



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de
betões de baixo teor de cimento

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil

Especialização em Construção Urbana

Autor: Rafael Paulo Rodrigues Oliveira.

Orientadores

Ricardo Nuno Francisco do Carmo

Hugo Sérgio Sousa Costa



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro de 2023

RESUMO

A diminuição da pegada ecológica associada aos materiais cimentícios constitui um assunto de grande relevância porque, durante todo o seu ciclo de vida, incluindo produção, colocação em obra, utilização, manutenção e demolição, existe libertação de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. Porém, contrariamente ao preconceito que frequentemente se tenta impor, o betão, comparativamente a outros materiais tais como cerâmicos e metálicos, tem um balanço energético muito favorável, com bons indicadores de sustentabilidade.

O uso de cimentos altamente reativos conjugado com a otimização da distribuição granulométrica e a redução do teor de água, com adição de superplastificantes, permite uma redução significativa do teor de cimento Portland nas misturas, garantindo o desempenho especificado. Atualmente, a maneira mais prática de reduzir o teor cimento é a sua substituição parcial por matérias-primas cimentícias, como cinzas volantes e escórias de alto forno. Todavia, tem a desvantagem de estar condicionada pela disponibilidade desses materiais, além da variação do custo.

O objetivo principal da presente dissertação é estudar com mais detalhe betões de baixo carbono - low carbon concrete (LCC), com reduzido teor de cimento. Para o efeito, foram produzidos diferentes LCC para dois níveis de resistência, com diferentes quantidades de cimento e diferentes compacidades, analisando a influência paramétrica, não apenas nas propriedades em estado fresco, mas também no estado endurecido. Foram caracterizadas as principais propriedades mecânicas dos betões LCC e de dois betões de referência de composição corrente, assim como o seu desempenho em termos durabilidade, particularmente no que se refere à resistência à carbonatação e à difusão dos cloretos. O estudo da durabilidade é essencial qualquer análise de sustentabilidade dos LCC. Por fim, estudou-se ainda a aderência entre os LCC e os varões de aço, pois as matrizes com menor quantidade de cimento podem ter uma aderência aos varões bastante diferente da dos betões correntes, o que tem consequências na fendilhação.

Palavras-chave: Low carbon concrete, reduzido teor de cimento, propriedades mecânicas, durabilidade, aderência.

ABSTRACT

Reducing the ecological footprint associated with cementitious materials is a matter of great relevance because, throughout their entire life cycle, including production, placing on site, use, maintenance and demolition, carbon dioxide (CO₂) is released into the atmosphere. However, contrary to the environmental prejudice that is often tried to impose, concrete, compared to other materials such as ceramics and metals, has a very favourable energy balance, with good sustainability indicators.

The use of highly reactive cements combined with the optimization of particle size distribution and the reduction of water content, with the addition of superplasticizers, allows a significant reduction in the Portland cement content of concrete mixtures, guaranteeing the specified performance. Currently, the most practical way to reduce cement content is its partial replacement with cementitious raw materials, such as fly ash and blast furnace slag. However, it has the disadvantage of being conditioned by the availability of these materials, in addition to the cost variation.

The main objective of this dissertation is to study in more detail low carbon concrete (LCC), with reduced cement content. For this purpose, different LCC were produced for two strength levels, with different amounts of cement and different compactness, analysing the parametric influence, not only on the properties in the fresh state, but also in the hardened state. The main mechanical properties of LCC concretes and of two reference concretes of current design were characterized, as well as their performance in terms of durability, particularly with regard to resistance to carbonation and chloride diffusion. The study of durability is essential for any LCC sustainability analysis. Finally, the bond between the LCC and the steel bars was also studied, as matrices with a smaller amount of cement can have a bond strength to the bars that is quite different from that of standard concrete, which has consequences for cracking.

Keywords: Low carbon concrete, mechanical properties, durability, bond strength.

AGRADECIMENTOS

Desde o primeiro dia ao longo do meu percurso no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra foram muitos professores, amigos e família que contribuíram para o meu crescimento, não só no contexto académico e profissional como também enquanto pessoa.

Aos professores Doutor Ricardo do Carmo e Doutor Hugo Costa, pela excelente orientação, suporte, disponibilidade e conhecimento facultados ao longo da minha formação. Agradeço pelo incentivo, pelos conselhos e pela amizade que foram fundamentais para a realização desta dissertação.

Um agradecimento também ao técnico António Amaral por toda a ajuda facultada e pela alegria.

Aos meus colegas Ana Rodrigues e Augusto Soares, um agradecimento enorme por toda a ajuda proporcionada para a concretização desta investigação.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, em especial o Departamento de Engenharia Civil pela oportunidade de desenvolver uma investigação de carácter experimental efetuado em sua maioria no laboratório de estruturas e também no laboratório de materiais de construção.

À minha tia Julia expresso um profundo respeito e agradecimento por todo apoio, paciência e conselho proporcionados.

Às minhas avós Joana e Albertina, um agradecimento enorme pelo imenso carinho e apoio no decorrer deste trabalho e que, mesmo estando a quilómetros de distância de Portugal, o incentivo ao esforço e apoio foram incondicionais.

À minha mãe e ao meu pai reservo um profundo e eterno carinho, gratidão e respeito por serem exemplos de perseverança e resiliência e por permitir que tudo isto e outras vivências fossem possíveis.

A todos, muitíssimo obrigado!

ÍNDICE

Resumo	i
<i>Abstract</i>	ii
Agradecimentos	iii
Índice.....	iv
Índice de tabelas	vii
Índice de figuras.....	viii
Lista de siglas e acrónimos	xii
Lista de símbolos	xiii
1 Introdução	15
1.1 Motivação.....	15
1.2 Objetivo.....	15
1.3 Estrutura do Trabalho	16
2 Betão Low cement concrete (LCC).....	17
2.1 Definição do material	17
2.2 Constituintes do betão.....	17
2.2.1 Cimento	17
2.2.2 Água de amassadura.....	18
2.2.3 Agregados.....	18
2.2.4 Adições	18
2.2.5 Adjuvantes.....	20
2.3 Betão com baixo teor de carbono.....	20
2.3.1 Estratégia de redução da pegada carbónica.....	20
2.3.2 Formas de produção e principais características	23
2.3.3 Implicações no comportamento das estruturas de betão.....	23
2.3.4 Sustentabilidade dos betões LCC	24
3 Durabilidade do betão armado.....	24
3.1 Considerações gerais sobre durabilidade.....	24
3.1.1 Vida útil das estruturas em betão	26
3.1.2 Rede porosa.....	27
3.2 Mecanismos de transporte	29
3.2.1 Permeabilidade.....	29

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

3.2.2	Absorção capilar	30
3.2.3	Difusão	31
3.3	Agentes agressivos e mecanismos de deterioração	32
3.3.1	Ataque de ácidos.....	32
3.3.2	Ataque de sulfatos	32
3.3.3	Reação álcalis-agregado	32
3.3.4	Carbonatação	33
3.3.5	Considerações gerais sobre a corrosão	38
4	Aderência aço-betão	39
4.1	Introdução.....	39
4.2	Componentes da aderência.....	40
4.2.1	Componente de adesão química.....	40
4.2.2	Componente da aderência por atrito	41
4.2.3	Componente de aderência por ancoragem mecânica	41
4.3	Fatores que influenciam a aderência	42
4.4	Curvas tensão de aderência <i>vs</i> escorregamento	43
5	Programa experimental	45
5.1	Materiais constituintes do betão.....	45
5.1.1	Agregados.....	45
5.1.2	Água de amassadura.....	46
5.1.3	Ligantes.....	46
5.1.4	Adjuvante superplastificante	48
5.1.5	Varões de aço.....	48
5.2	Composições e amassaduras.....	49
5.3	Propriedades mecânicas	52
5.3.1	Resistência a compressão	52
5.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	53
5.3.3	Módulo de elasticidade	54
5.3.4	Resistência à tração por flexão.....	54
5.3.5	Ensaio à retração ao longo do tempo	55
5.4	Desempenho associado à durabilidade.....	56
5.4.1	Ensaio de carbonatação acelerada.....	57
5.4.2	Difusão de cloretos	57

5.4.3	Absorção capilar (capilaridade).....	60
5.4.4	Resistividade.....	61
5.5	Ensaio de aderência “pull-out”	63
6	Análise de resultados	66
6.1	Propriedades mecânicas	66
6.1.1	Resistência a compressão	66
6.1.2	Resistência à tração por compressão diametral	70
6.1.3	Resistência à tração por flexão.....	72
6.1.4	Módulo de elasticidade	73
6.2	Retração.....	74
6.3	Durabilidade.....	75
6.3.1	Absorção de água por capilaridade	75
6.3.2	Resistividade.....	77
6.3.3	Difusão dos cloretos	78
6.3.4	Carbonatação	81
6.4	Tensão de aderência.....	82
7	Conclusões.....	88
7.1	Principais Conclusões	88
7.2	Desenvolvimentos Futuros.....	90
	Referências bibliográficas	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Massa volúmica dos agregados	46
Tabela 2: Massa volúmica dos ligantes.....	47
Tabela 3: Propriedades do aço A500 NR SD.	49
Tabela 4: Betões LCC produzidos.....	50
Tabela 5: Betões de referência.	50
Tabela 6: Composição das misturas para a classe alvo de 40 MPa.....	50
Tabela 7: Composição das misturas para a classe alvo de 55 MPa.....	51
Tabela 8: Potencial elétrico e a duração do ensaio.	59
Tabela 9: Penetração de cloretos baseada na resistividade.	62
Tabela 10: Resistência dos betões à compressão (provetes cúbicos).	66
Tabela 11: Valores do parâmetro s adotados para cada mistura.....	70
Tabela 12: Tensão média de aderência (MPa).....	86
Tabela 13: Tensão máxima de aderência (MPa).....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição volumétrica dos constituintes.....	17
Figura 2: Emissões líquidas de CO ₂ (kg) por tonelada de clínquer e por tonelada de cimento, entre 2011 e 2014 (Wermelinger De Matos, 2015).	21
Figura 3: Evolução da proporção de mistura tradicional para LCC (Proske et al., 2014).....	22
Figura 4: Conceito de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão e suas inter-relações (M. Coutinho, 2004).....	26
Figura 5: Vida útil e vida residual (Silva, 2014).	27
Figura 6: Modelo simplificado da estrutura da pasta de cimento (M. Coutinho, 2004).	28
Figura 7: Relação do coeficiente de permeabilidade e a razão A/C e a porosidade capilar numa pasta de cimento com grau de hidratação de 93% (A.M. Neville, 2010).	30
Figura 8: Representação da influência da razão A/C e cura na rede porosa capilar (M. Coutinho, 2004).....	31
Figura 9: Avanço da frente de carbonatação e suas consequências (Silva, 2014).	34
Figura 10: Betão armado em estado alcalino (Costa, 2006).	34
Figura 11: Betão armado carbonatado (Costa, 2006).....	35
Figura 12: Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fenda (Silva, 2014).	36
Figura 13: Fatores que influenciam a carbonatação como: humidade relativa, razão A/C, quantidade cimento e a resistência a compressão do betão (Silva, 2014).....	37
Figura 14: Processo de penetração de iões cloretos no interior do concreto armado (Arantes, 2020).....	38
Figura 15: Fendilhação e destacamento do betão devido a corrosão das armaduras.	39
Figura 16: Ligação química entre os átomos de betão e do aço.	41
Figura 17: Representação esquemática da aderência por atrito (Soares, 2020).....	41
Figura 18: Representação esquemática da ancoragem mecânica (Soares, 2020).....	42
Figura 19: Curvas de tensão de aderência versus escorregamento (Leonhardt & Monnig, 2008).....	43
Figura 20: Modelos de curvas padrão de tensão de aderência versus escorregamento propostas no Bulletin 10 da FIB (FIB BULLETIN 10, 2000) (Louro, 2011).....	44

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

Figura 21: Microfissuração do betão em torno do varão de aço em decorrência da mobilização da aderência (Fusco, 1995).	44
Figura 22: Areia fina 0/1 mm	45
Figura 23: Brita calcária 6/14 mm.....	45
Figura 24: Areia média 0/4 mm.....	46
Figura 25: Areão 4/8 mm.....	46
Figura 26: Cimento CEM I 52,5R.....	47
Figura 27: a) Fíler calcário; b) Cinza volante.....	47
Figura 28: Adjuvante MasterGlenium 526.	48
Figura 29: Varão nervurado Ø12 da classe A500 NR-SD.....	48
Figura 30: Betonagem: a) Pesagem dos materiais; b) Misturadora trabalhando; c) Enchimento dos moldes para ensaios mecânicos e de durabilidade; d) Enchimento de provetes para ensaios de pull-out.	51
Figura 31: Ensaio de resistência à compressão do betão.....	53
Figura 32: Ensaio de compressão diametral em provete cilíndrico.....	53
Figura 33: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade do betão.	54
Figura 34: Ensaio para a determinação da resistência à tração por flexão.	55
Figura 35: Ensaio de determinação da retração de um provete de betão.....	56
Figura 36 Ensaio de carbonatação: a) impermeabilização das faces; b) provetes dentro da câmara de carbonatação; c) pulverização com solução de fenolftaleína.	57
Figura 37: Provetes em betão ligados a fonte de alimentação.	58
Figura 38: a) Provetes em betão partidos ao meio; b) Provetes com as superfícies pulverizadas com nitrato de prata.	59
Figura 39: Procedimento do ensaio: a) Provetes em contacto com a lamina de água; b) Pesagem do provete após o contacto com a lamina de água.	61
Figura 40: Equipamento usado para o ensaio.....	61
Figura 41: Marcações no provete	62
Figura 42: Preparação e posicionamento dos varões nos moldes dos provetes para ensaio pull-out.....	63
Figura 43: Equipamento usado no ensaio de aderência: a) Central hidráulica e computador para registo de dados; b) Pormenor do atuador de carga.	64
Figura 44: Princípio do teste de arrancamento segundo a norma EN 10080 (EN 10080, 2005).	64
Figura 45: Estrutura metálica de encaixe conjuntamente com o provete de ensaio.	65

Figura 46: Esquema do ensaio de aderência: A – Atuador; B – Provete de ensaio; C – LVDT's; D - Estrutura metálica de suporte e reação.....	65
Figura 47: Desenvolvimento da resistência à compressão dos betões LCC e RC ao longo do tempo.....	66
Figura 48: Rácio da evolução da resistência dos betões entre os 28 e os 90 dias de idade.	67
Figura 49: Evolução da curva de endurecimento dos betões da classe 40 MPa.....	68
Figura 50: Evolução da curva de endurecimento dos betões da classe 55 MPa.....	68
Figura 51: Comparação das resistências à tração por compressão diametral dos RC e dos LCC aos 28 e 90 dias.....	70
Figura 52: Rácio da evolução da resistência à tração por compressão diametral dos betões entre os 28 aos 90 dias de idade.	71
Figura 53: Resistências à tração por flexão comparativamente à resistência à tração compressão diametral.....	72
Figura 54: Rácio entre a resistência à tração por flexão e por compressão diametral.	72
Figura 55: Módulo de elasticidade dos betões para 28 e 90 dias de idade.....	73
Figura 56: Rácio da evolução do módulo de elasticidade entre os 28 aos 90 dias de idade.	73
Figura 57: Evolução da retração de cada mistura produzida ao longo do tempo..	75
Figura 58: Evolução da quantidade de água absorvida por unidade de superfície aos 28 dias.	75
Figura 59: Evolução da quantidade de água absorvida por unidade de superfície aos 56 dias.	76
Figura 60: Evolução da absorção capilar dos LCC's e dos RC's aos 28 dias de idade.	77
Figura 61: Variação da resistividade para cada mistura com a idade.....	78
Figura 62: Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias de idade.	79
Figura 63: Coeficiente entre os coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 90 dias de idade.....	79
Figura 64: Variação do coeficiente de difusão de cloretos relativamente a quantidade de pozolana nas misturas.	80
Figura 65: Evolução da profundidade de carbonatação, mm, para cada mistura para os períodos de exposição (28, 56 e 90 dias).	81
Figura 66: Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo de exposição acelerada ao CO ₂	82

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

Figura 67: Aderência LCC40_C125_AC100.....	83
Figura 68: Aderência LCC40_C150_AC95.....	84
Figura 69: Aderência LCC40_C175_AC90.....	84
Figura 70: Aderência LCC55_C150_AC80.....	84
Figura 71: Aderência LCC55_C175_AC70.....	85
Figura 72: Correlação entre a tensão de aderência e a relação A/C.....	87

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

LCC	Low carbon concrete
FIB	Fédération Internationale du Béton
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RC	Reference Concrete
NP	Norma portuguesa
EN	European Norm (Norma europeia)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
EC	Eurocódigo
A/C	Relação água/cimento
CV	Cinza volante (fly ash)
GJ	Gigajoule
CSH	Silicato de cálcio hidratado
RAS	Reações álcalis-sílica
RAC	Reações álcalis-carbonato
pH	Potencial hidrogeniônico
CO ₂	Dióxido de carbono (gás carbónico)
OH ⁻	Hidróxilos
CaCO ₃	Carbonato de cálcio (calcite)
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio (brucite)
H ₂ CO ₃	Ácido carbónico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
Cl ⁻	Ião cloreto
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcico

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

kN	Quilonewton
V	Velocidade (m/s)
k	Coefficiente de permeabilidade à água (m/s)
i	Gradiente de pressão hidráulica (adimensional)
f_{syk}	Valor característico da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% à tração das armaduras de betão armado
f_{suk}	Tensão de rotura à tracção do aço
f_{cm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ctm}	Valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ct}	Valor da tensão de rotura do betão à tração por compressão diametral
F	Força
L	Comprimento da aresta de contacto do provete no ensaio de resistência a tração por compressão diametral
d	Dimensão da secção transversal de provetes
E_c	Módulo de elasticidade do betão aos 28 dias de idade
f_{ctf}	Resistência do betão à tração por flexão

Alfabeto grego

μ	Coefficiente de atrito
ϵ_{suk}	Extensão última característica do aço
ϵ_{cs}	Extensão por retração plástica do betão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A combinação do betão com o aço deu origem ao material estrutural com maior sucesso na execução de obras de engenharia civil: o betão armado. Durante o ciclo de vida das estruturas de betão, incluindo extração de matéria-prima, produção, colocação em obra, exploração e demolição, implica a libertação de CO₂ para a atmosfera. Considerando as preocupações atuais com o ambiente, interessa desenvolver soluções de betão que tenham menor impacte ambiental. A produção e a caracterização de Low carbon concrete (LCC) com reduzido teor de cimento enquadra-se nesta linha, pois o cimento é o constituinte com maior impacte ambiental.

Prevê-se que a utilização destes betões seja cada vez maior, principalmente por motivos ambientais. O presente trabalho é dedicado ao estudo de diferentes betões LCC com baixas dosagens de cimento, pretendendo-se avaliar o seu comportamento em termos de propriedades mecânicas, durabilidade e aderência com os varões de aço.

1.2 Objetivo

O principal objetivo da presente dissertação consiste no estudo de betões com reduzidas dosagens de cimento, especificamente através da caracterização a nível das propriedades mecânicas, do desempenho em termos de durabilidade e da aderência com os varões aço, a qual tem grande influência na fendilhação das estruturas de betão armado.

Objetivos específicos:

- Produzir diferentes betões LCC, com variação do valor alvo de resistência à compressão em dois níveis, bem como do teor de cimento para cada nível, sendo a pasta ligante obtida pela combinação de cimento, com adições de cinza volante (classe F) e fíler calcário.
- Caracterizar o comportamento mecânico dos betões LCC produzidos, incluindo a resistência à compressão, resistência à tração por flexão, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade;
- Caracterizar, nos LCC produzidos, as principais propriedades que influenciam a durabilidade, nomeadamente a absorção de água por

capilaridade, a resistividade, a resistência à difusão dos cloretos e a resistência à carbonatação;

- Estudar a aderência na interface entre os LCC e os varões de aço, a qual está diretamente relacionada com a fendilhação do betão, especificamente o espaçamento entre fendas e a largura de fendas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido por 7 capítulos. Seguidamente apresenta-se um resumo de cada um desses capítulos.

