

# **Aplicação de Técnicas de Reforço e Reparação Estrutural a um Edifício em Betão Armado**

**Sarah Maia de Vasconcelos Tavares**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL**

---

**Orientador: Professor António Abel Henriques**

---

**Acompanhamento dos trabalhos na empresa: Engº Tiago Daniel Rebocho Nunes Alves**

**Maio 2026**

**MESTRADO EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL 2025/2026**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ [mestec@fe.up.pt](mailto:mestec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil – 2025/2026- Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.



A Meus Pais

Não há saber mais ou saber menos, há saberes diferentes.

Paulo Freire.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor António Abel Henriques, pelo apoio, compreensão e disponibilidade em transmitir os seus conhecimentos. Aos engenheiros, Renato Bastos e Tiago Alves, por me abrirem as portas da vossa empresa para embarcar nesta tese, pela ajuda prestada ao longo da sua elaboração, pela paciência e compreensão.

A todos os professores que conheci durante estes dois anos, pela evidente dedicação demonstrada naquilo que fazem. Aos meus amigos Patrick, Leonardo, Francisco, Francisco Renato e Rafaela, com quem partilhei grande parte da minha vida académica e que me deram a mão mesmo quando eu julgava que não era necessário. Que os bons momentos se multipliquem ao longo de toda a vida.

Um agradecimento especial à minha família: à minha mãe, pelos princípios transmitidos ao longo da minha vida, pelo carácter e pela educação que me inculuiu, e que me permitiram chegar até aqui, refletindo hoje a pessoa que sou; ao meu padrasto, Daniel Benitez, a quem admiro muito, pela sua força, garra e inteligência, e que foi o primeiro a saber da minha viagem para Portugal, apoiando-me psicologicamente nesta “aventura”, que acabou por ser o melhor recomeço da minha vida; à minha tia, que me ajudou e apoiou em todas as etapas da minha vida; ao meu falecido pai, que me ensinou a ultrapassar os obstáculos do caminho; ao meu irmão, que sempre me incentivou a seguir a minha vontade; e ao meu namorado, Ricardo, que sempre me apoiou nos meus estudos, me incentivou e me “obrigou” a sentar para escrever, mesmo quando já estava cansada.

A mim mesma e a Deus que me deu forças para lutar até o fim.



## RESUMO

### Resumo

O reforço estrutural constitui uma prática fundamental na engenharia civil, particularmente no âmbito da reabilitação de edifícios existentes. Com o decorrer do tempo, as estruturas ficam sujeitas à degradação dos materiais, à alteração das condições de utilização e, em muitos casos, à inadequação face às normas técnicas atualmente em vigor. Neste contexto, o reforço estrutural assume um papel essencial na garantia da segurança, da funcionalidade e da durabilidade das construções.

O presente trabalho tem como caso de estudo um edifício localizado em Lisboa, construído na década de 1950, que sofreu alterações estruturais nos anos de 1988 e 1989 e que se encontra atualmente desativado, estando em fase de estudo para a sua reabilitação.

A demolição deste edifício não constitui uma solução viável, uma vez que a legislação urbanística atualmente em vigor não permitiria a reconstrução com a mesma volumetria. Assim, a reabilitação da estrutura existente, aliada à implementação de soluções de reforço estrutural, revela-se determinante para viabilizar a reativação do imóvel, assegurando simultaneamente o cumprimento das exigências regulamentares atuais.

No âmbito da caracterização do estado de conservação da estrutura, foi desenvolvido um estudo dedicado ao fenómeno da carbonatação do betão, enquanto um dos mecanismos de degradação que afetam as estruturas de betão armado. Para esse efeito, foram analisados os resultados das inspeções e dos ensaios realizados *in situ*, incluindo a determinação da profundidade de carbonatação, a avaliação do recobrimento das armaduras e a identificação das manifestações patológicas observadas.

Com base nas avaliações efetuadas e na verificação da segurança estrutural de acordo com a regulamentação em vigor, foram identificadas as insuficiências da estrutura e desenvolvidas soluções de reforço estrutural compatíveis com as características construtivas do edifício e com a sua futura utilização. As soluções propostas visam restabelecer as condições de segurança estrutural, aumentar a durabilidade da construção e prolongar a sua vida útil, preservando simultaneamente a configuração original do edifício.

**Palavras-chave:** reforço estrutural; reabilitação; carbonatação; durabilidade; inspeção estrutural; manifestações patológicas.



## **ABSTRACT**

### **Abstract**

Structural strengthening is a fundamental practice in civil engineering, particularly in the rehabilitation of existing buildings. Over time, structures are subjected to material degradation, changes in service conditions and, in many cases, become inadequate to meet current technical standards. In this context, structural strengthening plays a key role in ensuring the safety, functionality and durability of buildings.

The present dissertation focuses on a case study of a building located in Lisbon, Portugal, originally constructed in the 1950s, which underwent structural alterations in 1988 and 1989 and is currently out of service while awaiting rehabilitation.

The demolition of this building is not considered a viable solution, as the current urban planning regulations would not permit its reconstruction with the same volumetric characteristics. Therefore, the rehabilitation of the existing structure, together with the implementation of structural strengthening solutions, is essential to enable the building to be brought back into service while ensuring compliance with current regulatory requirements.

As part of the assessment of the structure's condition, a study was carried out on concrete carbonation as one of the degradation mechanisms affecting reinforced concrete structures. To this end, the results of on-site inspections and testing were analysed, including the determination of carbonation depth, the assessment of reinforcement cover and the identification of the observed pathological manifestations.

Based on the assessments performed and the structural safety verification in accordance with the applicable regulations, the structural deficiencies were identified and strengthening solutions compatible with the building's construction characteristics and intended future use were developed. The proposed solutions aim to restore structural safety, enhance the durability of the structure and extend its service life while preserving the building's original configuration.

**Keywords:** structural strengthening; rehabilitation; carbonation; durability; structural inspection; pathological manifestations.



## ÍNDICE GERAL

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                                                 | I   |
| <b>RESUMO</b> .....                                                                         | III |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                                       | V   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....                                                                   | 1   |
| 1.1 Aspetos gerais.....                                                                     | 1   |
| 1.2 Objetivos da tese .....                                                                 | 4   |
| 1.3 Organização da tese.....                                                                | 4   |
| <b>2 AVALIAÇÃO DE FENÓMENOS DE DEGRADAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO</b> .....            | 5   |
| 2.1 Corrosão .....                                                                          | 6   |
| 2.1.1.1 Indução da corrosão por carbonatação .....                                          | 11  |
| 2.1.1.2 Indução da corrosão por iões cloretos .....                                         | 14  |
| 2.2 Ensaio de Carbonatação .....                                                            | 16  |
| 2.3 Aderência entre aço e betão .....                                                       | 19  |
| 2.4 Modos de rotura.....                                                                    | 23  |
| 2.5 Estratégias de reabilitação de estruturas de betão armado sujeitas à carbonatação.....  | 25  |
| <b>3 CARACTERIZAÇÃO, PRINCIPAIS PATOLOGIAS, AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DA EDIFICAÇÃO</b> ..... | 28  |
| 3.1 Caracterização da Edificação .....                                                      | 28  |
| 3.2 Principais Patologias .....                                                             | 32  |
| <b>4. ESTRATÉGIAS E PROCESSO DE REPARAÇÃO ESTRUTURAL FRENTE A CARBONATAÇÃO</b> .....        | 52  |
| 4.1 Inibidores de Corrosão.....                                                             | 54  |
| 4.2 Modificação da estrutura de betão.....                                                  | 57  |
| 4.3 Revestimentos protetores superficiais.....                                              | 61  |

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.4 Recalcalinização .....</b>                                        | <b>64</b> |
| <b>4.5 Estratégias de intervenção utilizadas no caso de estudo .....</b> | <b>66</b> |
| 4.5.1 Soluções frente à carbonatação.....                                | 66        |
| 4.5.2 Solução para lajes .....                                           | 67        |
| <b>5. CONCLUSÃO.....</b>                                                 | <b>68</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>72</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Modelo de vida útil das estruturas com base na corrosão das armaduras do betão (Fonte: TUUTTI, 1982).....                                             | 7  |
| Figura 2 - Funcionamento de uma pilha (Fonte: Criação do chatgpt,2026).....                                                                                      | 8  |
| Figura 3 – Ciclo da corrosão do aço (Helene 1993, adaptado).....                                                                                                 | 9  |
| Figura 4– Desenho esquemático dos tipos de corrosão (FONSÊCA, 2023).....                                                                                         | 11 |
| Figura 5 – Ensaio de carbonatação com aplicação de fenolftaleína.....                                                                                            | 18 |
| Figura 6– Aderência entre aço e betão (Fonte: Criação chatgpt,2026).....                                                                                         | 20 |
| Figura 7 – Representação da aderência por adesão entre aço e betão (Fonte: Fonsêca, 2023).....                                                                   | 21 |
| Figura 8– Representação da aderência por atrito entre aço e betão em perspectiva (a) transversal e (b) longitudinal (fonte: Fonsêca, 2023).....                  | 21 |
| Figura 9– Representação da aderência mecânica entre aço e o betão (Fonte: Fonsêca, 2023).....                                                                    | 22 |
| Figura 1010 – Propagação das fendas de “splitting” numa ancoragem: (a) início, (b) fase intermédia; (c) propagação completa (Fonte: Lúcio e Marreiros,2005)..... | 24 |
| Figura 11- Planta parcial do edificio, detalhando a divisão de corpos (Fonte: Memória Descritiva e Justificativa,2025).....                                      | 30 |
| Figura 12 – Corte C-D do projeto de 1989 (Fonte: Projeto de 1989).....                                                                                           | 31 |
| Figura 13 – Demolição parcial da sapata. (Fonte: Memória Descritiva e Justificativa, 2025).....                                                                  | 33 |
| Figura 14 – Camada única de armadura com varões de Ø8/0,20, em paredes acima do solo (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                   | 34 |
| Figura 15 – Paredes de Contenção e sua fundação (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                                                        | 35 |
| Figura 16 - Mapeamento de anomalias e demarcação dos eixos G e I do piso -3 (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                            | 36 |
| Figura 17 - Evidência da fendilhação existente apenas no revestimento e não na laje (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                    | 37 |
| Figura 18 - Medição com fissurómetro, mostrando abertura significativa ( $\omega = 7\text{mm}$ ) (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                       | 38 |
| Figura 19 - Reabertura de fenda sobre o selante (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                                                        | 38 |
| Figura 20 - Fendilhação a meio vão na face superior da laje (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                                            | 39 |
| Figura 21 - Padrão de fendilhação intensa numa área do piso -1 (Fonte: Relatório de inspeção, 2025).....                                                         | 39 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22 - Pilares com emendas irregulares (Fonte: Registo fotográfico STAP) .....                                        | 40 |
| Figura 23 - Patologia da laje de pavimento 1 (Fonte: Registo fotográfico STAP, 2025) .....                                 | 43 |
| Figura 24 - Pacómetro de varrimento HILTI PS 300 Ferrosan System (Fonte: Site da Hilti Portugal, 2026) .....               | 45 |
| Figura 25 - Mapa de ensaio para análise da durabilidade piso -2 (Fonte: Peças desenhadas STAP, 2025) .....                 | 46 |
| Figura 26 - Comparação dos valores de recobrimento e frente de carbonatação (Fonte: Relatório de inspeção, 2025) .....     | 47 |
| Figura 27 - Pilares sem revestimento e sem recobrimento (Fonte: Relatório de inspeção, 2025) .....                         | 47 |
| Figura 28 - Armadura exposta (Fonte: Relatório de inspeção, 2025) .....                                                    | 48 |
| Figura 29 - Pilares sem revestimento e sem recobrimento (Fonte: Relatório de inspeção, 2025) .....                         | 48 |
| Figura 30 - Ensaio de teor de cloretos, pelo método RCT – Rapid Chloride Test (Type RCT-87-2) da Germann Instruments ..... | 50 |
| Figura 31 - Mapa de verificação do teor de cloretos (Fonte: Relatório de inspeção, 2025) .....                             | 50 |
| Figura 32 - Esquema de carbonatação existente na edificação .....                                                          | 53 |
| Figura 33 - Densificação da microestrutura do betão (Fonte: Criação Chatgpt, 2026) .....                                   | 58 |
| Figura 34 - Entrada de água nas fissuras com material de origem espanhola (Fonte: Consultor da marca, 2026) .....          | 60 |
| Figura 35 - Cristalização da fissura após entrada de água no elemento estrutural (Fonte: Consultor da marca, 2026) .....   | 60 |
| Figura 36 - Representação esquemática da realcalinização (Fonte: adaptada de Henriques, 2016) .....                        | 65 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Comparação do funcionamento de uma pilha com a corrosão do aço .....                                                 | 8  |
| Quadro 2 – Classes de exposição induzidas por carbonatação (fonte: NP EN 206:2013 + A1 2017).....                               | 13 |
| Quadro 3 - Classes indicativas de resistência (Fonte: Eurocódigo 2 - Anexo E) .....                                             | 13 |
| Quadro 4 - Recobrimento mínimo e nominal (Fonte: Eurocódigo 2 - Anexo Nacional) .....                                           | 14 |
| Quadro 5 - Classes de exposição (Fonte: NP EN 206:2013+A2:2021) .....                                                           | 16 |
| Quadro 6 - Estrutura e divisão da norma EN 1504 (Fonte: adaptado da EN 1504:2009).....                                          | 25 |
| Quadro 7 - Técnicas de reparação e reabilitação aplicáveis a estruturas de betão armado (Fonte: adaptada da EN 1504:2009) ..... | 27 |



## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

C3a – Coeficiente de aderência

Ca(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido de cálcio

CaCO<sub>3</sub> – Carbonato de cálcio

Cl<sup>-</sup> – Ião cloreto

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

F<sub>ct</sub> – Resistência à tração do betão

Fe<sup>2+</sup> – Ião ferroso

Fe(OH)<sub>2</sub> – Hidróxido ferroso

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

H<sub>2</sub>O – Água

NACE – National Association of Corrosion Engineers

O<sub>2</sub> – Oxigénio

pH – Potencial hidrogeniónico

PIB – Produto Interno Bruto

Pr – Tensões radiais

Rb1 – Resistência de adesão

Rb2 – Resistência de aderência por atrito

SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – Ião sulfato

TGA – Análise Termogravimétrica

XA1 a XA3 – Classes de exposição a ambientes quimicamente agressivos

XC1 a XC4 – Classes de exposição com risco de corrosão induzida por carbonatação

XD1 a XD3 – Classes de exposição com risco de corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar

XF1 a XF3 – Classes de exposição sujeitas a ciclos de gelo-degelo

XO – Classe de exposição sem risco de corrosão ou ataque

XRD – Difração de Raios X

XS1 a XS3 – Classes de exposição com risco de corrosão induzida por cloretos provenientes da água do mar

$\sigma_{tt}$  – Tensões de tração tangenciais

$t_b$  – Tensão de aderência por atrito





# INTRODUÇÃO

## 1.1 ASPETOS GERAIS

As estruturas de betão armado estão presentes na sociedade desde o século XIX e, graças à sua elevada resistência, durabilidade e à sua capacidade de resistir tanto à compressão como à tração, continuam a ser, ainda hoje, o material mais utilizado em muitas regiões na construção das edificações.

As estruturas datadas de décadas anteriores foram dimensionadas segundo critérios significativamente distintos dos atualmente adotados. Os métodos de cálculo baseavam-se em abordagens mais simplificadas, como o método das tensões admissíveis, não contemplando diversos aspetos que hoje são considerados essenciais. Atualmente, o dimensionamento de estruturas de betão armado na Europa é regido pelos Eurocódigos, em particular pelo Eurocódigo 2, o qual aperfeiçoa a abordagem dos estados limites de utilização, introduzindo metodologias de análise mais avançadas, oferecendo mais segurança, funcionalidade e durabilidade às estruturas.

Atualmente, considera-se que as edificações antigas com valor histórico relevante sejam reabilitadas em vez de demolidas. Embora esta consciência tenha surgido de forma tardia, reconhece-se hoje que a transmissão desta herança cultural às gerações futuras é de grande valor. Para além disso, em alguns casos, a reabilitação e o reforço estrutural revelam-se mais vantajosos do que a demolição, como é o caso da edificação em questão uma vez que a legislação atual, não permitiria a reconstrução com a mesma volumetria, caso todo o edifício fosse demolido.

Edificações construídas nas décadas passadas têm sofrido cada vez mais danos irreparáveis. Nesse contexto, o ICOMOS (Comité Científico Internacional para a análise e restauro de

estruturas do património arquitetónico) desenvolveu um documento que estabelece diretrizes técnicas e princípios fundamentais para lidar com estruturas do património arquitetónico. Este documento define, como devem ser realizadas as intervenções, destacando a importância de uma análise prévia a qualquer ação, nomeadamente o diagnóstico das patologias, a compreensão dos materiais e as técnicas construtivas originais. Para além disso, privilegia a reabilitação em detrimento da demolição, incentiva a adoção de soluções de reforço estrutural compatíveis e não invasivas e recomenda a utilização de técnicas adequadas às características das estruturas existentes. Adicionalmente, sublinha a importância da documentação, estabelecendo que todas as intervenções devem ser devidamente registadas.

A corrosão das armaduras, que pode ocorrer devido ao mecanismo de carbonatação e/ou pela presença de cloretos, conduz a um impacto direto na aderência entre o aço e o betão, comprometendo o modo de transferência de esforços entre estes materiais. Segundo Leonhardt e Mönnig (1977), as boas características do betão armado devem-se, em grande parte, à ligação entre o betão e as armaduras. Entretanto, a aderência entre estes dois materiais tem relação com diversos fatores, tais como: resistência do betão, características superficiais do varão de aço (espaçamentos, inclinações e alturas das nervuras), diâmetros e recobrimento das armaduras, entre outras.

A degradação da aderência pode conduzir ao aparecimento de fissuração longitudinal, ao destacamento do recobrimento e, em estados mais avançados, à perda de capacidade resistente dos elementos estruturais. Estes fenómenos estão associados a diferentes modos de rotura, que podem variar desde perdas localizadas de aderência até à rotura frágil por destacamento do betão envolvente. Assim, a compreensão dos mecanismos de aderência e dos respetivos modos de rotura é fundamental para a avaliação da segurança estrutural e para a definição de estratégias eficazes de reabilitação e reforço.

A carbonatação é vista como um dos processos mais relevantes e frequentes que afetam as estruturas de betão armado. Este fenómeno resulta da penetração do dióxido de carbono presente na atmosfera no interior do betão, reagindo com os compostos alcalinos da matriz cimentícia e conduzindo à redução do pH. Como consequência, ocorre a despasseificação das armaduras de aço, tornando-as mais suscetíveis à corrosão. A progressão da carbonatação depende de diversos fatores, tais como a porosidade do betão e as condições ambientais.

Neste contexto, o reforço estrutural assume um papel fundamental na engenharia civil, especialmente no âmbito da reabilitação de edificações existentes, surgindo como uma solução essencial para garantir a segurança, a funcionalidade e o prolongamento da vida útil das construções.

Neste âmbito, torna-se indispensável a realização de uma análise detalhada das condições atuais a fim de identificar as patologias dos elementos estruturais, tais como fissuração, corrosão e manifestações associadas a carbonatação do betão. Esses fatores, quando não tratados adequadamente, comprometem o desempenho estrutural e reduzem significativamente a vida útil.

O estudo da carbonatação do betão armado possui bastante relevância, tendo em vista que este fenómeno está diretamente relacionado à despasseiração das armaduras e ao consequente início do processo de corrosão. A avaliação da profundidade da carbonatação, aliada à estimativa da sua evolução ao longo do tempo, permite prever o estado de conservação da estrutura e auxiliar a definição de estratégia de intervenção da edificação.

Portanto, com base em estudos anteriores, na documentação existente e na realização de diversos ensaios — entre os quais a varredura generalizada com pacómetro das superfícies de betão armado para identificação dos respetivos recobrimentos estruturais — é possível reunir dados essenciais para a escolha das técnicas de reforço mais adequadas, garantindo a segurança da estrutura e a sua reabilitação de forma eficiente e sustentável.

Apesar dos estudos existentes sobre a corrosão das armaduras no betão armado, continuam a ser limitadas as abordagens práticas destinadas à eliminação dos efeitos da carbonatação em betão já degradado. Frequentemente, alternativas como a remoção do betão degradado, seguida da limpeza das armaduras ou até mesmo a sua substituição e a reposição do betão, para além da realcalinização, são as mais mencionadas. Entretanto, estas abordagens apresentam limitações, tanto em termos de custo quanto de complexidade, especialmente em estruturas de grande dimensão ou em edificações históricas, onde a intervenção invasiva pode comprometer outros elementos construtivos.

