

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe por provar o contrário”

Albert Einstein

RESUMO

Este projeto tem como principal objetivo aprofundar o conhecimento dos principais métodos de reabilitação e reforço a aplicar nas estruturas de betão armado. Pretende-se, que atendendo à patologia que o betão apresente, conhecer a técnica de reabilitação ou de reforço a aplicar, assim como o seu respetivo processo de execução.

A norma NP EN 1504 assume um papel importante na reabilitação e reforço de estruturas de betão armado, pois define princípios e métodos a utilizar para se obter um trabalho eficiente.

Identificam-se as principais patologias do betão que surgem na fase de construção, assim como outras como as fissurações que podem ocorrer ao longo da vida da estrutura.

Abordam-se os principais ensaios de diagnóstico de patologias e que se agrupam em ensaios “in situ” e em ensaios laboratoriais. Os dois grupos de ensaios são, muitas vezes, utilizados como complemento um do outro.

Palavras-chave: Reabilitação; Reforço; Patologias; Ensaios; Causas

ABSTRACT

The purpose of this project is to get deeply in the knowledge of the main rehabilitation and reinforcement concrete structures methods. It is intended to know the rehabilitation and reinforcement method depending on which pathology the concrete structure exhibits, as well as the implementation process to apply in order to fix it.

The NP EN 1504 takes an important role in the rehabilitation and reinforcement concrete structures, because it defines principles and methods to use in order to make an efficient work.

It will be described the main concrete pathologies that occur during the construction process, as well as the cracks that may issue during the structure life time.

The main diagnostic tests for pathologies are divided into two groups, “in situ” tests and laboratory tests. These groups are often combined as complement of each other.

Keywords: Rehabilitation; Reinforcement; Pathologys; Tests; Causes

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Estrutura do relatório	3
2	O BETÃO ARMADO	4
2.1	Enquadramento Histórico	4
2.2	Norma NP EN 1504.....	4
2.2.1	Estrutura da norma.....	4
2.2.2	Aplicabilidade.....	6
2.3	Causas de degradação do betão	6
2.3.1	Degradação física do betão.....	8
2.3.2	Degradação do betão devido a causas humanas	11
2.3.3	Degradação mecânica do betão	12
2.3.4	Degradação química do betão.....	13
2.3.5	Degradação eletroquímica do betão	16
2.4	Patologias das estruturas de betão armado	18
2.4.1	Anomalias decorrentes do processo de construção	19
2.4.2	Anomalias estruturais	24
2.4.3	Anomalias de durabilidade	31
3	TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO BETÃO ..	37
3.1	Ensaaios “ <i>in situ</i> ”	38
3.1.1	Dureza superficial.....	38
3.1.2	Resistência à tração	38
3.1.3	Ultra-sons	39
3.1.4	Ensaios de Carga	41

3.1.5 Extensómetro mecânico	42
3.1.6 Micro-cover meter.....	43
3.1.7 Profundidade da carbonatação	44
3.1.8 Penetração de cloretos.....	45
3.1.9 Medição do potencial de corrosão.....	46
3.1.10. Medição do teor de humidade do betão	48
3.2 Ensaaios Laboratoriais	48
3.2.1 Determinação da resistência à compressão, obtida através da extração de carotes	48
3.2.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral.....	49
3.2.3 Módulo de elasticidade.....	50
3.2.4 Fluência	52
3.2.5 Retração.....	53
3.2.6 Absorção de água	53
3.2.7 Permeabilidade à água.....	54
3.2.8 Difusão de cloretos.....	56
3.2.9 Carbonatação acelerada.....	57
3.2.10 Análise Petrográfica	58
4 TÉCNICAS DE REPARAÇÃO E REFORÇO DO BETÃO.....	59
4.1 Técnicas de Reparação	60
4.1.1 Reparação de Fendas.....	60
4.1.2 Reparação de vazios e zonas porosas.....	64
4.1.3 Reparação de destacamentos e de zonas fragmentadas.....	65
4.1.4 Reparação de desagregações	70
4.2 Técnicas de Reforço	70
4.2.1 Reforço por encamisamento do betão	70

4.2.2 Reforço por adição de chapas coladas	72
4.2.3 Reforço por adição de elementos de FRP	75
4.2.4 Reforço por introdução de perfis metálicos	78
4.2.5 Reforço por pré-esforço exterior	80
5 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

Índice de Figuras

Figura 1 - Diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão em função da temperatura [3]	11
Figura 2 - Processo de corrosão de armaduras devido à carbonatação do betão [7].....	16
Figura 3 - Zonas porosas no betão - “bolhas de pele” [5]	19
Figura 4 - Vazios no betão - “chochos” [5].....	19
Figura 5 - Acumulação de agregados - “ninhos de pedras” [5]	20
Figura 6 - Espaçamento das armaduras muito pequeno [5]	20
Figura 7 - Erro de geometria do pilar [5]	20
Figura 8 - Descontinuidades visíveis - “esbabaçado” [5]	21
Figura 9 - Descontinuidades visíveis - “crostas” [5].....	21
Figura 10 - Mancha de humidade – cofragem [5].....	21
Figura 11 - Mancha de humidade – ascensional [6].....	21
Figura 12 – Deficiente colocação das armaduras [5]	22
Figura 13 – Armaduras oxidadas, antes da betonagem [5]	22
Figura 14 – Descontinuidades visíveis - “esbabaçado” [5].....	22
Figura 15 – Deficiente recobrimento [7].....	23
Figura 16 – Deficiente colocação do cabo de pré-esforço [5].....	23
Figura 17 – Fissuras por deficiente cura do betão [7]	24
Figura 18 – Fissuras por assentamento plástico do betão [7].....	24
Figura 19 – Fissuras por remoção prematura do escoramento [5]	24
Figura 20 - Fissuração por tração simples [5]	25
Figura 21 – Fissuração por compressão simples [8]	26
Figura 22 – Fissuração por flexão simples com esforço transversal [8]	26
Figura 23 – Fissuração por esforço transversal [9]	26
Figura 24 – Fissuração por torção [10]	26
Figura 25 – Distribuições de temperaturas diferenciais numa estrutura [11]	27
Figura 26 – Retração devido a diferentes gradientes de humidade [5]	28
Figura 27 - (a) deformação côncava (b) deformação convexa (c) assentamentos diferenciais [12]	28
Figura 28 – Fissura de deslocamento relativo dos apoios [5]	29
Figura 29 – Fissuras devidas à ação do sismo [13]	29

Figura 30 – Parede com destacamento do betão após incêndio [14].....	30
Figura 31 – Fissuração devido a cargas excessivas [5]	30
Figura 32 – Zona fragmentada do betão devido a ação de choque (acidente de tráfego) [5]	31
Figura 33 – Manchas de ferrugem [5]	31
Figura 34 – Processo de fissuração por solidificação da água capilar [5].....	32
Figura 35 – Processo de fissuração por reações álcalis-sílica [5].....	33
Figura 36 – Fissuração orientada resultante de reações álcalis-sílica e de esforços de compressão [5].....	34
Figura 37 – Processo de desagregação gerado pelo ataque de sulfatos [5]	35
Figura 38 – Desagregação gerada pelo ataque de cloretos [5]	35
Figura 39 – Processo de desagregação gerado pelo ataque de ácidos [5]	36
Figura 40 – Esclerómetro de Schmidt [15].....	38
Figura 41 – Pull-off [16].....	38
Figura 42 – Modos de rotura do ensaio pull-off (1 – Pastilha metálica; 2 – Cola; 3 – Sistema de revestimento; 4 – Suporte) [17]	39
Figura 43 – Ensaio de ultra sons [17]	39
Figura 44 – Métodos de disposição dos tipos de ensaio de ultra-sons [18]	40
Figura 45 – Ensaio dinâmico no Estádio da Luz [1]	41
Figura 46 – Ensaio estático numa laje [19]	41
Figura 47 – Gráfico com curvas de ensaio antes e após reforço da estrutura [19].....	42
Figura 48 – Extensómetros mecânicos [20]	43
Figura 49 – Micro-cover meter [21]	44
Figura 50 – Carbonatação do betão – Fenolftaleína [22]	45
Figura 51 – Evolução da penetração de cloretos no betão [23].....	46
Figura 52 – Perfil de cloretos em profundidade [23].....	46
Figura 53 – Medição dos potenciais elétricos em obra [24].....	47
Figura 54 – Sonda para medir o teor de humidade do betão in-situ [5]	48
Figura 55 – Equipamento para extrair carotes [20]	48
Figura 56 – Esquema do ensaio por compressão diametral [25].....	50
Figura 57 – Ensaio por compressão diametral [25].....	50
Figura 58 – Ensaio módulo de elasticidade [26]	51

Figura 59 – Ensaio de fluência [27]	52
Figura 60 – Ensaio de retração [27]	53
Figura 61 – Ensaio de absorção por capilaridade [28]	54
Figura 62 – Ensaio de imersão [28]	54
Figura 63 – Esquema do dispositivo de ensaio para determinação da profundidade de penetração de água sob pressão [28]	55
Figura 64 – Profundidade de penetração [28]	55
Figura 65 – Teste de célula difusora [28].....	56
Figura 66 – Ensaio de migração [28]	57
Figura 67 – Câmara de carbonatação [28]	57
Figura 68 – Análise petrográfica e poro preenchido de gel resultante da ocorrência de reações álcalis-sílica [29]	58
Figura 69 – Selagem de superfície [30]	62
Figura 70 – Furação da superfície [30]	62
Figura 71 – Aplicação de tubos metálicos [30].....	62
Figura 72 – Equipamento de mistura [30].....	63
Figura 73 – Ajuste da mangueira aos tubos [30].....	63
Figura 74 – Sequência de injeção fenda vertical [30]	63
Figura 75 – Sequência de injeção fenda horizontal [30]	63
Figura 76 – $10\text{ mm} < w < 30\text{ mm}$ [30]	64
Figura 77 – $w > 30\text{ mm}$ (mastique) [30]	64
Figura 78 – $w > 30\text{ mm}$ (neoprene) [30]	64
Figura 79 – Aplicação de betão de agregados pré-colocados [31].....	66
Figura 80 – Preparação do substrato [31].....	68
Figura 81 – Técnica de projeção do betão [31]	68
Figura 82 – Encamisamento à flexão em viga [32].....	71
Figura 83 – Encamisamento à flexão e ao esforço transversal em viga [32]	71
Figura 84 – Encamisamento à flexão e compressão em pilares – Encamisamento fechado [32]	71
Figura 85 – Encamisamento à flexão e compressão em pilares – Encamisamento aberto [32]	71

Figura 86 – a) Preparação criando maior rugosidade; b) Preparação deixando expostas as armaduras; c) Preparação deixando as armaduras livres [32]	72
Figura 87 – Reforço por adição de chapas coladas [33].....	73
Figura 88 – Limpeza das superfícies de chapas de aço e betão [34]	74
Figura 89 – Aplicação de resina epóxida nas chapas e no betão [34]	74
Figura 90 – Aplicação camada protetora de chapas recorrendo a argamassas projetadas [34]	75
Figura 91 – Laminados aplicados em laje [35].....	76
Figura 92 – Mantas aplicadas em pilar [35]	76
Figura 93 – Aplicação de primário [36]	76
Figura 94 – Aplicação da manta e impregnação com a ajuda de rolo [36]	77
Figura 95 – Aplicação do adesivo em forma de cúpula [36].....	77
Figura 96 – Reforço por introdução de perfis metálicos em pilar [37]	79
Figura 97 – Reforço por introdução de perfis metálicos em pilar [38]	79
Figura 98 – Reforço e eliminação de deformação de uma viga [39].....	80
Figura 99 – Ancoragem em aço ligado a uma estrutura de betão armado [40].....	81
Figura 100 – Desviador de aço ligado a uma estrutura de betão armado [40]	81
Figura 101 – Fixador metálico anti vibratório ligado a uma estrutura de betão armado [40]	82
Figura 102 – Pré-esforço de uma viga através de tirante roscado [39]	82

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Causas de degradação do betão	7
Tabela 2 – Qualidade do betão em função da velocidade da propagação dos ultra-sons [18]	41
Tabela 3 – Registo e análise de dados dos níveis potenciais de corrosão [24].....	47
Tabela 4 – Técnicas de Reparação	60
Tabela 5 – Comparação de métodos de gunitagem	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Desde os meados do século passado, o betão esteve presente na maior parte das construções realizadas em Portugal. O fato de o betão armado ser versátil, permitindo executar qualquer forma pretendida, ser uma estrutura durável, resistente às influências atmosféricas, ao desgaste mecânico, ao choque, às vibrações, é económica a sua execução, não sendo necessária mão-de-obra especializada para a sua aplicação, são alguns dos fatores que conduziram ao uso generalizado deste material. Todas estas características e outras levaram os técnicos ligados à construção, a considerá-lo um material adequado para a execução de estruturas.

Mas como todos os materiais, ao longo tempo, eventualmente o betão envelhece e perde algumas das suas características. Uma deficitária manutenção e utilização contribuem em muito para a diminuição da vida útil das estruturas de betão armado. Isso verifica-se hoje em dia, com a maior parte das construções antigas degradadas que põe em causa não só a segurança dos utilizadores, como também o bom aspeto das construções. Para um aumento da vida útil das estruturas, será necessário elaborar um plano eficiente de manutenção para cada estrutura. Aos primeiros sintomas patológicos encontrados nas construções, normalmente visualizados pelos utilizadores, devem ser chamados técnicos ao local para fazer uma inspeção detalhada acerca da patologia encontrada.

A exposição permanente das estruturas de betão a agentes de deterioração, como a água, o vento, o dióxido de carbono, entre outros, associada a uma manutenção deficitária, é plausível a formação de danos. Estes danos podem ter origem de diversos tipos como por exemplo, físicos, humanos, químicos mecânicos e eletroquímicas.

Para o início de trabalhos de avaliação e de prevenção nas estruturas de betão, o técnico especializado necessita, numa primeira abordagem, da recolha de toda a informação documentada acerca da construção em análise. Seguidamente, inicia uma inspeção visual, na qual será realizada uma observação detalhada dos problemas que lhe foram reportados. Caso consiga tirar conclusões dessa análise, passa diretamente para uma fase de prognóstico em que elaborará uma solução eficaz para o dano visualizado. Mas caso isso não aconteça, e não consiga tirar conclusões apenas com uma inspeção visual, deve recorrer a outros meios,

nomeadamente à elaboração de ensaios que complementem a informação recolhida. Consoante o problema detetado, o técnico vai escolher o ensaio que mais se adequa a cada caso. Estes podem ser elaborados “*in situ*”, ou feitos laboratorialmente, dependendo do objetivo que se pretende.

Após a conclusão da análise de quais as patologias a tratar, existe a necessidade de avaliar qual o processo de reparação e/ou reforço a executar mais adequado a cada situação, tendo em conta as condicionantes existentes em cada estrutura e fator económico.

Todas estas temáticas são abordadas no presente documento escrito.

1.2 Objetivo

O presente documento aborda diversos assuntos relacionados com as estruturas de betão armado, tendo como objetivo aprofundar o conhecimento sobre as causas e consequências das patologias mais comuns bem como dos principais métodos de reabilitação e reforço destas estruturas. Procura-se neste trabalho final de mestrado fazer uma sistematização das técnicas de reabilitação e reforço de estruturas de betão armado, desenvolvendo os seguintes assuntos:

- Organização da estrutura e aplicabilidade da norma NP EN 1504, pormenorizando a Parte 9 que contém as fases previstas para a reparação de uma estrutura de betão armado e os princípios e métodos de proteção, reparação e reforço contidos na norma;
- Causas da degradação do betão, organizadas em cinco partes: físicas, humanas, químicas, mecânicas e eletroquímicas;
- Patologias das estruturas de betão armado decorrentes do processo de construção, anomalias estruturais e de durabilidade;
- Técnicas de inspeção e diagnóstico de anomalias, organizadas em ensaios “*in situ*” e laboratoriais;
- Técnicas de reparação e reforço do betão.

1.3 Estrutura do relatório

O presente documento encontra-se organizado em cinco capítulos. No primeiro elabora-se uma introdução, o enquadramento do tema, apresentam-se os objetivos e uma descrição sumária dos conteúdos dos restantes capítulos.

No segundo capítulo aborda-se o betão armado, elaborando uma breve história sobre o betão, explica-se a organização da norma NP EN 1504, que contém as fases previstas para a reparação de uma estrutura de betão armado assim como os princípios e métodos de proteção, reparação e reforço. Expõe-se as principais causas de degradação, organizadas em cinco partes, físicas, humanas, químicas, mecânicas e eletroquímicas, por último explicam-se as principais patologias das estruturas de betão armado decorrentes do processo de construção, anomalias estruturais e de durabilidade.

O terceiro capítulo descreve as principais técnicas de inspeção e diagnóstico de anomalias, organizadas em ensaios “in situ” e laboratoriais.

O quarto capítulo descreve as principais técnicas de reparação e reforço do betão, abordando as reparações de fendas, vazios e zonas porosas, destacamentos e zonas fragmentadas e desagregações. Quanto ao reforço refere-se o encamisamento do betão, a adição de chapas coladas, a adição de elementos de FRP, a introdução de perfis metálicos e o pré-esforço exterior.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2 O BETÃO ARMADO

2.1 Enquadramento Histórico

A invenção do betão armado surgiu em meados do século XIX e é atribuída a Joseph-Louis Lambot, que em 1848 contruiu um pequeno barco de betão armado que foi exibido na Exposição Universal de Paris em 1855. A expansão do betão armado surge a partir de 1890 através do construtor François Hennebique e dos estudos experimentais e teóricos de Considère, Rabut e Mesnager que estabeleceram as leis fundamentais da resistência do betão armado [1].

A primeira construção portuguesa em que se aplicou esta tecnologia foi na moagem de António José Gomes no Caramujo, Cova da Piedade, concluída em 1898. Seguidamente surgiram outras obras de betão armado, das quais se destacam a ponte sobre a ribeira de Vale de Meões em Mirandela (atualmente destruída) e a barragem de Xarrama em Évora, entre outras. Mais tarde surgiram outras obras como o Instituto Superior Técnico em 1936, ou a Igreja de Nossa Senhora de Fátima, concluída em 1938, nas Avenidas Novas, ambas em Lisboa [1].

Nas últimas décadas o betão armado tem sido o material estrutural dominante na esmagadora maioria das obras de construção civil, quer em Portugal, quer no mundo inteiro. O seu campo de utilização é alargado e vai desde os edifícios correntes até aos arranha-céus, edifícios públicos e industriais, infraestruturas viárias, como por exemplo as pontes, e infraestruturas hidráulicas, como por exemplo as barragens, entre outras.

2.2 Norma NP EN 1504

2.2.1 Estrutura da norma

A norma NP EN 1504 [2] reúne toda a informação sobre produtos e sistemas para manutenção e proteção, reabilitação e reforço de estruturas de betão. Está dividida em dez partes que têm em conta seis usos pretendidos para os produtos: proteção superficial, reparação estrutural e não estrutural, reforço por colagem estrutural, injeção de betão, injeção para ancoragem e enchimento e prevenção da corrosão.

Em resumo, cada parte da norma contém os seguintes aspetos:

- a parte 1 da NP EN 1504 (2006) classifica e define os tipos de produtos e sistemas para reparação, manutenção, proteção ou reforço de estruturas de betão. Esta parte da norma contém ainda a descrição dos principais tipos químicos e constituintes de produtos e sistemas para proteção e reparação do betão.
- a parte 2 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos para a identificação, comportamento (incluindo durabilidade) e segurança de produtos e sistemas para a proteção superficial do betão, para aumentar a durabilidade de estruturas de betão e de betão armado, em estruturas novas ou em trabalhos de manutenção e reparação.
- a parte 3 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos de comportamento (incluindo a durabilidade) e segurança dos produtos e sistemas para a reparação estrutural e não estrutural.
- a parte 4 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos e critérios de conformidade para a identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos e sistemas para colagem estrutural de materiais de construção a estruturas de betão.
- a parte 5 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos de preenchimento de fendas e cavidades internas no betão, por injeção ou por gravidade, em trabalhos de proteção ou reforço de estruturas.
- a parte 6 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos de injeção de caldas em ancoragens, em trabalhos de proteção ou de reforço.
- a parte 7 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos e sistemas de prevenção da corrosão das armaduras, em particular por realcalinização e extração eletroquímica de cloretos.
- a parte 8 da NP EN 1504 (2006) especifica os procedimentos para a amostragem, verificação da conformidade, marcação de produtos e identificação de sistemas para a proteção e reparação de estruturas.

- a parte 9 da NP EN 1504 (2009) define os princípios para a proteção e reparação de estruturas de betão, que tenham sofrido ou possam vir a sofrer danos ou deteriorações, e indica regras para a seleção adequada dos produtos e sistemas.
- a parte 10 da NP EN 1504 (2008) apresenta os requisitos para armazenamento, preparação e aplicação de produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão, incluindo o controlo de qualidade, manutenção, saúde e segurança.