Capítulo 1. Introdução: Descreve-se a fundamentação e a estrutura do trabalho, bem como os objetivos a serem cumpridos.

Capítulo 2. Betão LCC: Apresenta-se um resumo dos aspetos mais importantes sobre o que é o LCC a nível do material, os constituintes da sua matriz e a sua caracterização. Efetua-se uma abordagem sobre a pegada ambiental do betão armado. Definem-se as metodologias para a formulação e produção de LCC, as suas características, o seu impacto no meio ambiente e a sua implicação em termos de durabilidade.

Capítulo 3. Aderência aço-betão: Neste tópico são descritas as caracterizações da aderência na interface betão-aço, mais concretamente a origem das tensões, as componentes da aderência, os fatores influenciadores da aderência e a análise da curva tensão de aderência *versus* escorregamento.

Capítulo 4. Durabilidade das estruturas de betão armado: Abordam-se os fatores que influenciam a durabilidade do betão armado, incluindo os mecanismos de penetração da água e de agentes agressivos, algumas patologias que condicionam a durabilidade e outros subtópicos correlacionados com a durabilidade do material. Como causas da maioria dos problemas de corrosão do aço e das conseqüentes patologias do betão armado, é dado maior foco à carbonatação e à difusão dos cloretos no betão.

Capítulo 5. Programa experimental: Descrevem-se os betões LCC desenvolvidos, incluindo a caracterização de todos os materiais usados, a composição das misturas e a betonagem, os ensaios realizados para a caracterização das propriedades mecânicas e também das propriedades ligadas à durabilidade. São ainda descritos os ensaios utilizados para determinar a tensão de aderência.

Capítulo 6. Análise de resultados. São apresentados e discutidos os resultados dos vários ensaios realizados nos betões LCC.

Capítulo 7. Conclusões. Apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho.

2 BETÃO LOW CEMENT CONCRETE (LCC)

2.1 Definição do material

O betão é um material artificial formado pela mistura quantificada de cimento, água, agregados grossos e agregados finos, além de adjuvantes e adições. Para um comportamento adequado do betão, o mesmo deve ser convenientemente colocado e compactado. Depois da compactação, apresenta uma estrutura fechada, ou seja, o teor em ar em volume não excede geralmente 3% quando a máxima dimensão dos agregados é igual ou superior a 16 mm e 4% quando a máxima dimensão dos agregados é menor que 16 mm. Este teor limite de ar não inclui ar introduzido nem os poros dos agregados, isto é, trata-se apenas de ar aprisionado que não foi expulso em resultado da compactação. A compactidade (σ) no estado fresco é um dos parâmetros de formulação que permite avaliar essa densidade da estrutura do betão material. A mesma é definida como sendo o quociente entre o volume da parte sólida do betão, composta pelos agregados, ligante e adições, e o volume aparente do betão compactado. O índice de vazios (I) é um parâmetro complementar, sendo a soma dos dois rácios correspondente à unidade ($\sigma + I = 1$), (Figura 1).

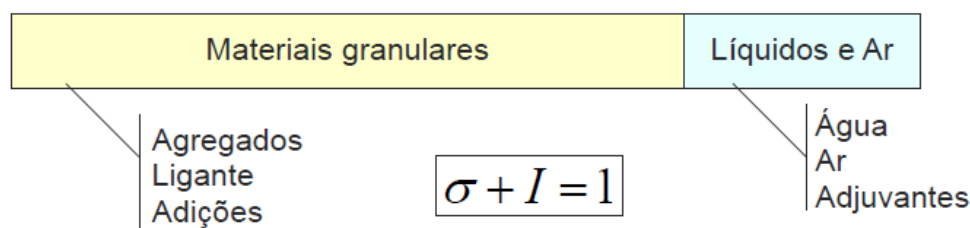


Figura 1: Distribuição volumétrica dos constituintes.

Após a betonagem, a presa e o endurecimento inicia-se pouco depois, atingindo-se aos 28 dias de idade cerca de 60 a 90% da sua resistência final, embora dependa do tipo de cimento e da cura utilizada.

2.2 Constituintes do betão

2.2.1 Cimento

O cimento (ligante hidráulico) é um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água.

A produção cimento resume-se primeiro à extração de calcário e a argila, depois esta matéria-prima é cozida a temperaturas da ordem de 1450 °C, originando

diversas reações químicas e formando novos compostos que, ao arrefecerem, aglomeram-se em frações com dimensões variáveis (2 a 20 mm) designado por clínquer (Costa & Appleton, 2002).

Após o arrefecimento, o clínquer é moído juntamente com outras adições, para facilitar a moagem, e gesso para regular o tempo de presa. O ligante assim obtido é designado correntemente por cimento Portland (Costa & Appleton, 2002). Na fase de moagem, podem ser adicionadas várias adições (pozolanas, cinzas volantes, escórias de alto forno, etc.) para modificar as suas características. Podem ainda ser adicionadas adições inertes em quantidades que não excedam 15%, de modo a não prejudicarem as propriedades do cimento.

2.2.2 Água de amassadura

A água desempenha dois papéis fundamentais nas duas fases que o betão está sujeito. Na fase da massa fresca, a água confere trabalhabilidade adequada ao betão de forma a permitir uma boa colocação e compactação. Na fase de endurecimento a água participa nas reações de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão. Para que seja adequada ao fabrico do betão é necessário que não contenha matérias prejudiciais. A água potável pode ser utilizada no fabrico do betão, sem necessidade de cumprimento de ensaios adicionais.

2.2.3 Agregados

Os agregados são constituídos por elementos naturais ou artificiais, britados ou não, com partículas de tamanho e formas adequadas para o fabrico de betão. No passado, os agregados eram denominados de inertes devido ao facto de se considerar que não tinham um papel significativo nas reações químicas de endurecimento do betão. Porém alguns destes materiais podem apresentar reatividade química importante que, em certas circunstâncias, podem conduzir à deterioração do betão como, por exemplo, as reações álcalis-sílica, razão pela qual a designação foi alterada para agregados (Costa & Appleton, 2002).

Relativamente às dimensões, os agregados podem classificar-se em areias, ou agregados finos, e agregados grossos. As areias são agregados com máxima dimensão inferior a 5 mm, designando-se por areia rolada quando é natural e areia britada quando obtida por fratura artificial. Os agregados grossos apresentam dimensões iguais ou superiores a 5 mm, designando-se por godos quando são de origem natural e por britas e gravilhas, quando são obtidos por fratura artificial, geralmente por britagem (J. Coutinho, 1999).

2.2.4 Adições

Classificam-se como sendo materiais inorgânicos finamente divididos (moídos ou não) que podem ser adicionados ao betão ou às argamassas com a finalidade

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

de melhorar certas propriedades ou para adquirir propriedades especiais. Normalmente utilizam-se numa proporção em relação ao peso de cimento e em percentagens superiores a 5%.

As adições do tipo 1 têm propriedades quase inertes, ou seja, não participam nas reações do betão no estado fresco e nem se enquadram na categoria dos materiais pozolânicos. São geralmente usadas para o melhoramento da trabalhabilidade e compacidade da mistura. Como exemplo tem-se o filler calcário.

As adições do tipo 2 apresentam propriedades não inertes, ou melhor, entram nas reações hidráulicas latentes, sendo usadas para melhorar a reologia do betão fresco (modo de escoar) e as propriedades em estado endurecido. Possuem também propriedades pozolânicas, ou seja, reagem com a cal hidratada no interior do betão e, na presença de água, formam silicatos de cálcio hidratados que refinam e densificam a matriz. As adições do tipo 2 tem a mesma estrutura química dos materiais pozolânicos e são exemplos a escória granulada de alto forno moída, cinzas volantes, sílica de fumo, entre outros.

Uma vez que a maioria dos betões com reduzido teor de cimento focam-se numa formulação à base de cimento Portland com adição de filler e de cinzas volantes, detalham-se mais pormenorizadamente as mesmas.

Filler calcário

O filler calcário é um material obtido principalmente através da moagem fina de calcário, com uma granulometria idêntica ou mais fina que a do cimento, ou seja, possui uma granulometria muito fina, o que faz desse material uma ótima associação para aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade de argamassas e betões (Figura 4). O filler calcário tem o efeito de preencher os vazios entre os agregados, aumentando a compacidade e, conseqüentemente, a resistência.

Cinzas volantes

As cinzas volantes são obtidas principalmente da combustão do carvão pulverizado nas centrais termoelétricas e constituem um pó mineral caracterizado por reagir quimicamente nas misturas cimentícias. Quando incorporadas nas condições e proporções adequadas proporcionam ganhos significativos no desempenho e no custo dos betões e argamassas, principalmente porque permitem reduzir o consumo do cimento e melhorar a durabilidade e algumas propriedades mecânicas.

2.2.5 Adjuvantes

Os adjuvantes são produtos adicionados em pequenas quantidades em função da massa de cimento, originando modificações nas propriedades do betão fresco ou endurecido. São utilizadas em percentagens inferiores a 5% em relação à massa de cimento.

Os chamados superplastificantes e redutores de água são os que terão maior ênfase no que diz respeito a esta dissertação, uma vez que permitem a redução da água de amassadura sem comprometer, ou até melhorando, a trabalhabilidade, resultando assim num aumento da resistência. Distinguem-se em plastificantes, que reduzem o teor de água entre 5 e 12% e os superplastificantes ou redutores de água de alta gama, que reduzem o teor de água mais de 12%.

Relativamente à composição química podem ser distinguidos em: i) Lenhosulfonatos – Redutores de água de 1ª geração – reduzem a água até 12%; ii) Melaminas ou naftalenos - Redutores de água de 2ª geração – reduzem a água até 25%; iii) Policarboxilatos - redutores de água de 3ª geração – reduzem a água até 40% (IPQ, 2000).

2.3 Betão com baixo teor de carbono

2.3.1 Estratégia de redução da pegada carbónica

Entrando na questão relativa a pegada ecológica do material betão, o cimento Portland classifica-se como o material constituinte mais prejudicial em termos de impacto ambiental.

Segundo dados da *United States Geological Survey (USGS)* (USGS, 2023) no ano de 2022 registou-se uma produção anual mundial que ronda 4.100 milhões de toneladas de cimento sendo a China e a Índia os dois maiores produtores. A produção de 1 tonelada de cimento portland liberta cerca de 850 kg de CO₂, esta indústria contribui com cerca de 7%, ou mais, do total de emissões de gases com efeito de estufa (Fennis & Walraven, 2012) (Figura 2). Outro impacto ambiental adverso está relacionado com o muito elevado consumo de energia no processo de fabrico do cimento, que é apenas superado pela produção de alumínio e de aço, atingindo valores próximos de cerca de 4 GJ por tonelada (Camões, 2011) (Ige et al., 2022).

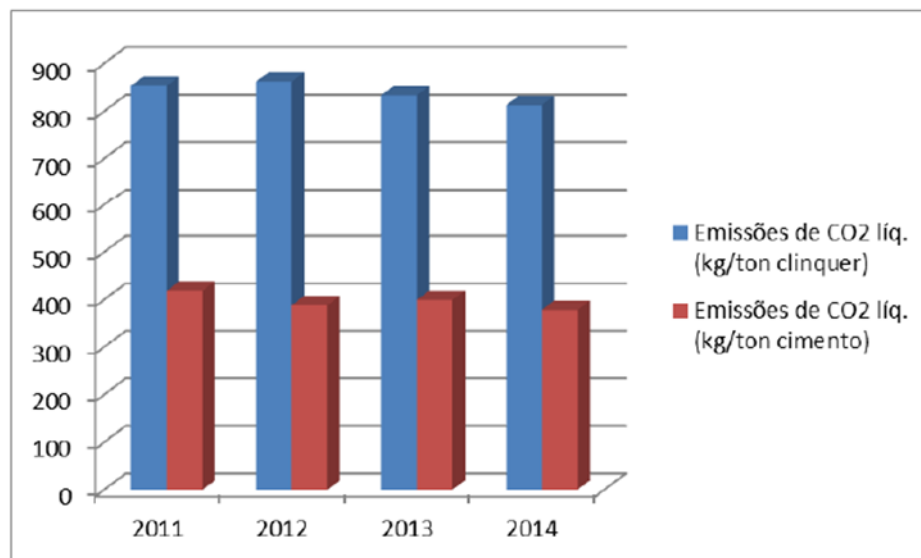


Figura 2: Emissões líquidas de CO₂ (kg) por tonelada de clínquer e por tonelada de cimento, entre 2011 e 2014 (Wermelinger De Matos, 2015).

Alem dos problemas ambientais, o acréscimo relevante do volume de construção e a notável negligencia na durabilidade da maioria das construções desencadeou uma diminuição muito grande dos recursos naturais renováveis. (Camões, 2011). Tendo em consideração a crescente preocupação ambiental, surge a necessidade de criar alternativas que promovam a sustentabilidade do setor da construção civil e uma delas consiste em reduzir a produção e o consumo de cimento Portland. Convém referir que o uso de grandes quantidades de cimento também apresenta outras desvantagens, origina mais reações calorificas e exotérmicas de hidratação e aumenta a retração plástica que, por sua vez, pode originar ou agravar a fendilhação do betão. A redução da dosagem de cimento, principalmente da parcela de clínquer, pode ser compensada através da otimização granulométrica (Fennis & Walraven, 2012), da utilização de cimentos de elevada resistência, da diminuição da água de amassadura, da utilização de superplastificantes e pela substituição parcial do cimento por adições (Robalo et al., 2018), resultando assim o betão LCC com reduzido teor de cimento (Figura 3).

O incentivo à redução da percentagem de cimento usado na pasta ligante tem sido promovido de maneira a assegurar o desenvolvimento sustentável da indústria do betão.

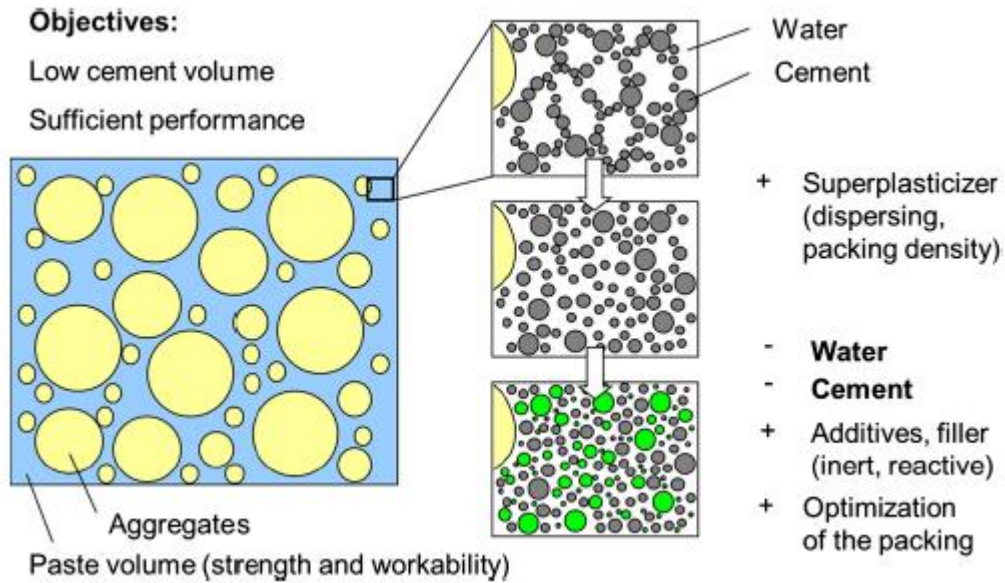


Figura 3: Evolução da proporção de mistura tradicional para LCC (Proske et al., 2014).

Os betões com dosagens reduzidas de cimento são conseguidos numa primeira abordagem por meio da substituição do cimento Portland por produtos provenientes de outras indústrias, sendo exemplo as cinzas volantes, as escórias de alto forno ou a sílica de fumo (Soldado et al., 2021). Estudos realizados ao longo dos últimos anos têm demonstrado resultados satisfatórios (Proske et al., 2014). Porém, relativamente às aplicações dos mesmos, até aos dias atuais não tem havido muita evolução, pelo que só mais recentemente se tem procurado a integração de práticas de sustentabilidade no que diz respeito a novos materiais cimentícios. Convém também referir que a substituição de cimento não apresenta só vantagens, há também alguns inconvenientes, como por exemplo a substituição de cimento por grandes volumes de cinzas volantes resulta no desenvolvimento de resistências muito lentas; portanto, ocorrem resistências baixas em idades jovens, existe maior sensibilidade à cura, uma elevada retração plástica e redução da resistência à carbonatação (Camões, 2011).

O cimento Portland não é necessariamente um material de baixo custo, pelo que a produção de elementos de betão com reduzido teor de cimento proporciona vantagens não só ambientais, mas também económicas.

Os betões LCC caracterizam-se como sendo betões que utilizam reduzidas quantidades de cimento Portland (valores geralmente entre 150 e 200 kg de cimento por cada metro cúbico de betão) e que normalmente têm uma maior quantidade de adições, principalmente adições com propriedades pozolânicas (Freitas, 2016).

2.3.2 Formas de produção e principais características

De modo geral, a principal estratégia para conseguir este tipo de betões será por substituição parcial do cimento Portland por subprodutos de outras indústrias, tais como, adição de filer calcário, cinzas volantes, escórias de alto forno, sílica de fumo, metacaulino, entre outras adições (Robalo et al., 2021). As cinzas volantes, por exemplo, permitem que os betões atinjam bons níveis de durabilidade, necessitem de menos água de amassadura e, eventualmente, as resistências mecânicas a longo prazo também são melhoradas. Assim, normalmente procura-se maximizar a incorporação de cinzas volantes em compostos cimentícios, de forma a diminuir o consumo de cimento e conseguir assim, ganhos económicos (Robalo et al., 2021).

Este tipo de adições proporciona algumas vantagens substitutos do cimento, tais como: aumento da trabalhabilidade e da estabilidade reológica do betão fresco, redução do calor de hidratação, reduz o custo do betão, diminuição de energia incorporada, maior resistência aos sulfatos.

O desenvolvimento deste tipo de betões deve partir do pressuposto da maximização da distribuição do cimento utilizado por cada metro cúbico de betão, sendo isto possível utilizando um superplastificante que garanta a dispersão do cimento e das adições uniformemente pela matriz (Robalo et al., 2021). A substituição por adições tem como consequência um aumento da densidade da mistura, porque estas partículas irão preencher os vazios entre as partículas de maior dimensão (Bentz et al., 2011). Essa otimização da distribuição das partículas permite uma redução do rácio água/cimento (A/C), alcançando-se um aumento de resistência e durabilidade do betão (Proske et al., 2014). É importante referir que a relação A/C é a razão entre a dosagem efetiva de água e a dosagem de cimento. A dosagem efetiva de água é a diferença entre a quantidade total de água presente no betão fresco e a quantidade de água absorvida pelos agregados, caso esta seja significativa no caso de utilização de agregados porosos. Isto significa que para o cálculo da razão A/C não se considera a parcela de água absorvida pelos agregados dado que a sua influência no comportamento da pasta de cimento é desprezável.

2.3.3 Implicações no comportamento das estruturas de betão

Num conjunto de ensaios já realizados, foram investigadas algumas propriedades dos betões com reduzidas dosagens de cimento, tais como a trabalhabilidade o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo, propriedades mecânicas e aspetos ligados à carbonatação, tendo-se concluído o seguinte: betões com teores de cimento inferiores a 125 kg/m³ são capazes de cumprir requisitos de trabalhabilidade, resistência (até aprox. 40 MPa) e outras propriedades mecânicas. A profundidade de carbonatação destes betões, com 150-175 kg/m³ de teor de cimento, é igual ou menor à profundidade de

carbonatação de betões de referência convencionais para estruturas exteriores (Proske et al., 2014).

