

Procedimentos de Reparação de Estruturas de Betão

Normas e Recomendações

Sara Martins Henriques

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientador

Professor Doutor António José da Silva Costa

Júri

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Coelho Guerreiro

Orientador: Professor Doutor António José da Silva Costa

Vogal: Professor Doutor Rui Vaz Rodrigues

Outubro de 2016

Resumo

O principal objectivo desta dissertação consiste na realização de uma síntese dos procedimentos de execução dos métodos de reparação de estruturas de betão e, posteriormente na sua aplicação a um caso prático.

Para uma reparação durável e eficaz é importante eliminar a causa da deterioração. Assim começou-se por identificar os mecanismos de deterioração das estruturas, indicando, para cada um deles, quais os possíveis métodos de reparação. Além disso, é essencial efectuar uma preparação de superfície adequada, para garantir uma boa aderência entre o material de reparação e o material existente. Portanto, foi necessário identificar os vários métodos de remoção e limpeza do betão e das armaduras. Posteriormente, apresentou-se uma breve descrição sobre cada técnica de reparação e os respectivos procedimentos de execução, relacionando-os com as normas e recomendações disponíveis.

Por fim, elaborou-se uma proposta de intervenção para a reabilitação de uma estrutura. Foi realizada uma inspecção visual e detalhada com base em ensaios realizados anteriormente, onde se concluiu que o betão estava delaminado e as armaduras corroídas, devido à acção da carbonatação e dos cloretos. Como o grau de contaminação não era elevado, concluiu-se que os processos electroquímicos não eram uma opção economicamente viável para o Dono de Obra, porque os custos da intervenção eram elevados. Portanto, optou-se por aplicar um revestimento nas zonas do betão contaminado não deteriorado, uma vez que a técnica é de custo inferior. Nas restantes zonas, procedeu-se à substituição do betão e à aplicação de uma protecção de superfície para evitar o reaparecimento da corrosão.

Palavras-chave: Reparação, betão, procedimentos, normas, deterioração

Abstract

The main objective of this dissertation is to summarize the execution procedures of the repair methods of concrete structures and posteriorly their application on a case study.

In order to achieve a durable and effective repair it is important to eliminate the cause of deterioration. Hence, the first issue addressed in this dissertation was the identification of the structures' deterioration mechanisms indicating, for each of them, which were the possible repair methods. Besides that, it is essential to make an adequate surface preparation, to ensure a good bonding between the repair material and the existing material. Therefore, it was necessary to identify the various removal and cleaning methods for concrete and reinforcements. Posteriorly, a brief description of each repair technique was presented along with the respective execution procedures, relating them with the available standards and recommendations.

Lastly, an intervention proposal for the rehabilitation of a structure was prepared. A detailed visual inspection was performed, based on previously done tests, where it was concluded that the concrete was delaminated and the reinforcements were corroded, due to carbonation and chlorides. Since the degree of contamination wasn't high, it was concluded that the electrochemical processes weren't an economical viable option for the owner, because the intervention costs were high. Therefore, a coating of the non-deteriorated contaminated concrete areas was chosen, since this technique is of lower cost. In the remaining areas, the substitution of concrete and application of a surface protection was performed, in order to avoid the recurrence of corrosion.

Key-words: Repair, concrete, procedures, standards, deterioration

Índice

Resumo	i
Abstract.....	ii
Índice	iii
Índice de Figuras	v
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objectivos da dissertação	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. Deterioração de estruturas de betão armado.....	3
2.1. Carbonatação do betão	3
2.2. Contaminação por cloretos.....	4
2.3. Corrosão das armaduras.....	5
2.4. Ataque químico do betão.....	7
2.4.1. Ataque de sulfatos	8
2.4.2. Ataque dos álcalis.....	9
2.4.3. Ataque de ácidos, águas puras e sais de amónio e magnésio	10
2.4.4. Acção da água do mar	11
2.5. Outros mecanismos de deterioração	12
2.5.1. Ataque biológico	12
2.5.2. Erosão, abrasão e cavitação	12
2.5.3. Ciclos de gelo-degelo	13
2.5.4. Acção do fogo.....	14
3. Preparação da superfície	15
3.1. Remoção do betão	15
3.2. Limpeza do betão	17
3.3. Limpeza das armaduras	19
4. Métodos de protecção e reparação.....	21
4.1. Protecção Superficial.....	21
4.1.1. Impregnação hidrofóbica	22
4.1.2. Impregnação.....	22
4.1.3. Revestimento.....	23
4.1.4. Procedimentos.....	23

4.1.5.	Controlo	24
4.2.	Métodos Electroquímicos	25
4.2.1.	Protecção Catódica	25
4.2.2.	Dessalinização.....	28
4.2.3.	Recalibração.....	30
4.3.	Inibidores de corrosão	33
4.3.1.	Preparação da superfície	33
4.3.2.	Procedimento da reparação	34
4.3.3.	Controlo	34
4.4.	Injecção de betão	34
4.4.1.	Procedimento da injecção sob pressão	35
4.4.2.	Procedimento do preenchimento por gravidade	37
4.4.3.	Controlo	39
4.5.	Substituição do betão	40
4.5.1.	Preparação de superfície	41
4.5.2.	Argamassa seca	42
4.5.3.	Betão ou argamassa injectada	43
4.5.4.	Betão moldado.....	46
4.5.5.	Agregados Pré-Colocados	48
4.5.6.	Betão ou argamassa aplicada à mão	50
4.5.7.	Betão projectado.....	52
4.5.8.	Controlo	54
5.	Caso Prático	57
5.1.	Descrição da estrutura e da sua envolvente	57
5.2.	Descrição das anomalias	58
5.3.	Proposta de intervenção.....	62
5.3.1.	Preparação da superfície	63
5.3.2.	Procedimento de reparação	65
5.3.3.	Controlo	68
6.	Conclusão.....	69
	Bibliografia	71

Índice de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo da corrosão [5].....	6
Figura 2 – Corrosão das armaduras por acção [5]: (a) da carbonatação; (b) dos cloretos	7
Figura 3 – Superfícies degradadas devido à acção de reacções sulfáticas de origem externa [5].....	8
Figura 4 – Deterioração devido à acção de reacções sulfáticas de origem interna [5]	8
Figura 5 – Fendilhação do tabuleiro de uma ponte devido ao ataque dos álcalis [5].....	9
Figura 6 – Deterioração devido ao ataque de ácidos [6]	10
Figura 7 – Eflorescências causadas pelo ataque das águas puras [6].....	10
Figura 8 – Deterioração de estacas devido ao ataque químico da água do mar [6]	11
Figura 9 – Ataque biológico em esgotos [6].....	12
Figura 10 – Superfícies degradadas por abrasão [6].....	13
Figura 11 – Deterioração progressiva das camadas superficiais, provocado pela cavitação [6]	13
Figura 12 – Superfícies deterioradas pelos ciclos de gelo-degelo [6]	14
Figura 13 – Deterioração do betão pela acção do fogo [6].....	14
Figura 14 – Remoção do betão [7].....	16
Figura 15 – Remoção do betão em redor das armaduras [8]	16
Figura 16 – Limpeza das armaduras através do jacto de areia [8].....	19
Figura 17 – Representação esquemática da impregnação hidrofóbica [12].....	22
Figura 18 – Representação esquemática de uma impregnação [12]	22
Figura 19 – Representação esquemática de um revestimento [12]	23
Figura 20 – Aplicação de um revestimento com [10]: (a) uma talocha e (b) um rolo	24
Figura 21 – Esquema do comportamento de um sistema de protecção contaminado por cloretos [15]	26
Figura 22 – Representação esquemática do funcionamento do processo da dessalinização [19].....	29
Figura 23 - Representação esquemática da realcalinização adaptado de [10].....	31
Figura 24 – Injecção de betão [24]: (a) sob pressão; (b) com vácuo; (c) por gravidade	35
Figura 25 – Identificação e marcação das fendas a reparar [26].....	36
Figura 26 – Injecção de betão [26]: (a) colocação dos tubos e arames; (b) selagem superficial da fenda.....	36
Figura 27 – Sequência de injecção de fendas [23]: (a) verticais; (b) horizontais	37
Figura 28 – Injecção de betão [27]: (a) colocação de um selante lateralmente à fenda; (b) colocação do material.....	38
Figura 29 – Remoção do excesso de material com auxílio de um rodo [27].....	38
Figura 30 – Preparação da superfície [29]: (a) identificação das zonas delaminadas com um martelo; (b) marcação do perímetro da zona de reparação.....	41
Figura 31 – Preparação da superfície [29]: (a) remoção do betão com um martelo pneumático; (b) corte com disco do perímetro definido no passo 2	41
Figura 32 – Preparação da superfície: (a) remoção do betão envolvente das armaduras corroídas [8]; (b) limpeza das armaduras e do betão com jacto de água [26].....	42

Figura 33 – Argamassa seca adaptado de [2]	42
Figura 34 – Betão ou argamassa injectada adaptado de [10]	44
Figura 35 – Betão ou argamassa injectada [33]: (a) montagem da cofragem; (b) colocação das válvulas de injeção	44
Figura 36 – Betão ou argamassa injectada [33] : (a) sistema pronto para iniciar a injeção do material; (b) material injectado de uma extremidade para a outra	45
Figura 37 – Cavidade completamente preenchida e pressurizada [33].....	45
Figura 38 – Betão moldado consolidado recorrendo a vibração interna [2]	46
Figura 39 – Betão moldado [29]: (a) Montagem da cofragem e preparação para colocação do material; (b) colocação do material na abertura da laje	47
Figura 40 – Consolidação do material através de vibração interna [29].....	47
Figura 41 – Montagem da cofragem [29]	48
Figura 42 – Betão moldado [29]: (a) colocação do material; (b) consolidação do material através de vibração interna	48
Figura 43 – Agregados pré-colocados adaptado de [10]	49
Figura 44 – Agregados pré-colocados [2]: (a) limpeza dos agregados; (b) montagem da cofragem e colocação dos agregados; (c) finalização da montagem da cofragem	49
Figura 45 – Mistura e injeção da calda adaptado de [2]	50
Figura 46 – Betão ou argamassa colocada à mão adaptado de [2]	50
Figura 47 – Mistura do material de reparação [35]	51
Figura 48 – Aplicação do material de reparação [35]	51
Figura 49 – Betão projectado adaptado de [2]	52
Figura 50 – Exemplos de correcta execução da projecção do betão [23]	53
Figura 51 – Betão projectado [39]: (a) sequência para betonagem de cantos; (b) critério para betonagem nos cantos	54
Figura 52 – Betão projectado [26]	54
Figura 53 – Pontes Rolantes de um estaleiro naval em Portugal	57
Figura 54 – Deterioração das vigas e consolas nas juntas de dilatação	58
Figura 55 – Segregação dos pilares nas juntas de betonagem, devido à má execução durante a construção	58
Figura 56 – Deterioração dos pilares	59
Figura 57 – Armaduras com recobrimento reduzido	59
Figura 58 – Perfis de penetração de cloretos nas faces: (a) norte e nascente; (b) sul e poente	60
Figura 59 – Efeito da qualidade do betão e do ambiente de exposição no teor crítico dos cloretos [6]	61
Figura 60 – Preparação da superfície: (a) e (b) marcação do perímetro das zonas a remover; (c) corte com disco do perímetro marcado	64
Figura 61 – Remoção do betão com martelo pneumático	64
Figura 62 – Remoção do betão na envolvente das armaduras	65
Figura 63 – Reposição do betão cortado com betão projectado nas faces dos pilares	66

Figura 64 – (a) Limpeza da superfície com jacto de água e (b) aplicação de um revestimento superficial por pintura 67

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

As principais anomalias em estruturas de betão estão relacionadas com o comportamento estrutural e com a deterioração dos materiais. Assim, a reabilitação de estruturas envolve o reforço e a reparação, respectivamente. Relativamente ao reforço de estruturas, embora não existam normas que enquadrem de forma global as diferentes técnicas de intervenção, está divulgada documentação dispersa onde esta matéria é abordada nos aspectos de dimensionamento, execução e controlo de qualidade. Também no caso da reparação de estruturas verifica-se que não existe documentação normativa relativa aos procedimentos de execução.

Actualmente em Portugal apenas existe a norma NP EN 1504 que define os produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão, em que inclui recomendações sobre a preparação da superfície, procedimentos e controlo de qualidade. No entanto, não especifica os procedimentos de execução das reparações. Assim, surge o interesse de fazer um levantamento das normas e recomendações mais recentes que se encontram dispersas sobre os procedimentos de execução e controlo de qualidade.

1.2. Objectivos da dissertação

A presente dissertação tem como principal objectivo realizar uma síntese dos procedimentos de execução e controlo de qualidade dos métodos de protecção e de reparação do betão e aplicá-los na reabilitação de uma estrutura sujeita a ambiente marítimo. Para tal, apresentam-se os seguintes objectivos:

- Identificar e descrever sinteticamente os principais mecanismos de deterioração das estruturas de betão;
- Em cada mecanismo de deterioração identificar quais os métodos de reparação que mais se adequam;
- Definir os métodos de preparação de superfície existentes, incluindo remoção e limpeza do betão e limpeza das armaduras;
- Definir sinteticamente os métodos de protecção e reparação das estruturas de betão, analisando também as suas vantagens e desvantagens;
- Identificar em cada método de protecção e reparação as normas existentes;
- Definir os procedimentos de execução recomendados em cada método de protecção e reparação, incluindo a preparação do substrato e o controlo de qualidade;
- Apresentar um caso prático para analisar os possíveis métodos de reparação e escolher a proposta de intervenção que mais se adequa;

- Definir os procedimentos de execução da proposta de intervenção escolhida no caso em estudo.

1.3. Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por seis capítulos distintos. De seguida apresenta-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

No primeiro capítulo elabora-se uma breve introdução ao tema da dissertação, referindo também os objectivos propostos e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo apresentam-se as principais causas de deterioração (carbonatação do betão, contaminação por cloretos, corrosão das armaduras, ataque químico e outros), elaborando uma breve descrição de cada um deles, identificando os defeitos que provocam nas estruturas e os possíveis métodos a considerar na sua reparação.

No terceiro capítulo apresentam-se os diversos métodos de preparação de superfícies de betão e armaduras, incluindo a remoção e limpeza do betão e a limpeza das armaduras. Em cada um deles, além de se apresentar os métodos disponíveis, apresentam-se também as recomendações da norma NP EN 1504.

No quarto capítulo expõem-se os principais métodos de protecção e reparação das estruturas de betão (sistemas de protecção de superfície, métodos electroquímicos, inibidores de corrosão, injeção de betão e substituição do betão). Em cada um deles elabora-se uma breve descrição dos diferentes métodos, identificando-os na norma NP EN 1504 e considerando as suas vantagens e desvantagens. Além disso, apresentam-se os procedimentos e controlo de qualidade a ter em cada método.

No quinto capítulo apresenta-se uma proposta de intervenção para o caso prático dos Pórticos das Pontes Rolantes de um estaleiro naval em Portugal. Começa-se por analisar as anomalias da estrutura através de uma inspecção visual e detalhada. De seguida, com base nas anomalias identificadas, apresentam-se os possíveis métodos de reparação e escolhe-se o que mais se adequa. Por fim, elabora-se a proposta de intervenção da reparação, incluindo a preparação de superfície, procedimentos de execução e controlo de qualidade.

No último capítulo apresentam-se as principais conclusões do estudo realizado.

2. Deterioração de estruturas de betão armado

Antes de se decidir qual o método de reparação a adoptar, é essencial compreender o que originou os defeitos na estrutura para que se possa eliminar a causa. Assim, não basta aplicar a reparação, uma vez que se a causa não for corrigida, os defeitos voltarão a surgir e, portanto, a reparação não irá durar. Este é um dos princípios para que uma reparação seja eficaz e durável. Nos capítulos seguintes, apresentam-se alguns dos processos de deterioração.

2.1. Carbonatação do betão

A carbonatação do betão é um dos mecanismos que provoca a corrosão das armaduras, uma vez que ao reduzir-se a alcalinidade do meio, destrói-se a película passiva em torno das armaduras. Este mecanismo envolve reacções entre os gases ácidos da atmosfera e os componentes alcalinos do betão, sendo que a principal reacção associada ao processo de carbonatação é entre o dióxido de carbono presente na atmosfera e o hidróxido de cálcio dissolvido [1]. Assim, o dióxido de carbono penetra nos poros do betão através de um processo de difusão e reage com o hidróxido de cálcio. Como resultado desta reacção, o pH decresce para valores inferiores a 9, permitindo, assim, destruir a película passiva, as armaduras ficarem desprotegidas e iniciar-se o processo da corrosão [2].

É importante salientar que a velocidade de difusão de dióxido de carbono na água é muito inferior à do ar. Portanto, se os poros do betão não contiverem água, o dióxido de carbono penetra com mais velocidade no interior de betão. No entanto, não ocorre carbonatação porque é preciso o dióxido de cálcio estar dissolvido. No caso de os poros estarem saturados, não existe carbonatação porque a velocidade de difusão do dióxido de carbono é muito baixa. Quando os poros do betão estão parcialmente preenchidos, a velocidade de carbonatação é muito influenciada por diversos parâmetros, tais como a composição, compactação e cura do betão e as condições de exposição.

A composição do betão determina a sua porosidade e, conseqüentemente, a maior ou menor dificuldade de penetração de dióxido de carbono, sendo que quanto maior for a relação água/cimento, maior será a porosidade e, por conseguinte, a velocidade de carbonatação. Pelo contrário, a quantidade de cimento determina a capacidade de fixação do dióxido de carbono no betão, assim quanto maior for a quantidade de cimento, maior será a quantidade de hidróxidos de cálcio e, portanto, menor será a velocidade de carbonatação. Relativamente às adições, por um lado, reduzem a estrutura porosa, mas por outro, geram pastas de cimento com menor quantidade de hidróxido de cálcio. O primeiro efeito é positivo, uma vez que ao reduzir a porosidade, diminui-se a velocidade de carbonatação. No entanto, o segundo efeito é negativo, porque ao diminuir a quantidade de hidróxido de cálcio, diminui-se a capacidade de fixação do dióxido de carbono no betão, fazendo com que sejam necessárias menores quantidades de dióxido de carbono para carbonatar o betão. Logo, a utilização de adições deve ser ponderada como algo que pode melhorar as características do betão, mas nunca como um produto para substituir o cimento.

A compactação e a cura do betão são extremamente importantes para que se obtenha uma camada de recobrimento de boa qualidade, dado que se o betão não for devidamente compactado e curado, o recobrimento ficará mais poroso, permitindo a penetração de dióxido de carbono ou de outras substâncias agressivas no betão.

Por fim, as condições de exposição determinam o teor de humidade no betão de recobrimento. Como já foi referido, quanto maior for o teor de humidade no betão, menor será a velocidade de carbonatação, porém para que o fenómeno da carbonatação ocorra é necessário estar na presença de água de modo a que os hidróxidos de cálcio e o dióxido de carbono se dissolvam. Assim, é fácil perceber que é preciso um teor de humidade intermédio (ambientes com humidades relativas entre 50 e 70%) para o qual a velocidade de carbonatação aumenta, sendo que decresce rapidamente conforme o teor de humidade aumente ou diminui.

Em elementos interiores a velocidade de carbonatação é máxima, porque a humidade relativa do ar geralmente varia entre os 50 e 60%. Contudo, em elementos submersos ou enterrados, a velocidade de carbonatação é pouco significativa. No caso de elementos exteriores protegidos da chuva a velocidade de carbonatação é geralmente elevada, dado que o teor de humidade no betão é menor. Todavia, em elementos exteriores com chuva a velocidade de carbonatação será inferior, mas depende muito dos períodos de molhagem e secagem a que a superfície está exposta. É importante referir que no caso de se aplicarem revestimentos que permitam a penetração de dióxido de carbono mas que diminuam o teor de humidade no betão, estes podem conduzir a um aumento de velocidade de carbonatação.

Os outros factores que influenciam o mecanismo da carbonatação são a temperatura e o teor de dióxido de carbono na atmosfera. Em relação ao primeiro, quanto maior for a temperatura, maior será a velocidade de carbonatação, uma vez que o aumento desta acelera as reacções químicas. A segunda é fácil de perceber, quanto maior for a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, maior a velocidade de carbonatação.

2.2. Contaminação por cloretos

A contaminação por cloretos é o outro mecanismo que causa corrosão das armaduras, sendo que quando o teor de cloretos ultrapassa o valor crítico, o processo da corrosão inicia-se. Esta contaminação pode ocorrer durante o processo de fabrico do betão se tiverem sido introduzidos na mistura ou durante a vida da estrutura, em especial, quando se encontra exposta a ambientes agressivos (como por exemplo ambientes marítimos). Em geral, o tipo de corrosão originado por este mecanismo de deterioração é a corrosão localizada e a corrosão por picadas, sendo que quando a quantidade de cloretos é bastante elevada pode ocorrer a corrosão geral das armaduras [3].

Existem três formas diferentes dos cloretos estarem presentes no betão, tais como ficarem quimicamente ligados a compostos resultantes da hidratação do cimento, fisicamente adsorvidos na

superfície dos poros ou livres na solução dos poros. É importante referir que apenas os cloretos livres provocam a destruição da película passiva, conduzindo à despassivação das armaduras [3].

A norma EN 206-1:2000 define que o teor de cloretos considerado crítico para que ocorra corrosão, em estruturas de betão armado, é de 0,4% (peso de cimento) [4].

O processo de penetração dos cloretos para o interior do betão é extremamente complexo e depende de um grande número de parâmetros relativos à composição do betão e às condições de exposição [1].

Relativamente à relação água/cimento, este parâmetro controla a dimensão e a continuidade da estrutura porosa do betão, em que quanto maior for esta relação, maior é a porosidade e, conseqüentemente, menor será a resistência à penetração de cloretos [1].

A composição do cimento determina a capacidade de fixação de cloretos pela pasta de cimento, este parâmetro é importante, porque apenas os cloretos livres são agressivos para as armaduras. A principal forma de fixação dos cloretos é através da reacção com o aluminato tricálcico (C_3A) que origina cloroaluminato de cálcio. Portanto, quanto maior for a quantidade de aluminato tricálcico, maior será a quantidade de cloretos fixos e, conseqüentemente, menor a quantidade de cloretos livres na solução dos poros, conduzindo a uma diminuição da velocidade de penetração [1].

O teor em adições (nomeadamente as pozolanas, cinzas volantes e as escórias de alto forno) é outro factor que influencia a capacidade de fixação de cloretos pelo interior do betão, no entanto não há consenso relativamente ao seu efeito, uma vez que existem resultados experimentais contraditórios [1].

Por fim, as condições de exposição influenciam fortemente os mecanismos de transporte de cloretos no betão, sendo mais gravosas em ambiente marítimo nos casos em que os elementos estão sujeitos a ciclos de molhagem e secagem.

2.3. Corrosão das armaduras

O mecanismo da corrosão é um processo electroquímico, este ocorre quando tem um ânodo (zona da armadura despassivada), um cátodo (zona da armadura com acesso a oxigénio), um condutor eléctrico (armaduras) e um electrólito (betão). No caso de o betão não estar contaminado, as armaduras estão protegidas pela película passiva devido à alta alcalinidade do meio onde se encontram (betão). Esta película impede que se inicie o processo de corrosão das armaduras.

