacente;
- O padrão de limpeza a utilizar deverá ser o adequado ao revestimento a aplicar. Neste caso será uma norma de limpeza Sa2 “decapagem/limpeza profunda”;
- É recomendada a limpeza em toda a periferia da armadura, estendendo-se a 50 mm ao longo da armadura, para além da zona com corrosão;
- No caso de existirem zonas onde a limpeza é dificultada ou mesmo impedida pelo agrupamento de armaduras ou por outros factores, é possível adoptar outras normas Sa de limpeza definidas pela ISO 8501-1[104] [52].

Poderão existir casos em que seja necessário a utilização de escovas de cerdas de aço, aplicando-se vigorosas escovagens na superfície dos varões, seguindo-se a aspiração das partículas libertadas. Esta escovagem deverá ser repetitiva, tentando eliminar ao máximo a ferrugem e outros materiais existentes nas armaduras, ficando sempre limitada à rigidez dos arames da própria escova (Fig. A. 4.) [31].

Fig. A. 4. – Limpeza com escova de aço [31].

A limpeza a realizar por detrás dos varões da armadura, um local normalmente de difícil acesso, pode ser realizada através da utilização de jactos de areia, aplicados de tal forma que o operador tire o maior partido do ricochete do jacto, como é possível verificar na Fig. A. 5..

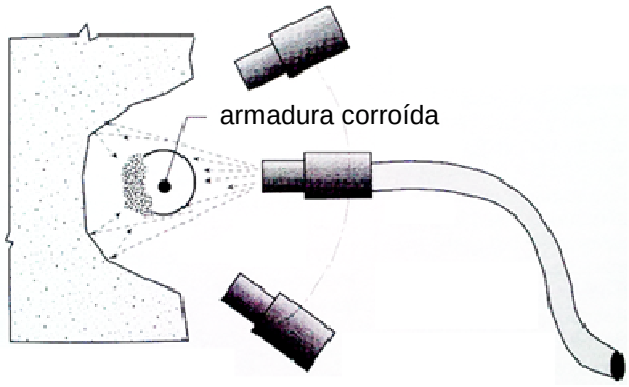



Fig. A. 5. – Limpeza por detrás dos varões [31].

### A.3.2. Preparação do substrato de betão

A preparação deste substrato envolve três processos diferentes: a limpeza, o desbaste e a remoção do betão.

A limpeza do substrato deverá então cumprir os seguintes requisitos:

- Todo o pó, o material desligado (Fig. A. 6.), as superfícies contaminadas, os materiais que reduzam a colagem ou evitam a sucção ou a molhagem pelos materiais de reparação devem ser removidos;
- Os métodos utilizados para a limpeza poderão ser mecânicos por percussão e abrasão, decapagem por jacto de ar e de areia (Fig. A. 7.), decapagem por jacto de água com baixa pressão sem remoção do betão (até 18MPa) e onde necessários pequenos volumes de água (até 60 MPa);
- Os contaminantes podem ser removidos através de métodos que envolvam o uso de solventes ou limpeza a vapor;
- Arames, pregos e madeira podem ser considerados contaminantes embebidos cuja remoção é importante;
- Membranas, resíduos de asfalto, marcações coloridas e leitanças são exemplos de materiais a remover com jactos de água a alta pressão, limpando e removendo superficialmente o betão até 2 mm de profundidade;
- O jacto de água, bem como a água corrente e o ar comprimido podem ser utilizados para a limpeza de juntas e fissuras existentes. No caso da utilização de ar comprimido, dever-se-á garantir que o ar está limpo não contaminando a superfície com óleo;
- Após a limpeza o substrato deverá ser protegido de possíveis contaminações, exceptuando-se a situação em que a aplicação dos produtos e sistemas seja executada imediatamente depois [52].

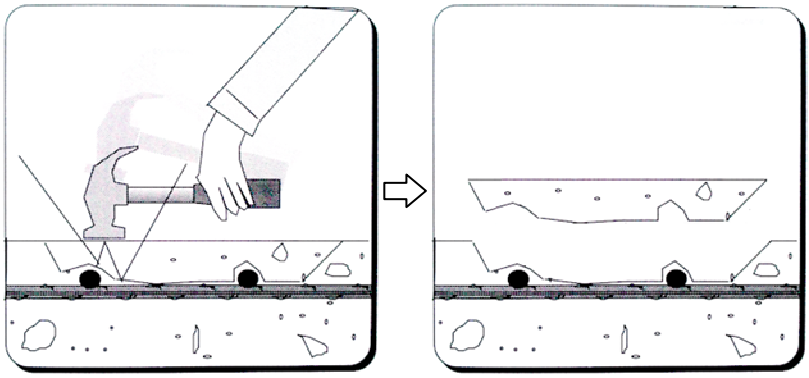


Fig. A. 6. – Detecção por percussão e remoção de material desligado [32].