As vantagens ecológicas foram também identificadas, por meio da avaliação de desempenho ambiental. Destaca-se uma redução até 50% no impacto ambiental em comparação com o betão convencional e uma redução superior a 65% usando cimento de alto-forno. A aplicação na prática foi verificada realizando testes em escala real na indústria de betão pré-fabricado. Os requisitos especiais de trabalhabilidade e resistência inicial foram satisfeitos com um teor de cimento de 150 kg/m³ (Proske et al., 2014).

2.3.4 Sustentabilidade dos betões LCC

Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade da construção, urge reduzir o consumo e conseqüentemente a produção de cimento. A emergência para as questões ambientais tem vindo a crescer com a consciencialização global do comum cidadão para as mudanças climáticas. Estas alterações climáticas têm apresentado as suas conseqüências de uma forma tanto destruidora como de espetacular, sendo difícil passar despercebidas. Dos vários problemas ambientais um dos mais urgentes é o aquecimento global. De uma forma cada vez mais consensual, a responsabilização do aquecimento global tem sido atribuída às elevadas emissões de CO₂ e outros gases com efeito de estufa.

A indústria da construção civil é uma das atividades que mais matérias-primas não renováveis consome em todo o mundo, levando a que contribua significativamente para o agravamento deste impacto. A produção anual mundial de betão é, como se referiu anteriormente, muito elevada e isso implica a emissão de grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera. Além disso, outro impacto ambiental adverso está relacionado com o elevado consumo de energia no processo de fabrico do cimento. Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade da construção surge a necessidade de fazer uma melhor racionalização na utilização do cimento e isso engloba a redução da sua produção e também a redução do seu consumo, encorajando a sua substituição por materiais mais amigos do ambiente.

3 DURABILIDADE DO BETÃO ARMADO

3.1 Considerações gerais sobre durabilidade

Mesmo com todos os benefícios que o betão armado possui, não há garantia que as construções usando este material sejam totalmente duradouras. Até os dias atuais, os projetistas, construtores e promotores dão, na maioria, muito

maior importância às resistências mecânicas, e têm tido menos consideração pelas questões relacionadas com a durabilidade.

Com o passar dos anos e graças aos conhecimentos aprofundados relativamente aos mecanismos de transporte dos gases e líquidos agressivos por meio dos poros da matriz, o estudo da durabilidade do betão tem evoluído bastante. Com base nessa evolução de conhecimentos, foi possível associar o fator tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos de deterioração e assim avaliar a vida útil de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado (M. Coutinho, 2004). Diz-se que uma estrutura de betão é considerada durável quando, durante a sua vida, são conservados os requisitos de projeto no que diz respeito a segurança funcionalidade e estética sem custos de manutenção não previstos. Essa durabilidade vai depender quer da deterioração física, química e biológica, quer da corrosão das armaduras (M. Coutinho, 2004) (Mattos, 2017).

O desempenho de uma estrutura é um conceito fortemente relacionado não só com a componente mecânica mas também com a durabilidade e define-se como sendo a capacidade de uma estrutura satisfazer os fins para os quais foi projetada do ponto de vista de segurança, funcionalidade e aspeto geral. Para melhorar o desempenho da estrutura é preciso atuar em diferentes vertentes: na fase de projeto de estrutura e arquitetura, ao nível de processos de execução da obra e nos procedimentos relativos à inspeção e manutenção. As interligações entre os principais fatores que influenciam a durabilidade e as suas consequências em termos de desempenho estão resumidas na Figura 4.

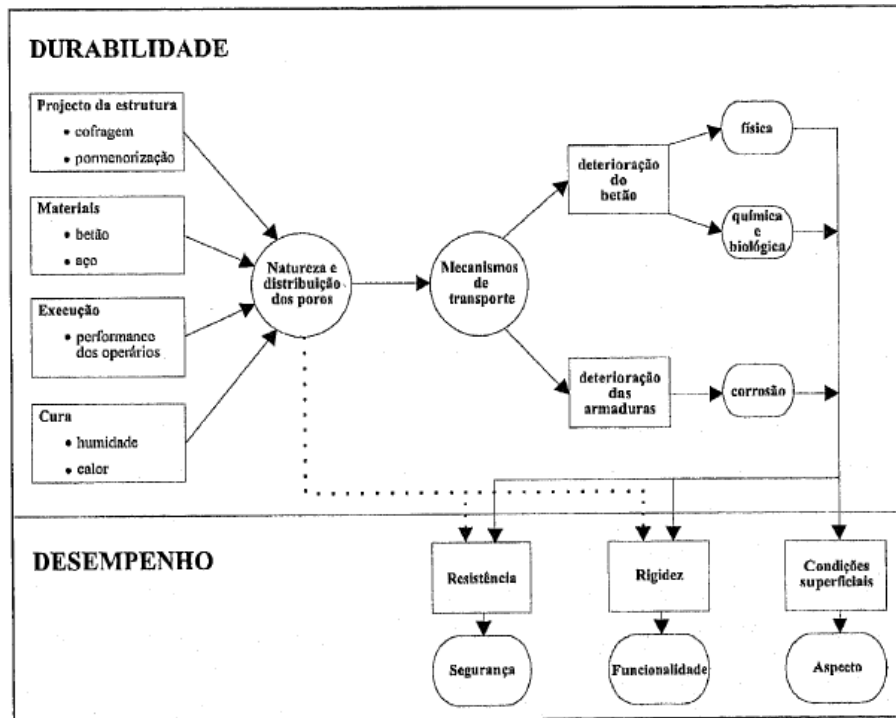


Figura 4: Conceito de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão e suas inter-relações (M. Coutinho, 2004).

3.1.1 Vida útil das estruturas em betão

A vida útil de uma estrutura é definida como sendo o período durante o qual uma determinada estrutura satisfaz os requisitos de segurança, de funcionalidades e estéticos previamente definidos na fase de projeto, sem custos de manutenção não previstos, isto é, o período de tempo durante o qual o desempenho da estrutura é satisfatório (Silva, 2014).

A vida residual de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado será o período contabilizado a partir do momento em que o desempenho da estrutura se torna inaceitável. Deste modo, faz-se intervenções de forma a repor novamente as condições de segurança, funcionalidade ou estéticas semelhantes às estabelecidas inicialmente na fase de projeto (Figura 5) (Silva, 2014).

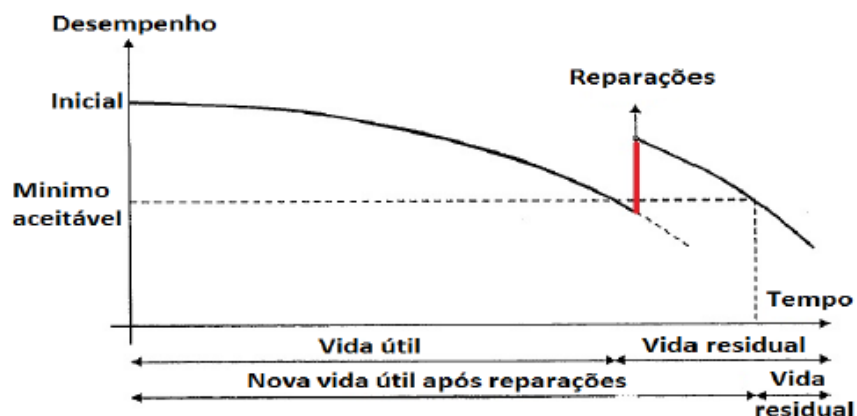


Figura 5: Vida útil e vida residual (Silva, 2014).

A grande maioria dos casos de degradação de estruturas é atribuído à corrosão das armaduras resultante da carbonatação ou da penetração de cloretos no betão de recobrimento (M. Coutinho, 2004).

3.1.2 Rede porosa

O betão resulta de uma mistura de diferentes materiais com diferentes propriedades que conferem ao produto final uma certa heterogeneidade. Além disso no seu interior existe uma rede de poros de dimensões variáveis, desde poros nanométricos até poros com milímetros de diâmetro. O mais importante a ser destacado na rede porosa do betão é a sua dimensão e a sua continuidade na matriz do betão, porque são esses os fatores que vão determinar como os agentes agressivos penetram no interior do betão e, conseqüentemente, como afetam a durabilidade do betão.

A rede porosa no interior do betão pode ter vários causas, por exemplo, na fase de colocação e compactação em obra, pela emulsão de ar na fase da mistura, devido a uma má composição do betão (razão A/C muito alta ou má distribuição granulométrica), ausência de cura adequada, entre outros fatores. Normalmente, na fase de compactação, o ar preso na pasta é parcialmente libertado, porém permanece sempre alguma percentagem de ar que fica retido. Os fatores acima mencionados que mais influenciam negativamente a durabilidade são a composição, a compactação e o tipo de cura.

Relativamente a tipologias, os poros poderão variar entre macroporos (vazios), poros capilares, e microporos (poros de gel) (Figura 6). Os macroporos geralmente resultam do processo de amassadura, colocação e compactação do betão, onde o volume de ar aprisionado no interior de betão pode variar normalmente entre a 1 a 5% do seu volume, e em certos casos pode ultrapassar os valores anteriores (Silva, 2014).

Os poros capilares surgem nos espaços vazios preenchidos inicialmente pela água de amassadura que não foi consumida na fase de hidratação do cimento.

A evaporação da água origina uma rede de poros capilares que influenciam de forma negativa a resistência e a durabilidade do betão. Os poros podem apresentar dimensões entre 10^2 e 10^4 nanómetros (Silva, 2014).

Os microporos ou poros de gel têm origem nos espaços vazios do gel de silicato de cálcio hidratado (CSH) (espaços intersticiais entre partículas de gel de CSH), apresentando dimensões muito reduzidas, na ordem dos nanómetros (0,5 a 2,5 nm); estes poros ocupam cerca de 28% do volume total da pasta de gel (Figura 6) (Silva, 2014).

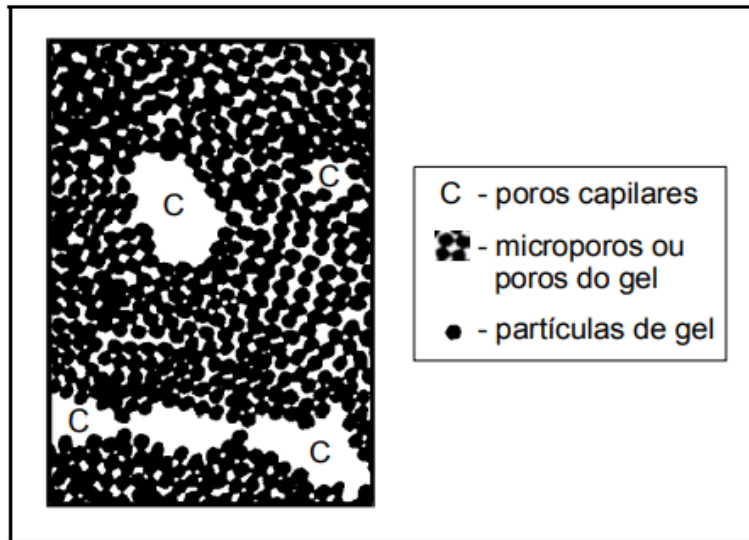


Figura 6: Modelo simplificado da estrutura da pasta de cimento (M. Coutinho, 2004).

Apesar de existirem três tipos de poros na estrutura interna do betão, aqueles que apresentam maior influência na durabilidade são os macroporos e os poros capilares. Os microporos apresentam um tamanho muito reduzido e, geralmente, não influenciam negativamente a permeabilidade, resistência e durabilidade do betão.

O betão armado tem diferentes desempenhos em relação ao transporte de substâncias agressivas dependendo da estrutura porosa, do tipo de ligante usado e das condições de cura. Por vezes, essas mesmas substâncias já estão presentes na matriz do betão ou por contaminação, provenientes dos agregados, dos cimentos ou da água utilizada na amassadura. Tudo isso terá um efeito final na durabilidade da estrutura (Silva, 2014).

O ataque químico no betão é desenvolvido quando ocorre a decomposição dos componentes de hidratação do cimento e na formação de novos compostos. Os efeitos das reações no interior do betão podem levar muitos anos a tornarem-se visíveis, devido à velocidade de entrada dos agentes agressivos ser normalmente reduzida (Silva, 2014)(M. Coutinho, 2004).

3.2 Mecanismos de transporte

A rede capilar é o fator decisivo em termos de durabilidade, pois está dependente principalmente da facilidade com que os fluídos, sobretudo água com ou sem substâncias dissolvidas, dióxido de carbono e oxigênio penetram e se movimentam no interior do betão.

A movimentação da água ou gases no interior do betão está geralmente associada aos seguintes mecanismos de transporte:

- a) Permeabilidade
- b) Absorção capilar
- c) Difusão

3.2.1 Permeabilidade

O termo permeabilidade define-se em termos genéricos como a maior ou menor facilidade com que um material se deixa atravessar por gases e líquidos (sob pressão ou à pressão atmosférica), eventualmente com substâncias dissolvidas ou em suspensão. Este fenómeno resulta do sistema de poros e fendas formados inicialmente por motivos mencionados anteriormente.

Num sentido mais restrito, a permeabilidade refere-se ao caudal escoado através do sistema poroso em condições de saturação causado por um gradiente de pressão. Este fenómeno é traduzido pela lei de Darcy se o escoamento for laminar não turbulento e permanente (Eq. (3.1)).

$$V = k * i \quad (3.1)$$

Em que: V – Velocidade de circulação da água (m/s); $i = \frac{H}{L}$ – Gradiente de pressão hidráulica (adimensional; k – Coeficiente de permeabilidade à água (m/s).

Assim sendo, a permeabilidade determina a capacidade de o betão de recobrimento impedir ou atrasar a entrada e a passagem de líquidos ou gases agressivos.

Permeabilidade à água.

A água é o principal fluído a ter em consideração e o seu movimento no interior do betão é relevante para a durabilidade. A permeabilidade à água é uma propriedade que nos dá informação sobre a qualidade do betão, ou seja, da rede porosa existente no interior do betão, permitindo assim avaliar a resistência à entrada e migração para o seu interior de substâncias agressiva (Silva, 2014).

A permeabilidade está, como se referiu, associada à porosidade capilar, e como esta, depende e muito da razão A/C e do grau de hidratação, portanto a permeabilidade irá depender também destes fatores. Na Figura 7 verifica-se que

a permeabilidade apresenta valores mais baixos, para valores de A/C inferiores a 0,6; isto porque existe uma maior segmentação e descontinuidade dos poros capilares (Silva, 2014).

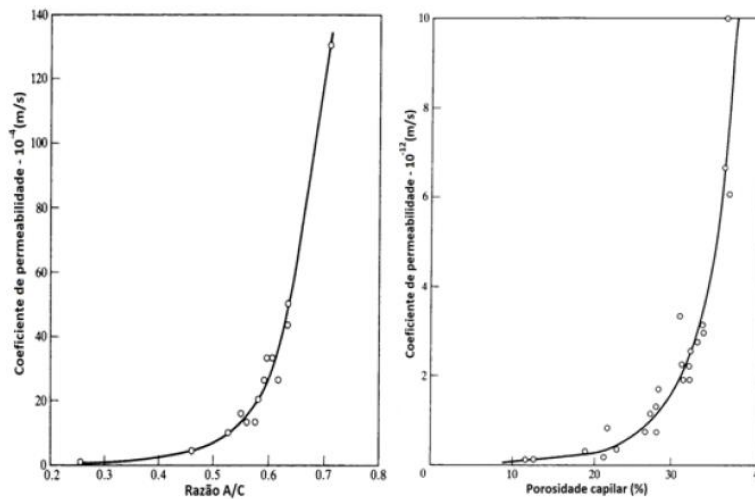


Figura 7: Relação do coeficiente de permeabilidade e a razão A/C e a porosidade capilar numa pasta de cimento com grau de hidratação de 93% (A.M. Neville, 2010).

3.2.2 Absorção capilar

A absorção capilar consiste na penetração de um fluido pela rede porosa do betão. O fenómeno dá-se devido ao aparecimento de forças capilares que têm origem na diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior e a superfície da água no interior dos poros. A força capilar depende da dimensão dos poros, e será maior nos poros de pequena dimensão. Já a velocidade de entrada é oposta do que foi descrito anteriormente, ou seja, será maior nos poros de maior dimensão. A humidade do betão influencia a absorção capilar, pois se os poros estiverem saturados, o fenómeno não irá ocorrer, dado que não se desenvolvem forças de sucção capilar (Silva, 2014).

A absorção capilar é influenciada por diversos fatores (Silva, 2014): o módulo de finura do cimento, a capilaridade diminui quanto mais baixo for o módulo de finura; a razão A/C, a capilaridade aumenta quando há um aumento da razão A/C; o tempo de cura húmida, a absorção capilar diminui com o aumento da duração da cura; a idade, a capilaridade diminui com o passar do tempo e; a compactidade. Quanto maior for a relação água/cimento maior será a quantidade final de poros capilares, pois para razões A/C superiores a 0,38, praticamente todo o cimento hidrata e o volume dos componentes resultantes não ocupa todo o espaço livre (Figura 8), (Pereira, 2019).

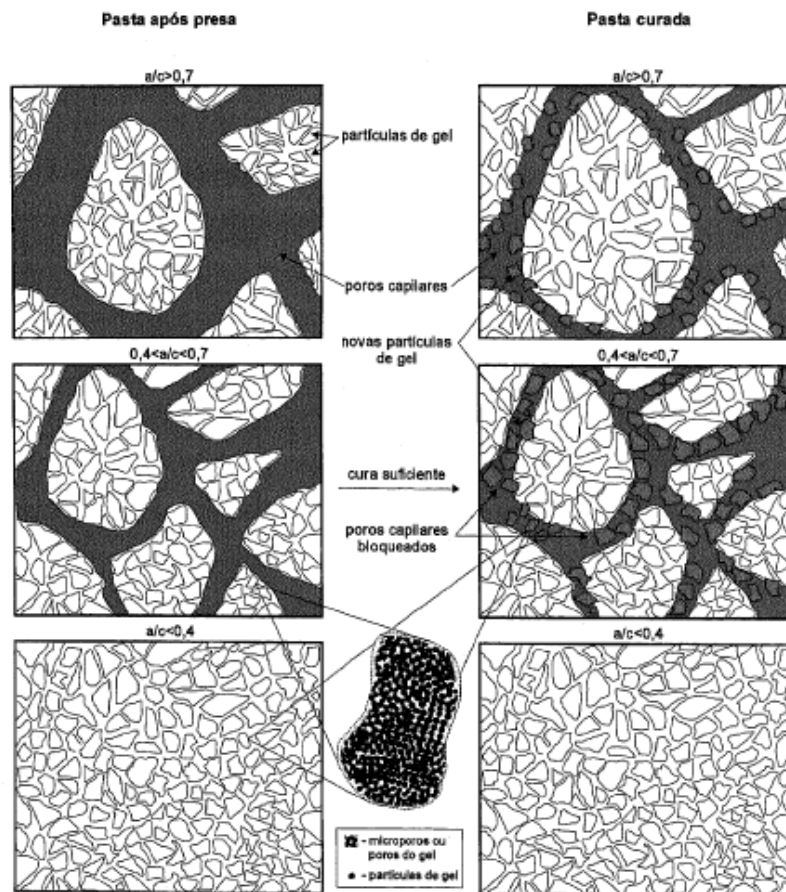


Figura 8: Representação da influência da razão A/C e cura na rede porosa capilar (M. Coutinho, 2004)

3.2.3 Difusão

A difusão consiste no transporte de líquidos, gases ou iões devido a um gradiente de concentração, pelo que o transporte se faz de uma zona mais concentrada para uma zona menos concentrada de modo a equilibrar as concentrações no interior do betão.