2.2.2 Aplicabilidade

A parte 9 da NP EN 1504-9 (2009) contém um procedimento, constituído por cinco fases distintas, a aplicar para obras de reparação de estruturas de betão armado. O processo é iniciado com uma fase de diagnóstico, constituída por duas tarefas com o objetivo de avaliar o estado da estrutura e identificar as patologias existentes. A fase seguinte denomina-se de fase deliberativa onde são decididas as medidas a tomar e os princípios e métodos a adotar. Segue-se a fase de dimensionamento da solução adotada, baseada na decisão tomada na fase anterior, que dará lugar à fase de execução da solução encontrada. A última fase é a de inspeção, monitorização e manutenção que pode ser facultativa, embora seja relevante em estruturas especiais e com elevada importância.

Esta parte 9 contém refere ainda os métodos de reparação, que são agrupados em função do princípio definido para a intervenção.

A NP EN 1504 contém onze princípios estando os seis primeiros relacionados com a deterioração do betão e os cinco restantes relacionados com a corrosão das armaduras.

2.3 Causas de degradação do betão

As causas para a ocorrência de degradação das estruturas de betão armado resultam da conjugação de vários fenómenos e mecanismos de degradação, sendo por vezes difíceis de diagnosticar. Neste ponto procura-se explicar as principais causas de degradação, por forma, a ser possível uma melhor compreensão do aparecimento de patologias no betão.

Apresentam-se as causas e os sintomas visíveis que originam a degradação no betão armado, distinguindo as causas que afetam o betão das causas que afetam as armaduras. As técnicas de inspeção e diagnóstico serão referidas no Capítulo 3.

As causas de degradação podem resumir-se na seguinte tabela:

Tabela 1 – Causas de degradação do betão

Causas de degradação do betão	Físicas	- ciclos gelo-degelo
		- retração do betão
		- ações térmicas
		- cristalização de sais
		- erosão
		- abrasão
		- ação do fogo
	Humanas	- projeto estrutural incoerente
		- composição do betão inadequada e amassadura e compactação insuficientes
		- recobrimento insuficiente
		- deficiente impermeabilização da superfície do betão
		- contaminação por agregados de má qualidade
		- cura inadequada
	Mecânicas	- impacto de corpos exteriores
		- sobrecargas excessivas

		- assentamentos de fundações ou de apoios
		- explosões
		- vibrações
	Químicas	- reações álcalis-agregado
		- agentes agressivos
		- ações de origem biológica
Causas de degradação das armaduras	Eletroquímicas	- carbonatação do betão
		- correntes parasitas
		- contaminantes corrosivos (cloretos presentes, cloretos provenientes do exterior)

2.3.1 Degradação física do betão

- **Ciclos gelo-degelo**

Os ciclos gelo-degelo são uma das causas físicas de degradação do betão armado, devido à ação do gelo estar relacionada com o processo de alteração do estado físico da água no interior do betão, que passa do estado líquido para o estado sólido à temperatura de 0°C.

Em Portugal, nas regiões onde as temperaturas predominantes são acima dos 0°C, o problema do gelo-degelo não é muito comum. Contudo, nas zonas em que se atinjam temperaturas abaixo dos 0°C, em os betões saturados à ação gelo provoca a expansão da água existente nos poros capilares da pasta de cimento e dos agregados, gerando uma pressão hidráulica no interior do betão, que é responsável pela sua degradação. Ao ocorrer o descongelamento, os poros ficam mais abertos e sujeitos a nova entrada de água, dando-se início a novos ciclos consecutivos de gelo-degelo e consequente progressão da degradação.

Essa degradação pode consistir numa fendilhação interna ou num destacamento superficial do betão (*scaling*). A extensão da degradação do betão, por ação dos ciclos de gelo degelo depende, sobretudo, da permeabilidade e porosidade do betão e do tipo de agregados.

- **Retração do betão**

A retração do betão consiste na variação de volume que se verifica num elemento de betão após a sua colocação em obra. Essa variação é sobretudo consequência da evaporação da água não fixada pelo ligante, da diminuição da temperatura do elemento de betão e do facto do volume dos constituintes hidratados do cimento ser menor, que a soma dos volumes da água e dos constituintes anidros (que não têm água). Conclui-se que a retração do betão é um fenómeno de redução de volume provocado pela perda de humidade do betão, podendo apresentar diversas origens:

- retração plástica: contração por perda de água do betão, no estado fresco, isto é, até do início até ao final da presa;
- retração física por efeito térmico: por perda da água devido à exposição de calor;
- retração química direta (ou de Le Chatelier): consequência do facto dos produtos de hidratação do cimento terem menor volume que a soma dos volumes da água e do cimento que os formam;
- retração física por secagem ou hidráulica: contração por perda de água da argamassa ou do betão no estado endurecido, ou seja, a partir do final da presa;
- retração autogénea: retração que ocorre por circulação da água no seio do betão;
- retração por carbonatação: retração devida à combinação do hidróxido de cálcio existente no cimento, com o dióxido de carbono da atmosfera;
- retração por adjuvantes e aditivos: devida à inclusão de substâncias que alterem as características base do betão.

- **Ações térmicas**

Este fenómeno ocorre quando existem variações de temperatura aliadas a restrições de movimento do betão armado e podem ser ações térmicas pontuais, diárias ou anuais.

A temperatura da superfície de uma estrutura de betão ajusta-se rapidamente, ao contrário da temperatura interior, que se ajusta lentamente. As tensões internas de origem térmica, devidas a uma diferença de temperatura entre o interior e exterior do betão (gradiente térmico), provocam fendilhação.

- **Erosão**

A erosão pode-se classificar em dois tipos: a abrasão e a cavitação, as quais levam à degradação da superfície de betão.

A abrasão caracteriza-se pelo desgaste de uma superfície devido aos repetidos movimentos de impacto, fricção de elementos, enrolamento e esfregamento por diversos agentes, sendo os mais comuns o ar e a água, que carregam partículas que provocam a abrasão, os veículos em pavimentos industriais e o impacto das ondas.

A cavitação está relacionada essencialmente com o contacto da água com as superfícies que estão expostas a águas turbulentas, nomeadamente em túneis ou barragens.

- **Cristalização de sais**

Este fenómeno assemelha-se ao do ciclo gelo-degelo, já referido anteriormente, pois ocorre quando uma superfície está em contacto com uma solução aquosa de sais e sucede a evaporação de água. Este mecanismo provoca a deposição de sais à superfície do elemento, originando eflorescências, no caso de termos uma velocidade de evaporação baixa. No caso de a velocidade de evaporação ser alta, a solução não terá a possibilidade de ascender à superfície do elemento e a cristalização dos sais dar-se-á no seu interior, originando criptoeflorescências e consequentemente a fendilhação do betão. Assim sendo, o principal fator que determina a deterioração do betão pela ação da cristalização dos sais é a sua permeabilidade.

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

- **Abrasão**

A abrasão caracteriza-se pelo efeito repetido de uma ação de fricção que causa a degradação da superfície de betão. O efeito provocado por esta ação no betão poderá ser progressivo, mas mais intenso em alguns locais, o que poderá levar à fissuração e fragmentação do mesmo. Esta ação ocorre frequentemente nos pisos de garagens, devido à fricção imposta pelo tráfego de automóveis.

- **Ação do fogo**

A deterioração do betão pela ação do fogo está diretamente relacionada, com a desidratação dos constituintes da pasta de cimento. No entanto, o efeito do calor intenso está também relacionado com as temperaturas atingidas e o tempo que demora esse contato com a superfície de betão.

Apesar de o betão ser um material incombustível, que não sustenta a propagação do fogo, perde gradualmente as suas propriedades e características mecânicas à medida que a temperatura aumenta.

A ação das temperaturas elevadas provoca diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão (Fig. 1), assim como a diminuição da resistência à tração e do módulo de elasticidade do aço, o que se traduz numa diminuição da capacidade resistente dos elementos. À perda de capacidade resistente dos elementos estão frequentemente associadas grandes deformações permanentes.

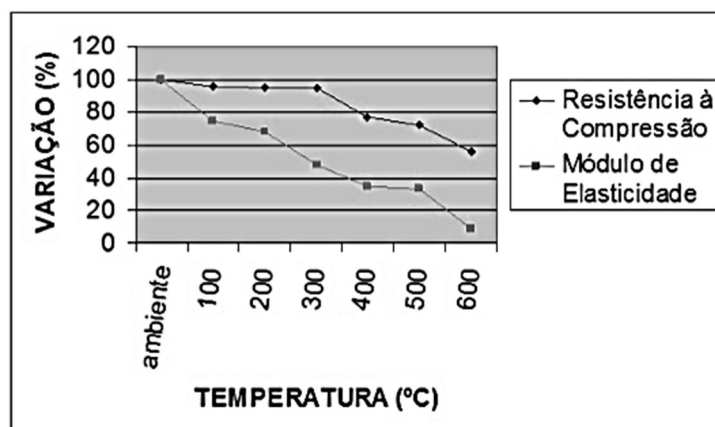


Figura 1 - Diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do betão em função da temperatura [3]

2.3.2 Degradação do betão devido a causas humanas

As causas de origem humana estão presentes no decorrer do ciclo de vida de uma estrutura, desde a fase de projeto às fases de construção, utilização e manutenção.

Os fatores mais comuns, que se traduzem em falhas na fase de projeto de uma estrutura, podendo originar sérios problemas patológicos, são diversos, nomeadamente:

- avaliação defeituosa das cargas atuantes e modelação desajustada no dimensionamento da estrutura;
- elementos de projeto inadequados;
- falta da compatibilização entre projetos de estruturas e de especialidades;
- insuficientes disposições quanto a exigências ambientais;
- especificações inadequadas de materiais;
- pormenorização insuficiente, errada e impraticável;
- erros de dimensionamento;
- falta de normalização das representações apresentadas.

Na fase de construção da estrutura de betão armado, as falhas humanas surgem em situações de fiscalização deficiente, de acompanhamento deficiente no terreno por parte do diretor de obra e de falta de mão-de-obra especializada.

A fase de exploração também pode afetar a estrutura quando esta é incorretamente utilizada, com cargas, sobrecargas e esforços superiores aos projetados.

A fase de manutenção, não menos importante, é muitas vezes descurada. Refere-se que todos os cuidados, que se possam ter durante o início de vida de uma estrutura, como a composição, colocação e cura do betão, podem não ser suficientes se não se proceder a uma manutenção regular da estrutura de betão armado.

2.3.3 Degradação mecânica do betão

- **Impacto de corpos exteriores**

O impacto de corpos exteriores à estrutura de betão, por exemplo de veículos, de pedras ou de máquinas, como é o caso das gruas, podem causar tensões elevadas na estrutura de betão armado e esforços superiores aos admissíveis, provocando a degradação ou a ruína dessas estruturas.

- **Sobrecargas excessivas**

Este fenómeno é facilmente explicável pela introdução de esforços superiores aos adotados no dimensionamento, que podem induzir deformações significativas, por exemplo, quando há alterações de uso. Por exemplo a utilização de um edifício dimensionado para habitação, como biblioteca, onde o peso dos livros e arquivos podem significar um grande aumento do carregamento, pode originar uma eventual deformação.

- **Assentamentos de fundações ou de apoios**

O assentamento de fundações pode ocorrer principalmente devido a deformações no solo, que podem passar pela deficiente compactação à presença de linhas de água. Ao ocorrerem, os assentamentos introduzem esforços na estrutura provocando danos.

- **Explosões**

A explosão é uma ação que, devido às suas altas temperaturas instantâneas, impacto, pressões e ondas de choque, provoca danos e têm o efeito de cargas excessivas.

- **Vibrações**

A vibração é geralmente caracterizada por ações de curta duração e com ciclos repetidos, que resultam numa perda de resistência dos elementos de betão armado, por ação da fadiga. Esta causa pode resultar de sismos, equipamentos mecânicos e máquinas industriais.

2.3.4 Degradação química do betão

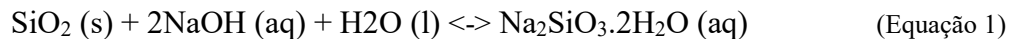
- **Reações álcalis-agregado**

Esta ocorrência baseia-se na reação entre os álcalis do cimento hidratado e os agregados reativos, que geralmente resultam em dois tipos de reações:

- álcali-carbonatos (agregados calcários);
- álcali-sílica (agregados como quartzo).

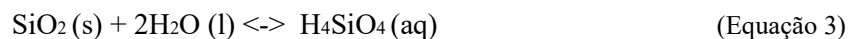
A reação álcalis-sílica são as mais prejudiciais e ocorrem se forem usados agregados inadequados no fabrico de betão, que reage com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio do cimento formando um gel à volta dos agregados, na presença de humidade, aumentando o volume dos mesmos e provocando tensões no betão que irão gerar fissuração à volta dos agregados.

A formação de gel sílico-sódico ou sílico-potássico, é dada por:



Alguns minerais siliciosos, entre os quais o quartzo, reagem com a água em ambiente alcalino, para formarem o gel de sílica, um material que expande quando absorve humidade e que gera grandes tensões no interior do betão.

A reação da dissolução da sílica é traduzida por:



- **Agentes agressivos**

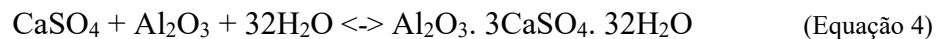
Os agentes químicos agressivos incluem água da chuva, águas puras, ácidos e sulfatos.

O ataque do betão por água da chuva é um ataque geralmente muito lento, no qual o contato da superfície de betão com a água da chuva, ou águas decarbonantes, origina a decomposição do betão. Quando em contacto com o cimento Portland, aquelas águas, devido às suas características, tendem a dissolver produtos contendo cálcio. O hidróxido de cálcio é um composto muito reativo que, em contacto com o dióxido de carbono CO_2 , altera a pasta de cimento, com diminuição do pH do betão, o que propicia a corrosão das armaduras.

O ataque de ácidos pode ser o mais agressivo, pois afeta seriamente a resistência do betão. As reações de substâncias agressivas como os ácidos sulfúrico, carbónico ou nítrico, com os compostos de cálcio do betão, formam compostos secundários que permanecem de forma não aderente ao betão e que resultam na consequente degradação e perda de resistência do mesmo [4].

Por último, o ataque por sulfatos que, são sais que originam uma substância designada etringite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), resultado da combinação entre os iões de sulfato (SO_4) e os aluminatos do betão (Al_2O_3). A etringite surge durante a presa do betão e é constituída por cristais que se formam e ocupam os poros do betão, o que reduz a sua rigidez e resistência. O resultado esperado destas combinações é o da expansão e fendilhação do betão.

A reação da formação da etringite é traduzida por:



Esta é a reação mais perigosa, no sentido de provocar mais danos no betão, é a que ocorre por sulfatos, que provêm do contacto da estrutura de betão armado com águas que contêm resíduos industriais, águas subterrâneas em geral e água do mar. Os sulfatos mais perigosos para o betão são o de amónio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, o de cálcio (CaSO_4), o de magnésio (MgSO_4) e o de sódio (Na_2SO_4).

- **Ações de origem biológica**

Este tipo de ataque inclui a ação biológica direta e indireta.

A ação biológica direta traduz-se por um ataque mais rápido e incisivo que o da ação indireta pois, após os ensaios de identificação de bactérias que libertam os agentes agressivos como é o caso dos ácidos, nota-se que os mesmos provocam reações químicas que conduzem à deterioração imediata do betão. Por outro lado, o ataque indireto da ação biológica, envolve o desenvolvimento de musgos, líquenes e plantas no betão, que devido ao crescimento das suas raízes nas fendas ou em zonas porosas do betão, originam forças expansivas que degradam mecanicamente o betão [4].

Isto é, a ação biológica direta surge de micro-organismos que provocam um ataque quimicamente agressivo através da libertação de ácido sulfúrico e o ataque indireto baseia-se no desenvolvimento de organismos exteriores, que penetram nas fendas da estrutura e se desenvolvem no interior do betão.

2.3.5 Degradação eletroquímica do betão

- **Carbonatação do betão**

A carbonatação, ocorre quando o dióxido de carbono do ar penetra nos poros do betão por difusão e reage com o hidróxido de cálcio dissolvido na água existente no interior do betão formando carbonato de cálcio, com a consequente redução do pH de 13-13.5 para valores inferiores a 9-9.5. Este processo químico (Fig. 2), quando atravessa a espessura do betão de recobrimento de um elemento de betão armado, e na presença de água e oxigénio, ativa o processo de corrosão das armaduras, acelerando a degradação e reduzindo a durabilidade do betão armado. Deste modo, o betão deixa de funcionar como uma camada protetora para as armaduras e a corrosão acelera.

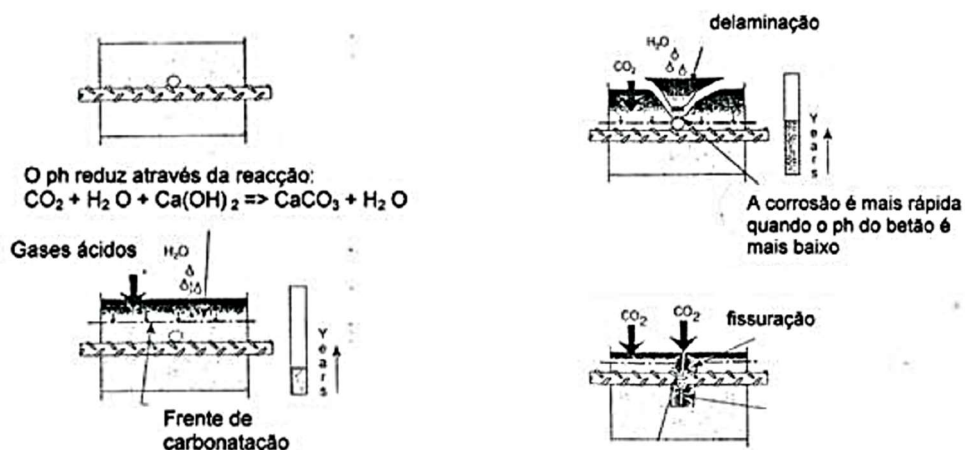
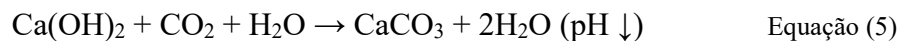


Figura 2 - Processo de corrosão de armaduras devido à carbonatação do betão [7]

O processo químico da carbonatação do betão é dado pela seguinte expressão:



- **Correntes parasitas**

A corrosão das armaduras por correntes parasitas processa-se quando uma fonte externa fornece uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, ou seja, ocorre uma troca de correntes elétricas entre as armaduras e o meio eletrolítico.

O fluxo de eletrões necessário para iniciar este tipo de corrosão é geralmente fornecido por elementos externos à estrutura, como será o caso de um gerador ou de linhas de alta tensão,

mas também existem outros elementos externos como os sistemas de proteção catódica vizinhas, comboios elétricos em viadutos sem ligação terra e máquinas de soldar. Os sintomas visíveis são a fendilhação e a delaminação como na carbonatação.

A medição da intensidade de corrente nas estruturas é uma avaliação que ajuda na perceção deste fenómeno.

- **Contaminantes corrosivos**

A principal agressão proveniente de contaminantes agressivos tem essencialmente a ver com a ação dos cloretos, que podem ter origem interna ou externa.

Em geral a corrosão por ação dos cloretos é uma corrosão localizada, por picadas. Este tipo de corrosão provoca uma grande diminuição da secção das armaduras. O fenómeno da corrosão por cloretos propaga-se pelo transporte em meio líquido de iões (Cl⁻), por permeação, absorção e difusão.

- Cloretos presentes no betão:

Os cloretos de origem interna são os cloretos presentes no betão através de água da amassadura contaminada, de agregados geralmente provenientes de ambientes salinos e ainda através da utilização de adjuvantes que contenham cloreto de cálcio, por exemplo destinados a acelerar ou a retardar a presa do betão ou plastificantes.

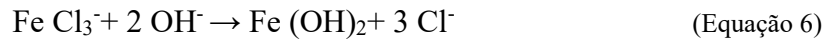
Todas estas condições fazem com que haja um aumento da quantidade de cloretos no betão e se inicie a corrosão eletrolítica localizada das armaduras.

As condições mais propícias para a introdução de cloretos no betão são os recobrimentos pouco espessos, a proximidade de correntes elétricas de alta tensão, a existência de peças metálicas embutidas no betão como chumbadores e a junção de alumínio e aço no mesmo meio.