Já foi referido que a corrosão ocorre devido a dois mecanismos: a carbonatação e a presença de cloretos. Assim, quando o pH desce para valores inferiores a 9 ou o número de cloretos ultrapassa o valor crítico, a película passiva é destruída e dá-se a despassivação das armaduras e inicia-se o mecanismo da corrosão. A partir deste momento, ocorre a dissolução do aço no ânodo que provoca a

libertação de iões ferrosos, ficando um excesso de electrões no aço. Estes migram pelo condutor eléctrico (armaduras) até ao cátodo que ao reagirem com a água e o oxigénio originam os iões de hidróxido. Por fim, ao ocorrer a redução do oxigénio, os iões de hidróxido migram para o ânodo através do betão. Na Figura 1 está representado o mecanismo de corrosão, as equações de oxidação e redução e os produtos da corrosão.

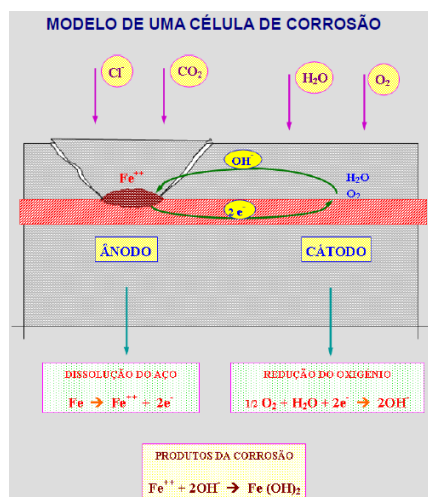


Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo da corrosão [5]

Na zona anódica ocorrem reacções secundárias que originam produtos de corrosão com elevado aumento de volume, esta expansão pode levar à delaminação e fendilhação do betão de recobrimento [5].

Conforme foi referido, sem a presença de oxigénio não ocorre corrosão, uma vez que não se forma o cátodo. Logo, em ambientes submersos, o mecanismo não se inicia. Em ambientes secos, como o betão tem condutividade baixa, o electrólito tem resistividade elevada e, portanto não há corrosão significativa. Assim, a velocidade de corrosão é controlada, maioritariamente, pela resistividade do betão e pela disponibilidade do acesso de oxigénio às armaduras, sendo que estes factores são controlados pelo teor de humidade do betão. Outros factores que também influenciam a velocidade de corrosão são a temperatura, a composição do betão, o recobrimento das armaduras, a cura, a fendilhação e a interacção ambiente-estrutura.

O teor de humidade do betão tem efeitos distintos na resistividade do betão e no acesso de oxigénio às armaduras. Relativamente à resistividade, quando o teor de humidade aumenta, esta diminui, ou seja, a condutividade aumenta, conduzindo a uma velocidade de corrosão superior. Quanto à penetração de oxigénio no betão quando o teor de humidade aumenta, esta diminui, uma vez que a difusão de oxigénio na água é muito baixa, induzindo uma velocidade de corrosão inferior. Então, para humidades relativas baixas, a velocidade de corrosão é controlada pela resistividade, e para humidades relativas altas, a velocidade de corrosão é controlada pelo acesso de oxigénio às armaduras. É, portanto, fácil de compreender que é necessário estar numa situação intermédia para

que os níveis de corrosão sejam maiores (situações de períodos alternados de molhagem e secagem).

A deterioração ocorre em duas fases, a primeira corresponde à iniciação e dura até à destruição da película passiva em torno das armaduras devido à carbonatação ou à contaminação por cloretos. A segunda fase corresponde à propagação, onde as armaduras ficam desprotegidas e a corrosão é iniciada. Nesta fase a corrosão pode provocar fendilhação, delaminação e destacamento do betão de recobrimento, manchas de ferrugem e perda da secção do aço. A Figura 2a ilustra a corrosão das armaduras devido à acção da carbonatação e a Figura 2b representa a corrosão das armaduras devido à acção dos cloretos.



(a)



(b)

Figura 2 – Corrosão das armaduras por acção [5]: (a) da carbonatação; (b) dos cloretos

Os métodos de reparação a utilizar na corrosão das armaduras podem ser a reposição do betão, a extracção electroquímica de cloretos, a realcalinização, a protecção catódica, inibidores de corrosão e sistemas de protecção de superfície. Quando se aplica a reposição do betão, para que a reparação seja durável, é importante aplicar um sistema de protecção de superfície para prevenir que a deterioração volte a ocorrer. Relativamente aos inibidores de corrosão, estes são mais eficazes numa fase inicial da corrosão.

2.4. Ataque químico do betão

As reacções químicas que têm maior significado na degradação do betão são as reacções dos sulfatos com os aluminatos da pasta de cimento (reacção expansiva), as reacções dos álcalis com os agregados do betão (reacção expansiva), as reacções dos ácidos, sais de magnésio e amónio e águas puras com a pasta de cimento (perda das propriedades ligantes), e as reacções dos iões agressivos da água do mar com a pasta de cimento (perda das propriedades ligantes) [5].

Quando as reacções originam produtos solúveis, ocorre deterioração pela lixiviação dos componentes da pasta de cimento, perdendo, assim, a sua capacidade ligante. Por outro lado, no caso de ocorrerem reacções expansivas, a deterioração é caracterizada pela fendilhação do betão [1].

É de salientar que o ataque químico do betão apenas tem significado quando está na presença de água (isto é, em ambientes com humidade relativa elevada), uma vez que esta é o meio de transporte dos agentes agressivos que provocam o ataque químico.

2.4.1. Ataque de sulfatos

O ataque dos sulfatos ocorre quando estes (sulfato de sódio, potássio, cálcio, magnésio e amónio) estão presentes em solução e reagem com a pasta de cimento hidratada (hidróxido de cálcio e aluminatos de cálcio hidratados). Os sulfatos mais comuns nos terrenos, nas águas e nos processos industriais são o de sódio e de cálcio, os menos comuns são os de magnésio, mas são mais destrutivos [2].

A deterioração através do ataque de sulfatos pode seguir duas formas diferentes: através de uma expansão do betão ou através de uma perda progressiva da resistência. Por um lado, a primeira, devido à reacção entre os sulfatos e os aluminatos de cálcio hidratados, conduz à fendilhação do betão e, conseqüentemente, a um aumento da permeabilidade que facilita a penetração de substâncias agressivas e, portanto, a um aumento da velocidade do processo de degradação. Por outro lado, a segunda forma pode ocorrer através da decomposição dos produtos hidratados da pasta de cimento, levando à desagregação do betão [1].

O ataque de sulfatos pode ser de origem externa, como se pode observar na Figura 3, ou de origem interna, como se ilustra na Figura 4.



Figura 3 – Superfícies degradadas devido à acção de reacções sulfáticas de origem externa [5]

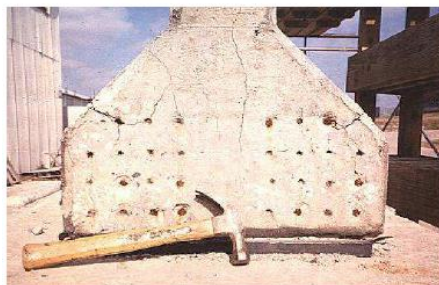


Figura 4 – Deterioração devido à acção de reacções sulfáticas de origem interna [5]

Por um lado, quando é de origem externa, os sulfatos começam por reagir com a zona superficial do betão, conduzindo à sua desintegração superficial [1]. Por outro lado, quando é de origem interna, pode ocorrer a remobilização dos sulfatos inicialmente contidos na pasta de cimento, devido às temperaturas elevadas durante o processo de cura, originando a etringite retardada [5]. Isto resulta na expansão interna da pasta e, conseqüentemente, no aparecimento de tensões internas que levam à fendilhação do betão.

Assim, no caso em que o mecanismo de deterioração é o ataque de sulfatos de origem externa, os métodos de reparação a utilizar são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície. Quando se aplica a substituição do betão de seguida deve aplicar-se um sistema de protecção de superfície, para que se evite a penetração dos sulfatos. O sistema de protecção de superfície também pode controlar a humidade no betão, de modo a evitar que o ataque químico ocorra. Por outro lado, se o mecanismo de deterioração é o ataque de sulfatos de origem interna, não há um método eficaz para reparar este tipo de deterioração. Apenas se pode controlar parcialmente o processo impedindo que a água penetre para o interior do betão recorrendo a um sistema de protecção superficial.

2.4.2. Ataque dos álcalis

Existem três tipos de reacções álcalis-agregados: a reacção álcalis-sílica, a reacção álcalis-silicato e a reacção álcalis-carbonato, sendo que a mais comum é a primeira [3]. Nestas reacções, algumas substâncias reactivas, como a sílica, presentes nos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos contidos na solução porosa do betão, formando assim um gel em torno da superfície dos agregados. Este gel tem a capacidade de, quando em contacto com a água, absorvê-la e expandir, criando tensões internas que levam à fendilhação do betão. No entanto, quando o betão é muito poroso, o gel preenche os poros e vazios, podendo não ocorrer fendilhação do betão. A Figura 5 apresenta um exemplo de deterioração por ataque dos álcalis.

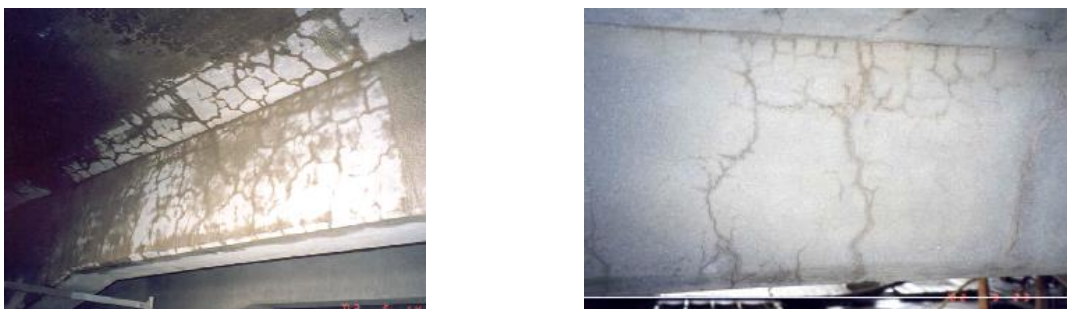


Figura 5 – Fendilhação do tabuleiro de uma ponte devido ao ataque dos álcalis [5]

Para que esta reacção conduza à deterioração do betão, é necessário que ocorram alguns factores [1]:

- A quantidade de álcalis no betão deve ser suficientemente elevada;
- Devem estar presentes agregados reactivos em quantidade suficiente;
- É necessário água para hidratar o gel;

- O betão não pode ter uma porosidade elevada.

Não existem métodos eficazes para reparar este tipo de deterioração. É possível controlar parcialmente o processo de deterioração evitando que a água penetre para o interior do betão através da protecção superficial.

2.4.3. Ataque de ácidos, águas puras e sais de amónio e magnésio

O betão devido à sua elevada alcalinidade torna-se susceptível ao ataque de ácidos. Deste modo, os ácidos ao reagirem com a pasta de cimento transformam os compostos de cálcio em sais solúveis, conduzindo à decomposição da pasta de cimento. A Figura 6 apresenta a deterioração de uma superfície devido ao ataque de ácidos.



Figura 6 – Deterioração devido ao ataque de ácidos [6]

O ataque dos ácidos ocorre com mais gravidade em ambientes industriais, em esgotos ou quando o betão está exposto ao escoamento de soluções com grande conteúdo de ácidos. Além disso, quanto menor for a solubilidade dos sais, menor será o ritmo de deterioração do betão [1].

As águas puras dissolvem o hidróxido de cálcio e originam a sua lixiviação, que por sua vez causa eflorescências no betão. Estas águas têm poucos iões de cálcio e resultam da condensação do vapor de água e nevoeiro e das águas da chuva ou provenientes da neve ou gelo derretido [1]. A Figura 7 ilustra a deterioração causada devido ao ataque das águas puras.



Figura 7 – Eflorescências causadas pelo ataque das águas puras [6]

Por fim, os sais de magnésio e amónio, assim como os ácidos, originam a dissolução dos compostos de cálcio da pasta de cimento, sendo que os sais de amónio podem ser encontrados nos fertilizantes e os sais de magnésio na água do mar, efluentes industriais ou águas da chuva.

Os métodos de reparação a utilizar nestes mecanismos de deterioração são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície.

2.4.4. Acção da água do mar

A deterioração provocada pela acção da água do mar resulta da interacção dos produtos da pasta de cimento (composta essencialmente por silicatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e monossulfato de cálcio hidratado) com os componentes agressivos presentes na água, sendo que o mecanismo de ataque ocorre em duas fases: a penetração das substâncias agressivas e a subsequente reacção com os produtos hidratados da pasta de cimento susceptíveis de ser atacados [1].

O produto da pasta de cimento mais susceptível ao ataque das substâncias agressivas presentes na água do mar é o hidróxido de cálcio. Este é atacado pelo dióxido de carbono e pelo sulfato de magnésio, conduzindo à sua remoção da pasta de cimento, tornando-a mais fraca e, por conseguinte, aumentando a permeabilidade. Assim, com a lixiviação do hidróxido de cálcio torna-se mais fácil a penetração dos outros componentes agressivos que atacam os restantes constituintes da pasta de cimento [1].

A Figura 8 representa a deterioração de uma estaca devido ao ataque da água do mar.

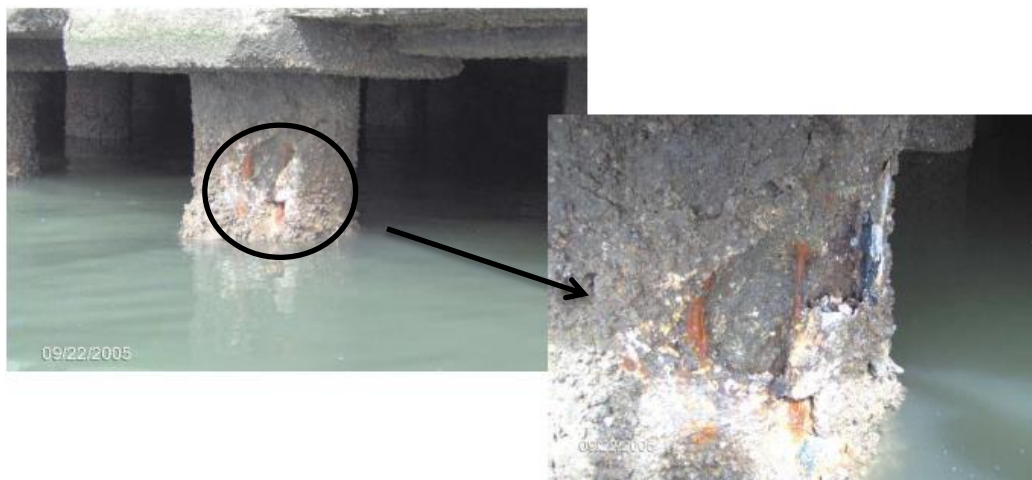


Figura 8 – Deterioração de estacas devido ao ataque químico da água do mar [6]

Os métodos de reparação a utilizar neste mecanismo de deterioração são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície (estes devem ser aplicados depois de se substituir o betão, de modo a evitar a penetração dos agentes agressivos). Além disso, o sistema de protecção de superfície também poderá ser utilizado para controlar o teor de humidade no betão, para atenuar o ataque químico.

2.5. Outros mecanismos de deterioração

De seguida apresentam-se outros mecanismos de deterioração, assim como o ataque biológico, a erosão, abrasão e cavitação, os ciclos de gelo-degelo e, por fim, a acção do fogo.

2.5.1. Ataque biológico

O ataque biológico pode causar a deterioração mecânica e a deterioração química do betão. A deterioração mecânica é provocada pelo desenvolvimento de forças expansivas, devido ao crescimento de vegetação nas zonas porosas do betão e em fendas. A deterioração química do betão ocorre devido ao desenvolvimento de alguns microorganismos que produzem ácido húmico que ataca a pasta de cimento [1].

A acção de algumas bactérias também causa o ataque químico do betão, sendo que a situação mais comum ocorre nos esgotos. Por um lado, as bactérias anaeróbias, quando expostas a temperaturas mais elevadas, transformam os compostos de enxofre em gás sulfídrico e, por outro lado, as bactérias aeróbias transformam esse ácido, quando é dissolvido, devido à película de humidade presente nas paredes dos esgotos, em ácido sulfúrico. Este ácido provoca o ataque químico da pasta de cimento [1]. A Figura 9 apresenta um exemplo do ataque biológico em esgotos.

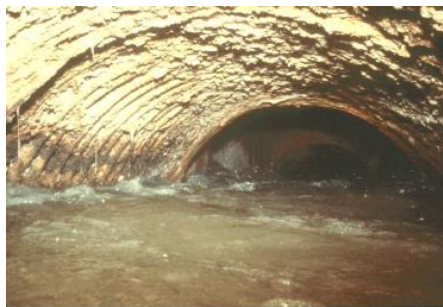


Figura 9 – Ataque biológico em esgotos [6]

Os métodos de reparação a utilizar no combate ao ataque biológico são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície.

2.5.2. Erosão, abrasão e cavitação

A abrasão é provocada pelo efeito repetido do impacto, esfregamento ou fricção de objectos na superfície de betão. Esta acção ocorre frequentemente devido ao tráfego de veículos e peões. Relativamente à erosão, esta é provocada pela acção abrasiva da água com sedimentos, causando a remoção do material da superfície do betão. A Figura 10 apresenta exemplos de superfícies degradadas devido à abrasão.

A cavitação (Figura 11) pode ocorrer em superfícies sujeitas a fluxos de água de velocidade elevadas e associadas a pressões negativas, uma vez que se formam umas bolhas de vapor que implodem

quando se dá uma mudança rápida na direcção do escoamento. Os danos causados devido a esta acção podem ser evitados realizando superfícies lisas e sem obstruções ao curso de água.



Figura 10 – Superfícies degradadas por abrasão [6]



Figura 11 – Deterioração progressiva das camadas superficiais, provocado pela cavitação [6]

Os métodos de reparação a utilizar neste mecanismo são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície (esta protecção deve ser utilizada para aumentar resistência do betão ao desgaste).

2.5.3. Ciclos de gelo-degelo

Quando a água transita do estado líquido para o estado sólido, ocorre um aumento de volume de, aproximadamente, 9%. Assim, nos betões saturados em países de clima frio, com temperaturas abaixo dos 0 °C, existe o risco de ocorrer deterioração, dado que a água presente nos poros ao atingir a solidificação expande, criando tensões internas que podem causar a fendilhação e a delaminação do betão. No caso de o betão não estar saturado ou quando os poros não estão totalmente preenchidos por água, não ocorre deterioração porque existe espaço para acomodar a expansão. No entanto, em Portugal a deterioração devido aos ciclos de gelo-degelo não tem grande significado prático, devido às condições climáticas existentes.

Os métodos a utilizar na reparação da deterioração causada pelos ciclos de gelo-degelo são a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície. Esta protecção pode ser aplicada numa fase inicial, para controlar o teor de humidade no betão ou numa fase mais avançada, de modo a complementar a reparação com a substituição do betão. A Figura 12 apresenta exemplos de superfícies deterioradas pelos ciclos de gelo-degelo.



Figura 12 – Superfícies deterioradas pelos ciclos de gelo-degelo [6]

2.5.4. Acção do fogo

A exposição do betão armado a altas temperaturas provoca danos significativos, sendo que com o aumento da temperatura do betão, a pasta de cimento e os agregados são alterados e, por conseguinte, a resistência à compressão do betão diminui. O vapor de água pode causar a delaminação do betão da zona superficial. A Figura 13 ilustra um exemplo de deterioração de betão pela acção do fogo.



Figura 13 – Deterioração do betão pela acção do fogo [6]

O método a utilizar na reparação da deterioração causada pela acção do fogo é a reposição do betão.

3. Preparação da superfície

A preparação da superfície deve ser sempre efectuada, independentemente do método de reparação, de modo a promover uma boa ligação entre o material de reparação e o material de base. Assim, se não for correctamente executada, pode por em causa a reparação. Esta preparação vai variar tendo em conta o tipo de reparação que vai ser efectuada e o estado em que se encontra o betão e as armaduras. Portanto, antes de se proceder à reparação, deve remover-se o betão deteriorado e limpar o remanescente. Em geral, a superfície preparada deverá ficar limpa, sã, seca e com uma textura rugosa.

A superfície do betão pode ser limpa recorrendo a métodos químicos, mecânicos, *shot blasting*, decapagem com jacto de água e areia ou por ataque ácido. Relativamente às armaduras, devem ser limpas com uma escova de aço, com jacto de areia ou jacto de água de alta pressão. Em relação à remoção do betão, os métodos mais utilizados são a hidrodemolição, martelos hidráulicos, pneumáticos e eléctricos. Existem outras metodologias mais potentes embora menos apropriadas para intervenções de reparação dado danificarem o betão remanescente.

Nos capítulos seguintes apresenta-se uma breve descrição dos métodos e cuidados a ter na remoção e limpeza de betão e na limpeza das armaduras.

3.1. Remoção do betão

O betão danificado deverá ser removido, quando se encontrar delaminado, fendilhado ou quando a limpeza da superfície não for suficiente para remover os contaminantes devido a cloretos ou a carbonatação. No entanto, quando se utilizam métodos electroquímicos para proceder à reparação, não é necessário remover o betão contaminado, apenas o betão deteriorado.

De acordo com a norma EN 1504-10, na remoção do betão devem ser satisfeitos os seguintes requisitos [7]:

- Remover o mínimo de betão necessário e em concordância com o princípio e o método escolhidos entre os da EN 1504-9;
- A remoção do betão não deverá por em causa a segurança da estrutura. Caso seja necessário, pode recorrer-se a suportes temporários;
- A profundidade de carbonatação e os perfis de concentração de cloretos devem ser estabelecidos e tidos em consideração;
- A extensão da remoção do betão deve estar em concordância com o método escolhido. Este deve ser especificado.

A norma EN 1504-10 também apresenta algumas indicações relativamente ao procedimento que deve ser tido em conta na remoção do betão. Tais como [7]:

- Quando se aplicam os métodos 7.3, 7.5 e 10.1 (realcalinização, extracção electroquímica de cloretos e protecção catódica) no betão com chochos ou delaminação, deverão ser removidos os revestimentos superficiais e as reparações prévias que apresentem alta resistividade. Nestes métodos não é necessário remover o betão original não deteriorado em redor das armaduras.
- Os bordos do betão deverão ser cortados com um ângulo entre 90° e 135° com a horizontal, como se ilustra na Figura 14.

