

Instituto Politécnico do Porto

-

Instituto Superior de Engenharia do Porto

-

Mestrado em Tecnologias e Gestão das Construções



DISSERTAÇÃO

DETERIORAÇÃO E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS  
DE BETÃO ARMADO

-

Aluna

Daniela da Silveira Moura n.º 1050273

Orientador

Eng.º Paulo Augusto Ribeiro Guedes (PRG)

-

Outubro 2012



## **Agradecimentos**

Desejo agradecer a todos aqueles que, indiretamente ou diretamente me facultaram as condições para realizar este trabalho.

Em primeiro lugar, com grande apreço e amizade, pela disponibilidade demonstrada, ao Eng.º Paulo Guedes, tendo sido incansável e muito compreensivo com a minha falta de tempo e atrasos.

Por fim, mas não menos importante, a todos que estiveram presentes nesta fase da minha vida, pela compreensão, pelo tempo que não passei convosco e também pelos momentos de mau humor e inquietação que tive, pois sem o apoio de todos vocês não teria sido possível a concretização deste trabalho.

Não abdicando de mencionar em especial os meus pais, que devido a minha ausência em casa não receberam a atenção e dedicação que merecem e desejam.

A todos, o meu agradecimento



## Glossário

**Absorção** – Humidificação dos materiais porosos quando em contacto com água líquida, por sucção ou capilaridade. [1]

**Anomalia** – Desajuste de comportamento, face ao esperado, que se verifica no material, componente, elemento ou estrutura que compõem o edifício. Indicação de possível defeito ou problema, que é diretamente visível ou mensurável. [1]

**Assentamento** – Deslocamento vertical, de abaixamento, duma estrutura, de parte dela ou da fundação. [1]

**Carbonatação do betão** – Ação do dióxido de carbono presente na atmosfera, que se combina com as bases de cimento hidratado, de onde resultam compostos com pH mais reduzido. [2]

**Choque térmico** – Força resultante da dilatação ou contração térmica que causa a alteração de um material que é subitamente aquecido ou arrefecido. [2]

**Conservação** – Conjunto de ações destinadas a prolongar o tempo de vida útil de um edifício. Medidas para salvaguardar e prevenir as degradações, que incluem a realização das operações de manutenção necessárias ao correto funcionamento de todas as partes do edifício. [1]

**Corrosão** – Oxidação destrutiva de um metal pelo meio que o rodeia. Processo pelo qual o metal retorna ao seu estado natural através de reação de oxidação com o ambiente não metálico. [2]

**Delaminação do betão armado** – Desprendimento de fragmentos de betão devido às tensões geradas pela corrosão do aço ou por dilatações e contrações diferenciais. [2]

**Deterioração** – alterações ao longo do tempo na composição, na microestrutura e nas propriedades de um componente ou material que reduzam o seu desempenho. [1]

**Diagnóstico** – Estabelecimento de causas dos danos apresentados pela construção. [2]

**Durabilidade** – Uma estrutura é considerada durável se durante a sua vida conserva os requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionalidade e estética, sem custos de manutenção não previstos. [3]

**Eflorescência** – Depósito salino, à superfície, de substâncias provenientes do interior do elemento de betão. [2]

**Escamação** – Separação localizada através da formação de flocos ou escamas. [2]

**Exsudação do betão** – Separação da água da mistura não endurecida. [2]

**Fluência** - Ao ser aplicada ao betão uma tensão, por hipótese, constante no tempo, pode esquematicamente considerar-se que ocorre uma deformação elástica instantânea, seguida de uma deformação que se processa no tempo - deformação de fluência. (REBAP)

**Inspecção** – Atividades que são necessárias para caracterizar o presente estado de uma estrutura ou elemento estrutural. [1]

**Manutenção** – operação de conservação que visa minimizar a deterioração de um edifício. Combinação das ações de carácter técnico ou administrativo, durante a vida útil do edifício, que visam mantê-lo num estado adequado ao desempenho das suas funções. [1]

**Materiais de Construção** – Materiais destinados a ser incorporados ou aplicados, de forma permanente, nos edifícios e obras de construção de engenharia. [1]

**Mecanismos de deterioração** – Processos químicos, mecânicos ou físicos que provocam alterações nas propriedades críticas de um produto da construção. [2]

**Património** – Conjunto de obras do Homem nas quais a comunidade reconhece os seus valores específicos e particulares e com os quais se identifica. [1]

**Patologia** – Toda a manifestação de acidentes ou anomalias verificadas na estrutura, diagnosticada e verificada. É todo um conjunto de manifestações anómalas associadas a uma cadeia de fenómenos causa – efeito que está subjacente a essas manifestações.

**Permeabilidade** - Aptidão dos materiais porosos de serem atravessados por um fluido, quando submetidos a um gradiente de pressão. [1]

**Reabilitação** - Termo de utilização generalizada e com interpretação praticamente unívoca. Classifica obras destinadas a melhorar o nível de qualidade de um edifício.[2]

**Reforço** – Melhoria da capacidade resistente de uma estrutura ou parte dela. Aumento da capacidade de carga de uma estrutura, eliminação de eventuais insuficiências. [1]

**Reparação** – Medida que corrige os defeitos. Eliminação dos defeitos da deterioração, restabelecendo o estado inicial da estrutura. Substituição ou correção dos materiais, componentes ou elementos, que se apresentam degradados, danificados ou defeituosos.[1]

**Retração** – Contração devida à redução do teor de água. [2]

**Vida útil da estrutura** – Período de tempo durante o qual a estrutura satisfaz os requisitos de segurança, de funcionalidade e estéticos, isto é, período de tempo durante o qual o desempenho da estrutura se considera satisfatório. [2]



## Palavras – Chave

### Deterioração; Durabilidade; Patologias; Reabilitação

#### Resumo

Apesar da enorme evolução tecnológica, os prazos na construção são cada vez mais reduzidos e os custos mais controlados, verificando-se uma despreocupação no que diz respeito a aspetos como a qualidade e durabilidade da construção das estruturas. Desperta assim nos técnicos, donos-de-obra, entidades executantes e projetistas a necessidade de avaliar o estado de conservação das estruturas de betão armado.

Esta dissertação tem como objetivo principal abordar as anomalias e os mecanismos de deterioração mais correntes, os métodos de ensaio destrutivos ou parcialmente destrutivos mais utilizados e adequados, e abordar algumas das técnicas de reparação e reforço das estruturas de betão armado.

Os principais danos apresentados nas estruturas são devidos a agentes físicos, mecânicos, biológicos e químicos. Podem ser devidos a causas diretas (acidentais ou naturais), que acarretam uma ação concreta sobre os elementos estruturais, e causas indiretas (humanas), diretamente ligadas com erros de projeto.

É primordial fazer-se o levantamento de todas as anomalias existentes para se recorrer a um método de inspeção e ensaio. Consoante a necessidade de informação e estado da estrutura são selecionados os ensaios a realizar, podendo ser realizados “*in situ*” ou em laboratório.

As técnicas de reparação e reforço são vistas como métodos para melhorar as condições da estrutura ao nível da segurança, desempenho, habitabilidade e durabilidade, prevenindo a evolução dos mecanismos de deterioração.



## **Keyword**

Deterioration; Durability; Pathology; Rehabilitation

## **Abstract**

Despite enormous technological progress, the deadlines in the construction are increasingly reduced and costs even more controlled, verifying a nonchalance with regard to aspects such as the quality and durability of building structures.

Awakening in the technicians, project owner, entity performer and designers the need to evaluate the conservation status of reinforced concrete structures.

This thesis aims to address the most current main deficiencies and degradation mechanisms, the totally or partially destructive testing methods, and address some of the technical repair and strengthening of reinforced concrete structures.

The main damages presented in structures are due to physical, mechanical, biological and chemical agents. They can be done due to direct causes (natural or accidental), which lead to concrete action on the structural elements, and indirect causes (human), directly related to design errors.

It is essential to do a survey of all the anomalies that exist to use a method of inspection and testing. Depending on the need of information and state of the structure, these are selected to perform the type of methods and can be performed "in situ" or in the laboratory.

The repair and strengthening techniques are seen as methods to improve the structure of the level of safety, performance, durability and livability, preventing the progression of degradation mechanisms.



## Índice

1. Introdução .....	27
1.1 Objetivos .....	28
1.2 Estruturação da dissertação .....	30
2. Anomalias e Mecanismos de Deterioração .....	31
2.1 Causas de deterioração do betão .....	32
2.1.1.1 Causas diretas .....	33
2.1.1.2 Causas indiretas .....	35
2.2 Manifestação de anomalias e principais causas .....	38
2.3 Mecanismos de corrosão das armaduras .....	43
2.3.1 Corrosão das armaduras.....	43
2.3.2 Rotura das armaduras.....	44
2.3.3 Consequências estruturais .....	45
2.4 Síntese de anomalias .....	46
3. Métodos de Inspeção e Ensaio.....	47
3.1 Classificação e seleção de métodos de inspeção e ensaio .....	47
3.2 Procedimento para um diagnóstico completo .....	49
3.3 Métodos de inspeção e ensaio .....	49
3.4 Ensaios Não – Destrutivos .....	50
3.4.1 Inspeção Visual.....	51
3.4.1.1 Descrição do método .....	51

3.4.1.2	Ferramentas e equipamentos complementares .....	51
3.4.1.3	Procedimento Geral.....	52
3.4.2	Deteção das armaduras .....	54
3.4.2.1	Descrição do método .....	54
3.4.2.2	Equipamentos.....	54
3.4.2.3	Vantagens e desvantagens .....	55
3.4.3	Termografia infravermelha.....	55
3.4.3.1	Descrição do método .....	55
3.4.3.2	Equipamentos.....	56
3.4.3.3	Vantagens e Desvantagens .....	57
3.4.4	Esclerometria .....	58
3.4.4.1	Descrição do método .....	58
3.4.4.2	Processo de cálculo.....	59
3.4.4.3	Vantagens e Desvantagens .....	60
3.4.5	Ensaios de Ultra-sons.....	61
3.4.5.1	Descrição do método .....	61
3.4.5.2	Equipamentos.....	61
3.4.5.3	Interpretação resultados .....	62
3.4.5.4	Vantagens e desvantagens .....	62
3.4.6	Radar.....	64
3.4.6.1	Descrição do método .....	64
3.4.6.2	Método de cálculo .....	64

3.4.6.3	Equipamento .....	65
3.4.6.4	Vantagens e desvantagens .....	67
3.4.7	Método da Maturidade .....	67
3.4.7.1	Descrição do método .....	67
3.4.7.2	Processo de cálculo .....	68
3.4.7.3	Vantagens e Desvantagens .....	69
3.5	Ensaios parcialmente destrutivos .....	70
3.5.1	Medição da profundidade de carbonatação.....	70
3.5.1.1	Medição através de fenolftaleína.....	70
3.5.1.2	Medição através das características .....	71
3.5.1.3	Vantagens e Desvantagens .....	72
3.5.2	Sonda de penetração .....	72
3.5.2.1	Descrição do método .....	72
3.5.2.2	Equipamento .....	73
3.5.2.3	Vantagens e Desvantagens .....	74
3.5.3	Ensaio de Arrancamento (Pull-Out) .....	75
3.5.3.1	Descrição do método .....	75
3.5.3.2	Lock – Test .....	75
3.5.3.3	Capo – Test.....	76
3.5.3.4	Vantagens e Desvantagens.....	77
3.5.4	Ensaio de tração Direta (Pull – Off) .....	78
3.5.4.1	Descrição do método .....	78

3.5.4.2	Vantagens e Desvantagens .....	78
3.5.5	Break – Test .....	79
3.5.5.2	Equipamento .....	79
3.5.5.3	Vantagens e Desvantagens .....	80
3.5.6	Ensaio de Carga.....	80
3.5.6.1	Descrição do método .....	80
3.5.6.2	Equipamentos.....	81
3.5.6.3	Vantagens e Desvantagem.....	82
3.5.7	Teor de cloretos .....	82
3.5.7.1	Descrição do método .....	82
3.5.7.2	Equipamentos.....	82
3.5.7.3	Interpretação de resultados .....	83
3.5.8	Carotagem .....	83
3.5.8.1	Descrição do método .....	83
3.5.8.2	Equipamentos.....	84
3.5.8.3	Interpretação dos resultados.....	85
3.5.8.4	Vantagens e Desvantagens .....	86
3.6	Normas para ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos .....	87
3.7	Avaliação do estado da estrutura.....	89
3.8	Síntese de métodos de inspeção e ensaio.....	92
4.	Reabilitação de Estruturas de Betão Armado .....	93
4.1	Metodologias de intervenção .....	94

4.2	Materiais de reparação e reforço.....	97
4.3	Reforço em fundações.....	97
4.4	Reforço por encamisamento de betão armado .....	98
4.4.1	Armaduras adicionais.....	99
4.4.2	Reforço em pilares.....	99
4.5	Reforço em vigas e lajes .....	100
4.5.1	Encamisamento no reforço em vigas e lajes .....	101
4.6	Reforço por encamisamento de betão projetado .....	101
4.6.1	Aplicação .....	102
4.6.2	Considerações antes da projeção .....	103
4.7	Reforço pela utilização de resinas épxi.....	103
4.7.1	Injeção de fissuras com resinas épxi.....	104
4.8	Reforço com CFRP .....	104
5.	Considerações Finais .....	107
	Referências bibliográficas .....	109
	Anexos .....	113



## Índice de Figuras

Figura 1: Fissuração devido a atuação das cargas [7].....	40
Figura 2: ataque das reações alcalis [3].....	42
Figura 3: ataque pelos sulfatos [3] .....	43
Figura 4: Modelo Simplificado da corrosão [3] .....	44
Figura 5: Distinção entre corrosão generalizada e localizada [3] .....	45
Figura 6: Exemplos de registos de anomalias [11].....	53
Figura 7: Detetor de armaduras – Modelo S Profometer – J.Roma [12].....	54
Figura 8: Barreira devido a presença de ar [10] .....	56
Figura 9: Camara termográfica de alta resolução [13].....	57
Figura 10: Esclerómetro CM70 [14] .....	58
Figura 11: Ilustração da sequência de execução do ensaio de Esclerometria [13].....	58
Figura 12: Esclerómetro de Schmidt – secção longitudinal [16].....	59
Figura 13: Ábaco de correlação do martelo de Schmidt [2].....	60
Figura 14: Aparelho de medição ultra – sons [13].....	61
Figura 15: Transmissão Direta [2] .....	63
Figura 16: Transmissão Semi – direta [2] .....	63
Figura 17: Transmissão indireta ou superficial [2] .....	63
Figura 18: Antena sem contato direto com o pavimento [10].....	66
Figura 19: Antena acoplada ao solo [10].....	66
Figura 20: Sonda de Windsor [19] .....	72
Figura 21: Zona fraturada [18] .....	73
Figura 22: Exemplo do método Lock – Test [18] .....	76
Figura 23: Exemplo do método Capo – Test [18].....	77
Figura 24: Ilustração do método pull-off [18].....	78

Figura 25: Ensaio Break – Test [10] .....	79
Figura 26: Equipamento para execução do ensaio break-off [15] .....	79
Figura 27: Correlação obtida entre os ensaios “ <i>in situ</i> ” e laboratoriais [2] .....	83
Figura 28: Brocas de perfuração em carote [22] .....	84
Figura 29: Modelo de tomada de decisão [7] .....	91
Figura 30: Reforço por encamisamento de betão em pilares [7].....	100
Figura 31: Reforço por encamisamento de betão em vigas e lajes [7] .....	101
Figura 32: Exemplo de correta projeção do betão [7].....	103

## Índice de Quadros

Quadro 1: Causas acidentais de origem direta [6] .....	33
Quadro 2: Causas naturais de origem direta [6] .....	34
Quadro 3: Causas indiretas [6] .....	37
Quadro 4: síntese das anomalias [2] .....	46
Quadro 5: Recolha de dados [4] .....	49
Quadro 6: Métodos de inspeção e ensaio [10] .....	50
Quadro 7: Condutibilidade térmica dos materiais [10] .....	56
Quadro 8: Relação da velocidade de impulso com a qualidade, [2 pág. 276] .....	62
Quadro 9: Coeficientes dielétricos dos materiais [10] .....	65
Quadro 10: Valores da permeabilidade do betão segundo a sua classe [11] .....	70
Quadro 11: Valores de R [11] .....	72
Quadro 12: Norma para ensaios parcialmente destrutivos [2] .....	87
Quadro 13: Norma para os ensaios não destrutivos [2] .....	88
Quadro 14: Princípios de reparação – Deterioração do betão [23] .....	95
Quadro 15: Princípios de reparação – Corrosão das armaduras [23] .....	96
Quadro 16: Exemplo de deterioração e princípios aplicáveis para a reabilitação [23] ...	96
Quadro 17: Avaliação das propriedades físicas/ químicas do betão armado [15] .....	- 1 -
Quadro 18: Avaliação das propriedades físicas/ químicas do betão armado [15] .....	- 2 -
Quadro 19: Avaliação das condições físicas do betão armado [15] .....	- 3 -
Quadro 20: Avaliação das propriedades e condições do betão armado [15] .....	- 4 -



## Índice de Expressões

Expressão 1:Índice esclerómetro [16] .....	59
Expressão 2: Coeficiente de reflexão [10] .....	64
Expressão 3: Velocidade da onda eletromagnética [10] .....	65
Expressão 4:Profundidade da interface [10] .....	65
Expressão 5: Fator de maturidade [17] .....	68
Expressão 6: Tempo necessário para que ocorra a carbonatação [11] .....	70
Expressão 7:Medição da profundidade de carbonatação [11] .....	71
Expressão 8: Normalização dos valores de tensão de rotura [2].....	85
Expressão 9:Resistência média do betão [2] .....	85
Expressão 10: Resistência média de tensão de provetes [2] .....	85
Expressão 11: Valor característico do betão armado [2].....	85



## Índice de Anexos

Anexo I - Guia Para Inspeção Visual ..... A

Anexo II - Processos de avaliação ..... B



## 1. Introdução

O betão armado surge como elemento primordial nas construções em Portugal logo após o início da produção em 1894, de cimento Portland na Fábrica de Cimento Tejo, em Alhandra. A construção da Igreja de N.<sup>a</sup> Sr.<sup>a</sup> de Fátima em 1938 nas Avenidas Novas, marcou o início do atual domínio do betão armado nos nossos hábitos construtivos. [2]

O aparecimento do betão armado deve-se ao facto do betão por si só não resistir a esforços de tração, suportando apenas esforços de compressão. Com a incorporação de varões de aço no seu interior consegue-se dar uma resposta, de uma forma eficaz, a esforços de flexão e tração. [2]

Nas últimas décadas é visível o crescimento incontrolável e irracional do parque habitacional em Portugal. Com um aumento tão veloz de novas construções, é notável e inequívoco pensar que serão executadas com menor controlo e qualidade.

A falta de manutenção e inspeções periódicas ao nosso património é significativa, essencialmente no que diz respeito a edifícios antigos.

Entende-se por reabilitação toda e qualquer obra que sirva para aumentar a qualidade de vida dos utilizadores de um edifício, bem como a vida útil dos elementos de betão armado.

A situação do nosso país a nível económico, social e cultural torna imprescindível aumentar os conhecimentos no que diz respeito a reabilitação e/ou recuperação do nosso parque habitacional, pois tudo indica que o mercado da reconstrução nos próximos anos tornar-se-á preferencial para a indústria da construção civil.

É fundamental, abordar mais pormenorizadamente o tema das patologias na construção, não só para uma possível reabilitação mas também para uma adequada

construção. Para prevenir a deterioração das estruturas de betão armado é necessário construir com qualidade e conhecer as causas das patologias, evitando assim uma possível repetição dos erros.

A ausência de investimento nesta área, o crescente ritmo de construção e os prazos de execução cada vez mais reduzidos, fazem aumentar significativamente a deterioração dos nossos centros urbanos, diminuindo a qualidade de vida e a durabilidade das estruturas.