Por isso, torna-se essencial explorar alternativas que permitam amenizar a carbonatação sem que seja necessária a remoção completa do betão, preservando ao mesmo tempo a integridade estrutural e reduzindo o impacto da intervenção.

## **1.2 OBJETIVOS DA TESE**

Neste trabalho estudou-se uma edificação localizada em Lisboa, a qual sofreu diversas alterações ao longo dos anos e se encontra atualmente em fase de projeto de execução. Este estudo exigiu a investigação do edifício desde o ano da sua construção até à atualidade, considerando as principais remodelações a que foi sujeito ao longo dos anos e atendendo ao facto de se encontrar atualmente devoluto.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE**

Esta tese está estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta o tema da investigação e uma breve discussão sobre a sua relevância, bem como o enquadramento da proposta e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos básicos relacionados com a corrosão em estruturas de betão armado, à carbonatação e as suas formas de indução e as técnicas de avaliação. Aborda também a aderência entre o aço e o betão, os seus mecanismos, os modos de rotura e por fim algumas estratégias de reabilitação de estruturas de betão armado, sujeitas à carbonatação.

O Capítulo 3 descreve a caracterização do edifício em estudo, identificando as suas patologias e o diagnóstico, estabelecendo uma relação com o referencial teórico apresentado no Capítulo 2.

O Capítulo 4 apresenta estratégias e os métodos de reparação estrutural frente à carbonatação.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas no âmbito deste trabalho.

## 2

# AVALIAÇÃO DE FENÓMENOS DE DEGRADAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

Este capítulo contempla uma breve revisão teórica dos principais fatores relacionados com o tema da dissertação. Inicialmente, descreve-se a corrosão, tanto por indução da carbonatação como por indução de iões cloreto no betão armado, seguindo-se uma abordagem das técnicas de avaliação da carbonatação, a aderência entre o aço e o betão e os respetivos modos de rotura.

O betão armado, desde há muito, é o material mais utilizado em vários locais do mundo na construção civil. Tal deve-se às suas características de versatilidade, resistência e durabilidade. A sua ampla aplicação resulta desta combinação, formando um material compósito com elevado desempenho estrutural, tanto à compressão como à tração.

As características mecânicas deste material, nomeadamente a elevada resistência à compressão, e a indiscutível facilidade de moldagem *in situ*, permitindo a execução de elementos com diferentes geometrias, bem como a sua relativa economia quando comparado com outros materiais, contribuíram para a sua generalização ao longo do século XX.

Apesar da sua reconhecida durabilidade, o betão não está imune à degradação ao longo do tempo. A corrosão das armaduras constitui um problema comum neste material estrutural, particularmente em ambientes urbanos, costeiros e industriais. A ação de agentes ambientais, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cloretos provenientes da água salgada ou dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$  - gás poluente presente na atmosfera, proveniente da queima de materiais que contenham enxofre), são exemplos de elementos que podem causar danos nas edificações, comprometendo a integridade das estruturas ao longo do tempo, afetando não só o betão, mas também a proteção das armaduras nele incorporadas.

A Norma Europeia EN 1504, define três principais causas de danos e deterioração do betão: a ação mecânica, a ação química e a ação física. A ação mecânica é causada por impactos, sobrecargas, movimentos, vibrações, sismos e explosões. A ação química é causada por reações álcali-agregado, exposição química agressiva, ação bacteriológica e lixiviação. Por fim, a ação física é causada por ações de gelo/degelo, fendilhação térmica, movimentos da humidade, cristalização de sais e erosão.

De acordo com a NACE Internacional (2016), estima-se que o impacto global da corrosão seja de cerca de 2,5 biliões de dólares por ano, o que corresponde a aproximadamente 3,4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Entre os diversos mecanismos de degradação, destacam-se a corrosão e a carbonatação, sendo esta última uma das principais causas de deterioração em estruturas de betão armado.

## **2.1 CORROSÃO**

A corrosão é o processo de degradação de um material, geralmente metálico, que no caso das estruturas de betão armado resultanta da perda da capacidade protetora do betão de recobrimento. Este fenómeno ocorre devido à alteração do pH do betão, associada à redução da sua alcalinidade, que compromete a proteção das armaduras. Pode também ser provocado pela contaminação do betão por cloretos ou pela ação de correntes parasitas, conduzidas ou induzidas nas armaduras, provenientes de instalações elétricas próximas.

De acordo com Tuutti (1982), a corrosão é um processo que pode ser apresentado em função da vida útil das estruturas em betão armado.

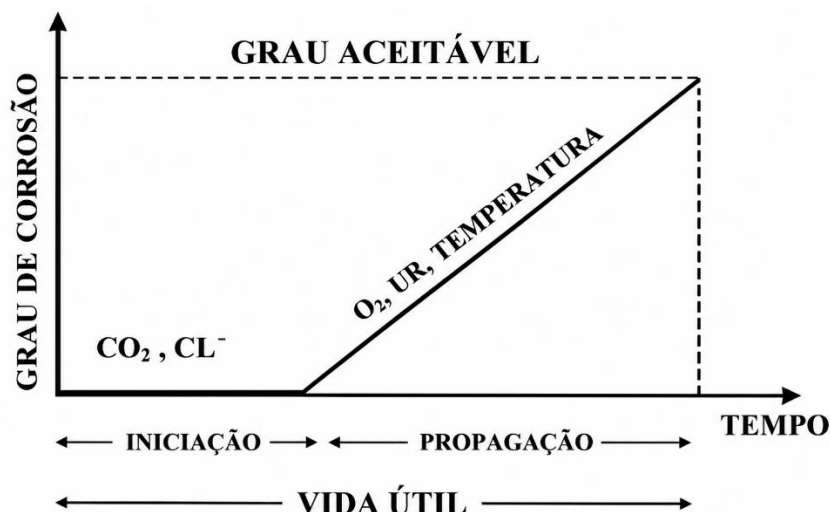


Figura 1 - Modelo de vida útil das estruturas com base na corrosão das armaduras do betão (Fonte: TUUTTI, 1982)

O gráfico demonstra que existe um grau aceitável em relação à corrosão das estruturas, e que quando este grau é atingido a estrutura já não é segura.

A fase de iniciação corresponde ao início do processo de degradação, durante a qual os agentes agressivos, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os cloretos (Cl<sup>-</sup>), penetram lentamente no betão, que nesta fase ainda não apresenta danos visíveis, através dos poros e fissuras, até atingirem o aço. Nesta etapa, o aço encontra-se ainda protegido pela denominada camada passiva ou passivação. A duração desta fase depende da permeabilidade do betão, da presença de fissuras, do grau de humidade e da facilidade de penetração de gases e líquidos.

Na etapa da propagação, a camada protetora passiva é destruída, ou seja, é despassivada e a partir desse momento inicia-se a corrosão eletroquímica, ou seja, o aço começa a corroer, sendo este processo acelerado com a entrada de oxigénio, humidade e temperatura, como consequência, formam-se produtos de corrosão (ferrugem) no aço, que provocam o aumento volumétrico e fissuração no betão, comprometendo o desempenho estrutural.

Tratando-se da deterioração do aço, são dois os processos de corrosão que podem ocorrer, o denominado de corrosão eletroquímica, de grande importância no campo das armaduras e o de oxidação direta/química. (Helene, 1993).

A corrosão eletroquímica é análoga ao funcionamento de uma pilha, necessitando de um meio condutor, como a água, para se desenvolver. No funcionamento da pilha a solução aquosa

permite a movimentação dos iões de aniões e catiões. Os eletrões saem do ânodo, passam pelo circuito externo e chegam ao cátodo, produzindo corrente elétrica.

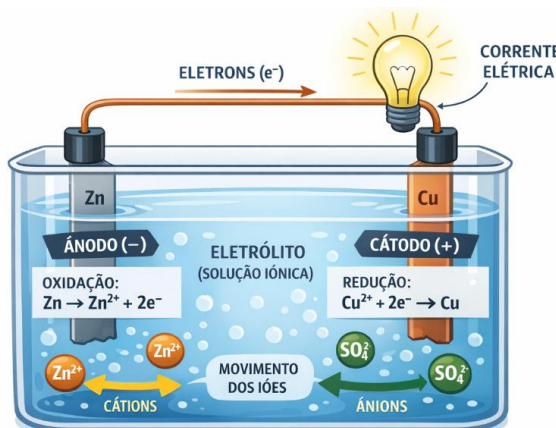


Figura 2 - Funcionamento de uma pilha (Fonte: Criação do chatgpt,2026)

A corrosão do aço pode ser descrita como uma pilha eletroquímica espontânea: por ser um metal heterogéneo, o ferro apresenta pequenas diferenças de composição, tensão e oxigenação na sua superfície, que originam, em simultâneo, regiões anódicas e catódicas. Na região anódica ocorre a oxidação, com a perda de eletrões e a formação de iões  $\text{Fe}^{2+}$ . Os eletrões libertados deslocam-se através da barra de ferro para a região catódica, onde, em contacto com a água presente nos poros do betão (eletrólito), ocorrendo a redução do oxigénio (nesta zona, não ocorre oxidação).

A dissolução do aço ocorre nas regiões anódicas e o processo não é uniforme, pois nas regiões catódicas o ataque pode ser considerado desprezável. A corrosão das armaduras de aço, na presença de humidade ou à temperatura ambiente, pode ser sempre considerada um processo de corrosão eletroquímica. (Helene, 1993).

Quadro 1 – Comparação do funcionamento de uma pilha com a corrosão do aço

| Aspecto           | Pilha                                | Corrosão do aço                                                                                 |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ânodo             | Metal que oxida                      | Ferro corroendo                                                                                 |
| Cátodo            | Metal que reduz                      | Região do ferro onde ocorre redução<br>(pode ser outra área do mesmo metal ou íons dissolvidos) |
| Eletrólito        | Solução condutora                    | Água, umidade, sais presentes                                                                   |
| Fluxo de elétrons | Pelo circuito externo                | Pelo próprio metal                                                                              |
| Fluxo de íons     | Pela solução                         | Pela solução aquosa em contato com o metal                                                      |
| Produto final     | Energia elétrica + produtos químicos | Ferrugem (óxidos de ferro)                                                                      |

A corrosão eletroquímica das armaduras de betão armado pode ser representada genericamente, conforme se indica na Figura 3, sem que a armadura esteja despassivada. (Helene, 1993).

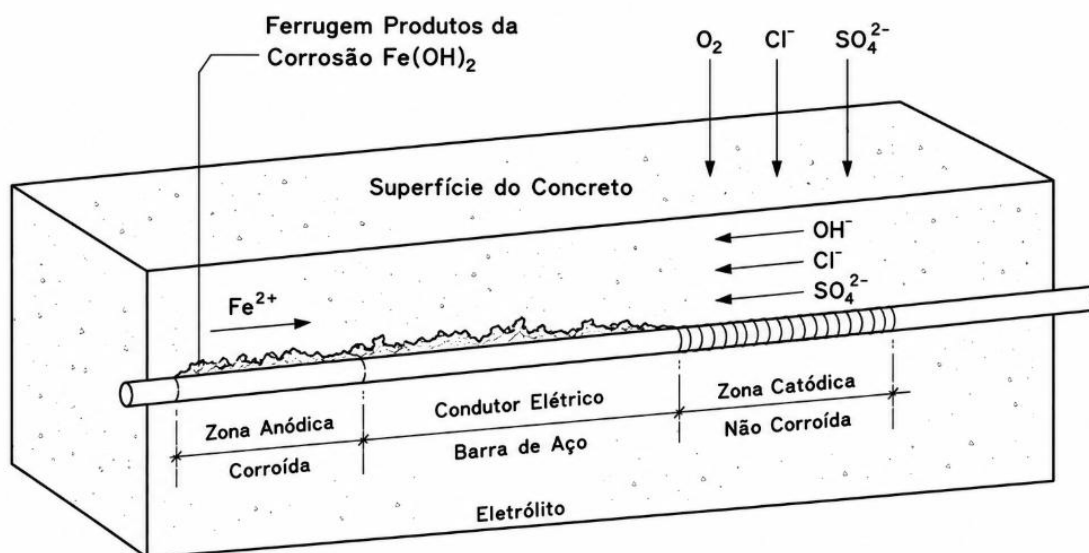


Figura 3 – Ciclo da corrosão do aço (Helene 1993, adaptado)

Na oxidação direta os átomos de aço reagem diretamente com o oxigênio. Contudo, esse tipo de corrosão não é de grande relevância para as obras de construção, tendo em vista que se trata de um processo lento onde os óxidos são formados logo após o processo de fabrico do aço e

criam uma película sobre o metal, onde além de reduzir a velocidade das reações, pode até servir de proteção relativa dos varões contra a corrosão húmida durante o transporte e armazenamento, desde que não tenham sido dobrados no estaleiro. Esse tipo de corrosão assume maior significado a altas temperaturas. A formação da carepa de laminação no processo siderúrgico é um exemplo de corrosão química, em que o aço, a altas temperaturas, reage com o oxigénio do meio ambiente, formando uma película de óxidos, compacta, uniforme e pouco permeável (Helene, 1993).

### 2.1.1 Tipos de Corrosão

A corrosão pode apresentar-se de forma generalizada ou localizada. Na corrosão generalizada, o desgaste do material ocorre de forma mais ou menos uniforme e atinge extensas áreas do metal. Na corrosão localizada, o desgaste processa-se numa superfície limitada e, em geral, tende a agravar-se de modo mais rápido do que num processo de corrosão generalizada. Essas expressões da corrosão podem sofrer algumas variações morfológicas quando analisadas em maior profundidade, podendo assumir, entre outras formas, aparência superficial uniforme ou irregular, com a formação de pites ou com a formação de fissuras. (Meira 2017).

- Corrosão generalizada: Também chamada de corrosão uniforme, ocorre de forma abrangente sobre toda a superfície do metal exposta aos agentes agressivos. Por ser mais fácil de detetar, costuma ser considerada menos grave do que a corrosão localizada. Entretanto, este tipo de corrosão pode tornar-se problemático em estruturas de betão armado, pois gera um grande volume de óxidos, aumentando o diâmetro das barras de aço dentro do elemento estrutural e provocando pressão interna, o que pode levar à formação de fissuras (que podem assumir grandes dimensões) ou ao destacamento de recobrimentos.
- Corrosão Localizada: Ocorre numa zona localizada, por um ataque intenso dos agentes agressivos, enquanto o restante da superfície pode ou não estar a corroer. Pode ocorrer em conjunto com outros fatores, como a fadiga, a erosão e outros ataques químicos, tais como os cloretos. “A corrosão localizada e sob tensão de tração é a mais grave, pois a estrutura pode romper sem aviso, ou seja, ocasionar uma rotura frágil, sem que haja uma prévia deformação da estrutura que alerte e permita corrigir o erro a tempo” (Helene, 1993).

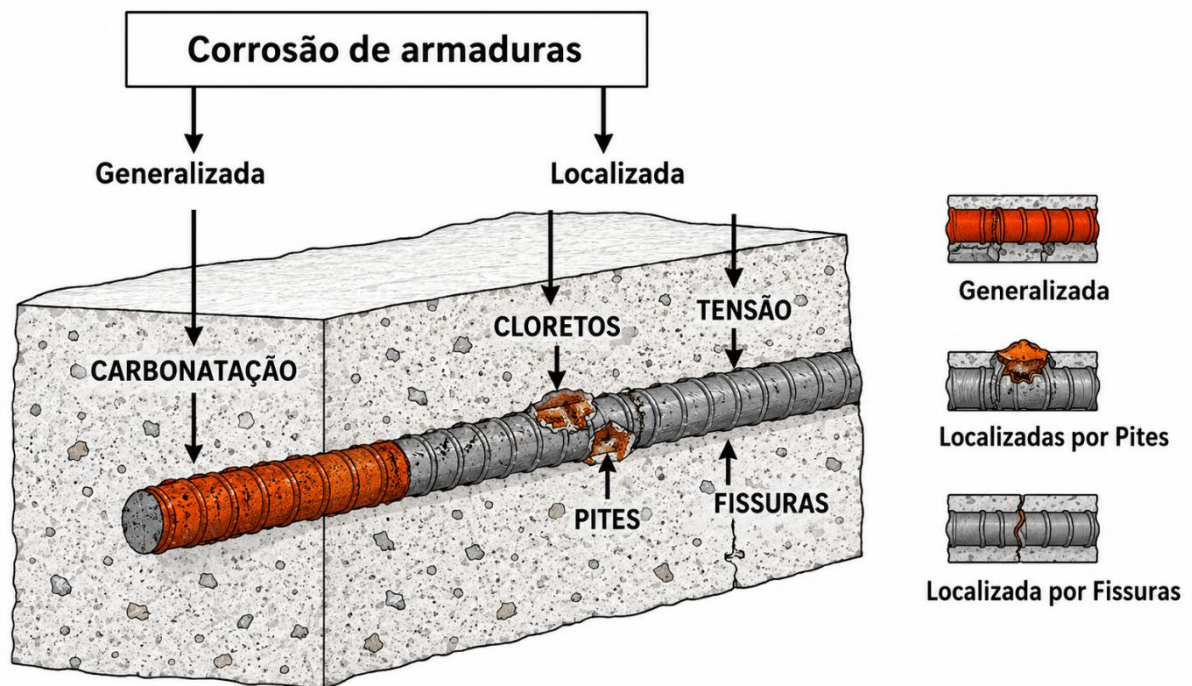


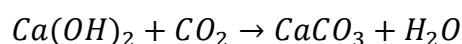
Figura 4– Desenho esquemático dos tipos de corrosão (FONSÊCA, 2023, adaptado)

No caso das estruturas em betão armado, a corrosão generalizada está, normalmente, associada à carbonatação do betão, enquanto a corrosão localizada (por pites), à ação dos iões de cloreto (Fonsêca, 2023).

#### 2.1.1.1 Indução da corrosão por carbonatação

A armadura dentro do betão está protegida contra a corrosão por uma barreira física e preponderantemente devido ao fenómeno da passivação conferida pela alta alcalinidade da solução intersticial do betão. (Helene 1993).

A corrosão por carbonatação é um dos mecanismos mais comuns que afetam as estruturas de betão armado. O betão contém hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), responsável por manter o pH elevado, entre 12 e 13, o que protege o aço formando uma camada passivante. Entretanto, com a penetração do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), essa camada protetora é destruída, pois a reação:



forma carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e reduz o pH para valores próximos de 9, tornando o aço suscetível à corrosão.

São vários os fatores que influenciam a carbonatação do betão. Este tópico foi abordado no trabalho de Andrade (2001), citado e adaptado por Stein (2016):

- A espessura da cobertura de betão sobre o aço (quanto menor, maior a penetração do CO<sub>2</sub>): a velocidade de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de CO<sub>2</sub>, principalmente para betões de elevadas relações a/c. Para efeitos práticos, admite-se que o teor de CO<sub>2</sub> presente em um ambiente rural é da ordem de 0,03 % em volume; em ambiente de laboratório, adota-se tal teor como sendo igual a 0,1 % em volume. Já nas grandes cidades, este valor é da ordem de 0,3 %, também em volume;
- A permeabilidade do betão (quanto mais poroso, mais rápido o processo); esse parâmetro exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do betão e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> através dos poros do material. Quando os poros estão secos (baixa HR), o CO<sub>2</sub> difunde até as regiões mais internas sem dificuldade; porém, a reação de carbonatação não ocorre devido à ausência de água. Quando os poros estão cheios de água, a frente de carbonatação progride lentamente, devido à baixa difusibilidade do CO<sub>2</sub> na água. Por outro lado, se os poros estão apenas parcialmente preenchidos com água, a frente de carbonatação avança mais rapidamente devido à existência simultânea da água e da possibilidade de difusão de CO<sub>2</sub>. Assim, admite-se que as maiores velocidades de carbonatação ocorrem com uma HR variando entre 60 e 80 %;
- A concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente, maior em zonas urbanas;
- A humidade relativa do ar: sendo valores intermediários (50–70%) os mais críticos para acelerar a reação;
- Tempo de cura: quanto maior o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, minimizando a porosidade e a permeabilidade, diminuindo a carbonatação no betões.