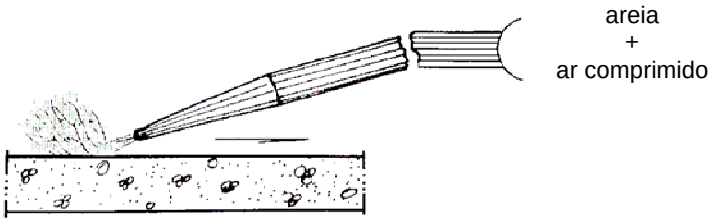



Fig. A. 7. – Limpeza a jacto de areia e ar comprimido [31].

O desbaste deverá promover uma superfície desbastada adequada aos produtos e sistemas a aplicar, removendo o betão até uma profundidade de 15 mm, dando uma textura adequada à ligação com a nova camada de argamassa a aplicar à mão. O desbaste pode ser realizado por percussão e abrasão mecânicas, decapagem por jacto de ar e de areia e decapagem por jacto de água, com alta pressão (aproximadamente 60 MPa).

Posteriormente segue-se a remoção do betão, cuja extensão deverá ser sempre especificada, respeitando os seguintes requisitos:

- A remoção poderá ser realizada por percussão mecânica e decapagem por jacto de água com alta pressão (até 60 MPa) e/ou muito alta pressão (até 120MPa) como é possível verificar na Fig. A. 8.;
- A remoção deverá ser sempre a mínima possível, não comprometendo a integridade estrutural do elemento. No caso de ser necessário poder-se-á colocar suportes temporários;
- As profundidades de carbonatação devem ser estabelecidas anteriormente para que seja possível adequar a remoção do betão às mesmas;
- Questões como: a resistência do betão à penetração de gases e fluidos, a natureza e concentração da contaminação antes e após a reparação, a profundidade de contaminação a actividade de corrosão das armaduras, a necessidade do tratamento das armaduras e a necessidade de ter recobrimento não contaminado na zona das armaduras, serão questões relevantes a ter em conta na realização da remoção do betão;
- Deverão ser removidos, sempre que possível, todos os fragmentos de arames, pregos ou restos de outros metais embebidos no betão;

- Após a remoção e com o intuito de reduzir o transbordo sobre a superfície do elemento, os bordos do betão deverão ser cortados num ângulo mínimo de 90º e um ângulo máximo de 135º (Fig. A. 9.). Estes bordos terão que ser rugosos o suficiente para fornecer a boa ligação entre o elemento a reparar e o produto de reparação;
- O betão contaminado deverá ser removido a toda à volta das armaduras num mínimo de 15 mm ou a máxima dimensão do inerte mais 5mm. A distância entre o substrato remanescente e a armadura também deverá tomar os valores anteriormente referidos;
- Como consequência dos métodos de remoção realizados é possível que acorram microfissuras em zonas onde o betão não foi removido. Esta fissuração é detectada através da molhagem da superfície e da posterior secagem, sendo visível a olho nu pela absorção de água pelas fissuras. Nestas circunstâncias a microfissuração deverá ser removida com água sob pressão com ou sem abrasivo (Fig. A. 10.) ou deverá ser tratada de modo a restaurar a sua integridade [52].

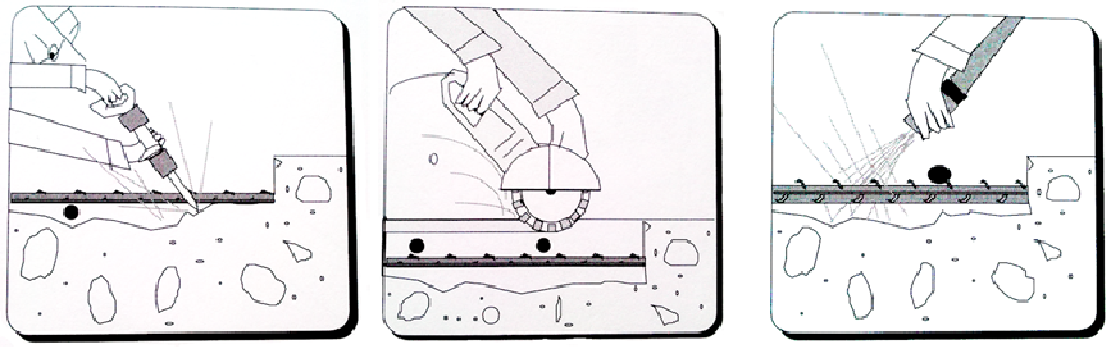


Fig. A. 8. – Remoção do betão por percussão mecânica, por disco para realizar o desbaste do contorno da área a reparar e por jacto com água [32].