Existem decisões que são tomadas que só posteriormente se consideram inaceitáveis e inadequadas. Os prazos reduzidos de execução levam a adotar soluções construtivas e/ou materiais pouco conhecidos, estudados e experimentados, baseando-se apenas na facilidade e rapidez de execução.

O investimento no conhecimento destes temas deve ser encarado como uma estratégia global, fundamental para a preparação dos futuros técnicos. [3]

A reabilitação deve ser vista como uma arte onde é necessário um conhecimento multidisciplinar, sendo um exercício complexo que envolve informação aprofundada da construção a reabilitar.

A curiosidade e interesse pela reabilitação em muitos autores, construtores e donos de obra surge devido a necessidades económicas, sociais, de segurança, de estética, de inovação, e de conservação do património histórico. Sente-se uma forte consciencialização para apostar no domínio desta matéria, com metodologias inovadoras de inspeção e diagnóstico.

## **1.1 Objetivos**

A reabilitação tem de ser vista como um desenvolvimento sustentável, que visa reconstruir o construído na idealização de poupar recursos e energia. Sendo

fundamental o conhecimento aprofundado das construções existentes, bem como todas as ações já efetuadas.

Com base na consulta de várias publicações, esta dissertação tem como principal objetivo a elaboração de um manual que facilite divulgar conhecimentos e familiarizar mais a comunidade com a preocupação de reabilitar.

Não é feita uma descrição exaustiva das causas de deterioração ou métodos de inspeção e de ensaio das estruturas de betão armado, visando apenas introduzir conceitos destinados a técnicos, donos de obra e entidades que se interessem pela necessidade de reabilitação e os problemas a ela subjacente.

Dando resposta à tendência para a reabilitação produziram-se equipamentos de diagnóstico mais sofisticados e aprofundados, que serão expostos de forma a facilitar a escolha do ensaio para a avaliação de uma estrutura de betão armado.

Através do diagnóstico bem estruturado pode-se determinar algumas causas da deterioração, no entanto o conjunto de danos que podem ocorrer simultaneamente torna difícil uma listagem completa e hierarquizada.

É importante frisar o custo e o tempo necessário para a realização dos ensaios, bem como a incerteza intrínseca aos resultados. Não existem estratégias a seguir pois cada caso é um caso e terá de ser visto e estudado de forma independente.

Após detetadas todas as possíveis causas, anomalias da estrutura e capacidades resistentes, quando aconselhável e desejável, deve-se proceder à reparação das estruturas de betão armado. Serão expostas algumas das técnicas para reparação de estruturas de betão armado, mas é de salientar que a grande maioria destas técnicas é mais dispendiosa e demorada, quando não são efetuadas inspeções periódicas.

## 1.2 Estruturação da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos principais, apresentados de forma sucinta os seus conteúdos.

No **capítulo 1** é feita uma pequena introdução ao tema “reabilitação de estruturas de betão armado” alertando para as principais causas de deterioração. É descrito de uma forma clara os objetivos que nos baseamos para o seu desenvolvimento.

As possíveis anomalias e mecanismos de deterioração presentes nas estruturas de betão armado são enunciados **no capítulo 2**. Referem-se as patologias do betão armado, os principais fenómenos de deterioração, relacionando as causas e os efeitos. E por último é ainda apresentado um quadro síntese das anomalias mais frequentemente encontradas e detetadas nas estruturas de betão armado.

Os métodos de inspeção e ensaio são apresentados no **capítulo 3**. É dado a este capítulo uma maior importância devido ao desconhecimento dos métodos que se faz sentir. São referidos os métodos de inspeção e ensaio não destrutivos ou parcialmente destrutivos mais utilizados para a avaliação do estado de conservação das estruturas de betão armado.

Todos os ensaios são identificados, sempre que possível, com imagens dos equipamentos utilizados e das Normas aplicáveis, sempre que existam.

No **capítulo 4** é abordado de uma forma não exaustiva as técnicas disponíveis para reparação do betão armado, realçando os materiais que podem e devem ser usados. São descritos alguns dos possíveis métodos de reforço.

No **capítulo 5** fazem-se algumas considerações finais, vinculando-se a necessidade de consciencialização para a problemática da reabilitação.

## 2. Anomalias e Mecanismos de Deterioração

A evolução tecnológica, os conhecimentos adquiridos e o aumento de mão-de-obra qualificada, têm contribuído para um crescente desenvolvimento da utilização de betão armado na construção.

No início da sua utilização o betão apresentava na sua composição agregados e ligantes de baixas resistências, grandes dimensões, maiores dosagens de cimento e elevadas espessuras de recobrimento. A colocação do betão era mais cuidada, o que conferia uma maior durabilidade às armaduras. [3]

Com a evolução da tecnologia, alcançou-se um maior conhecimento das propriedades dos materiais que constituem um elemento de betão armado e uma maior evolução nos métodos de cálculo, proporcionando assim a construção de elementos de betão armado com uma secção resistente inferior, recorrendo a maiores taxas de armadura. No entanto o aumento de armadura dificulta a passagem e acomodação do betão fresco.

A utilização de dosagens de água elevadas origina betões mais porosos e as espessuras de recobrimento menores tornam o betão mais sensível a fenómenos de corrosão. Pondo em causa o conceito de durabilidade devido a uma deficiente proteção das armaduras.[3]

Na idealização de uma estrutura de betão armado, temos em conta a resistência ao longo da sua vida útil, durabilidade. Contudo, por diversos motivos, as estruturas têm de sofrer intervenções de manutenção ou reparação, muito antes do que era esperado ou desejado.

A durabilidade da estrutura é muitas vezes comprometida por fatores que não podem ser quantificados nem avaliados, muitas vezes imprevisíveis, comprometendo assim o desempenho da estrutura durante a fase de utilização/ exploração.

Estruturas com já alguns anos, apresentam comportamentos que começam a alertar para a possível deterioração, fomentando uma crescente preocupação com o possível estado do betão armado.

Consequência dessa acentuada preocupação surge a necessidade de se tentar perceber os fenómenos que mais vulgarmente ocorrem nas estruturas e as causas a que se encontram diretamente ligadas.

Inicialmente e a olho nu é visível a deterioração das superfícies por fissurações, escamações, delaminações, desagregações, alterações da cor, aparecimento de manchas, eflorescência, deterioração dos materiais e deformações excessivas, despertando-nos para a verificação das patologias existentes no betão armado.

Para se poder controlar as degradações e aumentar o período de vida útil das estruturas deve-se antecipadamente conhecer o comportamento dos materiais, os mecanismos de deterioração, medidas de proteção e as técnicas de reabilitação. [5]

## **2.1 Causas de deterioração do betão**

A deterioração que ocorre nos edifícios deve-se essencialmente ao facto de se exceder a capacidade resistente dos elementos estruturais. Devido a uma redução de resistência ou alteração dos valores das ações a que estariam inicialmente sujeitos. [6]

A forma como estes acontecimentos alteram a comportamento do edifício encontra-se diretamente ligada ao tipo de ações que atuam na estrutura, aos sistemas construtivos adotados e aos materiais utilizados na sua execução, dando origem a um amplo leque de possíveis danos.

A ocorrência de patologias encontra-se sempre associada a uma ou mais causas, que podem dividir-se em dois grandes grupos [6], diretas ou indiretas, podendo ainda ser de natureza diversa como o caso de humana, natural ou acidental, dependendo do contexto em que se manifestam. [7]

### 2.1.1.1 Causas diretas

As causas de origem direta, como o próprio nome indica, acarretam uma ação concreta sobre os elementos estruturais ou sobre os materiais que os constituem. Nelas podem e devem ser incluídas as ações de intervenção que deveriam ter ocorrido, as manutenções executadas de forma deficiente e a alteração do uso. Se efetuarmos uma correta manutenção dos elementos de betão armado evitamos a deterioração dos materiais.[6]

As causas de origem diretas podem ser de natureza acidental (quadro 1) ou natural (Quadro2).

Quadro 1: Causas acidentais de origem direta [6]

Causas	Danos	Tipo de Dano
Acidentais	Mecânicos	Deformações, provocam alteração da forma, separação, aberturas e desgaste: - Encurvadura, esforços de compressão nos elementos verticais; - Rotação de um elemento estrutural devido a esforços; - Deslocamento, esforços horizontais;
		Fendilhação ( <i>abertura longitudinal incontrolada de um elemento construtivo, que o abrange em toda a espessura</i> ): - Excesso de carga, exigindo o reforço imediato dos elementos estruturais; - Dilatação e contração, origens higrótérmicas sobretudo quando é evidente a ausência de juntas de dilatação;
		Fissuração, afetando a superfície do elemento estrutural: - Fundação, deformações no solo e descontinuidade nos apoios; - Por acabamento, retração hidráulica e por movimentos de dilatação;
		Desprendimentos, provocando separação dos materiais devido a humidade, deformações ou fendas;

- Acidentais

Ocorrem durante um período de tempo muito curto, mas introduzem um importante estado de deterioração, considerando-se ações casuais/ pontuais.

Estas também podem estar ligadas a dois tipos de origem distinta: [8]

- Natural: sismos, tornados, cheias, avalanches, erupções vulcânicas, descalce das fundações, tempestades marítimas e deslizamentos de terras. Cujas ocorrências são muito raras mas das quais resultam danos severos.
- Humana: explosões, choque e inundações, afetando apenas partes do edifício. Para as quais existem mecanismos que eliminam ou reduzem os danos e a probabilidade de ocorrência.

Quadro 2: Causas naturais de origem direta [6]

Causas	Danos	Tipo de Dano
<b>Naturais</b>	Agentes Físicos	Humidade, provoca alteração da forma, da cor e teor de humidade: - De obra, devido a uma deficiente secagem dos elementos antes da colocação dos acabamentos; - Capilar, por ascensão da humidade nos elementos verticais; - Por infiltração, através de fendas, fissuras ou poros; - Acidental, forma fortuita;
		Erosão, provoca perda ou transformação superficial do material: - Agentes Atmosféricos (meteorização dos elementos estruturais);
	Biológicos	Organismos vivos: - Vegetais (raízes, trepadeiras, bolores e fungos); - Animais (vermes, insetos, roedores e pássaros);
	Químicos	Eflorescências, cristalização dos sais devido a presença de humidade; Oxidação e corrosão, perda do material na superfície dos elementos metálicos;
		Erosão química
Lesões Prévias	- Humidade (Eflorescências; erosão; corrosão; desprendimentos); - Deformações (Fendas; fissuras; desprendimentos); - Fendas/fissuras (humidade; erosão física; corrosão); - Desprendimentos (humidade; erosão física; desprendimentos); - Corrosão (sujidade);	

**Naturais**

- **Físicas**

Normalmente são ações de longa duração e cujos efeitos só são visíveis posteriormente.

Encontram-se diretamente ligadas a fenómenos atmosféricos, que incidem

maioritariamente sobre as fachadas e coberturas dos edifícios. Tais como a ação da gravidade, a chuva, o vento, o gelo, variações de temperatura, dilatações, contrações e radiação solar. A presença de água altera as condições do terreno de fundação provocando deformações na estrutura de betão armado. [8]

- **Ações químicas**

Prejudicam essencialmente os materiais, influenciando o aspeto estético. Uma boa manutenção pode ajudar a controlar o natural envelhecimento das estruturas, controlando a perda ou deterioração dos materiais. [8]

- **Ações biológicas**

Independentes da ação do Homem e da utilização podem ser de origem vegetal ou animal. Normalmente o seu aparecimento encontra-se associado a falta de manutenção e a força que exercem na estrutura provoca rotura dos materiais. [8]

- **Lesões prévias**

Afirmam-se devido à já existência de danos na estrutura, têm como causa um dano (Dano prévio). [6]

#### 2.1.1.2 Causas indiretas

As causas indiretas encontram-se relacionadas com erros de projeto, execução e manutenção.

Quando mencionamos os projetos referimo-nos às diversas fases que o integram, mas apoiamo-nos essencialmente na fase de cálculo e execução, onde o erro poderá trazer consequências nefastas para a estrutura, pondo em causa a sua durabilidade e fiabilidade.

Na fase de cálculo existe uma enormidade de erros que se podem cometer, originando as mais diversas causas para a ocorrência de danos.

Entre eles e mais gravosos encontram-se a má escolha do sistema estrutural e construtivo, incorreta seleção dos materiais, quantificação errada das ações, modelos de análise inadequados e hipóteses de cálculos incorretas. [6]

A maioria dos erros associam-se, à rotina na execução e à falta de conhecimentos no que diz respeito a:

- Condições de equilíbrio;
- Princípios que regem o comportamento mecânico dos materiais;
- Compatibilidade física – química dos materiais;
- Condições geológicas das fundações;
- Deficiente avaliação da agressividade das condições de exposição [5];
- Especificação inadequada dos materiais [5];
- Especificação deficiente dos recobrimentos das armaduras [5];
- Deficiente avaliação das deformações impostas (retração e temperatura) [5];

Estão distribuídos pelo nosso país diversos casos em que é visível o deficiente estudo prévio para a escolha da construção apropriada, sendo regular o aparecimento de patologias devidas à agressividade do meio.

Na fase de execução a má pormenorização dos elementos estruturais, a possibilidade de uma errada interpretação, peças incompletas e/ou escassas, são componentes que deviam preocupar os projetistas.

Esta incorreta e escassa pormenorização dos projetos, origina inúmeros defeitos como:[7]

- A existência de variações bruscas de secção, que provocam concentrações de tensões e dão lugar a fissuras;
- Deformações devido a flechas excessivas, provocando aparecimento de fissuras nos pavimentos;

- Incorreta drenagem das águas pluviais, um dos erros mais vulgares. O acumular das águas provoca danos irreversíveis nas estruturas;
- Uma imperfeita especificação das juntas de dilatação, provoca escamação das zonas vizinhas e tensões de corte que a estrutura não está preparada para receber;
- Incompatibilidade de materiais e secções;
- e Fluência, deformações imprevisíveis originando aberturas de juntas e o aparecimento de fissuras.

Importa alertar também que inúmeras vezes existe incumprimento do projeto e das condições técnicas especificadas.

Os acontecimentos mais frequentes nesta fase são a colocação errada das armaduras, a vibração defeituosa nas peças de betão armado, má condição de cura, erros nas ligações metálicas, utilização de uma classe de betão inferior ao prescrito no projeto, cofragens deficientes e remoção prematura do escoramento da cofragem. [5]

A inexistência ou defeituosa manutenção também provoca danos, em alguns casos irreversíveis, nas estruturas e nos elementos que a constituem. No quadro 3 encontram-se divididas de forma sucinta as causas indiretas, relacionadas com a sua origem. [6]

Quadro 3: Causas indiretas [6]

Tipo de causa		
Humanas	Projeto	- Escolha do material; - Sistema Construtivo; - Cálculo automático;
	Execução	- Má pormenorização - Peças incompletas e/ou escassas
	Material	- Defeito de fabrico; - Alteração;
	Manutenção	- Uso incorreto; - Falha de manutenção periódica

## 2.2 Manifestação de anomalias e principais causas

Na origem das intervenções precoces temos a deterioração do betão armado que pode ocorrer devido a inúmeros fatores, que nem têm apenas uma origem específica, mas sim uma combinação de diferentes fatores. [7]

- Abatimentos localizados das superfícies de betonagem

Devido à existência de zonas com diferentes capacidades resistentes, podendo ser provocadas por exemplo devido ao peso próprio ou abatimentos dos solos. [7]

- Deslocamentos das cofragens

Desde que se inicia a betonagem até ao momento da presa, todos os movimentos, por mais pequenos que sejam, provocam futuras fissuras na estrutura, no entanto como ocorrem internamente são indetetáveis a olho nu. Estas fissuras internas podem provocar a formação de bolsas de água, que ao congelarem provocam pressões que fissuram o betão e conseqüentemente a corrosão das armaduras. [7]

- Segregação do betão fresco

O betão ganha resistência inicialmente a superfície e naturalmente as partículas mais pesadas sedimentam. Se durante este processo as partículas encontrarem algum obstáculo, formam um núcleo onde poderá ocorrer fissuras. [7]

- Descofragem prematura

Inúmeras vezes as descofragens são realizadas antes de terminado o tempo de presa do betão, acrescentando muitas complicações para a durabilidade da estrutura. Quando a descofragem é realizada antes de findo o tempo necessário para o elemento de betão armado atingir a resistência necessária provoca fendilhações e deformações excessivas.

Os elementos de cofragem servem como barreira protetora à estrutura de betão armado e se os retirarmos prematuramente podemos provocar um aumento de temperatura descontrolado, desencadeando o aparecimento de fissuras. [7]

- Fendilhação

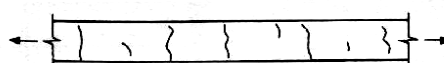
Quando as tensões de tração a que o betão armado está sujeito excederem a sua capacidade resistente ou existir deterioração física – química do material, ocorre fendilhação. Estas tensões podem ter origem em ações exteriores ou nos efeitos de deformação imposta, como o caso fluência, retração do betão por secagem, e expansão ou contração devido a mudanças de temperatura.

Os assentamentos plásticos são os principais responsáveis pela introdução de novas tensões de tração, devido a gerar uma limitação de movimentos na estrutura. Pode ser de forma localizada ou não, como no caso em que as armaduras ou os elementos a que a estrutura está ligada, impedem a retração do betão.

- ✓ Retração plástica: ocorre maioritariamente nas lajes e formam fendas superficiais, entre 2 a 3 mm. Sempre que a espessura das fendas aumenta, diminui consideravelmente o seu comprimento. [7]
- ✓ Assentamento plástico: surge em elementos de grande altura. As partículas sólidas através da gravidade exsudam, diminuindo o volume do elemento e o betão por sua vez assenta no interior da cofragem. [7]
- ✓ Atuação de cargas: quando se introduzem esforços de flexão, corte, tração, torção e esmagamento (Figura 1):



Flexão simples



Tração simples

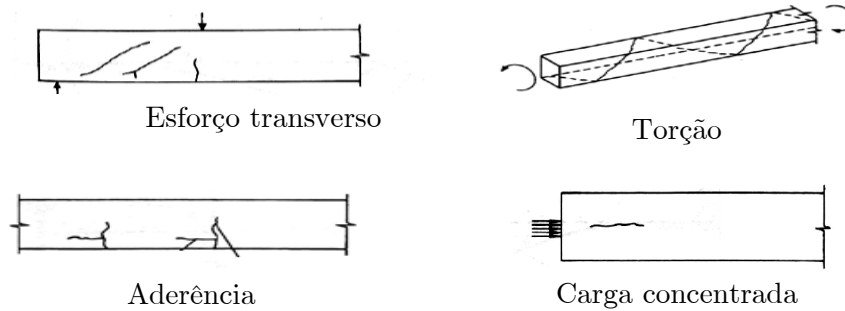


Figura 1: Fissuração devido a atuação das cargas [7]

- ✓ Deformações impedidas: têm origem mais frequentes nas variações de temperatura, mas ocorrem também devido a assentamentos diferenciais nas fundações ou à retração do betão armado.

O interior da estrutura, geralmente mais quente, sente tensões de compressão e o exterior, mais frio, sofre tensões de tração. Quanto mais restritos forem os movimentos da estrutura maior será a sua probabilidade de ocorrência.

- Retração durante o endurecimento

A sua ocorrência dá-se devido ao encastramento das estruturas e podem ter origem nas armaduras ou nas ligações. Podendo ser controlado utilizando a armadura apropriada.

- Retração durante a presa do betão

As variações de volume a que o betão armado está sujeito, provocam o aparecimento de uma superfície idêntica a escamas de crocodilo; [7]

- Vibrações

Tem origem em inúmeros fatores como o caso de circulação de veículos, cravação de estacas ou nas vibrações para compactação, quando efetuadas tardiamente. [7]

- Variações térmicas

As tensões internas de origem térmica, devidas a uma diferença de temperatura entre o interior e exterior do betão provocam fendilhação. A este acontecimento denominamos por gradiente térmico em que o frio contrai e o calor dilata a estrutura.