Com o intuito de reduzir a permeabilidade do betão, a EN 206 estabelece alguns requisitos de durabilidade. Para cada classe de exposição ambiental, a norma define parâmetros como a relação água/cimento máxima, a classe mínima de resistência e o teor mínimo de cimento a

utilizar. O Quadro 2, apresenta as classes de exposição associadas à corrosão induzida por carbonatação.

Quadro 2 – Classes de exposição induzidas por carbonatação (fonte: NP EN 206:2013 + A1 2017)

| <b>2. Corrosão induzida por carbonatação</b>                                                                                                                    |                                |                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quando o betão, armado ou contendo outros metais embebidos, se encontrar exposto ao ar e à humidade, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue: |                                |                                                                                                                |
| XC1                                                                                                                                                             | Seco ou permanentemente húmido | Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar;<br>Betão permanentemente submerso em água             |
| XC2                                                                                                                                                             | Húmido, raramente seco         | Superfícies de betão sob longos períodos de contacto com água;<br>Muitas fundações                             |
| XC3                                                                                                                                                             | Moderadamente húmido           | Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar;<br>Betão no exterior protegido da chuva |
| XC4                                                                                                                                                             | Ciclicamente húmido e seco     | Superfícies de betão sujeitas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2                             |

Vale ressaltar que a durabilidade é a capacidade de a estrutura manter os requisitos de utilização e segurança sem excesso de manutenção, e depende das condições de exposição ao meio ambiente, da compacidade e qualidade do betão, da espessura de recobrimento e da fendilhação.

Neste sentido, o Eurocódigo 2, estabelece as classes de resistência mínima do betão, tendo em conta as classes de exposição, como mostra o Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Classes indicativas de resistência (Fonte: Eurocódigo 2 - Anexo E)

| Corrosão                         |                                    |        |                    |        |                                |                |        |                                                 |     |        |
|----------------------------------|------------------------------------|--------|--------------------|--------|--------------------------------|----------------|--------|-------------------------------------------------|-----|--------|
|                                  | Corrosão induzida por carbonatação |        |                    |        | Corrosão induzida por cloretos |                |        | Corrosão induzida pelos cloretos da água do mar |     |        |
|                                  | XC1                                | XC2    | XC3                | XC4    | XD1                            | XD2            | XD3    | XS1                                             | XS2 | XS3    |
| Classe indicativa de resistência | C20/25                             | C25/30 | C30/37             |        | C30/37                         |                | C35/45 | C30/37                                          |     | C35/45 |
| Danos no betão                   |                                    |        |                    |        |                                |                |        |                                                 |     |        |
|                                  | Sem risco                          |        | Ataque gelo/degelo |        |                                | Ataque químico |        |                                                 |     |        |
|                                  | X0                                 |        | XF1                | XF2    | XF3                            | XA1            |        | XA2                                             |     | XA3    |
| Classe indicativa de resistência | C12/15                             |        | C30/37             | C25/30 | C30/37                         | C30/37         |        |                                                 |     | C35/45 |

O Eurocódigo 2, estabelece ainda o recobrimento mínimo e nominal, para cada classe indicativa de resistência, como mostra o quadro 4.

Quadro 4 - Recobrimento mínimo e nominal (Fonte: Eurocódigo 2 - Anexo Nacional)

|                                                                   |                           | X0 | XC1 | XC2/XC3 | XC4 | XD1/XS1 | XD2/XS2 | XD3/XS3 |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------|----|-----|---------|-----|---------|---------|---------|
| Tempo de vida útil de projecto de 50 anos (Classe Estrutural S4)  | Recobrimento mínimo (mm)  | 10 | 15  | 25      | 30  | 35      | 40      | 45      |
|                                                                   | Recobrimento nominal (mm) | 20 | 25  | 35      | 40  | 45      | 50      | 55      |
| Tempo de vida útil de projecto de 100 anos (Classe Estrutural S6) | Recobrimento mínimo (mm)  | 20 | 25  | 35      | 40  | 45      | 50      | 55      |
|                                                                   | Recobrimento nominal (mm) | 30 | 35  | 45      | 50  | 55      | 60      | 65      |

### 2.1.1.2 Indução da corrosão por iões cloretos

A contaminação por cloretos também é uma das principais causas da corrosão, podendo ocorrer sobretudo em estruturas localizadas em zonas costeiras. Nestas condições, o vento transporta iões cloreto para as superfícies das estruturas, onde se vão depositando e penetrando progressivamente no betão ao longo do tempo, até atingirem um valor crítico, desencadeando, assim, o processo de corrosão, o qual se trata de um processo lento, contínuo e cumulativo.

Outra forma de contaminação por cloretos é durante o próprio fabrico do betão, quando se utiliza água contaminada por sais, agregados provenientes de pedreiras na zona costeira, alguns aditivos como os aceleradores de presa e até mesmo o facto de a central de betão ser próxima do mar, pode acarretar uma contaminação.

Os iões cloretos podem apresentar-se no betão sob três formas. A forma química ocorre quando os iões cloretos se misturam à pasta do betão, ficando presos por ligações químicas fortes, passando assim a fazer parte estável da matriz. Neste caso ficam imobilizados não podendo mover-se durante o período de vida útil da estrutura.

A forma física corresponde à adsorção dos cloretos na superfície interna dos poros do betão, através de ligações fracas e reversíveis, como forças eletrostáticas. Sendo assim, os cloretos permanecem temporariamente retidos, podendo ser posteriormente libertados para a solução dos poros.

Por fim, existem os iões cloreto livres na solução dos poros, ou seja, dissolvidos na água presente no betão. Nesta forma, conseguem deslocar-se para o interior da estrutura, podendo atingir as armaduras, sendo, portanto, a forma mais perigosa.

Em geral, o tipo de corrosão originado por este mecanismo de deterioração é a corrosão localizada e a corrosão por picadas (pites), sendo que quando a quantidade de cloretos é bastante elevada pode ocorrer a corrosão geral das armaduras (Bryesse, 2012, citado por Henriques, 2016).

É importante referir que apenas os cloretos livres provocam a destruição da película passiva, conduzindo à despassivação das armaduras (Bryesse, 2012, citado por Henriques, 2016). Porém, alguns outros fatores, como carbonatação e temperaturas elevadas, podem tornar livres os cloretos combinados (Cavalcanti, 2010, citado por Fonsêca, 2023).

Apesar da EN 206:2013+A2:2021 não definir um teor crítico de corrosão universal, porque esse valor depende de fatores como a humidade, o pH, o oxigénio e outros, a norma estabelece que o teor inicial dos cloretos para betão armado deve ser menor que 0,40%, para o betão pré-esforçado os valores variam entre 0,10% a 0,20% e para o betão sem armaduras possuem limites mais permissivos.

Assim, como a EN 206 defini os parâmetros para as classes de exposição por corrosão de indução à carbonatação, também o faz para as classes de exposição por indução de cloretos

provenientes ou não da água do mar. O quadro a seguir mostra as classes de exposição para a indução à corrosão por cloretos.

Quadro 5 - Classes de exposição (Fonte: NP EN 206:2013+A2:2021)

| <b>3. Corrosão induzida por cloretos não provenientes de água do mar</b>                                                                                                                                                                             |                                                                                               |                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quando o betão armado ou contendo outros metais embebidos se encontrar em contato com água contendo cloretos que não provenham de água do mar, incluindo cloretos de sais descongelantes, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue: |                                                                                               |                                                                                                                         |
| XD1                                                                                                                                                                                                                                                  | Moderadamente húmido                                                                          | Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar                                                          |
| XD2                                                                                                                                                                                                                                                  | Húmido, raramente seco                                                                        | Piscinas;<br>Betão Exposto a águas industriais contendo cloreto                                                         |
| XD3                                                                                                                                                                                                                                                  | Ciclicamente húmido e seco                                                                    | Partes de pontes expostas a salpicos de água com cloretos, pavimentos, lajes de parques de estacionamento de automóveis |
| <b>4. Corrosão induzida por cloretos de água do mar</b>                                                                                                                                                                                              |                                                                                               |                                                                                                                         |
| Quando o betão, armado ou contendo outros metais embebidos se encontrar em contato com cloretos provenientes da água do mar ou exposto ao ar transportando sais provindos do mar, a exposição ambiental deve ser classificada como se segue:         |                                                                                               |                                                                                                                         |
| XS1                                                                                                                                                                                                                                                  | Exposição ao ar transportando sais provindos do mar, mas sem contato direto com a água do mar | Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade                                                                       |
| XS2                                                                                                                                                                                                                                                  | Submersão permanente                                                                          | Partes de estruturas marítimas                                                                                          |
| XS3                                                                                                                                                                                                                                                  | Zonas de marés, de rebentação ou se salpicos                                                  | Partes de estruturas marítimas                                                                                          |

O composto do betão tem a capacidade de “prender” cloretos na sua matriz, e isso depende de um componente do cimento chamado aluminato tricálcico (C3A), que reage quimicamente com os cloretos, formando o 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 (Costa, 1999, citado por Henriques, 2016).

## 2.2 ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO

Existem dois ensaios para avaliar o comportamento do betão. O primeiro, ao natural, é um ensaio de longa duração no qual se cria um ambiente favorável à degradação, recorrendo a provetes; ainda assim, a degradação ocorre de forma natural. O ensaio acelerado, por seu turno, decorre com intensidade superior, aumentando-se a concentração de CO<sub>2</sub> e controlando a humidade e a temperatura, de modo que um processo que demoraria anos se reproduz em poucos meses.

Segundo Pauletti, 2009, citado por Saldanha, 2013, o ensaio de carbonatação ao natural é pouco utilizado nas pesquisas sobre carbonatação devido ao tempo requerido na obtenção de resultados. Os resultados obtidos em ensaios acelerados são na grande maioria utilizados criando-se uma relação entre os dois, ou seja, utilizando um coeficiente de aceleração, conseguindo assim prever a velocidade de penetração de CO<sub>2</sub> no betão e a profundidade ao longo dos anos.

O fenómeno da carbonatação não é aparente e não reduz a resistência do betão, podendo até aumentar a sua dureza superficial, tendo em conta que, com a penetração do CO<sub>2</sub>, os poros do betão passam a ser mais preenchidos, reduzindo assim a porosidade local. Entretanto, esta reação química baixa o Ph do betão, causando a despassivação da armadura, como já visto anteriormente, e, ao atingir a armadura, a carbonatação pode promover a corrosão.

Além do uso de indicadores químicos, como a fenolftaleína, a profundidade de carbonatação pode ser avaliada através de métodos como o perfil de pH por extração de pó, análises laboratoriais, nomeadamente a análise termogravimétrica (TGA), a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e a análise por difração de raios X (XRD), bem como por técnicas de microscopia e sensores embutidos. No entanto, muitos destes métodos fornecem resultados indiretos ou exigem maior complexidade experimental, sendo os indicadores de pH os mais utilizados devido à sua simplicidade, rapidez e aplicabilidade prática.

No intuito de analisar a profundidade da carbonatação, um dos métodos mais utilizados é através da utilização do composto de fenolftaleína, que consiste na aplicação de uma solução indicadora de pH, permitindo a identificação da profundidade de carbonatação por meio da mudança de coloração.

O ensaio consiste em retirar uma amostra do elemento estrutural e encaminhar para um laboratório, para que seja realizada a rotura do elemento a fim de expor uma secção interna. No seguimento aplica-se a solução de fenolftaleína, na secção recém exposta, neste momento a região carbonatada permanece a cor natural indicando que o pH está baixo nesta região e fica em tom cor-de-rosa avermelhado, quando o pH ainda está alto e, portanto, não ocorreu a carbonatação.

A imagem apresentada na figura 5 mostra um ensaio realizado em uma aula laboratorial, que demonstra claramente como o elemento estrutural muda de cor com a aplicação do composto de fenolftaleína.



Figura 5 – Ensaio de carbonatação com aplicação de fenolftaleína

Como a corrosão das armaduras depende de outros fatores, existem outros ensaios que podem auxiliar na deteção da corrosão, como é o caso do ensaio com detetor de armaduras. Estes ensaios são realizados pelo varrimento generalizado com o pacómetro, a fim de localizar os varões de aço contidos no elemento estrutural indicando a posição, a direção e a profundidade do recobrimento deles.

Vale ressaltar que este ensaio não permite a visualização da carbonatação, ou a corrosão das armaduras, ele permite que sejam identificadas as distribuições das armaduras e o seu recobrimento, o qual é um item importante para a indução de corrosão por carbonatação do betão.

O recobrimento insuficiente pode facilitar a corrosão das armaduras, mas não significa necessariamente que estas estejam corroídas, pois, como se sabe, a corrosão depende de vários fatores. Por isso, ensaios como este constituem apenas um complemento do estudo.

Este equipamento gera um campo eletromagnético na superfície do betão e quando encontra o aço, o equipamento tem uma alteração no campo magnético, interpretando a mudança e calculando a posição e profundidade da barra. Este método apresenta limitações quando as

armaduras estão muito próximas entre si, quando o recobrimento é elevado, ou quando o betão é muito denso, contém agregados metálicos de grandes dimensões ou possui malha dupla.

Para além das possibilidades de avaliação do betão, também existem meios de avaliar a corrosão das armaduras, tais como as técnicas eletroquímicas que são bastante utilizadas, pois permitem interpretar as variáveis que intervêm no processo eletroquímico no momento em que se desenvolve o fenómeno, apresentam confiabilidade nos resultados, são rápidas e não acarretam sérios danos nas estruturas (Vieira, 2003, citado por Fonsêca, 2023).

Diversas são as técnicas eletroquímicas utilizadas na análise da corrosão no betão armado, tais como resistência à polarização, potencial de corrosão, impedância química, curvas de polarização, entre outras (González, 1989; Cigna et al., 1993; Rodriguez et al., 1994; Cascudo, 1997, citado por Fonsêca 2023).

Por fim, existem diversos métodos para avaliar a carbonatação do betão — fenómeno que pode conduzir à corrosão das armaduras — bem como várias técnicas destinadas à análise do processo corrosivo. Contudo, estes métodos não devem ser usados de forma isolada, mas sim complementar, recomendando-se a realização de mais do que um ensaio e/ou a sua combinação, de modo a obter resultados mais fiáveis e representativos do estado da estrutura.

### **2.3 ADERÊNCIA ENTRE AÇO E BETÃO**

A aderência entre o aço e o betão é o que garante que os dois materiais trabalhem juntos. Esta capacidade de ligação entre ambos garante que a deformação do elemento estrutural ocorra em conjunto, e para que isso ocorra é necessário que as forças atuantes sejam corretamente transmitidas de um elemento para o outro.

A aderência afeta vários aspetos do comportamento estrutural, tanto em estado limite último como em condições de serviço. O principal sinal de uma aderência deficiente é o aparecimento de fissuras paralelas à armadura que, na ausência de ancoragem adequada, podem provocar o deslizamento da armadura e até o colapso da estrutura (Fonsêca, 2023).

Outro problema associado ao aparecimento destas fissuras é que elas facilitam a entrada de agentes agressivos que podem acelerar ainda mais o processo de deterioração destas estruturas, (Fonsêca, 2023). Tema já abordado anteriormente.

### 2.3.1 Mecanismos de aderência

A aderência não vem de um único efeito, ela ocorre devido à combinação de três mecanismos diferentes, como mostra a figura 6.

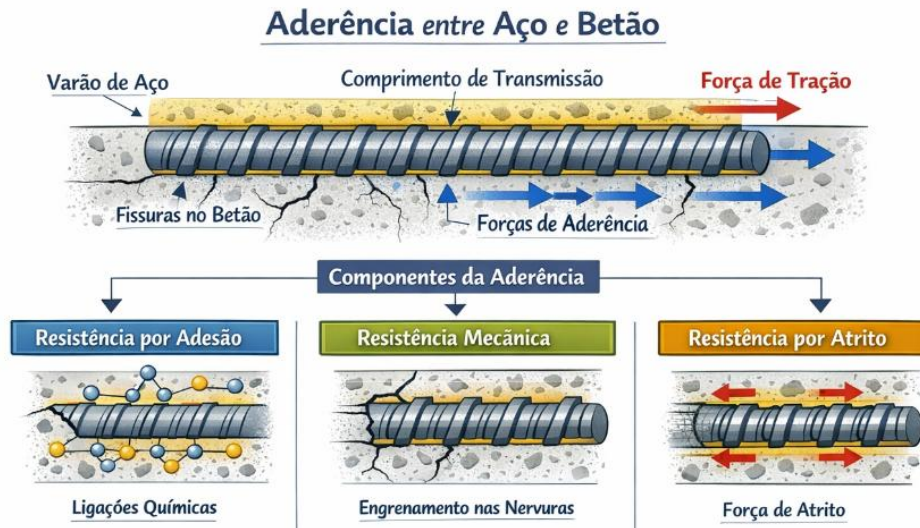


Figura 6– Aderência entre aço e betão (Fonte: Criação chatgpt,2026)

#### a) Aderência por adesão superficial

A aderência por adesão superficial é o primeiro mecanismo a atuar, sendo produzida na superfície de contacto entre o aço e o betão durante a hidratação da pasta de cimento, ela não é suficiente para garantir a segurança estrutural, tornando-se quase desprezável.

Na Figura 7, tem-se a representação de um bloco de betão diretamente sobre uma chapa de aço, na qual a parcela da aderência que corresponde à adesão superficial é representada por uma resistência de adesão ( $R_{b1}$ ) que se opõe à separação do bloco e da chapa (Fusco, 1995, citado por Fonsêca, 2023).

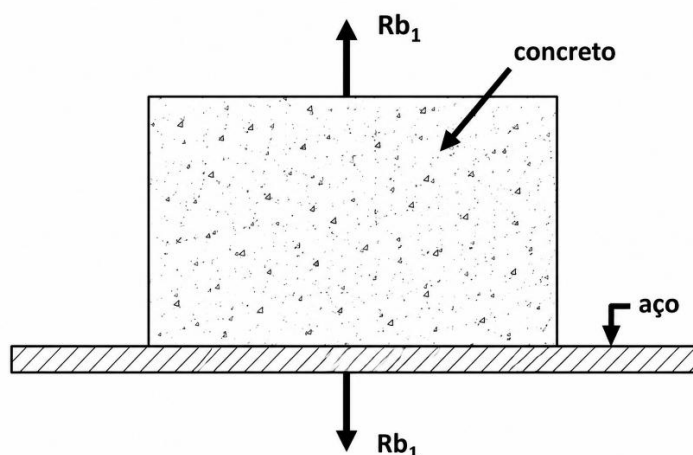


Figura 7 – Representação da aderência por adesão entre aço e betão (Fonte: Fonsêca, 2023)

b) Aderência por atrito

A aderência por atrito constitui uma das componentes da aderência entre o aço e o betão; após superada a aderência superficial, ocorre um deslizamento relativo entre o aço e o betão envolvente. Neste contexto, as forças tangenciais são geradas pela interação da rugosidade da superfície do varão e a pressão normal de confinamento exercida pelo betão sobre o aço.

A aderência por atrito ( $\tau b$ ) manifesta-se devido às tensões radiais ( $P_r$ ) do betão sobre a armadura, resultando na resistência de aderência por atrito ( $R_{b2}$ ). Tal aderência pode ser por retração, dado que a barra de aço, ao restringir as deformações do betão, origina uma pressão transversal que é exercida pelo betão sobre a barra, ou por confinamento externo aplicado transversalmente (Fusco, 1995, citado por Fonsêca, 2023).

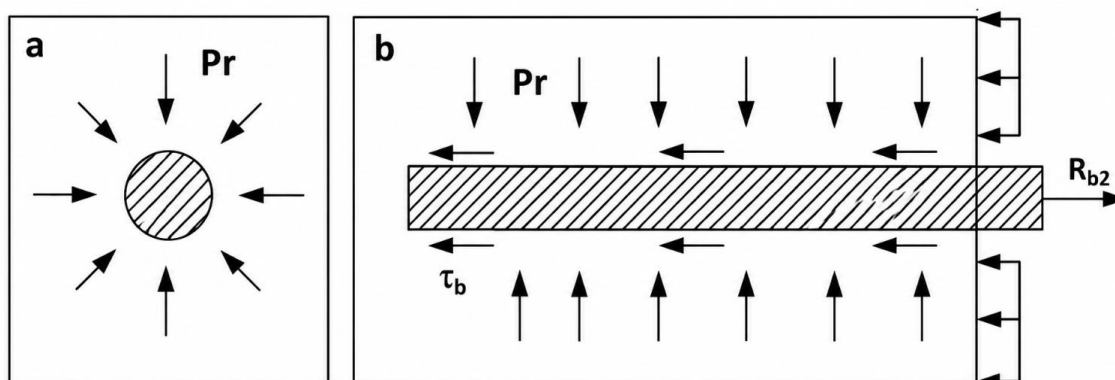


Figura 8– Representação da aderência por atrito entre aço e betão em perspectiva (a) transversal e (b) longitudinal (fonte: Fonsêca, 2023)

c) Aderência Mecânica

A aderência mecânica é a principal componente de ligação entre o aço e o betão, sendo responsável pela maior parcela da capacidade resistente da ligação. Resulta do embricamento entre as nervuras do varão e o betão envolvente, dada a criação de “cones” no betão no decorrer do endurecimento.