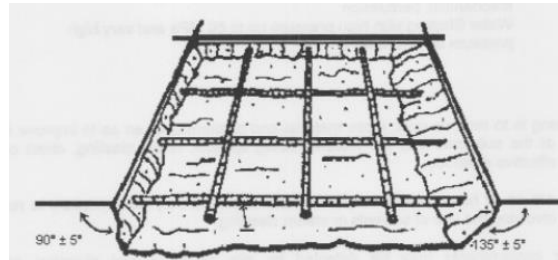


Figura 14 – Remoção do betão [7]

- No caso de as armaduras estarem corroídas, o betão deve ser removido na área à volta das armaduras (Fig. 15). Assim, a distância mínima entre a armadura e o substrato remanescente deverá ser 15 mm ou a máxima dimensão do agregado de reparação mais 5 mm, adoptando o valor superior.

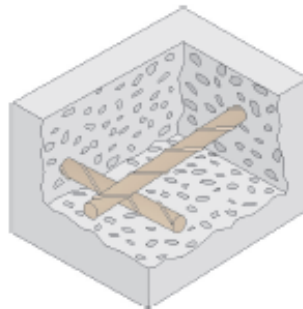


Figura 15 – Remoção do betão em redor das armaduras [8]

- O betão que esteja contaminado com cloretos deverá ser todo removido em redor das armaduras num mínimo de 20 mm.
- Caso sejam utilizados métodos electroquímicos e se não houver corrosão nas armaduras, pode não ser necessário remover o betão carbonatado ou com cloretos.

A escolha da técnica usada na remoção do betão depende de vários parâmetros, como por exemplo o custo, o impacto ambiental, a quantidade e as características do betão a remover, restrições de tempo e espaço, entre outras.

Como foi referido, existem várias técnicas disponíveis, assim como [9]:

- A hidrodemolição é utilizada na remoção da superfície de tabuleiros e paredes, em que a profundidade de remoção é inferior ou igual a 150 mm. Tem como vantagem o facto de betão

remanescente e as armaduras não fiquem danificados. Por outro lado, tem um custo bastante elevado, requer uma grande quantidade de água potável e uma parte do material é projectado. É necessário ter algumas precauções de segurança adicionais devido às altas pressões de água (100 – 300 MPa) e ao excesso de ruído.

- O martelo hidráulico pode ser aplicado na remoção total ou parcial em profundidade, sendo utilizado quando é mais economicamente viável do que a remoção por impacto efectuado por martelos pneumáticos. É necessário ter algumas precauções de segurança adicionais devido ao excesso de ruído. Além disso, produz poeiras e o betão remanescente pode ficar danificado com microfissuras.
- Os martelos pneumáticos são mais utilizados na remoção de betão em áreas de acesso limitado e em quantidades limitadas, sendo também aproveitado como suporte noutras técnicas de remoção. Normalmente não é usado na remoção de betão em grandes quantidades, salvo algumas excepções (por exemplo quando o betão está extremamente deteriorado). É necessário ter algumas precauções de segurança adicionais devido ao excesso de ruído. Além disso, produz poeiras e o betão remanescente pode ficar danificado com microfissuras.

3.2. Limpeza do betão

A limpeza do betão é um passo importante na preparação da superfície, uma vez que envolve a remoção dos contaminantes superficiais do mesmo, tais como sujidades superficiais, poeiras, gorduras, entre outros. É importante remover todos os defeitos que possam comprometer a aderência do material de reparação ao betão já existente.

Segundo a norma EN 1504-10, na limpeza da superfície de betão devem ser satisfeitos os seguintes requisitos [7]:

- O substrato deve estar livre de pó, material desligado, superfície contaminada e materiais que prejudiquem a colagem ou evitem a absorção ou a molhagem pelos materiais de reparação;
- O substrato limpo deve ser protegido de possíveis contaminações, a menos que a limpeza seja executada imediatamente antes da aplicação dos materiais de protecção e reparação.

Em algumas situações pode ser necessário recorrer a solventes como é descrito na EN 1504-10 [7].

Como foi mencionado, os métodos de limpeza do betão são [9]:

- Química:

Esta deve ser usada quando o betão está contaminado com óleos, gorduras. Os produtos de limpeza mais usados são detergentes ou fosfato trissódico. É importante que todos os vestígios dos produtos químicos sejam bem removidos depois da limpeza superfície. Não devem ser

usados solventes, uma vez que dissolvem os contaminantes e são absorvidos pelo betão. O ácido muriático não é eficaz na remoção de gorduras ou óleos.

- Mecânica:

Existem vários equipamentos disponíveis para limpar e preparar a superfície do betão. Dependendo do martelo utilizado ou do material abrasivo podem ser atingidos diferentes graus de limpeza superficial. É importante ter cuidado ao usar estes equipamentos mecânicos, de modo a evitar remover mais betão do que o necessário. Por vezes, depois de se utilizar este método, pode ser necessário recorrer a outro complementar, como por exemplo jacto de água ou jacto de areia e água, de modo a finalizar a limpeza da superfície.

- Decapagem com jacto de água e areia:

Como o nome indica, este método inclui jacto de areia húmida e seca, e jacto de água. Este método de limpeza é relativamente rápido e de baixo custo. Quando é utilizado jacto de areia, é preciso equipar a fonte de ar com um filtro de óleo, de modo a evitar a contaminação da superfície de betão durante a operação da limpeza.

Com o jacto de areia seca, o impacto da areia na superfície remove as poeiras, no entanto este método gera bastante pó sendo que é necessário um operador bastante experiente. No caso do jacto de areia húmida, como a areia é molhada antes de sair do tubo, este processo é mais lento mas gera muito menos pó [10].

A pressão do jacto de água varia entre os 40 e 60 MPa e este equipamento requer pessoal experiente. Contudo, é um método bastante eficaz quando utilizado como última fase da preparação da superfície.

- Ataque ácido:

Esta técnica é normalmente utilizada para remover calda de cimento superficial e quantidades normais de sujidade. O ACI 515.1R recomenda que só se use esta técnica quando nenhuma das alternativas puder ser utilizada, uma vez que os métodos anteriores são mais eficazes do que a limpeza com ataque ácido [11].

O ácido irá remover cimento suficiente para que se crie uma superfície rugosa, uma vez que irá promover uma melhor ligação entre o material de reparação e o material já existente. Note-se que se o ácido for utilizado, a superfície deve ser limpa de modo a remover os óleos e gorduras com agentes apropriados e, de seguida, estes agentes de limpeza devem ser removidos antes da aplicação do ácido na superfície. Depois de ser aplicado o ácido, quando a espuma pára, este deve ser todo removido. Para finalizar, utilizam-se umas escovas para remover os produtos da reacção e quaisquer partículas que ficaram na superfície. A superfície deve ser verificada com um papel indicador de pH, de modo a confirmar que todo o ácido utilizado na limpeza foi removido.

3.3. Limpeza das armaduras

Depois de se remover todo o betão contaminado na periferia das armaduras, é preciso limpá-las antes de se proceder à substituição do betão.

De acordo com a norma EN 1504-10, na limpeza das armaduras devem ser satisfeitos os seguintes requisitos [7]:

- A ferrugem, a argamassa, o betão, a poeira e outros materiais prejudiciais e soltos que reduzem a aderência e contribuem para a corrosão das armaduras deverão ser removidos;
- Toda a superfície exposta das armaduras deve ser uniformemente limpa, a não ser que haja algum condicionamento estrutural que não o permita;
- Os substratos limpos (betão e armaduras) devem ser protegidos de novas contaminações, excepto quando a limpeza é feita imediatamente antes da aplicação dos produtos e sistemas de protecção;
- A limpeza das armaduras deve ser efectuada sem lhes causar danos, danificar ou contaminar o betão ou o ambiente adjacente;
- Quando as armaduras expostas estão contaminadas com cloretos ou outro material que provoque corrosão, toda a superfície exposta das mesmas deve ser limpa com jacto de água não ultrapassando a pressão de 18 MPa para remover os cloretos e outros contaminantes, a menos que sejam utilizados métodos electroquímicos de protecção e reparação.

O processo de limpeza utilizado na remoção de ferrugem e outras sujidades depende da área a limpar. A escova de aço é eficaz para pequenas áreas, devendo ser removida toda a ferrugem existente. Para grandes áreas, o jacto de areia seca é o mais eficiente, porque é o único que consegue limpar atrás das armaduras (zona de difícil acesso), através do ricochete (Figura 16). Outros métodos alternativos são jacto de areia húmida ou jacto de água.

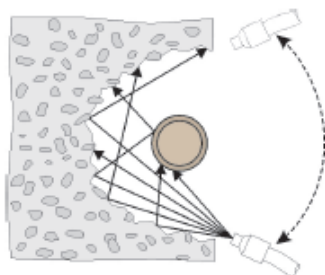


Figura 16 – Limpeza das armaduras através do jacto de areia [8]

Por fim, em algumas situações, pode ser aplicado um revestimento para dar uma protecção adicional às armaduras. No caso de, depois da limpeza, passarem mais de 4 horas, as armaduras devem ser limpas novamente antes de ser aplicado o revestimento adicional. É também muito importante verificar se há perda da secção e, se necessário, reforçar a estrutura ou substituir as armaduras.

4. Métodos de protecção e reparação

Depois de serem identificadas as causas da deterioração, pode proceder-se à reparação da estrutura. A norma EN 1504-9 define uma série de métodos de reparação, sendo que estão agrupados em função dos princípios que permitem a prevenção ou estabilização dos processos de deterioração [10]. Ao todo esta norma define 11 princípios e 37 métodos de reparação, em que os princípios de 1 a 7 estão relacionados com a deterioração do betão e os restantes com a corrosão das armaduras. Sempre que for necessário podem ser utilizados vários métodos em sobreposição desde que se tomem as devidas precauções, de modo a evitar que surjam novos danos na estrutura.

De seguida apresentam-se os métodos de protecção e reparação estudados no âmbito deste trabalho (protecção superficial, métodos electroquímicos, inibidores de corrosão, injeção de betão e substituição do betão).

4.1. Protecção Superficial

Os sistemas de protecção de superfície são aplicados para prevenir a penetração de substâncias agressivas, água ou outros líquidos, ataques químicos, biológicos, entre outros. Estes sistemas podem, também, ser utilizados na reparação quando combinados com outros métodos. A protecção superficial corresponde aos seguintes princípios e métodos da norma EN 1504-9 [12]:

- P1 – Protecção contra substâncias agressivas
 - M1.1 – Impregnação hidrófoba
 - M1.2 – Selagem de poros do betão
 - M1.3 – Revestimento de fendas com membrana
- P2 – Controlo da humidade no betão
 - M2.1 – Protecção com impregnação hidrófoba
 - M2.2a – Protecção superficial com selagem dos poros
 - M2.2b – Protecção superficial com pintura
- P5 – Aumento da resistência do betão ao desgaste
 - M5.1a – Aplicação de uma superfície de desgaste
 - M5.1b – Aplicação de membranas
 - M5.2 – Impregnação da superfície de betão
- P6 – Aumento da resistência química
 - M6.1a – Aplicação de uma superfície de desgaste
 - M6.1b – Aplicação de membranas
- P8 – Aumento da resistividade eléctrica do betão
 - M8.1 – Controlo da humidade do betão com revestimentos superficiais

Segundo a norma EN 1504-2, os três métodos de protecção superficial são a impregnação hidrofóbica (H), a impregnação (I) e o revestimento (C) [12].

4.1.1. Impregnação hidrofóbica

A impregnação hidrofóbica consiste na criação de uma camada repelente à água. Deste modo, reduz a penetração da água no betão, mas permite a evaporação através do revestimento contribuindo, assim, para a redução da humidade no interior do betão. Ao diminuir o teor de humidade no interior do betão, este passa a ter uma condutividade mais baixa, aumentando a resistividade do electrólito. Note-se que a aparência da superfície do betão não é alterada quando se aplica este método. Segundo a norma EN 1504-2, os componentes activos, destes produtos líquidos, podem ser silanos ou siloxanos [12]. A Figura 17 apresenta uma representação esquemática deste sistema de protecção superficial.

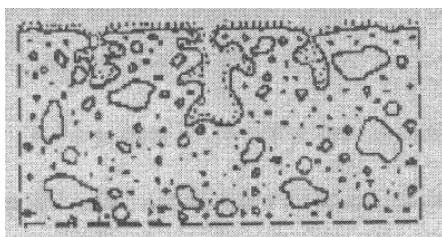


Figura 17 – Representação esquemática da impregnação hidrofóbica [12]

Este método pode ser utilizado para prevenir ou reduzir a corrosão das armaduras por cloretos ou o ataque de sulfatos. Como este tipo de revestimento permite a penetração de dióxido de carbono e diminui o teor de humidade no betão, pode conduzir a um aumento da velocidade de carbonatação.

4.1.2. Impregnação

A impregnação resulta da aplicação de um produto líquido de baixa viscosidade que seja absorvido e preencha parcial ou totalmente os poros e os capilares do betão. Assim, reduz-se a porosidade superficial e reforça-se a superfície. Este tratamento produz uma linha fina descontínua na superfície do betão que endurece e, em alguns casos, com o aumento da resistência ao desgaste, limita os efeitos da abrasão [12]. Segundo a norma EN 1504-02, os ligantes podem ser polímeros orgânicos tais como resinas acrílicas, epoxídicas ou silicatos alcalinos [12]. A Figura 18 apresenta uma representação esquemática de uma impregnação típica.

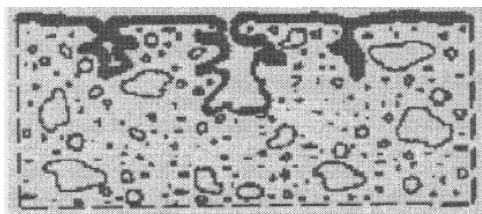


Figura 18 – Representação esquemática de uma impregnação [12]

Este método pode ser utilizado para prevenir ou reduzir a corrosão das armaduras por cloretos ou por carbonatação, ataque de sulfatos, reacções álcalis-agregados, abrasão-erosão, gelo-degelo, ataque por ácidos ou deterioração biológica.

4.1.3. Revestimento

O revestimento tem como objectivo produzir uma camada protectora contínua sobre o substrato do betão [12]. Existem dois tipos de revestimentos superficiais: o revestimento por pintura e revestimento com uma argamassa de cimento modificada com uma dispersão de polímeros. Os ligantes podem ser resinas epoxídicas, acrílicas, poliuretanos, polímeros orgânicos com cimento. É importante referir que quando o revestimento é completamente impermeável, trata-se de uma membrana. Segundo a norma EN 1504-2, a espessura do revestimento varia entre 0.1mm e 5mm, sendo que em certos casos a poderá ser superior a 5mm [12]. A Figura 19 representa esquematicamente um revestimento típico.

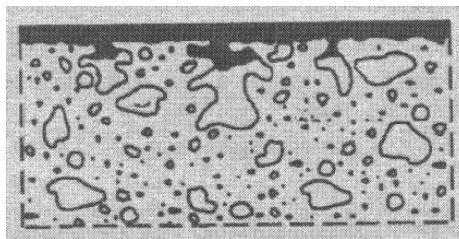


Figura 19 – Representação esquemática de um revestimento [12]

Este método pode ser utilizado para prevenir ou reduzir a corrosão das armaduras por cloretos ou por carbonatação, ataque de sulfatos, reacções álcalis-agregados, abrasão-erosão, gelo-degelo, ataque por ácidos ou deterioração biológica.

4.1.4. Procedimentos

4.1.4.1. Preparação da superfície

Passo 1: Verificar o estado da superfície de betão, sendo que se o betão estiver deteriorado, deve aplicar-se o método de reposição do betão, antes de usar os métodos de protecção de superfície;

Passo 2: Limpar o betão recorrendo a um dos métodos já descritos da preparação de superfície (por exemplo decapagem por jacto de água).

4.1.4.2. Procedimento da impregnação

Passo 1: Preparar a mistura do material. A norma EN 1504-10 refere que a temperatura máxima e mínima e o grau de humidade do betão e do ambiente devem ser especificados e apropriados ao material que se vai utilizar (de acordo com as indicações do fabricante) [7];

Passo 2: Aplicar uma camada com uma talocha de modo a regularizar a superfície e tapar os vazios;

Passo 3: Aplicar um primário com um pincel (opcional) [10];

Passo 4: Aplicar o material de baixo para cima, por pulverização, sob vácuo, ou através de um gel [7]. A norma EN 1504-10 refere que a penetração da impregnação hidrofóbica (por meio de um silano ou siloxano) pode ser melhorada quando se aplica o material por duas fases (molhado sobre molhado) [7]. A penetração deverá ser contínua e com pelo menos 2 mm de espessura [10].

4.1.4.3. Procedimento do revestimento

Passo 1: Preparar a mistura do material. A norma EN 1504-10 refere que a temperatura máxima e mínima e o grau de humidade do betão e do ambiente devem ser especificados e apropriados ao material que se vai utilizar (de acordo com as indicações do fabricante) [7];

Passo 2: Aplicar uma camada com uma talocha de modo a regularizar a superfície e tapar os vazios;

Passo 3: Aplicar um primário com um pincel (opcional) [10];

Passo 4: Aplicar o material por pincel, rolo, talocha ou por projecção, como se pode observar na Figura 20 [10]. Quando se utilizam revestimentos poliméricos, a temperatura do ar deve ser pelo menos 3 °C acima do ponto de orvalho [10]. Dependendo do sistema, as camadas podem ser aplicadas molhado sobre molhado ou então pode ser preciso esperar que a primeira camada seque antes de aplicar a segunda [10]. A máxima e mínima espessura do revestimento é definida na norma EN ISO 2808:2007 [13];



Figura 20 – Aplicação de um revestimento com [10]: (a) uma talocha e (b) um rolo

4.1.5. Controlo

A norma EN 1504-10 define uma série de ensaios para verificar a qualidade dos produtos e sistemas utilizados ao longo da protecção de superfície [7]. Seguidamente apresentam-se alguns dos ensaios a realizar:

- Ensaio nº1: Delaminação – Antes da aplicação da superfície de protecção (I, H ou C);
- Ensaio nº2: Limpeza – Depois da preparação do substrato e imediatamente antes da aplicação da superfície de protecção (I,H ou C);
- Ensaio nº3: Regularidade da superfície – Antes da aplicação do revestimento (C);
- Ensaio nº4: Rugosidade – (C);
- Ensaio nº 5: Tensão de tracção superficial do substrato – (I, H ou C);

- Ensaio nº 9: Teores de humidade do substrato – Antes e durante a aplicação da superfície de protecção (I, H ou C);
- Ensaio nº11: Ensaio de carbonatação – (I ou H);
- Ensaio nº12: Ensaio de cloretos – (I ou H);
- Ensaio nº 26: Espessura molhada do revestimento – Depois da aplicação do revestimento (C);
- Ensaio nº 31: Penetração da impregnação – Depois do material endurecer (I ou H);
- Ensaio nº 32: Permeabilidade à água – Depois do material endurecer para verificar a eficiência da protecção (I, H ou C);
- Ensaio nº 35: Aderência de revestimentos – Depois do material endurecer (C).

4.2. Métodos Electroquímicos

Estes métodos baseiam-se na alteração do potencial das armaduras através da aplicação de um campo eléctrico. As três técnicas electroquímicas usadas para reparar as estruturas devido à corrosão são a protecção catódica, a dessalinização (ou extracção electroquímica de cloretos) e a realcalinização. As principais diferenças destes três métodos são a duração do tratamento e o valor da corrente aplicada. Enquanto na protecção catódica a duração é permanente, na dessalinização é de 2 a 8 semanas e na realcalinização é de 2 a 10 dias. Em relação à intensidade da corrente, na protecção catódica é aproximadamente 10 mA/m² e nas restantes é 1 A/m².

4.2.1. Protecção Catódica

A protecção catódica consiste no fornecimento de electrões às armaduras através de uma fonte externa, ficando assim o potencial das armaduras mais negativo e forçando-as a funcionarem como cátodo. Deste modo, é possível prevenir ou eliminar (reduzir) a corrosão das armaduras. A protecção catódica corresponde ao princípio P10 (protecção catódica das armaduras): ao método M10.1a (protecção catódica passiva) e ao método M10.1b (protecção catódica activa) da norma EN 1504-9 [14].

Esta técnica pode ser utilizada em estruturas novas (prevenção catódica) ou existentes que estão em risco de contaminação por cloretos ou carbonatação, sendo bastante eficaz em suprimir ou prevenir a corrosão das armaduras devido aos cloretos. Neste tipo de reparação as armaduras (cátodo) são ligadas ao pólo negativo e o ânodo é ligado ao pólo positivo. Os iões cloreto estão carregados negativamente e, por isso, são atraídos para o ânodo sendo repelidos da zona das armaduras. Nesta zona (cátodo) ocorre a redução do oxigénio e a produção de iões hidróxido, sendo que se o valor do potencial do aço for bastante negativo poderá ocorrer a libertação de hidrogénio. No entanto, estes efeitos são benéficos pois ao diminuir a concentração de iões cloreto na estrutura e aumentado a produção de iões hidróxido, o pH aumenta, conduzindo à repassivação das armaduras. A Figura 21 apresenta um esquema do comportamento do sistema de protecção num betão contaminado por cloretos.

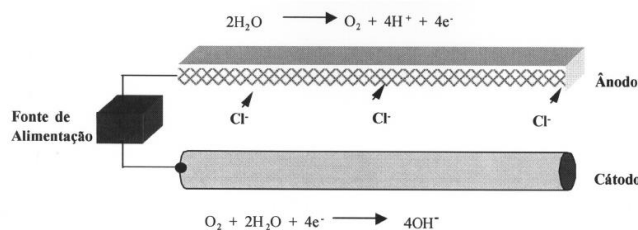


Figura 21 – Esquema do comportamento de um sistema de protecção contaminado por cloretos [15]

Se o potencial do aço atingir valores muito negativos, pode ocorrer a libertação do hidrogénio e, conseqüentemente, a fragilização do aço. A libertação do hidrogénio pode afectar vários metais, em especial o aço de alta resistência. Assim, em estruturas pré-esforçadas deve proceder-se a uma investigação antes de se aplicar a protecção catódica. Além disso, a norma ISO/DIS 12696:2009 recomenda que o potencial não deve ser mais negativo que -900mV neste tipo de estruturas [16].

Segundo alguns estudos efectuados, em estruturas deterioradas pelas reacções álcalis-agregados, a protecção catódica pode afectar negativamente a progressão dos danos [10]. Contudo, seguindo as indicações da norma ISO/DIS 12696:2009, não deverá haver problemas em aplicar esta técnica nas estruturas afectadas por este tipo de reacções [16].

Existem dois métodos: a protecção catódica activa (ou por corrente imposta) e a protecção catódica passiva (ou por ânodos de sacrifício).

4.2.1.1. Protecção catódica activa

A protecção catódica activa consiste na aplicação de uma corrente que é forçada a passar entre um ânodo inerte (ou seja, não é consumido ao longo do tempo) e o cátodo (armaduras). O ânodo pode ser por exemplo uma malha de titânio, fitas de malha de titânio, revestimentos ou tintas orgânicas condutoras e é colocado na superfície do betão, ligado ao pólo positivo de uma fonte de alimentação exterior. O cátodo está conectado ao pólo negativo da mesma fonte.

As principais vantagens são o tempo de vida útil superior e o facto de se tratar de um método mais eficiente. Em relação às desvantagens, a instalação deste mecanismo é mais complexa e exige uma manutenção regular.