- Ação gelo/degelo

Sendo o betão um material poroso que absorve água, quando submetido a um decréscimo elevado de temperaturas, abaixo dos 0°C graus, a água congela, implicando um aumento de volume, cerca de 9%, causando fissuração à superfície. Quando o processo se inverte presenciamos escamação, originando a desintegração do betão armado.

Esta ação depende da distribuição e quantidade de poros, das condições do ambiente, do grau de arrefecimento, frequência dos ciclos e também da idade do betão, que por sua vez é proporcional a resistência. [7]

- Erosão

Pode ocorrer devido a abrasão provocando um desgaste na superfície do betão, causada pelo arrastamento ou impacto de partículas, ou por cavitação, originando o aparecimento de escavações e deslocamentos na estrutura. [7]

- Inadequação ou contaminação dos agregados:

Reação, em meio húmido, entre os alcalis do cimento e a sílica não perfeitamente cristalizada dos agregados. Reação dos alcalis do cimento com o carbonato de magnésio de certos calcários dolomíticos. [2]

- ✓ Reações com os alcalis: os principais tipos de reação são os álcalis – sílica e álcalis – silicatos. Conduzem ao aparecimento de fissurações e expansões, de bolhas e escorrências, sendo este mecanismo muito semelhante aos ataques

dos sulfatos, distintos só porque estas reações se dão nos agregados e não no cimento (Figura 2). [3]

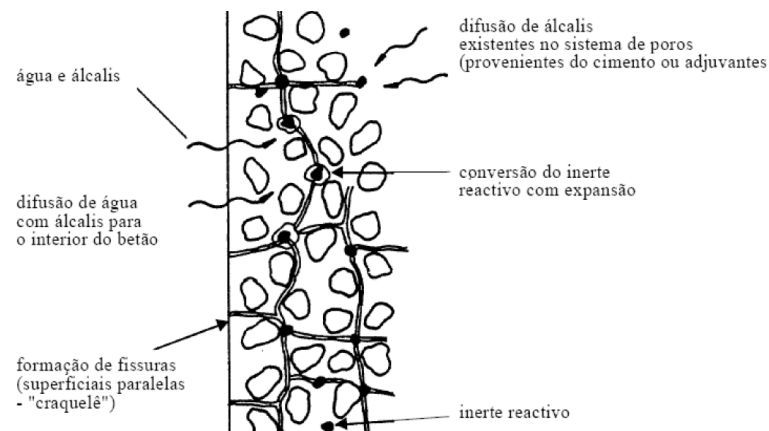


Figura 2: ataque das reações alcalis [3]

Os principais parâmetros que influenciam são a quantidade de agregado ativo, a permeabilidade do betão (razão água/cimento, cura e compactação) e a quantidade de água disponível. [3]

- Ataque pelos ácidos: resume-se a conversão de hidróxido de cálcio, o silicato de cálcio hidratado e o aluminato de cálcio em sais de cálcio. Os poros são totalmente destruídos, porque os ácidos reagem com todos os componentes do cimento.
- Ataque pelos sulfatos: caracterizado pela reação entre o ião sulfato sobre o aluminato do cimento Portland endurecido, provocando expansão do betão originando fendilhação. [3]

Um aumento de volume cerca de 2.5 vezes do volume inicial (reação expansiva), causando tensões internas e fissuração irregular do betão, facilitando a penetração de agentes agressivos e a sua deterioração (Figura 3). [3]

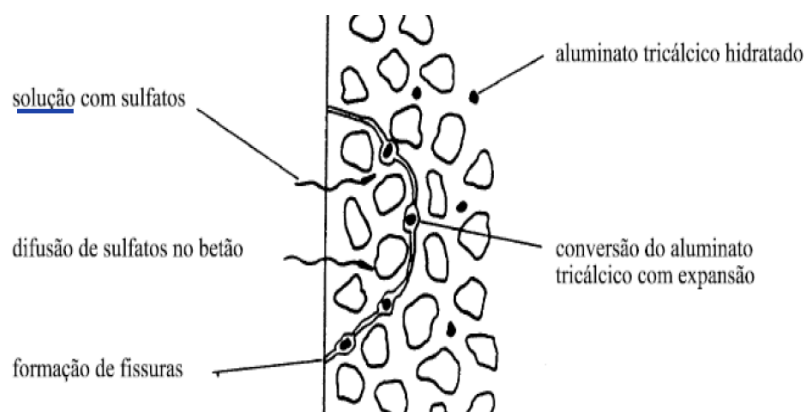


Figura 3: ataque pelos sulfatos [3]

Neste caso os parâmetros que influenciam são a severidade do ambiente (substâncias agressivas), a permeabilidade do betão (razão água/cimento; cura; compactação) e a quantidade água presente. [3]

## 2.3 Mecanismos de corrosão das armaduras

A deterioração das armaduras encontra-se diretamente ligada a uma grande fraqueza do betão armado. A falta de proteção das armaduras, que devido a vários motivos não existe estimula a deterioração das armaduras.

Podemos enumerar como principais origens da corrosão das armaduras as influências ambientais, o processo de fabrico do betão e a sua colocação e compactação em obra. [9]

### 2.3.1 Corrosão das armaduras

As armaduras de um elemento de betão armado encontram-se normalmente e naturalmente protegidas por uma película, designada por passivante, que evita a corrosão. A perda desta película pode estar diretamente associada a dois fatores:

1º O pH do betão atingir valores abaixo dos 8-9.5, devido essencialmente a presença de dióxido de carbono na atmosfera, carbonatação. [8]

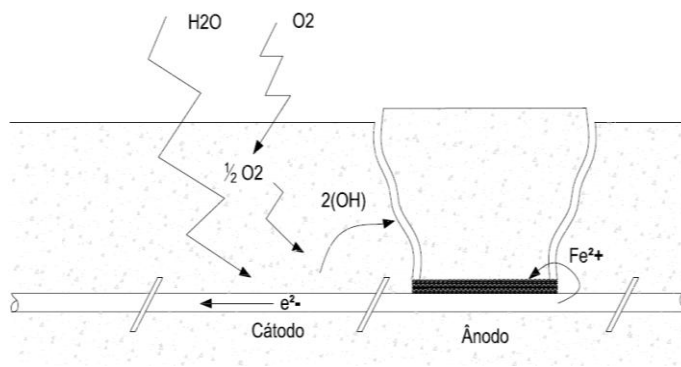
2º Presença de cloretos de betão em quantidade suficiente que envolvem a armadura;[8]

A presença de cloretos e dióxido de carbono podem assim ser vistos como os principais agentes externos responsáveis pela destruição de uma parceria entre o betão e o aço que se julgava bastante durável, originando uma deterioração precoce. [9]

A camada de recobrimento também assume um papel muito importante na prevenção da carbonatação, ajudando a ter às condições necessárias a formação de uma nova película protetora que atua como barreira à penetração de agentes agressivos. Por outro lado gera no interior do betão um ambiente com elevada alcalinidade que impede a corrosão do aço. [3;8]

A presença de fissuras, os defeitos de compacidade do betão e o recobrimento insuficiente ou defeituoso facilitam a corrosão das armaduras (Figura 4), sobretudo porque:

- Reduzem a distância efetiva a ser vencida pelos cloretos, humidade e oxigénio;
- Facilita a acumulação de sais, devido a evaporação da água da fissura;
- Permitem a penetração de agentes agressivos; [2 e 8]



Legenda:

Ânodo – Zona da armadura despassivada;

Cátodo – Zona da armadura com acesso de  $O_2$ ;

Condutor – Armadura;

Eletrólito – Betão +  $H_2O$

Figura 4: Modelo Simplificado da corrosão [3]

### 2.3.2 Rotura das armaduras

Quando a corrosão ocorre a uma velocidade geralmente elevada e associada a presença de cloretos, é uma corrosão localizada. Distinta do caso anterior que acontece a uma velocidade mais baixa e ligada sempre a carbonatação (corrosão generalizada).

O ataque neste tipo de corrosão efetua-se em profundidade, provocando a rotura das armaduras. (Figura 5)

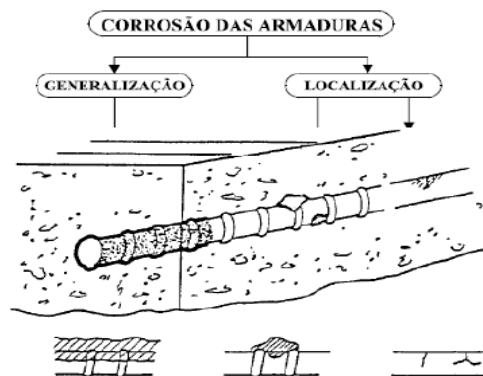


Figura 5: Distinção entre corrosão generalizada e localizada [3]

### 2.3.3 Consequências estruturais

As principais consequências da deterioração das armaduras, por corrosão generalizada ou localizada são: [3]

- Redução da secção da armadura: diminuição da resistência à tração, deformação e diminuição da resistência à fadiga;
- Fissuração do betão: perigo de separação da armadura do betão, aumento da velocidade de corrosão e delaminação do betão;
- Fragilização das estruturas: rotura das armaduras e colapso da estrutura.

E temos como principais patologias: [3]

- Manchas de óxido de ferro;
- Fissuras de delaminação no betão, dispostas segundo o eixo das armaduras;
- Delaminação do betão com ou sem exposição das armaduras, que se encontram na maioria dos casos corroídas, com eventual diminuição da secção ou desagregadas.

## 2.4 Síntese de anomalias

No quadro 4 encontram-se expostas uma síntese de anomalias mais frequentes em edifícios de betão armado. [2]

Quadro 4: síntese das anomalias [2]

Anomalias	Causas possíveis
Fissuração horizontal junto à laje de cobertura	Variações de temperatura
Fissuração em varandas e outros similares	Fluência desses elementos. Betão de deficiente qualidade
Manchas de ferrugem	Deficiente execução do betão armado (pontas de arame ou dispositivos e fixação das cofragens).
Delaminação ou escamação superficial	Elemento excessivamente comprimido e ataque químico
Delaminação superficial com exposição das armaduras	Corrosão das armaduras. Recobrimento insuficiente. Betão superficial poroso, carbonatado, ou com elevado teor de cloretos.
Flechas excessivas em lajes ou vigas	Excesso de carga, cedência da fundação, armadura inadequada ou mal posicionada. Betão de deficiente qualidade. Deficiência de cálculo
Juntas de dilatação abertas. Fissuração diagonal nos painéis de parede	Assentamentos diferenciados
Ninhos de parede, chocho	Má qualidade da cofragem, com fuga da calda de cimento. Má compactação do betão
Fissuras ativas verticais	Momento fletor excessivo
Fissuras ativas inclinadas	Esforço transversal excessivo
Fissuras passivas verticais	Carga excessiva
Fissura passiva atravessando a totalidade do elemento	Retração ou variação de temperatura em elemento restringido
Fissuras superficiais passivas	Retração plástica, cura deficiente, perda de água superficial, vento e/ou calor excessivo na altura da betonagem
Inchamento da superfície de betão	Reação alcali – agregado
Erosão da superfície	Abrasão, ataque químico
Cedência das armaduras	Excesso de carga
Rotura da armadura	Fadiga ou rotura frágil do elemento

### 3. Métodos de Inspeção e Ensaio

#### 3.1 Classificação e seleção de métodos de inspeção e ensaio

O elevado investimento que as estruturas de betão armado representam, suscita a cada passo uma crescente preocupação com a durabilidade das estruturas de betão armado, aumentando a consciência para a necessidade de realizar inspeções e manutenções periódicas às estruturas de betão armado, zelando pela sua conservação, a fim de prolongar a vida útil.

A avaliação do estado da estrutura de betão armado é extremamente complexa porque as anomalias estruturais e construtivas estão associadas entre si, dificultando uma correta tomada de decisão relativamente a causa - efeito.

Diagnosticar um elemento estrutural é assinalar e determinar as falhas que ocorrem e onde se encontram, possibilitando o reconhecimento da patologia. Permite-nos identificar a natureza e extensão de cada uma das anomalias verificadas e prever com alguma segurança consequências e evolução futura de cada anomalia.

O primeiro passo necessário para o conhecimento do estado de conservação das estruturas de betão armado passa pela inspeção visual efetuada por técnicos especializados, donde advêm os primeiros diagnósticos de anomalias. Como resultado desta inspeção surge então o plano de inspeção e ensaio, onde será definido o tipo de ensaios a realizar.

Estes ensaios serão realizados “*in situ*” ou em laboratório, consoante a necessidade, através de tecnologia avançada e apropriada para cada situação. Devem ser meticulosamente definidos para permitir uma compreensão mais acertada dos resultados e uma correta tomada de decisão. Inúmeras vezes recorre-se a elaboração de vários ensaios, a fim de se desvendar a verdadeira causa da patologia.

Com a execução de inspeções e ensaios pretende-se verificar a segurança das estruturas de betão armado. Consiste em comprovar se a estrutura está em condições de desempenhar as funções que a sua utilização exige, tais como: [4]

- As ações a que a estrutura resiste são superiores às que suporta;
- As flechas máximas previstas têm valores aceitáveis;
- Todas as regulamentações relativas a disposições construtivas estão verificadas;
- As armaduras estão devidamente protegidas de modo a garantir a sua durabilidade;

As técnicas de inspeção e ensaio permitem: [2]

- Recolher informação necessária para avaliar a capacidade de desempenho da estrutura;
- Determinar as causas das anomalias, permitindo uma correta intervenção;
- Avaliar a extensão das degradações existentes na estrutura de betão armado;
- Optar por medidas de reparação menos intrusivas e adaptadas a cada caso;
- Definir e planear antecipadamente as intervenções necessárias.

### 3.2 Procedimento para um diagnóstico completo

O principal objetivo em identificar as patologias é preveni-las e repará-las. Antes de procedermos à definição concreta dos métodos a adotar temos de fazer um levantamento sobre os danos da estrutura de betão armado. O quadro 5 esquematiza um método para a recolha de dados:

Quadro 5: Recolha de dados [4]

Objetivo	Dados
Identificação (cada dano de forma independente)	Tipo de lesão
	Data de aparecimento
	Frequência
Dados construtivos (Comum a todo o edifício ou só a partes dele)	Documentos técnicos
	Elementos construtivos afetados
	Materiais afetados
	Levantamento fotográfico
	Recolha de amostras para ensaios
Meio ambiente	Localização das lesões
	Orientação das fachadas
	Nível de exposição

### 3.3 Métodos de inspeção e ensaio

Os métodos de inspeção e ensaio surgem da necessidade de conseguir avaliar a resistência das estruturas de betão armado. Devido à sua complexidade, são ainda poucos os autores, que abordam este tema na sua generalidade.

O grande impulso para o estudo de métodos de inspeção surge na indústria dos transportes, pois na grande maioria as infraestruturas rodoviárias careciam de reparações devido ao natural envelhecimento e desgaste. [10]

Serão expostos os ensaios mais utilizados nas estruturas de betão armado, para dar a conhecer o seu campo de aplicação, métodos de execução e as normas regulamentadoras para que os técnicos, donos de obra e entidades possam aprofundar posteriormente os seus conhecimentos.

Os ensaios podem ser não destrutivos ou parcialmente destrutivos, realizados “in situ” ou em laboratório. O quadro 6 enuncia os métodos de inspeção e ensaio mais utilizados para a determinação de resistência e integridade das peças de betão armado.

Quadro 6: Métodos de inspeção e ensaio [10]

<b>Ensaio não destrutivo</b>	<b>Ensaio parcialmente destrutivo</b>
Inspeção visual	Sonda de penetração
Termografia infravermelha	Arrancamento
Esclerometria	Pull - Off
Impulso sónico	Break - Test
Radar	Ensaio de Carga
Método da maturidade	Deteção de cloretos
Deteção das armaduras	Carotagem
-	Profundidade de carbonatação

Para se obterem os resultados desejados todos os ensaios devem ser executados por técnicos ou equipas especializadas e possuir equipamentos de proteção adequados a cada ensaio. A sua execução pressupõe conhecimentos aprofundados e experiência na área, e a interpretação dos resultados domínio de estruturas de betão armado, materiais e possíveis patologias.

### **3.4 Ensaio Não – Destrutivo**

As modificações provocadas na estrutura de betão armado por este tipo de ensaios são insignificantes, método não invasivo. A resistência da estrutura não sofre qualquer tipo de alteração e a sua execução é geralmente simples, rápida e de baixo custo.

Através dos ensaios não destrutivos podemos detetar elementos ocultos na estrutura de betão armado, efetuar a caracterização de zonas heterógenas, deteção de cavidades e vazios, avaliar o teor de humidade e algumas características físicas e mecânicas dos materiais constituintes.

### **3.4.1 Inspeção Visual**

#### **3.4.1.1 Descrição do método**

A inspeção visual pode-se considerar o primeiro passo na avaliação do estado de uma estrutura de betão armado. Proporciona resultados muito importantes e valiosos, mas exige mão-de-obra especializada, com um enorme leque de conhecimentos a nível de sistemas estruturais, materiais e a construção em si. O seu resultado positivo está diretamente ligado aos conhecimentos do observador/ técnico. [11]

Permite recolher informações como a presença de fissuras ou fendas, manchas, alteração da cor, delaminação ou escamação e assentamentos da estrutura. A recolha dos dados não deve cingir-se apenas à estrutura em si. Deve-se considerar-se as estruturas vizinhas, o meio ambiente e as condições climatéricas.

A vasta informação recolhida neste ensaio permite que o técnico faça uma avaliação preliminar do estado de conservação da estrutura e sugerir um diagnóstico completo, orientado para as causas. Contudo diferentes técnicos apresentam diferentes opiniões, que poderão variar muito entre elas ou não, sendo relevante os conhecimentos do técnico.

A inspeção visual encontra-se regulamentada pela ACI 201.1R-92 e ACI 228.2R-98.

#### **3.4.1.2 Ferramentas e equipamentos complementares**

A inspeção visual tem uma enorme limitação, pois só permite inspecionar a superfície das estruturas, contudo aquando da realização de uma inspeção visual o

observador/técnico deverá ir provido de ferramentas e equipamentos que facilitem a quantificação e avaliação dos dados.

Ferramentas como fitas métricas, marcadores, termómetros, anemómetros, binóculos, máquinas fotográficas e de vídeo, lupas, facilitam a documentação correta e a identificação de alterações de cor no betão armado. [11]

Importante também mencionar a necessidade de uma correta iluminação do local, devendo ser ponderado o uso de fontes de iluminação artificial, no caso em que esta seja escassa. [10]

### 3.4.1.3 Procedimento Geral

Antes de iniciar qualquer registo o observador/técnico deverá familiarizar-se com o projeto, consultando toda a documentação existente acerca do sistema estrutural em causa, os materiais envolvidos, bem como todas as especificações técnicas e registos de construção ou alterações efetuadas. [11]

O levantamento das anomalias visíveis deve ser feito de forma sistemática, mencionando todos os defeitos, classificados segundo uma escala e extensão, referindo sempre que possível as causas.

Percecionar se os defeitos são aleatórios ou se aparecem segundo um padrão, ajuda a entender se toda a estrutura é afetada ou partes dela. Esta observação é possível comparando situações. [11]

Na realização deste ensaio não devemos limitar-nos apenas ao que é visível no momento da inspeção. No caso de o técnico achar conveniente e necessários podemos humedecer a estrutura de betão armado ou submete-la a variações de temperatura, que nos ajudam a percecionar mecanismos de deterioração do betão.

Existem inúmeros guias disponíveis para ajudar a uma correta inspeção visual (Anexo I), o registo cuidadoso e detalhado é fundamental. Muitos autores enunciam que devem

ser feitos desenhos das anomalias do local e colorir ou sombrear consoante a sua gravidade (Figura 6). [11]

As anomalias que necessitam de recolha mais pormenorizada são geralmente fissuras, fendas, delaminações, escamações, alteração da cor, presença de fungos, zonas de vazios, juntas de dilatação e eflorescências.