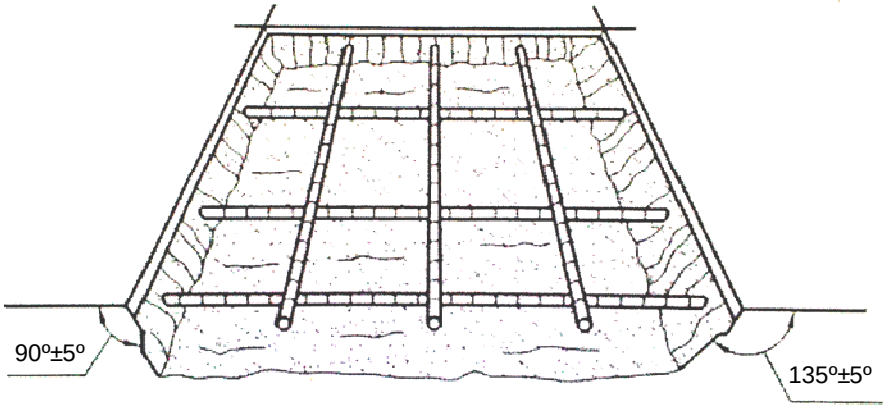



Fig. A. 9. – Remoção do betão [52].

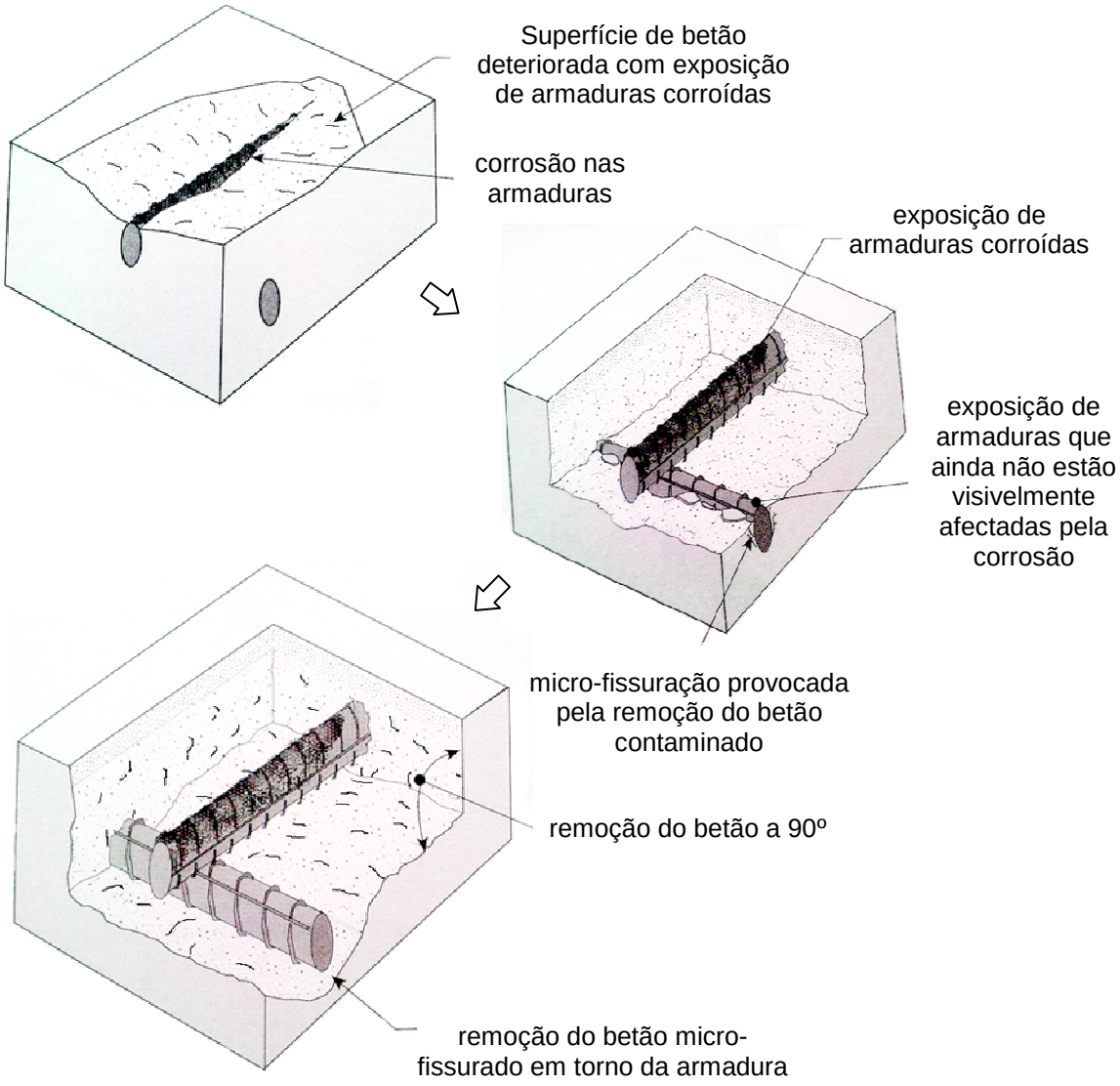



Fig. A. 10. – Remoção da camada micro-fissurada [32].

### A.3.3. Preparação do substrato para a aplicação do revestimento de protecção superficial e inibidores de corrosão

A preparação deste substrato resume-se à sua limpeza. Eliminando o pó, materiais desligados, materiais que reduzam a colagem ou evitem a sucção ou molhagem pelos materiais de reparação e que também os possam contaminar. No caso de não se proceder de imediato à aplicação do revestimento após a limpeza, o substrato deverá ser protegido contra contaminações.

### A.3.4. Considerações para a aplicação de revestimento activo da armadura

A aplicação do revestimento activo das armaduras deverá cumprir as seguintes considerações:

- O armazenamento dos produtos a aplicar deverá ser realizado de forma a não comprometer e alterar as propriedades dos mesmos;
- Os acessos ao trabalho devem ser adequados para que a preparação e a aplicação dos produtos e sistemas de reparação possam ser realizadas de acordo com os seus requisitos;
- A superfície limpa e exposta da armadura deverá ser totalmente e uniformemente revestida;
- Caso o revestimento prejudique a ligação entre o betão existente e os produtos e sistemas de reparação não deverá contaminar a sua superfície.