4.2.1.2. Protecção catódica passiva

Neste método a armadura está ligada electricamente a um ânodo de sacrifício que é colocado no mesmo meio electrolítico (betão). O ânodo de sacrifício deve ser um metal menos nobre porque tem mais tendência para corroer que aço, como por exemplo o alumínio, magnésio ou zinco. Assim, este ânodo vai ser consumido e, como tal, é necessário colocá-lo numa zona de fácil acessibilidade para que possa ser substituído [17].

Este mecanismo é de instalação bastante simples, porque não é necessário instalar uma fonte de energia externa e não precisa de manutenção regular. É também bastante menos dispendioso do que o método anterior. No entanto, o tempo de vida útil é mais reduzido e, portanto, deve ser substituído periodicamente. É também importante referir que só pode ser aplicado a betões de baixa resistividade, uma vez que as voltagens deste sistema são bastante baixas.

4.2.1.3. Considerações sobre a preparação de superfície para a protecção catódica activa

Quando se aplica a protecção catódica não é necessário remover o betão contaminado. Contudo, de modo a garantir uma distribuição de corrente uniforme, devem ser removidas todas as reparações antigas com características isolantes. No caso de as armaduras estarem corroídas e o betão estiver delaminado ou na presença de fendas é muito importante remover o betão deteriorado e proceder à sua reparação, antes de se iniciar o processo da protecção catódica. Esta reparação deve ser feita com uma argamassa cimentícia. Todas as armaduras devem estar electricamente ligadas entre si. Por fim, o substrato de betão deve ser limpo.

A norma EN 12696:2009 especifica uma série de verificações que devem ser efectuadas antes de se proceder à aplicação da protecção catódica [16]. É importante identificar defeitos, tais como a possível delaminação do betão e a existência de fendas, reparações antigas e a profundidade da contaminação de cloretos e da carbonatação. A espessura do recobrimento, quantidade e disposição das armaduras também devem ser identificadas, de modo a avaliar-se o espaçamento entre o cátodo e o ânodo para o sistema seleccionado. Além disso, as zonas de maior densidade de armaduras que necessitam de densidade de corrente superior devem ser identificadas. Por fim, possíveis situações de curto-circuito entre as armaduras e o ânodo devem ser avaliadas.

4.2.1.4. Procedimento da reparação para a protecção catódica activa

A instalação da protecção catódica deve estar de acordo com as indicações da norma EN 12696:2009 [16] e os requisitos para a competência dos técnicos de protecção catódica são especificados na norma EN 15257:2006 [18]. De seguida, apresenta-se o procedimento da reparação para a protecção catódica activa [10]:

Passo 1: O sistema de protecção catódica deverá ser instalado de acordo com o seu dimensionamento;

Passo 2: Expor uma parte das armaduras para encontrar um ponto adequado para a ligação eléctrica;

Passo 3: Os eléctrodos de referência e outras sondas de monitorização são embebidos no betão;

Passo 4: Aplicar o ânodo na superfície do betão com um revestimento;

Passo 5: Efectuar todas as ligações eléctricas e instalar a fonte de alimentação;

Passo 6: Depois de efectuar a cura de todos os materiais, faz-se uma primeira verificação ao funcionamento do sistema eléctrico e à ausência de curto-circuitos, sendo depois comissionado;

Passo 7: Fazem-se testes ao funcionamento do sistema e ajustes à densidade da corrente ao longo de várias semanas a meses;

Passo 8: Por fim, se os passos anteriores forem bem-sucedidos, inicia-se a fase normal da protecção catódica.

4.2.1.5. Controlo para a protecção catódica activa

Segundo a norma ISO/DIS 12696:2009, a competência dos técnicos de protecção catódica deve ser demonstrada através de um certificado de acordo com a norma EN 15257:2006 [16]. Além disso, o projecto, a instalação, os ensaios da instalação, o comissionamento e o controlo operacional a longo prazo deve ser supervisionado por técnicos com a devida qualificação com treino, especialização e experiência na aplicação deste sistema.

De modo a garantir a eficiência e a segurança do sistema de protecção catódica é necessário monitorizar continuamente os potenciais das armaduras na interface com o betão, densidades de corrente, temperatura ou pH, para tal são utilizados eléctrodos de referência. É também importante supervisionar o sistema eléctrico da protecção catódica, durante a vida útil da estrutura.

4.2.2. Dessalinização

A dessalinização, ou extracção electroquímica de cloretos, tem como princípio restaurar a película passiva nas armaduras de aço através da redução dos cloretos no interior do betão. A dessalinização corresponde ao princípio P7 (repassivação das armaduras) e ao método M7.5 (dessalinização electroquímica) da norma EN 1504-9 [14].

Este método é muito semelhante à protecção catódica, uma vez que consiste na aplicação de uma corrente eléctrica contínua entre um ânodo exterior e as armaduras de aço (estas funcionam como cátodo). No entanto, como foi referido anteriormente, a duração do tratamento é temporária e o valor da corrente é bastante inferior. O ânodo é aplicado na superfície do betão, está embebido numa solução electrolítica e ligado ao pólo positivo da fonte de energia enquanto o cátodo está ligado ao pólo negativo. Assim, os iões de carga negativa (cloretos) são atraídos para o ânodo e migram para fora do betão porque o ânodo está no exterior do mesmo. Simultaneamente, no cátodo ocorrem reacções de redução de oxigénio que produzem iões hidróxido, aumentando o pH que conduz à repassivação das armaduras. No fim do processo, o sistema de remoção electroquímica de cloretos é removido. A Figura 22 representa esquematicamente o funcionamento do processo da dessalinização.

O equipamento utilizado neste tipo de reparação consiste numa fonte de energia contínua, cabos e num ânodo, que está envolvido numa solução electrolítica. O ânodo, em geral, pode ser uma malha de aço (consumida ao longo do tempo) ou uma malha de titânio activado revestida com óxidos de metais nobres (inerte, ou seja, não é consumida ao longo do tempo). Relativamente à solução electrolítica, esta pode ser água corrente ou uma solução saturada de hidróxido de cálcio ou uma pasta que pode ser pulverizada em qualquer tipo de superfície [10].

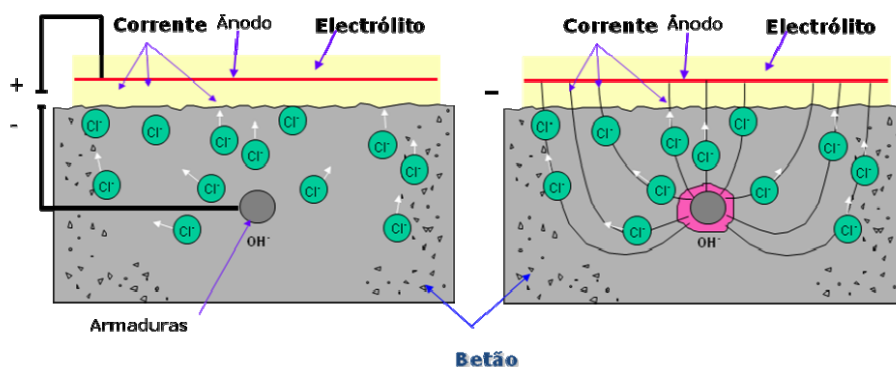


Figura 22 – Representação esquemática do funcionamento do processo da dessalinização [19]

A aplicação da dessalinização não é recomendada em betões que contenham agregados reactivos, uma vez que o aumento da alcalinidade do meio pode estimular a ocorrência das reacções álcalis-agregados [10].

Esta técnica também não deve ser aplicada em estruturas pré-esforçadas, uma vez que o aço está sujeito a voltagens negativas bastante elevadas, podendo provocar a libertação do hidrogénio e a fragilização do aço. Salienta-se que a fragilização do aço pelo hidrogénio só ocorre em aços de alta resistência. Assim, no caso de se aplicar a extracção electroquímica de cloretos numa estrutura pré-esforçada, deve ser demonstrado que o risco de ocorrer a fragilização do aço é insignificante.

4.2.2.1. Considerações sobre a preparação de superfície

Assim como na protecção catódica, antes de se aplicar a dessalinização, é importante identificar defeitos, tais como a possível delaminação do betão e a existência de fendas, uma vez que para que a corrente seja uniforme, as armaduras devem estar electricamente ligadas entre si e o betão deve ter uma distribuição de corrente adequada e homogénea [10]. Todas as reparações antigas também devem ser identificadas e a profundidade da contaminação por cloretos e carbonatação devem ser determinadas [10].

Como foi referido anteriormente, neste tipo de reparação não é necessário remover o betão contaminado. No entanto, deverá proceder-se à sua limpeza para que se remova todo o tipo de sujidades superficiais. Quando as armaduras já se encontram corroídas e o betão está delaminado ou com fendas, é importante repará-lo com materiais cimentícios, antes de se proceder à extracção electroquímica de cloretos, de modo a que a distribuição de corrente seja o mais uniforme possível. É também essencial remover antigas reparações com características isolantes, para que a corrente seja devidamente distribuída pela estrutura.

4.2.2.2. Procedimento da reparação

A norma CEN/TS 14038-2:2011 especifica os requisitos mínimos para a avaliação da condição do betão e das armaduras antes, durante e depois do projecto do tratamento por extracção electroquímica de cloretos [20]. De seguida apresenta-se o procedimento [19]:

Passo 1: Aplicação do ânodo e do electrólito na superfície do betão;

Passo 2: Realização das ligações anódicas e catódicas (armaduras) e instalação da fonte de energia;

Passo 3: Realização de testes para verificar a ausência de curto-circuitos entre o ânodo e o cátodo e monitorização da funcionalidade de todo o sistema;

Passo 4: Extracção de amostras para determinar e analisar o teor de cloretos ao nível das armaduras;

Passo 5: Quando o teor de cloretos estiver abaixo dos 0,4% (em peso de cimento), interrompe-se a ligação eléctrica, remove-se todo o sistema de reparação e procede-se à limpeza da superfície de betão;

Passo 6: No fim aplicar uma protecção superficial para evitar que a estrutura volte a ser contaminada por cloretos.

4.2.2.3. Controlo

Durante todo o processo da extracção electroquímica de cloretos deve efectuar-se um registo contínuo da densidade da corrente aplicada, sendo que esta não deverá ultrapassar os 10 A/m^2 [10]. Além disso, devem ser retiradas e analisadas amostras da superfície de betão, de modo a verificar o decréscimo do teor dos cloretos. É também muito importante verificar regularmente o electrólito, sendo que deverá ser repostado sempre que for necessário.

De modo a garantir a durabilidade desta técnica de reparação, mesmo depois do processo ter sido concluído, devem efectuar-se inspecções periódicas.

4.2.3. Realcalinização

O princípio da realcalinização é restaurar a alcalinidade do meio, de modo a recuperar a película passiva das armaduras. Este método não pode ser utilizado quando a causa da deterioração é a contaminação por cloretos, sendo apropriado quando o problema se trata da carbonatação. A realcalinização corresponde ao princípio P7 (repassivação das armaduras) e ao método M7.3 (realcalinização electroquímica) da norma EN 1504-9 [14].

Este tratamento, assim como a dessalinização, consiste na aplicação temporária de uma corrente eléctrica entre as armaduras, que funcionam como cátodo, e um ânodo exterior inserido num electrólito na superfície do betão. Como nos métodos electroquímicos já abordados, as armaduras estão ligadas ao pólo negativo da fonte de energia e o ânodo está ligado ao pólo positivo. Na armadura são produzidos iões hidróxido, estes como estão carregados negativamente tendem a

migrar para o ânodo. No entanto, alguns deles são mantidos nas imediações das armaduras pelos íons de sódio e potássio. Estes como estão carregados positivamente migraram da superfície do betão para a zona das armaduras. A produção de íons hidróxido gera um aumento do pH para valores da ordem dos 14, permitindo assim a restauração da passividade das armaduras. No fim do processo, o sistema de realcalinização é removido. A Figura 23 representa esquematicamente o processo de funcionamento da realcalinização.

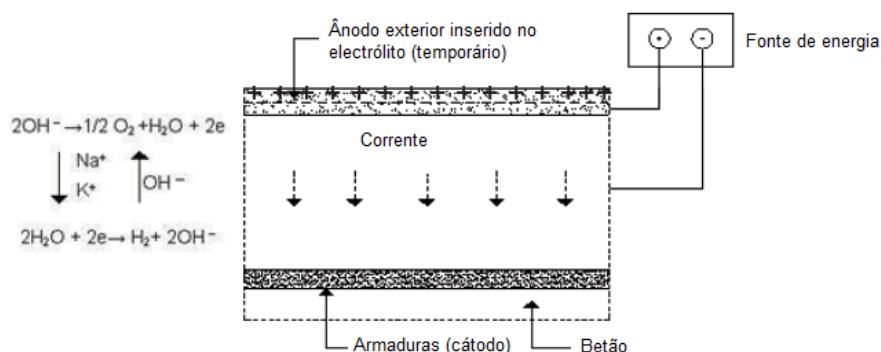


Figura 23 - Representação esquemática da realcalinização adaptado de [10]

O equipamento utilizado neste tipo de reparação consiste numa fonte de energia contínua, cabos e num ânodo, que está envolvido numa solução electrolítica. O ânodo, em geral, pode ser uma malha de aço (consumida ao longo do tempo) ou uma malha de titânio activado revestida com óxidos de metais nobres (inerte, ou seja, não é consumida ao longo do tempo). Relativamente à solução electrolítica, esta pode ser de carbonato de sódio ou uma pasta que pode ser pulverizada em qualquer tipo de superfície [10].

A aplicação desta técnica não é recomendada em betões que contenham agregados reactivos, uma vez que o aumento da alcalinidade do meio pode estimular a ocorrência das reacções álcalis-agregados [10].

A aplicação da realcalinização em estruturas pré-esforçadas não é recomendada, uma vez que o potencial do aço atinge valores muito negativos, podendo originar a libertação do hidrogénio e, conseqüente, fragilização dos aços de alta resistência.

4.2.3.1. Considerações sobre a preparação de superfície

Assim como na protecção catódica e na dessalinização, antes de se aplicar a realcalinização, é importante identificar defeitos, como a delaminação do betão e a presença de fendas, uma vez que para que a corrente seja uniforme, as armaduras devem estar electricamente ligadas entre si e o betão deve ter uma distribuição de corrente adequada e homogénea [10]. Todas as reparações antigas também devem ser identificadas e a profundidade da contaminação por carbonatação deve ser determinada [10].

Conforme foi mencionado, na realcalinização não é necessário remover o betão contaminado. No entanto, é necessário remover todo o tipo de materiais ou danos que possam colocar em causa a eficiência deste método. Assim, no caso de as armaduras estarem corroídas e do betão se encontrar delaminado ou na presença de fendas é essencial remover o betão danificado e proceder à sua reparação com materiais cimentícios, antes de aplicar a realcalinização. As superfícies do betão devem ser limpas e todas as reparações antigas que tenham características isolantes devem ser removidas. Estas medidas devem ser seguidas para que a distribuição de corrente no betão seja adequada e homogénea.

4.2.3.2. Procedimento da reparação

A norma CEN/TS 14038-1:2004 especifica os requisitos mínimos para a avaliação da condição do betão e das armaduras antes, durante e depois do projecto da realcalinização [21]. De seguida apresenta-se o procedimento [10]:

Passo 1: Aplicação do ânodo e do electrólito na superfície do betão;

Passo 2: Realização das ligações anódicas e catódicas (armaduras) e instalação da fonte de energia;

Passo 3: Realização de testes para verificar a ausência de curto-circuitos entre o ânodo e o cátodo e monitorização da funcionalidade de todo o sistema. Segundo a norma CEN/TS 14038-1:2004, a densidade da corrente da realcalinização não deve exceder 4 A/m^2 relativamente à superfície das armaduras e a carga terá a duração mínima de 100 h [21];

Passo 4: O tratamento por realcalinização do betão deve terminar quando uma carga total de 200 Ah/m^2 for transmitida às armaduras;

Passo 5: No fim do processo interrompe-se a ligação eléctrica, remove-se todo o sistema de reparação e limpa-se a superfície do betão;

Passo 6: Por fim, aplica-se um sistema de protecção superficial, de modo a evitar que a estrutura seja contaminada pela carbonatação.

4.2.3.3. Controlo

Durante o processo da realcalinização do betão deve efectuar-se um registo contínuo da densidade da corrente aplicada. Além disso, devem ser retiradas e analisadas amostras da superfície de betão, de modo a verificar os progressos da realcalinização do betão. É também muito importante verificar regularmente o electrólito, sendo que deverá ser repostado sempre que for necessário.

Para assegurar a durabilidade do método de reparação, mesmo depois do processo ter sido concluído, devem efectuar-se inspecções periódicas.

4.3. Inibidores de corrosão

Um inibidor de corrosão é uma substância química que tem como objectivo diminuir a velocidade de corrosão das armaduras, sendo que pode ser eficaz na fase inicial da deterioração, porque atrasa esse processo. Contudo, na fase de propagação da deterioração este método não é muito eficaz e, além disso, não há muitas informações disponíveis acerca da sua durabilidade [10]. Os inibidores de corrosão correspondem ao princípio P11 (controlo das zonas anódicas das armaduras) e ao método M11.3 (inibidores de corrosão para reparação) da norma EN 1504-9 [14]. Porém, na norma não há informações específicas sobre a utilização deste sistema.

Os inibidores de corrosão podem ser adicionados na mistura do betão como adjuvantes ou aplicados directamente na superfície e são classificados da seguinte forma: inibidores anódicos (tratam-se de aniões que migram para o ânodo e formam películas protectoras – reagem na reacção anódica), inibidores catódicos (reagem na reacção catódica) e inibidores mistos ou orgânicos (actuam por adsorção em toda a superfície da armadura e reagem nas duas reacções). Os mais utilizados na redução da corrosão das armaduras são os anódicos e os orgânicos. De seguida apresentam-se algumas situações em que faz sentido considerar a este sistema de reparação [14]:

- No caso de uma estrutura pré-esforçada, uma vez que quando se aplica um método electroquímico pode ocorrer a fragilização do aço;
- Em casos onde não há acesso directo a uma fonte de energia, sendo necessária para aplicar os métodos electroquímicos (excepto na protecção catódica passiva);
- Situações em que as armaduras não estão continuamente ligadas entre si. Como foi mencionado, este é um dos requisitos para aplicar os métodos electroquímicos.

No entanto, em estruturas em que a migração dos inibidores da superfície do betão para as armaduras está impedida, a utilização de inibidores de corrosão não deve ser considerada [14]. Isto acontece, por exemplo, no caso de ter sido aplicada uma reparação anterior com produtos impermeáveis.

A quantidade do produto utilizado deve ser a recomendada pelo fabricante, porque a sua eficácia depende da concentração e para evitar efeitos secundários. Inclusivamente, alguns dos produtos são tóxicos e, por isso, há um limite na quantidade a aplicar.

Segundo o anexo da norma EN 1504-10, a aplicação dos inibidores de corrosão deverá ser considerada como um tratamento da superfície ou adicionada na mistura do material de reparação como um adjuvante quando combinada com outros métodos [7].

4.3.1. Preparação da superfície

A preparação do substrato deve ser aplicada conforme as recomendações do fabricante do produto utilizado.

Passo 1: Verificar o estado da superfície de betão, sendo que se o betão estiver deteriorado ou na presença de fendas, deve aplicar-se o método de reposição do betão ou a injeção de betão, respectivamente, antes de usar os métodos de protecção de superfície;

Passo 2: Limpar o betão recorrendo a um dos métodos já descritos no capítulo de preparação de superfície (por exemplo jacto de água).

4.3.2. Procedimento da reparação

A aplicação do procedimento da reparação deve estar de acordo com as recomendações do fabricante.

Passo 1: Preparar a mistura do material (de acordo com as indicações do fabricante);

Passo 2: Aplicar uma camada do material na superfície do betão, com um rolo, pincel ou spray (a quantidade aplicada depende das indicações do fabricante);

4.3.3. Controlo

O controlo de qualidade também deve ser seguido conforme as indicações do fabricante. Além disso, deve ser feito um ensaio de modo a verificar a eficácia da penetração do produto. De modo a prevenir uma futura contaminação por acção dos cloretos ou da carbonatação, pode aplicar-se, depois da reparação, um sistema de protecção superficial.

4.4. Injecção de betão

Este método é aplicável na injeção de vazios criados no betão durante a betonagem e na injeção de fendas na superfície do betão, tendo como objectivo obter impermeabilidade à penetração da água ou de substâncias agressivas e reforçar o betão. A injeção de betão corresponde aos seguintes princípios e métodos da norma EN 1504-9 [22]:

- P1 – Protecção contra substâncias agressivas
 - M1.4 – Preenchimento de fendas
- P4 – Reforço de elementos
 - M4.5 – Injecção de fendas e vazios
 - M4.6 – Preenchimento por gravidade de fendas e vazios

A norma EN 1504-05 define os requisitos mínimos dos produtos de injeção utilizados na reparação de estruturas de betão [22]. Esta norma classifica os produtos de injeção em três categorias: preenchimento com transmissão de forças (produtos capazes de ligar as superfícies do betão e transmitir esforços através deles, como por exemplo resinas epóxicas ou caldas de cimento), preenchimento dúctil (produtos flexíveis que são capazes de acompanhar pequenos movimentos após a injeção, tais como resinas de poliuretano) e preenchimento expansivo (produtos que

expandem por absorção de água, permitindo um preenchimento eficaz das fendas, como por exemplo gel acrílico ou resinas de poliuretano). Define ainda os dois tipos de materiais de injeção utilizados: poliméricos reactivos e hidráulicos. Os primeiros podem ser utilizados em qualquer uma das três categorias e os segundos são adequados para o preenchimento com transmissão de forças.

Para escolher o tipo de material de injeção é necessário ter em conta a quantidade de humidade nas fendas (estão definidos quatro estados: seco, húmido, molhado e cheio de água), a largura das fissuras (são definidas 5 classes: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 e 0.8 mm) e a categoria da fenda (podem ser passivas, activas ou latentes). Por exemplo, no caso de se tratar de uma fenda passiva de abertura pequena ou média, pode utilizar-se uma resina epóxida [23]. No entanto se for uma fenda passiva com abertura significativa, já se recorre a caldas de cimento ou a resinas epóxidas adicionadas com areia. Por outro lado, quando a fenda é activa, utilizam-se resinas acrílicas ou de poliuretano [23]. A calda de cimento pode ser aplicada em ambientes secos e húmidos sem fluxo de água, mas a resina epóxida só pode ser aplicada em ambientes secos.

Existem 3 técnicas de injeção de betão:

- Injeção sob pressão (Figura 24a);
- Injeção superficial com vácuo (Figura 24b);
- Preenchimento por gravidade (Figura 24c).