Tomando como exemplo o dióxido de carbono, este difunde-se pelo betão, reagindo com os hidróxidos de cálcio da matriz do betão, dando origem aos carbonatos de cálcio. Este fenómeno é denominado de carbonatação e leva a um decréscimo de concentração de dióxido de carbono na frente de carbonatação, o que vai ocasionar mais difusão (dióxido de carbono) do exterior para a frente de carbonatação. O mesmo se passa com o oxigénio, pois este é consumido durante o processo de corrosão dos varões de aço (Silva, 2014).

3.3 Agentes agressivos e mecanismos de deterioração

3.3.1 Ataque de ácidos

Relativamente ao ataque de ácidos, há dois aspetos a ter em conta (Teixeira, 2011):

(1) Alcalinidade - quando o betão é exposto a ataques de ácidos, a alcalinidade do betão pode ser comprometida; a exposição a ácidos reduz o pH do betão, tornando-o menos alcalino e isso pode diminuir a capacidade de proteção passiva do betão contra a corrosão das armaduras, uma vez que a alcalinidade é necessária para manter a camada passiva na superfície do aço.

(2) Presença de ácidos que entram em contato com as estruturas de betão - os ácidos são prejudiciais ao betão, pois dissolvem os componentes mais solúveis da pasta de cimento, formando novos compostos, nomeadamente, sais; de acordo com o ácido atacante, a estrutura cristalina é destruída; os cimentos Portland, por possuírem elevada concentração de elementos de cálcio como hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e o aluminato de cálcio hidratado, tornam-se mais vulneráveis aos ataques de ácidos (Silva, 2014).

3.3.2 Ataque de sulfatos

O ataque de sulfatos é entendido como sendo uma série de reações químicas entre os componentes do betão já endurecido e os iões sulfato, com consequências pelo efeito expansivo. Geralmente é a pasta de cimento que é atacada. Os iões sulfato podem ter origem interna (nos próprios constituintes) ou externa (solos, poluição industrial, água e atmosfera). O ataque por sulfatos está, em geral, conotado como sendo um ataque externo, enquanto o interno está englobado nas reações expansivas de origem interna. O ataque por sulfatos pode ser inibido ou totalmente evitado usando uma composição adequada e com a devida proteção contra a ação externa (Teixeira, 2011).

3.3.3 Reação álcalis-agregado

Esta reação corresponde a um grupo de reações químicas que ocorrem em certos tipos de minerais dos agregados, os iões alcalinos (sódio e potássio) e hidroxilos (OH⁻) presentes na solução intersticial da pasta de cimento no betão (Teixeira, 2011).

Geralmente é considerada a existência de 2 tipos de ataques: (1) Reações álcalis-sílica (RAS); (2) Reações álcalis-carbonato (RAC).

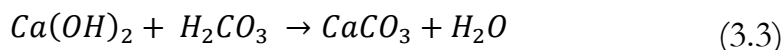
A reação alcalis-sílica é a mais comum e só ocorre na presença de água. A presença de álcalis no betão é muito reduzida (presença reduzida no cimento), mas estes podem difundir-se do exterior para o interior do betão. As formas reativas de sílica são: opala (amorfa), obsidiana (vidro vulcânico), cristobalita

(polimorfismo do quartzo) calcedónia (uma variedade criptocristalina do mineral de quartzo), e tridimita (cristalina) (Silva, 2014).

A RAC é uma reação entre os agregados dolomíticos argilosos e os hidróxidos alcalinos contidos na solução aquosa dos poros. Desta reação resulta a calcite (CaCO_3) e brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). A expansão acontece devido à absorção de água pelos minerais argilosos. O fenómeno é evidenciado pela formação de zonas de reação em volta do agregado de aproximadamente 2 mm de largura. A fendilhação desenvolve-se no seio da zona de reação, originando redes de fendas, que provocam a perda de ligação entre a pasta de cimento e o agregado (Silva, 2014).

3.3.4 Carbonatação

A carbonatação caracteriza-se pela difusão do dióxido de carbono (CO_2) no betão e pela sua reação com os componentes do betão principalmente o hidróxido de cálcio, formando assim o carbonato de cálcio (CaCO_3). É um dos mecanismos mais correntes de deterioração do betão, pelo que é tanto maior quanto maior for a presença de dióxido de carbono no meio envolvente e também quanto maior for a porosidade do betão. O fenómeno de carbonatação inicia-se quando ocorre a dissolução de CO_2 na película de água existente nos poros capilares e desta reação resulta o ácido carbónico (Eq. (3.2) que vai reagir com os componentes alcalinos existentes na solução intersticial da pasta de cimento (Eq. (3.3))(Silva, 2014).



Este processo pode ser subdividido em 3 zonas: a primeira onde o betão já se encontra carbonatado e o pH apresenta valores inferiores a 9 e o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi convertido em carbonato de cálcio CaCO_3 ; a zona não carbonatada onde o pH é de aproximadamente 13 e; a zona intermédia que faz a separação das anteriores.

Inicialmente, o betão caracteriza-se por ser alcalino ($\text{pH} \geq 12,5$) (Costa, 2006). À medida que ocorre a carbonatação, o betão vai perdendo essa alcalinidade ($\text{pH} < 9$) deixando assim as armaduras desprotegidas (despassivação dos varões de aço) facilitando o início da corrosão (Figura 9).

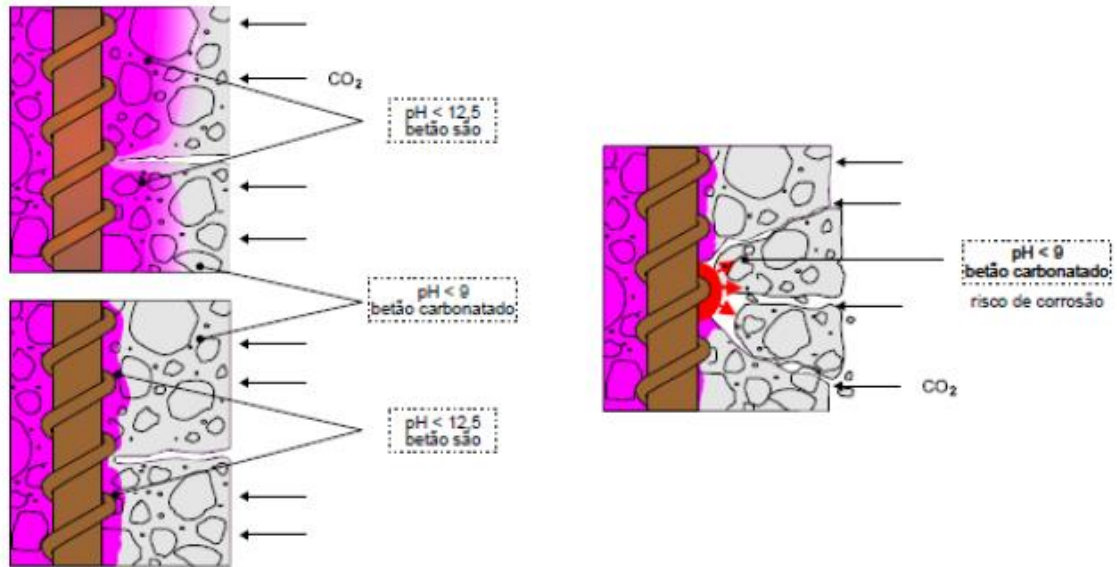


Figura 9: Avanço da frente de carbonatação e suas consequências (Silva, 2014).

Antes da carbonatação, ou seja, quando o betão possui ainda a característica alcalina (betão não contaminado), as armaduras encontram-se protegidas, pelo que nestas condições forma-se à superfície das mesmas uma barreira de proteção (película passiva) que impede a sua corrosão (Figura 10). À medida que ocorre a carbonatação e o pH vai reduzindo, dá-se a destruição da película passiva das armaduras e, quando destruída, origina o início do mecanismo de corrosão (Figura 11). Para o processo de corrosão iniciar-se é necessária a presença de oxigénio e humidade junto às armaduras, por esse motivo, é importante conhecer a profundidade de carbonatação. Importa referir que, devido a presença de agregados de grandes dimensões, a "frente" não se desloca como uma linha reta perfeita (Silva, 2014).

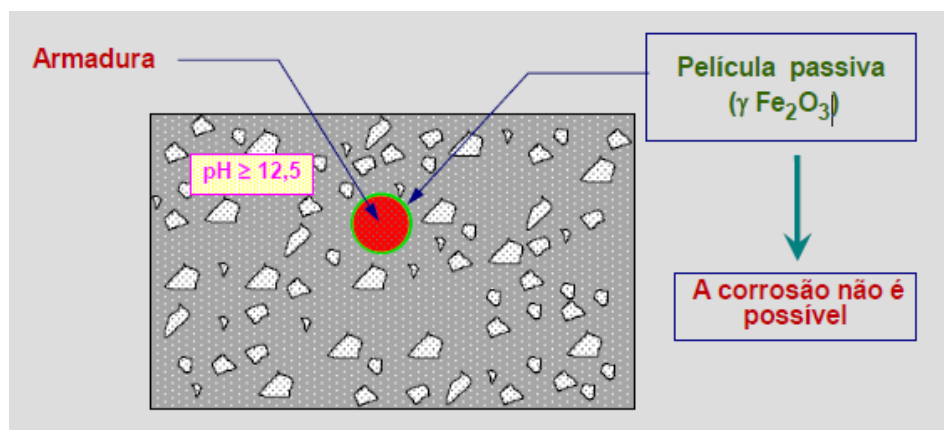


Figura 10: Betão armado em estado alcalino (Costa, 2006).

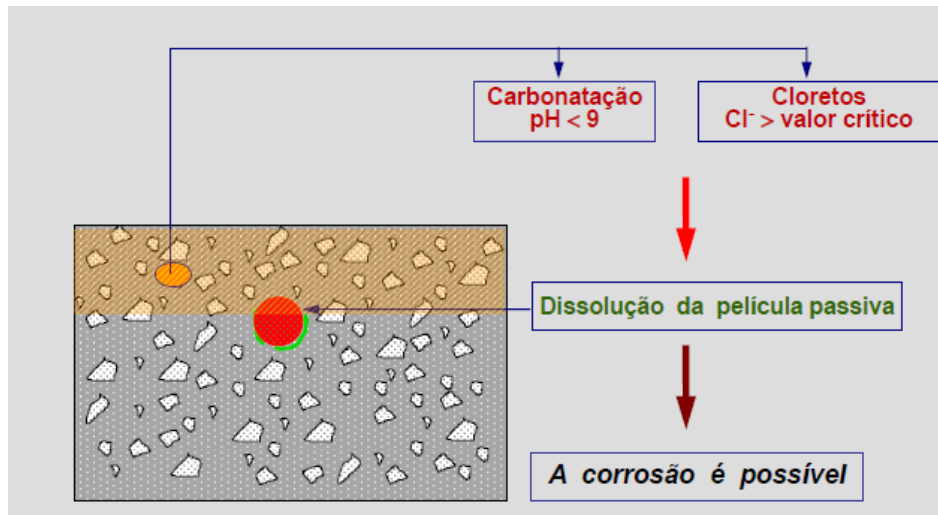


Figura 11: Betão armado carbonatado (Costa, 2006).

A carbonatação por si só não causa deterioração do betão, porém tem feitos importantes sobre este, nomeadamente, a retração por carbonatação e a diminuição do pH do betão. O pH do betão situa-se entre os 12,6 a 13,5 e é reduzido para menos de 9 devido ao fenómeno da carbonatação. A redução do pH é um efeito negativo, pois como já foi referido as armaduras embebidas no meio alcalino criam uma película de óxido em torno das armaduras, conhecida como camada passiva; com a diminuição do pH, a película protetora desaparece e as armaduras ficam sujeitas ao fenómeno de corrosão, que só ocorre na presença de humidade e oxigénio nos poros.

A velocidade de carbonatação poderá ser influenciada por vários fatores como por exemplo a concentração de dióxido de carbono no meio, temperatura, tipo e quantidade de cimento, razão A/C, fendilhação, tipo de cura, humidade relativa, etc (Silva, 2014). Por existirem muitos fatores que podem influenciar a carbonatação, torna-se difícil prever a profundidade da mesma. Este fenómeno ocorre geralmente de forma progressiva da superfície exterior do betão para o seu interior, onde o CO_2 vai sendo difundido pelo sistema de poros que o betão possui.

A concentração de dióxido de carbono presente na atmosfera varia de acordo com a localização da estrutura de betão. Nos locais onde existem maiores concentrações de dióxido de carbono, a taxa de carbonatação aumenta especialmente quando a razão A/C é elevada.

A temperatura influencia as reações químicas da carbonatação. Pequenas variações de temperatura causam insignificantes alterações na carbonatação, porém em casos extremos (casos de elevadas temperaturas) verifica-se um aumento da taxa de carbonatação.

O tipo e quantidade de cimento irão influenciar diretamente o grau de alcalinidade do betão; quanto maior a quantidade de cimento, maior será a quantidade de substâncias alcalinas (hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) que irão

reagir com o dióxido de carbono. A conclusão é que quanto maior a quantidade de substâncias alcalinas produzidas menor será a velocidade de carbonatação, levando assim a uma redução da profundidade de carbonatação.

A razão A/C atua diretamente no grau de porosidade do betão, ou seja, na dimensão, quantidade e continuidade dos poros no interior do betão, e estas características influenciam o grau de permeabilidade. Se se tem uma razão A/C muito alta então a permeabilidade será maior e, por consequência, maior será a difusão do dióxido de carbono no betão e maior será a velocidade de carbonatação.

A cura possui grande importância no desenvolvimento da resistência do betão, pelo que a perda rápida de água do betão afeta diretamente a resistência. Uma cura inadequada, além de afetar a resistência, causa retração plástica do betão, provocando eventualmente fendilhação e um aumento da permeabilidade e porosidade, e isso leva ao aumento da profundidade de carbonatação.

A existência de fendas (fendilhação) prematuras no betão possibilita um acesso mais rápido, mais profundo ao interior do betão e uma maior área de exposição aos agentes agressores (neste caso o dióxido de carbono). A facilidade de acesso ao interior do betão depende da abertura da fenda e da profundidade da mesma (Figura 12).

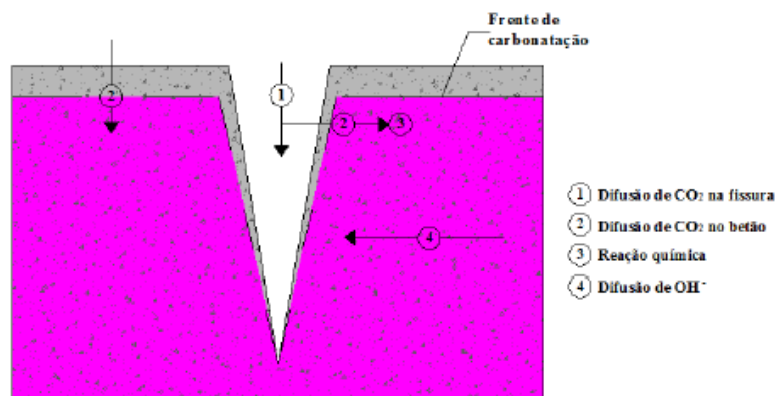


Figura 12: Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fenda (Silva, 2014).

Através da análise conclui-se que a resistência do betão é inversamente proporcional à velocidade de carbonatação; ou seja, quanto maior for a resistência do betão menor é a velocidade de carbonatação (Figura 13).

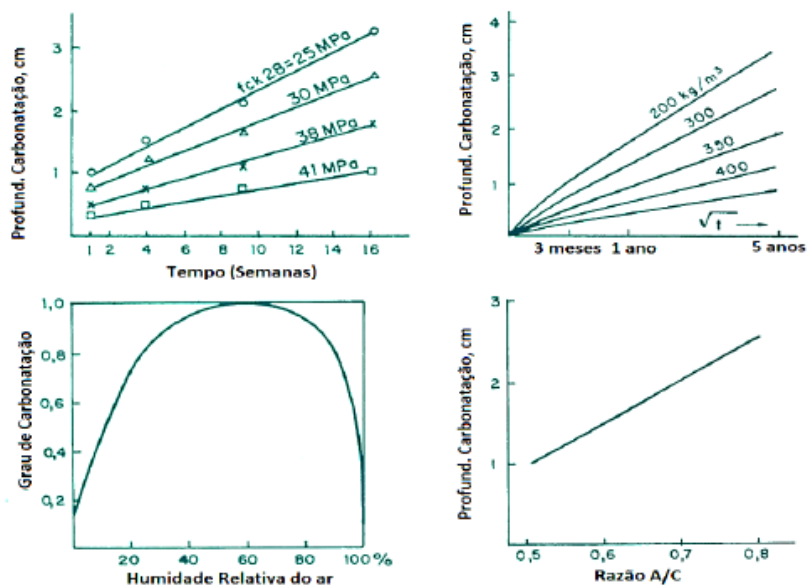


Figura 13: Fatores que influenciam a carbonatação como: humidade relativa, razão A/C, quantidade cimento e a resistência a compressão do betão (Silva, 2014).

A contaminação das estruturas por cloretos ocorre principalmente quando os elementos estruturais se encontram em regiões costeiras, onde a água possui iões de cloretos, quando os elementos estão dentro da água do mar ou quando os constituintes do betão já vêm à priori contaminados com CaCl_2 (cloreto de cálcio). Dependendo das condições ambientais, a penetração dos cloretos pode ocorrer segundo diferentes mecanismos de transporte: permeabilidade por sucção capilar ou por difusão. É de realçar que estes mecanismos normalmente não atuam sozinhos, mas sim em conjunto, dependendo do tipo de exposição a que a estrutura está sujeita.

Nas situações onde não há penetração de cloretos do meio exterior, o aparecimento destes é de origem interna, ou seja, no processo de fabrico de betão ou contaminação dos constituintes. No interior do betão, os cloretos podem-se encontrar em 3 diferentes estados: uma parte quimicamente ligada aos produtos resultantes da hidratação, outra parte absorvida na superfície de poros de gel CSH (silicato de cálcio hidratado) e os restantes encontram-se livres na solução dos poros. Os dois últimos são considerados os cloretos livres e são estes que poderão causar quebra da película passiva das armaduras.

Como já se referiu, a elevada alcalinidade do betão proporciona o surgimento de uma capa protetora passiva que envolve o aço. Com a ação dos iões cloretos, essa camada é destruída pontualmente, proporcionando a corrosão na presença de oxigénio e humidade. Por consequência, há uma diminuição da aderência, entre o betão e o aço, e há também um aumento do volume de aço. Este aumento de volume, pode atingir até sete vezes o volume inicial e aumenta as tensões internas que podem gerar mais fendilhação, aumentando assim o risco de um colapso estrutural (Figura 14) (Arantes, 2020).

Ao contrário do ataque de CO₂ ou de soluções ácidas, os cloretos podem danificar as armaduras mesmo em condições de alta alcalinidade da solução dos poros, os íons não são consumidos no processo de corrosão, ou seja, permanecem disponíveis para novas reações. Isso significa que pequenas quantidades do íon cloreto podem provocar altas taxas de corrosão (Crauss, 2010) e de forma muito acelerada.