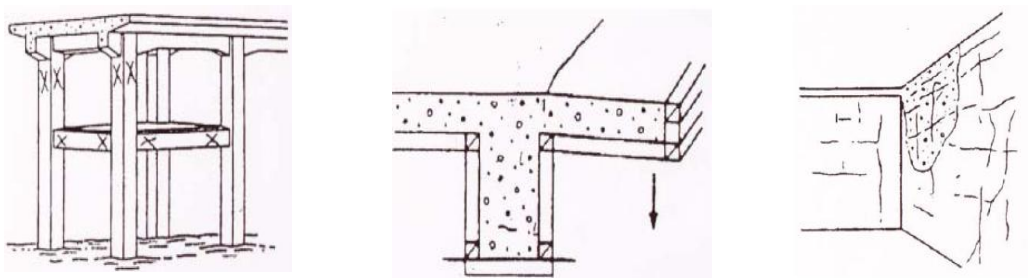


Figura 6: Exemplos de registos de anomalias [11]

Os guias para a inspeção visual identificam na sua grande maioria que é necessário recolher, entre muitos, os seguintes dados: [11]

- Data de pesquisa e de construção;
- Nome e endereço do edifício;
- Utilização tipo do edifício, número de pisos e áreas correspondentes;
- Tipo de construção (incluindo intervalo de vigas e fundações) e método de construção;
- Identificação do construtor, dos projetistas, do pessoal afeto a manutenção, dos materiais utilizados e especificações técnicas;
- Levantamento das condições ambientais, incluindo distanciamento do mar e velocidade média do vento, da presença de vibração ou produtos químicos;
- Histórico de utilização, de acidentes e reconstruções do edifício.

### 3.4.2 Detecção das armaduras

#### 3.4.2.1 Descrição do método

A deteção das armaduras e avaliação do seu diâmetro e recobrimento é um método de inspeção e ensaio complementar a todos os outros ensaios, tal como a inspeção visual.

Antes de iniciar o mapeamento/ planeamento dos ensaios considerados necessários ou qualquer ação de manutenção, é importante saber a localização, orientação e profundidade das armaduras das estruturas de betão armado.

Com recurso a medidores de recobrimento conseguimos detetar nas estruturas de betão armado a posição e direção das armaduras, as suas dimensões e o recobrimento existente. [2]

#### 3.4.2.2 Equipamentos

De fácil utilização o medidor de armaduras é um aparelho portátil, leve e compacto, alimentado por pilhas (Figura 7). Permite ao utilizador, através do seu pequeno ecrã saber a espessura de recobrimento, localização, orientação e diâmetro das armaduras. Através de uma pequena memória interna armazena os dados das medições que podem posteriormente ser transferidas para um computador.



Figura 7: Detetor de armaduras – Modelo S Profometer – J.Roma [12]

O medidor permite introduzir mínimos para os dados que tencionamos avaliar, como o caso de recobrimentos mínimos. Sempre que o dispositivo encontrar uma espessura de recobrimento inferior ao que o utilizador considerou mínimo aceitável o aparelho emite um sinal sonoro.

### 3.4.2.3 Vantagens e desvantagens

A maior vantagem do medidor de armaduras é a sua facilidade de utilização e interpretação acessível e rápida dos resultados.

Contudo o alcance de medição depende do diâmetro das armaduras e do tamanho do detetor, podendo alcançar os 360mm com uma precisão  $\pm$  de 2mm. [2]

A medição requer cuidados especiais para a obtenção de resultados precisos. Quando o diâmetro das armaduras é um dado importante, é necessário confirmar e repetir as medições. [2]

## 3.4.3 Termografia infravermelha

### 3.4.3.1 Descrição do método

A termografia infravermelha é uma técnica utilizada para avaliar a heterogeneidade dos elementos estruturais, encontra-se normalizada pela Norma ACI 228.2R-98 e ASTM D4788- 03. Desenvolvida para não existir necessidade de remover os rebocos ou estuques, que acabariam por danificar de forma significativa o aspeto dos elementos. [2]

Utilizada como método de deteção de anomalias no interior dos elementos estruturais de betão armado, baseia-se no princípio da condutibilidade térmica dos materiais, tendo por base dois grandes fundamentos: [10]

1º Todos os corpos emitem uma radiação térmica que depende da sua temperatura.

Os materiais que compõem uma estrutura comportam-se de maneira diferente, devido a sua condutibilidade térmica e calor específico. O que origina diferenças de temperatura no mesmo elemento quando submetidos às mesmas solicitações térmicas. [2]

2º A presença de ar no interior de um elemento de betão armado, origina um decréscimo de condutibilidade térmica, alterando a temperatura na superfície do elemento.

Analisando o quadro 7 podemos verificar que se deve ao facto de o ar possuir uma condutibilidade térmica consideravelmente inferior à do betão e do aço.

Quadro 7: Condutibilidade térmica dos materiais [10]

Material	Condutibilidade térmica (J/s.m.°C)
Aço	46
Gelo	1.7
Betão	0.8
Ar	0.024

A presença de ar num elemento de betão armado forma uma barreira local que interrompe o fluxo de calor, alterando a temperatura à superfície (Figura 8). Quanto mais profunda se encontrar a anomalia mais tempo levará o elemento a alterar a sua temperatura à superfície. [11]

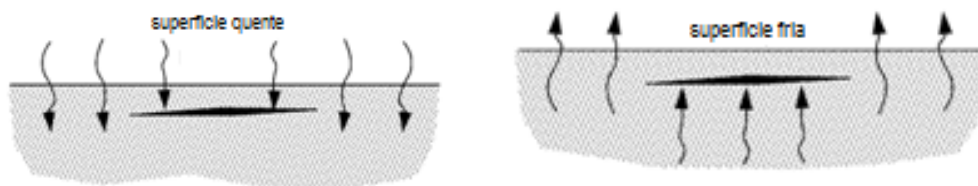


Figura 8: Barreira devido a presença de ar [10]

### 3.4.3.2 Equipamentos

Para se realizar o ensaio de termografia infravermelha tem de existir:

- ✓ Um fluxo de calor a atravessar a estrutura;
- ✓ Um equipamento ou meio para se conseguir medir as variações de temperatura a superfície.

O fluxo de calor é dado artificialmente à estrutura com o auxílio de lâmpadas de aquecimento, ou naturalmente através de aquecimento solar. Aconselhável recorrer-se aos métodos naturais porque são mais económicos. [10]

A medição é feita com um equipamento, figura 9, constituído por uma câmara termográfica sensível à radiação infravermelha, pares termoeletrônicos para controlo das temperaturas e equipamentos de gravação. [2]



Figura 9: Camara termográfica de alta resolução [13]

### 3.4.3.3 Vantagens e Desvantagens

A grande vantagem do ensaio de termografia infravermelha é o facto de não alterar o aspeto do elemento, salvaguardando a sua estética, ser de rápida preparação e não provocar poeira nem detritos, que poderiam causar problemas ambientais.

Outra vantagem diretamente ligada a saúde dos trabalhos deve-se a não emissão de radiações, as que existem são naturalmente emitidas pelos elementos. Podendo até comparar-se este aparelho a um termómetro vulgar só que mais sofisticado e eficiente.

No entanto a maior vantagem deste método é ainda a possibilidade de gerar uma imagem bidimensional da superfície em inspeção, onde verificamos a extensão da anomalia. Possibilidade de inspecionar grandes áreas num curto intervalo de tempo.

A termografia infravermelha apresenta uma grande desvantagem comparada com os outros métodos, pois apesar de detetar a anomalia não consegue medir a sua profundidade nem espessura. Isto é, o ensaio deteta a sua existência, mas não nos fornece dados concretos e dimensionais sobre a anomalia.

Para melhor conhecimento da anomalia teríamos de recorrer a um método que nos permita detetar a profundidade a que se encontra e a espessura que possui, e aí sim

conjugando os dois métodos teríamos uma conclusão mais precisa, eficiente, económica e segura. O seu uso é restringido devido ao seu elevado custo e sofisticação.

### 3.4.4 Esclerometria

#### 3.4.4.1 Descrição do método

Em 1948, o Engenheiro suíço Ernest Schmidt, desenvolveu o primeiro modelo de martelos de Schmidt, no entanto com a evolução da tecnologia vários modelos foram produzidos. Encontra-se normalizado pela ACI 228.1R-03 e ASTM C805-02.

O estudo deste ensaio advém de testes anteriormente executados para medir a dureza dos metais. Tendo como principal objetivo a medição da resistência do betão, a nível de compressão, avaliando as suas propriedades mecânicas, através da medição da dureza superficial. Conhecido também, por ser frequentemente utilizado para avaliar a homogeneidade do betão. [10]

As figuras que se seguem mostra-nos o aspeto do aparelho (figura 10), a sequência de execução do ensaio (Figura 11), e a sua secção longitudinal (figura 12).



Figura 10: Esclerómetro CM70 [14]

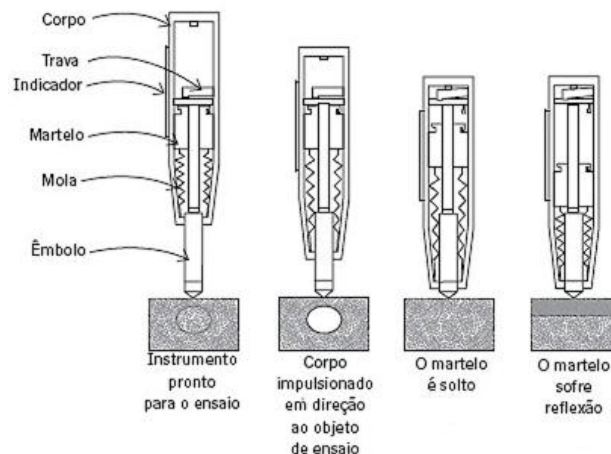
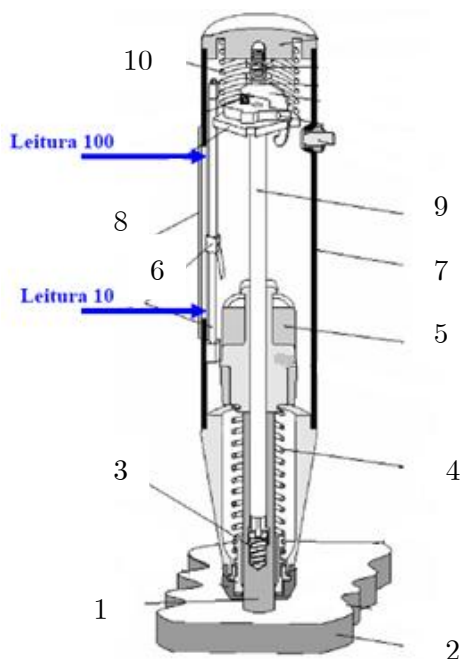


Figura 11: Ilustração da sequência de execução do ensaio de Esclerometria [13]



Legenda:

- 1- Êmbolo de impacto;
- 2- Superfície de betão a ensaiar;
- 3- Mola de retenção;
- 4- Mola para impacto;
- 5- Massa do martelo;
- 6- Cursor para leitura;
- 7- Invólucro de proteção;
- 8- Adesivo com o ábaco;
- 9- Guia da massa,
- 10- Mola de compressão.

Figura 12: Esclerómetro de Schmidt – secção longitudinal [16]

Os diversos modelos existentes no mercado diferem na rigidez da mola e na massa do martelo, podendo assim testar várias energias de impacto em diversos materiais.

#### 3.4.4.2 Processo de cálculo

No final da execução do ensaio o aparelho apresenta-nos um valor em percentagem, correspondente ao Índice Esclerométrico (IE), que permite avaliar o valor da resistência à compressão do betão, tendo em conta o ângulo entre o eixo longitudinal do Esclerómetro e a superfície ensaiada (Fórmula 1). [16]

$$IE = \left( \frac{\delta r - \delta 0}{\delta i - \delta 0} \right) = \frac{\Delta r}{\Delta i}$$

Expressão 1: Índice esclerómetro [16]

Sendo:

$\delta 0$  - Distância da massa do esclerómetro, não ativada, à superfície a ensaiar, ou seja, alongamento inicial de referência do êmbolo do Esclerómetro.

$\delta i$  - Distância da massa do esclerómetro, pronto a disparar, à superfície a ensaiar;

$\delta r$  - Distância da massa do esclerómetro, devido à mola se encontrar tensionada devido ao ressalto provocado pelo betão;

$\Delta i = (\delta i - \delta 0)$  - Deslocamento antes do impacto;

$\Delta r = (\delta r - \delta 0)$  - Deslocamento após o ressalto.

A relação  $\left(\frac{\Delta r}{\Delta i}\right)$  geralmente é expressa com percentagem (%), sendo adotada como a variável independente para fazer a correlação com a resistência do betão.

Após se efetuar a leitura no aparelho, recorreremos a um ábaco (Figura 13), normalmente colada na parte lateral do aparelho e fornecida pelo fabricante, para se estimar a resistência à compressão do material ensaiado.

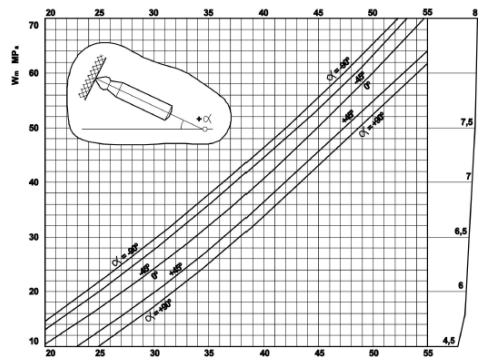


Figura 13: Ábaco de correlação do martelo de Schmidt [2]

### 3.4.4.3 Vantagens e Desvantagens

O martelo de Schmidt devido ao seu baixo custo e simplicidade de execução, torna-se num dos métodos mais utilizados. No entanto e apesar da sua simplicidade, não existe uma relação direta do índice esclerométrico e resistência.

Este método tem como desvantagem o facto de fornecer apenas dados acerca das propriedades superficiais, aproximadamente 5cm, e não da totalidade da estrutura. E não é recomendado para situações onde é importante a determinação da resistência com precisão.

No relatório do Comité ACI 228 [228.1R ACI-03] foram enunciados fatores que podem tornar os resultados pouco credíveis: [10]

- Humidade superficial do betão, o ressalto é maior em superfícies secas;
- Carbonatação, aumenta o ressalto;
- Textura da superfície, sendo mais favorável no caso de superfícies duras.

Conclui-se que seria necessário mais que um ensaio, para obtermos valores assertivos, exigido pela Norma ASTM C 805, e recomendado pelo ACI [228.1R ACI-03].

### 3.4.5 Ensaio de Ultra-sons

#### 3.4.5.1 Descrição do método

Desenvolvimento que se deve a estudos bem-sucedidos pelo corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, tendo início nos anos 40 a todas as investigações e evoluções. [10]

Atualmente normalizado pela ASTM C597-02 e ACI 228.1R-03.

Método que consiste na medição da velocidade de propagação de ondas, entre dois pontos, medindo-se a velocidade do impulso sónico, através de um sinal elétrico.

Consiste em medir o tempo que os impulsos levam a percorrer um dado material ao longo de distâncias conhecidas, desde o emissor até ao recetor. Recolhendo informação das características mecânicas, homogeneidade e presença de fissuras e defeitos. [10]

#### 3.4.5.2 Equipamentos

Para a sua realização são necessários dois transdutores, um recetor e outro emissor, e um piezoelétrico. (Figura 14)



Figura 14: Aparelho de medição ultra – sons [13]

### 3.4.5.3 Interpretação resultados

A velocidade de propagação de ondas num meio sólido está relacionada com o Módulo de Elasticidade, o Coeficiente de Poisson e a densidade.

Através da realização de diversos testes na mesma estrutura consegue-se detetar locais onde a qualidade do betão é superior. Para uma correta interpretação de dados é necessário conhecer-se alguma história da estrutura de betão armado.

Whitehurst, em 1951, publicou o resumo de uma experiência realizada em 1947, pela Associação de aplicações em Cimento Portland, onde descrevia uma tentativa de classificação que relaciona-se a velocidade do impulso sónico com a qualidade do betão (quadro 8). [10]

Quadro 8: Relação da velocidade de impulso com a qualidade, [2 pág. 276]

Velocidade (m/s)	Qualidade do betão
Acima 4500	Excelente
3500 – 4500	Bom
3000 – 3500	Regular
2000 – 3000	Medíocre
Abaixo 2000	Mau

Whitehurst alertou para as limitações na utilização desta tabela:

- ✓ Deve ser utilizada apenas por técnicos com alguma experiência;
- ✓ É importante comparar a velocidade em diversas partes da estrutura que se considere de qualidade aceitável.

Estes avanços foram bastante marcantes pois em 1967 este método passou a fazer parte de uma lista de testes de ensaios com a respetiva Norma ASTM C 597-02, [ACI 228.1R, 2003]. [10]

### 3.4.5.4 Vantagens e desvantagens

É bastante fácil de executar desde que se tenha acesso a diferentes faces da estrutura, e se possa efetuar devidamente a ligação do aparelho. É possível colocar-se o emissor e o

recetor na mesma face mas os resultados não são muito fiáveis, nem fáceis de interpretar.

Para além da resistência do betão, vários fatores podem influenciar a velocidade do impulso sónico, discutidos no Comité ACI 228 [ACI 228.1R, 2003]: [10]

- O teor de humidade, aumentando proporcionalmente a velocidade;
- Presença de armaduras, o impulso pode transmitir-se mas a velocidade aumenta;
- Fissuras ou vazios, aumenta o tempo de percurso do impulso e reduz a amplitude da onda.

Existem três métodos para a realização deste ensaio: direto, semidirecto e indirecto.

Para a avaliação das características de resistência mecânica e homogeneidade utilizamos os métodos diretos (Figura 15) e semidirectos (Figura 16). O método indirecto (Figura 17) para a determinação da profundidade de fissuras. Na impossibilidade de colocação dos transdutores aplica-se o método semi direto.

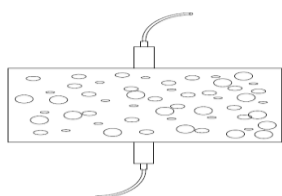


Figura 15: Transmissão Direta [2]

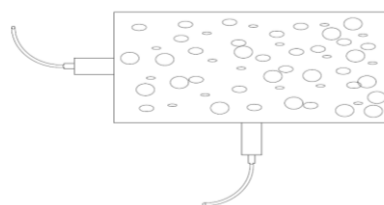


Figura 16: Transmissão Semi – direta [2]

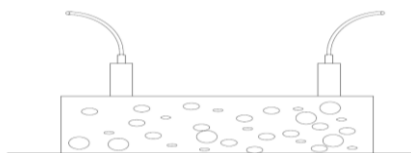


Figura 17: Transmissão indirecta ou superficial [2]

### 3.4.6 Radar

#### 3.4.6.1 Descrição do método

O ensaio Radar surge no mercado como uma técnica para deteção de tubagens enterradas ou tanques, posteriormente e com a evolução da tecnologia permitiu-nos determinar espessuras no betão, localização de armaduras e degradações internas. [10]

Resume-se a emissão de impulsos muito curtos de ondas eletromagnéticas (de alta frequência mas emitidas com impulsos muito curtos) e encontra-se normalizado pela ASTM D4748-98 e pela ASTM D6087-03. [10]

Percorrendo um elemento de betão armado, o impulso prossegue até encontrar alguma interface entre diferentes materiais, refletindo uma fração do impulso para a antena emissora sob a forma de eco.

#### 3.4.6.2 Método de cálculo

Através da medição do tempo necessário para efetuar o percurso, consegue-se detetar a profundidade a que foi encontrada a interface, sempre que a velocidade de propagação da onda pelo material seja conhecida.