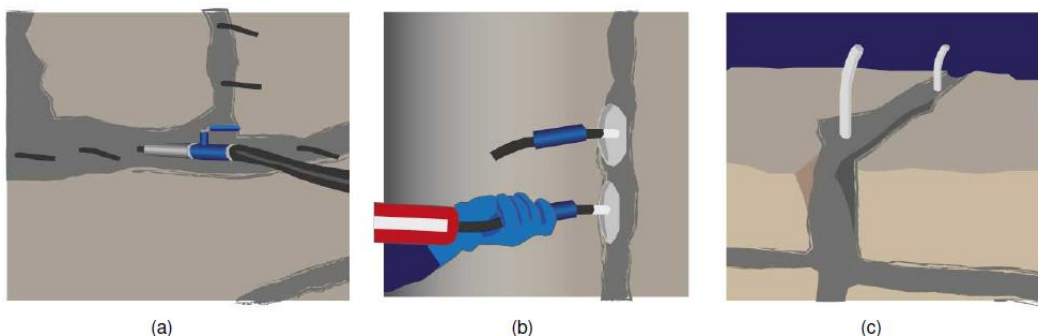


Figura 24 – Injeção de betão [24]: (a) sob pressão; (b) com vácuo; (c) por gravidade

A última técnica não vai ser abordada neste documento por só ser aplicada em situações muito especiais, sendo que não está incluída na norma EN 1504-05 [14]. É importante salientar que quando a fenda se deve à corrosão por cloretos, é necessário recorrer a métodos adicionais (extração electroquímica de cloretos) para eliminar a causa da deterioração [14]. Normalmente a injeção de betão é aplicada quando a largura das fendas é superior a 0.2 mm [10].

4.4.1. Procedimento da injeção sob pressão

Na injeção sob pressão, o material de injeção é colocado sob pressão dentro da fenda, através de uns furos executados na superfície do betão.

4.4.1.1. Preparação da superfície

Passo 1: Identificar e marcar as fendas a reparar, como se ilustra na Figura 25;

Passo 2: Alargar a abertura superficial (em V) em todo o comprimento da fenda com uma broca ou com um pequeno martelo pneumático, no caso de os bordos da fenda se apresentarem deteriorados;

Passo 3: Limpar a superfície na zona da fenda (cerca de 13 mm para cada lado) [25] com uma escova de aço, para que se crie uma boa ligação ao material de selagem;

Passo 4: Limpar a fenda para remover todos os detritos com recurso ao jacto de água;



Figura 25 – Identificação e marcação das fendas a reparar [26]

4.4.1.2. Procedimento da reparação

Passo 1: Realizar uns furos na superfície ao longo da fenda (espaçados aproximadamente entre 20 cm a 50 cm);

Passo 2: Colocar os tubos do sistema de injeção nos furos realizados no passo 1. Nos tubos colocar um arame para que não fique obstruído (Figura 26a);

Passo 3: Selar a superfície da fenda longitudinalmente com um material compatível ao que será injectado, de modo a que não haja nenhum derrame de material durante a injeção (Figura 26b);



(a)



(b)

Figura 26 – Injeção de betão [26]: (a) colocação dos tubos e arames; (b) selagem superficial da fenda

Passo 4: Retirar os arames e ligar os tubos à mangueira da bomba;

Passo 5: Preparar a mistura do material;

Passo 6: Injectar o material, 24h após a selagem da superfície, conforme a orientação das fendas (Figura 27). No caso de serem verticais, a injeção é aplicada de baixo para cima, só se passando para o tubo seguinte quando o material de reparação lá chegar vindo do tubo anterior (Figura 27a). Por outro lado, se as fendas forem horizontais a injeção pode ser feita de duas maneiras: inicia-se por um furo central e, de seguida, prossegue-se alternadamente para os furos contíguos ou divide-se a fenda por troços (Figura 27b) [23]. É importante manter a pressão máxima durante algum tempo para que o material preencha toda a fenda, mas a pressão de injeção não pode exceder a resistência da selagem [23];

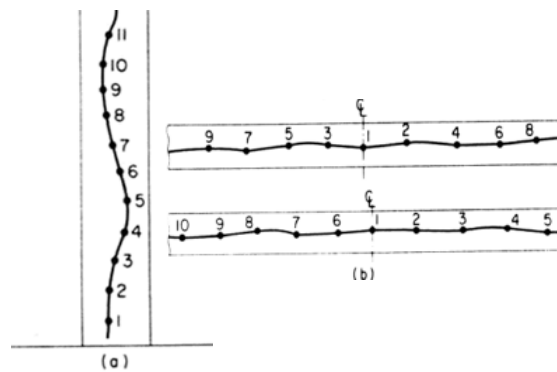


Figura 27 – Sequência de injeção de fendas [23]: (a) verticais; (b) horizontais

Passo 7: Selar o tubo que está a ser injectado quando o material começar a sair pelo tubo seguinte;

Passo 8: Repetir os passos 6 e 7 até que todos os tubos estejam preenchidos;

Passo 9: Pelo menos 24h após da injeção das fendas estar completa, removem-se os tubos e a selagem superficial e depois aplica-se um revestimento final [23];

4.4.2. Procedimento do preenchimento por gravidade

No preenchimento por gravidade, o material de injeção é colocado na fenda, através da gravidade, sendo bastante utilizado em elementos horizontais e em fendas de maior dimensão.

4.4.2.1. Preparação da superfície

Passo 1: Limpar a fenda para remover todos os detritos com recurso ao jacto de água.

4.4.2.2. Procedimento da reparação

Passo 1: Preparar a mistura do material de reparação;

Passo 2: Colocar um selante lateralmente à fenda no caso de esta ser contínua e acessível em ambos lados, para que não se perca o material de reparação (Figura 28a);

Passo 3: Verter o material por cima da abertura da fenda até que não consiga entrar mais e deixar de penetrar (Figura 28b). Em superfícies lisas usar um rodo e em superfícies irregulares utilizar escovas ou rolos para espalhar a resina [27];

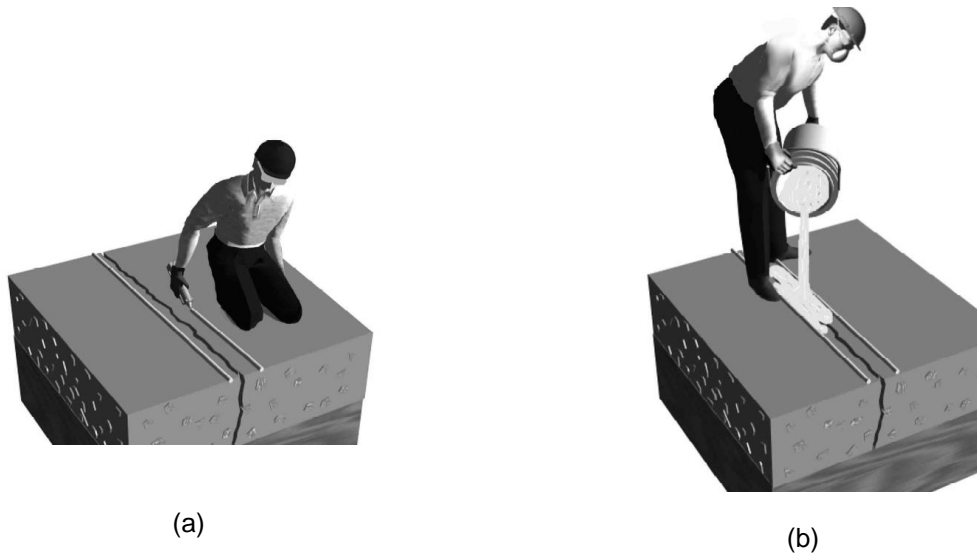


Figura 28 – Injecção de betão [27]: (a) colocação de um selante lateralmente à fenda; (b) colocação do material

Passo 4: Inspeccionar a fenda de modo a verificar se o material de reparação está a penetrar;

Passo 5: Esperar no mínimo 20 a 30 minutos para que o material penetre por completo na fenda, sendo que pode ser necessário repetir o passo 3 [27];

Passo 6: Remover o excesso de material que ficou na superfície com um rodo (Figura 29);

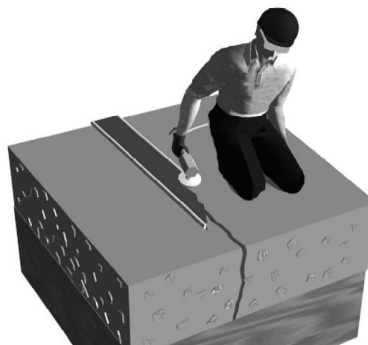


Figura 29 – Remoção do excesso de material com auxílio de um rodo [27]

Passo 7: Aplicar 0.5 a 1.0 kg/m² de areia após 20 a 30 minutos da última aplicação, para promover a resistência superficial [27];

Passo 8: Depois de deixar curar (tendo em conta as indicações da norma EN1504-10 [7]), remover o selante e aplicar um revestimento final;

4.4.3. Controlo

A norma EN 1504-10 define uma série de ensaios para conhecer as características das fendas e para verificar a qualidade dos produtos e sistemas utilizados ao longo da injeção [7]. Seguidamente apresentam-se alguns dos ensaios a realizar:

- Ensaio nº2: Limpeza – Depois da preparação da superfície e imediatamente antes da aplicação da injeção;
- Ensaio nº6: Largura e profundidade das fissuras;
- Ensaio nº 7: Movimento da fissura;
- Ensaio nº 9: Teores de humidade nas fissuras – Antes e durante a aplicação da injeção;
- Ensaio nº 14: Penetração de contaminantes das fissuras;
- Ensaio nº 32: Permeabilidade à água do enchimento de fissuras – Depois do material endurecer para verificar a eficiência da injeção;
- Ensaio nº 33: Grau de enchimento de fissuras – Depois do material endurecer;
- Ensaio nº 44: Aderência do material de enchimento de fissuras ao substrato – Depois do material endurecer.

4.5. Substituição do betão

A reposição do betão consiste na substituição do betão danificado ou contaminado por um material de reparação. Este método, geralmente, pode ser aplicado em todos os processos de deterioração, tendo como objectivo melhorar a capacidade estrutural original do betão degradado ou apenas resolver problemas estéticos. A reparação pode ser localizada ou, em situações extremas, pode optar-se por efectuar a substituição total do elemento.

Os princípios e métodos correspondentes à substituição do betão, definidos na norma ENV 1504-9, são [14]:

- P3 – Substituição do betão deteriorado
 - M3.1 – Betão ou argamassa colocada à mão
 - M3.2 – Nova betonagem
 - M3.3 – Argamassa ou betão projectado
- P4 – Reforço de elementos
 - M4.4 – Encamisamento com betão ou argamassas
- P5 – Aumento da resistência do betão ao desgaste
 - M5.1a – Aplicação de uma superfície de desgaste
 - M5.1b – Aplicação de membranas
- P6 – Aumento da resistência química
 - M6.1a – Aplicação de uma superfície de desgaste
 - M6.1b – Aplicação de membranas
- P7 – Repassivação das armaduras
 - M7.1 – Aumento do recobrimento com betão ou argamassa
 - M7.2 – Substituição do betão contaminado

Os três grupos de materiais utilizados nesta técnica são betão ou argamassa cimentícia, betão ou argamassa cimentícia modificada por polímeros e betão ou argamassa polimérica [10]. A norma EN 1504-3 define os requisitos para a identificação, desempenho e segurança de produtos e sistemas a utilizar na reparação estrutural e não estrutural em estruturas de betão [28]. Além disso, esta norma define 4 classes de resistência para as argamassas de reparação: R1, R2, R3 e R4 [28]. As duas primeiras são relativas à reparação não estrutural e as restantes são para a reparação estrutural (reforço).

É importante referir que a chave para uma boa reparação, em especial neste método, é garantir uma boa aderência entre o material de reparação e o material de base. Assim, é muito importante ter em conta os cuidados já mencionados no capítulo sobre a preparação de superfície.

Segundo a norma EN 1504-10, há três métodos para proceder à colocação do betão: betão ou argamassa colocada à mão, betão ou argamassa projectada e nova betonagem (argamassa seca,

betão ou argamassa injectada, betão moldado ou agregados pré-colocados) [7]. A escolha do método a utilizar vai depender de inúmeros factores tais como: os custos envolvidos, a montagem da cofragem, a orientação da superfície a reparar (vertical, horizontal, etc), a quantidade e qualidade do betão a substituir, restrições de tempo e espaço, entre outras. Nos capítulos seguintes, apresenta-se a preparação de superfície passo a passo, uma breve descrição de cada método de reparação e respectivos procedimentos.

4.5.1. Preparação de superfície

Passo 1: Identificar as zonas delaminadas com o auxílio de um martelo, sendo que quando se bate com o martelo na superfície e o som é oco, então o betão está delaminado nessa área (Figura 30a);

Passo 2: Marcar o perímetro da área a reparar, em que o traçado deverá ser o mais simples e uniforme possível, evitando-se o excesso de cantos e os ângulos agudos, ou seja, a forma do traçado poderá ser quadrangular ou rectangular (Figura 30b);

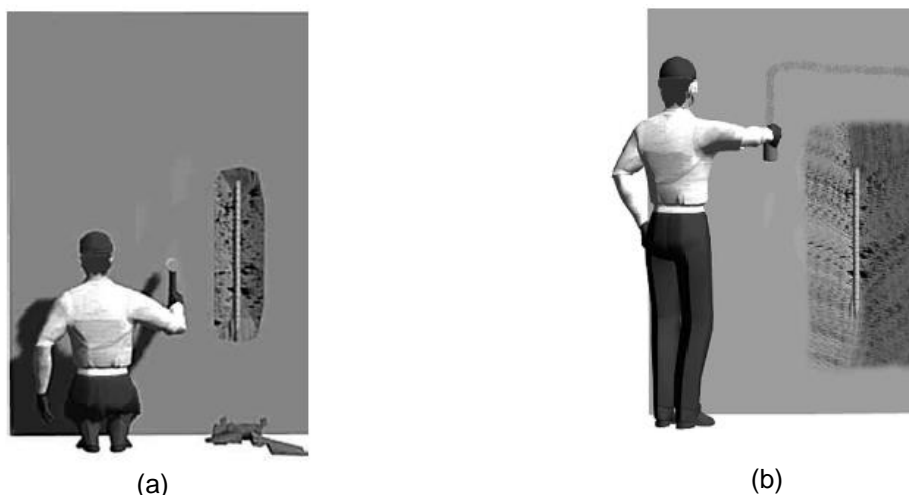


Figura 30 – Preparação da superfície [29]: (a) identificação das zonas delaminadas com um martelo; (b) marcação do perímetro da zona de reparação

Passo 3: Remover o betão deteriorado com um martelo pneumático (Figura 31a) e corte com disco do perímetro definido no passo 2 sem danificar as armaduras (Figura 31b);

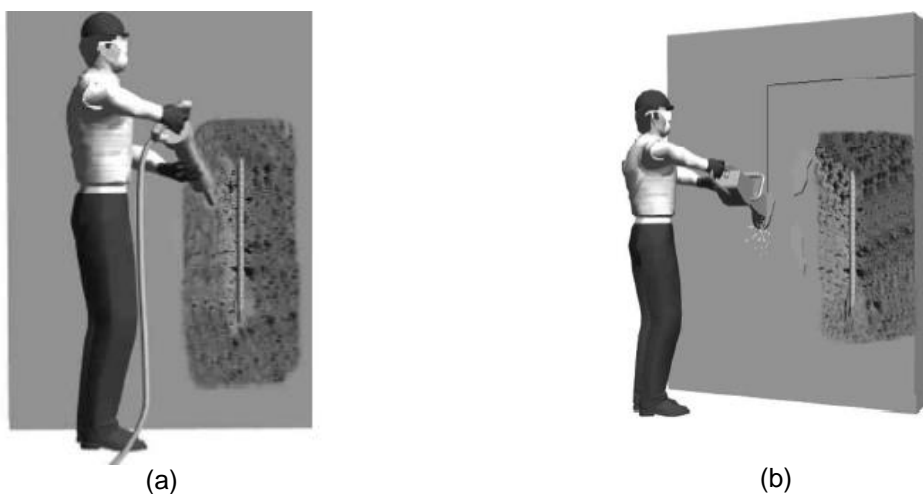


Figura 31 – Preparação da superfície [29]: (a) remoção do betão com um martelo pneumático; (b) corte com disco do perímetro definido no passo 2

Passo 4: Remover o betão envolvente das armaduras corroídas (Figura 32a). Como foi referido anteriormente, a distância mínima entre a armadura e o substrato remanescente deverá ser 15 mm ou a máxima dimensão do agregado de reparação mais 5 mm, adoptando o valor superior;

Passo 5: Limpar as armaduras e o betão recorrendo aos métodos já descritos no capítulo da preparação de superfície (Figura 32b). A norma EN 1504-10 refere que quando se utilizam materiais cimentícios sem um agente de colagem, o betão deverá estar húmido mas com a superfície seca [7].

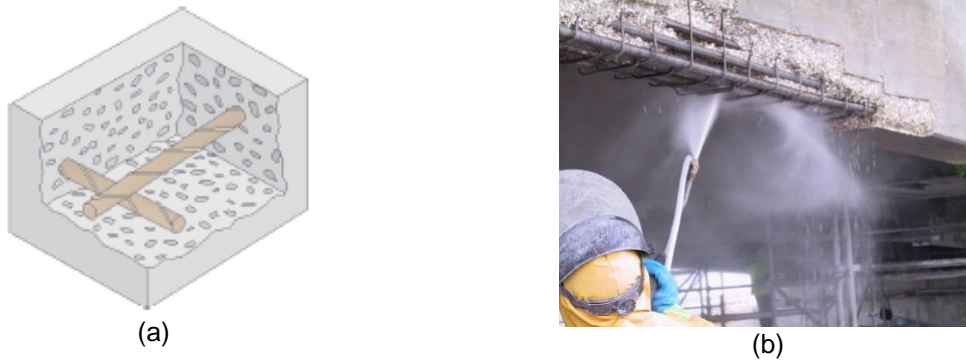


Figura 32 – Preparação da superfície: (a) remoção do betão envolvente das armaduras corroídas [8]; (b) limpeza das armaduras e do betão com jacto de água [26]

4.5.2. Argamassa seca

Este método consiste na colocação de uma argamassa praticamente seca, mas com uma boa coesão de modo a ser moldado numa bola, no interior da zona a ser reparada. O material deve ser colocado em camadas e compactado através de um martelo, como se verifica na Figura 33, para que se crie uma boa ligação entre a argamassa e o betão existente. É importante referir que devido à baixa relação de água/cimento, o material tem pouca retracção e, portanto, tem uma boa durabilidade, resistência e impermeabilidade, podendo ser considerado de boa qualidade.

Esta técnica deve ser usada em cavidades pequenas tais como buracos apertados, na zona inferior das nervuras ou pequenas áreas de ninhos de agregados. Não deve ser utilizada em reparação de defeitos nem em fendas activas.

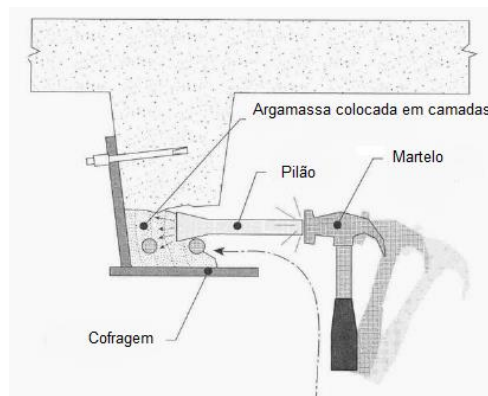


Figura 33 – Argamassa seca adaptado de [2]

4.5.2.1. Procedimento da reparação

Passo 1: Logo após a preparação do substrato, efectua-se a montagem da cofragem com os elementos de fixação ligados à superfície. Nota: Seguir as indicações da norma ENV 13670-1 para execução da cofragem [30].

Passo 2: O material de reparação é misturado, de acordo com a norma ENV 13670-1 [30] e a EN 206-1 [31];

Passo 3: De seguida, aplica-se a primeira camada do material de reparação, sendo compactada em toda a sua superfície através de um pilão de madeira e um martelo. Cada camada deve ter uma espessura igual ou inferior a 10 mm, para que o material fique bem compactado. Além disso, a superfície das camadas devem ter alguma rugosidade, de modo a garantir uma boa ligação à camada seguinte [9]. Segundo a norma EN 1504-10, a colocação do material deve estar de acordo com a norma ENV 13670-1, devendo ser especificado para evitar perda do material, exsudação e segregação [7];

Passo 4: Posteriormente, aplicam-se camadas sucessivas até se atingir a espessura necessária, tendo sempre em consideração as indicações do passo 3. É importante referir que cada camada deve ser colocada imediatamente a seguir à camada anterior e que no caso da camada anterior começar a ganhar presa, deve esperar-se uns 30 a 40 minutos até que esta endureça [32].

Passo 5: Remover a cofragem depois de se efectuar a cura do betão (tendo em consideração as indicações da norma EN1504-10 [7]).

4.5.3. Betão ou argamassa injectada

O betão ou argamassa injectada é um processo que envolve vários passos, incluindo a preparação e construção da cofragem e, de seguida, a bombagem do novo material na zona a ser reparada. Este material fica, então, confinado pela cofragem e pelo material de base, como se pode observar na Figura 34. Normalmente é bastante utilizada em superfícies verticais, em faces inferiores de superfícies horizontais, em secções de grande dimensão ou para preencher grandes cavidades em áreas de acesso difícil.

Esta técnica tem inúmeras vantagens tais como [2]:

- Permite o uso de praticamente qualquer tipo de material de reparação;
- O material de reparação é primeiro misturado e só depois colocado na bomba de modo a fornecer uma secção transversal uniforme sem riscos de segregação ou juntas de betonagem intermédias;
- A colocação não é limitada pela profundidade ou dimensão da reparação nem pela quantidade de armadura existente;
- Todos os materiais são suportados pela cofragem durante a injeção e, posteriormente, durante a cura do mesmo;

- A pressão da bomba exercida na cofragem permite consolidar o material de reparação evitando que existam vazios na zona posterior da armadura; a cofragem protege o material durante o processo da cura;
- Este processo é menos susceptível a erros do operador;
- E é mais fácil de assegurar a garantia de qualidade.

Tendo em conta estas vantagens este método pode ser aplicado em alternativa ao betão projectado, betão ou argamassa aplicado à mão ou agregados pré-colocados [2]. A única limitação na escolha do material é a bombagem do betão, sendo que deverá ter uma certa fluidez. Contudo, é muito importante que o material, apesar de ser fluído, tenha baixa retracção para que a reparação seja durável.