### A.3.5. Considerações para a argamassa aplicada à mão

Serão consideradas as seguintes fases: a colagem do produto de reparação ao substrato, a própria aplicação do produto e por último a sua cura

Caso existam, devem ser sempre definidos os requisitos para a colagem da argamassa, satisfazendo a NP 1504-4[80]. Os requisitos definidos na EN 206-1[22] e EN 1008[86] para a água de amassadura deverão ser adoptados para a água utilizada na molhagem do substrato.

Para a própria aplicação da argamassa de reparação dever-se-á ter em conta o seguinte:

- Quando não é previsto nenhum tipo de primário de colagem, antes da aplicação da argamassa o substrato de betão deve ser bem humedecido, não contendo água à superfície no momento aplicação. Nesta circunstância a superfície deverá apresentar uma aparência mate escuro e sem brilho;
- A resistência requerida à argamassa e a protecção das armaduras devem ser alcançadas pelo trabalhar da argamassa no substrato, compactando-a sem introdução de bolsas de ar;
- É necessário definir o número de camadas a realizar (Fig. A. 11.), bem como a sua espessura, o tempo entre a aplicação das mesmas e a adequação das propriedades do substrato às propriedades dos produtos de reparação, sejam eles argamassas cimentícias ou poliméricas. Poderá ser ainda necessário dar à superfície da cada camada de reparação alguma textura rugosa para melhorar a ligação à camada seguinte antes do inicio da sua presa [50].

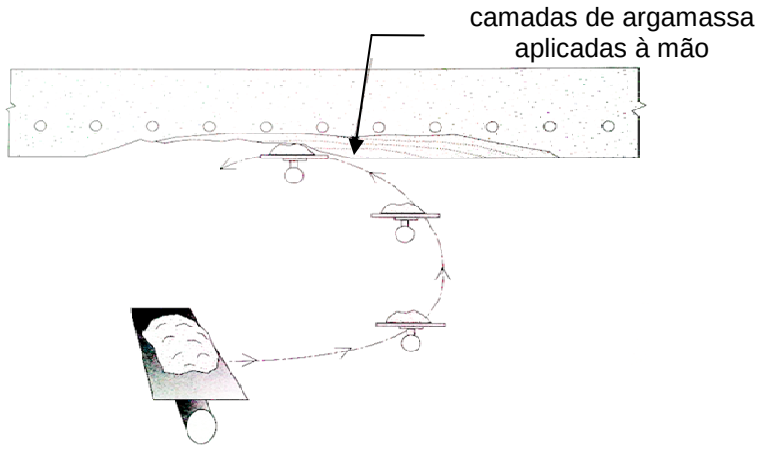



Fig. A. 11. – Argamassa aplicada à mão em camadas [32].