Os sintomas mais visíveis (nestas situações pode ser útil a realização de uma análise química para conferir a quantidade de cloretos presentes) traduzem-se em manchas de ferrugem, fendilhação em linhas paralelas e alinhadas com a armadura e delaminação do betão.

- Cloretos de origem externa:

O ataque de cloretos ocorre normalmente em ambientes marítimos, ambientes em que o uso do sal seja predominante, obras em que se utilizem agregados salinos (areias) e sais de degelo. Para que o processo de ataque por cloretos aconteça, é necessário existir humidade à superfície do betão, pois a penetração de cloretos processa-se da superfície para o interior. A concentração de cloretos em contacto com o aço causa corrosão, quando a humidade e o oxigénio estão presentes. A expressão seguinte traduz essa reacção.



O pH do betão é um fator muito relevante para a ocorrência da corrosão das armaduras. No entanto, a corrosão do aço pode acontecer até num meio altamente alcalino, se os cloretos estiverem presentes. Os cloretos aceleram a corrosão, seja qual for a sua origem. Concentrações de cloretos acima de 0.2-0.4% da massa de cimento, destroem o óxido passivante das armaduras [5].

2.4 Patologias das estruturas de betão armado

A deterioração das estruturas de betão armado resulta, basicamente, da degradação do betão e das armaduras, como consequência da ação de agentes agressivos oriundos do meio ambiente ou, erro humano nas várias fases da construção, e em casos mais raros, devido à ocorrência de acidentes, tais como explosões, incêndios ou impactos.

O diagnóstico das anomalias em construções de betão armado pode ser complexo, devido à variedade dos fenómenos de degradação que provocam as anomalias.

As principais causas das anomalias no betão diferenciam-se bastante no tempo de ocorrência:

- antes da construção, como por exemplo, os erros na fase de projeto;
- durante a construção, como por exemplo, os erros na fase de execução;
- no decurso da exploração normal da construção, como por exemplo, as ações físicas, químicas ou mecânicas;
- em consequência de catástrofes naturais imprevisíveis como ações acidentais ou ainda pela vontade humana como por exemplo a alteração das condições de serviço.

Apresentam-se as patologias correntes das estruturas de betão, classificadas em três grupos principais: anomalias decorrentes do processo de construção, anomalias estruturais e de durabilidade.

2.4.1 Anomalias decorrentes do processo de construção

São vários os aspetos que podem afetar o betão no decurso do processo de construção, sobretudo porque o betão é preparado, ou pelo menos, colocado e moldado em obra, o que potencia a ocorrência de erros ou defeitos na construção, tais como: vazios e zonas porosas, segregação, erros de geometria, descontinuidades visíveis, manchas e fissuração.

- **Vazios e zonas porosas**

Os vazios e zonas porosas aparecem, normalmente, junto às superfícies exteriores (Fig. 3) ou no interior da massa do betão (Fig. 4).

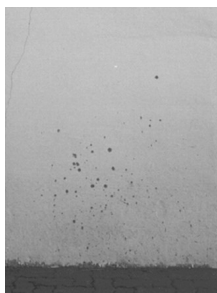


Figura 3 - Zonas porosas no betão - “bolhas de pele” [5]



Figura 4 - Vazios no betão - “chochos” [5]

As principais causas desta ocorrência devem-se essencialmente a causas de origem humana, como por exemplo, deficiente compactação do betão, segregação dos agregados, granulometria mal escolhida dos agregados (deficiência de finos), baixa relação água/cimento, deficiente vibração e cofragem mal escorada ou de rigidez insuficiente.

- **Segregação**

A segregação do betão é consequência de uma distribuição não uniforme dos seus constituintes. Podendo encontrar-se finos em excesso à superfície, ou mesmo a acumulação de agregados, formando os “ninhos de pedras” (Fig. 5). Outro motivo para desencadear este

fenómeno, é quando o espaçamento das armaduras é muito pequeno, não permitindo assim a passagem dos agregados durante a betonagem (Fig. 6).



Figura 5 - Acumulação de agregados - “ninhos de pedras” [5]



Figura 6 - Espaçamento das armaduras muito pequeno [5]

As principais causas deste fenómeno devem-se essencialmente a preparação incorreta do betão, excesso de vibração e betonagem de alturas excessivas.

- **Erros de geometria**

Nem sempre a execução em obra dos elementos de uma estrutura respeita o projeto e segue a geometria e o dimensionamento exato das peças, o que pode levar à execução de pilares e paredes com inclinações ou excentricidades entre elementos da estrutura (Fig. 7).



Figura 7 - Erro de geometria do pilar [5]

As principais causas deste fenómeno devem-se essencialmente a deficiente controlo da qualidade na execução, posicionamento incorreto da cofragem e fiscalização deficiente.

- **Descontinuidades visíveis**

As zonas onde ocorrem com muita frequência as descontinuidades são nas juntas de betonagem, em que o betão não tenha uma ligação forte e uniforme. Isto acontece quando a

nova betonagem é realizada sobre um betão já em fase de presa. O novo betão não adere completamente ao betão inicial, criando entre eles uma descontinuidade visível, onde são formadas zonas “esbabaçadas” (Fig. 8) e “crostas” (Fig. 9).



Figura 8 - Descontinuidades visíveis - “esbabaçado” [5]

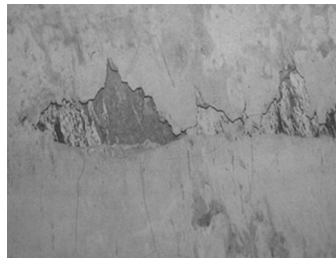


Figura 9 - Descontinuidades visíveis - “crostas” [5]

Isto deve-se essencialmente a causas de origem humana, tais como o deficiente controlo da qualidade da execução e a deficiente fiscalização.

- **Manchas**

As manchas existentes à superfície do betão, decorrentes do processo de construção, podem ser manchas de humidade, colorações ou eflorescências. As manchas de humidade no betão são devidas à perda de humidade através da cofragem (Fig. 10) e à humidade ascensional (Fig. 11), quando as paredes estão em contacto com a água ou com o solo húmido.



Figura 10 - Mancha de humidade – cofragem [5]



Figura 11 - Mancha de humidade – ascensional [6]

As colorações estão relacionadas com as variações de cor à superfície do betão (agregados aparentes, salpicado, negrões). Por exemplo, os óxidos metálicos, contidos nos agregados que se encontram próximo da superfície, oxidam e hidratam, originando uma coloração avermelhada. Quando se utiliza o cloreto de cálcio, como acelerador da presa, podem ocorrer nódulos à superfície, causando manchas no betão.

As colorações castanhas, na superfície do betão, são um indicativo de que está contaminado, devido à oxidação das armaduras durante o processo de construção. Por exemplo: deficiente colocação das armaduras, que ficaram em contacto com a cofragem (Fig. 12) e oxidação das armaduras que ainda não foram betonadas (Fig. 13).



Figura 12 – Deficiente colocação das armaduras [5]

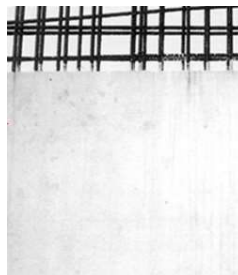


Figura 13 – Armaduras oxidadas, antes da betonagem [5]

As eflorescências são depósitos de sais cristalizados que aparecem à superfície do betão endurecido (Fig. 14), são indicação de que existe circulação de água.



Figura 14 – Descontinuidades visíveis - “esbabaçado” [5]

As principais causas deste fenómeno devem-se essencialmente a causas de origem química e humana, como por exemplo, ação dos materiais incorporados no fabrico do betão, ataque de ácidos, sulfatos e álcalis, deficiente colocação de armaduras (corrosão), deficiente colocação/preparação da cofragem e ação dos óleos de descofragem.

- **Fissuração**

Durante o processo de construção, pode ocorrer fissuração significativa no betão, podendo esta ser devido a causas de origem humana como a colocação incorreta das armaduras e cabos de pré-esforço; à deficiente cura do betão ou calor de hidratação; ao assentamento plástico do betão e à remoção prematura das cofragens.

A fissuração devido à colocação incorreta das armaduras pode implicar deficiente recobrimento das mesmas, o que facilita a fissuração e não as protege da corrosão (Fig. 15). Os deslocamentos das armaduras antes do endurecimento do betão podem também provocar fissuras. No caso dos cabos de pré-esforço, a sua excentricidade tem que estar de acordo com o projeto, ou a capacidade resistente será necessariamente menor, podendo provocar fissuração e em algumas situações pode ocorrer o colapso (Fig. 16).



Figura 15 – Deficiente recobrimento [7]

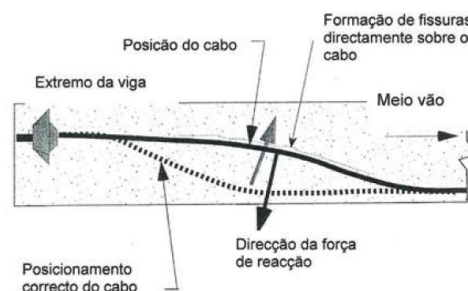


Figura 16 – Deficiente colocação do cabo de pré-esforço [5]

A fissuração devido à deficiente cura do betão ou calor de hidratação pode implicar fissuração por retração do betão, pois não existe água para compensar a evaporação natural durante a sua secagem. Raramente este tipo de fissuras implica a fratura dos agregados, mas provoca separação à volta dos agregados.

O betão fresco passa por um processo de aumento de temperatura devido ao calor gerado pela hidratação do cimento. O aumento de temperatura ocorre durante as primeiras horas ou dias depois da betonagem e o betão arrefece de seguida até à temperatura ambiente. O calor de hidratação associado a baixa resistência do betão pode levar a fissuras.

As fissuras devido ao calor de hidratação são mais severas, quando não existem de juntas de dilatação e em peças de grandes dimensões (Fig. 17).

A fissuração devido ao assentamento plástico do betão (Fig. 18) deve-se à migração da água do betão para a superfície exterior antes de se atingir a presa. A diminuição do volume de betão provoca assentamento que, quando impedido localmente pela armadura ou cofragem, causa fissuração.



Figura 17 – Fissuras por deficiente cura do betão [7]



Figura 18 – Fissuras por assentamento plástico do betão [7]

A fissuração devido à remoção prematura do escoramento da cofragem (Fig. 19), que servem de estrutura de suporte antes de o betão atingir a resistência necessária, pode provocar fissuração, deformações e em algumas situações pode ocorrer o colapso.



Figura 19 – Fissuras por remoção prematura do escoramento [5]

As principais causas deste fenómeno devem-se essencialmente à colocação incorreta das armaduras e cabos de pré-esforço, deficiente cura do betão, assentamento plástico do betão e remoção prematura do escoramento da cofragem.

2.4.2 Anomalias estruturais

As anomalias estruturais manifestam-se normalmente através do aparecimento de fissuras significativas ou de deformações graves. De referir que, na maioria dos casos (com exceção dos casos de carregamento excessivo), a fissuração significativa surge após processos de deformação, nos quais o movimento da peça está restringido.

As anomalias estruturais que ocorrem com mais frequência devem-se a causas de origem mecânica e física: fissuração devida às ações de cargas de cálculo; fissuração devida às ações termo-higrométricas; fissuração devida aos assentamentos diferenciais de apoios; fissuração devida às ações de acidente; zonas fragmentadas do betão e desagregação por ação do fogo.

- **Fissuração devida às ações de cargas de cálculo**

As cargas de cálculo produzem, em geral, fendilhação no betão, sendo necessário analisar a sua largura, pois se for excessiva, dará origem a níveis de fendilhação inaceitáveis. O aspeto e desenvolvimento das fissuras dependem das ações que as causam.

O aspeto estético do elemento estrutural, a proteção contra a corrosão e a garantia de estanqueidade, são as principais razões da limitação da fendilhação. De referir que a deformação estrutural provoca, por consequência, também a fendilhação nas paredes de enchimento. Cada um destes fatores conduz a diferentes valores da largura máxima admissível das fendas.

As fendas podem-se classificar em função da sua largura máxima em microfissuras até 0.05 mm, fissuras médias entre 0.05 mm e 0.4 mm e microfissuras para mais de 0.4 mm.

As fissuras podem ser geradas através de ações de tração simples, compressão simples, flexão simples, esforço transversal, torção e por efeito simultâneo das ações anteriores.

A fissuração gerada por tração simples ocorre, quando um elemento de betão, em tração pura, sofre fissuras perpendiculares à direção do esforço, com espaçamento relativamente uniforme e atravessando o elemento de lado a lado, como ilustra a Figura 20.



Figura 20 - Fissuração por tração simples [5]

A fendilhação, gerada por compressão simples, ocorre quando um elemento de betão é comprimido, ou seja, o betão apresenta extensões negativas na direção do carregamento e

extensões positivas na direção perpendicular. As fissuras geradas por compressão simples são paralelas à direção do esforço e irregulares (Fig. 21). O caso típico desta situação é o carregamento vertical dos pilares.

A fissuração gerada por flexão simples ocorre quando um elemento de betão armado simplesmente apoiado e sujeito a carregamento uniforme fissura em princípio nos pontos de tensão mais elevada (a meio vão ou nos apoios). A fissuração ocorre normalmente após se atingirem flechas excessivas, como é por exemplo no caso de vigas ou lajes.

As fissuras geradas por flexão podem ocorrer sem esforço transversal quando são perpendiculares ao eixo de peça, não atravessam a secção e aumentam da fibra neutra para a fibra mais tracionada; ou com esforço transversal, quando tendem a inclinar na direção dos apoios e aumentam de inclinação à medida que se aproximam do apoio (Fig. 22).



Figura 21 – Fissuração por compressão simples [8]



Figura 22 – Fissuração por flexão simples com esforço transversal [8]

A fissuração gerada por esforço transversal começa no ponto de aplicação do esforço, desenvolvendo-se em direção aos apoios (Fig. 23).

A fissuração devida à torção apresenta inclinação de aproximadamente 45° nas diversas faces da peça, formando no seu conjunto uma linha helicoidal quebrada (Fig. 24).

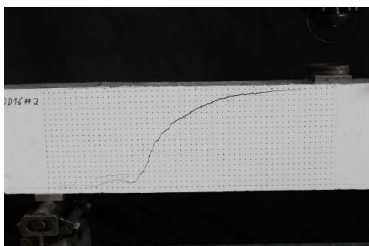


Figura 23 – Fissuração por esforço transversal [9]



Figura 24 – Fissuração por torção [10]

- **Fissuração devido às ações termo-higrométricas**

As ações termo-higrométricas traduzem-se no efeito que a temperatura provoca nas estruturas de betão, que se refere basicamente à variação de volume, que pode dar origem à fissuração. As fissuras causadas por este fenómeno apresentam normalmente espaçamento uniforme e, no caso das vigas, podem chegar mesmo a atravessá-las. O processo mais simples de observar que uma fissura ocorreu devido à ação da temperatura, numa dada estrutura, é pela variação da dimensão das juntas de dilatação.

As ações térmicas, portanto, quer sejam variações térmicas uniformes ou variações de gradientes térmicos, provocam fissuração. As variações térmicas uniformes afetam as estruturas de diferentes modos, consoante a sua geometria e o seu grau de estatia. As variações de gradientes térmicos ocorrem através das distribuições de temperaturas diferenciais num elemento estrutural, como por exemplo, quando uma face está exposta a altas temperaturas, enquanto a face oposta se encontra protegida. Quando as peças estão constrangidas, ou seja, quando não existem juntas de dilatação, são incutidas grandes tensões no interior da estrutura, que podem provocar fissuras (Fig. 25).

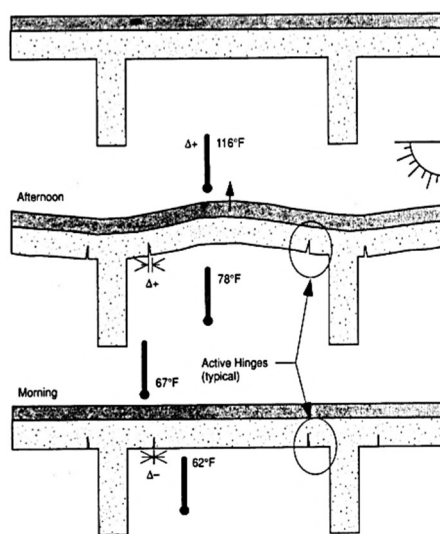


Figura 25 – Distribuições de temperaturas diferenciais numa estrutura [11]

A fissuração pode ainda ser gerada por retração do betão. Como anteriormente se referiu, a fissuração gerada por retração do betão ocorre devido à diminuição do volume do betão por perda de água, sendo que, a retração a longo prazo é independente do carregamento. O aspeto das fissuras depende das restrições impostas à estrutura e das restrições internas das

armaduras. Um exemplo é a retração do betão devido a diferentes gradientes de humidade (Fig. 26).

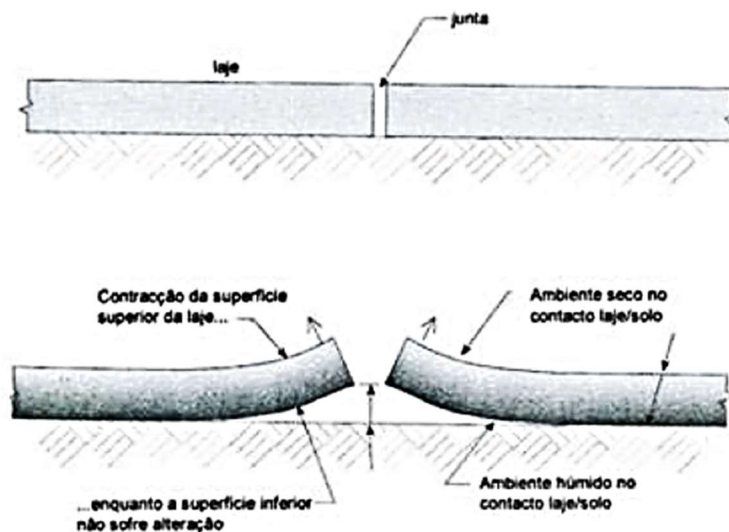


Figura 26 – Retração devido a diferentes gradientes de humidade [5]

- **Fissuração devida aos assentamentos de apoios**

O deslocamento relativo dos apoios acontece normalmente motivado pelos assentamentos do terreno de fundação. A ocorrência deste tipo de deslocamento, provoca alterações na estrutura podendo, conseqüentemente, introduzir fissuras ou deformações.

As fissuras devido aos assentamentos de apoios podem ter origem devido a deformação côncava ou convexa e a assentamentos diferenciais (Fig. 27).

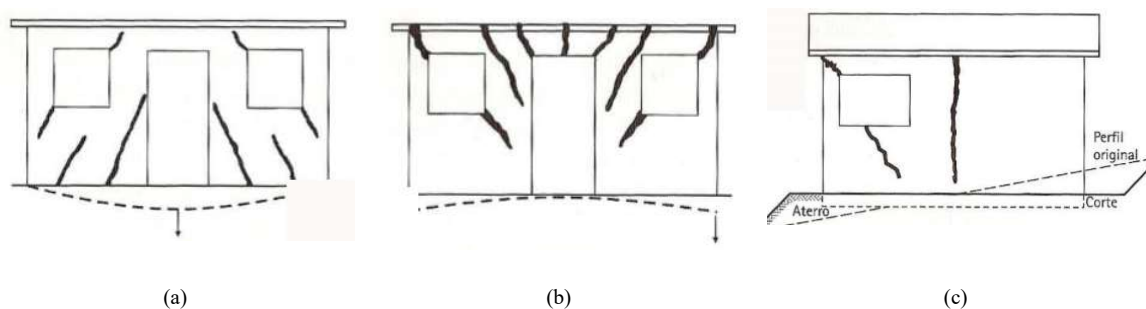


Figura 27 - (a) deformação côncava (b) deformação convexa (c) assentamentos diferenciais [12]

As fissuras devido aos assentamentos de apoios, nas paredes perpendiculares ao deslocamento das fundações, são normalmente inclinadas a 45° (Fig. 28), e quanto mais rígida for a estrutura mais grave será a fissura.

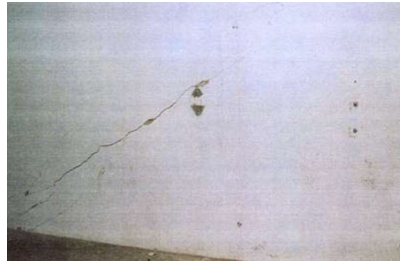


Figura 28 – Fissura de deslocamento relativo dos apoios [5]

- **Fissuração devida às ações de acidente**

A fissuração devida às ações de acidente podem ocorrer derivadas de vários acontecimentos, tais como: sismos, incêndios, choques, explosões, inundações, movimentações de terras, cargas excessivas, ventos excepcionais. Destes, os mais preocupantes, do ponto de vista da gravidade dos danos que podem infligir às estruturas de betão, são geralmente os sismos, os incêndios e as cargas excessivas.