Este comportamento pode ser interpretado como bielas comprimidas no betão, associadas a tensões de corte na interface. As nervuras induzem tensões inclinadas no betão, que podem ser decompostas numa componente longitudinal (resistência ao arrancamento) e uma componente transversal (tendência à fissuração).

O desenvolvimento da resistência mecânica provoca uma compressão localizada ocorrendo o esmagamento do betão junto às nervuras do aço; além disso, são geradas tensões radiais que induzem fendas longitudinais ao longo do varão, podendo levar à perda do confinamento. Este fenómeno torna-se crítico quando o recobrimento não é adequado ou quando não existem armaduras transversais suficientes.

A aderência mecânica também está presente nos varões de aço lisos, devido às irregularidades superficiais inerentes à laminação, sendo que, nestes varões, a aderência mecânica e a aderência por atrito confundem-se. A Figura 9 mostra como as irregularidades das barras funcionam provocando tensões de compressão no betão (Fusco, 1995, citado por Fonsêca, 2023).

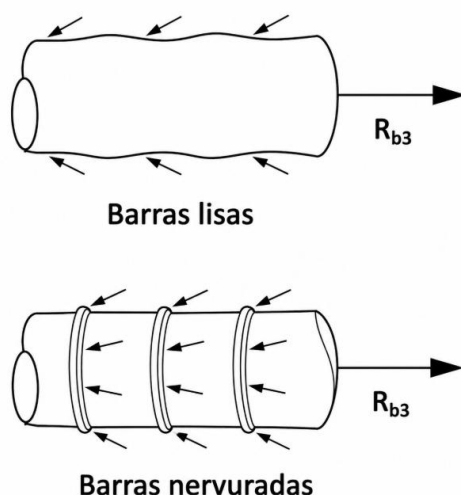


Figura 9– Representação da aderência mecânica entre aço e o betão (Fonte: Fonsêca, 2023)

## 2.4 MODOS DE ROTURA

Existem vários tipos de rotura das estruturas de betão armado, sendo as roturas por aderência fundamentais para o comportamento do elemento.

A rotura por aderência ocorre quando há falha de ligação entre o betão e o aço, impedindo a correta transferência de esforços e resultando no deslizamento da barra, no rompimento do betão, ou em ambos.

Existem dois modos principais de rotura do betão, o arrancamento (*pull out*), e a fendilhação (*splitting*), sendo o tipo de rotura dependente das condições de confinamento, do recobrimento, das propriedades do betão e das características da superfície da armadura.

Existem outros parâmetros que influenciam a aderência, uns relacionados com o betão (a mistura e a máxima dimensão dos agregados) outros com o aço (espaçamento entre varões, número de camadas de varões, diâmetro dos varões e tipo de material, a ferrugem e a corrosão do aço), outros ainda tais como a degradação da aderência devido às altas temperaturas e a melhoria do comportamento devido a baixas temperaturas (Lúcio e Marreiros, 2005).

### 2.4.1 Rotura por fendilhação (*splitting*)

No betão armado, o fenómeno de fendilhação (*splitting*), consiste na formação de fissuras longitudinais paralelas à armadura, provocadas pelas tensões radiais de tração geradas na interface aço–betão, conduzindo à redução da aderência e, em casos extremos, à sua rotura.

Para alguns autores, a rotura por fendilhação ocorre quando as tensões de tração, geradas ( $\sigma_{tt}$ ) pela aderência, excedem a resistência à tração do betão ( $f_{ct}$ ), provocando o aparecimento de fissuras longitudinais no betão, que tendem a propagar-se em direção às bordas, resultando na perda do recobrimento e na aderência (Fusco, 1995, citado por Fonsêca, 2023).

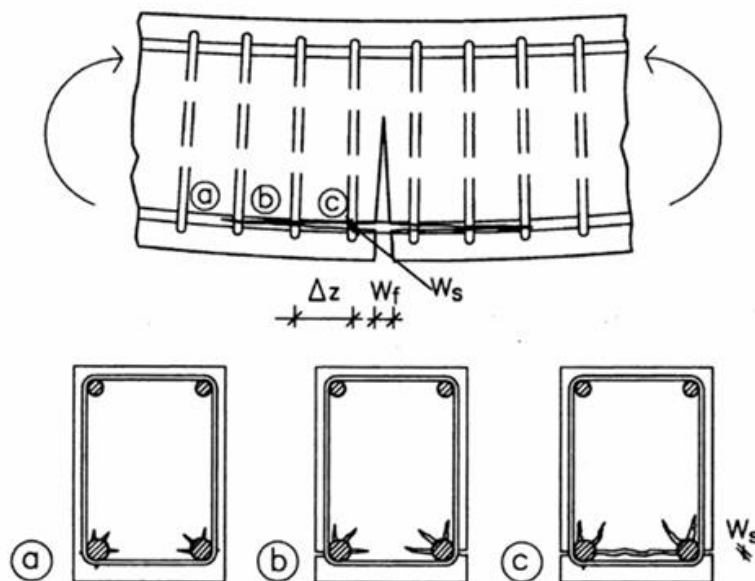


Figura 1010 – Propagação das fendas de “splitting” numa ancoragem: (a) início, (b) fase intermédia; (c) propagação completa (Fonte: Lúcio e Marreiros, 2005)

#### 2.4.2 Rotura por arrancamento (*pull-out*)

O mecanismo de arrancamento consiste no deslizamento do varão de aço. No caso de varões lisos, a transferência de força ocorre principalmente por atrito e pequenas irregularidades superficiais. Como não há “mecanismo mecânico” eficiente de travamento, o comportamento tende a ser de deslizamento do varão dentro do betão. Nos varões nervurados, as saliências das nervuras criam “chaves mecânicas”, e sob esforço, essas nervuras geram compressão local no betão, formando pequenos “cones” de betão. A rotura ocorre quando esses cones se rompem, caracterizando o arrancamento da barra (*pull-out*).

Este modo de rotura ocorre quando o confinamento é suficiente para garantir o arrancamento do varão e tem relação direta com a resistência do betão e a geometria das nervuras (Almeida Filho, 2006, citado por Fonsêca, 2023).

Por fim, salienta-se que em condições reais, as roturas por aderência raramente ocorrem de forma isolada, sendo comum a ocorrência de mecanismos mistos que envolvem simultaneamente o arrancamento da armadura e a fendilhação do betão, dependendo do nível de confinamento e do recobrimento existente.

## 2.5 ESTRATÉGIAS DE REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO SUJEITAS À CARBONATAÇÃO

Diferentes são as técnicas de intervenção que podem ser adotadas em função do grau de degradação da estrutura, das condições de exposição e do estado de corrosão das armaduras. A EN 1504 afirma que a adequada manutenção de uma estrutura de betão é essencial para garantir o tempo de vida previsto, uma vez que pode existir muitas causas para a deterioração do betão. Como tal, a reparação do betão é uma atividade que deve ser realizada por especialista treinado e competente em todas as etapas do processo.

Quando os problemas de degradação do betão não são compreendidos, chega-se a um diagnóstico errado e, consequentemente, a uma técnica de correção inadequada, o que gera grande insatisfação nos donos de obra.

Com o objetivo de assegurar um diagnóstico e uma intervenção adequados, a EN 1504 define um conjunto de princípios, requisitos e procedimentos para a proteção e reparação de estruturas de betão, estabelecendo uma abordagem sistemática que orienta a avaliação da degradação, a seleção das técnicas de intervenção e a sua execução.

Quadro 6 - Estrutura e divisão da norma EN 1504 (Fonte: adaptado da EN 1504:2009)

| <i>Nº do documento</i> | <i>Descrição</i>                                                                                       |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>EN 1504 – 1</i>     | <i>Descreve os termos e definições compreendidos na norma</i>                                          |
| <i>EN 1504 – 2</i>     | <i>Fornece especificações para produtos/sistemas de proteção superficial do betão</i>                  |
| <i>EN 1504 – 3</i>     | <i>Fornece especificações para a reparação estrutural e não-estrutural</i>                             |
| <i>EN 1504 – 4</i>     | <i>Fornece especificações para colagem estrutural</i>                                                  |
| <i>EN 1504 – 5</i>     | <i>Fornece especificações para injeção do betão</i>                                                    |
| <i>EN 1504 – 6</i>     | <i>Fornece especificações para ancoragem de armaduras</i>                                              |
| <i>EN 1504 – 7</i>     | <i>Fornece especificações para proteção contra a corrosão das armaduras</i>                            |
| <i>EN 1504 – 8</i>     | <i>Descreve o controlo da qualidade e avaliação da conformidade das empresas fabricantes</i>           |
| <i>EN 1504 – 9</i>     | <i>Define os princípios gerais para o uso de produtos e sistemas, na reparação e proteção de betão</i> |
| <i>EN 1504 – 10</i>    | <i>Fornece informação sobre a aplicação e o controlo da qualidade dos trabalhos</i>                    |

A norma EN 1504-9 define um conjunto de métodos de reparação agrupados de acordo com os princípios destinados à prevenção ou estabilização dos processos de deterioração das estruturas de betão armado. No total, esta norma estabelece 11 princípios e 37 métodos de reparação, sendo os princípios de 1 a 6 associados à degradação do betão e os princípios de 7 a 11 cobrem os problemas relacionados à corrosão das armaduras. Sempre que necessário, podem ser aplicados diferentes métodos de forma combinada, desde que sejam tomadas as devidas precauções, de modo a evitar o aparecimento de novos danos na estrutura (adaptado de Henriques, 2016).

Com base nos princípios e métodos estabelecidos pela EN 1504-9, as técnicas de reparação e reabilitação podem ser organizadas segundo a natureza da intervenção, permitindo uma análise comparativa dos seus modos de atuação, objetivos e carácter invasivo, conforme apresentado no quadro 7.

Entre as principais estratégias de reparação e reabilitação no caso da carbonatação e corrosão das armaduras destacam-se a aplicação de revestimentos protetores superficiais, incluindo a impregnação hidrofóbica, redução da permeabilidade/densificação, selagem de fissuras, inibidores de corrosão, realcalinização eletroquímica, reparação/substituição do betão degradado e proteção e revestimento das armaduras destinadas a reduzir a permeabilidade e a progressão da carbonatação.

Com relevância secundária, referem-se ainda a proteção catódica e os ânodos galvânicos que, embora válidos, são mais comuns em estruturas contaminadas por cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) e raramente aplicáveis em casos de simples carbonatação; e a extração eletroquímica de cloretos, método dirigido exclusivamente à contaminação por cloretos, que não atua sobre a carbonatação. Estas técnicas são aqui referidas apenas para enquadramento da EN 1504.

Quadro 7 - Técnicas de reparação e reabilitação aplicáveis a estruturas de betão armado (Fonte: adaptada da EN 1504:2009)

| <i>Categoria</i>     | <i>Técnica de intervenção</i>                                                    | <i>Modo de atuação</i>                                                       | <i>Objetivo principal</i>                           | <i>Caráter invasivo</i> |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|
| <i>Superficial</i>   | <i>Revestimentos protetores superficiais</i>                                     | <i>Formação de barreira contra CO<sub>2</sub> e humidade</i>                 | <i>Retardar a carbonatação e proteger o betão</i>   | <i>Baixo</i>            |
| <i>Superficial</i>   | <i>Impregnação hidrofóbica</i>                                                   | <i>Redução da absorção capilar de água sem bloquear vapor</i>                | <i>Limitar entrada de água e agentes agressivos</i> | <i>Baixo</i>            |
| <i>Superficial</i>   | <i>Tratamentos de redução da permeabilidade / densificação da microestrutura</i> | <i>Redução da porosidade e permeabilidade</i>                                | <i>Limitar difusão de agentes agressivos</i>        | <i>Baixo</i>            |
| <i>Superficial</i>   | <i>Selagem/injeção de fissuras</i>                                               | <i>Bloqueio da entrada de água; Co<sub>2</sub> e cloretos pelas fissuras</i> | <i>Restabelecer estanqueidade e durabilidade</i>    | <i>Baixo a médio</i>    |
| <i>Química</i>       | <i>Inibidores de corrosão</i>                                                    | <i>Formação de película protetora nas armaduras</i>                          | <i>Reduzir a corrosão do aço</i>                    | <i>Baixo</i>            |
| <i>Química</i>       | <i>Proteção/revestimento das armaduras</i>                                       | <i>Aplicação de camada protetora diretamente sobre o aço</i>                 | <i>Aumentar proteção contra corrosão</i>            | <i>Médio</i>            |
| <i>Eletroquímica</i> | <i>Realcalinização eletroquímica</i>                                             | <i>Restabelecimento da alcalinidade do betão</i>                             | <i>Repassar as armaduras</i>                        | <i>Médio</i>            |
| <i>Eletroquímica</i> | <i>Extração eletroquímica de cloretos</i>                                        | <i>Migração iónica dos cloretos para fora do betão</i>                       | <i>Reduzir risco de corrosão por cloretos</i>       | <i>Médio</i>            |
| <i>Eletroquímica</i> | <i>Proteção catódica</i>                                                         | <i>Controlo eletroquímico da corrosão</i>                                    | <i>Interromper a corrosão ativa</i>                 | <i>Médio a elevado</i>  |
| <i>Eletroquímica</i> | <i>Âodos galvânicos</i>                                                          | <i>Polarização catódica localizada das armaduras</i>                         | <i>Mitigar corrosão em zonas reparadas</i>          | <i>Médio</i>            |

# 3

## **CARACTERIZAÇÃO, PRINCIPAIS PATOLOGIAS, AVALIAÇÃO E DIAGNÓSTICO DA EDIFICAÇÃO**

### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO**

A EN 1504 estabelece um conjunto de etapas estruturadas a serem seguidas antes da realização de intervenções em estruturas de betão danificadas. Inicialmente, procede-se ao levantamento de informações sobre a estrutura, incluindo dados relativos ao seu histórico, utilização, condições de exposição e documentação existente. Em seguida, realiza-se a avaliação da estrutura, por meio de inspeções e, quando necessário, ensaios, com o objetivo de identificar os danos, sua extensão e as respetivas causas.

Com base nesse diagnóstico, é então definida a estratégia de intervenção, etapa em que é desenvolvido um estudo específico do caso para determinar as soluções mais adequadas de reparo. Posteriormente, é especificado o processo de reparação, ressaltando que este deve considerar não apenas o desempenho estrutural, mas também a compatibilidade dos materiais a serem utilizados com os restantes dos materiais existentes na estrutura, de modo a evitar efeitos adversos.

Na execução dos trabalhos devem considerar-se as condições específicas da obra, incluindo acessibilidade, segurança e requisitos ambientais. Por fim, a norma prevê a receção da intervenção, acompanhada do registo completo dos materiais e das técnicas utilizadas, bem como da definição de planos de inspeção e manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

Considerando o objetivo deste capítulo, serão abordadas apenas as etapas de levantamento de informações e avaliação da estrutura, por estarem diretamente relacionadas com a

caracterização da edificação e a identificação das patologias existentes, conforme preconizado pela EN 1504. As etapas subsequentes, nomeadamente a definição da estratégia de intervenção e os métodos de reparação, serão desenvolvidas no capítulo seguinte.

Inicialmente, procede-se à descrição do edifício, e ao seu enquadramento histórico, seguindo-se a identificação e análise das manifestações patológicas observadas.

O edifício localiza-se na grande Lisboa, e encontra-se inserido numa zona urbana consolidada. A edificação foi construída na década de 1950, tendo sido inicialmente concebida como uma unidade industrial.

O edifício em estudo desenvolve-se em 11 pisos, dos quais três correspondem a caves, sendo construído integralmente em betão armado. A nível estrutural, apresenta uma configuração global relativamente regular, constituída por um sistema porticado composto por pilares, vigas e lajes.

Apesar desta regularidade global, a edificação encontra-se subdividida em vários corpos estruturais (ou blocos), verificando-se uma variação da sua configuração em altura. Entre os pisos -3 e 1, o edifício é constituído por quatro blocos estruturais; entre o piso 1 e o piso 5, a estrutura reduz-se a três blocos; e nos pisos 6 e 7 passam a existir apenas dois blocos. Esta variação traduz-se numa geometria irregular em altura e numa consequente heterogeneidade de rigidez ao longo da estrutura.

Atualmente, estes blocos não apresentam um comportamento estrutural totalmente solidário, podendo evidenciar respostas diferenciadas em termos de distribuição de esforços e comportamento global. A figura a seguir mostra como os corpos estão distribuídos.

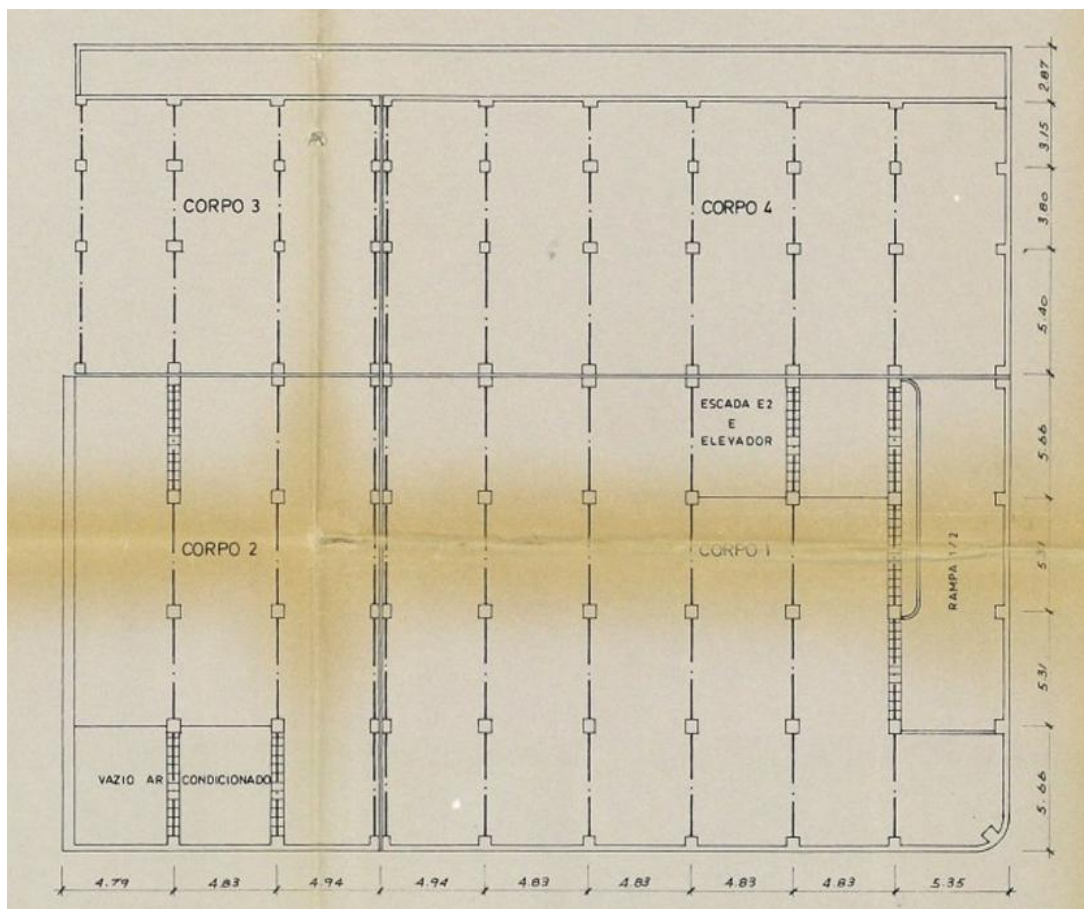


Figura 11- Planta parcial do edifício, detalhando a divisão de corpos (Fonte: Memória Descritiva e Justificativa, 2025)

A evolução histórica do complexo industrial reflete diferentes fases de utilização e transformação. Entre 1952 e 1956, as instalações industriais foram objeto de intervenções relevantes, incluindo obras de modernização e ampliação. Ao longo do século XX, o edifício consolidou-se como uma referência local, associada à sua função industrial.