Relativamente à cura das camadas de argamassa de reparação dever-se-á respeitar as seguintes condições:

- Quando for prevista a realização de uma cura húmida, os métodos e o próprio período deverão ser definidos de acordo com os produtos a utilizar e as respectivas espessuras, bem como o ambiente em causa;
- Sempre que se preveja a incompatibilidade entre compostos de cura e o produto utilizado para a realização da camada seguinte, os primeiros não deverão ser utilizados;
- No caso de serem aplicados produtos cimentícios a sua cura deverá respeitar a ENV 13670-1[87];
- Dever-se-á minimizar tanto quanto possível a ocorrência de retracção plástica e retracção térmica. No caso da cura de argamassas hidráulicas é eficaz a manutenção de um excesso de água à superfície. Quando as argamassas utilizadas contêm polímeros o processo de cura requer um equilíbrio entre a necessidade de reter água para a cura do cimento e a necessidade de reduzir humidade para permitir a que o polímero forme o filme com a finalidade de aumentar a resistência. É ainda importante garantir que o gradiente de temperatura no elemento seja o mais baixo possível durante todo o processo de hidratação, de modo a evitar a fendilhação de origem térmica [52].

### A.3.6. Considerações para a aplicação do revestimento de protecção superficial

Requisitos a considerar para a aplicação do revestimento:

- O armazenamento dos produtos a aplicar deverá ser realizado de forma a não comprometer e alterar as propriedades dos mesmos;
- Os acessos ao trabalho devem ser adequados para que a preparação e a aplicação dos produtos e sistemas de reparação possam ser realizadas de acordo com os seus requisitos;
- No caso de ser prevista a aplicação de revestimentos para promover o alisamento do substrato, estes deverão ser aplicados e curados antes da aplicação do revestimento em si;
- A aplicação deverá respeitar as espessuras compreendidas entre o máximo e o mínimo especificado;
- Dever-se-á igualmente especificar quais os teores de humidade do substrato, as temperaturas máximas e mínimas e humidade ambientes adequadas à aplicação do revestimento [52].

### A.3.7. Considerações para a aplicação do inibidor de corrosão no betão

Para evitar a passagem de agentes nocivos para o interior do elemento, a aplicação do inibidor de corrosão deverá estender-se a todo o elemento, garantindo também o preenchimento de possíveis fissuras existentes.

### A.3.8. Considerações para a aplicação da impregnação hidrofóbica

Os requisitos a considerar agora na aplicação desta impregnação estão relacionados com o armazenamento dos produtos em si e com o instante da sua aplicação, e são os seguintes:

- O armazenamento dos produtos a aplicar deverá ser realizado de forma a não comprometer e alterar as propriedades dos mesmos;

- Os acessos ao trabalho devem ser adequados para que a preparação e a aplicação dos produtos e sistemas de reparação possam ser realizadas de acordo com os seus requisitos;
- Antes da aplicação da impregnação a superfície do elemento deverá estar lisa. No caso de ser prevista a aplicação de revestimentos para promover este alisamento, estes deverão ser aplicados e curados antes da aplicação da impregnação hidrofóbica;
- Dever-se-á aplicar a impregnação com espessuras compreendidas entre o máximo e o mínimo especificado;
- Dever-se-á igualmente especificar quais os teores de humidade do substrato, as temperaturas máximas e mínimas e humidade ambientes adequadas à aplicação da impregnação hidrofóbica;
- Esta impregnação pode ser aplicada à mão, por pulverização, sob vácuo ou através de um gel. No caso de ser aplicada por meio de um silano ou siloxano, recomenda-se a sua aplicação por duas fases, molhado sobre molhado, para melhorar a sua penetração [52].

### A.3.9. Considerações para a aplicação do produto de colagem

Considerações para a aplicação do produto de colagem:

- O armazenamento dos produtos a aplicar deverá ser realizado de forma a não comprometer e alterar as propriedades dos mesmos;
- Os acessos ao trabalho devem ser adequados para que a preparação e a aplicação dos produtos e sistemas de reparação possam ser realizadas de acordo com os seus requisitos [52].

Todos os requisitos do fabricante devem ser cumpridos dando-se especial atenção ao seguinte aspecto: os materiais de reparação devem ser aplicados dentro do período do “pot-life” do produto de colagem, caso contrário em vez de este promover a colagem entre o betão e a nova argamassa, acabará por inviabilizar a mesma [31].