O impulso refletido depois da interface depende da diferença dos coeficientes dielétricos do material envolvido (Fórmula 2). [10]

$$\rho_{1,2} = \frac{\sqrt{\epsilon r_1} - \sqrt{\epsilon r_2}}{\sqrt{\epsilon r_1} + \sqrt{\epsilon r_2}}$$

Expressão 2: Coeficiente de reflexão [10]

Sendo que:

- $\rho_{1,2}$  Coeficiente de reflexão,
- $\sqrt{\epsilon r_1}$ ;  $\sqrt{\epsilon r_2}$  coeficientes dielétricos dos materiais.

Por definição, o coeficiente dielétrico do ar assume o valor de 1 e os valores típicos para os outros materiais são os seguintes segundo a norma ASTM D4748-98 (quadro 9).

Quadro 9: Coeficientes dielétricos dos materiais [10]

Material	Coeficiente dielétrico
Betão de cimento Portland	6 a 11
Betão de cimento asfáltico	3 a 5
Gravilha	5 a 9
Areia	2 a 6
Rocha	6 a 12
Água	8

Os valores acima são apresentados num intervalo porque dependem do teor de humidade e das concentrações iónicas, que sofrem um aumento paralelamente.

Para determinar a profundidade da interface temos de calcular anteriormente a velocidade da onda eletromagnética (Fórmula 3):

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon r}}$$

Expressão 3: Velocidade da onda eletromagnética [10]

Onde:

- $C_0$  - Velocidade da luz no ar ( $3 \times 10^8$  m / s);
- $\sqrt{\epsilon r}$  - Coeficiente dielétrico.

Se o tempo de viagem de ida e volta é  $t$ , a profundidade,  $D$ , seria: (Fórmula 4)

$$D = \frac{C \cdot \Delta t}{2}$$

Expressão 4: Profundidade da interface [10]

### 3.4.6.3 Equipamento

A instrumentação para a realização deste ensaio consiste em:

- Unidade de antena;
- Unidade de controlo;

- Dispositivo de exibição;
- Dispositivo de armazenamento.

A antena emite um impulso eletromagnético e recebe o impulso refletido sob a forma de eco, onde os impulsos mais longos são diretamente associados a uma capacidade penetrante mais elevada, mas uma menor resolução. Com um aumento do teor de humidade e de armaduras, a profundidade de penetração da onda diminui.

Este dispositivo pode ou não estar em contacto direto com o pavimento. Devendo ter-se em consideração que no primeiro caso a antena irá receber um sinal de eco entre a superfície e o aparelho. (Figura 18 e 19)

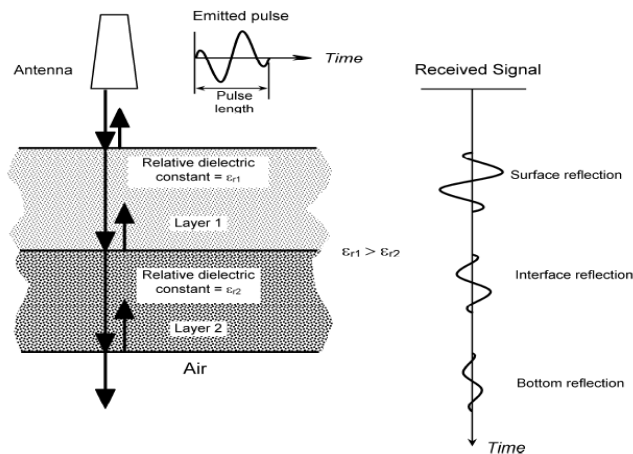


Figura 18: Antena sem contato direto com o pavimento [10]

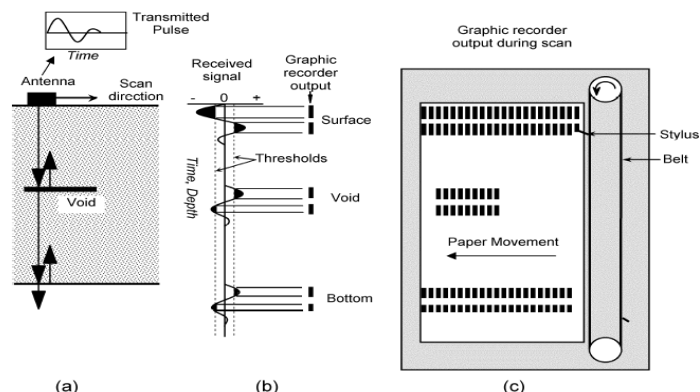


Figura 19: Antena acoplada ao solo [10]

- a) Reflexões do pulso eletromagnético; b) Interface refletidas em forma de onda;
- c) Saída no controlo de exposição

A unidade de controlo é o centro de todo o sistema, controlando a frequência de repetição do impulso, fornecendo a energia para emitir o impulso, registar e amplificar o sinal de saída para o dispositivo de exibição. [10]

#### **3.4.6.4 Vantagens e desvantagens**

Ao contrário do ensaio de termografia infravermelho neste ensaio não é necessário criar as condições de temperatura ideais. É o único método que existe atualmente no mercado que possibilita o estudo de uma estrutura com sobreposição dos revestimentos, é capaz de detetar perda de ligação entre o recobrimento e o betão e não necessita de ser fixo a estrutura o que facilita o ensaio. [11]

No entanto ocasionalmente o ensaio de Radar pode indicar erradamente delaminação nas estruturas de betão e pode falhar na sua identificação, caso em que são inferiores a 0.3 m de largura, devido a proteção das armaduras. [11]

Outra causa que poderá levar a erros na inspeção será a presença de humidade e a presença de metais que interrompem a transmissão do impulso.

O ensaio de Radar quando emite uma frequência mais baixa, possibilita uma maior penetração do elemento, contudo tem uma menor precisão, sendo a sua avaliação muito alterada consoante a experiência do operador.

É um método de elevado custo e de utilização reservada a casos especiais.

### **3.4.7 Método da Maturidade**

#### **3.4.7.1 Descrição do método**

Surge nos anos 50 na Inglaterra, tendo por base à necessidade de criar um procedimento que avaliasse o espectrograma da temperatura no betão, ou seja, perceber o efeito que as diferentes temperaturas têm sobre o desenvolvimento da resistência do betão. [17]

As condições de cura nos elementos de betão armado são essenciais para que a estrutura atinja a capacidade resistente às cargas desejadas. O betão armado quando sujeito num mesmo intervalo de tempo, a temperaturas diferentes atinge distintas capacidades resistentes. As altas temperaturas e a reações de hidratação do cimento podem produzir maior porosidade e menor resistência a compressão.

Normalizado pela ASTM C 1074, o método estima o tempo necessário para se iniciar o processo de descofragem, tendo em conta as condições de temperatura a que a estrutura de betão armado está sujeita. Exige que se conheça previamente o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo numa condição isotérmica de cura. [10]

### 3.4.7.2 Processo de cálculo

O método da maturidade é denominado usualmente como o produto entre o tempo e a temperatura. Através da fórmula 5, conhecida como função de “Nurse – Saul”, é possível calcular o fator de maturidade:

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_0) \Delta t$$

Expressão 5: Fator de maturidade [17]

Sendo:

$M(t)$  – Índice de maturidade, (° C. hora);

$T_a$  – Temperatura média do betão, num dado intervalo de tempo, (° C);

$T_0$  - Temperatura base, (° C), temperatura abaixo da qual as reações de hidratação do cimento não ocorrem; Valor de referência situa-se nos -10°C.

$\Delta t$  - Intervalo de tempo, (hora).

São recolhidas na altura de betonagem as amostras e conservadas em laboratório a temperatura idêntica a do local. Testa-se a capacidade resistente dos provetes

recolhidos diariamente, a fim de estimar a capacidade resistente dos elementos de betão armado, e o seu desenvolvimento ao longo do tempo.

### 3.4.7.3 Vantagens e Desvantagens

O método da maturidade é muito útil para se prever a resistência do betão ao longo do tempo quando sujeito a uma temperatura conhecida e controlada. Sabe-se que com o aumento da temperatura consegue-se, num intervalo de tempo menor, semelhantes capacidades resistentes dos elementos de betão armado.

A maior desvantagem é que este método embora seja não destrutivo só é válido para processos de pré-moldagem, dando mais importância às variações térmicas e às suas influências no desenvolvimento da resistência do betão armado. Método utilizado apenas para medições pontuais, devido ao tempo de execução e custo.

Outra desvantagem deste método é a necessidade de ter sempre presente o conhecimento que estruturas de betão armado, compostas por cimentos diferentes, apresentam comportamentos diferentes quando sujeitos as mesmas condições de temperatura e tempo.

### 3.5 Ensaios parcialmente destrutivos

Os ensaios de carácter parcialmente destrutivos causam alguma modificação na estrutura de betão, mas não põem em causa a sua resistência. Não podem ser utilizados em edifícios que se pretenda conservar na totalidade o elemento de betão armado e a sua execução envolve operações de reparação.

#### 3.5.1 Medição da profundidade de carbonatação

##### 3.5.1.1 Medição através de fenolftaleína

O processo de carbonatação, como anteriormente já foi referido e também conhecido por despasseamento do betão, ocorre quando o dióxido de carbono presente na atmosfera, na presença de humidade, reage com os cloretos presentes no betão.

A carbonatação é um processo muito lento, sendo possível estimar o tempo necessário para que ocorra (Fórmula 6), desde que se tenha conhecimento da classe de betão. [11]

$$t = \left(\frac{d}{k}\right)^2$$

Expressão 6: Tempo necessário para que ocorra a carbonatação [11]

Onde:

- t – tempo necessário para que ocorra a carbonatação;
- d – recobrimento;
- k – permeabilidade do betão, que depende da sua classe (Quadro 10)
- 

Quadro 10: Valores da permeabilidade do betão segundo a sua classe [11]

Classe de betão	Permeabilidade
15	17
20	10
25	6
30	5
35	4
40	3.5

Quando existe a necessidade de medir a extensão de carbonatação numa superfície só necessitamos de uma solução de fenolftaleína.

Se pulverizarmos a superfície com uma solução que contenha 1% da fenolftaleína, solução incolor, e a superfície apresentar um tom rosado, então é porque estamos na presença de cloretos de betão. [11]

Este método geralmente é feito em pequenos núcleos extraídos da estrutura mas também pode ser efetuado em orifícios desde que devidamente limpos antes da pulverização. Normalizado pelo CPC 18.

### 3.5.1.2 Medição através das características

Para efetuarmos a medição da profundidade, podemos recorrer a fórmula 8 que têm em consideração a idade do edifício, a razão água/cimento e uma constante que varia de acordo com o recobrimento.

$$Y = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} \cdot C^2 \Leftrightarrow C = \frac{\frac{1}{y^2} \cdot R \cdot (4.6x - 1.76)}{\sqrt{7.2}}$$

Expressão 7: Medição da profundidade de carbonatação [11]

Onde:

- Y – Idade de edifício expressa em anos;
- x – Razão água/cimento;
- C – Profundidade da carbonatação;
- R – constante que assume o valor de 1.7 no caso de betão no interior e 1.0 no caso de betão no exterior. (Quadro 11)

Quadro 11: Valores de R [11]

Condição	Interior	Exterior
Sem recobrimento	1.7	1.0
Gesso	0.79	
Argamassa + Gesso	0.41	
Argamassa	0.29	0.28
Argamassa + Pintura	0.15	
Telha	0.21	0.07
Pintura	0.57	0.8

### 3.5.1.3 Vantagens e Desvantagens

O método que usa fenolftaleína é o método mais barato e simples de determinar a profundidade de carbonatação, e fornece dados sobre o risco de corrosão das armaduras. No entanto este ensaio é necessário efetuar pequenos orifícios no betão para introduzir a solução. [11]

## 3.5.2 Sonda de penetração

### 3.5.2.1 Descrição do método

O método da medição da resistência à penetração, também conhecido como Sonda de Windsor, foi desenvolvido nos Estados Unidos em 1964. Utiliza-se para estudar o desenvolvimento da resistência do betão. [10]

Como o próprio nome indica, envolve a penetração de uma sonda (Figura 20) na estrutura de betão até que a energia cinética inicial seja absorvida, provocando uma furação na peça, possibilitando uma rápida verificação da qualidade e da maturidade do betão. [18]



Figura 20: Sonda de Windsor [19]

Ao contrário do ensaio de esclerometria, que consiste também na avaliação da dureza superficial, este método avalia a qualidade do betão a uma profundidade significativa.

À medida que a sonda penetra na estrutura, alguma da energia é absorvida por atrito, e a restante, é absorvida pelo esmagamento e fratura do elemento alvo de ensaio.

A descrição deste método torna-se complexa devido à variedade do tipo de forças associadas, compressão, corte, atrito e tração. [18]

É formado na peça uma secção ou cone, normalmente designada por bolbo de compressão (Figura 21), correspondente a zona das fraturas, onde são absorvidas grande parte das energias. [18]

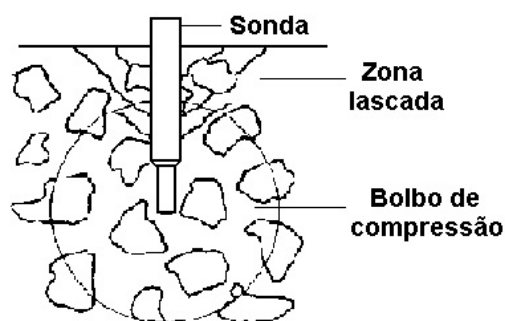


Figura 21: Zona fraturada [18]

Este método encontra-se normalizado pela ASTM C803, desde 1975, e relaciona a profundidade de penetração de uma sonda projetada a uma determinada energia, diretamente contra uma superfície de betão, com a sua resistência à compressão. [10]

### 3.5.2.2 Equipamento

O aparelho é acompanhado de uma tabela, consoante o fabricante, e de um medidor normalizado. [10]

Pode ser utilizado um nível de energia baixo (Low Power), no caso de betões em que as resistências esperadas são inferiores a 26MPa - secções cúbicas, e 21MPa - secções cilíndricas. [18]

Os níveis de energias elevados (Standard Power) são utilizados nos casos em que as resistências estimadas são superiores às anteriores.

Consoante o betão a ensaiar, as sondas serão diferentes. As de prata utilizam-se para betões normais, e tem 6,35mm e com 79,5mm. [18]

Para betões leves, a sonda passa a ser dourada o diâmetro é de 7,94mm e com 79,5mm de comprimento. [18]

### 3.5.2.3 Vantagens e Desvantagens

Embora este método apresente um baixo custo, rapidez e facilidade de execução alguns cuidados devem ser tidos em conta. Entre eles temos as limitações na caracterização das influências, tanto a nível de temperatura como de carbonatação, bem como o cuidado de estudar devidamente qual o tipo de sonda e quantidade de energia a utilizar, condicionados pelo betão a ensaiar.

O Comité ACI 228 [ACI 228.1R, 2003] enunciou alguns fatores que afetam o ensaio:

- ✓ As propriedades dos agregados estão diretamente relacionadas, com a profundidade e energia;
- ✓ Sonda deve ser disparada na perpendicular, não sendo sensível as condições superficiais;
- ✓ No caso do betão armado existe uma especial atenção, pois não deve ser realizado na proximidade de armaduras, principalmente quando a camada do recobrimento é baixa.

Num sistema corrente, a máxima penetração é limitada a 7,60mm e não é recomendada a sua execução em peças com tensões de compressão superiores a 28MPa, devido a sensibilidade de execução.

A principal desvantagem deste método é a necessidade de realizar-se um grande número de testes para conseguir-se detetar pequenas diferenças da resistência no betão.

Com vantagens podem-se considerar: [18]

- A possibilidade de se estimar a resistência do betão, quando não é possível executar-se ensaios de carácter não destrutivos;
- Em trabalhos de descofragem ou de aplicação de pré-esforço, consegue-se um controle de qualidade ou mesmo a avaliação do desenvolvimento da resistência do betão.

### 3.5.3 Ensaio de Arrancamento (Pull-Out)

#### 3.5.3.1 Descrição do método

Várias experiências foram realizadas em torno deste método, surgiram na década dos anos 30 nos Estados Unidos e na União Soviética, mas só em 60 é que sofreram um grande desenvolvimento. Atualmente encontra-se normalizado na ASTM C900-01. [10] Possibilita uma avaliação da capacidade de resistência à tração, uniformidade do betão, deformabilidade e qualidade, existindo diferentes métodos.

O método do arrancamento (Pull – Out) analisa a força necessária para arrancar um disco metálico inserido no betão a uma dada profundidade, onde a formação de um anel de reação à superfície do betão define a superfície de rotura. Possibilita estimar a resistência à compressão do betão, convertendo a força, através de correlações estabelecidas previamente.

Existem duas categorias: [18]

- Ensaios planeados antes da betonagem (Lock – Test);
- Ensaios planeados após a betonagem (Capo – Test).

#### 3.5.3.2 Lock – Test

O teste Lock – Test (Figura 22), desenvolvido na década dos 60, por Peter Krierkegaard – Hansen, estabelece hoje a principal referência neste tipo de ensaios.

Necessita que um conjunto seja normalmente fixo às cofragens antes da betonagem, ficando no interior do betão. [18]

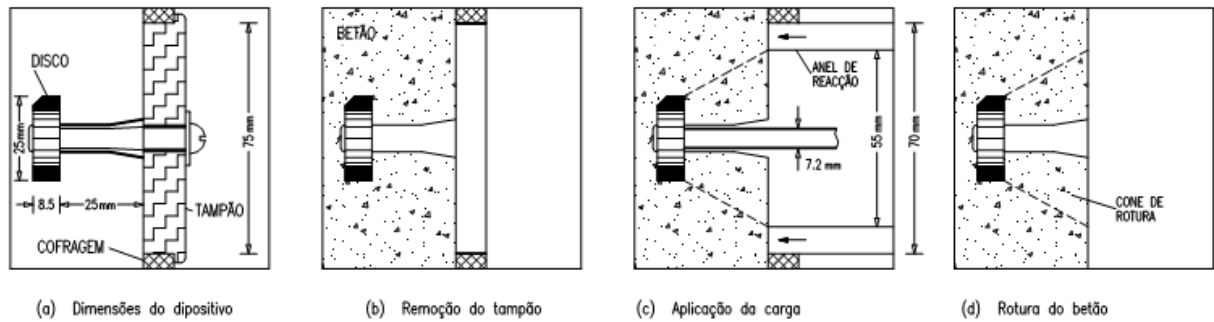


Figura 22: Exemplo do método Lock – Test [18]

As aplicações de cada ensaio são ligeiramente diferentes, o Lok – Test tem como principais:[18]

- Alternativa à extracção de carotes, possibilitando o controlo de qualidade;
- Através do conjunto inserido na estrutura anteriormente ajuda a avaliar o desenvolvimento da resistência, possibilitando informações acerca da altura correcta da descofragem e mesmo aplicação de pré – esforço;
- Quando se espera que a deterioração da resistência do betão seja acelerada, é importante saber o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo.

### 3.5.3.3 Capo – Test

Capo – Test (Figura 28), foi desenvolvido na década dos 70 na Dinamarca. Ao contrário do Lock – Test não necessita de um planeamento prévio, podendo ser executado após o endurecimento do betão. [18]

Consiste na extração de um anel que é expandido no interior de um furo feito no betão, sendo extremamente necessário saber-se a localização da armadura bem como efetuar-se a medição do recobrimento. [18]

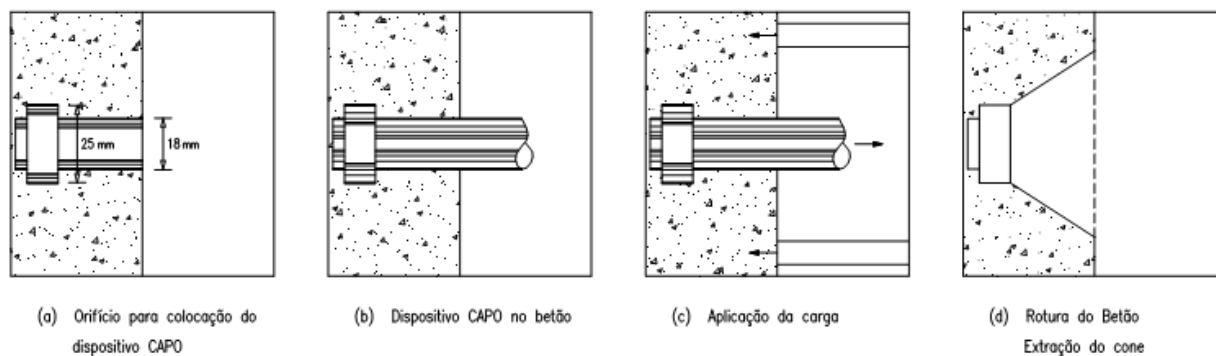


Figura 23: Exemplo do método Capo – Test [18]

A força de arranque provoca o esmagamento entre o betão e o dispositivo de arranque, o que pressupõe que a tensão medida seja diretamente relacionada com a resistência à compressão.