As ações dos sismos causam geralmente anomalias graves nas estruturas, que vão desde deformações até ao colapso total. As fissuras, devidas a esta ação, são irregulares, atravessando as paredes e apresentando inclinações em várias direções. Nos pilares, as fissuras são de flexão e também se desenvolvem em várias direções (Fig. 29).



Figura 29 – Fissuras devidas à ação do sismo [13]

A ação do fogo provoca fortes variações de volume na estrutura, promovendo gradientes de temperatura extremos, provocando uma expansão rápida do betão, que provoca a sua fissuras. A fissuração pode também surgir localmente ao longo das armaduras, como resultado da diferente expansão do betão e do aço sob ação da temperatura. Outro tipo de fissuração é a que resulta da diferença entre os coeficientes de dilatação térmica da pasta de cimento e dos agregados podendo ser interna ou superficial. A água utilizada pelos

bombeiros no combate ao incêndio pode também causar fissuras de retração graves na superfície do betão provocando fenómenos de destacamento do betão (Fig. 30).



Figura 30 – Parede com destacamento do betão após incêndio [14]

A ação de carga excessiva tem origem normalmente em dois fatores: a utilização indevida da estrutura ou cálculo deficiente para as ações em causa. Um exemplo relativamente ao primeiro fator é a fissuração devido ao aumento da carga máxima, provocando o posterior assentamento da laje de transição de um viaduto (Fig. 31).



Figura 31 – Fissuração devido a cargas excessivas [5]

- **Zonas fragmentadas do betão**

As zonas fragmentadas do betão são identificadas pela perda localizada de recobrimento. Este fenómeno geralmente ocorre na zona dos nós de ligação entre os pilares e as vigas, sendo que, as principais causas para o aparecimento de zonas fragmentadas são os sismos, as cargas verticais excessivas, os choques ou explosões, a corrosão das armaduras e deficiências de betonagem.

Um exemplo de uma zona fragmentada devido à ação de choque, provocada pela ocorrência de acidente, terá o aspeto ilustrado na Figura 32.



Figura 32 – Zona fragmentada do betão devido a ação de choque (acidente de tráfego) [5]

2.4.3 Anomalias de durabilidade

As anomalias de durabilidade estão relacionadas com a degradação das estruturas de betão armado ao longo do tempo e devem-se a causas de origem eletroquímica e física. Destaca-se a alteração da coloração do betão, a exposição/corrosão de armaduras, a fissuração, desagregação e destacamento do betão.

- **Coloração do betão**

A coloração superficial do betão pode dar indicações sobre as propriedades do mesmo, e ocorre devido a vários fatores, como por exemplo: ataques de ácidos, sulfatos e álcalis, eflorescências e corrosão das armaduras. Destes fatores, o que pode causar maiores problemas na estrutura é a corrosão das armaduras, a qual geralmente acontece devido ao ataque de cloretos e/ou à carbonatação.

Um exemplo de coloração superficial é o aparecimento de manchas de ferrugem, causadas pela corrosão das armaduras, após fixação de guardas galvanizadas, devida à existência de materiais de potencial elétrico diferente (Fig. 33).



Figura 33 – Manchas de ferrugem [5]

- **Exposição/corrosão de armaduras**

A corrosão de armaduras pode ocorrer devido ao ataque de cloretos ou à carbonatação.

A constatação da ocorrência da corrosão de armaduras pode feita através da observação do aparecimento de manchas de óxido de ferro. As armaduras aumentam de volume por expansão do óxido de ferro, gerando tensões de tração no interior do betão. O resultado é a fissuração do betão ou até a separação de partes do betão.

Uma das principais barreiras deste fenómeno, e que pode caracterizar a resistência de uma superfície de betão à difusão de CO_2 e respetiva carbonatação, é uma boa camada de recobrimento da armadura, sem fissuração, aliada a uma boa compactação e cura do betão.

O processo de corrosão por carbonatação é semelhante ao da corrosão por ação de cloretos, exceto no facto de este tipo de corrosão ser contínuo e não pontual, como no caso da ação dos cloretos.

- **Fissuração do betão**

A excessiva fissuração do betão é uma das anomalias de durabilidade mais frequente. As principais causas apontadas para o acontecimento deste fenómeno são a solidificação precoce da água capilar, os ciclos de gelo/degelo a corrosão das armaduras e as reações álcalis-sílica. A fissuração por solidificação precoce da água capilar resulta da expansão da água quando solidifica (Fig. 34).

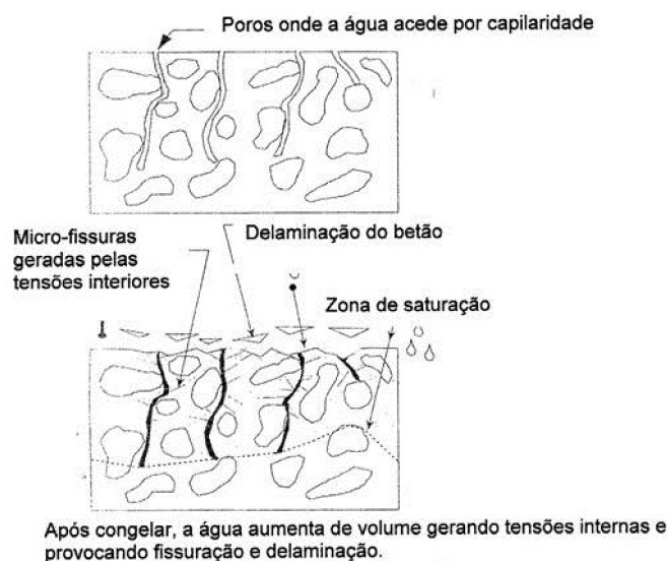


Figura 34 – Processo de fissuração por solidificação da água capilar [5]

O betão tem alta resistência à compressão, mas por outro lado, tem baixa resistência quando submetido a esforço de tração, que é o tipo de força que é exercida quando este fenómeno acontece, provocando assim o aparecimento de fissuras.

A fissuração gerada por ciclos gelo/degelo geralmente ocorre em superfícies horizontais expostas ou em superfícies verticais que estejam em contacto (permanente ou quase permanente) com a água. A água contida nos poros expande ao congelar, causando tensões no interior do betão e fissuras à superfície. As patologias resultantes deste fenómeno são a fendilhação, delaminação e destacamento do betão. A utilização de carotes extraídas do betão afetado permite detetar uma fendilhação interna, paralela à superfície, associada à expansão dos poros, muito característica da degradação por ação dos ciclos de gelo-degelo.

A fissuração gerada pela corrosão das armaduras ocorre quando a oxidação provoca o aumento de volume das armaduras, gerando tensões no interior do betão.

A fissuração gerada pelas reações álcalis-sílica resulta dos mecanismos que causam este tipo de reações. Alguns agregados contêm sílica reativa que reage com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio do cimento e formam um gel que envolve os agregados do betão. O gel formado expande quando exposto à humidade, que acelera a reação álcalis – sílica, criando trações no betão, de que resultam fissuras expansivas à volta dos agregados. (Fig. 35).



Figura 35 – Processo de fissuração por reações álcalis-sílica [5]

Este tipo de reação pode não ser possível de detetar durante muito tempo e revelar-se subitamente num estado já avançado.

A combinação de efeitos simultâneos de reações álcalis-sílica e de esforços (compressão longitudinal de pré-esforço), que criam fissuração orientada como mostra Figura 36.



Figura 36 – Fissuração orientada resultante de reações alcalis-sílica e de esforços de compressão [5]

- **Desagregação do betão**

A desagregação do betão consiste na libertação dos agregados após a perda progressiva da coesão conferida pela pasta de cimento. Este fenómeno inicia-se à superfície, com alteração na coloração, seguida de aumento na largura das fissuras entrecruzadas que vão surgindo. As principais causas para a ocorrência da desagregação do betão são os ataques de sulfatos, cloretos, ácidos, os ciclos gelo/degelo e a erosão.

Os ataques sulfatos de sódio e cálcio são os mais comuns em solos, água e processos industriais, enquanto os sulfatos de magnésio são menos comuns, mas mais destrutivos. Os solos ou águas que contenham estes sulfatos são geralmente denominados de alcalinos. Os sulfatos, quando presentes, atacam a matriz cimentícia provocando transformação numa espécie de gesso. Esta transformação tem como consequência, a ausência de aderência entre o cimento e os agregados, podendo atingir a completa desagregação do betão.

É ainda formada a etringite, que provoca uma reação expansiva no betão, contribuindo também para a sua desagregação (Fig. 37).

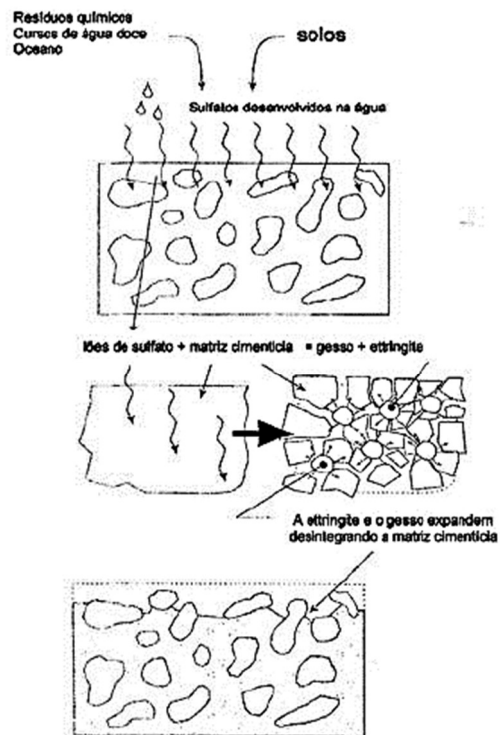


Figura 37 – Processo de desagregação gerado pelo ataque de sulfatos [5]

Os ataques de cloretos, como anteriormente se referiu, provocam oxidação das armaduras, originando fissuração e posterior desagregação e delaminação do betão. (Fig. 38).



Figura 38 – Desagregação gerada pelo ataque de cloretos [5]

Os ataques de ácidos provocam a desagregação do betão através da reação entre o ácido e o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do betão. À semelhança dos ataques de sulfatos, os ácidos também atacam a matriz cimentícia, provocando a desagregação dos agregados do betão (Fig. 39).

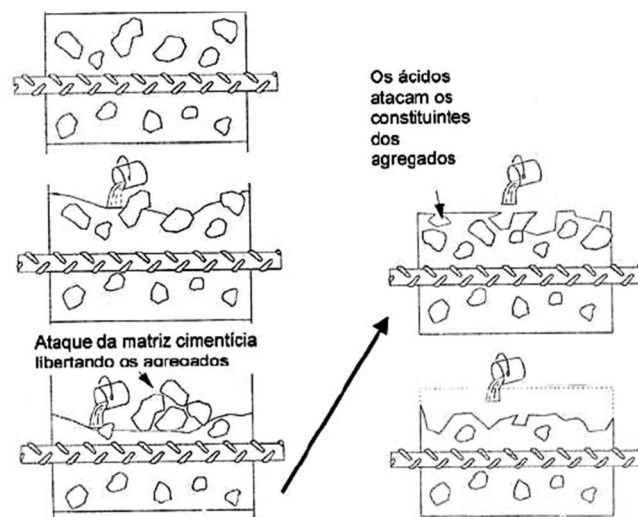


Figura 39 – Processo de desagregação gerado pelo ataque de ácidos [5]

- **Destacamento do betão**

O destacamento do betão caracteriza-se pela perda localizada do betão de recobrimento e ocorre normalmente em arestas salientes ou cantos, colocando à vista a armadura longitudinal. As principais causas para a ocorrência deste fenómeno devem-se à corrosão das armaduras, aos ciclos gelo/degelo, à formação de sulfo-aluminatos, à existência de agregados altamente reativos e à concentração excessiva de armaduras.

3 TÉCNICAS DE INSPEÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS NO BETÃO

O estudo de diagnóstico é um conjunto de procedimentos destinados a garantir o conhecimento acerca de um edifício ou estrutura, incluindo a avaliação do seu estado de conservação e segurança e a determinação das causas das anomalias observadas.

A primeira fase de um processo de reabilitação é a elaboração de um estudo de diagnóstico das patologias que um edifício, ou qualquer outra construção em que se pretende intervir, apresenta.

Como se referiu no capítulo anterior, existem várias causas que contribuem para o aparecimento de anomalias no betão. A identificação dessas causas é, na maioria das vezes, complexa. Contudo, existem técnicas de inspeção e diagnóstico que permitem inferir sobre as possíveis causas das anomalias, explicar mecanismos de degradação das estruturas, bem como avaliar o seu estado de conservação.

Existem várias técnicas para obter a informação necessária para uma avaliação do estado do betão, desde a inspeção visual, às técnicas de ensaio *in situ* e às técnicas de ensaio laboratoriais, sobre amostras recolhidas em obra.

A inspeção visual é feita a olho nu ou com o auxílio de instrumentos óticos que potenciem a capacidade visual. Este tipo de análise aplica-se, sobretudo à avaliação das características geométricas da estrutura e à identificação dos materiais que a constituem e dos sintomas patológicos eventualmente presentes.

Dada a intensificação do esforço de investigação, a que se tem assistido nos últimos anos, para ampliar o alcance e a eficácia das técnicas de inspeção e ensaio das construções, em particular das de betão armado, é hoje possível recorrer a várias técnicas e instrumentos, de mais variada natureza, que facilitam as observações ou multiplicam o seu alcance e rigor. Estas técnicas e instrumentos podem proporcionar dados importantes aos responsáveis pela conceção das intervenções de conservação, reparação e recuperação de construções.

As técnicas de ensaio existentes são geralmente classificadas como: *in situ* e laboratoriais. É de referir a importância da realização conjunta destes dois tipos de ensaios, pois podem ser complementares.

3.1 Ensaios “*in situ*”

3.1.1 Dureza superficial

O esclerómetro de Schmidt determina a dureza superficial do betão. Esta técnica não-destrutiva baseia-se na relação entre a dureza da superfície do betão e a sua tensão de rotura por compressão.

Devido à falta de precisão da técnica, os melhores resultados são obtidos testando a mesma área com o esclerómetro e com o ensaio sobre carotes. Depois de calibrar o esclerómetro, é possível utilizar este aparelho para avaliar variações da resistência superficial do betão em vários pontos da estrutura (Fig. 40).



Figura 40 – Esclerómetro de Schmidt [15]

3.1.2 Resistência à tração

O ensaio de *pull-off* é utilizado para obter a resistência à tração do betão, por arrancamento *in situ*, ou para verificar a aderência de betão novo (ou outro material) colocado sobre betão antigo (Fig. 41).

Este ensaio consiste em fazer uma pré carotagem na superfície do betão a ensaiar, sobre a qual se cola uma patilha metálica colada, habitualmente com 5 cm de diâmetro. Aplica-se depois uma força de tração até à rotura, registando-se o valor da força para determinar a tensão à qual a carote rompe e também o seu modo de rotura.



Figura 41 – Pull-off [16]

Os modos de rotura no ensaio podem resumir-se a três tipos diferentes, de acordo com o que ilustra a Figura 42.

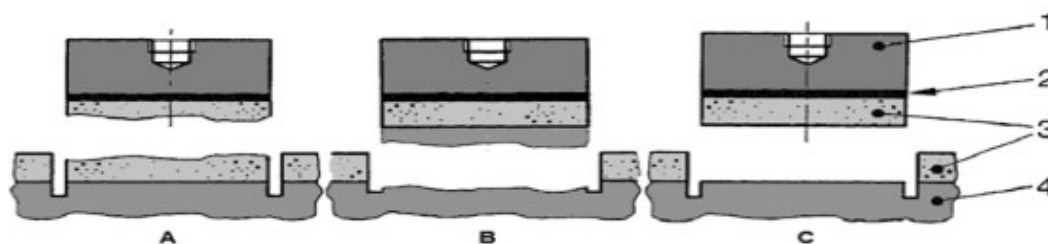


Figura 42 – Modos de rotura do ensaio pull-off (1 – Pastilha metálica; 2 – Cola; 3 – Sistema de revestimento; 4 – Suporte) [17]

A - rotura coesiva do sistema de revestimento (destacamento pelo betão novo);

B - rotura coesiva do suporte (destacamento pelo betão antigo);

C - rotura adesiva entre sistema de revestimento e o suporte (descolamento pela superfície de interface betão novo-betão antigo).

3.1.3 Ultra-sons

O ensaio de ultra-sons (Fig. 43) permite verificar o estado da estrutura, analisando a homogeneidade do material (uniformidade do betão) e a existência de fendas ou vazios (anomalias internas).

Este ensaio consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultrassónico, entre dois pontos de medida, isto é, desde um transmissor até a um recetor colocados em dois pontos de uma amostra. A velocidade do som é maior em sólidos do que no ar e aumenta também com a compactação do betão.



Figura 43 – Ensaio de ultra sons [17]

Existem três métodos possíveis para a realização deste tipo de ensaios: direto, semi-direto e indireto (Fig. 44). Os ensaios devem ser efetuados em superfícies lisas, sendo conveniente usar uma massa de contacto entre os transdutores e a superfície, de modo a melhorar a transmissão acústica

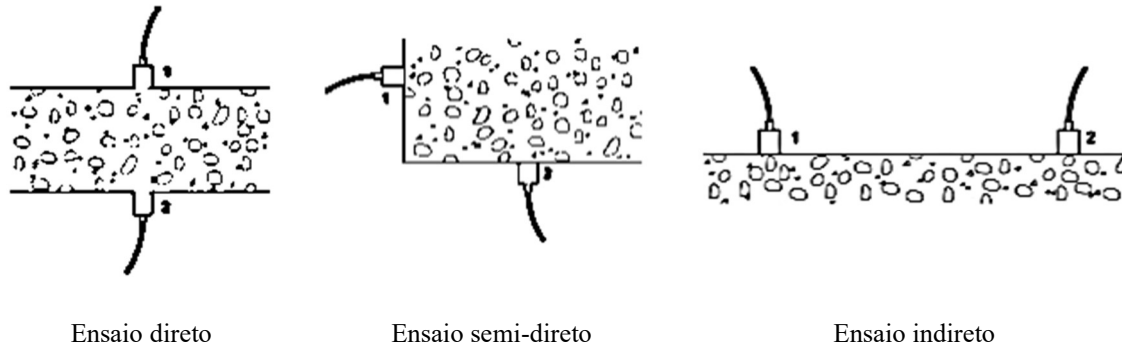


Figura 44 – Métodos de disposição dos tipos de ensaio de ultra-sons [18]

Os métodos direto e semi-direto têm como finalidade a avaliação das características de resistência mecânica e de homogeneidade e deteção de descontinuidades no betão. O método indireto aplica-se, fundamentalmente, na determinação da profundidade de fissuras.

A velocidade do impulso nos métodos referidos é calculada através da seguinte expressão:

$$V \left(\frac{km}{s} \right) = \frac{L(mm)}{T(\mu s)} \quad (\text{Equação 7})$$

O método semi-direto aplica-se apenas na impossibilidade de colocação dos transdutores segundo o método direto.

A velocidade do impulso no método semi-direto é calculada através da seguinte expressão:

$$h = x \sqrt{\frac{rc^2}{rL^2}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

rc = tempo de percurso de contorno da fissura

rL = tempo de percurso verificado na leitura da área homogênea

h = profundidade da fissura

x = distância entre o transdutor e a fissura

Mediante a velocidade registada durante o ensaio é possível obter informação sobre a qualidade do betão, numa escala de mau a excelente, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Qualidade do betão em função da velocidade da propagação dos ultra-sons [18]

Velocidade (m/s)	Qualidade do betão
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Medíocre
< 2000	Mau

3.1.4 Ensaios de Carga

O ensaio de carga permite analisar o comportamento de uma estrutura perante uma determinada solicitação, recorrendo a ensaios dinâmicos e/ou estáticos. Podem efetuar-se ensaios de carga para analisar a frequência própria da estrutura (ensaio dinâmico) (Fig. 45) e as deformações da estrutura (ensaio estático) (Fig. 46).

Estes ensaios destinam-se a verificar se a estrutura se encontra em condições de suportar, com a segurança necessária, as ações previstas de acordo com a utilização que se pretende dar à estrutura.



Figura 45 – Ensaio dinâmico no Estádio da Luz [1]



Figura 46 – Ensaio estático numa laje [19]

Para realizar o ensaio deve existir metodologia, deve-se realizar um plano de observações com a seguinte informação: definição geométrica da obra a ensaiar, propriedades mecânicas

dos materiais estruturais, definição das cargas a utilizar nos ensaios, definição das grandezas a medir e localização dos pontos de medição - aparelhos a utilizar nos ensaios, estimativa dos valores das grandezas a medir para montagem adequada dos aparelhos e análise dos resultados, procedimento geral da realização dos ensaios, pormenores de certas montagens, precauções de segurança (eventual escoramento) e interrupções da utilização da estrutura.