### A.3.10. Considerações para a aplicação da argamassa cofrada

Considerações para a aplicação da argamassa cofrada:

- Os requisitos para a água de molhagem do substrato devem satisfazer os requisitos impostos pela EN 206-1[22] para a água de amassadura;
- A colocação da argamassa deverá ser realizada de acordo com a ENV 13670[88] bem como a cofragem a utilizar;
- Logo que seja tratado o substrato dever-se-á fixar as cofragens, protegendo as suas aberturas para evitar a sua contaminação e a do substrato;
- A cura necessária deverá ser especificada segundo a ENV 13670-1[87] sempre que sejam utilizados produtos e sistemas de reparação cimentícios;
- Associados à natureza dos produtos e sistemas de reparação, dever-se-á especificar o método e o período de qualquer cura húmida a realizar;
- A aplicação, em seguida, de um outro produto não deverá ser afectada pelos possíveis compostos de cura utilizados [52].

## A.4. ENSAIOS E OBSERVAÇÕES PARA CONTROLO DE QUALIDADE

Quadro A. 2. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para as condições do substrato antes ou depois da preparação [52].

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Delaminação | Martelo<br><br>Uma vez antes da aplicação. | - | Com a finalidade de detectar áreas delaminadas da estrutura de betão ou agregados desligados. A sondagem sobre a superfície de betão é realizada com martelo ligeiro ou equipamento de impacto ligeiro. | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Limpeza | Visual e Ensaio<br><br>Após a preparação e imediatamente antes da aplicação | - | A superfície será examinada visualmente para detectar a presença de: cimento endurecido ou poeiras; defeitos; eflorescências; pós e areia; partículas não ligadas (poeiras ou betão); matéria orgânica; contaminantes (óleos, massas consistentes ou parafina); agentes desmoldantes ou de cura ou revestimentos antigos, descolagens de argamassa.<br>A presença de pó pode ser detectada pela passagem de um pano ou aplicando uma fita adesiva no momento da sua remoção. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Superfície ondulada | Visual<br><br>Antes da aplicação. | - | A regularidade do substrato pode ser verificada com uma régua de aço. A inspecção visual procurará verificar a presença de cavidades ou picadelas na superfície do substrato que provocarão a interrupção da regularidade da espessura dum filme de ligação ou de revestimento. | | | ✓ | |
| Rugosidade | Visual<br><br>Ensaio de areia ou perfilómetro | A EN 1766[67] descreve o ensaio da área de areia, a EN ISO 3274[89] e a EN ISO 4288[90] descrevem o método do perfil superficial. | | | ✓ | ✓ | |

*(Continuação do Quadro A. 2.)*

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistência superficial à tracção do substrato | Ensaio de arranque | EN 1542 [39] | Pode ser usado num ponto da superfície previamente carotado (no caso de se pretender determinar a resistência a certa profundidade) ou pode ser realizado directamente superfície. Para garantir a sua representatividade é conveniente estabelecer à priori o número e as posições dos ensaios. | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Teor de humidade do substrato | Visual | | Avaliação do teor de humidade:<br>"seco" – a superfície de uma fractura recentemente produzida a 2 cm de profundidade pode não se tornar mais clara após a secagem;<br>"húmido" – a superfície tem um aspecto mate, húmido, sem uma película de água. Os poros do substrato não estão saturados de água, ou seja, a água aplicada á superfície deve ser absorvida deixando-a retomar o seu aspecto mate passado pouco tempo;<br>"molhado" – os poros podem estar saturados de água. A superfície poderá estar brilhante, mas sem água livre. | | | ✓ | ✓ |
| | Amostragem local e análise laboratorial | | Utilizando sondas de humidade relativa. | | | | |
| | Ensaio de resistividade | | Medindo a resistividade eléctrica utilizando o ensaio de Werner e expressando os resultados como teor de água absoluto, após ensaios em laboratório. | | | | |
| | Sonda de humidade | | Colhendo amostras e ensaiando em laboratório. | | | | |
| | | | Antes e durante a da aplicação. | | | | |