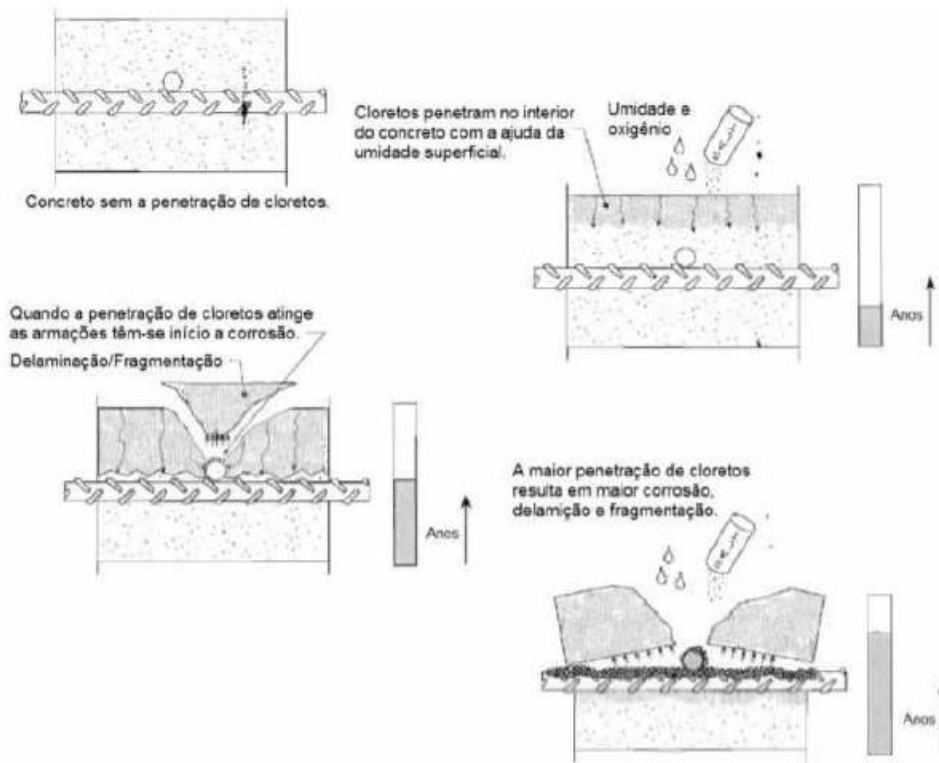


Figura 14: Processo de penetração de íons cloretos no interior do concreto armado (Arantes, 2020).

Para determinar o perfil de cloretos (totais), normalmente são obtidas amostras de pó, a diferentes profundidades, para serem analisadas em laboratório. As amostras podem ser obtidas em obra ou de um carote, porém em ambos os casos, é necessário o uso de um berbequim ou outro equipamento de perfuração. Posteriormente, podem ser efetuadas análises químicas ou análises de fluorescência de raios-X. É necessário ter cuidado na obtenção das amostras de pó, de modo a não haver contaminação destas, pois iria afetar os resultados obtidos em laboratório.

3.3.5 Considerações gerais sobre a corrosão

Em termos de durabilidade de uma estrutura de betão armado, o betão de recobrimento possui uma dupla função: proteger as armaduras dos agentes agressores e garantir que a solução contida nos poros é alcalina, ou seja, com valores de $\text{pH} \approx 13$ para haver uma camada de óxido de ferro protetor (Fe_2O_3). Já se sabe que a alcalinidade do meio é obtida principalmente devido a enorme

quantidade de hidróxidos de cálcio produzidos durante as reações de hidratação dos silicatos de cálcio, mas também dos hidróxidos de sódio e potássio.

O processo de corrosão tem início quando a película de óxido de ferro é destruída. Essa destruição pode estar relacionada com a diminuição do pH da solução dos poros para valores inferiores a 9 (relacionado com a penetração do dióxido carbono, ou seja, a carbonatação do betão, ou por lixiviação dos elementos alcalinos), ou pela ação dos íões cloreto quando estes ultrapassam um determinado valor crítico próximo das armaduras. Importa reforçar que, para o processo de corrosão iniciar-se, é necessária a presença de humidade e oxigénio.

A corrosão pode ser identificada pelo aparecimento de manchas castanhas e avermelhadas que são designadas por ferrugem. Com o passar do tempo o processo origina fendilhação, delaminação e destacamento do betão de recobrimento (Figura 15).



Figura 15: Fendilhação e destacamento do betão devido a corrosão das armaduras.

4 ADERÊNCIA AÇO-BETÃO

4.1 Introdução

A aderência entre o aço e o betão é muito importante para o bom comportamento dos elementos de betão armado porque é responsável por transferir as tensões entre o aço e o betão e pela compatibilidade de deformações entre os dois materiais. Esta propriedade é também muito relevante nas ligações entre os elementos estruturais, ligações pilar-fundação, parede-fundação e pilar-viga, pois nestas ligações existem normalmente esforços significativos; além disso, é nessas zonas que são normalmente executadas as ancoragens das armaduras longitudinais.

As tensões de aderência surgem devido à variação de tensão entre o aço e o betão, sendo que estas podem ter as seguintes origens (Fernandes, 2000):

- Ações externas – causam alterações das tensões no aço, podendo ser de tração ou compressão;
- Fendilhação – leva a um acréscimo das tensões na armadura, influenciando conseqüentemente as tensões de aderência;
- Forças de amarração nas extremidades das armaduras – através das tensões de aderência a força atuante no varão é transferida para o betão;
- Variações de temperatura – o maior coeficiente de dilatação térmica do aço, induz uma maior deformação nos varões de aço em relação ao betão, levando a um aumento das tensões de aderência;
- Retração do betão – o aço limita/condiciona a retração introduzindo tensões de compressão nas armaduras e tração no betão;
- Fluência do betão – o aumento da deformação do betão ao longo do tempo cria um aumento das tensões nas armaduras.

4.2 Componentes da aderência

Embora a conceção de um valor médio da tensão de aderência seja conveniente para resoluções práticas, a transferência de forças aço-betão está associada a uma combinação de parcelas relativas: a adesão, a atrito e a aderência mecânica.

4.2.1 Componente de adesão química

A adesão química deve-se às reações químicas que ocorrem no início de presa do betão. Nesse momento, criaram-se ligações na interface entre os dois materiais, originando uma aparente união (Figura 16). Estas reações serão tanto mais elevadas quanto mais a superfície do varão estiver desprovida de impurezas que interfiram nessa ligação. Esta parcela depende também da micro-rugosidade das armaduras. Essa componente da aderência, isoladamente, não é suficiente para uma boa ligação entre os varões e o betão, sendo destruída para pequenos deslocamentos do varão, ou seja, quando as solicitações ainda são relativamente baixas (Figura 16). Estudos recentemente realizados para comparar o comportamento de varões de aço liso com varões revestidos com resina epóxi, mostram que a adesão pode ter um papel importante na aderência no caso de rotura por fendilhação (Choi et al., 1991).



Figura 16: Ligação química entre os átomos de betão e do aço.

4.2.2 Componente da aderência por atrito

O atrito é um parâmetro físico que depende da rugosidade superficial de cada material, sendo definido por um coeficiente de atrito, μ , que se manifesta quando há deslocamento relativo entre os dois materiais. A resistência por atrito manifesta-se após a adesão química ser perdida, desde que existam pressões transversais aplicadas às armaduras (Figura 17). Estas podem surgir devido a cargas externas, retração ou expansão do betão (Leonhardt & Monnig, 2008).

A contribuição do atrito na tensão de aderência é geralmente pouco importante, sendo apenas relevante em varões lisos (Romulo Dinalli da Silva, 2006).

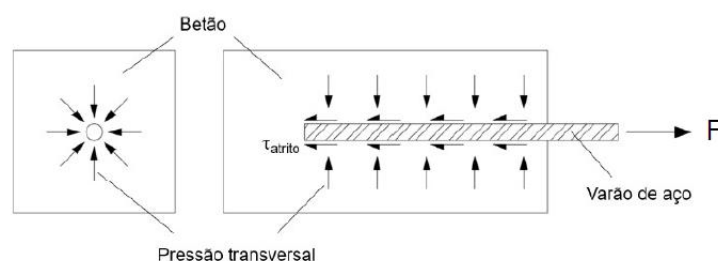


Figura 17: Representação esquemática da aderência por atrito (Soares, 2020).

4.2.3 Componente de aderência por ancoragem mecânica

Esta componente da aderência é a que mais contribui para o bom funcionamento da ligação aço-betão, no que diz respeito das armaduras nervuradas, criando uma macro-rugosidade. As nervuras funcionam assim como amarrações/consolas, fazendo com que a transferência de tensões para o betão ocorra em zonas muito localizadas, podendo originar a fendilhação e/ou esmagamento do betão (Figura 18). Para os varões lisos, esta componente também poderá existir, mas é muito reduzida em comparação com os varões nervurados. Nestes casos a interação mecânica ocorre devido à eventual

existência de irregularidades superficiais e ondulações provenientes do processo de laminação (Louro, 2011).

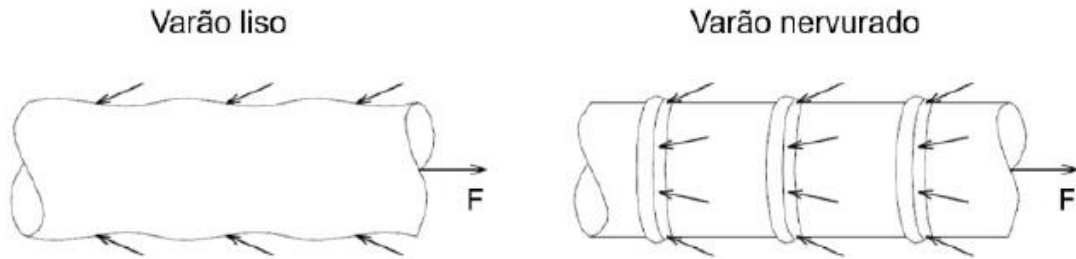


Figura 18: Representação esquemática da ancoragem mecânica (Soares, 2020).

4.3 Fatores que influenciam a aderência

A aderência depende de uma série de fatores físicos e mecânicos relacionados com a armadura e com o betão. Abaixo encontra-se enumerados os principais fatores que influenciam a aderência (Fernandes, 2000):

- Características do betão e seus componentes (resistência, composição granulométrica);
- Classe do aço;
- Tensão de cedência do aço);
- Recobrimento e espaçamento da armadura;
- Diâmetro da armadura;
- Comprimento de ancoragem;
- Tipo e geometria das nervuras;
- Efeitos de confinamento;
- Quantidade e posição da armadura transversal (vertical, inclinada, horizontal);
- Posição da armadura em relação à betonagem (em cima, no centro, em baixo)
- Repetição do carregamento;
- Número de ciclos e amplitude do carregamento cíclico;
- Tipo, velocidade e duração do carregamento;
- Temperatura;
- Revestimento da armadura.

4.4 Curvas tensão de aderência vs escorregamento

Como já abordado anteriormente, a aderência é composta por uma combinação de diversas parcelas, aderência química, atrito e resistência mecânica, as quais decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação aço-betão. Não é possível determinar-se cada parcela isoladamente devido à complexidade dos fenômenos envolvidos (Fernandes, 2000). Alguns autores apresentam curvas esquemáticas da relação entre a tensão de aderência *versus* escorregamento. Na Figura 19 é demonstrado um exemplo da evolução da tensão de aderência em varões lisos e nervurados.

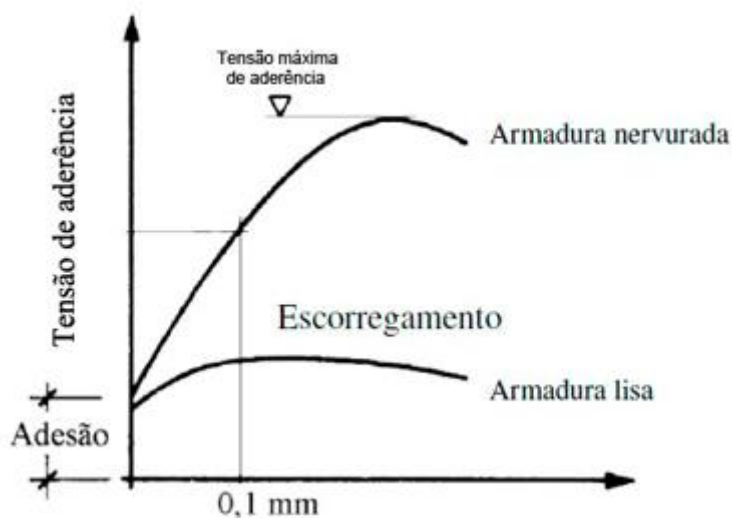


Figura 19: Curvas de tensão de aderência versus escorregamento (Leonhardt & Monnig, 2008).

Numa fase inicial, a aderência entre o aço e o betão depende da adesão, ou seja, da aderência química. A tensão de adesão para armaduras lisas e nervuradas é aproximadamente igual. À medida que as tensões vão aumentando a aderência química perde-se; porém, as resistências nesta etapa serão diferentes para as armaduras nervuradas e para as armaduras lisas. Devido à existência das nervuras nas armaduras, a aderência será predominantemente mecânica neste tipo de armaduras. O mesmo não acontece para as armaduras lisas, tendo a curva um trecho aproximadamente horizontal, significando que a aderência por interação mecânica é aproximadamente zero. Quando é atingido o patamar máximo de tensões de aderência, para as armaduras nervuradas, a aderência mecânica perde-se e dá-se o início ao escorregamento do aço pelo betão, significando que a resistência por atrito é insuficiente. O Bulletin 20 da Fédération Internationale du Béton (fib, 2002), apresenta uma curva padrão mais detalhada para a aderência, onde a interação aço – betão é definida por quatro estágios distintos (Figura 20):

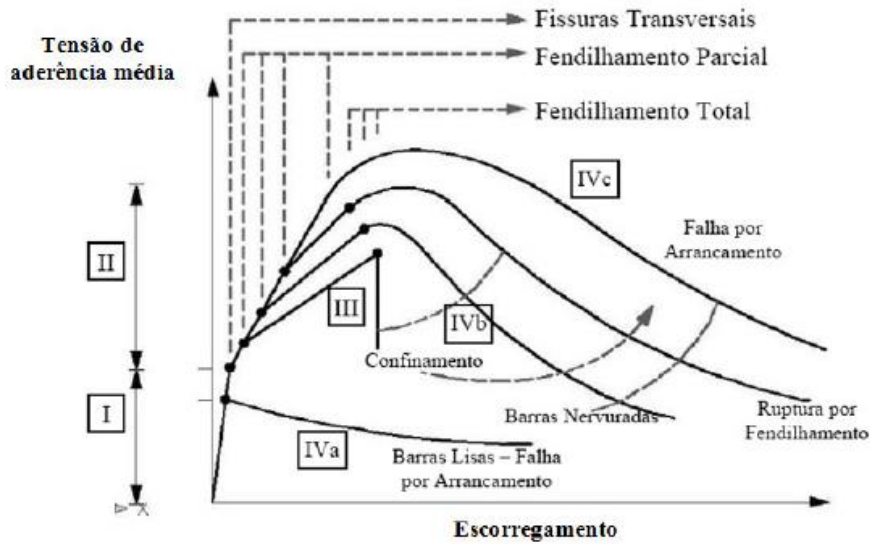


Figura 20: Modelos de curvas padrão de tensão de aderência versus escorregamento propostas no Bulletin 10 da FIB (fib, 2000) (Louro, 2011).

O primeiro estágio é caracterizado por não haver fendilhação no betão nem escorregamento da armadura. Nesta fase, a aderência é assegurada pela parcela da adesão, embora o modelo admita que pode ocorrer uma interação micro - mecânica devida à rugosidade superficial do varão de aço (Louro, 2011).

No segundo estágio dá-se a perda da adesão, aparecendo as primeiras fendas. Estas surgem, devido à elevada compressão localizada e aplicada no betão (Louro, 2011).

O estágio seguinte é o que antecede a rotura da aderência, sendo que as fendas transversais se tornam mais longas e as fendas longitudinais espalham-se ao longo de todo o betão que circunda o aço (Louro, 2011).

O último estágio caracteriza a rotura da aderência (Figura 21), e varia com a configuração inicial da armadura, o grau de confinamento, a resistência do betão, entre outros fatores (Louro, 2011).

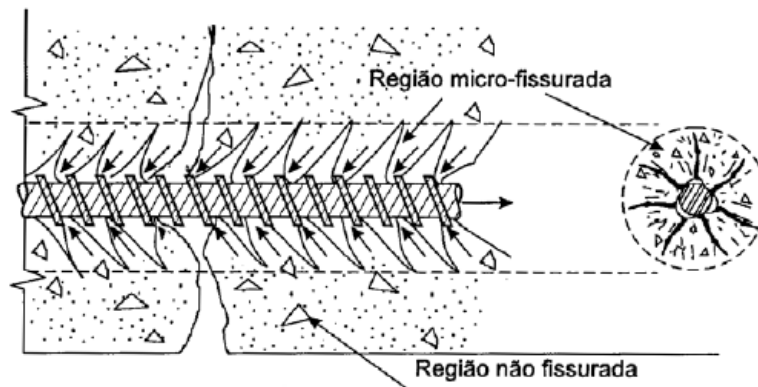


Figura 21: Microfissuração do betão em torno do varão de aço em decorrência da mobilização da aderência (Fusco, 2013).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os objetivos principais do programa experimental da presente dissertação são constituídos por: caracterizar as propriedades mecânicas de 5 betões LCC diferentes, produzidos utilizando dosagens reduzidas de cimento relativamente aos betões convencionais; avaliar o desempenho dos betões em termos de durabilidade, nomeadamente a resistência à carbonatação e à difusão dos cloretos; avaliar a aderência dos betões produzidos com os varões de aço; analisar a influência dos parâmetros de formulação dos betões nas propriedades caracterizadas.

5.1 Materiais constituintes do betão

Nesta secção apresentam-se as principais propriedades dos materiais selecionados para a realização do estudo experimental, bem como a metodologia usada na sua formulação e a descrição dos ensaios realizados.

5.1.1 Agregados

A classificação dos agregados em relação às suas formas e dimensões é importante para garantir uma elevada compacidade, e um baixo índice de vazios, melhorando as propriedades físicas e mecânicas do betão. Selecionaram-se e caracterizaram-se 4 tipos de agregados com diferentes dimensões; uma areia fina 0/1 mm, uma areia média 0/4 mm, um areão 4/8 mm (agregado 3) e uma brita calcária 6/14 mm. As areias e o areão são de origem quartzítica.



Figura 22: Areia fina 0/1 mm



Figura 23: Brita calcária 6/14 mm



Figura 24: Areia média 0/4 mm



Figura 25: Areão 4/8 mm

Na Tabela 1 apresenta-se, para cada tipo de agregado, a respetiva massa volúmica.

Tabela 1: Massa volúmica dos agregados

Agregado	Massa volúmica (kg/dm ³)
Areia Fina 0/1 mm	2,63
Areia Média 0/4 mm	2,63
Brita 6/14 mm	2,66

5.1.2 Água de amassadura

A água utilizada em todas as amassaduras foi a proveniente da rede pública de Coimbra. Não foram analisadas as suas características, uma vez que a especificação do E372 (1993) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (E372 LNEC, 1993) considera que basta a água ser potável para que seja considerada adequada para a produção de betões.

5.1.3 Ligantes

5.1.3.1 Cimento

Para a formulação deste tipo de betões é importante o uso de um cimento de elevada resistência. O cimento utilizado no fabrico dos betões produzidos no decurso da campanha experimental foi o CEM I 52.5 R, da Secil. Este cimento tem na sua composição uma percentagem de clínquer superior a 95%. A Figura 30 apresenta o aspeto do cimento utilizado com uma escala/régua de referência.



Figura 26: Cimento CEM I 52,5R

5.1.3.2 Adições

As adições têm como finalidade aumentar a trabalhabilidade e a compacidade da pasta ligante, e melhorar algumas propriedades do betão. Nas composições estudadas, as adições utilizadas foram o fíler calcário e as cinzas volantes. A Figura 27 apresenta o aspeto do fíler calcário e da cinza volante utilizados com uma escala de referência.



a)



b)

Figura 27: a) Fíler calcário; b) Cinza volante.