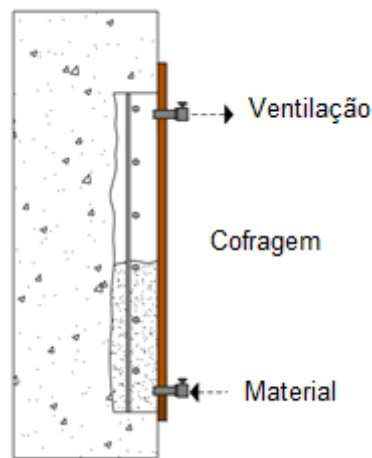


Figura 34 – Betão ou argamassa injectada adaptado de [10]

4.5.3.1. Procedimento da reparação

Passo 1: Logo após a preparação do substrato, efectua-se a montagem da cofragem com os elementos de fixação ligados à superfície (Figura 35a). Nota: Seguir as indicações da norma ENV 13670-1 para execução da cofragem [30]. No entanto, a cofragem deve ser dimensionada para a pressão mínima de 100 kPa e a pressão máxima exercida na cofragem só ocorre depois de a cavidade estar preenchida e pressurizada [33];

Passo 2: Colocação das válvulas de injeção (Figura 35b), espaçadas entre 90 a 120 cm, para ligar a mangueira à bomba [33];

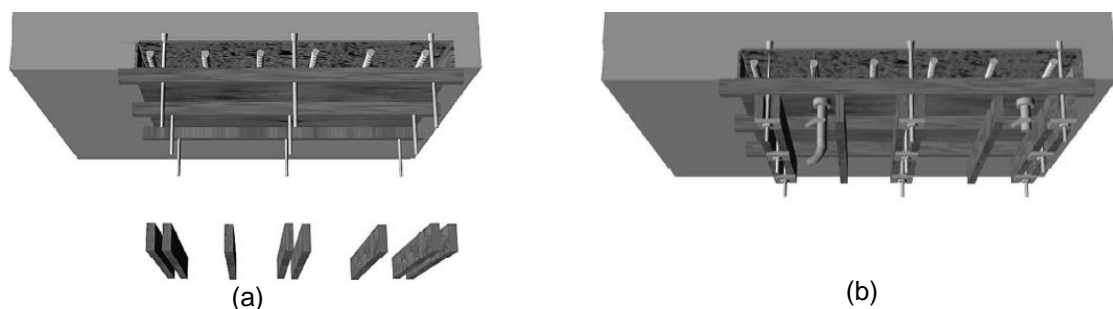


Figura 35 – Betão ou argamassa injectada [33]: (a) montagem da cofragem; (b) colocação das válvulas de injeção

Passo 3: O material de reparação é misturado, de acordo com a norma EN 206-1 [31] e a ENV 13670-1 [30], e é colocado na bomba;

Passo 4: Injecta-se o material de reparação na cavidade (Figura 36a), sendo que em superfícies verticais a sequência da injeção é de baixo para cima e nas zonas da face inferior de elementos horizontais a injeção é feita de uma extremidade para a outra, de modo a remover o ar e a cavidade ficar completamente preenchida (Figura 36b). Segundo a norma EN 1504-10, a colocação do material deve estar de acordo com a norma ENV 13670-1, devendo ser especificado para evitar perda do material, exsudação e segregação [7];

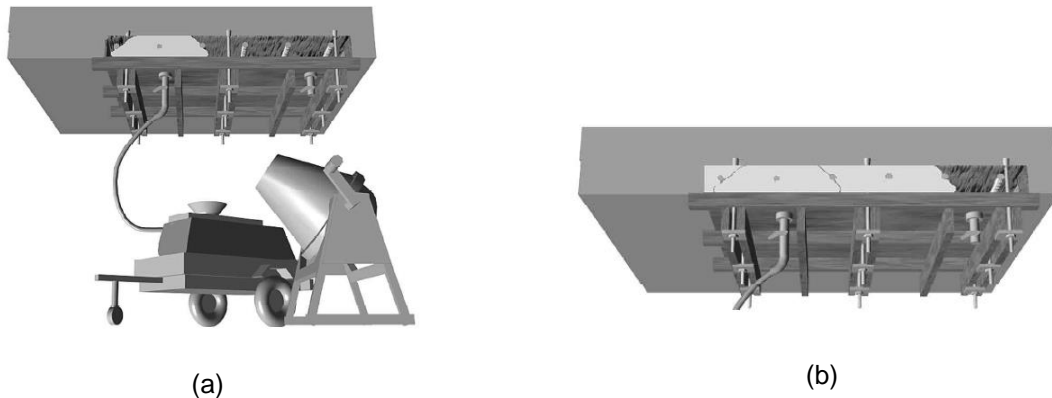


Figura 36 – Betão ou argamassa injectada [33] : (a) sistema pronto para iniciar a injeção do material; (b) material injectado de uma extremidade para a outra

Passo 5: Quando o material começa a sair pela válvula seguinte para expelir o ar, a injeção continua. No entanto, quando a saída do material ocorre sem ar, desliga-se a bomba e a válvula que estava a injectar o material. Seguidamente, liga-se a mangueira à válvula seguinte [33];

Passo 6: Repetir os passos 4 e 5 até que a cavidade esteja completamente preenchida;

Passo 7: Depois de a cavidade estar completamente preenchida, aplica-se uma pressão superior, para consolidar o material de reparação e criar uma boa ligação entre este e o betão remanescente. Nota: É importante ter algum cuidado nesta última pressurização, uma vez que o excesso de pressão exercida na cofragem pode causar o colapso desta [33];

Passo 8: Quando a zona de reparação está completamente preenchida e pressurizada, como se observa na Figura 37, desliga-se a bomba;

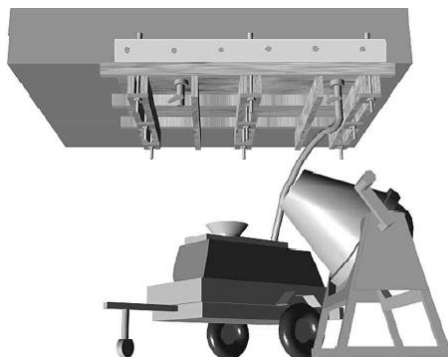


Figura 37 – Cavidade completamente preenchida e pressurizada [33]

Passo 9: Remover a cofragem depois de se efectuar a cura do betão (tendo em conta as indicações da norma EN 1504-10 [7]).

4.5.4. Betão moldado

O betão moldado é uma técnica que envolve a preparação, construção da cofragem e a colocação do material de reparação na zona de reparação. O material de reparação fica entre o material de base e a cofragem, este pode ser colocado recorrendo a baldes, carros de mão, calhas, entre outros. Este processo é bastante utilizado em superfícies verticais e, por vezes, na face inferior de superfícies horizontais. Uma das desvantagens do betão moldado é a instalação da cofragem, que torna esta técnica mais trabalhosa do que outras, tais como o betão projectado ou o betão ou argamassa aplicada à mão. Algumas das vantagens incluem a possibilidade de usar diferentes tipos de materiais de reparação; o material de reparação pode ser colocado à volta da armadura; e a cofragem protege o material evitando a fendilhação devido à retração plástica.

Como já foi referido podem ser usados diferentes tipos de material, no entanto deve ser o mais fluido possível mas com baixa retração. Depois de ser colocado na cavidade, é necessário consolidar o material de reparação de modo a remover o ar e promover uma boa ligação ao substrato existente, recorrendo a vibração interna (Figura 38), apiloamento ou vibração externa através da cofragem. É de notar que quando o material é auto-compactável, não são necessários meios externos para obter a consolidação do mesmo.

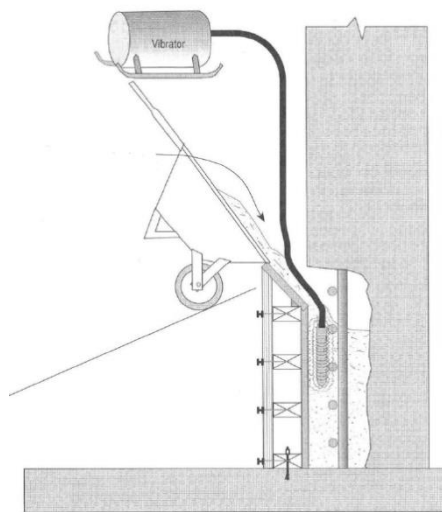


Figura 38 – Betão moldado consolidado recorrendo a vibração interna [2]

4.5.4.1. Procedimento da reparação em zonas de faces inferiores de elementos horizontais

Passo 1: Logo após a preparação do substrato, efectua-se a montagem da cofragem com os elementos de fixação ligados à superfície, sendo que não é necessário fazer aberturas na cofragem, uma vez que a colocação do material é feita através de aberturas por cima da laje (Figura 39a). Nota: Seguir as indicações da norma ENV 13670-1 para execução da cofragem [30];

Passo 2: Fazer a mistura do material de reparação, de acordo com a norma EN 206-1 [31] e a ENV 13670-1 [30], de seguida transportá-lo e colocá-lo na abertura da laje (Figura 39b). Segundo a norma

EN 1504-10, a colocação do material deve estar de acordo com a norma ENV 13670-1, devendo ser especificado para evitar perda do material, exsudação e segregação [7];

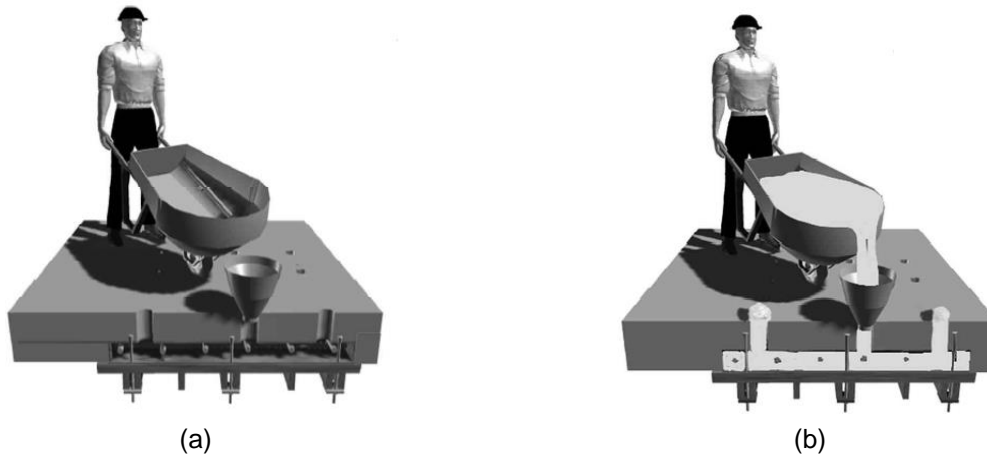


Figura 39 – Betão moldado [29]: (a) Montagem da cofragem e preparação para colocação do material; (b) colocação do material na abertura da laje

Passo 3: Quando a cavidade estiver preenchida, deve recorrer-se a vibração externa, interna (Figura 40) ou apiloamento para consolidar o material de reparação. Se for usado betão auto-compactável, este passo deve ser ignorado;

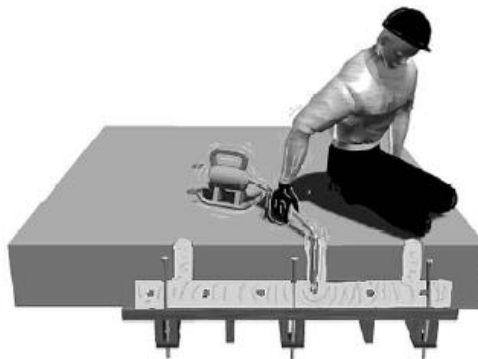


Figura 40 – Consolidação do material através de vibração interna [29]

Passo 4: Depois de se efectuar a cura do betão (tendo em consideração as indicações da norma EN 1504-10 [7]), remove-se a cofragem. Por vezes é difícil conseguir que os espaços fiquem todos preenchidos, assim é necessário aplicar betão ou argamassa seca nessas zonas.

4.5.4.2. Procedimento da reparação em superfícies verticais

Passo 1: Logo após a preparação do substrato, efectua-se a montagem da cofragem com os elementos de fixação ligados à superfície (Figura 41), sendo que é preciso deixar aberturas ou colocar calhas de modo a poder depositar-se o material na zona posterior da cofragem. A norma EN 1504-10 refere que devem proteger-se as aberturas na cofragem, de modo a evitar a entrada de contaminantes [7]. Nota: Seguir as indicações da norma ENV 13670-1 para execução da cofragem [30];

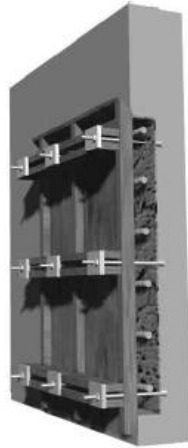
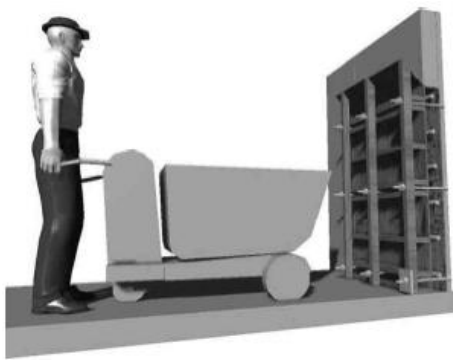


Figura 41 – Montagem da cofragem [29]

Passo 3: Quando a cavidade estiver preenchida, deve recorrer-se a vibração externa, interna (Figura 42b) ou apiloamento para consolidar o material de reparação. A consolidação deverá ser feita por camadas de espessura entre 0.7 m e 1 m [29]. Não esquecer que se for usado betão auto-compactável este passo deve ser ignorado;



(a)



(b)

Figura 42 – Betão moldado [29]: (a) colocação do material; (b) consolidação do material através de vibração interna

Passo 4: Depois de se efectuar a cura do betão (tendo em conta as indicações da norma EN1504-10 [7]), remove-se a cofragem. Por vezes é difícil conseguir que os espaços fiquem todos preenchidos, assim é necessário aplicar betão ou argamassa seca nessas zonas.

4.5.5. Agregados Pré-Colocados

Os agregados pré-colocados são um método de reparação que envolve dois passos essencialmente, sendo que no primeiro colocam-se os agregados na zona a reparar durante a montagem da cofragem e no segundo injecta-se a calda de cimento para preencher os vazios. A Figura 43 representa esquematicamente esta técnica. É utilizado normalmente em superfícies verticais, em faces inferiores de elementos horizontais, em reparações debaixo de água e em áreas de difícil acesso. A grande

vantagem desta técnica é a redução da retracção comparativamente às outras técnicas de betonagem.

Relativamente ao material reparação, a calda de deve conter entre 600 a 900 kg/m³ de cimento e os agregados devem ter dimensão superior a 35 mm para que a calda penetre adequadamente. Assim, esta técnica só deve ser aplicada em secções transversais superiores a 150 mm [10].

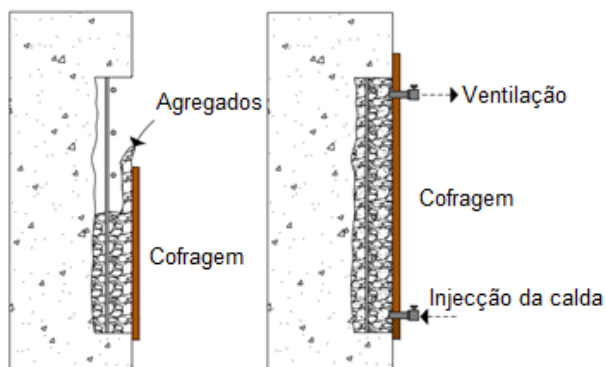


Figura 43 – Agregados pré-colocados adaptado de [10]

4.5.5.1. Procedimento da reparação

Passo 1: Inicia-se a montagem da cofragem com os elementos de fixação ligados à superfície;

Passo 2: Lavam-se os agregados que devem ser de rolados e de granulometria descontínua para facilitar a injeção da calda de cimento (Figura 44a);

Passo 3: Depositam-se os agregados por detrás da cofragem (Figura 44b), não devendo deixar que caiam mais do que 1.5 m, excepto quando a reparação é debaixo de água e os agregados caem através dela [34];

Passo 4: Quando a cavidade está preenchida com os agregados, finaliza-se a montagem da cofragem (Figura 44c). Esta é equipada com válvulas de modo a ligar a mangueira à bomba;

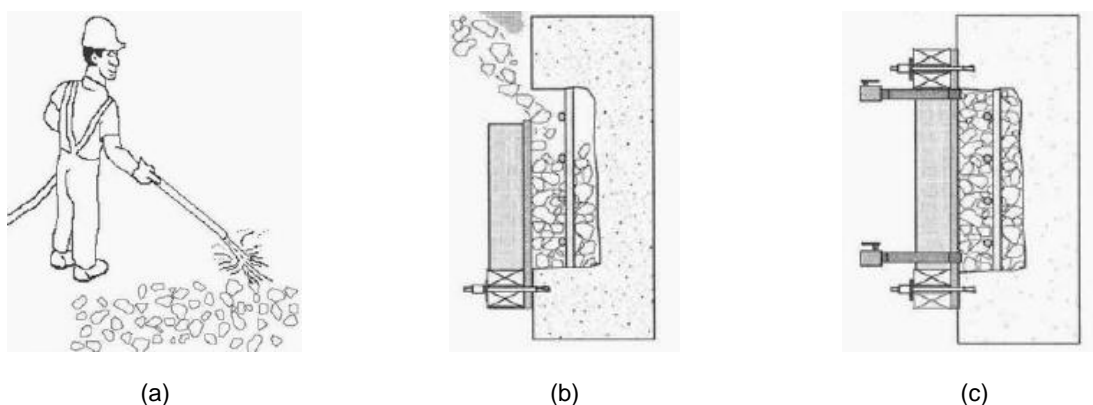


Figura 44 – Agregados pré-colocados [2]: (a) limpeza dos agregados; (b) montagem da cofragem e colocação dos agregados; (c) finalização da montagem da cofragem

Passo 5: Misturar a calda e colocá-la na bomba;

Passo 6: Injectar a calda por baixo na cavidade, de modo a preencher os espaços vazios entre os agregados, como se ilustra na Figura 45. A vibração externa pode ajudar na consolidação, não sendo necessária quando os agregados têm uma granulometria adequada e a calda é de boa qualidade [34];

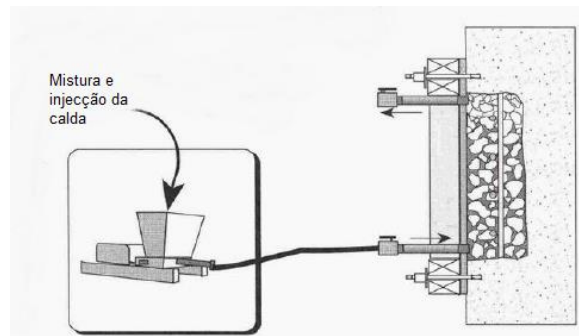


Figura 45 – Mistura e injeção da calda adaptado de [2]

Passo 7: Quando a cavidade estiver preenchida com a calda, deve aumentar-se ligeiramente a pressão para evitar problemas de exsudação e para compactar o material de reparação. No entanto, se começar a sair calda pela cofragem, deve parar-se com a pressão e desligar-se a bomba [34];

Passo 8: Efectuar a cura do betão (tendo em conta as indicações da norma EN 1504-10 [7]) e remover a cofragem.

4.5.6. Betão ou argamassa aplicada à mão

Esta técnica consiste na aplicação de betão ou argamassa por camadas sucessivas em superfícies verticais e em faces inferiores de superfícies horizontais, sendo que é ideal para reparações superficiais. O material de reparação deverá ter baixa retracção para evitar a fendilhação e a delaminação, de modo a que a reparação seja durável. Uma vantagem deste método é que não exige o uso de muito equipamento, mas não deve ser utilizado quando as armaduras estão presentes na zona a reparar, para que se evite a formação de vazios na envolvente delas (Figura 46). Outro problema envolve a má aderência entre as camadas.

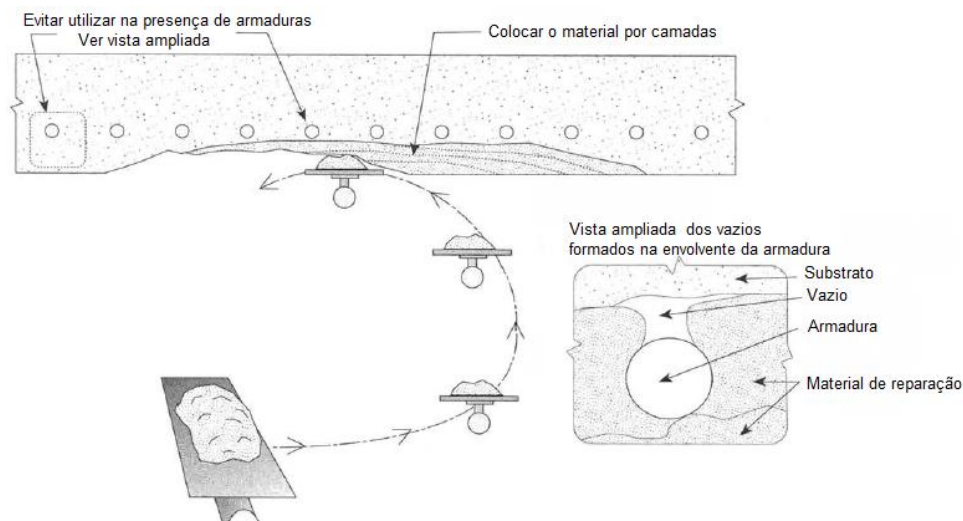


Figura 46 – Betão ou argamassa colocada à mão adaptado de [2]

4.5.6.1. Procedimento da reparação

Passo 1: Fazer a mistura do material de reparação (Figura 47), de acordo com a norma EN 206-1 [31] e a ENV 13670-1 [30];



Figura 47 – Mistura do material de reparação [35]

Passo 2: Aplicar uma camada fina do material de reparação no betão húmido mas de superfície seca para preencher os poros, de modo a melhorar a aderência. Caso se tenha aplicado um primário de ligação, este passo pode ser ignorado;

Passo 3: Logo de seguida, aplica-se a primeira camada do material de reparação com alguma pressão através de uma talocha, para que este fique compactado e sem bolsas de ar;

Passo 4: Posteriormente, aplicam-se as camadas sucessivas necessárias até obter a espessura desejada, como se ilustra na Figura 48. Segundo a norma EN 1504-10, as camadas devem ser aplicadas molhado sobre molhado, ou seja, a primeira camada faz presa mas não endurece antes de se aplicar a segunda camada. No entanto, se a aplicação das camadas for interrompida, a camada anterior deverá ser preparada novamente antes de se aplicar a camada seguinte [7] (repetir o passo 5 preparação de superfície e o passo 2 da reparação). Nota: É importante envolver o máximo possível as armaduras no novo material, para evitar a formação de vazios e não por em causa a durabilidade da reparação;



Figura 48 – Aplicação do material de reparação [35]

Passo 5: Nivelar a última camada com o betão adjacente;

Passo 6: De seguida, efectuar a cura do betão (tendo em consideração as indicações da norma EN 1504-10 [7]).

4.5.7. Betão projectado

Nesta técnica o betão é projectado sob pressão a alta velocidade, na superfície previamente preparada, combinando-se, assim, os processos de colocação e compactação. A grande vantagem do betão projectado é que se evita a montagem de cofragens. No entanto, é necessário ter algum cuidado com as armaduras, uma vez que como a projecção é feita na perpendicular à superfície, a parte que está por detrás das armaduras pode não ficar devidamente preenchida, o que origina a formação de vazios, como se observa na Figura 49. Outra desvantagem deste método de reparação é a perda de material por ricochete, especialmente agregados, sendo que, por este motivo, é necessário que a mistura tenha um elevado teor de cimento, levando a que tenha problemas de retracção, que origina fendilhação.