No caso do ensaio Capo – Test é aplicado porque: [18]

- Possibilita estimar a resistência de estruturas já existentes, podendo ser estas danificadas ou deteioradas;
- Comprovar os dados obtidos através do outro método;

#### 3.5.3.4 Vantagens e Desvantagens

Em ambos os testes é necessário verificar se a superfície se encontra lisa e regular, conseguindo-se essa verificação quando o anel assenta em toda a sua superfície.

Os resultados dos ensaios são influenciados pela dimensão e tipo de agregados, pela velocidade de aplicação da carga e as dimensões do dispositivo de arranque.

Sendo a mais desfavorável a máxima dimensão do agregado, pelo facto de ser um ensaio de rotura localizada, influenciando mais no Capo – Test.

Ambos os ensaios permitem avaliar a capacidade resistente à compressão do betão armado.

### 3.5.4 Ensaio de tração Direta (Pull – Off)

#### 3.5.4.1 Descrição do método

Conhecido pelo ensaio de aderência, medindo a força necessária para arrancar um disco metálico, colado a superfície do betão com uma resina epoxídica, produzindo uma força de tração de forma gradual. (Figura 24)

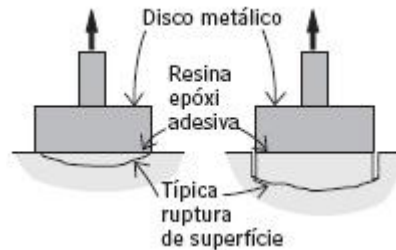


Figura 24: Ilustração do método pull-off [18]

Este método possibilita a avaliação direta da resistência à tração à superfície e no interior do elemento de betão. A aderência entre duas camadas de betão executadas em idades diferentes ou entre o betão e elementos colados à superfície também pode ser avaliada.

#### 3.5.4.2 Vantagens e Desvantagens

Existe a necessidade de arrancar uma pequena parte do betão à superfície da estrutura, necessitando posteriormente de pequenas reparações, realizados de duas formas distintas:

- Com corte superficial segundo a dimensão do disco metálico;
- Sem a necessidade de execução deste corte superficial.

Durante os ensaios de arranque existe a possibilidade do aparecimento de fissuras, devendo ter-se em atenção a máxima dimensão da peça a ensaiar, bem como a distância dos dispositivos aos bordos da peça.

O risco aumenta com o aumento da dimensão do agregado, a classe de betão e a distância aos bordos da peça.

### 3.5.5 Break – Test

Ensaio desenvolvido por R. Johansen no “Cement and Concrete Research Institute” na Noruega, no início do ano 1970 e regulamentado pela norma ASTM em 1990 (ASTM C 1150), determina a força necessária para o arrancamento de uma amostra cilíndrica, paralela ao plano da superfície de betão armado, de uma forma barata, simples e robusta. (Figura 25)

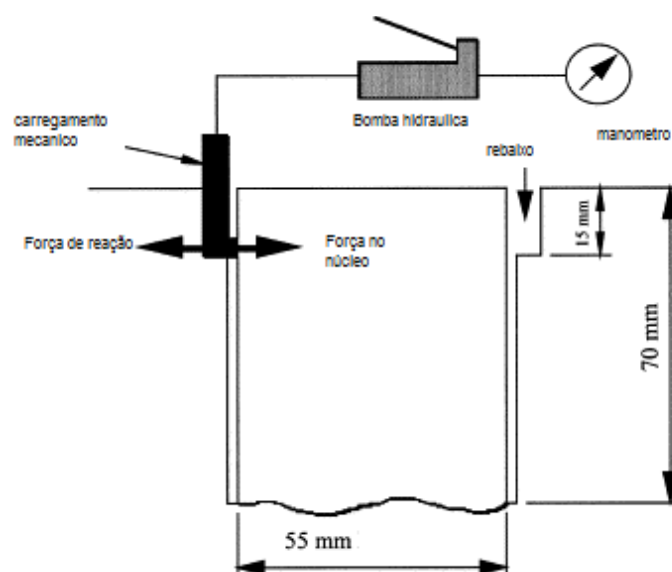


Figura 25: Ensaio Break – Test [10]

#### 3.5.5.2 Equipamento

Para a realização deste ensaio é necessário:

- Uma célula de carga;
- Um manómetro, que mede a força necessária para se atingir a rotura do núcleo;
- Uma bomba hidráulica manual, que transmite forças ao elemento. (Figura 26)



Figura 26: Equipamento para execução do ensaio break-off [15]

No caso de novas construções, no momento da betonagem dos elementos é introduzido um tubo plástico descartável oco, que é removido quando queremos determinar a resistência do elemento.

Para uma correta execução deste ensaio o diâmetro nominal dos agregados não deve exceder os 25mm e o tubular deve ser introduzido, com cuidado e por pessoal especializado, para garantir a correta compactação do betão.

Nas construções já existentes, com a ajuda de uma broca especial efetua-se o corte do núcleo.

Este ensaio aplica uma força lentamente, submetendo o núcleo a uma combinação de tensões de flexão e corte, os resultados estão diretamente ligados a resistência à compressão.

### **3.5.5.3 Vantagens e Desvantagens**

A correta calibração do instrumento é crucial para assegurar que as leituras correspondem efetivamente a resistência à compressão.

O desenvolvimento das resistências a compressão do betão apresenta um comportamento não linear. As pequenas dimensões dos agregados e a heterogeneidade do betão, influenciam os resultados em cerca de 9% de amostra para amostra.

Infelizmente depois de todos estes testes efetuados e dos resultados obtidos em 2002 o Comité da ASTM votou para retirar a norma ASTM C 1150 e desde então o equipamento não foi mais comercializado.

## **3.5.6 Ensaio de Carga**

### **3.5.6.1 Descrição do método**

Normalizado pelo ACI 4371-03, o ensaio de carga, como o próprio nome indica, consiste em determinar o desempenho de uma estrutura sob a simulação real de carga, isto é,

aplicar carga à estrutura em estudo e acompanhar as suas deformações, abertura de fissuras já existentes ou formação de novas fissuras. [20]

Para garantirmos a segurança de uma estrutura no que respeita à sua funcionalidade, durabilidade e aparência, temos de observar cuidadosamente os seus estados limites. [2]

Através do ensaio de carga podemos recolher informação sobre:

- Deslocamentos verticais;
- Assentamentos e rotação nos apoios;
- Existência e estado das fissuras;

O primeiro passo para a realização deste ensaio é o levantamento de todas as anomalias existentes, como o caso de fissuras e deformações, para permitir um acompanhamento correto da evolução do estado da estrutura.

Depois de se proceder a carga do elemento são retiradas informações múltiplas, num intervalo de tempo dependente da estrutura, até a deformação ou formação de fissuras estabilizar.

### 3.5.6.2 Equipamentos

Este ensaio para obter o sucesso desejado deve ser efetuado por mão-de-obra especializada e ter em consideração a necessidade de escoramento da estrutura para proteção e segurança, tanto da estrutura como dos operadores. [20]

Para a realização deste ensaio necessitamos de um meio para efetuar carga na estrutura, como o caso mais utilizado dos bidões de água com uma capacidade aproximadamente de 200 litros, ou então sacos de areia.

Para efetuar a leitura pode-se usar um medidor ótico de fissuras, fita métrica, termómetro, prumos metálicos extensíveis, defletómetros mecânicos de centésimos montados entre os elementos estruturais e uma base inferior fixa e régua graduada em milímetros. [2]

### 3.5.6.3 Vantagens e Desvantagem

Este ensaio tem como principal desvantagem o seu custo elevado e tempo necessário para a sua execução, podendo deixar danos irreversíveis na estrutura ou a alguns dos seus elementos. No entanto os resultados são bastante fiáveis e precisos.

## 3.5.7 Teor de cloretos

### 3.5.7.1 Descrição do método

A determinação “*in situ*” do teor de cloretos torna-se essencial para avaliar a necessidade de proceder-se a uma intervenção na estrutura de betão armado. Este ensaio permite saber o teor de cloretos solúvel em ácidos, de cloretos de betão. E encontra-se normalizado pela ASTM C1152-04 e ASTM C1218-99.

Uma amostra do pó do betão a ensaiar é dissolvida numa solução ácida normalizada. Os iões de cloreto reagem com o ácido numa reação eletroquímica. [2]

Para a escolha adequada dos locais de ensaio teremos de previamente detetar a posição das armaduras através de um detetor de armaduras. A recolha do pó é efetuado aquando da perfuração do elemento de betão armado, normalmente efetuam-se três furos a níveis diferentes.

Um elétrodo, devidamente calibrado e provido de um sensor de temperatura, é inserido na solução, medindo a reação eletroquímica. Com recurso a um aparelho concebido para o efeito converte-se automaticamente a percentagem de iões de cloreto em percentagem de iões de cloretos. [2]

### 3.5.7.2 Equipamentos

Para a realização deste método são necessários: [2]

- ✓ Elétrodo com sensor de temperatura;
- ✓ Aparelho eletrónico de leitura;

- ✓ Solução ácida com coloração;
- ✓ Balança para pesagem da amostra;
- ✓ Concha para recolha do pó e soprador para amostragem;

### 3.5.7.3 Interpretação de resultados

Para a realização deste ensaio devem ser recolhidas diversas amostras em locais diferentes, realizar ensaios “*in situ*” e laboratoriais para se construir um gráfico de correlação (Figura 27). [2]

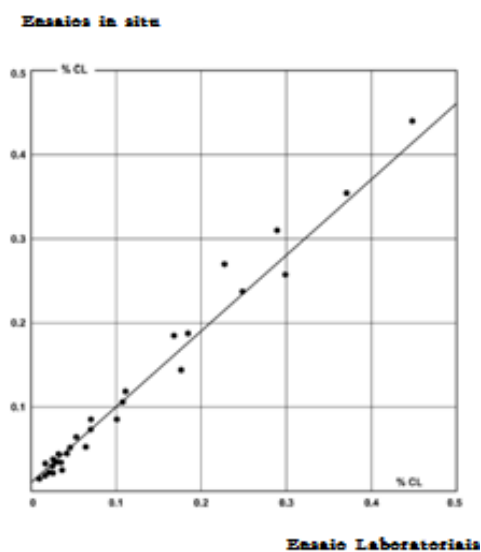


Figura 27: Correlação obtida entre os ensaios “*in situ*” e laboratoriais [2]

A Norma NP EN 206 fixa o teor de cloretos admissíveis nas estruturas de betão armado em 0,4% de ião de cloro em relação ao peso do cimento, e de 0,2% em estruturas pré-esforçadas. [2]

## 3.5.8 Carotagem

### 3.5.8.1 Descrição do método

Consiste na extração de pequenas amostras cilíndricas, carotes, nos pontos mais significativos da estrutura. Encontra-se normalizada pela ASTM C42-04 e no ACI39-03. [21]

É muito relevante e eficaz quando se avalia a capacidade resistente de um elemento danificado ou que apresenta um comportamento diferente do esperado ao longo da sua vida útil. Normalmente é efetua-se quando se consideram insuficientes ou incoerentes os resultados obtidos através de outros métodos. [1]

Antes da execução deverá ser definida criteriosamente o local ou locais que se pretendem avaliar. Este método permite observar a olho nu as partes constituintes de um elemento de betão armado e a realização de ensaios laboratoriais.

Os ensaios laboratoriais permitem obter informação sobre as características mecânicas (ensaio a compressão), químicas e físicas (densidade, absorção de água e permeabilidade) do elemento de betão. [1]

Contudo a presença de armadura nos provetes poderá influenciar os resultados. No entanto recorrendo a outros ensaios não destrutivos pode-se optar por uma zona no elemento de betão menos condicionada pela presença de armadura. [21]

### 3.5.8.2 Equipamentos

Para a extração dos carotes é necessário apenas de uma máquina de corte rotativa, dotada de coroas com dentes de diamante (Figura 28). Deve ser colocada verticalmente a superfície do betão e possuir um sistema de fornecimento de água para uma correta lubrificação da superfície a cortar.



Figura 28: Brocas de perfuração em carote [22]

As normas recomendam um diâmetro entre 100 a 150mm. As dimensões do carote deverão contabilizar os custos e os danos que podem causar na estrutura. [21]

### 3.5.8.3 Interpretação dos resultados

Para a interpretação correta dos resultados obtidos em laboratório para a tensão de rotura deve-se ter em consideração a direção em que foi efetuada a Carotagem, a relação entre a altura e diâmetro dos provetes e a presença de armaduras. [2]

Para a normalização dos resultados obtidos para carotes de diferentes tamanhos é necessário efetuar-se a seguinte correlação (fórmula 8):

$$F_{cil} = \frac{2,5}{1,5 + \frac{\phi}{h}} \times F_{car}, \text{ carotes extraídos horizontalmente}$$

Expressão 8: Normalização dos valores de tensão de rotura [2]

A resistência média do betão para provetes cúbicos pode ser calculada através da fórmula 9.

$$f_{cm} = f_{cm,ci} \times \left(1 \pm \frac{1,2\%}{\sqrt{n}}\right)$$

Expressão 9: Resistência média do betão [2]

Onde:

$f_{cm}$  - Tensão média;

$f_{cm,ci}$  - Tensão média em provetes cilíndricos

$n$  - Número de provetes

O valor de tensão de rotura dos provetes cúbicos é idêntico a tensão de rotura dos provetes cilíndricos. Logo a resistência média de referência em moldes de betão pode ser estimado através da fórmula 10. [2]

$$f_{cm(standard)} = f_{cm} \times 1,25$$

Expressão 10: Resistência média de tensão de provetes [2]

Segundo as normas regulamentares o valor característico pode ser obtido segundo a fórmula 11. [2]

$$f_{ck} = f_{cm} \times (1 - 1,64 \times \delta)$$

Expressão 11: Valor característico do betão armado [2]

Onde:

$\delta$  – Coeficiente de variação (valor de desvio-padrão e média dos resultados obtidos)

#### **3.5.8.4 Vantagens e Desvantagens**

Apesar de proporcionar resultados fiáveis em laboratório, a extração de carotes provoca destruição de uma parte da estrutura que necessitará de recuperação/ manutenção após efetuadas todas as análises.

As suas desvantagens encontram-se diretamente ligadas ao seu elevado custo e tempo de execução. Por isso deve conjugar-se este método sempre com outros ensaios menos trabalhosos e demorados para evitar que a destruição do elemento seja em grande escala e obter resultados mais rápidos.

Os resultados deste método dependem muito da porosidade do betão, da humidade e das condições de cura. [21]

### 3.6 Normas para ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos

As normas têm um papel fundamental numa sociedade cada vez mais globalizada, ajudando a estabelecer bases técnicas para a boa execução de bens e serviços. Produzidas por entidades técnicas- científicas de competência reconhecida, vocacionadas para áreas especializadas.

Seguidamente apresentam-se de forma clara as normas para cada um dos métodos de inspeção e ensaio parcialmente destrutivos (Quadro12) e não destrutivos (Quadro13) descritos anteriormente.

Quadro 12: Norma para ensaios parcialmente destrutivos [2]

Ensaio parcialmente destrutivo	Normas
Sonda de Penetração	ASTM C 803 - Método - Padrão de ensaio para a determinação da resistência à penetração do betão endurecido;
Arrancamento	ASTM C 900-01 – Método – padrão de ensaio para a determinação de resistência pull-out do betão endurecido;
Pull – Off	ASTM D 4541-02 – Método – padrão de ensaio para a determinação da resistência à remoção de revestimentos utilizando dispositivos portáteis. NP EN 12504 – 3
Break – Test	ASTM C 1150 – Método – padrão de ensaio para o break- off do betão
Carga	ACI 437R-03 – Avaliação da resistência em edifícios de betão existentes;
Presença de cloretos	ASTM C 1152 -04 – Método de ensaio para a presença de cloretos solúveis em ácido em argamassa e betão; ASTM C 1218-99 – Método de ensaio para cloretos hidrossolúveis em argamassa e betão;
Carotagem	ASTM C 42 – 04 – Métodos de ensaio para obtenção e ensaio de carotes e vigas de betão serradas; ASTM C 39-93 – Métodos – padrão de ensaio para determinação da resistência à compressão de provetes cilíndricos em betão; NP EN 12504 - 1
Profundidade de Carbonatação	CPC 18 – Determinação da profundidade de carbonatação através de ensaios de fenolftaleína.

Quadro 13: Norma para os ensaios não destrutivos [2]

Ensaios não destrutivos	Normas
Inspeção visual	ACI 201.1R-92 – Guia para a elaboração de uma avaliação do estado do betão em serviço; ACI 228.2R-98 – Métodos de ensaios não destrutivos para a avaliação do betão em estruturas;
Termografia Infravermelha	ACI 228.2R-98 – Métodos de ensaios não destrutivos para a avaliação do betão em estruturas; ASTM D 4788-03 – Método padrão para a determinação de delaminações em tabuleiros de ponte;
Esclerometria	ACI 228.1R-03 – Métodos <i>in situ</i> para a determinação da resistência do betão; ASTM C 805-02 – Método – padrão para determinação do número esclerométrico do betão endurecido; NP EN 12504 -2
Ultra-sons	ASTM C 597-02 – Método – padrão de ensaio para determinação da velocidade de impulsos através do betão; ACI 228.1R-03 - Métodos <i>in situ</i> para a determinação da resistência do betão; NP EN 12504 - 4
Radar	ASTM D 4748-98 – Método – padrão para a determinação da espessura de camadas de pavimento, utilizando um radar de impulso muito curto; ASTM D 6087 – 03 – Método – padrão de ensaio para a avaliação de tabuleiros de pontes de betão cobertas com asfalto;
Maturidade	ASTM C 1074 – Método – padrão para determinar a resistência do betão armado pelo método da maturidade.

### 3.7 Avaliação do estado da estrutura

Para se decidir impulsionar uma operação de reabilitação é necessário avaliar a sua viabilidade. Sendo ponderados os aspetos que dizem respeito ao tempo, custo, espaço e técnicas a utilizar.

Um levantamento correto dos danos otimiza a escolha correta do ensaio a realizar, possibilitando a determinação do rigor necessário e os custos envolvidos, tanto a nível de equipamentos como de mão-de-obra envolvida. No anexo I é apresentado um modelo para uma correta recolha dos dados da estrutura a inspecionar. [6]

Esta etapa é muito importante porque ajuda a perceber a urgência das intervenções.

A avaliação do estado da estrutura compreende as seguintes etapas: [7]

- ✓ *Caracterização das anomalias existentes com a definição da sua importância, extensão e intensidade de deterioração ou danos verificados;*
- ✓ *Identificação das causas das anomalias, principalmente quando estamos perante processos de deterioração progressivos;*
- ✓ *Avaliação das características residuais da estrutura e das condições de segurança;*

No caso de estruturas que foram alvo de danos severos deve proceder-se rapidamente à tomada de medidas urgentes. Através de escoramento, alívio de cargas e evacuação de pessoas e bens pode-se manter a segurança da estrutura de betão armado existente, bem como salvaguardar os utentes.

Através dos ensaios anteriormente referidos consegue-se quantificar, em termos de valor médio, as características físicas e mecânicas mais importantes do elemento de betão armado para a aferição do seu comportamento estrutural.