Com a progressiva desativação da atividade industrial na zona, o edifício foi sendo adaptado a novos usos. Em 1989, foi alvo de uma intervenção de grande escala, que conduziu à sua reconversão ao setor terciário. Esta alteração de uso implicou a adaptação da estrutura existente a novas exigências funcionais e de carga.

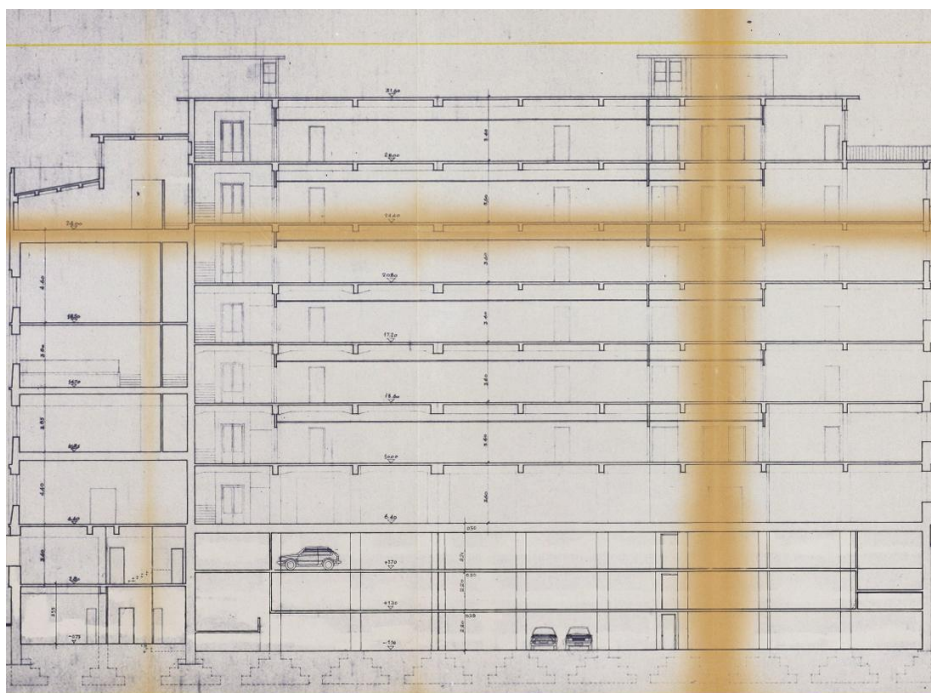


Figura 12 – Corte C-D do projeto de 1989 (Fonte: Projeto de 1989)

No âmbito desta intervenção, foram realizadas demolições de duas lajes maciças na zona das caves, posteriormente substituídas por lajes fungiformes com cerca de 20cm de espessura, tendo ainda sido acrescentado um novo piso. Ao nível do piso 1, procedeu-se igualmente à demolição parcial da laje existente, mantendo-se e reforçando alguns elementos estruturais.

Na zona correspondente ao Corpo 1, anteriormente ocupada por silos, verificou-se uma reconfiguração estrutural significativa. Os silos existentes foram demolidos, tendo sido executada uma nova estrutura acima do piso 1. Os novos pilares foram materializados por prolongamento dos pilares existentes, assegurando a continuidade estrutural. As vigas foram executadas com recurso a elementos pré-fabricados, enquanto as lajes foram realizadas sobre pré-lajes, configurando um sistema misto de elementos pré-fabricados e moldados *in situ*.

Adicionalmente, foi utilizado betão projetado em diversas zonas, nomeadamente para reforço localizado de elementos estruturais e para execução de ligações entre componentes pré-fabricados, assegurando a adequada transferência de esforços entre os diferentes elementos.

As soluções construtivas adotadas nas diferentes fases de intervenção podem conduzir a uma descontinuidade entre os elementos estruturais existentes e os elementos posteriormente executados, podendo resultar em diferenças de rigidez e de comportamento estrutural. Este

aspecto assume particular relevância no contexto de ações horizontais, como as sísmicas, podendo influenciar a distribuição de esforços e a resposta global da estrutura.

Relativamente aos corpos 2 e 3, estes apresentam diferenças de cotas entre lajes face ao restante edifício. Em consequência, prevê-se a demolição parcial do corpo 2 e a demolição quase total do corpo 3. Estima-se ainda que o corpo 4 tenha sido demolido a partir do piso 1 no início deste século.

“Do ponto de vista da conceção estrutural do edifício, o projeto de reabilitação e reforço a que esta memória diz respeito assenta em duas condicionantes fundamentais: (i) dotar o edifício de capacidade resistente ao sismo, de acordo com as normas em vigor, nomeadamente a NP EN 1998-1:2010 e a NP EN 1998-3:2017, e (ii) a reabilitação e o reforço dos elementos estruturais que apresentem problemas de resistência ou de durabilidade, estando estes últimos associados à falta de resistência à carbonatação e à insuficiência de recobrimento.” (Adão da Fonseca, 2025).

## **3.2 PRINCIPAIS PATOLOGIAS**

### **3.2.1 Patologias de Fundações**

Segundo a documentação existente, a demolição das lajes na zona das caves, associada à introdução de um novo piso, implicou o rebaixamento da cota do pavimento térreo. Esta alteração altimétrica terá conduzido à remoção de uma parte significativa da zona superior das fundações existentes.

Contudo, não foi identificada, no projeto de remodelação, qualquer justificação técnica explícita para esta intervenção. Acresce que as peças desenhadas desse projeto continuam a representar as fundações integralmente abaixo da cota do piso térreo, o que evidencia uma possível discrepância entre o projeto e a execução em obra.

Refira-se ainda que, no projeto original do edifício, as sapatas foram concebidas com uma configuração geométrica alargada e inclinada, típica da prática corrente à época, com o objetivo de reduzir os efeitos de flexão e promover uma distribuição mais uniforme das tensões no solo.

A Figura 13 ilustra a zona da sapata onde se verificou a demolição parcial. De acordo com as sondagens realizadas in situ, estima-se que cerca de dois terços da altura total das sapatas tenha sido removida, sem que tenha sido identificado qualquer reforço estrutural subsequente ou medida de compensação.

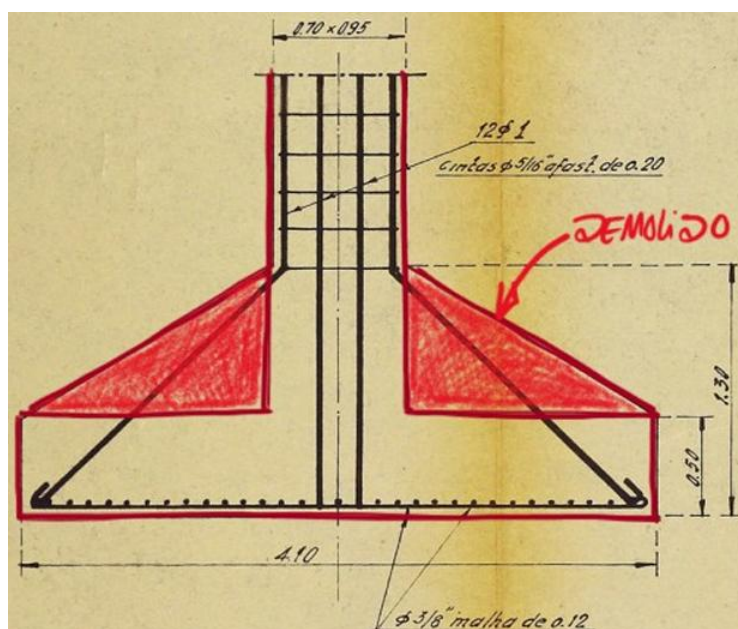


Figura 13 – Demolição parcial da sapata. (Fonte: Memória Descritiva e Justificativa, 2025)

Para uma análise mais detalhada das fundações, foram executados poços de inspeção com o objetivo de observar diretamente as dimensões das sapatas, o estado de conservação, o tipo de fundação existente e a interação entre a fundação e o terreno de apoio. Esta intervenção permitiu avaliar se as fundações haviam sido executadas conforme o previsto e se o solo apresentava condições adequadas para suportar a estrutura. Importa referir que esta avaliação se baseou essencialmente em observação direta, não tendo sido realizados ensaios laboratoriais específicos no terreno ou nos elementos de fundação.

A redução significativa da altura das sapatas traduz-se diretamente na diminuição da sua altura útil resistente, reduzindo a sua capacidade de suporte, nomeadamente no que respeita aos mecanismos resistentes à flexão e ao punçoamento.

De acordo com os princípios estabelecidos no Eurocódigo 2, a altura útil constitui um parâmetro fundamental na resistência de elementos de betão armado, pelo que a sua redução conduz a um aumento das tensões internas e a uma diminuição da capacidade de redistribuição de esforços.

Deste modo, conclui-se que as intervenções realizadas podem originar défices estruturais relevantes. Contudo, para sustentar tal afirmação, torna-se necessária a comparação entre as cargas previamente definidas no projeto inicial e as cargas consideradas no projeto em que foi efetuada a redução. Apenas através dessa análise será possível avaliar a compatibilidade da capacidade de carga dimensionada.

Esta situação deverá ser devidamente considerada no âmbito da avaliação global da estrutura, bem como na definição de eventuais estratégias de reforço e reabilitação.

### 3.2.2 Patologias das Paredes de Contenção

As análises realizadas, através de: aberturas localizadas, observações diretas dos elementos enterrados, levantamento geométrico, análise visual das ligações entre as paredes, pilares e fundações e registo fotográfico, indicam que as paredes de contenção existentes não dispõem de fundação própria, encontrando-se apoiadas diretamente sobre as fundações dos pilares.

Os resultados das sondagens efetuadas evidenciam uma significativa insuficiência de armadura nestes elementos. No cenário mais favorável, foi identificada uma camada de armadura por face e por direção, constituída por varões de Ø10 espaçados de 0,20 m, em aço A235 NL.

Contudo, foram também identificadas zonas em que existe uma única camada de armadura de Ø8/0,20, aproximadamente coincidente com o eixo da parede, neste caso, ocorrem em paredes acima do solo.



Figura 14 – Camada única de armadura com varões de Ø8/0,20, em paredes acima do solo (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

Esta reduzida taxa de armadura compromete a capacidade resistente das paredes, nomeadamente no que respeita à flexão induzida pelos impulsos de terras e às tensões de tração associadas. De acordo com o Eurocódigo 2, deve ser garantida uma armadura mínima adequada para controlo da fissuração e para assegurar a capacidade resistente dos elementos estruturais, condição que, à luz dos dados obtidos, parece não se verificar.

Importa ainda referir que as zonas onde se identificou apenas uma camada de armadura parecem corresponder ao prolongamento das paredes acima da cota do arruamento exterior, sugerindo possíveis alterações ou simplificações construtivas face à solução inicialmente prevista.

A Figura 15 ilustra o estado atual de uma das paredes de contenção, sendo visíveis sinais de degradação superficial e descontinuidade material, que poderão estar associados às deficiências construtivas anteriormente descritas.



Figura 15 – Paredes de Contenção e sua fundação (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

### 3.2.3 Patologia das Lajes

No que respeita às lajes dos pisos -2 e -1, apesar de não se observarem deformações globais significativas, verifica-se a presença de um elevado grau de fissuração generalizada. Este padrão de fissuração é compatível com um comportamento estrutural condicionado por uma

insuficiente capacidade portante, nomeadamente face às ações a que os elementos se encontram sujeitos.

De acordo com o Eurocódigo 2, a limitação da fissuração constitui um requisito fundamental no controlo dos Estados Limite de Utilização (ELS), sendo definida através da verificação da abertura característica de fendas ( $w_k$ ) face aos valores limite regulamentares ( $w_{k,lim}$ ), estabelecidos em função da classe de exposição ambiental e das exigências de durabilidade. Para estruturas correntes, estes valores situam-se tipicamente entre 0,2 mm (ambientes mais agressivos), 0,3 mm (ambientes de exposição corrente) e 0,4 mm (ambientes pouco agressivos).

Neste sentido foi realizado um mapeamento das anomalias, em particular pela intensidade das fendas observadas a olho nu, tanto na face inferior, como na face superior das lajes fungiformes que estruturam os pisos enterrados. O mapeamento foi realizado através de inspeção direta, complementada por um registo fotográfico detalhado e exaustivo das superfícies analisadas. A figura a seguir mostra um exemplo do mapeamento das anomalias de fissuras.

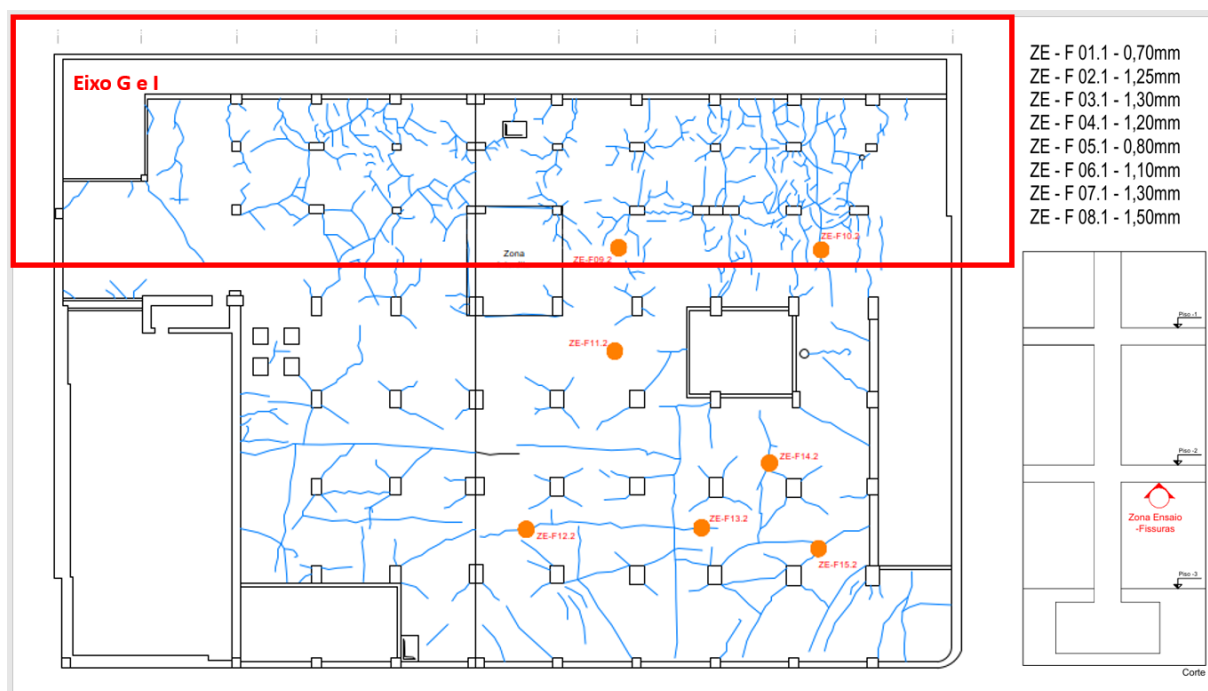


Figura 16 - Mapeamento de anomalias e demarcação dos eixos G e I do piso -3 (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

As lajes não apresentam deformações relevantes, nem problemas de segregação ou delaminação do betão. Importa, no entanto, referir que entre os eixos G e I, indicados na figura acima, existe num dos pisos um revestimento de betão com cerca de 6 a 7 cm de espessura.

Essa camada de betão, que se encontra extremamente fendilhada, foi aparentemente necessária para regularizar localmente a cota de superfície. Pode-se observar na Figura 17 a evidência da fendilhação existente apenas na camada de regularização e não na totalidade da laje.



Figura 17 - Evidência da fendilhação existente apenas no revestimento e não na laje (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

A abertura das fendas foi medida de forma relativamente simples através da utilização de um fissurómetro calibrado, constituído por uma lâmina pequena transparente, com várias linhas impressas, cuja espessura é incrementada em intervalos de 0,05 mm até o valor de 0,90 mm, a partir do qual o intervalo passa a ser de 0,10 mm. O técnico coloca o fissurómetro diretamente sobre a fissura e compara visualmente a espessura da fenda, com as linhas desenhadas na régua transparente, como mostra a figura a seguir.

Observou-se que o padrão de fendilhação é generalizado na superfície das lajes e mais intenso em algumas zonas. Em muitos casos, as fendas têm dimensões de 1,5 mm, aproximando-se até de 2 mm, a Figura 18 constata esta afirmação. Para além disso, verificou-se a existência de fendas no meio do vão, como mostra a Figura 20, paralela ao alinhamento dos pilares, sendo importante por ser uma zona de tração, onde surgem as tensões de flexão.

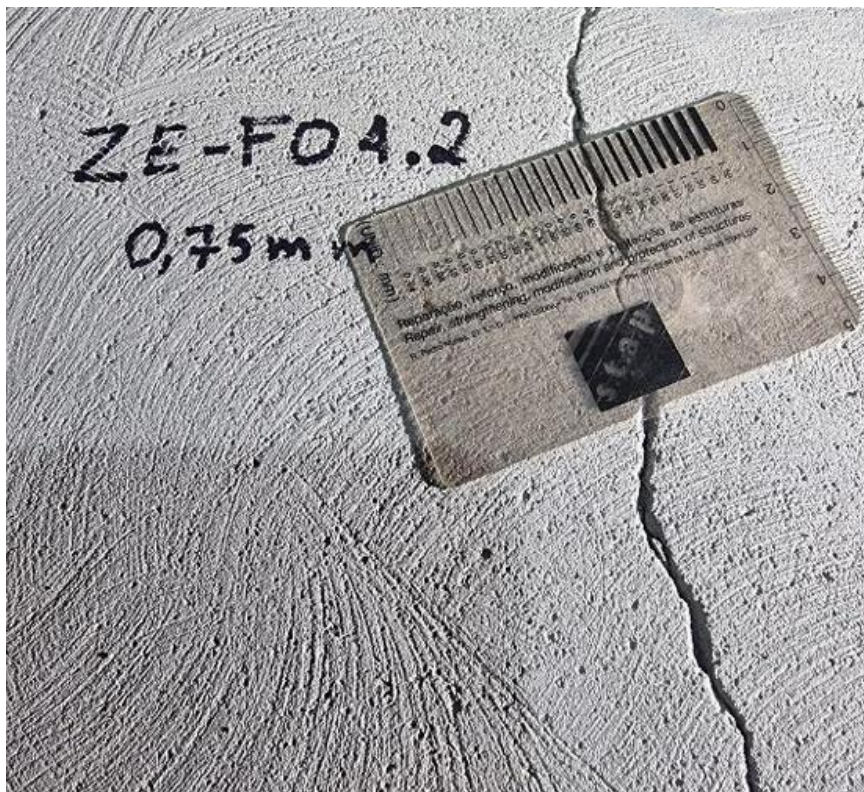


Figura 18 - Medição com fissurómetro, mostrando abertura significativa ( $\omega = 7\text{mm}$ ) (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

Algumas fissuras parecem ter sido injetadas, sendo que quase todas estão barradas com um selante epóxico, o que não impediu que as fissuras voltassem a abrir, como se regista na figura 20. Para garantir fiabilidade da medição, foi necessário raspar localmente o selante.



Figura 19 - Reabertura de fenda sobre o selante (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)



Figura 20 - Fendilhação a meio vão na face superior da laje (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)



Figura 21 - Padrão de fendilhação intensa numa área do piso -1 (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

A fissuração excessiva observada implica uma redução da proteção conferida pelo recobrimento de betão, promovendo a penetração acelerada de agentes agressivos, como o dióxido de carbono

e a humidade, com consequente aceleração do processo de carbonatação e potencial iniciação precoce da corrosão das armaduras.

Adicionalmente, verifica-se que a demolição dos silos anteriormente existentes terá introduzido descontinuidades no sistema estrutural, resultando numa deficiente ligação entre as lajes executadas no âmbito da reconversão de uso e os pilares pertencentes à estrutura original, posteriormente prolongados. Esta execução evidencia fragilidades ao nível da ligação laje-pilar, particularmente no que respeita à ancoragem e continuidade das armaduras.