Na Tabela 2 abaixo apresentam-se as massas volúmicas dos ligantes utilizados:

Tabela 2: Massa volúmica dos ligantes

Ligante	Massa volúmica (kg/dm ³)
CEM I 52,5R	3,17
Cinzas volantes	2,35
Fíler calcário	2,70

5.1.4 Adjuvante superplastificante

Com o objetivo de reduzir a água de amassadura utilizada na pasta ligante, é essencial o uso de adjuvantes redutores de água, também conhecidos como superplastificantes. Este material aumenta a dispersão das partículas sólidas, levando à necessidade de menores quantidades de água de amassadura, sem que a trabalhabilidade seja afetada. O superplastificante utilizado na mistura foi o MasterGlenium 526 da BASF (Figura 28).



Figura 28: Adjuvante MasterGlenium 526.

5.1.5 Varões de aço

Os varões de aço utilizados para os ensaios de aderência pull-out, são da classe A500 NR-SD, com uma tensão de cedência característica de 500MPa. Este tipo de classe de aço foi produzido com tratamento por laminagem a quente e apresenta uma superfície nervurada. Para estes ensaios foi utilizado o mesmo diâmetro do varão Ø12 para todos os ensaios/provetes de modo que se possa fazer, posteriormente, uma comparação direta na análise de resultados (Figura 29).

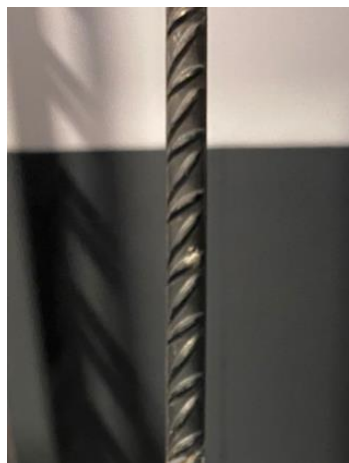


Figura 29: Varão nervurado Ø12 da classe A500 NR-SD.

Não foram efetuados quaisquer tipos de ensaios de caracterização do aço, mas de acordo com o que vem prescrito no Eurocódigo 2 (EC2), os valores considerados para cálculos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do aço A500 NR SD.

	f_{syk} (MPa)	f_{suk} (MPa)	ϵ_{suk} (%)
A500NR SD	500	550	12

5.2 Composições e amassaduras

Foram produzidos de 5 betões diferentes onde se foi variando a quantidade de cimento para cada mistura produzida, sendo que o teor de cimento usado encontra-se no intervalo de 125 a 175kg/m³, além de se ter definido dois níveis alvo de resistência aos 90 dias (40 MPa e 55 MPa).

A designação para estes betões foi baseada no acrónimo que identifica o seu tipo (*Low Cement Concrete - LCC*) juntamente com um valor estimado da sua tensão de resistência à compressão, bem como a quantidade de cimento por metro cúbico usada e, por fim, a relação água/cimento. A título de exemplo, a mistura LCC40_C125_AC100 tem um valor alvo de resistência à compressão aos 90 dias de 40 MPa, um teor de cimento de 125 kg/m³, sendo a relação A/C de 1.00. Os betões LCC produzidos foram, portanto, os seguintes:

- LCC40_C175_AC90;
- LCC40_C150_AC95;
- LCC40_C125_AC100;
- LCC55_C175_AC70;
- LCC55_C150_AC80.

Foram também produzidos dois betões de referência, betões convencionais, para comparar com os betões LCC. A sua designação inclui o acrónimo RC significando “*Reference Concrete*”, juntamente com a estimativa da tensão resistente à compressão, a quantidade de cimento utilizada e a relação água/cimento.

- RC40_C250_AC68;
- RC55_C325_AC52

De uma forma sintetizada, apresentam-se nas Tabela 4 e Tabela 5 os betões produzidos, contendo a sua designação e a classe de resistência estimada para os 90 dias para LCC e 28 dias para RC.

Tabela 4: Betões LCC produzidos.

Nomenclatura	Classe de resistência estimada
LCC40 C175 AC90	C25/30 (40 MPa, 90D)
LCC40 C150 AC95	C25/30 (40 MPa, 90D)
LCC40 C125 AC100	C25/30 (40 MPa, 90D)
LCC55 C175 AC70	C35/45 (55 MPa, 90D)
LCC55 C150 AC80	C35/45 (55 MPa, 90D)

Tabela 5: Betões de referência.

Nomenclatura	Classe de resistência estimada
RC40 C250 AC68	C25/30 (40MPa, 28D)
RC55 C325 AC52	C35/45 (55MPa, 28D)

Para o teor de pó na pasta ligante, fixou-se a dosagem de 350 kg/m³, sendo composto pelo cimento com adições de cinzas volantes e fíler. A composição de cada betão está apresentada nas Tabela 6 e Tabela 7. Os ajustes de quantidades em cada mistura tiveram em consideração os parâmetros iniciais definidos, no que respeita ao teor de cimento e à percentagem de substituição em relação ao pó na pasta. Tendo sempre em consideração o alvo de resistência definida, e com base em estudos desenvolvidos anteriormente (Robalo et al., 2018), à medida que se reduziu o teor de cimento, aumentou-se a proporção relativa de cinzas, com conseqüente redução do fíler. Contudo, há uma necessidade complementar de aumento da compactidade, progressivamente com a redução do teor de cimento.

Tabela 6: Composição das misturas para a classe alvo de 40 MPa.

Vol=1m ³	RC40_C250_AC68		LCC40_C175_AC90		LCC40_C150_AC95		LCC40_C125_AC100	
Constituintes	Massas (kg)	Volume (litros)	Massas (kg)	Volume (litros)	Massas (kg)	Volume (litros)	Massas (kg)	Volume (litros)
Cem I 52.5R	250	80	175	56	150	48	125	40
FC	100	37	140	52	120	44	100	37
CV	0	0	35	15	80	34	125	53
Spl	1.0	0.9	1.2	1.1	1.7	1.6	2.8	2.6
Água	169	169	158	158	143	143	125	125
ar	---	20	---	15	---	15	---	15
G01	199	76	181	69	183	69	186	71
A04I	734	279	722	275	731	278	742	282
A48	99	38	95	36	97	37	98	37
B614	799	300	863	324	878	330	896	337
Somas:	2351	1000	2369	1000	2383	1000	2400	1000

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

Tabela 7: Composição das misturas para a classe alvo de 55 MPa.

Vol=1m ³	RC55_C325_AC52		LCC55_C175_AC70		LCC55_C150_AC80	
Constituintes	Massas (kg)	Volumes (litros)	Massas (kg)	Volumes (litros)	Massas (kg)	Volumes (litros)
Cem I 52,5R	325	104	175	56	150	48
FC	25	9	70	26	50	19
CV	0	0	105	45	150	64
BASF_ME5025	1	0.9	3.2	3.0	4.1	3.8
Água	169	169	122	122	120	120
ar	---	20	---	15	---	15
G01	174	66	188	72	187	71
A04I	698	265	754	287	747	284
A48	192	73	99	37	99	38
B614	776	292	897	337	900	338
Somas:	2361	1000	2413	1000	2406	1000

Conforme apresentado, no total foram realizadas 7 betonagens, sendo 5 delas correspondentes aos LCC's e as restantes duas correspondentes aos betões de referência RC.

A Figura 30 mostra o processo de betonagem desde a pesagem dos materiais até ao processo de amassadura, enchimento e compactação do betão nos moldes, com agulha vibratória.

Foi usada uma misturadora de eixo vertical com capacidade total de amassadura de 100 litros.



Figura 30: Betonagem: a) Pesagem dos materiais; b) Misturadora trabalhando; c) Enchimento dos moldes para ensaios mecânicos e de durabilidade; d) Enchimento de provetes para ensaios de pull-out.

5.3 Propriedades mecânicas

De forma a determinar as propriedades mecânicas dos betões produzidos foram realizados os seguintes ensaios, de acordo com as respetivas normas:

- Resistência à compressão, NP EN 12390-3 (NP EN 12390-3, 2009);
- Resistência à tração por compressão diametral, NP EN 12390-6 (NP EN 12390-6, 2011);
- Resistência à tração por flexão, NP EN 12390-5 (NP EN 12390-5, 2009);
- Determinação do módulo de elasticidade, E397 LNEC (E397 LNEC, 1993).

5.3.1 Resistência a compressão

A resistência à compressão é uma das características mecânicas mais importantes do betão. O valor da tensão de rotura do betão a compressão é determinado através de ensaios experimentais que podem ser realizados em qualquer idade no entanto para caracterizar o betão foi conveniente a idade de 28 dias usando provetes de forma cúbica ou cilíndrica mediante a normalização (NP EN 12390-3., 2009). Existe uma diferença de resultados para os dois tipos de provetes, sendo a relação entre os valores médios das resistências, f_{cm} , para cilindros e para cubos de cerca de 80% (Eq. (5.1)).

$$f_{cm,cil} (MPa) \approx f_{cm,cubo} (28 \text{ dias}) \times 0,8 \quad (5.1)$$

Neste trabalho foram utilizados provetes cúbicos com as seguintes dimensões de aresta de 150 mm. Para cada mistura e para cada idade (7, 28, 56 e 90 dias) foram ensaiados 3 provetes cúbicos. O procedimento de ensaio foi igual para todos os provetes e todas as misturas. A cura dos provetes foi em imersão num tanque de água a uma temperatura de 20°C até ao dia anterior ao ensaio. Posteriormente, utilizou-se uma prensa hidráulica para aplicar uma tensão de compressão nos provetes até à rotura, a uma velocidade constante de 13,5 kN/s (Figura 31). De seguida, através do quociente entre a força de rotura e a área comprimida do provete, determinou-se a tensão resistente do betão à compressão. De modo a obter os valores médios da tensão resistente ($f_{cm,cubo}$), foi feita uma média aritmética dos valores obtidos.

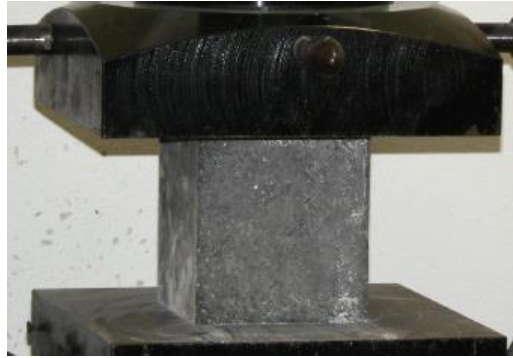


Figura 31: Ensaio de resistência à compressão do betão.

5.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A norma (NP EN 12390-6, 2011) define o procedimento de ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, em provetes com secção prismática de 100×100 mm². A aplicação da carga foi realizada a uma velocidade constante igual a 0,8 kN/s, até à rotura (Figura 32).



Figura 32: Ensaio de compressão diametral em provete cilíndrico.

O valor da tensão de rotura (f_{ct}), para cada provete, foi calculado utilizando a seguinte expressão (Eq. ((5.2))), sendo F a força de rotura (N), L e d são as dimensões da secção (mm).

$$f_{ct} (MPa) = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (5.2)$$

5.3.3 Módulo de elasticidade

Para determinar o módulo de elasticidade do betão (E_c) recorreu-se à aplicação de uma carga cíclica entre dois níveis de tensão, em provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$, de acordo com a especificação (E397 LNEC, 1993). Para a medição das deformações em cada ciclo, foram coladas, em faces opostas do prisma, pastilhas metálicas com orifícios troncocónicos e mediu-se a variação da dimensão longitudinal entre as pastilhas usando um alongâmetro. A tensão inicial tem um valor de 0,5 MPa e o segundo nível de tensão corresponde a $f_{cm}/3$. Os níveis de tensão deverão ser mantidos durante um período de 60 segundos antes de se realizar a leitura das deformações resultantes (Figura 33). Esse procedimento será repetido até que a diferença da variação da extensão ($\epsilon_a - \epsilon_b$) entre ciclos consecutivos seja inferior a 10%. O módulo de elasticidade é determinado usando a Equação (5.3).

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_{a,n} - \epsilon_{b,n}} \times 10^{-3} \quad (5.3)$$

Onde: E_c é o módulo de elasticidade em GPa, σ_a é a tensão máxima aplicada em MPa, σ_b é a tensão inicial aplicada em MPa, $\epsilon_{a,n}$ é a extensão para a tensão σ_a medida no n-ésimo ciclo de carga e $\epsilon_{b,n}$ é a extensão para a tensão σ_b medida no n-ésimo ciclo de carga.



Figura 33: Ensaio para determinação do módulo de elasticidade do betão.

5.3.4 Resistência à tração por flexão

A determinação da resistência à tração por flexão, f_{ctf} , foi efetuada de acordo com a norma (NP EN 12390-5, 2009). Os respetivos ensaios de flexão de três

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

pontos foram realizados recorrendo a provetes prismáticos de 100×100×400 mm³, estando os apoios distanciados 300 mm. Após o provete ser corretamente posicionado, colocando o eixo longitudinal do provete perpendicularmente ao eixo longitudinal do rolete superior, aplica-se uma carga concentrada a meio vão até se atingir a rotura do provete, sendo registada a carga máxima (Figura 34)



Figura 34: Ensaio para a determinação da resistência à tração por flexão.

A resistência média foi determinada usando os resultados de dois ensaios para cada mistura. A equação usada para se obter essa resistência tem em consideração as dimensões da secção do provete, o comprimento longitudinal da peça e a força máxima aplicada (Eq. (5.4))

$$f_{ctf} = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d^3} \quad (5.4)$$

Onde: f_{ctf} é a resistência do betão à tração por flexão (kPa), F é a força máxima aplicada (kN), L é a distância entre apoios (m) e d é o comprimento da aresta da secção transversal do provete (m), sendo neste caso uma secção quadrada.

5.3.5 Ensaio à retração ao longo do tempo

Os procedimentos seguidos neste ensaio estão definidos na especificação (E398 LNEC, 1993). Este ensaio consiste na medição da diferença de comprimento de um provete após secagem sob condições específicas ao longo do tempo (Figura 35). Durante a betonagem dos provetes para este ensaio são incorporados os dispositivos metálicos embebidos no topo dos provetes. 24 horas após a betonagem, desmoldam-se os provetes e faz-se a medição do comprimento inicial d_i .



Figura 35: Ensaio de determinação da retração de um provete de betão.

Os provetes foram mantidos no interior de uma câmara de secagem termo-higrométrica, a uma temperatura de 20°C e humidade relativa de 50%. Após certos períodos de tempo realizaram-se as medições do comprimento do provete, d_f . A extensão da retração em cada idade de medição é obtida pela Equação (5.5) , tendo sido ensaiados dois provetes por cada mistura:

$$\varepsilon_{cs} = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (5.5)$$

5.4 Desempenho associado à durabilidade.

Relativamente ao desempenho em termos de durabilidade foram realizados os seguintes ensaios, adotando os procedimentos nas normas respetivas

- Resistência a carbonatação, LNEC E391 (E391 LNEC, 1993);
- Difusão de cloretos, LNEC E463 (E463 LNEC, 2004);
- Capilaridade, LNEC E393 (E393 LNEC, 1993);
- Resistividade elétrica, AASHTO T 358 (AASHTO -T-358, 2015).

5.4.1 Ensaio de carbonatação acelerada

Este ensaio consiste em expor provetes cilíndricos de betão com dimensões normalizadas por um determinado período de tempo num ambiente com elevada concentração de CO₂, acelerando assim o processo de carbonatação; no fim de cada período de exposição é medida a profundidade de carbonatação (ISEC, 2021)

Segundo a especificação LNEC E391 (E391 LNEC, 1993), o ensaio é realizado usando provetes de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Para a processo de cura, os provetes devem ser colocados dentro de um tanque de água em condições estáveis de temperatura, durante um período de 14 dias, de modo a completar ao máximo o processo de hidratação do cimento. Ao fim desse período os provetes são retirados do tanque e deixados ao ar durante outros 14 dias, completando assim 28 dias de idade. Após secagem coloca-se nos topos dos provetes um revestimento isolante de forma que o acesso do CO₂ ocorra unicamente pela superfície lateral. Depois da secagem desse isolante, os provetes são colocados na câmara de carbonatação com uma humidade relativa de 55 – 65%, à temperatura de 23 ± 3 °C e uma alimentação de ar com $5\% \pm 0,1\%$ de concentração de CO₂; as condições devem ser medidas durante todo o período de ensaio. Após cada tempo de exposição pretendido retiraram-se os provetes da câmara, fraturam-se a meio e pulveriza-se com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1% (Figura 36). Neste caso, foram realizados ensaios em dois provetes por cada mistura, para cada período de exposição (28, 56, 90 dias).

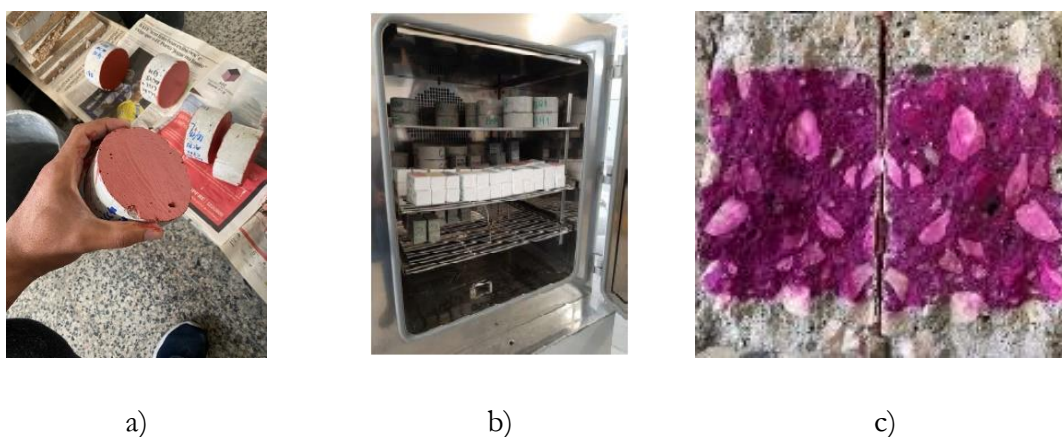


Figura 36 Ensaio de carbonatação: a) impermeabilização das faces; b) provetes dentro da câmara de carbonatação; c) pulverização com solução de fenolftaleína.

5.4.2 Difusão de cloretos

O ensaio permite determinar o coeficiente de difusão de cloretos que permite quantificar a resistência do betão à penetração dos cloretos. Estes ensaios foram realizados de acordo com a especificação LNEC E463 (E463 LNEC, 2004).

O ensaio pode ser realizado em betões novos ou extraídos de alguma obra já com alguns anos de vida e consiste em aplicar entre os topos do provete um potencial elétrico que irá forçar o transporte dos iões cloreto através do betão por migração. Primeiro é realizada uma preparação das soluções anódica de hidróxido de sódio e catódica de cloreto de sódio. De seguida coloca-se o provete no equipamento/células, tendo especial atenção no sistema de aperto para garantir a estanquidade. De seguida enchem-se os reservatórios do equipamento com as soluções anódica e catódica e liga-se o cátodo ao polo negativo da fonte de alimentação e o ânodo ao polo positivo. Depois liga-se a fonte de alimentação com uma voltagem pré-estabelecida de 30 volts e faz-se o registo da intensidade da corrente inicial de cada provete, devendo manter-se a temperatura do ensaio entre os 20 e 25°C (Figura 37).