O carregamento da zona a ensaiar é realizado por fases. O incremento de carga é, desejavelmente, uniforme. No fim de cada fase, são feitas tantas leituras quanto as necessárias até se atingir a estabilização das deformações observadas. A duração do intervalo e o número de leituras dependem do tipo de estrutura, dos materiais constituintes, dos patamares de carga. A descarga total da zona ensaiada é realizada por fases ou numa fase, até se repor a situação inicial do ensaio (zona sem carga).

As leituras serão registadas e os resultados são apresentados sob a forma de tabelas ou graficamente, por forma a poderem distinguir-se as várias fases dos ensaios. Caso exista deformação residual em algum dos pontos no final dos ensaios, esta é apresentada nas tabelas e gráficos. A Figura 47 mostra os resultados da medição da flecha num ponto do piso de betão armado, antes e depois da execução dum reforço estrutural.

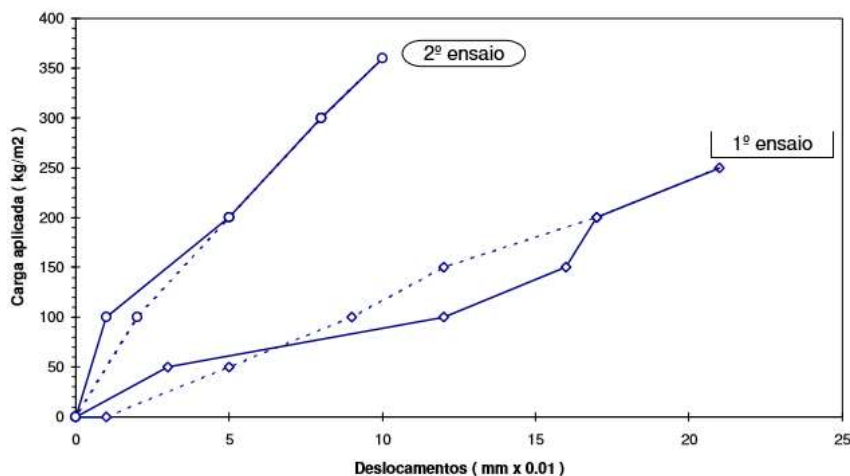


Figura 47 – Gráfico com curvas de ensaio antes e após reforço da estrutura [19]

3.1.5 Extensómetro mecânico

Os extensómetros são aparelhos utilizados experimentalmente, para avaliar as extensões ocorridas num dado ponto e numa dada direcção. Na realidade, os extensómetros apenas

medem a variação de distância (ΔL) de dois pontos inicialmente afastados de (L), distância essa que se designa por base de medida, sendo a extensão dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Equação 9})$$

Podem classificar-se os extensómetros de acordo com o fenómeno em que se baseia o seu princípio de funcionamento. Os tipos mais correntes de extensómetros são os extensómetros mecânicos (Fig. 48) em que por meio de dispositivos mecânicos de alavancas e engrenagens ligados à base se obtém uma ampliação dos deslocamentos relativos das extremidades da base.

As estruturas podem sofrer deformações que podem ser controladas com instrumentos apropriados. Os extensómetros mecânicos são instrumentos que permitem determinar a variação e desvio de diversos elementos estruturais.

O extensómetro mecânico com sensor tubular permite controlar as deformações, abatimentos, aumento de flechas estruturais de lajes, vigas, arcos, abóbadas, e de outros elementos, com precisão de 0,01 mm.



Figura 48 – Extensómetros mecânicos [20]

3.1.6 Micro-cover meter

Através da utilização do micro-cover meter, é possível detetar a posição e direcção da armadura no interior do betão armado, determinar a espessura do betão de recobrimento e o diâmetro dos varões de aço.

As principais aplicações do ensaio são: localização, diâmetro, profundidade e orientação da armadura; controlo da qualidade; investigar elementos sem registos disponíveis ou como auxílio a outros ensaios para a localização de armaduras (Fig. 49).

Contudo, existem limitações nomeadamente: deteção do efeito da dimensão da armadura de 10 mm a 32 mm de diâmetro; calibrações sensíveis ao tipo de aço, grau de deformação, agregado e cimento; necessária experiência na execução do ensaio, devido a ocorrência de armadura sobreposta, transversal ou dupla, propriedades magnéticas dos agregados, estabilidade da calibração (temperatura) e campos magnéticos vagabundos.

Os resultados obtidos serão processados estatisticamente e apresentados em tabelas, onde serão indicados, por cada zona de ensaio, os seguintes parâmetros: valor mínimo e valor máximo medido, valor medio e desvio-padrão do conjunto de medições e o coeficiente de variação correspondente.

Deste modo, os resultados serão apresentados graficamente, permitindo avaliar qual a percentagem correspondente a um determinado valor de referência, como, por exemplo, o valor do recobrimento mínimo regulamentar.



Figura 49 – Micro-cover meter [21]

3.1.7 Profundidade da carbonatação

Para determinar a profundidade da carbonatação, utiliza-se uma solução de fenolftaleína. Com a ocorrência da carbonatação do betão, o pH 13 (meio básico) passa para valores de 9 (meio ácido). Para determinar a profundidade da frente de carbonatação *in-situ*, faz-se um furo na superfície do betão junto a uma armadura e depois de remover cuidadosamente o pó resultante do furo, aplica-se uma solução de fenolftaleína calibrada para $\text{pH} = 9.5$. A zona não carbonatada do betão adquire cor lilás, ficando incolor a zona carbonatada.

O aparecimento da cor lilás indica, aproximadamente, a profundidade da frente de carbonatação (Fig. 50).



Figura 50 – Carbonatação do betão – Fenolftaleína [22]

A variação da profundidade de carbonatação com o tempo é dada pela expressão:

$$X = K \times \sqrt{t} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- x profundidade de carbonatação (mm);
- k constante;
- t idade do betão (anos).

3.1.8 Penetração de cloretos

A avaliação da evolução da penetração de cloretos é efetuada pela determinação do teor de cloretos em amostras, recolhidas a vários níveis de profundidade, em intervalos de tempo sucessivos. Para cada intervalo de tempo de exposição, são obtidas amostras com incrementos de 5 mm em profundidade, em dois furos adjacentes, utilizando-se uma broca de 20 mm de diâmetro. Após a recolha, as amostras são analisadas para determinação do teor total de cloretos, utilizando-se um eléctrodo específico de cloretos.

A Figura 51 mostra o comportamento típico dos perfis de cloretos medidos nos provetes de um betão exposto numa doca. Relacionando a percentagem de cloretos relativamente à massa de betão com a profundidade de penetração atingida pelos cloretos.

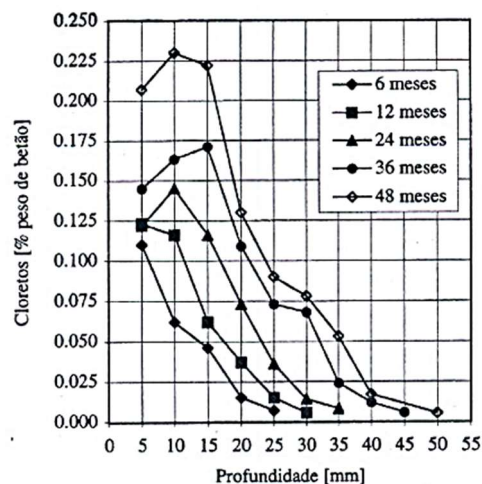


Figura 51 – Evolução da penetração de cloretos no betão [23]

A profundidade que os cloretos atingem está relacionada com a humidade relativa, em que o perfil de cloretos em profundidade é diferente para os casos de humidade constante ou variável, como ilustra a Figura 52.

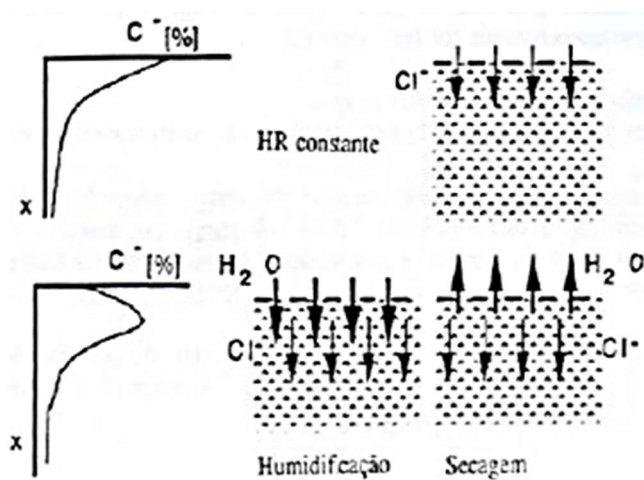


Figura 52 – Perfil de cloretos em profundidade [23]

3.1.9 Medição do potencial de corrosão

Este ensaio é efetuado principalmente para verificar se entre uma armadura e a superfície do betão existe humidade suficiente para provocar corrosão.

A metodologia seguida é a descrita na Norma ASTM C876-80 e consiste no seguinte: escolhe-se uma área em função do estado aparente do betão e definem-se zonas de leitura da

área a estudar, aumentando o número de leituras, na medida em que o betão aparente estar mais degradado; procede-se à limpeza, com uma escova de aço, de um varão da armadura, previamente localizada com o detetor de armaduras; fixa-se o eléctrodo secundário, através do alicate de aperto ao varão da armadura, e liga-se o eléctrodo ao voltímetro, através do cabo fornecido; procede-se à molhagem das superfícies em que vão efetuar-se leituras, de modo a humedecer em profundidade o betão a estudar; coloca-se o eléctrodo primário sucessivamente em cada ponto de leitura, medindo-se, no voltímetro do equipamento, o potencial eléctrico. Durante a realização de todas as medições, o operador deve assegurar-se que a esponja do topo do eléctrodo primário se encontra devidamente humedecida.

Esta técnica utiliza um eléctrodo de referência que está ligado a um cabo da armadura (Fig. 53). A análise do potencial entre a armadura e o eléctrodo permite definir um mapa de corrosão potencial.



Figura 53 – Medição dos potenciais eléctricos em obra [24]

Elabora-se o registo dos potenciais medidos em impresso próprio. Mediante o potencial medido existe um determinado risco de corrosão. A Tabela 3 explica como devem ser interpretados os resultados:

Tabela 3 – Registo e análise de dados dos níveis potenciais de corrosão [24]

Nível potencial (mV)	Risco de corrosão ativa
- 260 a - 410	até 95%
- 110 a - 260	até 50%
> - 110	até 5%

3.1.10. Medição do teor de humidade do betão

A humidade no betão pode ser medida a partir de amostras retiradas da estrutura e colocadas em contentores isolados para que o teor de humidade seja depois medido em laboratório (o procedimento será descrito no ponto dos ensaios de laboratório).

Em alternativa, podem também utilizar-se sensores químicos (Fig. 54) ou elétricos, humidímetros ou sondas para medir a humidade do betão imediatamente *in-situ*.



Figura 54 – Sonda para medir o teor de humidade do betão *in-situ* [5]

3.2 Ensaios Laboratoriais

3.2.1 Determinação da resistência à compressão, obtida através da extração de carotes

A determinação da resistência à compressão obtém-se através do ensaio de rotura por compressão, que é realizado de acordo com a norma de ensaio NP EN 12390-3:2011.

Para obter a resistência à compressão do betão, recorre-se à utilização de carotes para executar ensaios de determinação da resistência à compressão, sendo um dos procedimentos mais frequentes e fiáveis para a determinação deste parâmetro. As carotes retiradas do betão, por equipamento adequado (Fig. 55), devem ter uma relação h/d igual a 2, sendo h a altura da carote e d o diâmetro. Recomenda-se uma altura mínima de 10 cm. As bases das carotes necessitam de ser retificadas antes de serem testadas para determinação da tensão de compressão.



Figura 55 – Equipamento para extrair carotes [20]

A tensão de compressão do betão obtida, através das carotes retiradas das estruturas, deve ser relacionada com a tensão de compressão obtida em cubos normalizados.

Para normalizar os valores da tensão de rotura das carotes com diferentes dimensões, para o provete cilíndrico-padrão, com $f = h$, é necessário efetuar a seguinte correção (para carotes extraídas horizontalmente):

$$f_{cil} = \frac{2,5}{1,5 + \frac{\phi}{h}} \times f_{car} \quad (\text{Equação 11})$$

A resistência média do betão referida a cubos pode ser estimada por:

$$f_{cm} = f_{cm,cil} \times \left(1 \pm \frac{12\%}{\sqrt{n}}\right) \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

- f_{cm} : tensão média;
- $f_{cm,cil}$: tensão média dos provetes cilíndricos;
- n : número de provetes;

Tendo em conta que o valor da tensão de rotura dum provete cilíndrico com $f = h$ é idêntico ao da tensão de rotura obtido sobre um provete cúbico, a resistência média de referência em moldes standardizados do betão pode ser estimada por:

$$f_{cm,standart} = f_{cm} \times 1,25 \quad (\text{Equação 13})$$

3.2.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração obtém-se através do ensaio de rotura por compressão diametral, que é realizado de acordo com a norma de ensaio NP EN 12390-6:2011.

Ensaio é realizado através da aplicação de cargas uniformes ao longo de duas geratrizes opostas de um provete cilíndrico de betão (Fig. 57). A aplicação deve ter uma velocidade constante entre 0,04 MPa/s e 0,06 MPa/s, de forma contínua e sem choques até se atingir a rotura. As cargas geram tensões ortogonais em relação ao plano de carga, provocando a rotura do cilindro por tração. A carga máxima atingida deverá ser registada como P (Fig. 56).

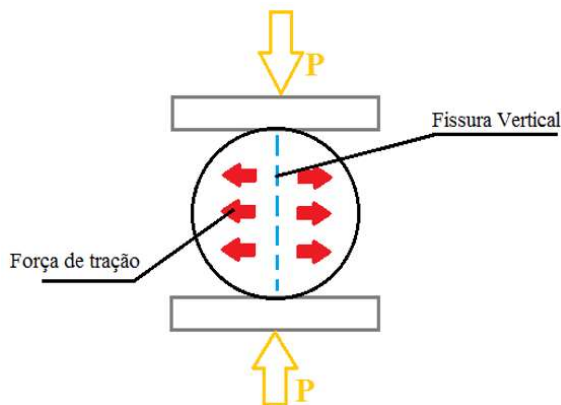


Figura 56 – Esquema do ensaio por compressão diametral [25]



Figura 57 – Ensaio por compressão diametral [25]

A resistência à tração por compressão diametral é dada pela expressão:

$$F_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

- f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral (MPa ou N/mm²);
- F é a carga máxima (N);
- L é o comprimento da linha de contacto do provete (mm);
- d é a dimensão da secção transversal (mm).

3.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade obtém-se através do ensaio de rotura por compressão, que é realizado de acordo com a norma de ensaio LNEC-397:1993.

O ensaio é realizado através da aplicação de dois extensómetros no provete em posições diametralmente opostas e utilização de uma rótula metálica para assegurar a transmissão exclusiva de esforço axial. As cargas são aplicadas ciclicamente, devendo cada ciclo de carga ser inferior em 10%. Deverá ser aplicada tensão inicial de 0,5 MPa a 1 MPa (σ_i) e aumentá-la de forma contínua, a uma velocidade de 0,5 MPa/s $\pm$ 0,1 MPa/s, até se atingir 1/3 da tensão média de resistência à compressão. De seguida registar as extensões e tensões iniciais e finais, efetuar um novo ciclo de carga e após cada ciclo, confirmar se a diferença entre a média das variações de extensão de ciclos consecutivos ($|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}|$) é inferior a 1×10^{-5} .

Caso o limite não seja satisfatório, é necessário repetir o ciclo de carga. Efetuar os ciclos necessários até que a seguinte condição seja verificada ($\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1} < 1 \times 10^{-5}$) (Fig. 58).



Figura 58 – Ensaio módulo de elasticidade [26]

Considerando que a diferença entre as médias das variações de extensão entre dois ciclos consecutivos verifica a expressão:

$$|\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1}| = \left| \left(\frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_i - \left(\frac{\varepsilon_{ext1} + \varepsilon_{ext2}}{2} \right)_{i+1} \right| < 1 \times 10^{-5} \quad (\text{Equação 15})$$

O módulo de elasticidade em compressão (E_c) é dado por:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_{f,n} - \sigma_{i,n}}{\varepsilon_{f,n} - \varepsilon_{i,n}} \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

- E_c é o módulo de elasticidade em compressão (GPa);
- $\sigma_{i,n}$ é a tensão inicial aplicada no ciclo n (MPa);
- $\sigma_{f,n}$ é a tensão máxima aplicada no ciclo n (MPa);
- $\varepsilon_{i,n}$ é a extensão correspondente à tensão $\sigma_{i,n}$, registada no ciclo n;
- $\varepsilon_{f,n}$ é a extensão correspondente à tensão $\sigma_{f,n}$, registada no ciclo n.

3.2.4 Fluência

As tensões de fluência são medidas em provetes testados num ambiente de temperatura e humidade controladas, de acordo com a norma de ensaio LNEC 399:1993.

Os provetes são sujeitos a tensões de compressão constantes, através de cargas constantes aplicadas, durante vários meses. Os provetes ensaiados à fluência deveram ser instalados em bastidores de fluência constituídos por duas plataformas quadrangulares (uma superior e outra inferior) ligadas através de quatro varões roscados em aço, de forma a permitir o ajuste à altura do provete. Existem ainda dois pratos que limitam o provete na sua face superior e inferior, sendo os responsáveis pela aplicação da carga/pressão ao provete (Fig. 59).



Figura 59 – Ensaio de fluência [27]

A fluência é um fenómeno que consiste no aumento da deformação do betão ao longo do tempo, quando sujeito a tensão constante.

De acordo com a LNEC 399:1993 para a obtenção da extensão de fluência $\varepsilon_c(t)$, num dado instante de tempo de carga (t), deve utilizar-se a expressão:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_t(t) - \varepsilon_i \quad (\text{Equação 17})$$

onde:

- $\varepsilon_c(t)$ extensão total do provete sob tensão num dado tempo t , contado a partir do instante a partir da qual se deu por concluída a moldagem e respetiva selagem dos provetes usados no ensaio;
- ε_i extensão instantânea medida logo após a aplicação da carga máxima no ensaio de fluência.

3.2.5 Retração

As tensões de retração são medidas em provetes testados num ambiente de deformação livre e com parâmetros de humidade e temperatura controlados (Fig. 60), de acordo com a norma de ensaio LNEC 398:1993.



Figura 60 – Ensaio de retração [27]

A retração consiste no encurtamento do material associado à remoção de água da estrutura porosa, provocando depressões nas pressões capilares internas.

De acordo com a LNEC 398:1993 para a obtenção da extensão de retração $\varepsilon_s(t)$, num dado instante de tempo de carga (t), deve utilizar-se a expressão:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_s(t) - \varepsilon_i \quad (\text{Equação 18})$$

onde:

- $\varepsilon_s(t)$ extensão média na mesma idade da dos provetes destinados à medição de retração (não carregados);
- ε_i extensão instantânea medida logo após a aplicação da carga máxima no ensaio de fluência.

3.2.6 Absorção de água

A absorção de água do betão está relacionada com a penetração da água no betão através da superfície e pode ser obtida segundo dois ensaios diferentes: ensaio de absorção por capilaridade (Fig. 61) ou ensaio de imersão (Fig. 62).

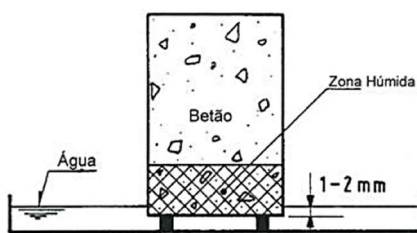


Figura 61 – Ensaio de absorção por capilaridade [28]

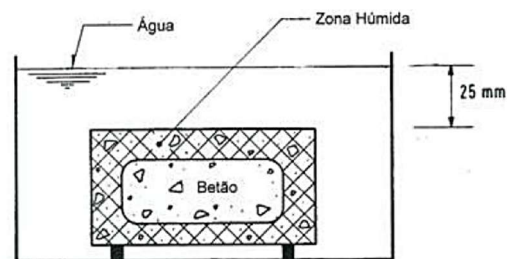


Figura 62 – Ensaio de imersão [28]

No ensaio de absorção por capilaridade, as amostras são colocadas com uma face dentro de água (até 5 mm), durante 4 horas. A área molhada vai aumentando com o tempo e pode calcular-se o coeficiente de absorção de acordo com a seguinte expressão:

$$I = a t^{0,5} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

I = absorção de água por unidade de área (mm^3/mm^2);

a = coeficiente de absorção ($\text{mm}/\text{min}^{0,5}$);

t = tempo (min).