Do ponto de vista mecânico, a deficiente ancoragem compromete a adequada transmissão de esforços entre elementos estruturais, podendo originar fenómenos de deslizamento relativo, perda de rigidez local e concentração de tensões nas zonas de ligação. Em conformidade com o Eurocódigo 2, o comprimento de ancoragem das armaduras deve ser devidamente assegurado de forma a garantir o desenvolvimento da sua resistência, condição que aparentemente não se encontra satisfeita no caso em análise.

Tal situação foi “descoberta” mediante a abertura de janelas para identificação, por observação direta e registo fotográfico de pormenor, da entrega dos varões das lajes nos pilares, intervenção que veio a ser muito relevante, com implicações diretas na capacidade de resposta das lajes, tanto ao estado limite último quanto em serviço.

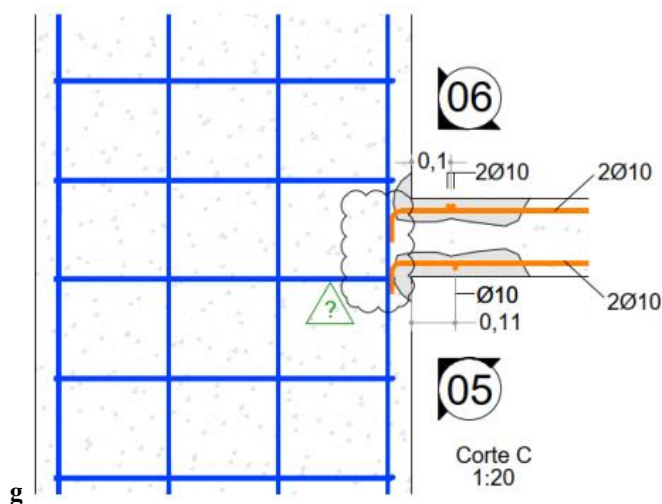


Figura 22 - Pilares com emendas irregulares (Fonte: Registo fotográfico STAP)

Outro aspeto importante para perceber se as lajes dos pisos enterrados ainda apresentam capacidade resistente adequada, foi a realização de um estudo sobre a qualidade do betão, através da extração de testemunhos (carotes) e posterior submissão a ensaios em laboratório acreditado. Nas lajes os testemunhos foram extraídos no sentido da betonagem, enquanto nos pilares os carotes foram retirados na direção perpendicular à betonagem.

Com base em ensaios já existente do ano de 2020, optou-se por considerar conjuntamente os resultados obtidos anteriormente e os novos testemunhos extraídos, desde que apresentassem características compatíveis, nomeadamente ao nível do tipo e dimensões dos carotes. Esta opção permitiu aumentar o número de amostras analisadas e, consequentemente, obter resultados mais fiáveis.

A caracterização da resistência à compressão do betão foi realizada através da extração de testemunhos (carotes) das lajes (23 carotes) e dos pilares (15 carotes), em conformidade com a norma NP EN 12504-1 – *Carotes – Extração, exame e ensaio à compressão* (Relatório de inspeção, 2025).

Previamente à extração, procedeu-se à deteção das armaduras com recurso ao pacómetro Ferrosan Hilti PS300, de modo a evitar danos nos varões durante os trabalhos. Para a recolha das amostras foi utilizada uma coroa perfuradora com diâmetro exterior de 107 mm, permitindo a obtenção de provetes com diâmetro de 10 cm e relação altura/diâmetro unitária.

Após a extração, as aberturas foram preenchidas com argamassa de reparação de classe R4, sendo as amostras devidamente identificadas de acordo com a sua localização. Em laboratório, os provetes foram preparados através do corte e retificação das extremidades, garantindo a planura necessária para os ensaios de compressão, realizados segundo as normas NP EN 12390-3 e NP EN 12390-4.

O ensaio consistiu na aplicação de carga de compressão até à rotura dos provetes, registando-se a carga máxima suportada para determinação da resistência à compressão do betão. Importa referir que o processo de carotagem pode originar valores de resistência ligeiramente inferiores aos obtidos em provetes moldados diretamente, devido à presença de agregados cortados e possíveis vazios internos.

Verificou-se ainda que a direção de extração dos carotes relativamente ao sentido da betonagem pode influenciar os resultados obtidos, podendo as carotes extraídas no sentido de a betonagem

apresentar resistências até 8% superiores às extraídas perpendicularmente. Adicionalmente, a presença de porosidade constitui outro fator relevante, podendo reduzir a resistência do betão, situação identificada em duas carotes extraídas dos pilares.

A avaliação da resistência característica do betão das lajes, com base nos resultados obtidos a partir das carotes ensaiadas, foi realizada de acordo com a NP EN 13791, recorrendo ao método modificado da Abordagem A. Neste enquadramento normativo, a determinação da resistência característica não se baseia apenas na resistência média obtida, mas considera igualmente a dispersão estatística dos resultados e o número de testemunhos ensaiados. Para esse efeito, é aplicado o coeficiente estatístico  $k_n$ , cujo valor depende da dimensão da amostra.

No presente estudo, considerando os 26 testemunhos analisados, adotou-se o valor de  $k_n = 1,75$ , conforme estabelecido pela NP EN 13791 para esta dimensão amostral. A resistência média obtida foi de 30,5 MPa, enquanto o desvio-padrão dos resultados foi de 8,2 MPa. Assim, a resistência característica estimada do betão foi determinada através da seguinte expressão:

$$f_{ck} = f_{cm} - k_n \times s$$

$$f_{ck} = 30,5 - 14,35$$

$$f_{ck} = 16,15 \text{ MPa}$$

onde:

- $f_{ck}$ – Resistência característica à compressão do betão (MPa);
- $f_{cm}$ – Resistência média à compressão do betão (MPa);
- $k_n$ – Coeficiente estatístico definido pela NP EN 13791;
- $s$ – desvio-padrão dos resultados experimentais (MPa).

Assim, ao aplicar a metodologia estatística definida na NP EN 13791, o valor característico da resistência à compressão resulta significativamente inferior à média obtida, conduzindo à classificação do betão como pertencente à classe C12/15 tanto para lajes, como para os pilares, de forma conservadora. Esta classificação reflete não apenas o nível médio de resistência medido, mas sobretudo a elevada variabilidade dos resultados, que condiciona de forma decisiva a estimativa conservadora da resistência efetiva do betão em obra.



Figura 23 - Patologia da laje de pavimento 1 (Fonte: Registo fotográfico STAP, 2025)

Para o aço das armaduras não foram realizados novos ensaios, tendo em vista que, os relatórios do ano de 2020, já apontavam para a conformidade entre os materiais efetivamente utilizados na construção e o especificado no projeto original (aço A24) e de reconversão (A400 NR).

Face ao exposto, as patologias identificadas evidenciam que a capacidade resistente global das lajes poderá encontrar-se comprometida, não sendo, contudo, simples justificar de forma isolada a origem de algumas das fissuras observadas. Ainda assim, diversos fatores, atuando de forma isolada ou conjunta, poderão ter contribuído para o elevado nível de fissuração verificado, nomeadamente deficiências na ancoragem dos varões das lajes aos pilares em ambas as superfícies, reduzida resistência do betão, eventual atuação de sobrecargas superiores às previstas em projeto, bem como deficiências no processo de cura do betão.

Neste contexto, estas anomalias deverão ser objeto de medidas corretivas adequadas, incluindo o tratamento da fissuração, a eventual implementação de soluções de reforço estrutural das lajes e a intervenção nas zonas de ancoragem das armaduras, de modo a garantir as condições de segurança, desempenho e durabilidade da estrutura.

### 3.2.4 Patologias referente à falta de recobrimento e à carbonatação

Como já abordado no Capítulo 2, a insuficiência de recobrimento das armaduras em elementos de betão armado constitui uma não conformidade face aos requisitos de durabilidade estabelecidos no Eurocódigo 2, nomeadamente no que se refere à garantia de proteção contra a carbonatação.

De acordo com esta norma, o recobrimento nominal deve ser definido tendo em conta a classe de exposição ambiental, conforme especificado na EN 206, assegurando simultaneamente requisitos de aderência, proteção contra a corrosão e resistência ao fogo.

Importa, no entanto, relembrar que a ausência ou insuficiência de recobrimento não implica automaticamente a corrosão ativa das armaduras, uma vez que o início deste processo depende da despassivação do aço, geralmente associada à redução do pH do betão provocada pela carbonatação.

Adicionalmente, a ausência de revestimento e o reduzido recobrimento contribuem para o aumento da permeabilidade superficial do betão, facilitando a penetração de agentes agressivos e potenciando mecanismos de deterioração.

Neste sentido e por razões técnicas, foram realizados estudos relacionados com a durabilidade do betão. Para isso, comparou-se a espessura do recobrimento das armaduras com a profundidade da carbonatação do betão, de forma a perceber se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) já tinha atingido zonas próximas das armaduras, podendo comprometer a sua proteção contra a corrosão.

Os ensaios de recobrimento foram regulamentados pelas normas: BS 1881-204 – Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters e por EN 12504-5 – Testing concrete in structures – Part 5: Determination of concrete cover using electromagnetic covermeters.

O ensaio consiste na utilização de um pacómetro (neste caso foi utilizado o modelo HILTI PS 300 Ferrosan System) que opera com ondas eletromagnéticas permitindo a visualização da localização das armaduras e a medição da respetiva espessura de recobrimento. Quando encostado à superfície de betão, o aparelho envia um sinal eletromagnético para o interior do elemento estrutural; esse sinal reage ao localizar a armadura e, em seguida, o aparelho interpreta essa reação, identificando a posição do varão e a respetiva profundidade.



Figura 24 - Pacómetro de varrimento HILTI PS 300 Ferroskan System (Fonte: Site da Hilti Portugal, 2026)

Observa-se que os pilares apresentam ausência de revestimento superficial e um recobrimento claramente inferior ao mínimo exigido pelas normas em vigor. Esta condição expõe diretamente o betão à ação do dióxido de carbono atmosférico, favorecendo o avanço da frente de carbonatação em profundidade.

De acordo com o Eurocódigo 2, o recobrimento mínimo ( $c_{min}$ ) deve satisfazer requisitos de durabilidade associados à classe de exposição (por exemplo, XC1 a XC4 para ambientes sujeitos à carbonatação), sendo posteriormente ajustado através de tolerâncias de execução para obtenção do recobrimento nominal ( $c_{nom}$ ). A inexistência deste recobrimento compromete diretamente a vida útil de projeto da estrutura.

No que diz respeito à carbonatação, foram realizados ensaios de medição da profundidade de carbonatação no betão, no intuito de avaliar o estado de conservação do betão e prever o seu comportamento a longo prazo. O procedimento é regulamentado pelo LNEC E 391 – Betões. Determinação da resistência à carbonatação e a EN 4630 - European Committee for Standardization. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test

methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.

O ensaio, assim como visto no capítulo 2, consiste na aplicação da solução química de fenolftaleína a 1% em álcool sobre uma superfície fraturada do betão, funcionando como indicador de pH: torna-se cor-de-rosa em contacto com betão não carbonatado e permanece incolor nas zonas onde ocorreu carbonatação. A frente de carbonatação é determinada medindo a distância entre a superfície exposta e a linha de transição entre as áreas coloridas e não coloridas.

As figuras seguintes comparam a espessura do betão carbonatado com a do recobrimento das armaduras, permitindo constatar que, por vezes, a frente de carbonatação ultrapassa o plano das armaduras, o que configura uma despassivação do aço, ainda que não generalizada.



Figura 25 - Mapa de ensaio para análise da durabilidade piso -2 (Fonte: Peças desenhadas STAP, 2025)

| Localização        | Elemento | Referência | Recobrimento | Profundidade Carbonatação (mm) |
|--------------------|----------|------------|--------------|--------------------------------|
| Piso -2<br>Grupo 5 | Lajes    | 2E 97      | 12,0         | 15,5                           |
|                    |          | 2E 98      | 11,0         | 14,1                           |
|                    |          | 2E 99      | 14,8         | 13,9                           |
|                    | Pilares  | 2E 103     | 43,0         | 5,7                            |
|                    |          | 2E 104     | 15,0         | 5,5                            |
|                    |          | 2E 105     | 17,0         | 5,9                            |

| Localização        | Elemento | Referência | Recobrimento | Profundidade Carbonatação (mm) |
|--------------------|----------|------------|--------------|--------------------------------|
| Piso -2<br>Grupo 6 | Lajes    | 2E 100     | 38,0         | 17,2                           |
|                    |          | 2E 101     | 16,0         | 17,7                           |
|                    |          | 2E 102     | 15,0         | 18,3                           |
|                    | Pilares  | 2E 106     | 28,0         | 4,3                            |
|                    |          | 2E 107     | 26,0         | 5,3                            |
|                    |          | 2E 108     | 15,0         | 18,3                           |

| Elemento | Referência | Recobrimento | Profundidade Carbonatação (mm) |
|----------|------------|--------------|--------------------------------|
| Pilares  | 2E 50      | 41,0         | 26,7                           |
|          | 2E 51      | 17,0         | 22,3                           |
|          | 2E 52      | 25,0         | 34,6                           |
|          | 2E 53      | 32,0         | 37,1                           |
|          | 2E 54      | 39,0         | 36,1                           |
|          | 2E 55      | 47,0         | 36,1                           |

Figura 26 - Comparação dos valores de recobrimento e frente de carbonatação (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

Lembrando que a carbonatação provoca a redução do pH do betão de valores tipicamente superiores a 12,5 para níveis inferiores a aproximadamente 9, conduzindo à destruição da camada passivante das armaduras, na situação observada, como a profundidade de carbonatação atinge a interface aço-betão, reúne assim as condições para o início do processo de corrosão, na presença de oxigénio e humidade.



Figura 27 - Pilares sem revestimento e sem recobrimento (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)



Figura 28 - Armadura exposta (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)



Figura 29 - Pilares sem revestimento e sem recobrimento (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

### 3.2.5 Patologias referente ao teor de cloretos

Como é sabido, o teor de cloretos assume particular importância nas estruturas de betão armado, uma vez que constitui um dos principais agentes responsáveis pela corrosão das armaduras. Neste contexto, foram realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de identificar e quantificar a presença de cloretos ao longo da secção dos elementos de betão armado. Este procedimento permite avaliar o grau de contaminação por cloretos e analisar a sua distribuição em profundidade, sendo um parâmetro fundamental para a compreensão dos mecanismos de degradação das armaduras

O procedimento é regulado pela norma EN 14629: Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures-Test Methods-Determination of Chloride Content in Hardened Concrete. A pesquisa in situ do teor de cloretos na massa de betão foi realizada através da recolha de pó de betão a três profundidades diferentes, permitindo traçar o perfil correspondente da secção estudada, nomeadamente:

- superfície;
- plano das armaduras principais;
- 20 mm para além do plano das armaduras principais.

A determinação do teor de cloretos foi efetuada pelo método RCT – Rapid Chloride Test (Type RCT-87-2) da Germann Instruments, um sistema fiável e rápido para a determinação do conteúdo de iões cloro a partir de amostras de pó de betão.

A perfuradora utilizada para a recolha de pó foi a HILTI TE 30. Os resultados, que constam na figura a seguir, mostram que a concentração de cloretos na massa de cimento assume, para todos os ensaios realizados, valores muito reduzidos, pelo que se pode afirmar que os iões cloretos não constituem agente agressor para os componentes estruturais do edifício.

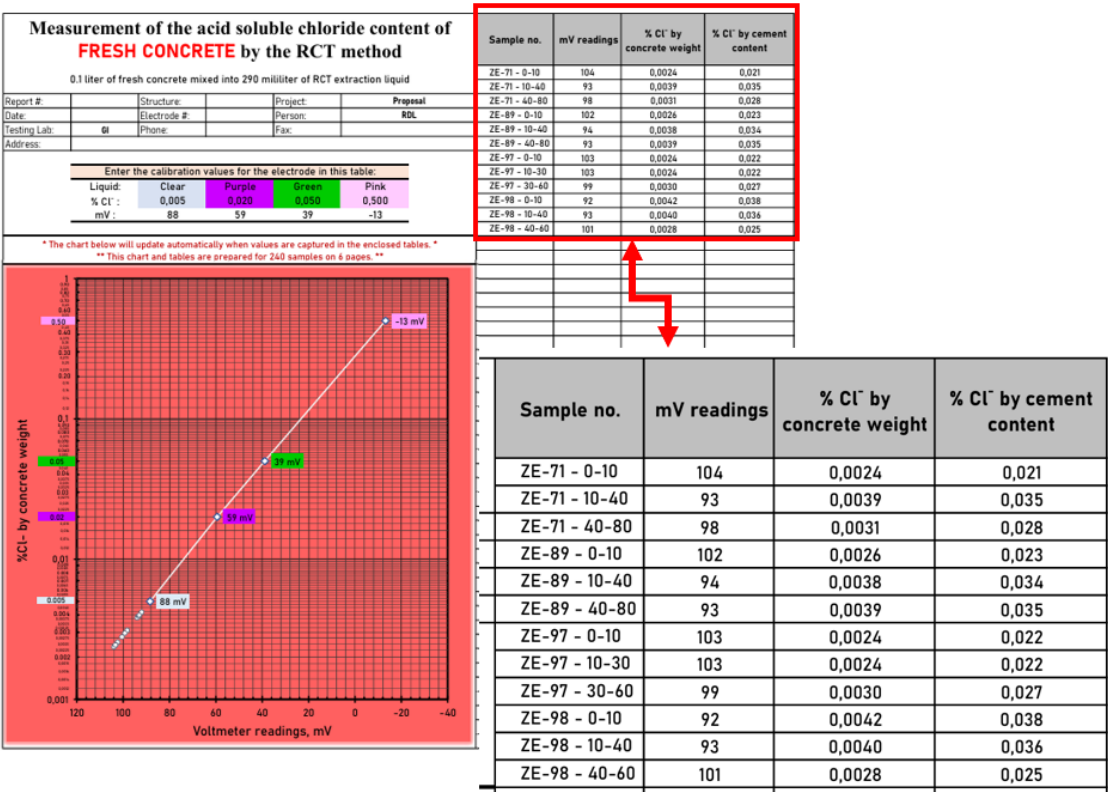


Figura 30 - Ensaio de teor de cloretos, pelo método RCT – Rapid Chloride Test (Type RCT-87-2) da Germann Instruments



Figura 31 - Mapa de verificação do teor de cloretos (Fonte: Relatório de inspeção, 2025)

### **3.2.6 Patologias dos Pilares**

Embora se manifestem com menor expressão comparativamente a outros elementos estruturais, os pilares também apresentam patologias relevantes, nomeadamente insuficiência de recobrimento (como já mencionado anteriormente na secção 3.2.4) e ocorrência de armaduras encurvadas, situações que podem comprometer o seu desempenho estrutural e a durabilidade ao longo da vida útil da estrutura.

## 4

# ESTRATÉGIAS E PROCESSO DE REPARAÇÃO ESTRUTURAL FRENTE A CARBONATAÇÃO

Após a realização das etapas de avaliação e diagnóstico, conforme estabelecido na EN 1504-9, torna-se possível avançar para a definição da estratégia e do processo de reparação da estrutura, com vista à adoção da solução mais adequada.

Com base na análise conjunta dos resultados obtidos, verificou-se que, no que respeita à durabilidade dos elementos estruturais, existem profundidades de carbonatação significativas no betão. Em alguns casos, a frente de carbonatação ultrapassa inclusivamente o recobrimento das armaduras.

Esta situação compromete a proteção natural conferida pelo betão ao aço, potenciando o desenvolvimento de fenómenos de corrosão e, conseqüentemente, a degradação da capacidade resistente dos elementos estruturais, conforme discutido em capítulos anteriores.

Adicionalmente, os recobrimentos existentes revelam-se, em muitos casos, inferiores aos valores mínimos exigidos pela regulamentação em vigor, nomeadamente pelo Eurocódigo 2. Para a classe de exposição XC3 e para um betão da classe C30/37, o recobrimento nominal recomendado é da ordem dos 35 mm. A insuficiência deste parâmetro agrava significativamente a vulnerabilidade da estrutura à ação dos agentes agressivos, nomeadamente ao avanço da carbonatação.

O esquema apresentado na Figura 33 ilustra quatro cenários distintos, sendo os casos (c) e (d) os mais recorrentes no que diz respeito ao avanço da carbonatação.