A escolha por um dos métodos deve ser feita por técnicos devidamente especializados e familiarizados com diversas técnicas de construção, bem como possuir um elevado conhecimento dos materiais e do seu comportamento ao longo dos tempos.

De uma forma geral, a avaliação das estruturas de betão armado passa pela elaboração rigorosa de planos de caracterização e diagnóstico, onde devem ser mencionados: [7]

- ✓ *Recolha e análise da informação existente;*
- ✓ *Avaliação das condições de serviço da estrutura;*
- ✓ *Visitas de inspeção;*
- ✓ *Realização de ensaios e de observações específicas;*
- ✓ *Análise e integração de toda a informação obtida e análise estrutural.*

O esquema que se apresenta na figura 29 é um modelo que poderá ser sugerido para ajudar na tomada de decisão relativamente às ações a considerar. [7]

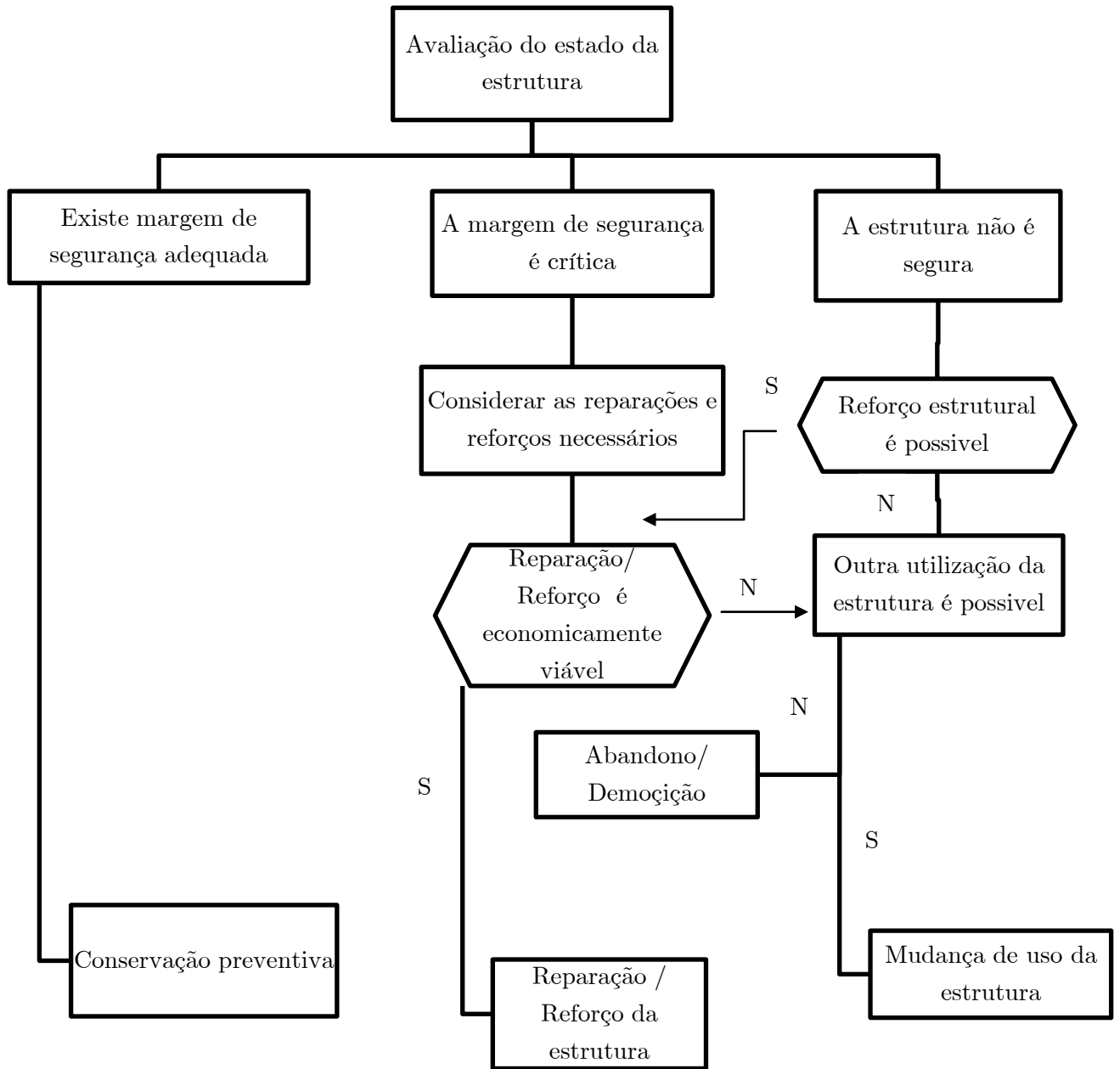


Figura 29: Modelo de tomada de decisão [7]

### **3.8 Síntese de métodos de inspeção e ensaio**

No decorrer deste trabalho foram apenas referidos métodos de inspeção e ensaio mais correntes para avaliação do estado de conservação e deterioração das estruturas de betão armado.

Devido à enorme variedade de ensaios e possíveis aplicações não foi possível estudar mais aprofundadamente e de forma mais completa todo o tipo de ensaios.

São apresentados no Anexo II os processos de avaliação existentes relacionando-os com a informação que permitem obter.

## 4. Reabilitação de Estruturas de Betão Armado

As principais anomalias das estruturas de betão armado estão relacionadas com o seu comportamento estrutural ou com a deterioração dos materiais que as constituem. As intervenções para impedir a deterioração dos materiais, aço e betão, são consideradas ações de reparação. Enquanto as relacionadas com o comportamento estrutural, como o caso de deficiente capacidade resistente, funcionamento inadequado, deformações elevadas ou fendilhações excessivas, são vistas como reforço estrutural.

A reparação é o ato de prevenir a evolução da deterioração reparando e/ou protegendo a estrutura. Com estas intervenções tenta manter-se, repor-se ou aumentar os aspetos funcionais dos edifícios, a nível de:

- Segurança a nível estrutural, de incêndio e ao uso;
- Habitabilidade e estanquidade a nível de higrotermicidade, qualidade do ar, visual, táctil e uso;
- Durabilidade e economia.

Várias medidas podem ser tomadas de forma a reparar ou reforçar as estruturas de betão armado. Entre elas destacam-se: [7]

- A demolição total ou parcial da estrutura, medida drástica onde normalmente se procede ao corte de alguns pisos, mantendo a integridade do resto da estrutura.  
Esta medida tem em consideração elevados danos nas fundações ou apoios.
- Limitação do uso, medida de caráter provisório ou definitivo dependendo do estado da estrutura.  
É usual transformar-se edifícios públicos ou escolas em habitação havendo redução significativa das ações na estrutura.
- Modificação do sistema estrutural ou substituição dos elementos danificados;

- Inclusão de elementos estruturais ocasionais;
- Reparação e reforço dos elementos estruturais, sendo as mais económicas.

#### 4.1 Metodologias de intervenção

Antes de se iniciar uma ação, seja ela de reparação ou reforço, deve-se definir o tipo de intervenção em função do nível de deterioração, da utilização da estrutura, da manutenção associada à técnica de intervenção e os custos. [23]

Para uma correta metodologia de reparação das estruturas classifica-se a estrutura tendo em conta os seguintes aspetos: [23]

- ✓ *Tipo de utilização e período de vida;*
- ✓ *Requisitos de desempenho funcional;*
- ✓ *Manutenção prevista;*
- ✓ *Possibilidade de realizar operações de reparações futuras;*
- ✓ *Aplicabilidade das técnicas de reparação à deterioração em causa;*
- ✓ *Condições de acesso;*
- ✓ *Custos.*

Uma intervenção é considerada adequada quando o método é eficiente para a reparação da deterioração existente. Quando consegue prevenir e eliminar as causas da sua origem e é adequada a agressividade do meio ambiente. [23]

A Norma EN1504 – Produtos e Sistemas para a Proteção e Reparação de Estruturas de Betão, regulamenta o reforço das estruturas de betão armado, define 37 métodos de reparação relacionados com 11 princípios, apresentados nos quadros 14 e 15). No quadro 16 são apresentados alguns exemplos aplicáveis para a reabilitação. [23]

Quadro 14: Princípios de reparação – Deterioração do betão [23]

Princípio	Definição	Método	Breve descrição
P1	Proteção contra substâncias agressivas	M1.1	Impregnação hidrófoba
		M1.2	Selagem dos poros do betão
		M1.3	Revestimento das fendas com membrana
		M1.4	Preenchimento das fendas
		M1.5	Alterar a fenda para junta
		M1.6	Proteção da estrutura com barreira exterior
		M1.7	Proteção superficial com pintura
P2	Controlo de humidade no betão	M2.1	Proteção com impregnação hidrófoba
		M2.2 a	Proteção superficial por selagem dos poros
		M2.2 b	Proteção superficial com pintura
		M2.3	Proteção da estrutura com barreira exterior
		M2.4	Desumidificação eletroquímica
P3	Substituição do betão degradado	M3.1	Argamassa colocada à colher
		M3.2	Betão moldado
		M3.3	Argamassa ou betão projetado
		M3.4	Substituição de elementos estruturais
P4	Reforço de elementos	M4.1	Substituição/ complementação das armaduras
		M4.2	Introdução de armaduras em furos
		M4.3	Reforço com armaduras exterior: chapas metálicas ou fibras de carbono
		M4.4	Encamisamento com betão ou argamassas
		M4.5	Injeção de fendas e vazios
		M4.6	Preenchimento por gravidade de fendas e vazios
		M4.7	Pré-esforço exterior
P5	Aumento da resistência do betão ao desgaste	M5.1 a	Aplicação de uma superfície de desgaste
		M5.1 b	Aplicação de membranas
		M5.2	Impregnação da superfície do betão
P6	Aumento da resistência química	M6.1 a	Aplicação de uma superfície de desgaste
		M6.1 b	Aplicação de membranas
		M6.2	Aplicação de um selante

Quadro 15: Princípios de reparação – Corrosão das armaduras [23]

Princípio	Definição	Método	Breve descrição
P7	Repassivação das armaduras	M7.1	Aumento de recobrimento com betão ou argamassa
		M7.2	Substituição do betão contaminado
		M7.3	Realcalinização eletroquímica
		M7.4	Realcalinização passiva
		M7.5	Dessalinização eletroquímica
P8	Aumento da resistividade elétrica do betão	M8.1	Controlo da humidade do betão com revestimentos superficiais
P9	Controlo das zonas catódicas das armaduras	M9.1 a	Controlo da penetração de oxigénio por saturação do betão
		M9.1 b	Controlo da penetração de oxigénio por membranas
P10	Proteção catódica das armaduras	M10.1 a	Proteção catódica passiva
		M10.1 b	Proteção catódica ativa
P11	Controlo das zonas anódicas das armaduras	M11.1	Proteção das armaduras com pinturas de sacrifício
		M11.2	Proteção de armaduras com pinturas de barreira
		M11.3	Inibidor de corrosão para reparação

Quadro 16: Exemplo de deterioração e princípios aplicáveis para a reabilitação [23]

Anomalia	Princípio	
	Deterioração do betão	Corrosão das armaduras
Penetração de substâncias agressivas	P1; P3; P6	P7; P8; P10
Fendas devidas a cargas, retração, temperatura, etc.	P1; P4	-
Carbonatação	P1; P2	P7; P8; P10
Reações álcalis-agregados	P2; P3	-
Erosão, abrasão	P3	-
Corrosão das armaduras	P3; P4	P7; P8; P9; P10; P11
Recobrimento reduzido	-	P7
Betão contaminado	-	P7

## 4.2 Materiais de reparação e reforço

A reabilitação de reparações requer o recurso a técnicas e materiais diferentes dos que são usualmente empregues numa nova construção, como o caso de resinas, betões e argamassas especiais ou ainda colocação de armaduras adicionais de reforço.

- Betões e argamassas especiais de alta resistência, com baixa retração ou até mesmo expansivos, utilizados para a realização de espessamentos, encamisamentos e cintagem de elementos estruturais;
- Betão projetado, normalmente utilizado quando as zonas a reforçar são extensas;
- Resinas, empregues em fissuras de elementos de betão, como produto para melhoria da ligação entre betões e argamassas com idades diferentes, e em impregnações superficiais para diminuir a porosidade e aumentar a estanquidade;
- Armadura adicional de reforço, através da inclusão de perfis metálicos aumenta-se a capacidade resistente do elemento de betão armado.

## 4.3 Reforço em fundações

As intervenções a nível das fundações requerem uma cuidada e correta preparação, para evitar que a estabilidade e resistência da estrutura sejam postas em causa. Recorre-se habitualmente ao betão armado devido à sua facilidade de moldagem, durabilidade e ótimas condições de conservação.

Para dar resposta ao aumento das cargas ou diminuir as tensões a que o elemento de betão armado está sujeito, recorre-se ao aumento da secção das fundações. De modo a evitar que a estrutura seja lesada devido a assentamentos deve previamente preparar-se os esquemas de reforço, seguindo esta ordem: [7]

- Reforço da rigidez de construção;
- Alívio estrutural das cargas transmitidas às fundações;

- Execução das obras de consolidação;
- Reaplicação das cargas.

#### 4.4 Reforço por encamisamento de betão armado

As vantagens do reforço por encamisamento de betão armado devem-se ao facto de recorrer a técnicas usuais e à sua simplicidade de execução. No entanto o aumento das dimensões dos elementos, bem como o tempo de espera para que o betão atinga a resistência pretendida são as suas maiores desvantagens.

O efeito de retração deve ser tido em consideração devido à ligação entre betões de diferentes idades. Para diminuir estes efeitos deve atender-se aos seguintes procedimentos:

[7]

- *Remoção do betão degradado ou desagregado;*
- *Escarificação manual, em pequenas superfícies, ou mecânica, em grandes superfícies;*
- *Limpeza e preparação das superfícies com remoção de gorduras do betão, de ferrugens das armaduras e eliminação de poeiras;*
- *Aumento de rugosidade da superfície de contacto para facilitar a aderência;*

As condições adequadas e aconselhadas para a execução do reforço são fornecidas seguindo estes passos: [7]

- *Saturar as superfícies dos betões com água, durante as seis horas anteriores à colocação do betão;*
- *Aplicar cuidadosamente o novo betão, com a consistência fluida adequada aos espaços a preencher, de modo a evitar as bolsas de ar;*
- *Proceder a uma cura adequada do novo betão por um período de pelo menos dez dias, por molhagem, cobertura com elementos saturados ou utilizando um agente de cura;*

- *O betão a utilizar no encamisamento deve ter características semelhantes ao betão existente, devendo a sua resistência à compressão ser superior pelo menos em 5MPa.*

#### 4.4.1 Armaduras adicionais

No reforço por encamisamento são utilizadas armaduras adicionais, normalmente varões de aço, malhas soldadas e estribos, que garantem a transferência das forças às novas armaduras.

Para uma correta aplicação destas armaduras é tido em consideração: [7]

- *As armaduras devem estar dispostas de acordo com as condições de ancoragem e espaçamentos, tendo em consideração as armaduras existentes;*
- *Verificar a ancoragem dos novos varões aos existentes;*
- *Para garantir a ancoragem das armaduras em cavidades, deve-se fazer um orifício em que a diferença entre o diâmetro do furo e o do varão seja aproximadamente 5mm. Seguidamente limpar e secar, preencher esta cavidade com resina de modo a que não permaneça ar no furo e de seguida colocar a armadura;*

#### 4.4.2 Reforço em pilares

Após avaliação da estrutura se chegarmos à conclusão que a capacidade resistente do elemento foi reduzida para apenas 45%, e estivermos perante um caso semelhante ao da figura 30, procede-se geralmente à integração de estribos de diâmetro de 8mm afastados entre si a 10cm. [7]

Se a capacidade ficar reduzida a 10% o afastamento dos estribos nas zonas mais danificadas passa a ser de apenas 5cm e 10cm nas restantes zonas.

E respeitar as seguintes medidas (figura 30): [7]

- Betão projetado:  $t \geq 50\text{mm}$
- Betão moldado “in situ”:  $t' \geq 70 - 100 \text{ mm}$

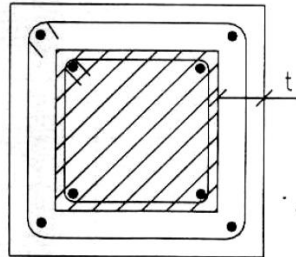


Figura 30: Reforço por encamisamento de betão em pilares [7]

Para que haja uma correta execução os reforços devem sempre estender-se aos pilares do piso abaixo, e sempre que possível ter continuidade na laje a toda a altura do reforço. [7]

Se após a execução de cálculos se considerar que o reforço feito pela armadura é insuficiente, então procede-se à incorporação de perfis metálicos ao betão armado.

São geralmente utilizadas cantoneiras ou chapas de aço, coladas com resinas épxi, normalmente introduzidas nos cantos dos pilares ligados entre si por barras soldadas. [7]

#### 4.5 Reforço em vigas e lajes

Geralmente no reforço de vigas e lajes recorre-se a chapas de aço ou perfis metálicos, colados como já anteriormente foi referido com resinas épxi. As chapas introduzidas nos elementos são previamente decapadas e posteriormente protegidas por uma película, que só será retirada mesmo antes da aplicação. A utilização de chapas metálicas é muito eficaz para o controlo da fendilhação.

Esta técnica geralmente é utilizada quando o elemento de betão armado, vigas ou lajes, está submetido a cargas superiores às iniciais, o betão existente é de má qualidade ou há falta de armaduras. A sua grande vantagem é o baixo custo e facilidade de execução.

#### 4.5.1 Encamisamento no reforço em vigas e lajes

As diferentes camadas de betão passam a trabalhar como uma única peça, ligadas entre si por aderência. Os reforços por encamisamento devem respeitar os seguintes valores (figura 31): [7]

- Vigas:  $t \geq 50\text{mm}$  e  $A_{sr} \geq 3\phi 12$
- Lajes:  $t' \geq 50\text{mm}$  e  $A's \geq \phi 8//0.20\text{m}$

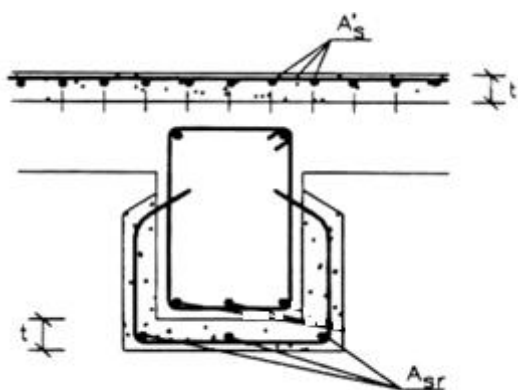


Figura 31: Reforço por encamisamento de betão em vigas e lajes [7]

#### 4.6 Reforço por encamisamento de betão projetado

Como o próprio nome indica, neste caso o betão é projetado de uma forma contínua sob pressão. Composto por cimento, água e agregados, podendo em casos particulares receber adições, como o caso de latex e fibras, e adjuvantes incorporadores de ar, aceleradores de presa.

A única diferença do betão normalmente utilizado é a sua forma de aplicação e agregados com dimensões mais pequenas. Mais aconselhável no restauro e reparação de grandes superfícies.

A incorporação de fibras de aço faz aumentar a sua capacidade resistente à compressão e permite um maior controlo a retração. A adição de latex possibilita o aumento da capacidade resistente à tração e flexão. [7]

As principais vantagens deste método são: [7]

- Excelente aderência ao betão já existente e às armaduras;
- Alto grau de compactação e baixa relação água-cimento que asseguram boas condições de resistência;
- Possibilidade de ser aplicado sobre superfícies horizontais, verticais ou mesmo inclinadas, sem recurso a nenhum tipo de cofragem;

#### 4.6.1 Aplicação

O betão é projetado a uma grande velocidade sobre a superfície do betão, provocando um impacto que permite uma boa compactação.

A mistura do betão projetado pode ser por via:[7]

- **Seca:** inicialmente são misturados os agregados húmidos e o cimento e lançados por ar comprimido para a pistola de projeção, onde posteriormente lhes é adicionado a água sob pressão.