No ensaio de imersão, as amostras (normalmente com $h = 75 \text{ mm}$) são inicialmente secas durante 72 horas a uma temperatura de 105°C . São depois arrefecidas e pesadas (M_1) e de seguida colocadas em água durante 30 minutos e pesadas de novo (M_2). A absorção de água ($=A$) é obtida através da seguinte expressão:

$$A = (M_2 - M_1) / M_1 \quad (\text{Equação 20})$$

3.2.7 Permeabilidade à água

As características de permeabilidade à água são obtidas considerando uma amostra sujeita a pressão de água numa face e medindo o volume de água que atravessa a amostra.

O ensaio de determinação da profundidade de penetração de água sob pressão é realizado de acordo com o disposto na norma NP EN12390-8, apenas podendo ser aplicado em betões cuja permeabilidade não seja muito elevada, isto é, em betões em que não é atingido um estado estacionário, pois o fluxo não atravessa o provete, medindo-se a profundidade até onde a água penetra.

Os provetes utilizados na realização deste ensaio, devem ser cubos com as dimensões (150 x 150 x 150) mm, sendo realizado à idade de 28 dias.

O ensaio consiste em escovar a face dos provetes que vai estar sujeita à pressão, sendo estes posteriormente colocados no aparelho de ensaio. Em seguida, aplica-se uma pressão de água de 500 kPa durante 72 horas, tendo-se o cuidado de não aplicar na superfície de enchimento do provete (Fig. 63).

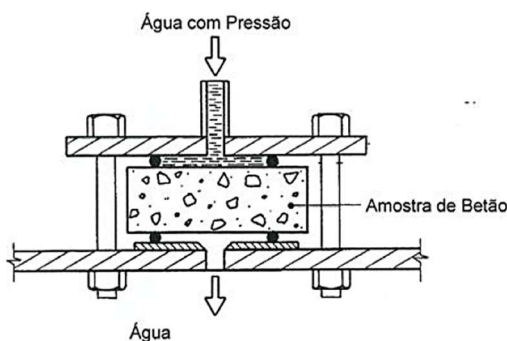


Figura 63 – Esquema do dispositivo de ensaio para determinação da profundidade de penetração de água sob pressão [28]

Depois da pressão ter sido aplicada durante o tempo especificado, o provete deverá ser retirado do aparelho, remove-se o excesso de água na face sobre a qual se aplicou a pressão. Em seguida, abre-se o provete por compressão linear perpendicularmente à face exposta à pressão. Deixa-se então exposto ao ar cada provete aberto e logo que a face partida esteja seca de modo a que a linha de penetração de água fique claramente visível, marca-se a linha com um marcador. Posteriormente mede-se a profundidade de penetração da água no betão (Fig. 64)



Figura 64 – Profundidade de penetração [28]

3.2.8 Difusão de cloretos

Para avaliar a difusão de cloretos no betão existem dois tipos de ensaios: ensaio de difusão e ensaio de migração.

Embora sejam mais rápidos do que os ensaios de difusão, os ensaios de migração são mais eficientes para verificar a qualidade do betão do que para quantificar o coeficiente de difusão.

O ensaio de difusão (teste de célula difusora) consiste na colocação de uma amostra de betão entre duas câmaras: uma saturada com cloretos e a outra sem cloretos (Fig. 65).

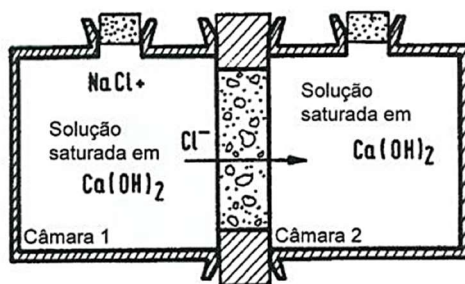


Figura 65 – Teste de célula difusora [28]

Passado algum tempo e medindo a concentração de cloretos nas duas câmaras, é possível determinar o coeficiente de difusão através da seguinte expressão:

$$D = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (\text{Equação 21})$$

onde:

- D, coeficiente de difusão no estado não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;
- U, o valor absoluto da voltagem aplicada, V;
- T, o valor médio das temperaturas inicial e final, °C;
- L, a espessura do provete, mm;
- X_d , o valor médio da profundidade de penetração, mm;
- T, a duração do ensaio, horas.

O ensaio de migração de cloretos consiste em acelerar o processo de difusão dos cloretos, aplicando um potencial elétrico entre as duas câmaras da célula difusora. Entre os ensaios de migração, o mais utilizado é o AASHTO T277 1983, em que é aplicado um potencial de

60 volt entre as duas câmaras e passadas 6 horas, mede-se a intensidade da corrente em Coulomb (Fig. 66).

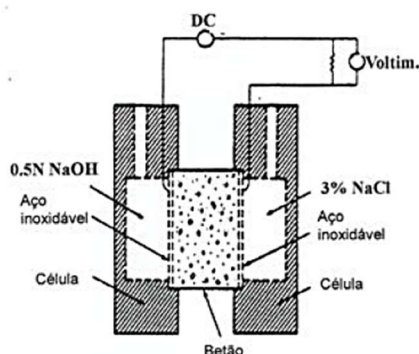


Figura 66 – Ensaio de migração [28]

3.2.9 Carbonatação acelerada

Este é o ensaio mais frequente para estimar a resistência do betão à carbonatação. Demora cerca de duas semanas para testar um fenómeno que naturalmente dura anos, pelo que é considerado um ensaio rápido.

As amostras são colocadas numa câmara controlada (Fig. 67) com humidade relativa de cerca de 60%, temperatura de cerca de 23°C e percentagem de CO₂ de cerca de 5%. A profundidade de carbonatação é depois medida periodicamente e o coeficiente de carbonatação é obtido segundo a lei de difusão:

$$Kt = x / t^{0,5} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde:

Kt = coeficiente de carbonatação acelerada (mm/ano^{0,5});

x = profundidade de carbonatação (mm);

t = tempo (anos).



Figura 67 – Câmara de carbonatação [28]

3.2.10 Análise Petrográfica

A análise petrográfica consiste na identificação detalhada dos constituintes do betão e na avaliação das implicações das suas propriedades, no comportamento do betão. É realizada através do exame ao microscópio ótico, ou do microscópio eletrónico de varrimento, de lâminas delgadas de betão, com área aproximada de 40×25 mm e espessura da ordem dos 0,003 mm. É utilizada para avaliar a micro estrutura do betão, permitindo identificar, entre outros: o volume relativo de agregados grossos, finos, cimento e poros; a presença ou não de agregados artificiais e adições do cimento; o tipo de cimento e a relação água/cimento; os ataques por sulfatos e as reações álcalis-sílica.

A petrografia consegue ainda identificar a presença de fissuras, a presença e natureza do gel, e de etringite e os indícios de reação das partículas dos agregados.

Na Figura 68, é possível observar resultados de análises petrográficas ao betão. Em a) observa-se a existência de poros esféricos na pasta, preenchidos com cristais de etringite (E); em b) a presença de grande quantidade de gel, num poro, resultante da ocorrência de reação álcalis-sílica, numa amostra de betão com agregados graníticos.

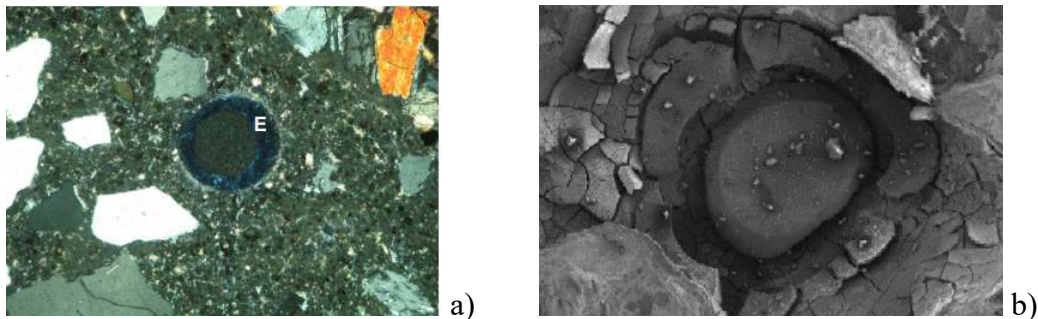


Figura 68 – Análise petrográfica e poro preenchido de gel resultante da ocorrência de reações álcalis-sílica [29]

4 TÉCNICAS DE REPARAÇÃO E REFORÇO DO BETÃO

Existem várias técnicas de reparação e reforço do betão. As técnicas de reparação têm como objetivos: aumentar a capacidade resistente (ou a rigidez) residual da estrutura até esta atingir de novo o nível correspondente ao cálculo inicial; melhorar o aspeto visual da estrutura; melhorar o seu desempenho funcional; garantir a impermeabilidade; aumentar a durabilidade.

As técnicas de reforço têm como objetivo aumentar a capacidade resistente e/ou a rigidez em relação ao seu nível inicial de projeto.

A evolução técnica e a crescente exigência, por parte da sociedade, de construções com cada vez maior qualidade, proporcionou uma evolução apreciável dos materiais e das técnicas de reparação e reforço do betão.

Os materiais de reparação do betão têm evoluído, nomeadamente os tipos de materiais cimentícios como: os betões/argamassas convencionais, betões/argamassas não retrácteis, betões/argamassas com polímeros. Esta evolução deve-se à necessidade de controlar as propriedades de fenómenos como: retração, aderência, resistência e tempos de presa/aplicação.

Os materiais de reforço de betão também têm evoluído e têm tido maior utilização, nomeadamente na adição de materiais como: perfis metálicos, chapas coladas e elementos de FRP. Esta evolução deve-se à necessidade de executar o reforço a mais baixo custo possível, permitindo uma melhoria da capacidade resistente das estruturas reforçadas.

4.1 Técnicas de Reparação

Referem-se as principais técnicas aplicadas na reparação de anomalias que ocorrem no betão, tais como fendas, vazios e zonas porosas, destacamentos e zonas fragmentadas, desagregações, zonas contaminadas ou com corrosão acentuada. A Tabela 4 resume as técnicas apresentadas.

Tabela 4 – Técnicas de Reparação

Anomalias	Técnicas de reparação
Fendas	Injeção
	Selagem superficial
Vazios e zonas porosas	Resinas epóxicas/acrílicas
	Argamassas de cimento não retrácteis
Destacamentos e zonas fragmentadas	Betão aplicado manualmente
	Betão de agregados pré-colocados
	Betão projetado (gunitagem ou shotcrete)
	Betão projetado com fibras de aço
	Betão projetado com fibras de vidro
Desagregações	Betão adequado ao meio ambiente
	Resinas epóxicas

4.1.1 Reparação de Fendas

Na reparação de fendas do betão, mais importante que o método a aplicar, é necessário saber como é que essa fenda deve ser reparada. Para isso, deve-se analisar a sua atividade (se está ativa ou passiva) e as causas que lhe deram origem, para não correr o risco de efetuar a reparação e posteriormente surgirem novas tensões de tração excessivas e o betão voltar a fendilhar no mesmo local ou próximo.

Existem dois tipos de fendas: ativas e passivas. O primeiro tipo surge em estruturas submetidas a ações alternadas ou a variações de temperatura, sem que tenham sido previstas

juntas de dilatação. Este tipo de fenda não está estabilizada. Fecha e abre alternadamente em função do gradiente térmico. O segundo tipo de fendas, como o nome indica, são fendas que estão estabilizadas ou que têm uma amplitude de movimento praticamente nula.

Para as fendas ativas, com grandes amplitudes de movimento, a reparação realiza-se, utilizando materiais elásticos ou plásticos (resinas acrílicas ou poliuretano) que são colocados em entalhes feitos no betão sobre a fenda.

Para as fendas inativas, de menor abertura ou com amplitude de movimentos suficientemente pequena, recorre-se a injeções de resina epóxida, utilizando formulação controlável rígida para movimentos praticamente nulos. Para fendas inativas de maior abertura recorre-se a caldas de cimento (grouts cimentícios).

- **Injeção**

A injeção de material de reparação sob pressão (reduzida) tem como objetivo preencher o espaço vazio resultante da fissuração, restabelecendo a estanqueidade e as propriedades mecânicas do elemento em causa. A escolha do material de reparação depende da abertura da fissura, sendo que, as resinas epóxidas são as mais utilizadas para este tipo de reparação em fendas (inativas) de abertura pequena/média, enquanto a alternativa para aberturas maiores são as caldas de cimento.

As resinas são compostas por dois componentes: uma resina líquida (epóxida, poliéster, poliuretano, etc.) e um endurecedor (fenol, amina, etc.). Têm como vantagem a boa trabalhabilidade e cura rápida, retração inexistente, estabilidade física e resistência aos agentes químicos, impermeabilidade e boa resistência à tração, assim como ótima aderência às superfícies de betão. Como desvantagens apresentam baixa resistência a temperaturas elevadas (T_g), as resinas epóxidas correntes não aderem a superfícies húmidas, têm *pot life* variável (de 5 min a 30 min) que diminui com a temperatura (reação exotérmica) e varia com a quantidade misturada.

Para proceder à reparação de fendas por injeção devem ser seguidos os seguintes procedimentos. Remoção do betão degradado na zona da fenda (caso exista); alargamento da abertura superficial (em V) em todo o comprimento da fenda, utilizando por exemplo, martelo pneumático, coroas diamantadas ou escopro; limpeza de pó ou detritos utilizando

jato de água e secagem com ar quente; jato de ar comprimido; selagem da superfície longitudinal da fenda para o material aglutinante não sair durante operação de injeção (Fig. 69).

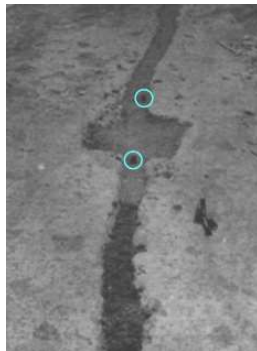


Figura 69 – Selagem de superfície [30]

De seguida a furação da superfície ao longo da fenda (Fig. 70) deve ser realizada em intervalos regulares pré-determinados de 5 mm a 10 mm, espaçamento em função da largura da peça a reparar, número de lados injetados, abertura e profundidade das fendas, eventuais bifurcações, viscosidade da resina e pressão de injeção.



Figura 70 – Furação da superfície [30]

A aplicação de tubos metálicos/plástico (*Packers*) (Fig. 71) e aplicação da mangueira de injeção nos furos previamente executados.



Figura 71 – Aplicação de tubos metálicos [30]

A verificação de eventuais obstruções entre dois tubos e também da efetividade da selagem (ar comprimido; se necessário efetuar mais furos). A preparação do material de reparação, mistura com equipamento adequado (resina bi-componente) (Fig. 72) e ajuste da mangueira aos tubos (Fig. 73);



Figura 72 – Equipamento de mistura [30]



Figura 73 – Ajuste da mangueira aos tubos [30]

A injeção do material de reparação (24h após a selagem) para fendas verticais inicia-se pelo furo inferior passando-se para o seguinte quando este purga material (baixo - cima) (Fig. 74) e para fendas horizontais inicia-se por um furo central e prossegue alternadamente nos furos contíguos, ou divide-se em troços e completa-se cada uma antes do início do seguinte (Fig. 75).

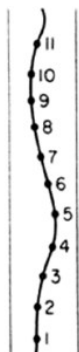


Figura 74 – Sequência de injeção fenda vertical [30]

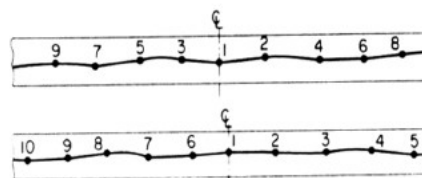


Figura 75 – Sequência de injeção fenda horizontal [30]

A selagem dos furos utilizando, por exemplo, cera de parafina ou o próprio material de injeção, e realizar reparação cosmética das superfícies após 12h a 24h. Verificação da eficiência da injeção realizando ensaios, por exemplo, extração de carotes cilíndricas ou ultra-sons, considerando-se satisfatória se penetração da resina foi efetuada em pelo menos 90% da profundidade da fenda.

• Selagem superficial

A técnica de selagem superficial, para fendas ativas, recorre-se à utilização de um material necessariamente aderente, resistente mecânica e quimicamente, não retráctil e módulo de elasticidade suficiente para se adaptar à deformação da fenda. Mediante a extensão da abertura da fenda (w), existe diferente modo de realizar a reparação assim como o material a aplicar: no caso de $w < 10$ mm, a reparação é realizada como na injeção por pressão, até ao passo à selagem da superfície, enquanto que, para $10 \text{ mm} < w < 30 \text{ mm}$, a reparação é realizada através do enchimento da fenda com grout, (eventual adição de carga) selando-se os bordos com epóxi (Fig. 76). Para os casos em que $w > 30 \text{ mm}$, a reparação é realizada através da vedação de uma junta em movimento, recorrendo à inserção de cordão em poliestireno ou mangueira plástica para apoio e isolamento do material selante (Fig. 77) ou colocação de juntas de neoprene aderentes aos bordos da fenda (Fig. 78).

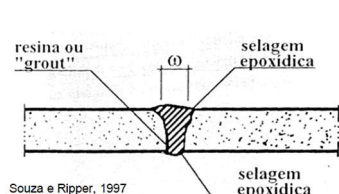


Figura 76 – $10 \text{ mm} < w < 30 \text{ mm}$
[30]

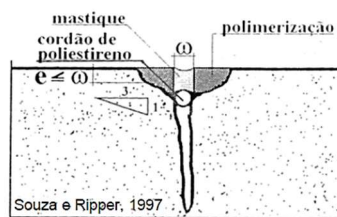


Figura 77 – $w > 30 \text{ mm}$
(mastique) [30]

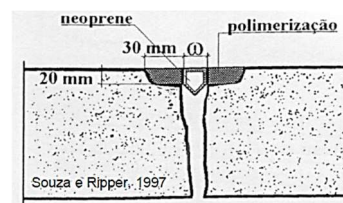


Figura 78 – $w > 30 \text{ mm}$
(neoprene) [30]

4.1.2 Reparação de vazios e zonas porosas

Para esta técnica, existem opções de reparação mediante a dimensão dos vazios:

- vazios de pequena dimensão a reparação é realizada através da aplicação de resinas epóxicas/acrílicas ou argamassas de cimento não retrácteis.
- vazios maiores recorre-se a argamassas de cimento não retrácteis.
- vazios de grandes dimensões e se existirem agregados soltos ou unidos pontualmente entre si, denotando falta de argamassa, deve-se proceder à reparação utilizando os seguintes passos: limpeza a fundo com eliminação de todo o betão que se considere deteriorado (martelos pneumáticos, martelo/escopro); aplicação de película de resina epóxida na superfície do betão a reparar (para melhorar ligação entre betões); preenchimento dos vazios com betão (não retráctil/expansivo).

4.1.3 Reparação de destacamentos e de zonas fragmentadas

No caso de destacamentos superficiais, o método de reparação passa por remover todo o material que esteja solto ou pouco seguro, tornar a superfície de contacto irregular para melhorar a aderência, devem ainda ser eliminadas todas as eventuais substâncias contaminantes, e por fim, aplicar o material de reparação. Os materiais de reparação podem ser: argamassas epóxicas, argamassa de cimento não retráctil, betão de cimento portland normal e betão projetado.

No caso de betão danificado em profundidade e fragmentado, existem várias técnicas de reparação. Contudo, antes da reparação é necessário ter em conta os seguintes aspetos: o betão danificado deverá ser completamente retirado e eliminado, sobretudo em peças críticas, como pilares ou vigas, expondo as armaduras, e também, os varões de armadura que tenham sofrido deformações permanentes significativas ou que estejam danificados devem ser substituídos. Para isso, são retirados os troços danificados e substituídos por aço novo, recorrendo a soldadura in-situ, amarração convencional ou mangas metálicas.

As técnicas de reparação para o betão danificado em profundidade e fragmentado são: betão aplicado manualmente, betão de agregados pré-colocados e betão projetado.

- **Betão aplicado manualmente**

O procedimento para a realização desta técnica é o seguinte: retirar todo o betão deteriorado; formar mais irregularidades de forma a obter uma superfície rugosa e deixar a descoberto a armadura existente (2 cm a 3 cm); criar juntas de betonagem bem vincadas (com cantos); retirar gorduras do betão, recorrendo a solventes e emulsionantes, e a ferrugem do aço através da escovagem; retirar a poeira por lavagem com água sob pressão; saturar a superfície de contacto, através da molhagem direta, tecidos saturados ou sprinklers; aplicar o betão novo, recorrendo à colher ou talocha, cofragem ou agregados pré-colocados; se necessário e possível, compactar o betão novo por apiloamento, vibração ou outro meio adequado; curar todas as superfícies expostas por molhagem ou cobrindo-as com serapilheiras molhadas (pelo menos 10 dias).