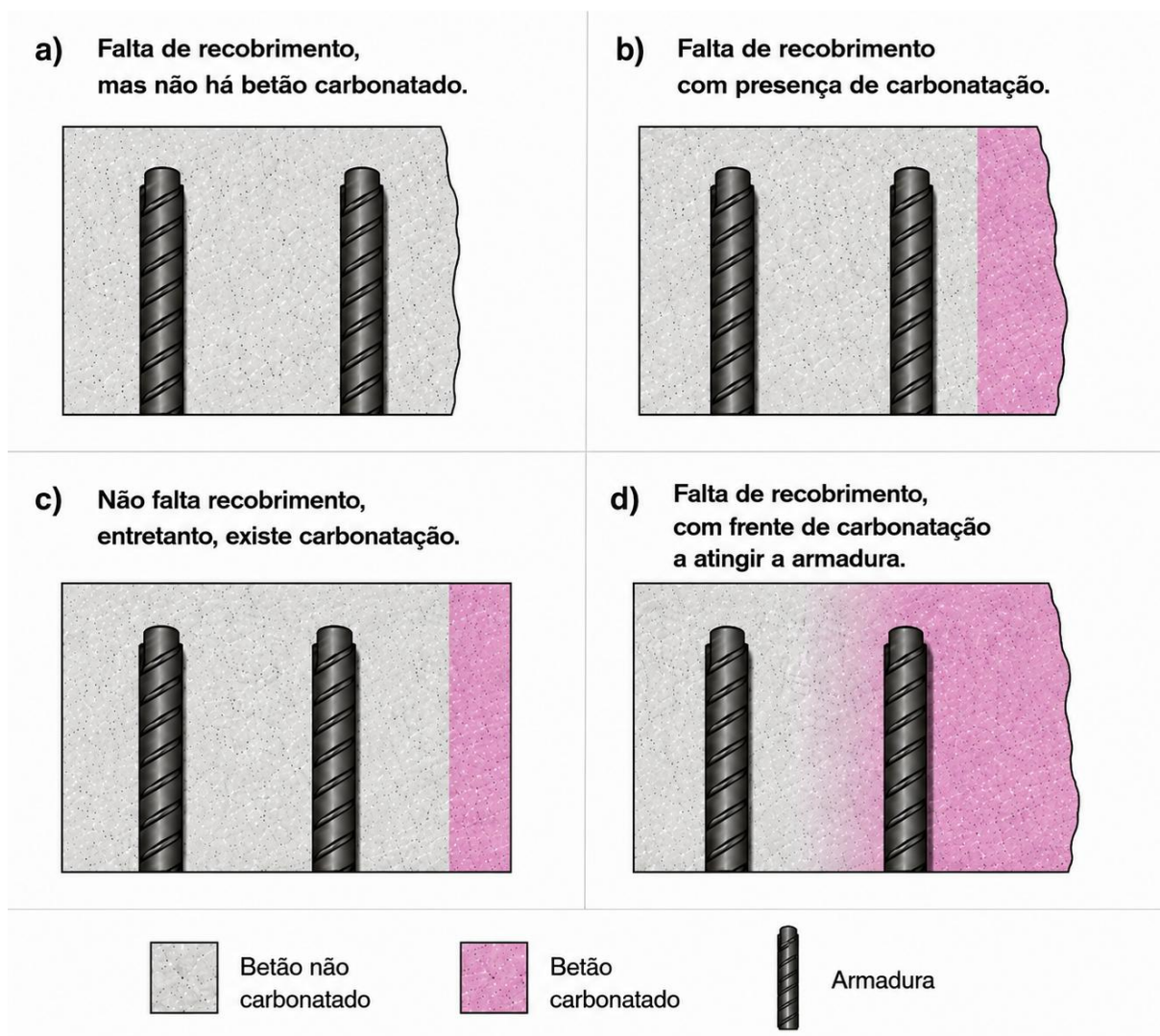


Figura 32 - Esquema de carbonatação existente na edificação

- a) Falta de recobrimento, mas não há betão carbonatado;
- b) Falta de recobrimento com presença de carbonatação;
- c) Não falta recobrimento, entretanto, existe carbonatação;
- d) Falta de recobrimento, com frente de carbonatação a atingir a armadura

Face a estes cenários, a EN 1504 - 9 como já citado no capítulo 2, estabelece princípios e métodos gerais de reparação e proteção do betão, que devem ser consideradas após a avaliação dos resultados da inspeção à estrutura e diagnóstico das principais causas dos danos. Ao todo a norma define 11 princípios e 37 métodos, relacionados aos defeitos no betão e à corrosão das armaduras.

Dentre as soluções apresentadas, que são relevantes para o nosso caso de estudo, destacam-se: os inibidores de corrosão; a injeção de produtos químicos de realcalinização; a proteção catódica combinada com reparos superficiais; revestimentos protetores superficiais e a modificação da microestrutura do betão.

#### **4.1 INIBIDORES DE CORROSÃO**

Como sabemos, o aço no interior do betão está protegido devido à sua elevada alcalinidade. No entanto, esta proteção pode ser comprometida com a entrada de cloretos ou através da carbonatação, quando ocorre a entrada de  $\text{CO}_2$ .

Os inibidores de corrosão atuam por adsorção, ou seja, aderem à superfície do betão e formam uma camada protetora molecular, funcionando como um escudo que impede o contacto do aço com a água e o oxigénio.

Alguns inibidores ajudam a manter ou a reconstruir a camada protetora natural do aço, reforçando o estado passivo e dificultando o início da corrosão, como é o caso dos inibidores à base de nitritos.

Tecnicamente, a corrosão é uma reação eletroquímica, semelhante ao funcionamento de uma pilha. Estes inibidores reduzem a velocidade das reações eletroquímicas, diminuindo tanto a reação anódica como a catódica, e dificultam o fluxo de eletrões, tornando o processo de corrosão mais lento.

Estas substâncias são capazes de retardar a atividade eletroquímica da reação anódica (por meio de inibidores anódicos), da reação catódica (via inibidores catódicos) ou de ambas as reações (com uso de inibidores mistos), rompendo o circuito eletroquímico formado pela célula de corrosão. Para a aplicação em betão, os inibidores devem ser ativos em meio alcalino e não devem alterar substancialmente as propriedades físicas, químicas e mecânicas do betão (Helene, 1986; Andrade, 1992).

Os inibidores podem ser classificados de acordo com sua composição química, mecanismo de proteção e meio de aplicação. Lima (1996), Gentil (2011) e Venkatesh et al. (2019), citado por Schmoeller, expõem as classificações mais conhecidas como descrito na sequência.

#### 4.1.1 Composição Química

Em relação à composição química, Shi et al. (2009) divide os inibidores em:

- a) Orgânicos: agem formando uma película protetora no aço, que inibe as reações anódicas e catódicas dos processos de corrosão, e obstrui o acesso de cloretos e oxigénio – as aminas e os carboxilatos são exemplos de inibidores orgânicos usados em betão armado.
- b) Inorgânicos:
  - estudos mostraram a eficiência do fosfato de sódio em inibir a corrosão por pite, se sua concentração for igual à concentração de cloreto, embora sua eficiência seja parcialmente perdida no betão;
  - o nitrito de cálcio modifica as propriedades químicas superficiais do aço e comporta-se como um acelerador de pega e de endurecimento, podendo atingir melhores resistências à compressão;
  - o nitrito de sódio é muito eficaz e não altera significativamente as propriedades físico-químicas do betão, embora tenha estudos indicando seus efeitos prejudiciais para a resistência à compressão, além de estimular a corrosão por pites, com o aumento da temperatura.
- c) Naturais: atualmente há uma tendência de estudos voltados para materiais sustentáveis, buscando reduzir ao máximo os resíduos e utilizando com eficiência os materiais e bens naturais relacionados com os inibidores de corrosão. Há diversas pesquisas recentes direcionadas à eficiência dos inibidores verdes, desde extratos de folhas, cascas, frutos e sementes de plantas (como exemplo, o extrato de gengibre e o óleo de palmeira têm apresentado bom desempenho na resistência à corrosão, além de serem ecologicamente corretos).

#### 4.1.2 Mecanismo de Proteção

Em relação ao mecanismo de proteção, os inibidores de corrosão podem ser divididos em (Venkatesh et al., 2019, citado por Schmoeller):

- a) Inibidores anódicos: atuam reprimindo a reação do ânodo, criando um filme aderente na superfície da barra e aumentando a polarização anódica – são divididos em dois tipos de inibidores de passivação:
  - Iões não oxidantes, que requerem presença de oxigénio para passivar o aço;

- Aniões oxidantes, com os quais a passivação ocorre sem a presença de oxigénio;
  - As principais substâncias utilizadas como inibidores anódicos são os molibdatos, nitratos, cromatos, ortofosfatos e benzoatos.
- b) inibidores catódicos: atuam reprimindo a reação do cátodo, através de reações que produzem compostos insolúveis que impedem a difusão do oxigénio e a condução de eletrões; porém, são considerados menos eficientes do que os inibidores anódicos, sendo os mais usados: os carbonatos, silicatos, fosfatos, óxido de zinco e polifosfatos.
- c) inibidores mistos: provocam reações inibidoras em ambas as extremidades da célula de corrosão, anódica e catódica – com isso, reduzem a taxa de corrosão, sem mudar significativamente o potencial de corrosão.

Os inibidores catódicos são chamados de inibidores seguros, pois, mesmo com concentração insuficiente, permitem uma corrosão uniforme ao longo da barra, sem causar danos localizados. Já os inibidores anódicos, como os nitritos, são considerados inibidores perigosos, já que, quando em concentração insuficiente para a proteção total do aço, podem provocar uma corrosão localizada, que, muitas vezes, agrava a situação da anomalia já existente (Lima, 1996; Venkatesh et al., 2019).

Os inibidores à base de nitritos de sódio e de cálcio, são os mais estudados na Engenharia Civil porque não alteram significativamente as propriedades físico-químicas do betão (Andrade, 1992).

#### 4.1.3 Meio de Aplicação

De acordo com Lima (1996) citado por Schmoeller (2021), existem duas maneiras de aplicar-se os inibidores de corrosão:

- a) Via adição: São misturados à massa do betão e à medida que o betão endurece, os componentes químicos do produto deslocam-se através da solução existente nos poros do betão e chegam até às armaduras.
- b) Via Migração: Conhecidos como inibidores de corrosão migratórios, são aplicados à superfície do betão endurecido, infiltrando-se no betão e migrando até atingir as armaduras, onde formam uma camada protetora contra a corrosão.

Como se pode perceber, apesar de existirem duas formas de aplicação, ambas têm, em última análise, o mesmo objetivo: migrar até às armaduras através dos poros do betão. A diferença

reside no facto de uma ser adicionada à mistura do betão fresco, sendo utilizada como medida preventiva, enquanto a outra é aplicada em estruturas já existentes, atuando como medida corretiva.

Segundo o anexo da norma EN 1504-10, a aplicação de inibidores de corrosão deve ser considerada como um tratamento superficial ou como um aditivo utilizado na mistura do material de reparação, quando combinada com outros métodos.

Antes da aplicação do produto, é necessário verificar o elemento estrutural; caso este se encontre deteriorado, deve proceder-se à reposição do betão. A preparação do produto deverá ser sempre realizada de acordo com as informações do fabricante, podendo o produto ser aplicado com rolo, pincel ou até mesmo em forma de spray, a depender do fabricante.

## **4.2 MODIFICAÇÃO DA ESTRUTURA DE BETÃO**

Uma das soluções identificadas no mercado para melhoria da impermeabilização do betão foi um produto de origem espanhola. Este produto baseia-se numa tecnologia designada por impermeabilização cristalina, diferenciando-se significativamente dos sistemas convencionais de impermeabilização por membranas.

O funcionamento deste aditivo consiste na sua incorporação diretamente na mistura de betão. Quando ocorre a presença de água, os compostos químicos ativos reagem com partículas de cimento não hidratadas, promovendo a formação de cristais microscópicos insolúveis no interior dos poros capilares e microfissuras do betão. Estes cristais desenvolvem-se em profundidade, reduzindo a permeabilidade do material e dificultando a passagem de água.

Este produto encontrado no mercado é à base de silicatos alcalinos, principalmente silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e silicato de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ), dissolvidos em água.

Após penetrar na rede capilar do betão, esses silicatos reagem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente na pasta cimentícia hidratada, formando adicionalmente C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é o principal composto responsável pela resistência do cimento.

O novo C-S-H formado densifica a microestrutura do betão, reduzindo a porosidade e tornando o produto parte integrante da matriz do betão, em vez de formar apenas uma película superficial. A reação simplificada formada é:

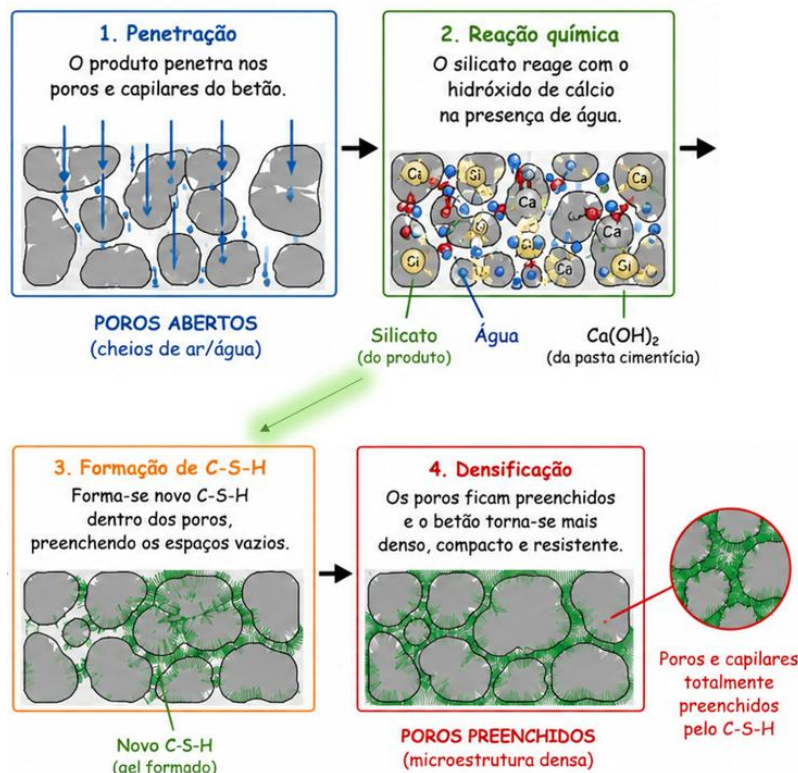
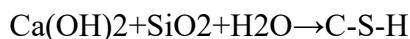


Figura 33 - Densificação da microestrutura do betão (Fonte: Criação Chatgpt, 2026)

Ao contrário dos sistemas tradicionais de impermeabilização superficial, como tintas impermeabilizantes ou mantas betuminosas, esta tecnologia atua de forma interna e permanente, tornando-se parte integrante da matriz cimentícia. Desta forma, o desempenho do sistema não depende exclusivamente de uma camada superficial suscetível à degradação mecânica, química ou ao envelhecimento ao longo do tempo.

Outra característica relevante deste tipo de solução é a sua capacidade de auto-cicatrização (self-healing). Sempre que surgem microfissuras e ocorre infiltração de água, os componentes reativos presentes no betão podem voltar a ser ativados, originando a formação de novos cristais que contribuem para o fecho parcial ou total dessas fissuras. Esta propriedade permite aumentar a durabilidade e a resistência à penetração de água ao longo da vida útil da estrutura.

Este comportamento contribui significativamente para o aumento da durabilidade do betão, reduzindo a penetração de água e de agentes agressivos responsáveis pela degradação das armaduras e pelo aparecimento de patologias estruturais. Consequentemente, verifica-se uma

diminuição da necessidade de intervenções de manutenção e reparação, traduzindo-se numa redução dos custos associados à conservação da estrutura ao longo do tempo.

Além disso, por prolongar a vida útil das construções e minimizar futuras intervenções corretivas, esta tecnologia apresenta também vantagens do ponto de vista da sustentabilidade, reduzindo o consumo de materiais e recursos necessários para reparações e reabilitações.

A aplicação deste sistema é particularmente comum em estruturas sujeitas à presença contínua ou pressão hidrostática de água, nomeadamente fundações, reservatórios, túneis, piscinas, lajes enterradas e outras infraestruturas subterrâneas.

Verifica-se que não se pode caracterizar este produto como um inibidor de corrosão, mas ajuda a preveni-la de forma indireta, já que impede a entrada de agentes agressivos à corrosão, funcionando como barreira interna permanente.

A tabela a seguir apresenta o processo de formação cristalina no interior da matriz cimentícia, evidenciando o preenchimento dos poros capilares e microfissuras responsáveis pela permeabilidade do betão.

Quadro 8 – Diferença entre impermeabilização cristalina e impermeabilização convencional

| <i>Impermeabilização Cristalina</i>      | <i>Mantas/Tintas Convencionais</i>    |
|------------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Atua dentro do betão</i>              | <i>Atua na superfície</i>             |
| <i>Auto-selagem de microfissuras</i>     | <i>Não possui regeneração</i>         |
| <i>Elevada durabilidade</i>              | <i>Sofre desgaste com o tempo</i>     |
| <i>Menor necessidade de manutenção</i>   | <i>Necessita manutenção periódica</i> |
| <i>Resistente à pressão hidrostática</i> | <i>Pode descolar ou fissurar</i>      |

A Figura a seguir apresenta o processo de formação cristalina no interior da matriz do betão, evidenciando o preenchimento dos poros capilares e microfissuras responsáveis pela permeabilidade do betão.



Figura 34 - Entrada de água nas fissuras com material de origem espanhola (Fonte: Consultor da marca, 2026)



Figura 35 - Cristalização da fissura após entrada de água no elemento estrutural (Fonte: Consultor da marca, 2026)

Apesar das vantagens associadas à impermeabilização cristalina, este sistema apresenta algumas limitações que devem ser consideradas durante o projeto e aplicação. A sua eficácia

depende diretamente da correta dosagem do produto, da qualidade, da mistura, do betão e das condições de execução em obra.

Além disso, o mecanismo de auto-cicatrização é mais eficiente em microfissuras capilares, não sendo suficiente para fissuras de dimensões maiores que 4 mm ou resultantes de movimentos estruturais significativos. Nestes casos, poderá ser necessária a utilização de soluções complementares de impermeabilização ou reparação.

Importa ainda referir que este tipo de tecnologia não substitui um adequado dimensionamento estrutural nem elimina a necessidade de boas práticas construtivas, nomeadamente no controlo da fissuração, compactação e cura do betão.

### **4.3 REVESTIMENTOS PROTETORES SUPERFICIAIS**

Os sistemas de proteção 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.

De acordo com a EN 1504-2, para proteção do betão face aos mecanismos de degradação, três são os métodos de proteção superficial: a impregnação hidrofóbica (H), a impregnação (I) e o revestimento (C).

#### **4.3.1 Impregnação Hidrofóbica**

A impregnação hidrofóbica é definida como o tratamento do betão de maneira que se possa obter uma superfície repelente a água. Neste sentido os poros e os capilares não são preenchidos nem tão pouco a matriz do betão é modificada.

Neste caso os produtos baseados em impregnações hidrofóbicas, são apenas repelentes de água, que criam uma película protetora na superfície do elemento estrutural de betão armado, mas permitem uma 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, entretanto este método permite a penetração do dióxido de carbono, podendo conduzir a um aumento da velocidade de carbonatação.

#### 4.3.2 Impregnação

A impregnação é definida como um tratamento do betão que reduz a porosidade e reforça a superfície, neste caso os poros e os capilares são então parcialmente ou totalmente preenchidos.

Este tipo de tratamento geralmente 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 (Henriques, 2016).

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.

Para proceder à aplicação deste método deve-se:

- 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);
- Aplicar uma camada com uma talocha de modo a regularizar a superfície e tapar os vazios;
- Aplicar um primário com um pincel (opcional);
- Aplicar o material de baixo para cima, por pulverização, sob vácuo, ou através de um gel.

A norma EN 1504-10 ressalta que a penetração da impregnação hidrofóbica (por meio de um silano ou siloxano) se aplicada por duas fases (molhado sobre molhado) é mais eficiente e além disso sugere que a penetração deverá ser contínua e com pelo menos 2 mm de espessura.

#### 4.3.3 Revestimentos

Os revestimentos (coatings) são produtos aplicados na superfície do betão para formar uma camada contínua de proteção contra os agentes agressivos ambientais. Podem ser classificados de acordo com a sua composição, comportamento ou função/proteção, como revestimentos acrílicos, revestimentos epóxi, revestimentos de poliuretano, revestimentos cimentícios poliméricos e revestimentos elastoméricos, sendo o método selecionado conforme o mecanismo de degradação existente no betão (carbonatação, cloretos, ataque químico, etc.).