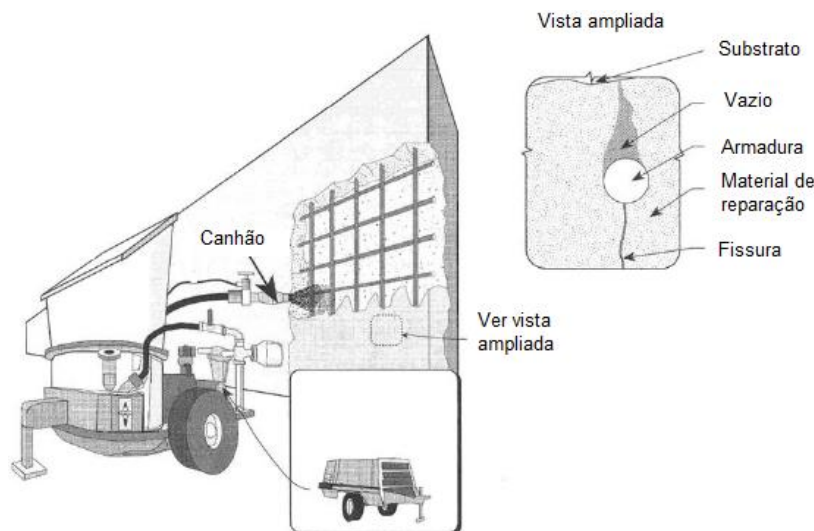


Figura 49 – Betão projectado adaptado de [2]

O betão pode ser aplicado por via seca ou via húmida. A mistura do material de reparação na via seca contém cimento, agregados e, eventualmente, adições e adjuvantes. Esta mistura é transportada seca por toda a extensão da mangueira, até ao canhão, onde é adicionada água, de modo a promover a hidratação da mistura. Por outro lado, na via húmida a água é logo adicionada na mistura do material de reparação, a mistura húmida é transportada pela mangueira, até ao canhão, onde é introduzido ar adicional para aumentar a velocidade de projecção.

As vantagens e desvantagens da via seca são as seguintes [36]:

- Pressão de projecção elevada, promovendo uma excelente ligação entre o material de reparação e o material base;
- Exige uma mão-de-obra especializada;

- Perda de material por ricochete é muito elevada, o que leva a uma rentabilidade de produção mais baixa.
- Trabalho muito poluente;
- Custo de manutenção do equipamento é mais baixo.

As vantagens e desvantagens da via húmida são as seguintes [36]:

- Melhor controlo da composição do material, uma vez que a água é adicionada na mistura;
- Pressão de projecção inferior, ou seja a aderência entre o material de reparação e o material base é inferior à da via seca;
- Exige mão-de-obra menos especializada;
- Perda do material por ricochete é menor do que a via seca, promovendo uma elevada rentabilidade de produção;
- Trabalho menos poluente;
- Custo de manutenção do equipamento é mais elevado.

4.5.7.1. Procedimento da reparação

Passo 1: Fazer a mistura do material de reparação, de acordo com a norma EN 206-1 [31] e a ENV 13670-1 [30]. O material de reparação deve satisfazer a norma para betão projectado (EN 14487-1:2005 [37] e EN 14487-2:2006 [38]). No caso da reparação por via seca, a mistura é feita sem água e no caso da reparação por via húmida, a mistura é feita com água;

Passo 2: Introduzir apenas ar pela mangueira e comprovar o percurso correcto até à saída do canhão;

Passo 3: Colocar o material de reparação na máquina de projecção, esta é transportada por ar comprimido, através da mangueira até ao canhão.

Passo 4: Via seca: Introduzir a água em quantidade adequada para que esta promova a hidratação da mistura. Via húmida: Introduzir ar adicional para aumentar a velocidade de projecção;

Passo 5: Iniciar a projecção do material de reparação o mais perpendicular à superfície, sempre que possível (Figura 50). A aplicação do jacto deve ser feita numa sequência uniforme de ovais e círculos, no mesmo sentido, sendo que a distância entre o substrato e o canhão deverá estar entre 0.5 e 1 m [7].

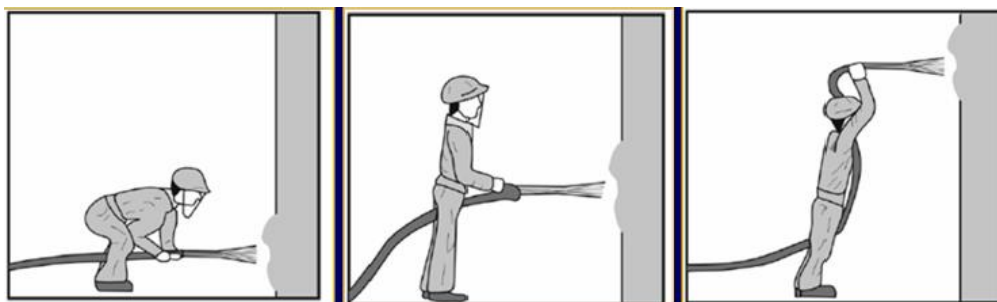


Figura 50 – Exemplos de correcta execução da projecção do betão [23]

Começa-se pelos cantos (Figura 51a) para que não se acumulem materiais naquelas zonas e o canhão deve ser apontado para a bissetriz do ângulo formado, como se ilustra na Figura 51b;

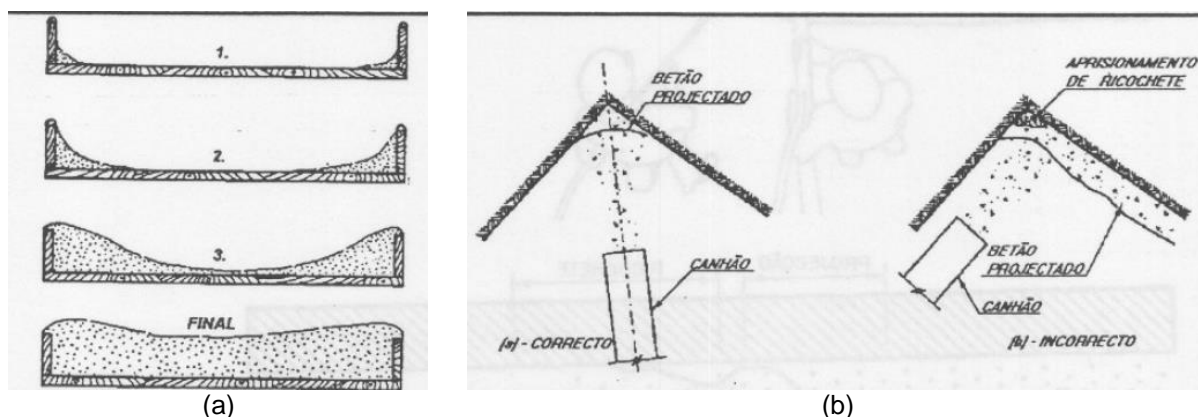


Figura 51 – Betão projectado [39]: (a) sequência para betonagem de cantos; (b) critério para betonagem nos cantos

Passo 6: Continuar a projecção para as restantes zonas do substrato (Figura 52). É importante salientar que é preciso ter cuidado com as armaduras, de modo a que fiquem completamente envolvidas no novo material. Quando é aplicada mais que uma camada, estas devem ser feitas molhadas sobre molhadas [7]. Se tal não for possível, deve limpar-se a camada anterior e, de seguida, aplicar um primário de ligação. Se a espessura das camadas for superior a 70 mm, pode ser necessário acrescentar armaduras para evitar a fendilhação [7];



Figura 52 – Betão projectado [26]

Passo 7: Remover o excesso de material com uma talocha, depois do betão iniciar a presa;

Passo 8: Efectuar a cura do betão (tendo em conta as indicações da norma EN1504-10 [7]).

4.5.8. Controlo

A norma EN 1504-10 define uma série de ensaios para verificar a qualidade dos produtos e sistemas utilizados ao longo da substituição do betão. Seguidamente apresentam-se alguns dos ensaios a realizar [7]:

- Ensaio nº1: Delaminação – Antes da aplicação da reparação e depois o material de reparação ter endurecido para verificar a eficiência da reparação;

- Ensaio nº2: Limpeza – Depois da preparação do substrato e imediatamente antes da aplicação da reparação;
- Ensaio nº4: Rugosidade;
- Ensaio nº5: Resistência à tracção superficial do substrato;
- Ensaio nº11: Ensaio de carbonatação;
- Ensaio nº12: Ensaio de cloretos;
- Ensaio nº13: Penetração de outros contaminantes;
- Ensaio nº35: Aderência de materiais de reparação – Uma vez em cada superfície reparada;
- Ensaio nº36: Resistência à compressão – Depois do material de reparação endurecer;
- Ensaio nº38: Retracção e fendilhação dos materiais de reparação – Depois do material de reparação endurecer para verificar a eficiência.

5. Caso Prático

Para possibilitar um melhor entendimento acerca dos mecanismos de deterioração e dos métodos de protecção e reparação, será elaborada neste capítulo uma proposta de intervenção para a reparação dos Pórticos das Pontes Rolantes de um estaleiro naval em Portugal. Para tal, em primeiro lugar serão analisadas as anomalias da estrutura através de uma inspecção visual e uma inspecção detalhada recorrendo a determinados ensaios realizados anteriormente.

5.1. Descrição da estrutura e da sua envolvente

Os Pórticos das Pontes Rolantes (Figura 53) são constituídos por quatro vigas apoiadas em pilares, permitindo o funcionamento das duas pontes rolantes, em que os pilares estão dispostos em três alinhamentos. No alinhamento central os pilares apoiam duas vigas e nos laterais apoiam numa viga. Além disso, existem juntas de dilatação espaçadas de 30 em 30 m nas vigas.



Figura 53 – Pontes Rolantes de um estaleiro naval em Portugal

O comprimento total das vigas é 1600 m, apoiadas num conjunto de 118 pilares espaçados de 10 em 10 m. Os pilares e as vigas são em betão armado e a estrutura está exposta ao ambiente marítimo XS1 e XC4. A obra foi construída em 1973/1974 e ao longo dos anos várias obras deste estaleiro evidenciaram marcas de deterioração. A inspecção visual e os ensaios foram realizados 25 anos depois da sua construção.

5.2. Descrição das anomalias

Em primeiro lugar é necessário fazer uma avaliação do estado da estrutura, de modo a definir o tipo, as causas e o nível da deterioração. Para tal, é importante fazer uma inspeção visual à estrutura e uma inspeção mais detalhada através de alguns ensaios.

Através da inspeção visual foi possível detectar que o problema de deterioração estava relacionado com a má execução ao nível das juntas, as espessuras de recobrimento inferiores ao mínimo recomendado, a fraca qualidade do betão utilizado aquando da sua construção e o facto de a estrutura se inserir num ambiente marítimo agressivo (XS1).

De seguida apresentam-se algumas figuras que ilustram a deterioração da obra em causa:

Na Figura 54 está ilustrada a deterioração das vigas e consolas nas juntas de dilatação. Esta deterioração está relacionada com o mau funcionamento da junta, uma vez que as vigas estão ligadas às consolas através de ferrolhos. Estes impedem o livre movimento da estrutura, que conduz ao mau funcionamento das juntas, gerando forças de tracção que causam a fendilhação da viga. Note-se que neste caso se trata de um problema estrutural.



Figura 54 – Deterioração das vigas e consolas nas juntas de dilatação

Na Figura 55 observa-se a segregação do betão nos pilares. Esta problemática advém da deficiente execução e da fraca qualidade do betão utilizado durante a construção dos pilares.



Figura 55 – Segregação dos pilares nas juntas de betonagem, devido à má execução durante a construção

A Figura 56 representa a deterioração dos pilares, onde se evidencia a concentração da corrosão das armaduras nos cantos salientes. Isto deve-se ao efeito de canto causado pela penetração dos cloretos e dióxido de carbono nas duas direcções do pilar.



Figura 56 – Deterioração dos pilares

A Figura 57 evidencia o recobrimento reduzido das armaduras, sendo que se percebe que houve um problema de má execução durante a betonagem com os espaçadores (estes tem a função de garantir o recobrimento da armadura durante a betonagem).



Figura 57 – Armaduras com recobrimento reduzido

Depois de se analisar a estrutura visualmente, concluiu-se que as anomalias observadas, em relação à deterioração dos materiais, foram a delaminação do betão e a corrosão das armaduras. Além disso, detectou-se um problema estrutural relacionado com o funcionamento inadequado nas juntas de dilatação.

A inspecção detalhada consiste na avaliação da deterioração e, como já foi referido, para tal recorrem-se a alguns ensaios, nomeadamente o de recobrimento das armaduras, perfil de penetração de cloretos, penetração da carbonatação, resistividade do betão e velocidade de corrosão. Note-se que os três primeiros ensaios caracterizam a fase de iniciação da deterioração e os restantes a fase de propagação.

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos e uma breve análise com possíveis justificações para cada um dos ensaios.

- Profundidade da carbonatação

Este ensaio deve ser realizado em qualquer ambiente de exposição. Nas vigas, a profundidade de penetração da carbonatação obtida foi de 6 a 11 mm e nos pilares foi de 14 a 28 mm. A diferença da profundidade de carbonatação dos pilares varia em mais do dobro do que nas vigas. Esta diferença pode dever-se ao facto do betão das vigas ser de qualidade superior ao dos pilares. De facto como já tinha sido referido, os pilares estão bastante deteriorados e com problemas de segregação que se devem a uma execução inadequada e à deficiente qualidade do betão utilizado durante a construção da estrutura.

- Espessura do recobrimento das armaduras

Este ensaio é muito importante para determinar a espessura de recobrimento das armaduras e verificar se essa espessura está dentro dos limites. Um bom recobrimento, mesmo em ambientes mais agressivos, pode controlar a penetração dos agentes agressivos e, assim, dificultar o processo de corrosão das armaduras. Nas vigas, a espessura do recobrimento obtida foi de 10 a 30 mm e nos pilares foi de 20 a 50 mm. Normalmente a espessura do recobrimento entre pilares e vigas não varia muito, mas neste ensaio obteve-se uma grande diferença de valores. Esta discrepância pode estar relacionada com um problema de deficiente execução durante construção. Conclui-se que os valores apresentados são inferiores aos mínimos recomendados na regulamentação actual.

- Perfis de penetração de cloretos

Este ensaio é fundamental em estruturas expostas ao ambiente marítimo. As Figuras 58a e 58b ilustram os perfis de penetração de cloretos nas faces norte e nascente e sul e poente, respectivamente.

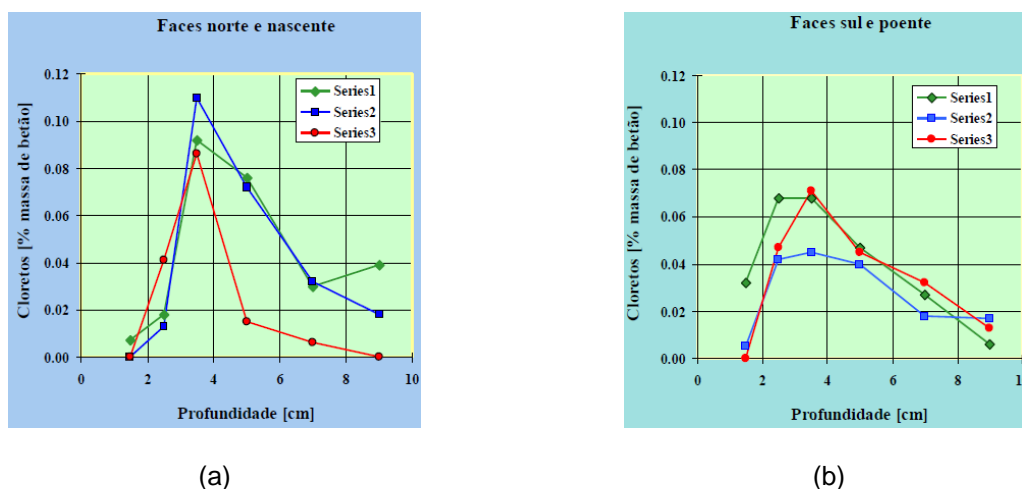


Figura 58 – Perfis de penetração de cloretos nas faces: (a) norte e nascente; (b) sul e poente

Observando os resultados obtidos conclui-se que o teor de cloretos nas faces norte e nascente é superior ao teor de cloretos nas faces sul e poente. Isto acontece porque usualmente quando chove o vento predominante é de Sul e Poente. Assim, quando chove nestas faces (sul e poente) os cloretos que estão depositados à superfície são lavados, conduzindo a uma redução do teor de cloretos livres nos poros do betão. Por outro lado, as faces norte e nascente não têm essa incidência do vento e, portanto, os cloretos acumulam-se nessas faces. Logo, era expectável que o teor de cloretos nestas faces fosse superior ao das faces sul e poente.

Verifica-se que, o perfil está invertido na camada junto à superfície (Figuras 58 e 59). Isto está relacionado com dois efeitos. Em primeiro lugar, alguns dos cloretos são lavados e outros penetram na superfície misturados com a água da chuva, o que dá origem a picos de cloretos mais para o interior do betão. O segundo efeito tem a ver com a carbonatação. O processo da penetração dos cloretos é acelerado, uma vez que quando ocorre a carbonatação, os cloretoaluminatos são decompostos e, assim, os cloretos ficam livres, penetrando para o interior.

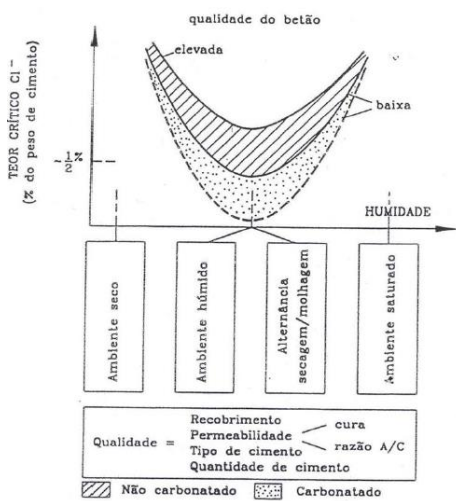


Figura 59 – Efeito da qualidade do betão e do ambiente de exposição no teor crítico dos cloretos [6]

Como mencionado no capítulo da contaminação por cloretos, o teor crítico de cloretos no betão, geralmente, toma o valor de 0,4% do peso de cimento. No entanto, os valores obtidos nas figuras são relativos à percentagem de massa de betão. Um betão corrente tem 300 kg de cimento por m³, sendo que a massa de cimento é 1/8 da massa de betão. Como tal, o teor crítico de cloretos nestas condições toma valor de 0,05% do peso de betão. Observando novamente os valores obtidos conclui-se que o teor de cloretos presentes na estrutura é superior ao valor crítico, mas não é uma quantidade muito elevada. Note-se que este valor (0,4% do peso de cimento) é apenas uma referência, sendo preciso analisar todos os parâmetros que influenciam este parâmetro (Figura 59).

- Resistividade do betão

Este ensaio tem interesse por fornecer informação relacionada com a velocidade de corrosão. A resistividade do betão depende do seu teor de humidade, sendo que quando o teor de humidade é

elevado, a resistividade diminui. Nas vigas, a resistividade do betão obtida foi de 5 a 30 k Ω .cm e nos pilares foi de 11 a 67 k Ω .cm. Note-se que este ensaio foi medido na Primavera quando o ambiente estava mais seco. Como os valores da resistividade são relativamente altos, é de esperar que a velocidade de corrosão seja reduzida.

- Velocidade de corrosão

A velocidade de corrosão obtida no ensaio foi de 0.9 a 2 μ m/ano, sendo que é um valor relativamente baixo. Este valor está de acordo com os valores obtidos no ensaio da resistividade do betão, pois como o ensaio foi feito na Primavera, com humidades relativas mais baixas, a velocidade de corrosão é controlada pelo electrolítico, isto é, pela resistividade do betão. A resistividade do betão obtida anteriormente foi relativamente elevada, conduzindo a uma condutividade reduzida e, portanto a velocidade de corrosão diminui.

No caso de se querer ter uma visão mais abrangente relativamente à velocidade de corrosão, devem fazer-se vários ensaios durante diferentes épocas do ano, nomeadamente um em cada estação.

5.3. Proposta de intervenção

Face às anomalias acima referidas, é necessário escolher os métodos de intervenção para repará-las. Relativamente à corrosão das armaduras (devido à contaminação por cloretos e por carbonatação), podem seguir-se vários caminhos tais como a substituição dos elementos deteriorados, a redução ou anulação da velocidade de corrosão ou demolir e conceber uma estrutura nova. Esta última opção não tem interesse, uma vez que esta estrutura pode ser reparada.

A velocidade de corrosão pode ser reduzida ou anulada, actuando no ânodo, no cátodo ou no electrolito, uma vez que se um deles falhar, não ocorre corrosão. No ânodo é possível fazer a repassivação das armaduras (através da substituição do betão contaminado, realcalinização ou extracção electroquímica de cloretos), controlo das zonas anódicas (através de uma protecção por pintura ou inibidores de corrosão) ou a protecção catódica (activa ou passiva). No cátodo, o objectivo é limitar a penetração do oxigénio (através da saturação do betão ou aplicação de uma membrana), no entanto esta opção por ser muito difícil de aplicar em obra, não é viável. Por fim, no electrolito pode aumentar-se a resistividade (reduzindo o teor em água nos poros do betão com uma protecção superficial) e, deste modo, reduzir a condutividade eléctrica.

As vantagens dos métodos electroquímicos relativamente aos métodos tradicionais são que se evita a remoção do betão contaminado (não delaminado) e têm resultados mais duradouros, sendo bastante eficazes no controlo da corrosão ao longo do tempo. No entanto, os custos da intervenção são, em geral, mais elevados do que nos métodos tradicionais. A realcalinização não é uma opção a considerar, porque além da carbonatação, a corrosão das armaduras também se deve à presença de cloretos. Neste caso a protecção catódica poderia ser aplicada, mas por exigir uma manutenção significativa ao longo do tempo e um custo elevado, optou-se por não aplicá-la. Por fim, a extracção

electroquímica de cloretos era uma opção viável, uma vez que remove os cloretos e aumenta o pH da estrutura, além disso não requer a monitorização periódica como a protecção catódica, embora também tenha custos significativos. Entre a extracção electroquímica de cloretos e a substituição total do betão contaminado, faria mais sentido optar pela primeira opção, porque se a reparação não remover todo o betão contaminado, podem formar-se novas zonas de corrosão nas regiões adjacentes às reparadas, conduzindo à continuação da deterioração.

Em relação ao controlo das zonas anódicas, a protecção por pintura é aplicada em estruturas novas e os inibidores de corrosão são produtos adicionados que controlam a despassivação da armadura, atrasando o processo de corrosão. Estes últimos também não se aplicam neste caso, porque as armaduras já se encontram despassivadas.