*(Continuação do Quadro A. 2.)*

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura do substrato | Termómetro<br><br>Durante a aplicação. | - | A realizar com um termómetro para medir temperaturas superficiais. No caso de ser necessário medir exactamente a temperatura do substrato, após ter sido aplicado um material adequado para assegurar o contacto térmico, dever-se-á colocar o termómetro na posição de medida no centro dum material isolante, como uma placa de poliestireno, com 0,5 $m^2$ e 70 mm de espessura. A temperatura deverá ser medida quando estiver estável (quando a variação com o tempo for inferior a 1 ºC/5 min). | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Carbonatação | Ensaio com fenolftaleína | prEN 14630: 2003-03[91] | | | | | ✓ |
| Teor de cloretos | Amostragem no local e análise química | prEN 14629: 2003-03[93]<br><br>(A verificar especialmente no caso em que a acção dos cloretos é determinante na escolha da estratégia de reabilitação.) | | | ✓ | | ✓ |
| Resistividade eléctrica | Ensaio de Wenner | - | É utilizada uma sonda com quatro pontas de medição da resistividade. A resistividade do material de reparação deverá ser medida no material aplicado ou em provetes preparados e é normalmente especificada como estando entre 50% a 200% da do substrato, obtida por métodos electroquímicos. | | ✓ | | |

1 – Aplicação de revestimento activo da armadura.

2 – Aplicação de produtos de colagem, argamassa aplicada à mão e argamassa cofrada.

3 – Aplicação de revestimento por pintura.

4 – Aplicação de impregnação hidrofóbica.

Quadro A. 3. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para a aceitação de produtos e sistemas [52].

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Identidade dos produtos aplicados | Documentação de certificação.<br><br>Antes da utilização. | | A identificação pode ser estabelecida por marcação e rotulagem de acordo com a EN 1504-8:2000-10[12] ou por um certificado. A água para a amassadura deve ser ensaiada quimicamente se não estiver disponível um documento confirmando que a água é potável. A pureza da água pode ser estabelecida pela EN 1008 [86]. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

1 – Aplicação de revestimento activo da armadura.

2 – Aplicação de produtos de colagem, argamassa aplicada à mão e argamassa cofrada.

3 – Aplicação de revestimento por pintura.

4 – Aplicação de impregnação hidrofóbica.

Quadro A. 4. – Ensaios e observações para controlo de qualidade para as condições e requisitos antes ou durante a aplicação [52].

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura ambiente | Termómetro<br><br>Durante a aplicação. | - | Medida com termómetros adoptando uma precisão de ± 1 ºC. As medições deverão ser feitas na imediata vizinhança dos trabalhos, com uma frequência tal que permita a detecção de variações de 2 ºC. O sensor não deverá estar exposto à radiação solar directa. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Humidade ambiente | Higrómetro<br><br>Durante a aplicação. | Metodologia descrita na ISO 4677-1 e -2[92]. | | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Precipitação | Visual<br><br>Diariamente. | - | A realizar visualmente ou com pluviómetro se necessário. Pode incluir chuva, neve, orvalho e nevoeiro. | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

*(Continuação do Quadro A. 4.)*

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Resistência ao vento | Anemómetro<br><br>Antes da utilização. | - | A velocidade do vento deverá ser medida com um anemómetro, de forma a que durante a aplicação, possam ser medidos valores máximos e consequentemente suspender os trabalhos caso tal seja especificado. | | | ✓ | ✓ |
| Ponto de condensação | Higrómetro e termómetro<br><br>Durante a aplicação se o produto requerer. | ISO 4677-1 e -2[92] | O ponto de condensação pode ser obtido pela medição da temperatura do ar seco e da humidade relativa do ar recorrendo-se posteriormente à ISO indicada. Para a aplicação de muitos polímeros ou outros produtos, convém que o substrato esteja seco e que seja evitada a condensação. | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Espessura húmida do revestimento | Medidor de espessura<br><br>Após a aplicação. | EN ISO 2808[93] | Medidor com pente ou com roda. O primeiro é mais indicado para medir espessuras de pinturas e vernizes e é mais fácil de adaptar a produtos de reparação. | | | ✓ | |
| Consistência da aragamassa e das caldas | Ensaio de escoamento<br>Ensaio de espalhamento<br>Ensaio no tecto | EN 13395-1, -2, -4[94]<br><br>Diariamente ou em cada amassadura. | | | ✓ | | |
| Espessura do recobrimento e do material de reparação | Carote e visual<br>Ensaio com medidor de recobrimento | EN 12504-1 [95] | A exactidão expectável em condições locais médias deverá estar dentro de ± 15 % ou 5 mm, considerando-se o maior valor para recobrimentos inferiores a 100 mm.<br>Uma vez após a reparação. | | ✓ | | |
| Resistência à compressão | Ensaio com carotes<br>Ensaio com esclerómetro<br>Ensaio de esmagamento | Os carotes deverão ser ensaiados segundo a EN 12504-1[95] e a utilização do esclerómetro deverá cumprir a EN 12504-2[96]. O ensaio de esmagamento é realizado de acordo com a EN 12190[43].<br><br>Uma vez após a reparação. | | | ✓ | | |

1 – Aplicação de revestimento activo da armadura.