Esta via é mais adequada para agregados leves e porosos. É usada para betões de maior resistência, o equipamento é de dimensões relativamente pequenas e de fácil montagem, permitindo maiores comprimentos de mangueira;

- **Húmida:** a água, o cimento e os agregados são misturados ao mesmo tempo e transportados por ar comprimido até ao canhão de projeção, onde é injetado mais ar para o lançamento.

Esta via garante uma melhor qualidade de trabalho. Há menos produção de pó, menos espessuras de aplicação, sendo no entanto mais cara e utilizada em trabalhos de grandes dimensões.

A aplicação deste tipo de betão deve ser feita em camadas de 4,5cm, nunca ultrapassando a espessura máxima total de 20cm. A distância ótima entre as extremidades do canhão e a superfície recetora está situada entre os 0,50m e 2,00m. (Figura 32) [7]

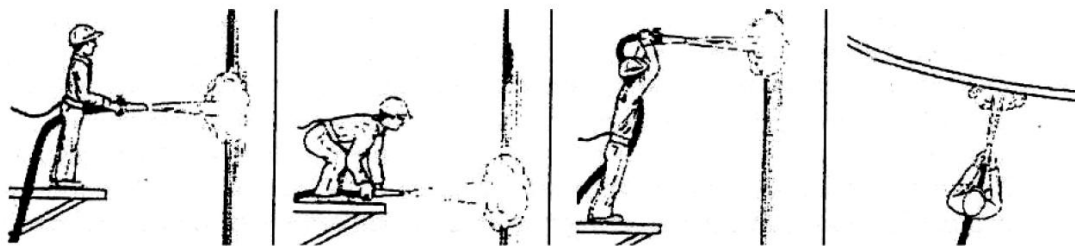


Figura 32: Exemplo de correta projeção do betão [7]

#### 4.6.2 Considerações antes da projeção

Antes de se proceder à projeção do betão devemos: [7]

- *Remover o betão desagregado ou degradado;*
- *Escarificar o betão de suporte para aumentar a rugosidade e descobrir as armaduras existentes;*
- *Limpar a superfície do betão e possível ferrugem das armaduras;*
- *Saturar com água o suporte durante as seis horas anteriores à aplicação;*
- *Colocar convenientemente as novas armaduras e prever armadura de pele para evitar a fissuração por retração;*
- *Após projeção cuidar das superfícies, por molhagem sucessivas durante um período mínimo de sete horas após a betonagem.*

#### 4.7 Reforço pela utilização de resinas épxi

Método geralmente utilizado quando se pretende melhor desempenho de uma estrutura de betão armado, face a novas utilizações, ou consolidar o elemento logo depois de ocorrer um incidente ou ainda para se proceder a substituição de armaduras.

A resina épxi é constituída por dois elementos, a resina épxi propriamente dita e um endurecedor, que após misturados obtêm-se, por polimerização, um produto com excelentes características de aderência.

As principais vantagens deste reforço são. [7]

- *Rapidez de execução;*

- *Compatibilidade com o projeto inicial de arquitetura;*
- *Instalações auxiliares simples;*
- *Ausência de materiais húmidos;*

As suas maiores desvantagens devem-se ao facto de ser necessário pessoal especializado para a execução dos trabalhos e existir uma necessidade de controlo da qualidade dos materiais.

Antes da sua aplicação deve-se: [7]

- *Limpar a superfície e aumentar, de modo não excessivo, a sua rugosidade;*
- *Aspirar a superfície final para retirar o pó;*

#### **4.7.1 Injeção de fissuras com resinas epoxi**

A injeção de resinas epoxi pode ser feita independentemente ou cumulativamente com o reforço de chapas metálicas.

As características da resina devem ser cuidadosamente estudadas para o caso a aplicar. Normalmente são utilizadas resinas com baixa viscosidade para permitir a sua injeção de forma lenta e permitir a penetração da resina nas fissuras.

Antes da injeção a fissura é vedada exteriormente ao longo do seu comprimento, deixando os tubos por onde se irá efetuar a injeção. Durante o processo deve-se garantir que não ficam bolsas de ar no interior das fissuras. [7]

#### **4.8 Reforço com CFRP**

Constituídos por fibras longas sob a forma de filamentos, impregnadas numa resina polimérica, os compósitos reforçados com fibras de carbono são conhecidos por terem uma alta resistência à tração. Contudo não apresentam um bom comportamento quando sujeitos a altas temperaturas e o seu custo é considerado elevado. Fatores como a sua leveza, durabilidade, resistência e elevado módulo de elasticidade, fazem do CFRP uma técnica de reforço aceitável. [24]

A imunidade à corrosão e facilidade de execução fazem com que os compósitos reforçados com fibras de carbono ganhem em alguns casos vantagem perante os reforços com armaduras adicionais.

O CFRP apresentam um vasto leque de utilização, podendo ser utilizados sempre que se pretende garantir maior capacidade resistente a: [24]

- Esforços de flexão;
- Esforços de corte;
- Ao impacto;
- Controlo de fissuras;

Apresentando o aspeto de mantas ou chapas com espessuras entre a e 2mm, podem ser aplicados em diversos elementos de betão armado, tais como lajes, vigas, pilares, pavimentos ou em aberturas de lajes. [24]

Os laminados de CFRP são colados exteriormente ao longo da superfície de betão, através de um adesivo, que deve ser escolhidos tendo em consideração o meio ambiente onde será aplicado.

Antes da aplicação do adesivo, devemos ter uma prévia preparação tanto no betão como com no laminado: [24]

- Picagem com passagem de escova de aço;
- Projeção de jato de areia;
- Decapagem com martelo de agulhas.



## 5. Considerações Finais

A realização desta dissertação teve por base a consulta de uma vasta bibliografia. Foi referido inúmeras vezes, a importância da conservação e manutenção do nosso parque habitacional, de modo a garantir a durabilidade das nossas estruturas de betão armado. Esta conservação passa pela implementação de medidas preventivas e não corretivas, de uma forma racional e o mais económico possível.

Existe uma enorme necessidade de consciencialização por parte dos projetistas, donos de obra, técnicos especializados e entidades executantes no que diz respeito à preocupação com o desempenho estrutural em todas as fases do processo de construção/ utilização.

Ao longo desta dissertação foram referidas as diferentes patologias das estruturas de betão armado, bem como as suas principais causas. Para que posteriormente se tomem decisões acertadas, tanto a nível de métodos de inspeção e ensaios a realizar como de medidas de reparação a tomar, os dados relativamente às patologias devem ser cuidadosamente analisados e efetuadas apenas por técnicos especializados.

É apresentado no anexo I uma ferramenta bastante útil para a recolha dos dados, que permite a identificação da patologia no que diz respeito a sua descrição, natureza, causas e localização.

Utilizados individualmente ou em conjunto os ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos, constituem uma ferramenta essencial na construção. Possibilitando a quantificação e avaliação da capacidade resistente das estruturas de betão armado.

A ampla gama atualmente existente e a evolução dos métodos de ensaio permite estudar e analisar as mais diversas situações, quer a nível de avaliação da resistência como de durabilidade das estruturas de betão armado.

A deterioração constante do nosso parque habitacional desperta cada vez mais o interesse por este tema e aumenta a consciencialização da necessidade da sua manutenção. Também acentua no mercado a preocupação com um controlo mais rigoroso nas novas construções, como o caso das condições de cura ótima do betão.

Aplicando assim os ensaios cada vez mais não só a estruturas de betão armado já existentes como também em construções novas, de forma a garantir que apresentem as características desejadas e esperadas.

Os ensaios devem ser efetuados por técnicos especializados e que conhecem na totalidade a técnica que estão a executar, para assim obter uma boa gestão dos custos, dos materiais e uma correta interpretação dos dados, caso contrário poderá conduzir a erros significativos e a tomadas de decisão desapropriadas.

Foram descritas apenas algumas técnicas de reparação e reforço das estruturas de betão armado, porque é um mercado em constante evolução. Descrevendo apenas, de forma sucinta, as técnicas mais usadas.

As estruturas de betão armado representam um elevado investimento, tanto a curto como a longo prazo. Para a sua idealização deve-se ter em consideração o seu desempenho, durabilidade e fiabilidade. São inúmeros os casos em que se perdem qualidade de vida devido a erros que poderiam ser evitados se o estudo da estrutura fosse mais cuidado.

## Referências bibliográficas

- [1] Freitas, Vasco Peixoto de; 2012; Manual de apoio ao projeto de reabilitação de edifícios antigos; ordem dos engenheiros região norte; FEUP; 1ª Edição;
- [2] Córias, Victor; Outubro 2006. Inspeções e Ensaios na reabilitação de edifícios; Instituto Superior Técnico; Lisboa;
- [3] Lança, Pedro; Apontamentos das Aulas de Conservação e Reabilitação da Construção; Durabilidade das Estruturas de Betão Armado; Escola Superior de Tecnologias e Gestão de Beja;
- [4] PATORREB, Março 2006; Prof. Vasco Peixoto de Freitas, Prof. Vítor Abrantes; Prof. César Diaz Gómez; 2º encontro sobre patologia e reabilitação de edifícios, volume I, Porto, FEUP e UPC.
- [5] Costa, António; Patologias de betão armado; Anomalias e Mecanismos de Deterioração; Reabilitação e Reforço de Estruturas; Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas; Instituto Superior Técnico; departamento de engenharia civil.
- [6] Padrão, José Avelino Loureiro Moreira; Setembro 2004; Técnicas de Inspeção e diagnóstico em Estruturas, Patologias da Construção, , MEST, FEUP
- [7] Castro, J. e Martins, J. M. 2006. Patologias do betão reparação e reforço de estruturas; serie reabilitação; 1ª edição.
- [8] Eng.º Taborda, Apontamentos das aulas de Reabilitação e Conservação de Edifícios; 2010; Introdução à corrosão do aço no betão, modelos de comportamento às ações agressivas; Instituto Superior de Engenharia do Porto; Mestrado em Tecnologias e Gestão das Construções;

- [9] Gouveia, João Carlos Mateus; Janeiro, 2010; Deterioração do betão por fenómenos de carbonatação: consequências nas armaduras de edificações após 50 na cidade Lisboa; Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
- [10] Nicholas J. Carino, 23 June, 2010; Nondestructive and in place; the methods to evaluate concrete structures; Special Sessions on Inspection and Diagnostics of Structures; REABILITAR 2010; National Laboratory of Civil Engineering (LNEC); Lisbon, Portugal
- [11] Guidebook on non-destructive testing of concrete structures; 2002; International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [12] J. Roma; Detetor de Armaduras; [www.jroma.pt/detector\\_armaduras.htm](http://www.jroma.pt/detector_armaduras.htm) (consultado Outubro, 2012);
- [13] Factorelevante; Engenharia e Sistemas, Lda., [www.factorelevante.pt](http://www.factorelevante.pt); (Consultado Março, 2011)
- [14] MR TOOLS; Produtos; Esclerómetro CM70; [www.mrtools.com.pt](http://www.mrtools.com.pt); (Consultado Março, 2012);
- [15] PINI, Lda.; Artigo: Método de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto; Téchne; [www.revistatechne.com.br](http://www.revistatechne.com.br) (consultado a Março de 2011);
- [16] Thomaz, Professor Eduardo C. S.; Notas de aulas; Esclerómetro, notas de aula.
- [17] Peres, L.D., Barbosa, M.P., Pinto, R. C. A.; Novembro, 2005; Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas. 1º Encontro Nacional de Pesquisa - Provet - Produção em Concreto Pré-Moldado.
- [18] Pereira, João Paulo Veludo; Coimbra 1999; Avaliação da Resistência à Compressão do Betão através de Ensaios Não-Destrutivos; Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra;
- [19] Civilgeeks.com; Artigo: Três Métodos no Destructivos para Determinar la Resistencia del Concreto, 2011; [www.civilgeeks.com](http://www.civilgeeks.com); (Consultado Setembro, 2012);

[20] Tony C. Liu; Leonard Millstein; 1999; Guide for Evaluation of Concrete Structures; Prior to Rehabilitation, Reported by ACI Committee 364.

[21] Nepomuceno, Miguel Costa Santos; Covilhã, 1999; Ensaios não destrutivos em Betão; Universidade da Beira Interior; Departamento de Engenharia Civil; Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica; Trabalho Síntese;

[22] Atlas Copo; [www.atlascopco.pt](http://www.atlascopco.pt) (Consultado a setembro de 2012);

[23] Appleton, J.; Costa, A.; Reparação das estruturas de betão armado; Reabilitação e Reforço de Estruturas; DECivil;

[24] Silva, Paulo Alexandre; 1999; Modelação e Análise de Estruturas de betão reforçadas com FRP; Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Porto, para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil;



## Anexos



## ANEXO I – Guia Para Inspeção Visual

### Ficha de Recolha de Dados



## Ficha de recolha de dados

1. **Identificação do Edifício** Ref.<sup>a</sup>: \_\_\_\_\_

Identificação do Edifício: \_\_\_\_\_

Motivo de Inspeção: Reclamação \_\_ Inspeção de rotina \_\_ Outro \_\_

Inspeção realizada por: \_\_\_\_\_ Hora: \_\_:\_\_ Data: \_\_/\_\_/\_\_

2. **Identificação de danos observados**

2.1 **Caraterização do local onde ocorreu anomalia**

Identificação do local: \_\_\_\_\_

Elemento/ Componente estrutural: \_\_\_\_\_

Intervenções anteriores: \_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Responsável: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Uso do edifício: \_\_\_\_\_

2.2 **Identificação das anomalias**

Tipo de dano:

Humidade \_\_ Erosão \_\_ Deformação \_\_ Fendas \_\_

Fissuras \_\_ Corrosão \_\_ Desprendimentos \_\_ Oxidação \_\_

Eflorescências \_\_ Organismos \_\_ Sujidade \_\_

Descrição do dano: \_\_\_\_\_

Observação visual da envolvente:

O dano é localizado? \_\_\_\_\_

Extensão aproximada: \_\_\_\_\_

Esquema da anomalia:

Existem outras anomalias? Sim \_\_ Não \_\_

Descrição: \_\_\_\_\_

História:

Data em que surgiu: \_\_\_\_\_ Como evoluiu: \_\_\_\_\_

Aparece e desaparece em ciclos? \_\_\_\_\_

### **2.3 Detalhes Construtivos**

Documentação existente:

Peças escritas: \_\_\_\_\_

Peças desenhadas: \_\_\_\_\_

Descrição do tipo de Estrutura:

Betão armado \_\_ Alvenaria \_\_ Madeira \_\_ Metálica \_\_

Descrição do sistema estrutural existente: \_\_\_\_\_

### **2.4 Caracterização Ambiental**

Localização do dano:

Na vertical: \_\_\_\_\_

Na horizontal: \_\_\_\_\_

Orientação do dano: \_\_\_\_\_

Nível de exposição:

H (altura do dano, em relação à rua) \_\_\_\_\_

D (distância em relação aos edifícios, situados em frente) \_\_\_\_\_

Nível de contaminação: \_\_\_\_\_

1 – alto; 2 – médio; 3 - Baixo

Observação: Necessidade de anexar fotografias ao modelo

### 3. Identificação do Mecanismo de Deterioração

Identificação da causa da deterioração:

- ✓ Caso particular

Necessária a intervenção de um técnico especializado

Observações: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

- ✓ Caso tipificado

- Dar por concluído o diagnóstico

Observações: \_\_\_\_\_

- Proceder a inspeção detalhada

Inspeção específica a realizar: \_\_\_\_\_

Locais de realização de ensaios: \_\_\_\_\_

Urgência de intervenção: \_\_\_\_\_

- ✓ Requer apenas manutenção

Data da próxima inspeção visual \_\_/\_\_/\_\_\_\_\_

Observações: \_\_\_\_\_

Data: \_\_/\_\_/\_\_\_\_\_ O técnico: \_\_\_\_\_



## ANEXO II – Processos de avaliação



Quadro 17: Avaliação das propriedades físicas/ químicas do betão armado 15]

Processo de Avaliação	Impacto acústico	Teste do teor de água	Teste de teor de cimento	Análise química	Teste do núcleo	Medição do potencial elétrico	Medição da resistência elétrica	Ensaio de flexão	Congelamento – descongelamento	Gama radioterapia	Medidor de Humidade nuclear	Teste de permeabilidade	Análise petrográficas	Ensaio de arrancamento	Esclerometria	Impulso ultra-sónico
Propriedades físicas/ químicas																
Acidez				X									X			
Teor de ar		X											X			
Reação alcali - carbonato													X			
Reação alcali – sílica													X			
Teor de cimento			X	X									X			
Composição química				X									X			
Teor de Cloreto				X	X								X			
Resistência a compressão					X									X	X	X
Agregados contaminados				X									X			
Mistura de água contaminada				X									X			
Ambiente de corrosão				X		X										
Deformação					X											
Densidade					X					X						
Alongamento					X											
Componentes congelados													X			

Quadro 18: Avaliação das propriedades físicas/ químicas do betão armado [15]

Processo de Avaliação	Impacto acústico	Teste do teor de água	Teste de teor de cimento	Análise química	Teste do núcleo	Medição do potencial elétrico	Medição da resistência elétrica	Ensaio de flexão	Congelamento – descongelamento	Gama radioterapia	Medidor de Humidade nuclear	Teste permeabilidade	Análise petrográficas	Ensaio arrancamento	Esclerometria	Impulso ultra-sónico
Propriedades físicas/ químicas																
Módulo de elasticidade					X											X
Módulo de rotura					X			X								
Teor de humidade					X		X				X					
Permeabilidade												X	X			
Resistência a tração - Pull off														X		
Qualidade dos agregados													X			
Resistência ao congelamento/ descongelamento					X				X				X			
Solidez					X					X			X			
Resistência ao sulfato				X									X			
Resistência a tração					X			X								
Homogeneidade	X												X		X	
Relação A/C													X			

Quadro 19: Avaliação das condições físicas do betão armado [15]

Processo de Avaliação	Emissões acústicas	Impacto acústico	Análise química	Teste do núcleo	Fibra ótica	Gama radioterapia	Termografia infravermelha	Ensaio de Carga	Análise petrográfica	Medição física	Radar	Esclerometria	Pulso ultra	Eco impulso ultra-sónico	Exame Visual
Condições físicas															
Fissuras									X						X
Deteriorização química			X						X						X
Corrosão do aço			X	X					X						X
Rotura/ fissuração	X	X		X	X		X		X	X	X		X	X	X
Corte transversal/ espessura				X		X				X			X		
Delaminação		X		X	X	X	X		X		X		X	X	X
Descoloração			X						X						X
Desagregação				X		X	X		X				X		X
Deformação															X
Efluorescência			X						X						X
Erosão									X						X
Danos do congelamento descongelamento									X						X
Corrosão				X	X	X	X		X				X		X
Dimensionamento															X
Fragmentação				X		X	X								X
Estratificação		X			X									X	X
Desempenho estrutural	X							X							X
Uniformidade do betão															

Quadro 20: Avaliação das propriedades e condições do betão armado [15]

Processo de Avaliação	Impacto acústico	Análise química	Teste de revestimento	Avaliação de armaduras	Medição do potencial elétrico	Gama radioterapia	Medição física	Radar	Teste de tensões	Eco impulso ultra-sónico	Inspeção visual
Propriedades e condições											
Aderência ao revestimento epoxi			X								
Fixação							X				
Teste a flexão							X				
Resistência a rotura									X		
Teor de carbono		X									
Composição química		X	X								
Propriedades do revestimento		X									
Recobrimento				X		X	X	X			
Continuidade da camada de epoxi			X								
Corrosão					X		X				X
Redução da área									X		
Forma							X				
Forma das ligações							X				
Resistência a tração									X		
Espessura do revestimento epoxi			X								
Resistência ao cisalhamento das juntas							X				
Resistência ao corte									X		
Redução da área									X		
Forma							X				
Forma das ligações							X				
Resistência a tração									X		
Revestimento epoxi			X								