Os revestimentos acrílicos possuem boa proteção contra a carbonatação, resistência aos raios ultravioleta, são flexíveis e muito utilizados em fachadas.

Os revestimentos à base de epóxi possuem elevada resistência química, muito baixa permeabilidade, alta resistência mecânica e baixa permeabilidade à água. Entretanto, podem sofrer alteração de coloração sob grande incidência de raios ultravioleta, possuem pouca permeabilidade ao vapor e baixa flexibilidade. São geralmente aplicados em pisos industriais e estações de tratamento de águas, por exemplo.

Os revestimentos à base de poliuretano possuem elevada elasticidade e boa resistência aos raios ultravioleta. Têm capacidade de continuar íntegros e impermeáveis mesmo quando o betão fissura ou movimenta-se ligeiramente. Geralmente são aplicados em coberturas, estacionamento, reparação de fissuras em pisos de betão armado de alta resistência e estruturas sujeitas à deformação.

Os revestimentos cimentícios poliméricos são compostos por misturas de cimento, polímeros e aditivos, proporcionando boa aderência, permeabilidade ao vapor, proteção contra a água e compatibilidade com o betão.

Os revestimentos elastoméricos são projetados para acomodar a fissuração e acompanhar as deformações. Possuem boa flexibilidade, protegem contra a carbonatação e têm capacidade de continuar íntegros e impermeáveis mesmo quando o betão fissura ou movimenta-se ligeiramente.

Para além disso, existem os revestimentos de pintura, talvez o método mais antigo e mais prático de revestimento superficial. São amplamente utilizados para proteção estética e superficial do betão, podendo também contribuir para a redução da penetração de água, dióxido de carbono e outros agentes agressivos, dependendo do tipo de tinta utilizada.

A aplicação deste material é parecida com a impregnação hidrofóbica, diferindo no facto de neste método poder ser realizada a utilização de pincel, rolo, talocha ou projeção. Além disso quando o material for polimérico, a temperatura do ar deve ser pelo menos 3 °C acima do ponto de orvalho. A depender do método também pode ser aplicada camada sobre camada com material ainda molhado.

#### 4.4 REALCALINIZAÇÃO

A realcalinização do betão armado tem como objetivo restabelecer a alcalinidade perdida devido ao avanço da carbonatação. Como referido anteriormente, o betão novo apresenta um pH elevado, geralmente entre 12,5 e 13,5, o que garante a passivação das armaduras. Com o passar dos anos e a penetração do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) através dos poros do betão, ocorre a carbonatação, provocando a redução da alcalinidade e a diminuição do pH para valores próximos de 9,0.

O método de realcalinização mais utilizado é a realcalinização eletroquímica. Esta técnica apresenta um princípio de funcionamento semelhante ao da extração eletroquímica de cloretos, embora esta última não seja abordada no presente trabalho por não existir contaminação por cloretos na estrutura em estudo. Importa, contudo, referir que, apesar das semelhanças entre ambos os processos, a realcalinização eletroquímica é eficaz apenas na mitigação dos efeitos da carbonatação, não resolvendo problemas associados à presença de cloretos.

A realcalinização corresponde ao Princípio 7 (preservação ou restauração da passividade) e ao Método 7.3 (realcalinização eletroquímica do betão carbonatado) da norma EN 1504-9. De forma geral, o processo consiste na aplicação temporária de uma corrente elétrica através de um material absorvente, normalmente uma manta, impregnada com uma solução alcalina de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

Inicialmente, aplica-se sobre a superfície do betão a manta embebida na solução alcalina. Em seguida, instala-se uma malha metálica externa que atua como ânodo temporário, sendo ligada ao polo positivo da fonte de corrente contínua, enquanto as armaduras são ligadas ao polo negativo, funcionando como cátodo. Posteriormente, o sistema é ligado à fonte de corrente contínua, fazendo com que os iões alcalinos migrem para o interior do betão. Este fenómeno promove o aumento do pH na zona envolvente das armaduras, permitindo a sua repassivação.

Após algumas semanas de tratamento, o sistema temporário é removido, permanecendo o betão com uma alcalinidade restaurada e uma maior capacidade de proteção das armaduras contra a corrosão. A Figura 36 representa esquematicamente o processo de funcionamento da realcalinização.

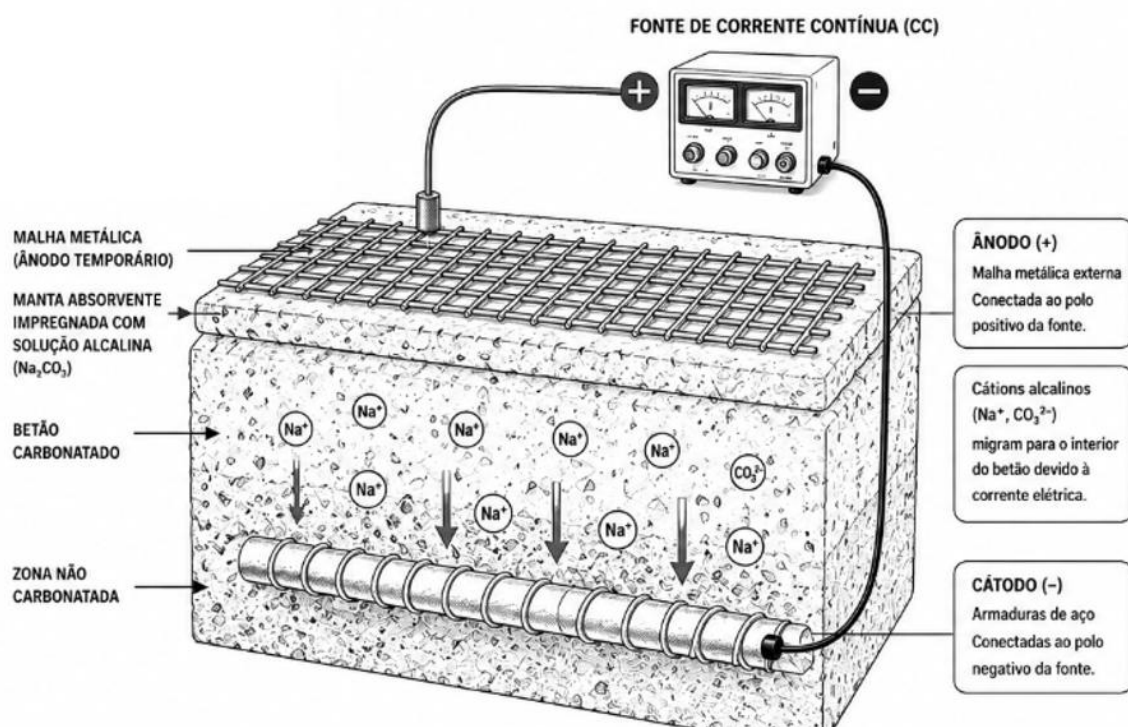


Figura 36 - Representação esquemática da realcalinização (Fonte: adaptada de Henriques, 2016)

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 eletricamente ligadas entre si e o betão deve ter uma distribuição de corrente adequada e homogénea. Todas as reparações antigas também devem ser identificadas e a profundidade da contaminação por carbonatação deve ser determinada. 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 (Henriques, 2016).

## **4.5 ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO UTILIZADAS NO CASO DE ESTUDO**

### **4.5.1 SOLUÇÕES FRENTE À CARBONATAÇÃO**

Face às situações de degradação apresentadas no capítulo 3, foi definida uma estratégia de intervenção baseada na avaliação conjunta das profundidades de carbonatação e dos recobrimentos existentes, contemplando, conforme os casos, a aplicação de inibidores de corrosão, a remoção do betão contaminado e a reposição da secção com materiais compatíveis, bem como o aumento dos recobrimentos de armadura através da aplicação de betão ou argamassas de reparação.

Os métodos de correção adotados foram:

- Na falta de recobrimento sem carbonatação deverá ser utilizada argamassa de reparação para regularização do recobrimento com adição de inibidores de corrosão;
- Em elementos carbonatados que não tenham atingido a armadura e não tenham falta de recobrimento deverá ser aplicado os inibidores de corrosão migratórios;

Nos casos em que a frente de carbonatação atingiu a armadura, o betão carbonatado deverá ser removido e repostado, garantindo o recobrimento regulamentar e adicionando inibidores de corrosão à “amassadura”. Ainda nestes casos, se houver perda significativa da secção das armaduras, estas deverão também ser substituídas.

Uma vez terminados os trabalhos de reforço estrutural, propõe-se que os elementos existentes de betão armado sejam pintados com um material monocomponente de dispersão aquosa de alta resistência para proteção e reabilitação visual do betão.

Uma vez curado este tipo de pintura forma uma camada flexível, com capacidade de ponteio de fissuras (capacidade que a tinta ou revestimento tem de acompanhar pequenas fissuras do substrato sem “rachar” ou abrir.), elevada resistência à humidade e aos agentes atmosféricos nocivos (CO<sub>2</sub>), mantendo-se permeável ao vapor de água. Poderá ainda, apresentar uma excelente resistência ao envelhecimento, à humidade e à radiação UV, garantindo uma proteção duradoura da superfície tratada

#### **4.5.2 SOLUÇÃO PARA LAJES**

Apesar de não terem sido detetadas deformações significativas, as lajes do estacionamento (pisos -2 e -1) apresentam elevado grau de fissuração, manifesta falta de capacidade portante e entrega insuficiente das armaduras das lajes executadas anteriormente.

A substituição integral das lajes em pisos enterrados apresenta-se como uma solução complexa e de difícil execução, uma vez que implicaria a remoção, ainda que faseada, dos apoios às contenções periféricas. Assim, optou-se por uma estratégia de reabilitação baseada no reforço das lajes existentes.

Em alternativa, e porque as lajes não apresentam sinais evidentes de deformação, optou-se pela injeção das fissuras com resinas do tipo F (injection products for force transmitting filling of cracks - EN 1504-5:2013) e pelo reforço com laminados de carbono nas faces inferiores a meio-vão e superiores sobre os apoios.

Nas faces inferiores preconiza-se a aplicação de laminados externamente aderidos (EBR), tipicamente com 50 mm de largura, 1.2 mm de espessura e afastados entre si de 500mm. Sobre os apoios adoptam-se laminados inseridos (NSM) com secção  $10 \times 2.8 \text{ mm}^2$ , aplicados a cutelo em rasgos com larguras de 5 mm a 8 mm e profundidades entre 12 mm e 15 mm.

# 5

## CONCLUSÃO

A análise desenvolvida ao longo desta dissertação permitiu concluir que a seleção de uma estratégia de reparação e reforço estrutural não deve basear-se na aplicação isolada de uma determinada técnica, mas sim resultar de uma avaliação integrada do estado de conservação da estrutura, dos mecanismos de degradação presentes e das condições de exposição a que os elementos estruturais se encontram sujeitos. Deste modo, a eficácia das diferentes soluções depende não apenas das suas características técnicas, mas também do grau de deterioração existente e da sua adequação às patologias identificadas.

No caso de estudo, verificou-se que a carbonatação constitui o principal mecanismo responsável pela despassivação das armaduras, encontrando-se associada, em grande parte dos elementos estruturais, à insuficiência de recobrimento e, em diversos casos, ao desenvolvimento de processos de corrosão. Os resultados obtidos durante a inspeção visual, a campanha de ensaios e a caracterização dos elementos estruturais permitiram concluir que estas patologias não podem ser resolvidas através da aplicação de uma única técnica de reparação, tornando necessária a combinação de diferentes métodos de intervenção para garantir a recuperação da durabilidade e da capacidade resistente da estrutura.

Os inibidores de corrosão revelam-se uma solução eficaz quando aplicados de forma preventiva ou quando a frente de carbonatação ainda não atingiu as armaduras, permitindo retardar o desenvolvimento do processo corrosivo e prolongar a vida útil da estrutura. No entanto, quando a corrosão já se encontra instalada e existe perda significativa de recobrimento ou degradação do betão, a sua aplicação isolada deixa de ser suficiente para assegurar a proteção das armaduras. No edifício em estudo, nos elementos em que a carbonatação ainda não atingiu as armaduras, a utilização deste método poderá constituir uma solução complementar de proteção.

Contudo, optou-se igualmente pela aplicação de um revestimento superficial à base de tinta, de forma a proporcionar uma proteção adicional contra a penetração de agentes agressivos.

Relativamente ao método de densificação da microestrutura do betão, conclui-se que a sua aplicação poderá representar uma solução interessante em intervenções de reparação que envolvam a substituição do betão degradado, uma vez que promove a redução da permeabilidade do material e apresenta capacidade de selagem de futuras microfissuras através de processos de cristalização. No entanto, esta tecnologia revela maior eficácia em elementos estruturais exteriores ou sujeitos à presença frequente de água, condição indispensável para a ativação do processo de cristalização descrito pelo fabricante. Considerando que os elementos estruturais analisados neste estudo são predominantemente interiores, entende-se que esta solução não apresenta vantagens suficientemente relevantes que justifiquem a sua adoção.

A realcalinização eletroquímica constitui igualmente uma alternativa tecnicamente válida para estruturas afetadas predominantemente pela carbonatação, enquadrando-se no Princípio 7 da EN 1504-9, relativo ao restabelecimento da passividade das armaduras. Este método atua sobre o betão envolvente, restabelecendo a sua alcalinidade e promovendo a repassivação das armaduras, sem intervir diretamente sobre o aço. Contudo, no caso de estudo, a presença generalizada de insuficiência de recobrimento e de degradação localizada do betão limita a eficácia desta técnica, tornando a sua aplicação menos vantajosa do ponto de vista técnico e económico quando comparada com métodos convencionais de reparação.

No que respeita às técnicas de impregnação e impregnação hidrofóbica, conclui-se que estas desempenham essencialmente uma função preventiva, reduzindo a absorção de água e dificultando a penetração de agentes agressivos no interior do betão. Todavia, por não promoverem o restabelecimento da alcalinidade do betão nem corrigirem os efeitos provocados pela carbonatação, estas soluções não se revelam adequadas para a reparação das patologias identificadas neste edifício, podendo, no entanto, constituir medidas de proteção complementar em estruturas novas ou após a execução das reparações necessárias.

As soluções analisadas ao longo desta dissertação encontram-se em conformidade com os princípios estabelecidos na EN 1504-9, evidenciando que a seleção dos métodos de intervenção deve basear-se no diagnóstico das causas da degradação e não apenas na correção das

manifestações visíveis. Esta abordagem permite definir estratégias de reparação mais eficazes e duráveis, adaptadas às necessidades específicas de cada estrutura.

Face às condições observadas no edifício em estudo, conclui-se que a estratégia de intervenção mais adequada consiste na remoção do betão degradado, limpeza das armaduras e substituição das que apresentem perda significativa de secção, reconstrução das zonas intervencionadas com materiais de reparação apropriados e aplicação de sistemas de proteção superficial. Esta solução permite eliminar os efeitos da degradação, restabelecer as condições de proteção das armaduras e aumentar significativamente a durabilidade da estrutura, constituindo a alternativa tecnicamente mais adequada para as patologias identificadas.

Os resultados obtidos ao longo desta investigação demonstram igualmente que as técnicas de reparação, por si só, não substituem a importância das medidas preventivas adotadas durante as fases de projeto e construção. A correta definição do recobrimento nominal das armaduras, em conformidade com as classes de exposição previstas na EN 206 e no Eurocódigo 2, a adequada seleção dos materiais constituintes do betão, o controlo rigoroso da execução e a implementação de medidas de proteção desde a fase inicial da estrutura são fatores determinantes para minimizar o desenvolvimento da carbonatação e reduzir a necessidade de futuras intervenções de reabilitação.

O setor da construção tem vindo a registar uma evolução significativa no desenvolvimento de novos materiais e tecnologias de reparação, procurando soluções cada vez mais eficazes, sustentáveis e menos invasivas. Neste contexto, uma tecnologia capaz de recuperar armaduras afetadas pela corrosão sem necessidade de remover o betão envolvente representaria um avanço de elevada relevância para a engenharia de reabilitação, permitindo reduzir os custos de intervenção, minimizar os impactos na utilização das estruturas e preservar uma maior parte dos elementos originais.

Em síntese, esta dissertação demonstra que a reabilitação de estruturas de betão armado exige uma abordagem baseada num diagnóstico rigoroso das patologias e na seleção criteriosa das técnicas de intervenção, não existindo uma solução universal aplicável a todas as situações. A escolha da metodologia de reparação deve considerar simultaneamente os mecanismos de degradação, o estado de conservação da estrutura, as condições de exposição e os requisitos de durabilidade pretendidos. Neste contexto, reforça-se a importância da inspeção, da

caracterização dos materiais e da compreensão dos mecanismos de deterioração como ferramentas fundamentais para definir intervenções eficazes, seguras e duráveis. Considera-se, assim, que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos, contribuindo este trabalho para uma melhor compreensão dos processos associados à carbonatação do betão armado e para a seleção fundamentada de estratégias de reparação adequadas a estruturas existentes, promovendo a preservação do património construído e o prolongamento da sua vida útil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. São Paulo: Pini, 1992.

Corrosion of Metals - Mechanisms and Characteristics (<https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/failure-modes-of-materials/corrosion/>) (Acessado em 25 de março de 2026)

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.

EN 1504-5:2013, Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 5: Injeção do Betão, Portugal, 2014.

EN 1504-9:2004, Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas, Portugal, 2009.

EN 1504-10:2008, Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, Requisitos, Controlo de Qualidade e Avaliação da Conformidade - Parte 10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra, Portugal, 2008.

EN 14629: Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures-Test Methods-Determination of Chloride Content in Hardened Concrete, 2007.

Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Portugal, 2004.

Fernandes, Dennis Videira (2011). *Estudos da aderência de barras de aço coladas ao concreto com resina Epóxi*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ)

Flávio Lopes e Miguel Brito Correia (2014). ICOMOS Princípios para análise; conservação e restauro de elementos estruturais do património arquitetónico In *Património Cultural, critérios e normas internacionais de proteção*, pp. 407-410, Editora Caleidoscópio, Casal de Cambra.

Fonsêca, Márcia Suzana Dutra Abreu Borges da, (2023). *Análise do comportamento do aço galvanizado frente à corrosão por cloretos e seu efeito na aderência*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Helene, Paulo Roberto do Lago (1993). *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, São Paulo

Helene, P.R.L. (1993). *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

Henrique, Sara Martins (2016). *Procedimentos de Reparação de Estruturas de Betão Normas e Recomendações*. Dissertação de Mestrado, Técnico Lisboa.

Lúcio, Válder J.G. e Marreiros Rui. P.C (2005). *Estado do conhecimento em aderência de varões nervurados de aço ao betão em elementos de betão armado* ([Aderência Aço-Betão em Estruturas Armadas | PDF | Estresse \(Mecânica\) | Concreto reforçado](#)) (Acessado em 17 de março de 2026)

Medeiros, M. H. F.; Helene, P. *Migração de íons cloreto no concreto-fluência da consistência, relação água/cimento e consumo de cimento*. Revista IBRACON, ano XI, n. 32, 53-65 p., Fev/Mar/Abr 2003, São Paulo.

Meira, Gibson e Figueiredo, Enio Pazini (2013). *Corrosión de armadura de estructuras de hormigón*, México.

MEIRA, G. R. (2017). *Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção*. IFPB. João Pessoa.

NACE INTERNATIONAL, 2016. International Measures of Prevention, Application, and Economics Corrosion Technologies Study, disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-InternationalReport.pdf> (Acessado em 22 de março de 2026)

Norma Europeia NP EN 206:2013+A2 2021. Betão, especificação, desempenho, produção e conformidade, Portugal, 2021.

Norma Portuguesa, NP EN 13791 – Avaliação da resistência à compressão do betão nas estruturas e em produtos pré-fabricados. 2008

Schmoeller, Francieli, e Lima, Maryangela Geimbra de. *Inibidores de corrosão para estruturas de concreto armado: uma revisão*. Concreto & Construções. Ed. 103. Jul-Set.2021, p.34-38. Ibracon. São Paulo.

Stein, Kássio Joe (2016) *Avaliação Experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado*, Dissertação de Grau, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

TUUTTI, K. Corrosion of Steel in Concrete, CBI Forskning 82:4, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982. UNE 36740:98 *Determinación de la adherencia de las barras y alambres de acero para hormigón armado. Ensayo de la viga*, AENOR, 1998.