As vantagens da utilização da técnica do betão aplicado manualmente são: baixo custo, dispensa mão-de-obra especializada e uma boa integração com o material existente. Em

desvantagem, obtém-se diferentes períodos de retração entre o material original e o betão de reparação, o que provoca aumento de tensões de tração na superfície de contacto, com consequente tendência para a diminuição de adesão e eventual fissuração e separação.

Para melhores características de aderência e controlo da retração é necessário utilizar betões com maior tensão de rotura à compressão (>5 MPa) que a do betão existente e reduzir substancialmente a relação água/cimento e adjuvantes plastificantes/superplastificantes.

- **Betão de agregados pré-colocados**

A aplicação desta técnica é útil em situações de difícil acesso, como por exemplo em elementos submersos, ou onde existe uma grande concentração de armaduras.

O procedimento para a realização desta técnica é o seguinte: colocação dos agregados grossos, com dimensões entre 12,5 mm e 40 mm, montagem da cofragem estanque e bem escorada devido à pressão de injeção a que vai estar sujeita, molhagem dos agregados grossos, bombeamento de argamassa cimentícia fina de forma lenta e continuamente por baixo, de modo a expulsar o ar existente entre os inertes. Em áreas muito extensas é conveniente dispor de vários tubos de injeção espaçados de cerca de 50 cm (Fig. 79).

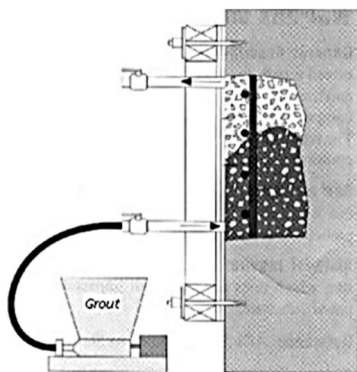


Figura 79 – Aplicação de betão de agregados pré-colocados [31]

- **Betão projetado (gunitagem ou shotcrete)**

A reparação recorrendo ao betão projetado, é realizada através de um processo contínuo de colocação de betão normal (com composição controlada, máxima dimensão dos agregados de 10 mm a 20 mm, relação água/cimento reduzida) por projeção, dispensando-se o uso de cofragem.

O princípio deste método está na força do impacto do jato de betão contra a superfície, não só faz com que este adira, mas também serve para o compactar. Utiliza-se em geral uma mistura relativamente seca para que o material se segure por si sem escorregar. Tem tido uma aplicação cada vez mais alargada em trabalhos de reparação e reforço de estruturas de betão armado.

Esta técnica caracteriza-se pela excelente aderência, elevada compactação e baixa relação água/cimento, propriedades mecânicas elevadas, propriedades de durabilidade elevadas, dispensa cofragens e é de fácil aplicação. Contudo, apresenta algumas desvantagens, como o ricochete de agregados grossos, provocando menor resistência e maior retração, pode provocar estragos no betão existente, mão-de-obra especializada e equipamento específico, baixo rendimento (m³/h) e acabamento não fica executado.

Existem dois métodos de aplicação: gunitagem por via seca e gunitagem por via húmida, que são descritos abaixo e comparados na tabela 5.

No método de gunitagem por via seca, a hidratação da argamassa dá-se apenas na saída da mangueira de projeção, a mistura seca de cimento e agregados é introduzida no equipamento de projeção, sendo a água necessária para a hidratação da mistura adicionada na agulha, imediatamente antes da projeção. No método de gunitagem por via húmida, a mistura hidratada é bombada através da mangueira de projeção, sendo a mistura preparada numa central, de forma semelhante ao betão corrente, com toda a água necessária para a sua hidratação, posteriormente, esta mistura é transportada para a obra e projetada com equipamento adequado.

Tabela 5 – Comparação de métodos de gunitagem

Comparação de métodos de gunitagem	
Via seca	Via húmida
Controlo da quantidade de água e consistência à saída da mangueira, sendo possível proceder a ajustes, por exemplo para evitar escorregamento	Melhor controlo da quantidade de água, medida com exatidão na misturadora, e por com isso, também da posologia

Menor retração e maior aderência	Maior garantia de hidratação completa da mistura
Não há risco de presa precoce	Menos perdas de agregados por ricochete
Melhor comportamento para misturas com agregados porosos e leves	Menos pó durante a operação
Permite maior comprimento da mangueira de aplicação	

Os procedimentos para a aplicação desta técnica são: preparação do substrato removendo o betão deteriorado através da decapagem, lavagem e remoção de ferrugem (Fig. 80).



Figura 80 – Preparação do substrato [31]

Colocar sempre que possível e necessário, uma armadura de pele mínima para evitar fendilhação por retração do betão projetado. Por outro lado, se o betão for armado deve-se colocar armadura, projeção de camada de argamassa de pequena espessura com uma mistura de cimento, areia e água, por forma, a formar uma base sobre a qual se possa projetar a mistura com agregados grossos e baixo conteúdo em água sem perigo de haver um ricochete excessivo. A técnica de projeção passa por projetar das zonas inferiores para as zonas superiores e aplicar a cerca de um metro de distância e na perpendicular da superfície (Fig. 81).

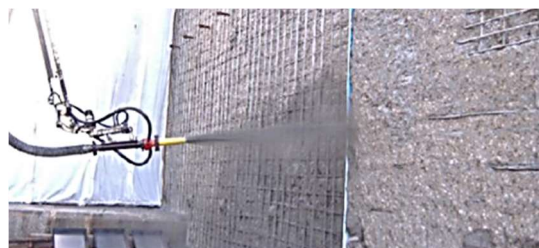


Figura 81 – Técnica de projeção do betão [31]

O betão deve ser aplicado em camadas finas, com espessuras de 25 mm a 75 mm. Procedendo-se à cura de cada camada aplicada, que é realizada através de repetidas molhagens das superfícies, devendo-se esperar o tempo de presa para aplicação de nova camada, de 6 h a 12 h, consoante utilização de aceleradores de presa. De referir que a espessura total do betão projetado não deve ultrapassar os 15 cm a 20 cm e deve-se evitar mexer a superfície do betão projetado.

- **Betão projetado com fibras de aço**

Este método é idêntico ao exposto anteriormente, betão projetado, com a diferença de conter fibras de aço misturadas com o betão. A mistura consiste num betão com cerca de mais 20% de cimento do que um betão corrente, agregados de pequeno diâmetro (5 mm a 10 mm) e uma quantidade limitada de fibras de aço. As fibras devem ser de menos de 5% do peso total do betão fresco ou até 80 kg/m³, com comprimento inferior a 50 mm e diâmetros de 0,3 mm a 0,5 mm.

As vantagens são a reduzida retração/tendência para fissuração e o aumento das resistências à compressão/tração, ao choque de 5 a 10 vezes superior, e da extensão de cedência de 50% a 100%. As desvantagens são a necessidade de proteção para evitar a corrosão das fibras e a última camada do betão projetado (pelo menos 20 mm) não deve conter fibras de aço ou, em alternativa, estas devem ser galvanizadas.

- **Betão projetado com fibras de vidro**

Este método é idêntico ao exposto anteriormente, betão projetado, com a diferença de conter fibras de vidro misturadas com o betão. As fibras de vidro (GRC), resistentes aos álcalis, e dispersas na sua matriz apresenta diversas vantagens relativamente ao betão convencional.

As vantagens são a elevada resistência ao desgaste, devido à baixa relação água/cimento e utilização de agregados duros de forma lisa e regular, a elevada resistência ao impacto, fortemente influenciada pela presença das fibras de vidro, um comportamento não desprezável à tração, reduzida retração/fissuração, elevada resistência química, elevada resistência às ações de gelo e degelo e bom comportamento ao fogo.

4.1.4 Reparação de desagregações

No caso de existirem desagregações no betão, os métodos de reparação para as desagregações são: remoção da parte do betão que está deteriorado, aplicação de um betão mais adequado ao meio ambiente agressivo com os procedimentos normais através de projeção (exemplos: resistente aos sulfatos ou sem agregados reativos), em alternativa, ou como complemento, podem utilizar-se soluções de proteção como os recobrimentos de argamassas resistentes aos ataques químicos ou revestimentos impermeabilizantes (resinas epóxicas).

Para obter sucesso na reparação é fundamental, sempre que possível, eliminar a causa da patologia ou garantir o impedimento do acesso dos agentes agressivos aos materiais mais vulneráveis.

4.2 Técnicas de Reforço

Neste ponto, trata-se as principais técnicas aplicadas no reforço de betão armado, que têm como objetivo aumentar a capacidade resistente e/ou a rigidez em relação ao seu nível inicial de projeto. As técnicas mais usadas e que se vão explicar são o encamisamento do betão, colagem de chapas metálicas, colagem de materiais compósitos (sistemas FRP) pelo exterior, introdução de perfis metálicos e pré-esforço exterior.

4.2.1 Reforço por encamisamento do betão

O reforço por encamisamento é a técnica de reforço mais comum, por ser a que melhor se identifica com a regra de os materiais novos e os existentes terem características e comportamentos mecânicos semelhantes.

Esta técnica consiste na utilização de materiais cimentícios mais ou menos tradicionais e armadura em varão para conferir maior resistência e/ou rigidez aos elementos existentes danificados e/ou com deficiências estruturais. As camadas do novo material cobrem o existente, “encamisando-o” e obtendo-se um acréscimo das dimensões finais das peças reforçadas em relação às originais.

As vantagens são o aumento de resistência e rigidez das peças, eficácia e garantia de funcionamento muito bom, desde que se garanta aderência e monolitismo, tem um custo em

geral reduzido, a execução é relativamente rápida, obtém-se inexistência de efeitos secundários na maior parte dos casos e a mão-de-obra não necessita ser especializada. As desvantagens são as dimensões finais superiores às iniciais de projeto e o tempo de espera inevitável para que o novo betão adquira a resistência suficiente para ser carregado.

O reforço por encamisamento pode ser aplicado em vigas ou pilares. Nas vigas o reforço poderá ser efetuado apenas para a flexão (Fig. 82) ou à flexão e ao esforço transversal (Fig. 83), enquanto que em pilares é efetuado para aumentar a resistência à compressão e à flexão. Este reforço em pilares é realizado normalmente em toda a secção do pilar sendo designado por encamisamento fechado (Fig. 84). Contudo, devido a condicionantes arquitetónicas pode ser executado apenas em algumas faces do pilar, designando-se por encamisamento aberto (Fig. 85).

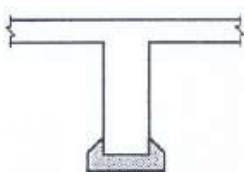


Figura 82 – Encamisamento à flexão em viga [32]

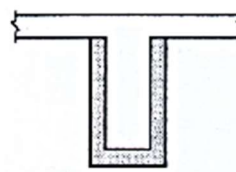


Figura 83 – Encamisamento à flexão e ao esforço transversal em viga [32]



Figura 84 – Encamisamento à flexão e compressão em pilares – Encamisamento fechado [32]



Figura 85 – Encamisamento à flexão e compressão em pilares – Encamisamento aberto [32]

Para a execução desta técnica o procedimento a seguir deverá ser, começar por elaborar um escoramento para que o reforço seja aplicado com níveis de tensão mais baixos, depois prosseguir para a preparação da superfície que envolve a realização de trabalhos diferentes conforme o estado de degradação do elemento. Podendo-se dividir em três tipos de preparação, a remoção do betão deteriorado e remoção de poeira para criar maior rugosidade, retirar a camada de betão de recobrimento deixando expostas as armaduras e quando o

elemento se encontra muito degradado há necessidade de deixar as armaduras iniciais livres (Fig. 86).

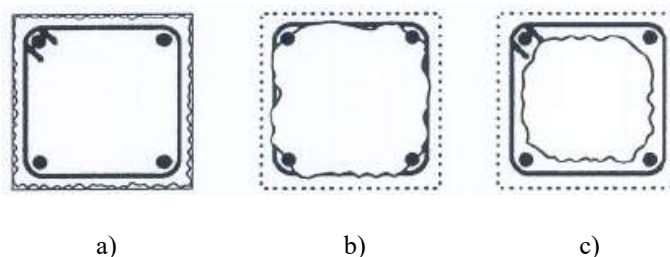


Figura 86 – a) Preparação criando maior rugosidade; b) Preparação deixando expostas as armaduras; c) Preparação deixando as armaduras livres [32]

Procede-se a limpeza com jato de água por forma a remover todas as poeiras. De referir que em caso de as armaduras iniciais se encontrarem deterioradas deve realizar-se a sua reparação. No caso de existir uma redução de até 10% da secção, será admissível que se realize apenas uma limpeza das armaduras com jato de areia, mas se a redução for maior, deve-se ter em conta no dimensionamento das armaduras de reforço.

Após a preparação da superfície e a limpeza, será possível colocar as armaduras adicionais exteriormente à secção inicial e dar início à betonagem. Para esta última fase, a aplicação pode ser realizada recorrendo aos métodos já explicados anteriormente, betão normal cofrado, betão projetado ou aplicado diretamente à colher, sendo que se recomenda que o inerte do betão utilizado seja de dimensão máxima de um terço da espessura a betonar. De referir, que em caso de a espessura a betonar ser inferior a 60mm, deve-se recorrer à utilização de argamassas. A conclusão do procedimento será a cura do betão, que é importante para se obter uma maior resistência e aderência, recorrendo a molhagens sucessivas ou da aplicação de membranas de cura.

4.2.2 Reforço por adição de chapas coladas

A técnica de reforço por adição de chapas coladas, consiste na solidarização de chapas metálicas à peça existente por colagem, geralmente com resina epóxi, e normalmente complementada por meios mecânicos. As dimensões do elemento existente praticamente mantêm-se, com exceção da própria espessura da chapa e de eventuais camadas de proteção contra o fogo e a corrosão da mesma. Esta solução é particularmente vocacionada para

situações que requerem urgência de intervenção, por ter um rápido procedimento de execução (Fig. 87).



Figura 87 – Reforço por adição de chapas coladas [33]

A adição de chapas coladas permite aumentar a capacidade resistente à flexão simples e ao esforço transversal, sobretudo de vigas, para quais esta técnica está particularmente vocacionada, e de lajes. Noutros elementos estruturais, como paredes, este tipo de reforço tem uma menor aplicabilidade, devido às dimensões dos mesmos e do elevado custo envolvido.

Esta técnica permite uma melhoria sensível da capacidade resistente da peça, rapidez de execução, manutenção da secção existente, possibilidade de manter em utilização a estrutura durante a execução do reforço e ausência de ruído excessivo ou pó. As desvantagens são, elevado custo, possibilidade de efeitos secundários nas zonas de ancoragem, mão-de-obra relativamente especializada, necessidade de grande controlo de qualidade na execução e a necessidade de proteger as chapas do fogo e corrosão com revestimentos exteriores de materiais adequados.

A execução de reforço por adição de chapas coladas obedece a um procedimento que começa com o tratamento das superfícies dos materiais existentes, semelhante ao descrito para as técnicas de reparação, obter superfícies completamente limpas de líquidos, pó ou sólidos de pouca resistência que possam diminuir o efeito de aderência que se pretende, rugosidade superficial que aumenta a superfície de contacto entre a resina e a base, recorrendo ao jato de areia, martelo de agulhas ou esmeril, água sob pressão alta eventualmente com partículas

metálicas, escovas de aço ou martelos pneumáticos, as gorduras podem ser eliminadas com acetona ou tricloroetileno (Fig. 88).



Figura 88 – Limpeza das superfícies de chapas de aço e betão [34]

As chapas metálicas devem também ser objeto de um tratamento anterior à sua colocação, recorrendo à execução de furos para colocação das buchas dos parafusos de suporte. Para a implantação das chapas e/ou perfis deve-se aplicar da cola antes da colocação das mesmas, aplicando uma camada de resina epóxida nas chapas e no betão (Fig. 89), depois exercer pressão uniforme sobre a chapa até se conseguir que a espessura da camada do ligante seja adequada, recorrendo a tábua e escoras.



Figura 89 – Aplicação de resina epóxida nas chapas e no betão [34]

Após a colocação das chapas, deve-se aguardar no mínimo 7 dias para desmontar o sistema de aperto, procedendo também à remoção das partes de resina escorrentes, limpeza geral das chapas. Por último, executar proteção total das faces expostas das chapas com pinturas anticorrosivas aplicadas sobre uma demão de primário epóxido em pó de zinco ou argamassas projetadas (Fig. 90) que apresentam bom isolamento térmico às altas temperaturas e trabalham monoliticamente com a estrutura, possibilitando a não ocorrência de fissuras ou destacamentos.



Figura 90 – Aplicação camada protetora de chapas recorrendo a argamassas projetadas [34]

4.2.3 Reforço por adição de elementos de FRP

A técnica de reforço por adição de elementos de FRP - Fiber Reinforced Polymers, consiste na aplicação de sistemas, constituídos por compósitos de fibras e resinas. As fibras podem ser de vidro, carbono ou aramida. As resinas podem ser termoendurecíveis (poliéster, viniléster, epóxi, fenólicas) ou termoplásticas (polietileno, polipropileno). Sendo que as fibras de carbono e as resinas termoendurecíveis são as que têm maiores potencialidades.

Nos materiais compósitos de FRP é possível optar por aplicações de reforço por laminados, mantas ou tecidos colados exteriormente. É também possível, mas menos utilizado, recorrer-se a varões ou barras de compósitos FRP pré-esforçados ou não em aplicações de reforço.

Os elementos de FRP apresentam resistência à corrosão, baixo peso e permitem fácil mobilidade, principais características que contribuem para a sua utilização. Contudo, em situações em que os aspetos estéticos ou de preservação patrimonial não intrusiva ou de agressividade ambiental sejam fundamentais, a utilização destes materiais não tem interesse.

Existem duas formas principais de aplicar FRP: laminados de fibra de carbono unidireccionais, já endurecidos (pré-curados e prontos a usar), que são simplesmente colados com um adesivo de resina epóxida (Fig. 91) e mantas de fibras contínuas e unidireccionais, endurecidas *in situ*, aglutinadas e coladas com uma matriz epóxida (Fig. 92).



Figura 91 – Laminados aplicados em laje [35]



Figura 92 – Mantas aplicadas em pilar [35]

Antes de proceder à aplicação dos laminados ou mantas é necessário preparar a superfície que vai receber estes elementos, através da remoção de poeira, sujidade, leitadas ou outros materiais que possam prejudicar a aderência. Sendo também necessário a inspeção das condições da superfície e condições ambientais, como por exemplo, verificar se a temperatura ambiental inferior a 5°C, poros da superfície cheios de água ou existir potencial fuga de água, porque em caso de alguma destas condições existir, a aplicação não pode ocorrer.

A aplicação das mantas obedece a um procedimento que se pode dividir em várias fases. Numa primeira fase a superfície tem de ser preparada para receber a camada aderente, sendo esta lixada ou limpa com jato de areia. De seguida é aplicado um primário (Fig. 93) epóxico de baixa viscosidade para assim penetrar melhor no betão.



Figura 93 – Aplicação de primário [36]

Após o primário e de modo a eliminar qualquer imperfeição da superfície é aplicada uma argamassa de regularização e suavizam-se as arestas. Com a superfície já regularizada, aplica-se a primeira camada de resina epóxica para impregnação de alta viscosidade, o que irá ajudar a manter a manta na direção e posição adequada, ajudando também na resistência da fibra. Depois, é aplicada a manta (Fig. 94), podendo esta ser aplicada com auxílio de um

rolo ou espátula própria de modo a retirar qualquer ar que fique entre a manta e a resina, para ficar uma superfície totalmente embebida na resina e selada.



Figura 94 – Aplicação da manta e impregnação com a ajuda de rolo [36]

Por último, é aplicada uma nova camada de resina epoxídica seguido de uma última camada de acabamento e proteção, podendo esta ser uma tinta, ou algum elemento de revestimento ou elemento de proteção ao fogo.

A aplicação dos laminados obedece a um procedimento que se pode dividir também em várias fases. Começando por limpar o laminado com um solvente apropriado como a acetona, para depois aplicar o adesivo na superfície a colar em forma de cúpula, ou seja, na zona interior com uma espessura maior que a exterior (Fig. 95).

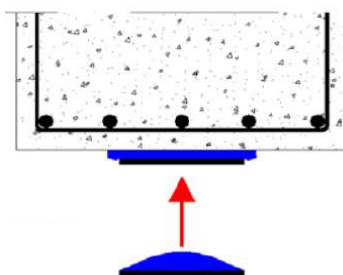


Figura 95 – Aplicação do adesivo em forma de cúpula [36]

Após a realização destes procedimentos coloca-se o laminado na superfície e com o auxílio de um rolo, faz-se pressão sobre o laminado retirando-se simultaneamente o adesivo em excesso. Por último, aplica-se um revestimento de proteção aos raios UV e à ação do fogo.