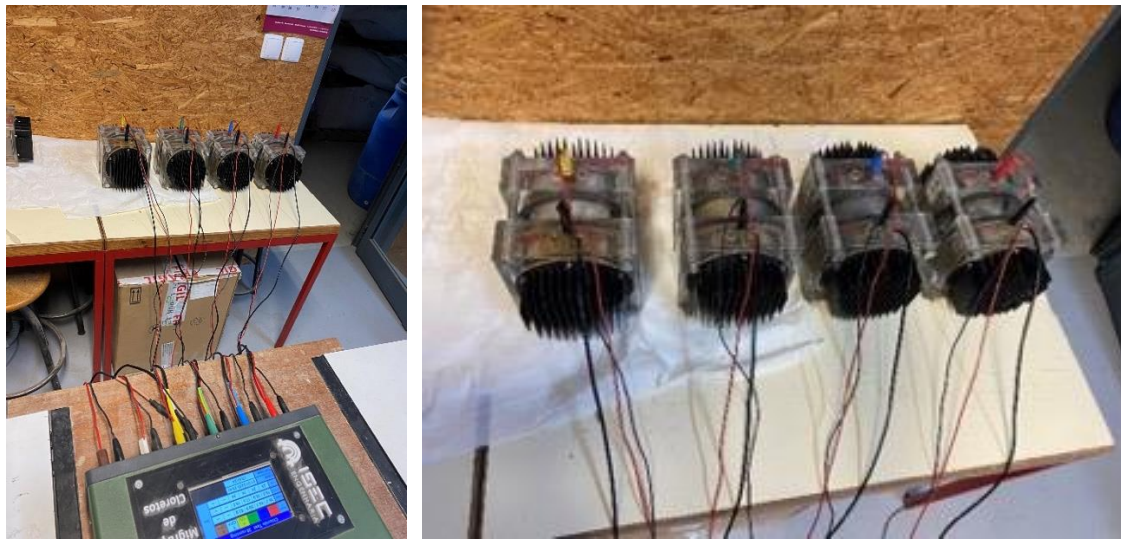


Figura 37: Provetes em betão ligados a fonte de alimentação.

Após o registo da voltagem inicial para cada provete faz-se um ajuste da voltagem usando a informação da Tabela 8, apresentada no anexo 2 da norma NT Build 492 (NT BUILD 492, 1999) e regista-se novamente a intensidade da corrente inicial.

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

Tabela 8: Potencial elétrico e a duração do ensaio.

Intensidade de corrente inicial aplicada I_{30V} (com 30V) (mA)	Potencial elétrico aplicado (após ajuste) (V)	Intensidade de nova corrente inicial I_0 (mA)	Duração de ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

A nova intensidade de corrente deve ser mantida durante o tempo indicado na Tabela 8. O procedimento é aplicado para cada provete e regista-se a temperatura inicial de cada solução anódica. Após o término do ensaio, faz-se o registo da temperatura e da intensidade da corrente de cada um dos provetes. Limpam-se os provetes de forma a eliminar o excesso de humidade e fratura-se cada provete ao meio. De seguida, pulveriza-se a superfície retangular da fratura com uma solução de nitrato de prata obtendo-se um precipitado branco/prateado que representa a presença de cloretos (Figura 38).



Figura 38: a) Provetes em betão partidos ao meio; b) Provetes com as superfícies pulverizadas com nitrato de prata.

Com os valores obtidos calcula-se o coeficiente de difusão de cloretos através da seguinte equação (5.6):

$$D = \frac{0,0239 * (273 + T) * L}{(U - 2)t} * \left(x_d - 0,0238 * \sqrt{\frac{(273 + T) * L * x_d}{U - 2}} \right) \quad (5.6)$$

Onde: D é o coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), U é o valor absoluto de voltagem aplicada, T é o valor médio das temperaturas inicial e final da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$), L é a espessura do provete em mm, x_d é o valor médio de profundidade de penetração dos cloretos (mm) e t é a duração do ensaio (horas).

5.4.3 Absorção capilar (capilaridade)

A capilaridade é definida como sendo a entrada da água na rede porosa do betão resultante das forças capilares derivadas da diferença de pressão entre a superfície livre da água do exterior do betão e a superfície dos poros capilares.

A absorção capilar é calculada pelo quociente entre o aumento do peso do provete (água absorvida por capilaridade) e a área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água, sendo expressa em kg/m^2 . O aumento do peso do provete indica quanta água foi absorvida, ou seja, é a diferença entre a massa seca do provete e a massa do provete após absorção de água (Eq. (5.7)).

$$S_a = \frac{M_i - M_0}{S} \quad (5.7)$$

Onde: S_a indica a quantidade de água absorvida por unidade de superfície no instante t_i e é expressa em kg/m^2 ; M_i é a massa do provete ao fim do tempo t_i expressa em kg; M_0 é a massa do provete seco no instante t_0 , expressa em kg e; S é a secção do provete em contacto com a água (m^2).

Para a execução deste ensaio foram seguidos os procedimentos definidos na especificação LNEC E393 (E393 LNEC, 1993). Os procedimentos para executar este ensaio são os seguintes: i) primeiro os provetes são colocados durante um período de 28 dias num tanque de água até o momento do ensaio; ii) depois os provetes são colocados numa estufa a uma temperatura de $40 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até ao instante em que a massa do provete estabilizou; iii) colocam-se os provetes em contacto direto com uma lamina de água de 2 a 5mm, na posição vertical, fazendo sempre a reposição da água à medida que os provetes vão absorvendo a água por capilaridade; iv) após o início de ensaio e, pelo menos, ao fim de 3, 6, 24 e 72 horas mede-se a massa dos provetes. Estas pesagens permitem medir a absorção de água por capilaridade (Figura 39). Para cada mistura foram ensaiados 2 provetes.

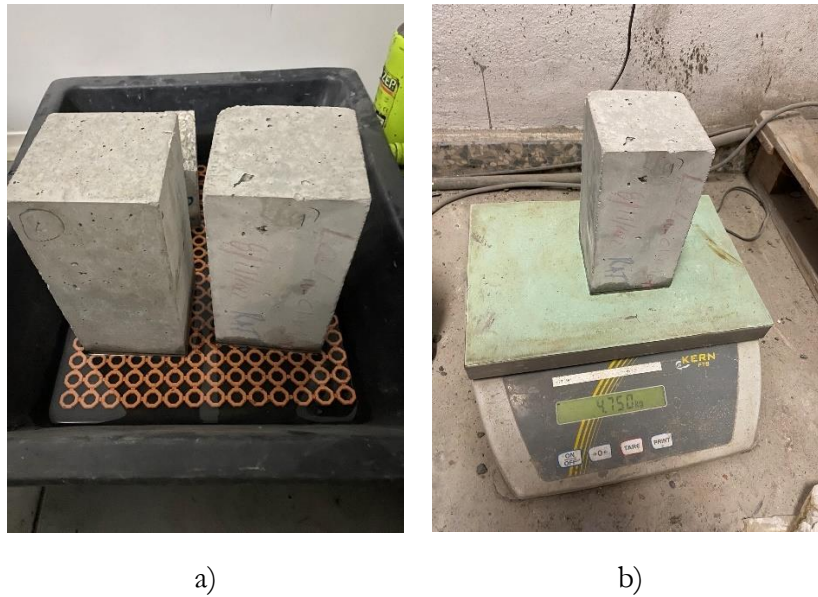


Figura 39: Procedimento do ensaio: a) Provetes em contacto com a lamina de água; b) Pesagem do provete após o contacto com a lamina de água.

5.4.4 Resistividade

Este ensaio não destrutivo permite estimar a penetração dos cloretos no betão e conseqüentemente analisar sua durabilidade. O ensaio de resistividade superficial foi realizado de acordo com a norma americana AASHTO T 358 (AASHTO -T-358, 2015), onde é utilizada uma sonda Wenner (Resipod), para medir a resistividade elétrica do betão (Figura 40).

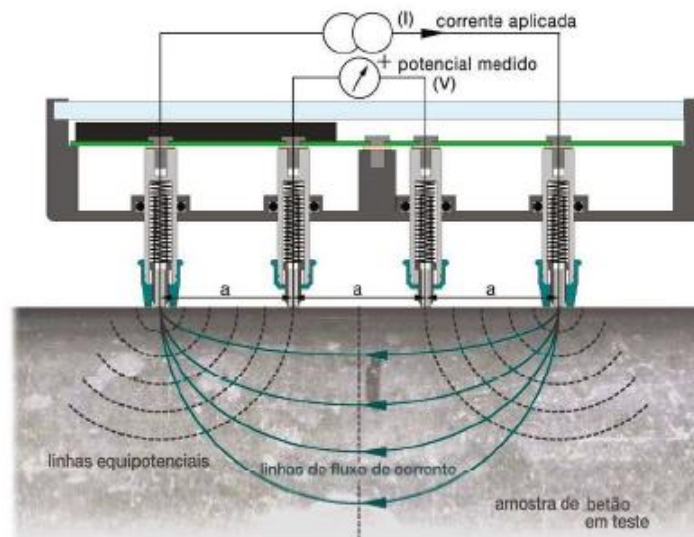


Figura 40: Equipamento usado para o ensaio.

Os provetes usados neste ensaio foram provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e comprimento de 200 mm. Para execução deste ensaio é preciso

marcar no topo dos provetes os pontos correspondentes a 0, 90, 180 e 270 graus de circunferência (Figura 41). Além destes pontos, faz-se também a marcação do centro do provete na sua direção longitudinal.

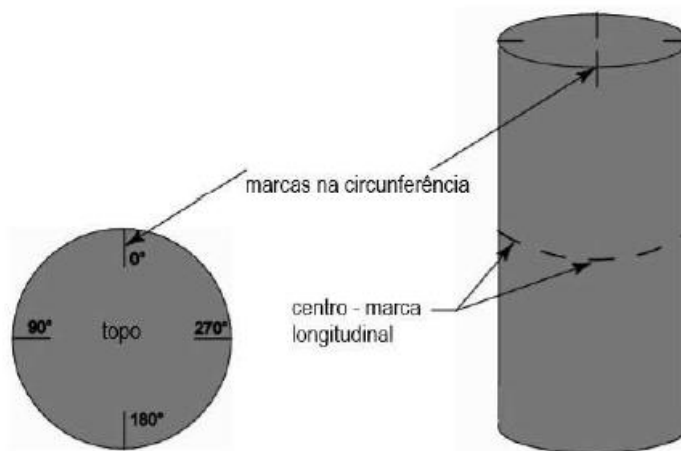


Figura 41: Marcações no provete

Os provetes estão num tanque de água até realização do ensaio. Após o período definido, os provetes são retirados da água e procede-se ao ensaio propriamente dito, em que se faz o registo das leituras pressionando o aparelho, através dos seus quatro pontos, nos provetes e nas marcas de circunferência. De forma a recolher valores mais precisos, o procedimento é repetido de modo a obter, para cada ponto da circunferência duas leituras e o valor usado será a média de todas as leituras. Com o valor da resistividade elétrica superficial média, pode-se avaliar indiretamente a resistência do betão à penetração de cloretos através da tabela indicada abaixo (Tabela 9).

Para cada betão produzido foram executadas leituras de resistividade em 6 idades diferentes: 7, 14, 21, 28, 56 e 90 dias.

Tabela 9: Penetração de cloretos baseada na resistividade.

Penetração de cloretos	Método de Resistividade Superficial	
	Provete cilíndrico (kΩ-cm) (Ø100 mm e comprimento 200 mm) a=1,5	Provete cilíndrico (kΩ-cm) (Ø150 mm e comprimento 300 mm) a=1,5
Alto	<12	<9,5
Moderado	12–21	9,5–16,5
Baixo	21–37	16,5–29
Muito baixo	37–254	29–199
Insignificante	>254	>199

a – Espaçamento dos pontos na sonda *Wenner*

5.5 Ensaios de aderência “pull-out”

Para a medir a aderência dos LCC aos varões de aço foram realizados 30 ensaios. Para cada betão foram produzidos 6 cubos com aresta de 200 mm. Foram usados varões de 12 mm de diâmetro do aço foi o A500 NR SD.

O ensaio *pull-out* consiste na aplicação de uma força de arrancamento num varão que se encontra inserido num provete cúbico de betão até que a força de aderência entre o betão e o aço sejam perdidas. Soldou-se uma chapa de aço numa das extremidades dos varões para servir de ancoragem no equipamento que foi usado para exercer a força de arrancamento (Figura 42). Durante o ensaio a força exercida foi registada com a frequência de uma leitura por segundo. Sabendo a força aplicada e a área do varão em contacto com o betão é possível a tensão de aderência.



Figura 42: Preparação e posicionamento dos varões nos moldes dos provetes para ensaio pull-out.

A configuração deste ensaio é constituída por um atuador com capacidade de carga de 180 kN em tração e por uma caixa metálica que funciona como estrutura de reação onde o provete é colocado. As Figura 43 a Figura 46 mostram os equipamentos usados e a configuração do ensaio.

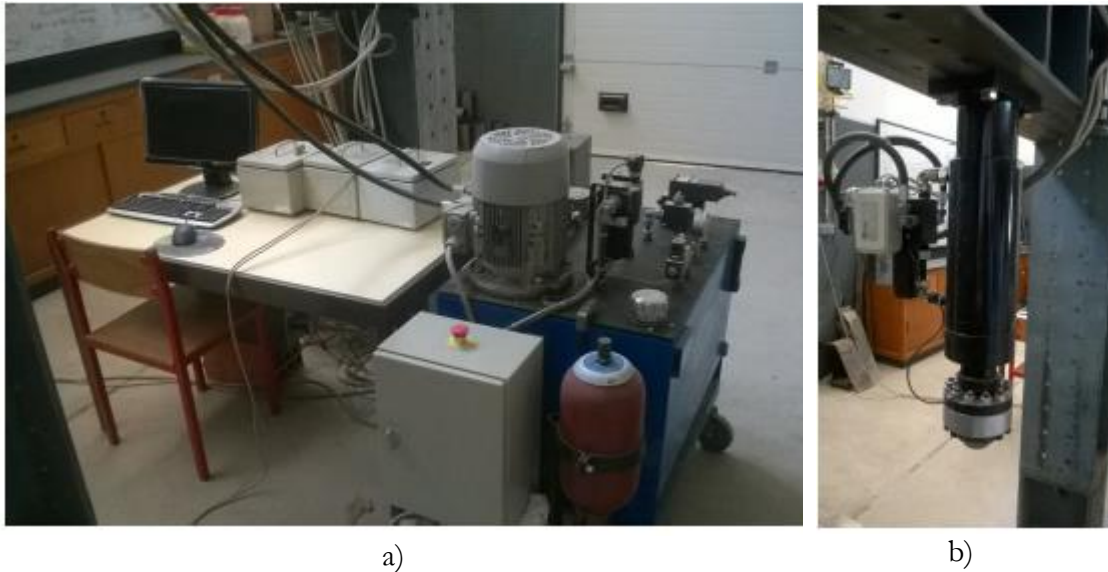


Figura 43: Equipamento usado no ensaio de aderência: a) Central hidráulica e computador para registo de dados; b) Pormenor do atuador de carga.

Para execução deste ensaio teve-se em consideração a norma EN 10080 (EN 10080, 2005), que define os procedimentos para determinar a relação entre a tensão de aderência e o escorregamento ou deslizamento para comprimentos retos de amarração. O anexo D desta norma especifica o método de ensaio para varões usados em elementos estruturais de betão armado. A relação entre a força de tração e o escorregamento (ou seja, o deslocamento relativo entre o aço e o betão) é medido até à rotura. A força é aumentada até a rotura por aderência ou até à rotura do provete, neste caso a uma velocidade de 0,02 mm/s (controlo de deslocamento). A montagem do ensaio está ilustrada na Figura 44.

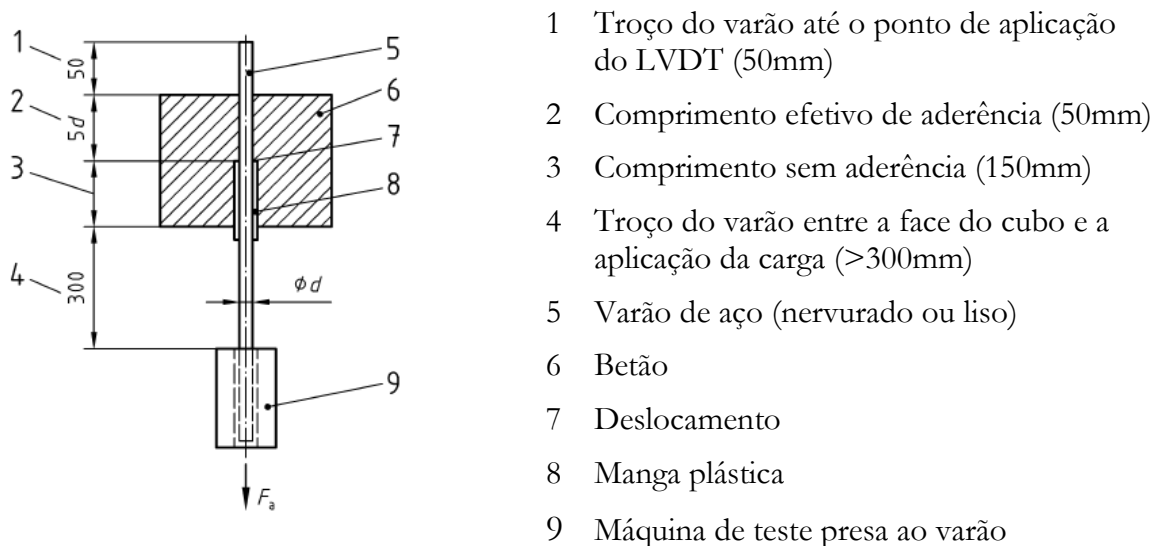


Figura 44: Princípio do teste de arrancamento segundo a norma EN 10080 (EN 10080, 2005).

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

Para realizar este ensaio, os provetes foram colocados no interior de uma caixa metálica de reação, presa ao pórtico por vários parafusos metálicos roscados na parte inferior (Figura 45). Na figura abaixo apresentam-se fotografias da preparação dos ensaios.



Figura 45: Estrutura metálica de encaixe conjuntamente com o provete de ensaio.

O sistema permite medir a força e o deslocamento do atuador. De maneira a obter valores mais fidedignos do escorregamento do varão em relação ao betão foram usados 2 LVDT's acoplados ao varão, na diagonal do cubo. Na Figura 46 está apresentado o esquema global do ensaio.

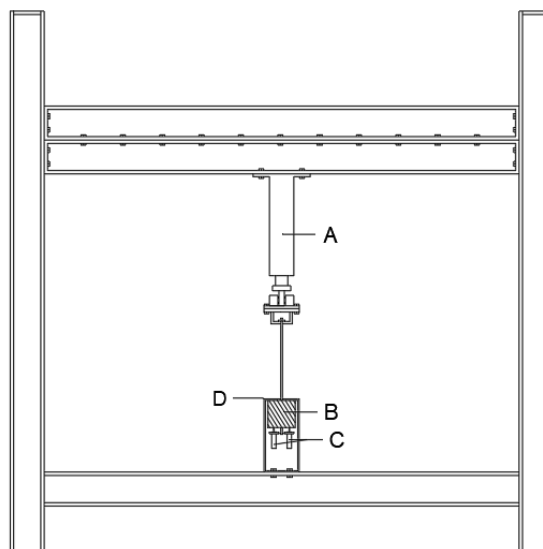


Figura 46: Esquema do ensaio de aderência: A – Atuador; B – Provette de ensaio; C – LVDT's; D - Estrutura metálica de suporte e reação.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Propriedades mecânicas

6.1.1 Resistência a compressão

A resistência dos betões à compressão foi avaliada aos 7, 28, 56 e 90 dias de forma a analisar como as resistências evoluíam ao longo do tempo. Os resultados dos valores médios, f_{cm} , obtidos para os LCC e para os RC estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 47. Na Figura 48 contam os rácios de evolução da resistência à compressão entre os 90 e os 28 dias de idade.