Por fim, pode optar-se por aplicar uma protecção superficial para manter o teor de água reduzido e diminuir a velocidade de corrosão, sendo que é uma técnica eficaz que envolve alguns riscos mas detém um custo muito inferior quando comparado com os métodos anteriores. Esta técnica só é viável porque a contaminação por cloretos não é muito elevada e a velocidade de corrosão é relativamente baixa como se verificou nos ensaios realizados. Além disso, este método também vai impedir a penetração de agentes agressivos na superfície, de modo a evitar que a deterioração volte a ocorrer. É importante referir que só pode ser aplicado um revestimento, porque no caso de se aplicar uma impregnação hidrófoba, a velocidade de carbonatação poderá aumentar (este tipo de impregnação permite a difusão do dióxido de carbono e reduz o teor de água do betão).

Assim, optou-se por controlar a corrosão das armaduras através da aplicação de um sistema de protecção de superfície nas zonas em que o betão está contaminado. Nas zonas em que o betão está delaminado, o betão deverá ser removido e substituído por um de boa qualidade e com recobrimento adequado (no fim da reposição do betão pode aplicar-se uma protecção superficial para impedir a penetração de agentes agressivos, para evitar que a corrosão volte a aparecer). Nas juntas de dilatação é necessário substituir e reforçar as vigas e as consolas. No entanto, o reforço estrutural está fora do âmbito deste trabalho, por isso não vai ser abordado.

5.3.1. Preparação da superfície

Como foi mencionado nos capítulos anteriores, antes de se proceder à reparação, é necessário preparar o substrato de betão, para garantir uma boa ligação entre o novo material de reparação e o betão existente. Em suma, é importante remover o betão delaminado, limpar a superfície e as armaduras, de modo a que o substrato fique limpo, são e com uma textura rugosa.

Em primeiro lugar identificam-se as zonas delaminadas por percussão com um martelo sabendo que quando o som é oco, indica a presença de delaminação ou chochos. De seguida, marca-se o perímetro da área a reparar, tendo em consideração que o traçado deverá ser o mais simples e uniforme possível, sem excesso de cantos e ângulos agudos (Figuras 60a e 60b). Depois corta-se

com um disco o perímetro definido anteriormente, evitando sempre danificar as armaduras (Figura 60c).

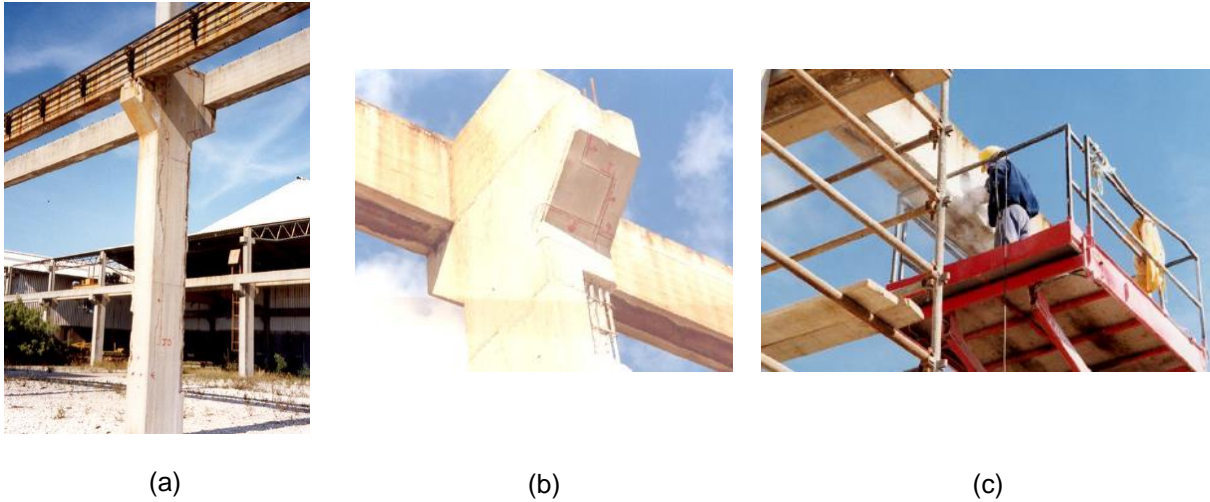


Figura 60 – Preparação da superfície: (a) e (b) marcação do perímetro das zonas a remover; (c) corte com disco do perímetro marcado

O betão deteriorado pode ser removido por hidrodemolição ou com um martelo pneumático com cuidado para não danificar a superfície (nas zonas de difícil acesso). A Figura 61 ilustra a remoção do betão com martelo pneumático. Além disso, note-se que quando o betão é removido, é necessário tomar as precauções necessárias para manter a segurança estrutural da estrutura, sendo para isso importante avaliar as condições de segurança antes e durante a reparação.



Figura 61 – Remoção do betão com martelo pneumático

O betão que envolve as armaduras corroídas também deve ser removido (Figura 62), de modo a expor a totalidade das armaduras, sendo que a distância mínima entre a armadura e o substrato remanescente deverá ser 15 mm ou a máxima dimensão do agregado de reparação mais 5 mm, adoptando o valor superior.

Por fim, procede-se à limpeza das armaduras e à limpeza da superfície do betão. Para tal, nas áreas maiores as armaduras são limpas através de jacto de areia seca (como foi mencionado anteriormente, este método é muito eficaz, uma vez que consegue limpar na zona atrás das

armaduras, através do ricochete) e nas áreas pequenas recorre-se a uma escova de aço. Esta limpeza permite remover a ferrugem, poeiras e outros materiais prejudiciais que contribuem para a corrosão das armaduras. A superfície de betão deve ser limpa recorrendo a decapagem com jacto de água, para remover todo o tipo de sujidades superficiais, poeiras, óleos, entre outros.



Figura 62 – Remoção do betão na envolvente das armaduras

5.3.2. Procedimento de reparação

Assim que a preparação da superfície estiver concluída, pode aplicar-se a reparação do betão. A reposição do betão fez-se através de betão moldado nas consolas e nas faces inferiores das vigas e com betão projectado nas faces dos pilares. O material utilizado nesta reparação foi um betão de classe de resistência C35/45. No sistema de protecção superficial optou-se por um revestimento por pintura que impeça o ingresso de substâncias agressivas e que aumente a resistividade eléctrica do betão. Este revestimento cumpre as características mínimas definidas na norma EN 1504-2.

Conforme o que foi explicado na proposta de intervenção, apresentam-se de seguida os princípios e os métodos escolhidos para esta reparação, definidos na norma EN 1504-9:

- Alteração e reforço das consolas e vigas nas juntas de dilatação
 - P3 – Substituição do betão deteriorado
 - M3.2 – Nova betonagem
 - P4 – Reforço de elementos
 - M4.4 – Encamisamento com betão ou argamassas
- Reparação das zonas delaminadas
 - P3 – Substituição do betão deteriorado
 - M3.2 – Nova betonagem
 - M3.3 – Argamassa ou betão projectado
 - P7 – Repassivação das armaduras
 - M7.2 – Substituição do betão contaminado
- Protecção do betão contra as substâncias agressivas
 - P1 – Protecção contra substâncias agressivas
 - M1.7 – Protecção superficial com pintura

- Protecção das armaduras contra a corrosão
 - P8 – Aumento da resistividade eléctrica do betão
 - M8.1 – Controlo da humidade do betão com revestimentos superficiais

5.3.2.1. Procedimento da reparação das zonas delaminadas com betão projectado (pilares)

O método utilizado foi o betão projectado por via seca, escolheu-se esta via uma vez que os custos de equipamento são mais reduzidos e porque a pressão de projecção é mais elevada, garantindo uma melhor aderência entre o material de reparação e o material existente do que a projecção por via húmida. Em primeiro lugar faz-se a mistura do material de reparação de acordo com as normas já mencionadas. De seguida introduz-se apenas ar pela mangueira, para comprovar o percurso correcto até à saída do canhão. O material é colocado na máquina de projecção e introduz-se a água numa quantidade adequada para promover a hidratação da mistura. De seguida inicia-se a projecção do material de reparação o mais perpendicular à superfície, sempre que possível. Note-se que é importante seguir todas as recomendações referidas anteriormente no capítulo do procedimento do betão projectado. Depois de aplicar todo o material de reparação por projecção, assim que se iniciar a presa, deve remover-se o excesso do material com uma talocha. De seguida efectua-se a cura, tendo em conta as indicações da norma EN1504-10 [7]. Na Figura 63 observa-se o aspecto da estrutura depois de se substituir o betão cortado com betão projectado.



Figura 63 – Reposição do betão cortado com betão projectado nas faces dos pilares

De seguida, procede-se à limpeza da superfície com jacto de água (Figura 64a), de modo a poder-se aplicar o revestimento. Em primeiro lugar, prepara-se a mistura do material, tendo em consideração as recomendações da norma EN 1504-10 [7]. Depois aplica-se um primário com um pincel. Por fim, aplica-se o material de protecção com uma talocha, sendo que as camadas podem ser aplicadas molhado sobre molhado. Na Figura 64b está ilustrado o aspecto da estrutura depois de ser aplicada a protecção superficial.



(a)



(b)

Figura 64 – (a) Limpeza da superfície com jacto de água e (b) aplicação de um revestimento superficial por pintura

5.3.2.2. Procedimento da reparação das zonas delaminadas com betão moldado (vigas e consolas)

Nestas zonas optou-se pelo betão moldado em vez do betão projectado, porque nesta técnica o material de reparação consegue ser colocado na envolvente das armaduras. Em primeiro lugar, logo que a preparação da superfície esteja concluída, efectua-se a montagem da cofragem, tendo em consideração que é necessário deixar aberturas para poder depositar-se o material na zona posterior da cofragem e seguir as indicações das normas já mencionadas. De seguida, faz-se a mistura do material de reparação, considerando as normas referidas no capítulo relativo ao betão moldado. O material deve ser colocado na abertura da cofragem e assim que a cavidade estiver preenchida deve recorrer-se a vibração interna, de modo a consolidar o material de reparação. Depois efectua-se a cura do betão e remove-se a cofragem.

De seguida, procede-se à limpeza da superfície com jacto de água, para se poder aplicar o revestimento, sendo que o procedimento é análogo ao executado no capítulo anterior.

5.3.2.3. Procedimento da reparação das zonas contaminadas por aplicação de um revestimento

Em primeiro lugar, assim que a preparação do substrato esteja concluída (neste caso era só limpar-se o betão com recurso a decapagem por jacto de água), deve aplicar-se o revestimento. Prepara-se a mistura do material, tendo em conta que deve ser um material que reduza a permeabilidade do betão e que impeça o ingresso de agentes agressivos. Além disso, é necessário seguir as recomendações da norma EN 1504-10 [7]. De seguida, deve aplicar-se uma primeira camada para regularizar a superfície e tapar os vazios existentes. Depois aplica-se um primário com um pincel. Por fim, aplica-se o material de protecção comum rolo, sendo que as camadas podem ser aplicadas molhado sobre molhado.

5.3.3. Controlo

Como foi mencionado ao longo do trabalho, a norma EN 1504-10 define uma série de ensaios para verificar a qualidade dos produtos e sistemas utilizados antes, durante e após as reparações [7]. De seguida apresentam-se os ensaios a realizar em cada sistema utilizado:

- Reposição do betão com nova betonagem (betão moldado) ou com betão projectado:
 - Ensaio nº1: Delaminação – Antes da aplicação da reparação e depois o material de reparação ter endurecido para verificar a eficiência da reparação;
 - Ensaio nº2: Limpeza – Depois da preparação do substrato e imediatamente antes da aplicação da reparação;
 - Ensaio nº4: Rugosidade;
 - Ensaio nº 5: Resistência à tracção superficial do substrato;
 - Ensaio nº11: Ensaio de carbonatação;
 - Ensaio nº12: Ensaio de cloretos;
 - Ensaio nº13: Penetração de outros contaminantes;
 - Ensaio nº35: Aderência de materiais de reparação – Uma vez em cada superfície reparada;
 - Ensaio nº36: Resistência à compressão – Depois do material de reparação endurecer;
 - Ensaio nº38: Retracção e fendilhação dos materiais de reparação – Depois do material de reparação endurecer para verificar a eficiência.

- Protecção superficial com revestimento:
 - Ensaio nº1: Delaminação – Antes da aplicação do revestimento;
 - Ensaio nº2: Limpeza – Depois da preparação do substrato e imediatamente antes da aplicação do revestimento;
 - Ensaio nº3: Regularidade da superfície – Antes da aplicação do revestimento;
 - Ensaio nº4: Rugosidade;
 - Ensaio nº 5: Resistência à tracção superficial do substrato;
 - Ensaio nº 9: Teores de humidade do substrato – Antes e durante a aplicação do revestimento;
 - Ensaio nº 26: Espessura molhada do revestimento – Depois da aplicação do revestimento;
 - Ensaio nº 32: Permeabilidade à água – Depois do material endurecer para verificar a eficiência da protecção;
 - Ensaio nº 35: Aderência de revestimentos – Depois do material endurecer.

6. Conclusão

O objectivo primordial deste trabalho consistiu num levantamento das normas e recomendações mais recentes no âmbito dos procedimentos de execução da reparação de estruturas de betão e na sua aplicação numa proposta de intervenção da reabilitação de uma estrutura sujeita a ambiente marítimo.

Com este trabalho concluiu-se que para uma reparação ser eficaz e durável, é necessário: conhecer as causas da deterioração, de modo a serem eliminadas; preparar o substrato de forma adequada, sendo que, em geral, remove-se o betão delaminado, limpa-se o remanescente e as armaduras, através das técnicas descritas; escolher materiais adequados e de boa qualidade; seguir os procedimentos de execução recomendados, consultando as normas mencionadas (por exemplo a NP EN 1504) para cada tipo de reparação; e, por fim, efectuar os ensaios de controlo de qualidade de modo a verificar a eficácia dos produtos e sistemas utilizados antes, durante e após a reparação da estrutura.

Os ataques químicos usualmente podem ser reparados recorrendo à substituição do betão ou a um sistema de protecção superficial que controle a humidade no betão, de modo a evitar que o ataque químico ocorra. A substituição do betão é um método eficaz, porém pode ser complementado com uma protecção superficial para evitar que a água penetre para o interior do betão, conduzindo a que o mecanismo da deterioração não volte a ocorrer. No entanto, relativamente às reacções álcalis-silica e sulfáticas de origem interna, não existem métodos eficazes para repará-los, apenas se pode tentar controlar parcialmente o processo de deterioração impedindo que a água penetre no substrato de betão recorrendo a um sistema de protecção superficial.

O ataque biológico; erosão, abrasão e cavitação; e os ciclos de gelo-degelo também podem ser reparados através da substituição do betão e dos sistemas de protecção de superfície. Contudo, nos ciclos de gelo-degelo a protecção superficial pode ser aplicada numa fase inicial, de modo a controlar a humidade no betão ou numa fase mais avançada, em conjunto com a substituição do betão.

A corrosão das armaduras pode ser reparada com diversos métodos, sendo que os métodos electroquímicos são, em geral, os mais eficientes e duradouros no controlo da corrosão, tendo a grande vantagem de evitar a remoção do betão contaminado. Todavia, os custos envolvidos na intervenção são elevados e exigem uma monitorização contínua, especialmente a protecção catódica. A realcalinização tem a desvantagem de só poder ser utilizada na corrosão por acção da carbonatação e, no caso dos cloretos, a extracção electroquímica é a única técnica que remove o agente corrosivo. Além dos métodos electroquímicos, a corrosão também pode ser reparada com inibidores de corrosão, porém estes são apenas eficazes numa fase inicial da deterioração. Por fim, restam a substituição do betão e os sistemas de protecção de superfície. Estes dois métodos podem ser utilizados em conjunto, uma vez que a protecção superficial pode prevenir que a deterioração volte a ocorrer, tornando esta reparação mais durável. A substituição do betão contaminado tem

algum risco no caso da corrosão por acção dos cloretos, uma vez que se a reparação não remover toda a contaminação, podem formar-se novas zonas de corrosão nas regiões adjacentes às reparadas, conduzindo à continuação da deterioração. Além disso, em situações em que é necessário remover uma profundidade significativa de betão, podem ser introduzidos problemas de segurança estrutural durante a reparação. A aplicação de sistemas de protecção superficial, em zonas em que a armadura está despassivada, é uma técnica eficaz em algumas situações, na medida em que reduz o teor de humidade no betão mas envolve alguns riscos (pode não conseguir reduzir o teor de humidade para níveis adequados), sendo que só deve ser aplicada em casos em que a contaminação não é muito elevada.

O caso prático foi referente aos Pórticos da Pontes Rolantes de um estaleiro naval, em Portugal. Face às anomalias da estrutura (delaminação do betão e corrosão das armaduras) devidas à carbonatação do betão e à contaminação por cloretos, concluiu-se que, considerando os custos envolvidos, a intervenção mais adequada nas zonas contaminadas seria a aplicação de uma protecção superficial e nas zonas delaminadas seria a substituição do betão e, posteriormente, a aplicação de um revestimento que impedisse a penetração das substâncias agressivas. Apesar de a protecção catódica e a extracção electroquímica de cloretos serem as técnicas mais eficazes a longo prazo no combate da corrosão das armaduras, apresentam custos de intervenção elevados. Além disso, na obra em causa, a contaminação por cloretos não era muito elevada e a velocidade de corrosão também era relativamente baixa. Portanto, optou-se pela protecção superficial que é uma técnica que envolve alguns riscos, mas que tem um custo muito inferior. Esta protecção também tem a vantagem de impedir a penetração dos agentes agressivos, de modo a evitar que a deterioração recomece. Relativamente à escolha do método para substituir o betão delaminado, o betão projectado tem a vantagem de não ser necessário construir uma cofragem, mas não deve ser utilizado quando a malha das armaduras é pouco espaçada, além de que é muito difícil conseguir o total envolvimento das armaduras pelo novo material. Este aspecto pode pôr em causa a durabilidade da reparação. Por outro lado, o betão moldado, apesar de precisar de cofragem, permite que o novo material envolva eficazmente as armaduras.

Assim, conclui-se que é muito importante analisar as intervenções de reabilitação caso a caso e que a escolha do método de reparação varia conforme vários parâmetros, tais como o mecanismo e o nível da deterioração, os custos envolvidos, a disposição das armaduras, a orientação da superfície a reparar, entre outros.

A realização desta dissertação permitiu compilar informação existente que se encontrava dispersa, de modo a definir os procedimentos de execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de betão, relacionando-os com as normas e recomendações disponíveis. No futuro poderá ser interessante criar um único documento que enquadre todos os aspectos deste trabalho.

Bibliografia

- [1] A. Costa, *Mecanismos de Deterioração em Estruturas de Betão Armado*. IST, 1999.
- [2] P. H. Emmons, *Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis; Repair Strategy; Techniques*. 1992.
- [3] D. Bryesse, M. Salta, and A. Daly, *Maintenance and Repair of Transport Infrastructures - Technical Guide Part IV Vol. 2 - Deterioration*. Lisbon: LNEC, 2012.
- [4] EN 206-1:2000/A2:2005, *Concrete - Part 1: Specification Performance, Production, Conformity*. 2005.
- [5] A. Costa, *Durabilidade de Estruturas de Betão*, Apontamentos da Cadeira Reabil. e Reforço Estruturas, IST, 2006.
- [6] A. Costa, *Aula 7.1: Corrosão e Deterioração do Betão*, Apontamentos da Cadeira Reabil. e Reforço Estruturas, IST, 2012.
- [7] EN 1504-10:2003/AC, *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity - Part 10: Site Application of Products and Systems and Quality Control of the Works*. 2003.
- [8] ICRI, *Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion*, vol. 2008, no. 310, 1995.
- [9] Department of the Army - U.S. Army Corps Engineers, Engineering and Design, *Evaluation and Repair of Concrete Structures*. USA, 1995.
- [10] A. Daly et al, *Maintenance and Repair of Transport Infrastructures - Technical Guide Part IV Vol. 4 - Repair Methods*. 2012.
- [11] ACI 515.1R-85, *Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete*. 1979.
- [12] EN 1504-2:2004, *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 2: Sistemas de Protecção Superficial do Betão*, Portugal, 2006.
- [13] EN ISO 2809:2007, *Paints and Varnishes - Determination of Film Thickness*. 2007.
- [14] Danish Standart Association, *Repair of Concrete Structures to EN 1504*. Oxford, Elsevier, 2004.

- [15] Z. Lourenço, *Protecção Catódica de Estruturas de Betão Armado*, Corros. Prot. Mater., vol. 26, no. 3, 2007.
- [16] ISO/DIS 12696:2009, *Cathodic Protection of Steel in Concrete*. 2009.
- [17] UFC, *Electrical Engineering Cathodic Protection*. 2004.
- [18] EN 15257:2006, *Cathodic Protection - Competence Levels and Certification of Cathodic Protection Personnel*. 2006.
- [19] H. Alves, P. Colaço, and Z. Lourenço, *Reabilitação de uma Estrutura Contaminada por Cloretos utilizando a Técnica da Dessalinização*, Corros. Prot. Mater., vol. 32, no. 1, 2013.
- [20] CEN/TS 14038-2:2011, *Electrochemical Re-alkalization and Chloride Extraction for Reinforced Concrete - Part 2: Chloride Extraction*. 2011.
- [21] CEN/TS 14038-1:2011, *Electrochemical Re-alkalization and Chloride Extraction for Reinforced Concrete - Part 1: Re-alkalization*, 2011.
- [22] EN 1504-5:2004, *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 5: Injecção do Betão*. Portugal, 2006.
- [23] J. R. Correia, *Protecção, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado*. IST/UTL, 2011.
- [24] Progenie Engineering, *Sistemas de injeção*, 2016.
- [25] B. F. Keane et al, *Structural Crack Repair by Epoxi Injection*, ACI Committee E706, 2003.
- [26] A. Costa, *Reparação de Estruturas de Betão*, Reabil. e Reforço Estruturas, IST, 2014.
- [27] B. F. Keane et al, *Crack Repair by Gravity Feed with Resin*, ACI Committee E706, 2003.
- [28] EN 1504-3:2004, *Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 3: Reparação Estrutural e não Estrutural*. Portugal, 2006.
- [29] B. F. Keane et al, *Surface Repair Using Form-and-Pour Techinques*, ACI Committee E706, 2003.
- [30] ENV 13670-1:2007, *Execução de Estruturas em Betão - Parte 1: Regras Gerais*. 2007.
- [31] EN 206-1:2007, *Betão – Parte 1: Especificação, Desempenho, Produção e Conformidade*. 2007.

- [32] United States Department of the Interior, *Guide to Concrete Repair*. USA, 1996.
- [33] B. F. Keane et al, *Surface Repair Using Form-and-Pump Techniques*, ACI Committee E706, 2003.
- [34] D. W. Whitmore et al, *Spall Repair by the Preplaced Aggregate Method*, ACI Committee E706, 2005.
- [35] D. W. Whitmore et al, *Vertical and Overhead Spall Repair by Hand Application*, ACI Committee E706, 2005.
- [36] ACI 506R-05, *Guide to Shotcrete*, 2005.
- [37] EN 14487-1:2005, *Sprayed Concrete - Part 1: Definitions, Specifications and Conformity*. 2005.
- [38] EN 14487-2:2005, *Sprayed Concrete - Part 2: Execution*, 2005.
- [39] T. Ripper, *Aplicação de Betão Estrutural por Projecção*, Curso em Durabilidade - Reparação e Reforço Estruturas, IST, 1996.