4.2.4 Reforço por introdução de perfis metálicos

A técnica de reforço por introdução de perfis metálicos, consiste na incorporação de perfis metálicos no elemento de betão armado existente, principalmente em vigas ou pilares, com o objetivo de aumentar a capacidade resistente à flexão composta e ao esforço transversal, eventualmente os perfis são complementados pela introdução de chapas metálicas coladas, soldadas, chumbadas ou rebitadas. As dimensões do elemento existente não sofrem alterações apreciáveis na generalidade dos reforços deste tipo. Mas existe a eventual necessidade de executar camadas de proteção contra o fogo e a corrosão dos perfis ou chapas sem capacidade resistente própria. A maior dificuldade desta técnica, consiste em conseguir um funcionamento conjunto eficaz dos elementos existentes e dos perfis metálicos de reforço.

Esta técnica de reforço permite aumentar a capacidade resistente à flexão composta e ao corte em pilares, onde é largamente aplicada. Aplicada em vigas aumenta a sua capacidade resistente ao corte e a solidarização a paredes. Em lajes aumenta a resistência ao punçoamento ou modifica o sistema estrutural de apoio.

Esta técnica destina-se a casos que é necessário a melhoria da capacidade resistente e da ductilidade da peça, rapidez de execução e de colocação em carga da estrutura reforçada, manutenção da secção existente para a maioria dos casos e possibilidade de manter em serviço a estrutura a reforçar. Contudo, esta técnica implica, um elevado custo, mão-de-obra relativamente especializada, necessidade de grande controlo na execução, necessidade de proteger todas as peças metálicas contra o fogo e a corrosão através da colocação de revestimentos exteriores de materiais adequados, possibilidade de criação de efeitos secundários na zona dos nós e nas peças adjacentes não reforçadas e perigo de concentração de tensões de corte nas lajes entre troços de pilares reforçados, se não for dada continuidade a esses mesmos reforços.

A aplicação desta técnica em pilares, onde tem sido mais utilizada, consiste na colocação de cantoneiras nos quatro cantos do pilar solidarizadas lateralmente por meio de chapas metálicas ou varões (Fig. 96).



Figura 96 – Reforço por introdução de perfis metálicos em pilar [37]

Os elementos metálicos deverão possuir dimensões mínimas. No caso da utilização de cantoneiras (armadura longitudinal), a sua dimensão não deve ser inferior a uma secção L50x50x5 (dimensões de acordo com a norma EN10056-1:2017 e tolerâncias de acordo com a norma EN10056-2:1994). Quando se utilizam barras transversais, a sua largura não deve ser inferior a 25 mm (com 4 mm de espessura, mínimo) ou varões de 10 mm de diâmetro, espaçados 0,10 m. No caso de se colocar um encamisamento de betão armado, a sua espessura não deve ser inferior a 40 mm quando se recorre a betão projetado, ou 50 mm no caso de betão moldado *in-situ*. A armadura de distribuição a empregar nesta situação será uma malha quadrada de varões de 8 mm de diâmetro espaçados a 0,10 m. A forma mais simples de colocação destes elementos, passa pela utilização de resina epoxy para a sua fixação ao pilar a reforçar (Fig. 97).

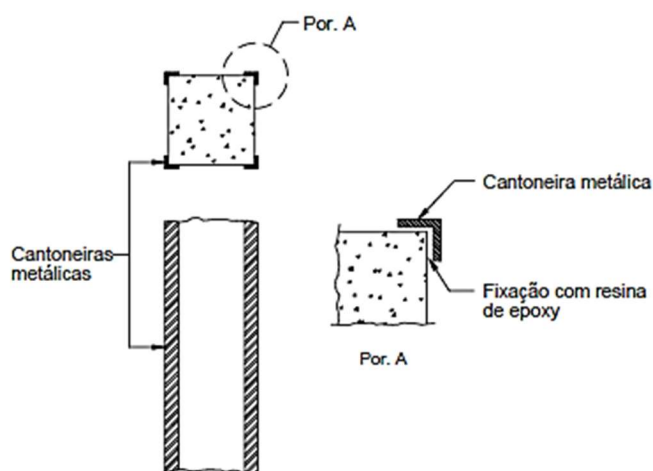


Figura 97 – Reforço por introdução de perfis metálicos em pilar [38]

Para além da ligação dos elementos metálicos por colagem com resina injetada, pode complementar-se esta união recorrendo à execução de soldadura às armaduras iniciais, adição de buchas (em caso de a dimensão da armadura de reforço ser suficientemente elevada por forma a permitir que as buchas não colidam com a armadura existente), ou adicionar barras transversais para ligar os elementos longitudinais, colocados nos cantos da secção, sejam ligados entre si através recorrendo à soldadura. Estas barras podem ser utilizadas para o reforço da armadura transversal.

4.2.5 Reforço por pré-esforço exterior

A técnica de reforço por pré-esforço exterior consiste na imposição de uma pós-tensão em cabos de pré-esforço exteriores ou interiores ao elemento a reforçar, para os quais é criteriosamente escolhido um traçado. Por exemplo em estruturas isostáticas procura-se impor uma deformação contrária à das ações permanentes. Esta técnica tem como principal dificuldade, a pormenorização das zonas de ancoragem, devido às compressões elevadas na direção do pré-esforço, originando tensões de tração normais nessa mesma direção para as quais a peça existente poderá não estar preparada.

Com este tipo de reforço é possível aumentar a capacidade resistente à flexão e ao esforço transversal, assim como, diminuir flechas excessivas em vigas (Fig. 98) e em lajes, sendo a sua aplicação noutros elementos estruturais muito pouco comum.

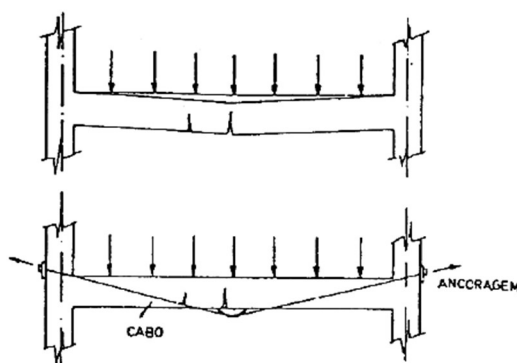


Figura 98 – Reforço e eliminação de deformação de uma viga [39]

Esta técnica destina-se a casos em que é necessário atuar sobre os elementos deficientes sem ter de os descarregar, gerando forças que asseguram o equilíbrio e a resistência da estrutura ao mesmo tempo que elimina as suas deformações de carácter permanente, ao contrário de

outras técnicas, em que a eficácia do reforço depende de deformações adicionais ao elemento existente. De referir que, recorrendo a esta técnica, é possível colocar em carga a estrutura reforçada logo após a sua instalação. Contudo, a aplicação do pré-esforço obedece a mão-de-obra especializada, tem um elevado custo e existe a possibilidade de criação de efeitos secundários nas zonas de ancoragem ou em elementos adjacentes não reforçados. Existe a necessidade de proteger todos os cabos contra o fogo e a corrosão, e é esteticamente inaceitável na maioria dos casos.

Para a aplicação desta técnica será necessário que o traçado dos cabos reproduza o anti-funcular das cargas exteriores para ter o seu rendimento máximo, o que nem sempre é possível. De facto, na prática, é muito mais fácil impor traçados retilíneos que parabólicos. A disposição em anti-funcular dos cabos melhora também as características resistentes do elemento ao esforço transversal devido à componente vertical do esforço normal no cabo. É também necessário a criação de zonas de ancoragem (Fig. 99) e de desviadores (Fig. 100) de direção nos pontos mais adequados para conseguir um traçado de cabo que reproduza o anti-funcular das cargas permanentes.

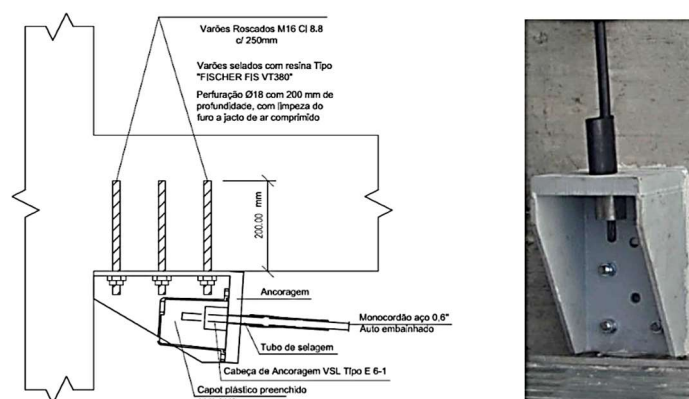


Figura 99 – Ancoragem em aço ligada a uma estrutura de betão armado [40]

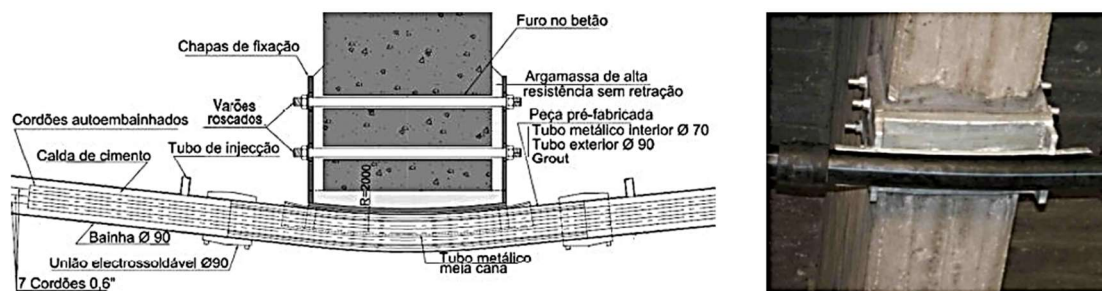


Figura 100 – Desviador de aço ligado a uma estrutura de betão armado [40]

A pormenorização e ligação adequada à peça existente das zonas de ancoragem e dos desviadores são cruciais para a diminuição das tensões locais na peça existente. Deverá existir cuidado com os fenómenos de vibração (ressonância) dos cabos, devem ser previstos dispositivos adequados para prevenir que ocorra ressonância, por exemplo, utilizando fixadores em torno dos cabos (Fig. 101).



Figura 101 – Fixador metálico anti vibratório ligado a uma estrutura de betão armado [40]

Para além dos cabos, é frequente a colocação de tirantes formados por barras de aço de alta resistência roscadas nas suas extremidades, encostadas às faces laterais da viga e colocadas em carga por meio de aperto de roscas que transmitem a sua tensão a dispositivos de ancoragem adequados (Fig. 102).

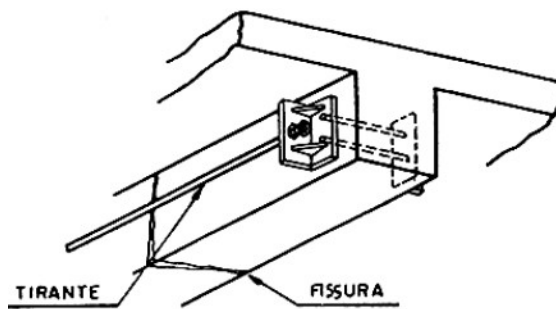


Figura 102 – Pré-esforço de uma viga através de tirante roscado [39]

5 CONCLUSÕES

A reabilitação tem como objetivo aumentar os níveis de qualidade e conforto, mantendo as exigências funcionais e o tempo de vida útil previsto aquando da construção.

Na construção civil, em Portugal, assiste-se a uma crescente preocupação com o parque edificado e a um aumento das intervenções de reabilitação. Mas na maioria das obras de reabilitação não são seguidos os processos e princípios descritos neste relatório, quer na fase de execução, mas também na fase de inspeção e avaliação da estrutura a intervir.

Este trabalho teve como principal objetivo aprofundar o conhecimento dos principais métodos de reabilitação e reforço a aplicar nas estruturas de betão armado. Pretendeu-se, que atendendo à patologia que o betão apresente, conhecer a técnica de reabilitação ou de reforço a aplicar, assim como o seu respetivo processo de execução.

A norma NP EN 1504 assume um papel importante na reabilitação de estruturas de betão armado, pois define princípios e métodos de reparação, para que a intervenção numa estrutura de betão armado, se revele eficaz. As fases do processo de reparação, bem como as condições de aplicabilidade das técnicas enunciadas na NP EN 1504, são fáceis de compreender e de aplicar.

No que se refere às das patologias do betão, foram identificadas as principais anomalias, que surgem já na fase de construção e que, maioritariamente, são devidas a falhas que podem ser evitadas com a correta execução da betonagem, vibração e cura do betão. Outras patologias como as fissurações, que podem ocorrer ao longo da vida da estrutura, são mais difíceis de controlar, como se descreve no presente trabalho.

Relativamente aos ensaios de diagnóstico de anomalias, foram abordados os mais usuais e que se agrupam em ensaios “*in situ*” e em ensaios laboratoriais. Apesar de existirem algumas patologias facilmente diagnosticáveis apenas com inspeção visual, os ensaios permitem obter dados mais concretos e fiáveis sobre as patologias. Os dois grupos de ensaios referidos são, muitas vezes, utilizados como complemento um do outro.

Relativamente às técnicas de reparação e reforço refere-se que, devido à ausência de acompanhamento de casos práticos de obra no decurso da execução do presente trabalho,

considerou-se importante descrever e ilustrar bem as diferentes técnicas, por forma a poder esclarecer o mais possível a sua execução.

Neste trabalho foram descritas as técnicas comumente usadas em trabalhos de reparação e reforço de estruturas de betão armado, podendo servir de apoio em obras de reabilitação.

Face à sua especificidade e utilização não corrente, não foram referidas as técnicas de tratamento do betão, nomeadamente para a remoção de cloretos e para a reposição da alcalinidade do betão.

Considera-se importante e fundamental conhecer os vários tipos de materiais e de técnicas com que se pode intervir numa estrutura de betão armado para saber optar pela melhor solução, em cada situação real de obra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Apresentação da unidade curricular de Patologia e Reabilitação da Construção do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, “Anomalias em betão armado e pré-esforçado” (consultado em 06.01.18)
- [2] - Norma Europeia EN 1504, um guia ilustrado, simplificado para todos os intervenientes na reparação de betão, “The Chemical Company” (consultado em 06.01.18)
- [3] - Gilson Morales, Alessandro Campos, Adriana M. Patriota Faganello (2011), “A ação do fogo sobre os componentes do concreto”
- [4] - Ruben André (2013), “Reparação de estruturas de betão Armado afetado pela carbonatação do betão e corrosão das armaduras”, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias
- [5] - “Diagnóstico e patologia de construções em betão armado”, Instituto Superior Técnico (consultado em 14.01.18)
- [6] - <http://www.dansolucao.com.br/blog-dan-solucao-item.php?post=principais-patologias-causadas-por-infiltracoes-e-umidades> (consultado em 14.01.18)
- [7] - Apontamentos de Conservação e Reabilitação de Edifícios I (2015) – “Patologias do Betão”, Instituto Politécnico de Tomar, Maria de Lurdes Belgas da Costa
- [8] - Gil Rosa, Maria Ribeira, Sérgio Oliveira (2016), “Ensaio de fluência em tração”, 2º encontro nacional sobre qualidade e inovação na construção, Lisboa LNEC
- [9] - Mónica Pinho (2016), “Avaliação da resistência ao esforço transversal em vigas de betão reforçado com fibras de aço”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto
- [10] - <http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2016/07/AULA-TORCAO-EM-VIGAS-DE-CONCRETO-ARMADO.pdf> (consultado em 20.02.18)
- [11] - Júlio Appleton, António Costa, “Deterioração de estruturas de betão”, Instituto Superior Técnico (consultado em 21.02.18)
- [12] - Paulo Pinto (2011), “Reabilitação e reforço de estruturas – Aula 19: Reforço de fundações”, Instituto Superior Técnico

- [13] - Cristofe Viegas (2014), “Reforço sísmico de pilares de betão armado sujeitos a flexão biaxial”, Universidade de Aveiro
- [14] - Cristina Santos, João Rodrigues António Coelho, “Reparação de estruturas de betão após incêndio” (consultado em 17.02.18)
- [15] - https://www.google.pt/search?q=Escler%C3%B3metro+de+Schmidt&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiw1Ojt9tjUAhXMCBoKHbXzCzEQ_AUICigB&biw=1280&bih=557#imgsrc=mEo9Llyt_RcF3M: (consultado em 17.02.18)
- [16] - https://www.google.pt/search?q=pull-off&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi6ibfh99jUAhUDHxoKHUgMBB8Q_AUICigB&biw=1280&bih=557#imgsrc=x6bza9JQasWNWM: (consultado em 17.02.18)
- [17] - Ana Lopes (2012), “Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio pull-off na medição da resistência de aderência à tracção em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas”, Instituto Superior Técnico
- [18] - “Ensaio de ultra-sons em betão”, OZ Diagnostico - <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20004.pdf> (consultado em 15.04.18)
- [19] - “Execução de ensaios de carga estáticos de curta duração em estruturas”, OZ Diagnostico - <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20007.pdf> (consultado em 15.04.18)
- [20] - Apontamentos de Conservação e Reabilitação de Edifícios I (2015) – “Técnicas de levantamento e diagnóstico “in situ” e laboratoriais”, Instituto Politécnico de Tomar, Maria de Lurdes Belgas da Costa
- [21] - Seminário - Reabilitação Sísmica dos Edifícios (2011), “Segurança sísmica das construções informação de suporte com recurso a ensaios não destrutivos “in-situ”, Lisboa
- [22] - https://www.google.pt/search?q=Carbonata%C3%A7%C3%A3o+do+bet%C3%A3o+%E2%80%93+Fenolftale%C3%ADna&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiipzjwZ3eAhULU1AKHb4oAdkQ_AUIDigB&biw=1438&bih=651#imgsrc=BtWvfGff-awiM: (consultado em 03.03.18)

- [23] - Júlio Appleton, António Costa, (1999), “Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas n.º46 (consultado em 15.06.18)
- [24] - “Detecção de corrosão activa em armaduras por medição dos potenciais eléctricos”, OZ Diagnostico - <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20009.pdf> (consultado em 15.06.18)
- [25] - Cristina Lourenço (2016), “Estudo do desempenho de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos industriais”, Instituto Politécnico de Viseu
- [26] - Diogo Silva (2012), “Desempenho em termos mecânicos de betões com incorporação de agregados finos provenientes de resíduos da indústria do mármore”, Instituto Superior Técnico
- [27] - Hélder Braga (2014), “Nova ponte sobre a foz do rio Dão: desenvolvimento de um sistema de monitorização contínua e avaliação do betão em termos de características mecânicas instantâneas e efeitos diferidos”, Universidade do Minho Escola de Engenharia
- [28] - Bruno Silva (2007), “Betão leve estrutural com agregados de argila expandida”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto
- [29] - Dora Soares (2004) “Estudo e caracterização de agregados para betão. Avaliação da sua contribuição para o aumento da alcalinidade e no desenvolvimento da reacção álcalis-sílica no betão”, Universidade de Évora
- [30] - Apresentação da unidade curricular de Reabilitação de edifícios contemporâneos, FUNDEC, 7-8 de Junho de 2011, Instituto Superior Técnico, “Proteção, reparação e reforço de estruturas de betão armado”
- [31] - José Rodrigues (2017), Proteção e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- [32] - Júlio Appleton, António Costa, (1992), “Reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das seções”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas n.º42

- [33] - Apontamentos de Conservação e Reabilitação de Edifícios I (2015) – “Reparação e Reforço de Elementos de Betão – Parte II”, Instituto Politécnico de Tomar, Maria de Lurdes Belgas da Costa
- [34] - Marcos Higashi (2016), “Reforço em estruturas de betão armado com chapas de aço”, Instituto Superior de Engenharia do Porto
- [35] - Carlos Rodrigues (2005), “Reparação e Reforço de Elementos de Betão”, Centro de investigação em estruturas e construção da UNL
- [36] - Nuno Marques (2008), “Procedimentos de Aplicação e Controlo de Qualidade para Reforço com Sistemas Compósitos de FRP”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [37] - <http://www.trimetrica.pt/pt/projects/0143> (consultado em 07.09.18)
- [38] - Tito Santos (2008), “Estratégias para reparação e reforço de estruturas de betão armado”, Universidade do Minho
- [39] - Apontamentos de inspeção e reabilitação de construções do Mestrado em Ciências da construção (2002) - “Técnicas de reforço menos correntes de estruturas de betão”, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Jorge de Brito
- [40] - Pedro Preto (2014), “Aplicação de pré-esforço exterior como técnica de reforço de estruturas de betão”, Instituto Superior Técnico