2 – Aplicação de produtos de colagem, argamassa aplicada à mão e argamassa cofrada.

3 – Aplicação de revestimento por pintura.

4 – Aplicação de impregnação hidrofóbica.

Quadro A. 5. – Ensaios e observações para controlo de qualidade da condição final dos produtos e sistemas endurecidos [52].

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Delaminação | Descrito anteriormente no Quadro A. 2.. A realizar uma vez por elemento tipo para julgar a eficiência da reparação. | | | | ✓ | | |
| Resistividade eléctrica | Descrito anteriormente no Quadro A. 2.. | | | | ✓ | | |
| Espessura seca do revestimento por pintura | Corte no bordo ou medição da quantidade<br>Uma vez para julgar a eficiência. | EN ISO 2808[93] | Pode ser medida conhecendo a quantidade de produto aplicado de acordo com a ISO 2808[9]. Poder-se-á recorrer a métodos destrutivos tais como o método do perfilómetro e do entalhe e ainda pela realização de carotes (este ultimo sem normalização). | ✓ | | ✓ | |
| Pintura do revestimento | Visual<br>Uma vez para julgar a eficiência. | As interrupções, furos e defeitos no revestimento podem ser observados visualmente de acordo com a a EN ISO 4628-1 e -6:2003-04[65, 97]. | | ✓ | | ✓ | |
| Penetração da impregnação | Carote e visual<br>Medição da quantidade | EN 12504-1 [95]<br>EN ISO 2808[93] | A penetração da impregnação depende da porosidade do substrato e da capacidade de penetração do produto. Para tal é possível determinar a quantidade de produto utilizado pela determinação da espessura seca do filme por cálculo da massa do filme por unidade de área, conforme a EN ISO 2808[93]. É possível extrair também carotes e proceder à sua visualização. | | | | ✓ |

*(Continuação do Quadro A. 5.)*

| Características | Método de ensaio ou observação e equipamento | EN ou ISO | Descrição sumária | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Permeabilidade à água do revestimento | Poder-se-á realizar o ensaio de karsten é pela EN 12390-8[98] ou a extracção de carotes submetidos ao ensaio de penetração a realizar pela ISO 7031[99]. Uma vez para julgar a eficiência. | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Espessura do recobrimento do material de reparação | Descrito anteriormente no Quadro A. 4.. A realizar uma vez por tipo de elemento. | | | | ✓ | | |
| Aderência do revestimento por pintura, aderência do material de reparação | Ensaio de corte transversal<br>Ensaio de arranque | A aderência de revestimentos pode ser verificada pela EN ISO 2409-6[100] e para a aderência de materiais de reparação poder-se-á realizar o ensaio de arranque especificado na EN ISO 4624[101]. Para espessuras inferiores a 0,5 mm utiliza-se o ensaio de corte transversal sendo o ensaio de arranque utilizado para espessuras superiores. A realizar um vez por cada tipo de superfície. | | | ✓ | ✓ | |
| Resistência à compressão | Descrito anteriormente no Quadro A. 4.. A realizar uma vez por tipo de elemento. | | | | ✓ | | |
| Fendilhação por retracção na argamassa | Extensómetro mecânico ou visual Uma vez para julgar a eficiência. | Visualmente a fendilhação pode ser observada com um deflectómetro. Na presença de fendilhação muito fina poder-se-á realizar a molhagem da superfície visualizando a sua secagem. Uma vez para julgar a eficiência. | | | ✓ | | |
| Presença de vazios no material de reparação | Ensaio de ultrasons Radiografia Carote e visual | Vazios provocados pela inadequada compactação, injecção ou enchimento e as fissuras podem ser detectadas por meio de radiografias de acordo com a ISO 8047[102] ou pelo ensaio de ultrasons definido pela EN 12504-4:1998-07[103]. Como alternativa poder-se-á extrair carotes para serem examinadas visualmente. | | | ✓ | | |
| Textura e cor das superfícies acabadas | Visual | Deverá cumprir as exigências especificadas, sendo que no mínimo tanto a textura como a cor deverão ser semelhantes às originais. | | | ✓ | | |

1 – Aplicação de revestimento activo da armadura.

2 – Aplicação de produtos de colagem, argamassa aplicada à mão e argamassa cofrada.

3 – Aplicação de revestimento por pintura.

4 – Aplicação de impregnação hidrofóbica.