Tabela 10: Resistência dos betões à compressão (provete cúbicos).

	f_{cm} 7D (MPa)	f_{cm} 28D (MPa)	f_{cm} 56D (MPa)	f_{cm} 90D (MPa)
RC40 C250 AC68	32,9	38,1	40,4	41,4
LCC40 C175 AC90	28,2	34,9	38,1	39,6
LCC40 C150 AC95	28,9	37,1	39,7	43,0
LCC40 C125 AC100	25,2	35,8	40,4	45,5
RC55 C325 AC52	39,8	50,1	53,7	55,6
LCC55 C175 AC70	36,1	50,9	56,4	61,7
LCC55 C150 AC80	34,5	45,9	51,6	58,1

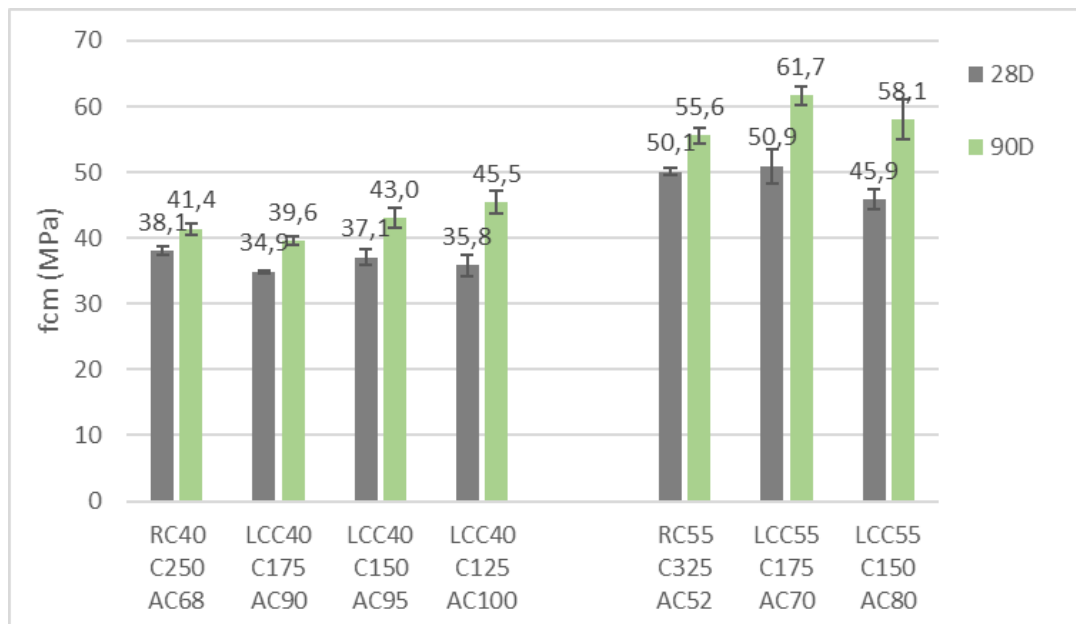


Figura 47: Desenvolvimento da resistência à compressão dos betões LCC e RC ao longo do tempo.

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

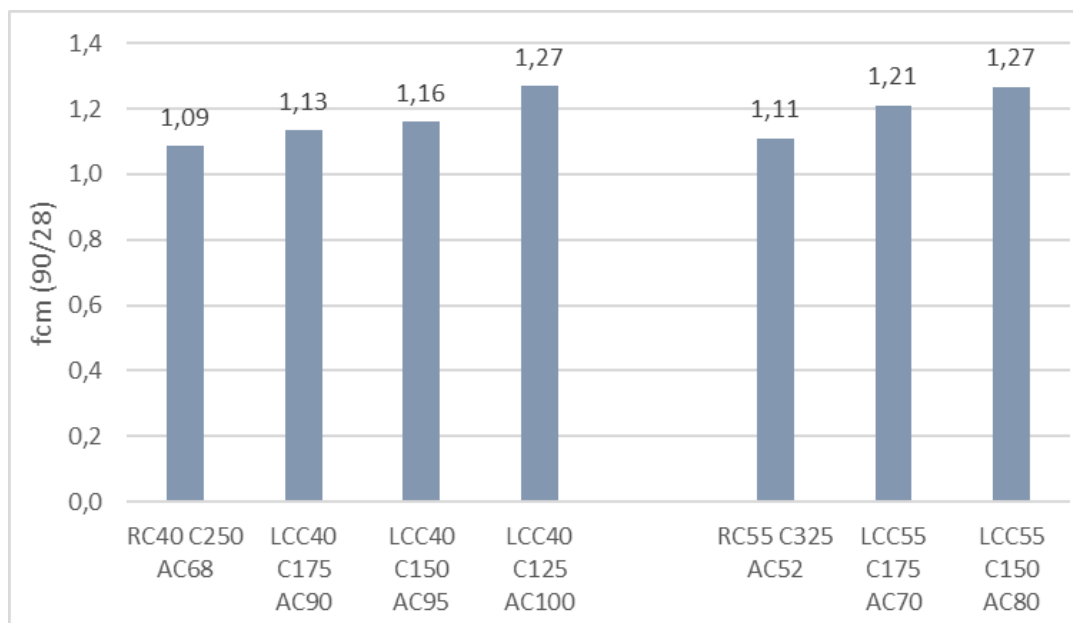


Figura 48: Rácio da evolução da resistência dos betões entre os 28 e os 90 dias de idade.

Tendo em consideração que os betões LCC foram formulados para terem uma redução de cimento relativamente aos betões convencionais e essa redução foi compensada com um aumento gradual da compactidade e da cinza volante, comprovou-se que foi possível aproximar o nível de resistência dos betões LCC40 relativamente ao betão de referência RC40, aos 28 dias de idade. Recorda-se que reduzindo a dosagem de cimento, e aumentando a dosagem de cinza volante, a relação A/C aumentada gradualmente, embora esse aumento tenha sido limitado pelo também aumento da compactidade. A partir dos 28 dias nota-se o efeito das reações pozolânicas derivadas das cinzas volantes. Esse efeito não se nota no betão RC porque não possui nenhuma adição pozolânica. Aos 90 dias de idade, os níveis de resistência dos betões LCC40, comparativamente ao RC40, aumentaram substancialmente e devido ao efeito longo e tardio das reações pozolânicas nos LCC's (efeito da cinza volante). Em relação ao RC e LCC55, recorda-se que o betão de referência tem uma dosagem de cimento de 325 kg/m³ e teve um aumento da resistência entre os 28 e os 90 dias de idade, mas os LCC tiveram um aumento ainda maior. Este resultado deve-se essencialmente à adição pozolânica conjugada com o aumento da compactidade.

O aumento do rácio de resistências entre 90 e 28 dias é tanto maior quanto maior é a dosagem de cinza volante incorporada, atingindo 1,27 nas misturas com maior teor da adição pozolânica, enquanto nos betões de referência o rácio é de cerca de 1,10. O betão de referência RC40 teve um aumento de aproximadamente 10% dos 28 aos 90 dias de idade, mas os restantes betões LCC, para essa mesma classe de resistência prevista, obtiveram um aumento de 13, 16 e 27%. Analisando o RC55, mesmo com maior dosagem de cimento, a evolução da resistência teve um aumento de 11%. Já os LCC pertencentes à mesma classe de resistência, apresentaram aumentos mais significativos, 21 e

27%, salientando-se que nestes betões a dosagem de cimento é menor, mas tem adição de cinza volante.

Analisando as curvas de endurecimento apresentadas na Figura 49 e na Figura 50 pode concluir-se o seguinte: os betões têm curvas de evolução de resistência diferentes, verificando-se que a evolução da resistência dos betões com uma maior dosagem de cimento (betões de referência RC40 e RC55) são, nos primeiros dias, mais rápidas, porém são também os primeiros com tendência a estabilizarem. Contudo, o parâmetro que define a forma da curva foi ajustado de modo a melhor corresponder à evolução caracterizada nos betões LCC.

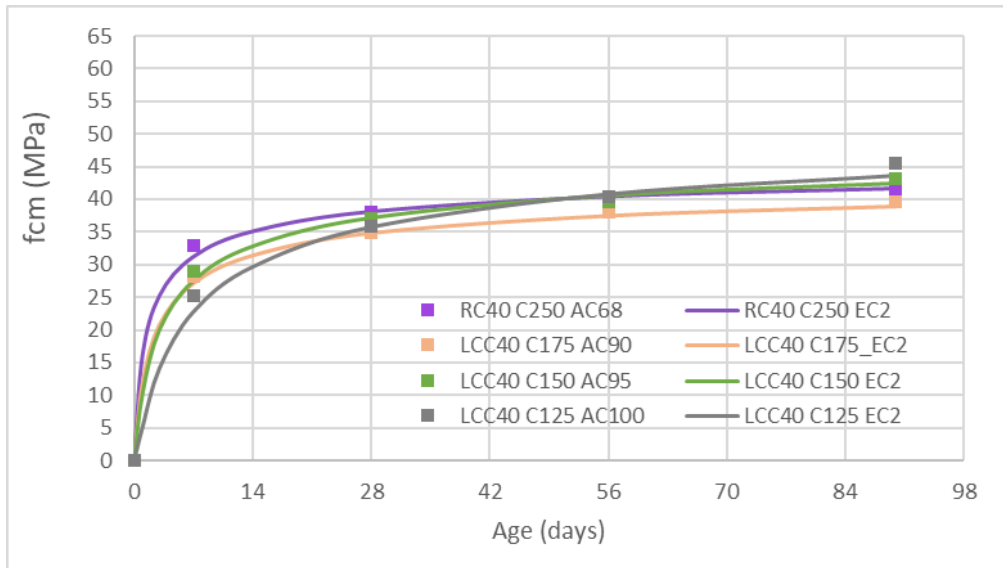


Figura 49: Evolução da curva de endurecimento dos betões da classe 40 MPa.

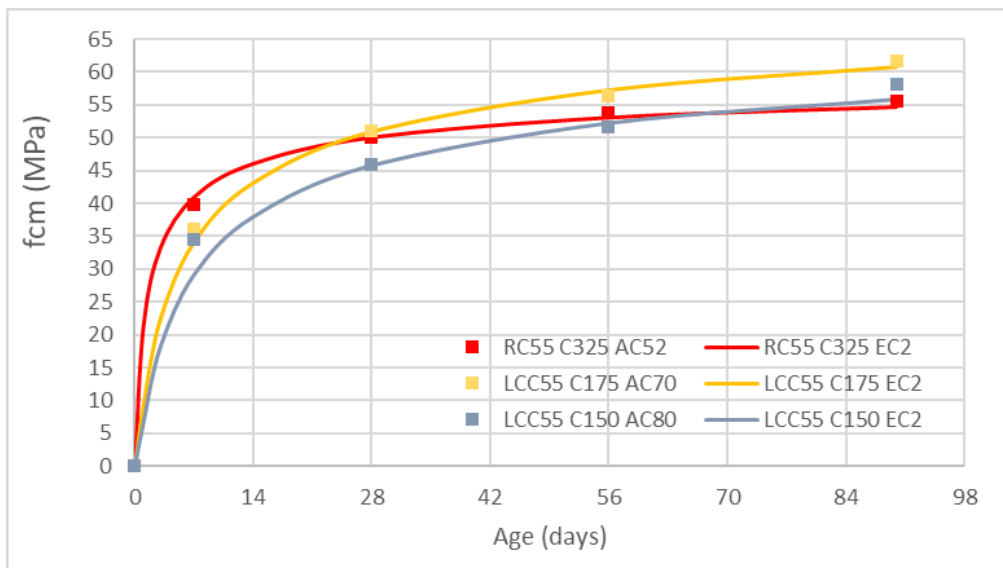


Figura 50: Evolução da curva de endurecimento dos betões da classe 55 MPa.

Tendo em consideração que a tensão de rotura do betão à compressão numa idade t depende do tipo de cimento, da temperatura e das condições de cura, para cada betão foi estimado o valor médio da tensão de rotura para o tempo t , através das expressões do EC2 indicadas abaixo (Eq. (6.1) e Eq. (6.2)):

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (6.1)$$

Com

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \times \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (6.2)$$

Onde: $\beta_{cc}(t)$ é o coeficiente que depende da idade do betão e depende da variável t (idade, expressa em dias) e do parâmetro s que é o coeficiente que varia consoante o tipo de cimento usado (tem valores mais baixos para um endurecimento rápido e mais altos para um endurecimento mais lento). O critério de variabilidade do parâmetro s é baseado na evolução das resistências caracterizadas nos betões. O parâmetro s permite ajustar as curvas de endurecimento de modo a se obter um melhor acompanhamento da evolução destas resistências.

Para todas as misturas foi usado sempre a mesma classe de cimento o CEM I 52.5 R, que tem a característica de ter um ganho rápido de endurecimento, logo aos 7 dias (a designação do cimento comporta a letra R). O EC2 indica que para este tipo de cimento usa-se um parâmetro s igual a 0,20 devido a sua evolução rápida na resistência. Para cimentos cuja evolução é mais lenta, consequência do endurecimento lento, usam-se parâmetros s maiores, de maneira a acompanhar melhor a evolução da resistência. Apesar de se usar o mesmo tipo de cimento em todas as misturas, a quantidade de cimento foi reduzida para os LCC, sendo esta compensada com o aumento da dosagem de cinzas volantes e também com o aumento da compacidade. Logo, nestes betões o endurecimento é mais lento. É possível chegar a esta conclusão analisando a evolução de cada uma das misturas indicadas nas Figura 49 e Figura 50. Observa-se que o betão que apresenta menor resistência aos 7 dias é o mesmo que tem mais resistência ao fim de 90 dias (LCC40_C125_AC100). Comparativamente ao RC40, os LCC desta classe de resistência não atingem um patamar onde o nível de resistência estabiliza. Há uma certa continuidade no aumento do nível de resistência ao longo do tempo derivado da ação a longo prazo das cinzas volantes (reações pozolânicas).

Sabendo que a evolução das resistências ao longo do tempo está dependente da ação pozolânica das cinzas volantes, ou seja, em idades mais jovens a evolução da resistência é mais lenta e em idades posteriores a 28 dias a resistência continua a evoluir de forma significativa, na Tabela 11 são propostos valores

para o parâmetro s de modo a conseguir-se uma melhor aproximação da evolução da resistência à compressão das várias misturas ao longo tempo.

Tabela 11: Valores do parâmetro s adotados para cada mistura.

	Parâmetro 's' adotado
RC40 C250 AC68	0,20
LCC40 C175 AC90	0,25
LCC40 C150 AC95	0,30
LCC40 C125 AC100	0,45
RC55 C325 AC52	0,20
LCC55 C175 AC70	0,40
LCC55 C150 AC80	0,45

6.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Tal como foi referido anteriormente, a resistência à tração por compressão diametral foi avaliada em provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$ aos 28 e 90 dias de idade. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos LCC e dos RC são apresentados nas Figura 51 e Figura 52.

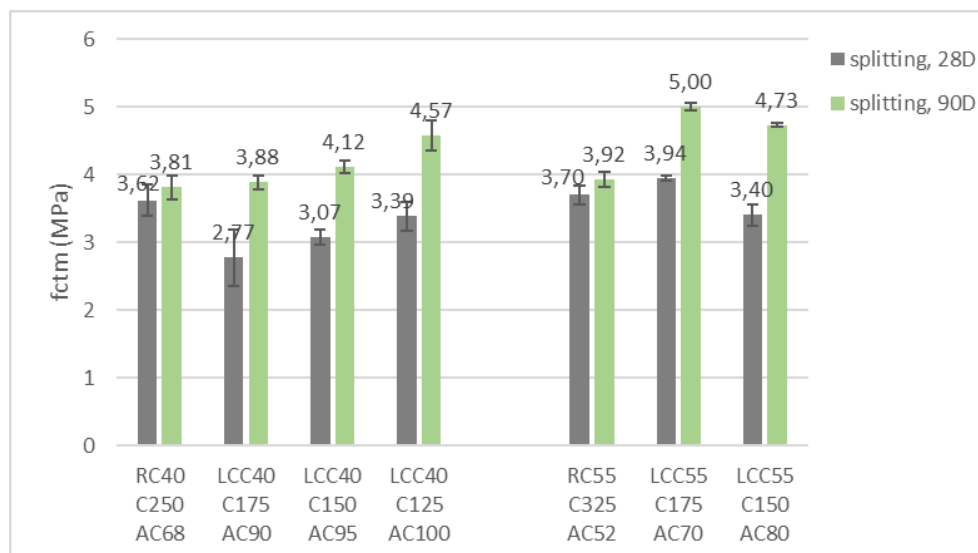


Figura 51: Comparação das resistências à tração por compressão diametral dos RC e dos LCC aos 28 e 90 dias.

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

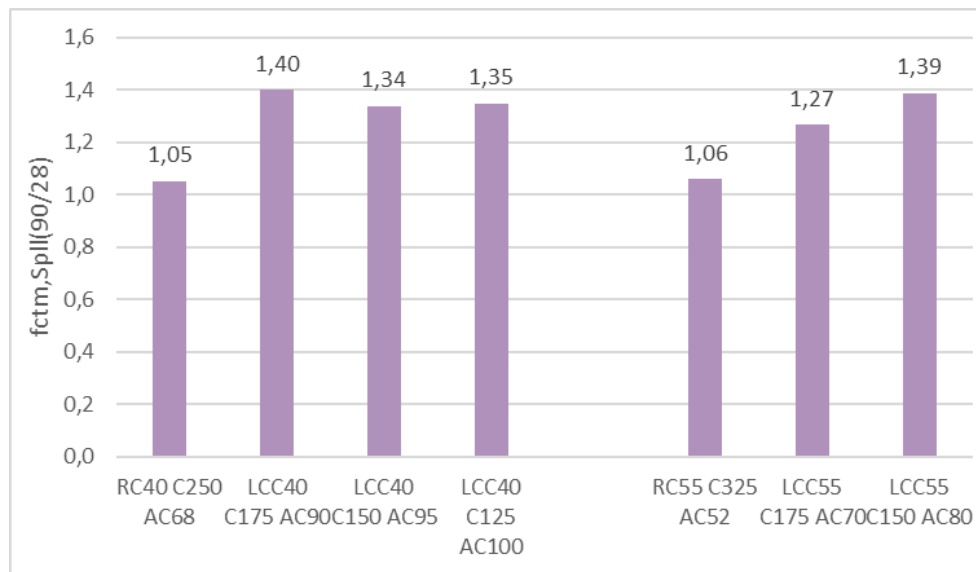


Figura 52: Rácio da evolução da resistência à tração por compressão diametral dos betões entre os 28 aos 90 dias de idade.

Com base nos resultados ilustrados nas Figura 51 e Figura 52 é possível fazer as seguintes observações. Tal como acontece na resistência à compressão, os betões de referência RC tiveram um ligeiro aumento (cerca de 5%) no que diz respeito à resistência à tração por compressão diametral entre os 28 e os 90 dias, devido à maior dosagem de cimento na pasta ligante e também porque aos 90 dias as reações de hidratação do cimento estarem mais completas. Contudo, houve um aumento elevado da resistência dos betões LCC entre os 28 e os 90 dias de idade, sendo representados pelos rácios que variam entre 1,27 e 1,45. Mesmo com menor dosagem de cimento as misturas LCC tiveram resistências à tração, por compressão diametral, muito maiores, comparativamente aos betões RC, não aos 28 dias, mas apenas em idade mais tardia (90 dias), indicando mais uma vez que a diminuição de ligante principal pode ser compensada, principalmente, com a adição de pozolanas combinada com o aumento da compacidade das misturas.

Analisando o betão de referência RC40_C250_AC68 e o LCC40_C125_AC100, a resistência à tração por compressão diametral aos 90 dias de idade foi de 3,81 e de 4,57 MPa, respetivamente; o aumento foi de aproximadamente 20%, quando a dosagem de cimento passou para metade.

Na Figura 56 é possível ver com maior clareza como a resistência à tração por compressão diametral se desenvolve ao longo do tempo. Os RC têm um desenvolvimento muito baixo ao longo do tempo devido à ausência de adições pozolânicas e às relações A/C mais reduzidas. Os betões de referência têm um acréscimo de resistência de apenas 5 e 6%. Já os LCC apresentaram um aumento mais significativo ao longo do tempo: os LCC da classe de 40 MPa tiveram um aumento médio de 36%, ou seja, aumentaram 31% relativamente ao betão de referência da mesma categoria; os LCC da classe de 55 MPa

apresentaram um aumento médio da resistência de 33%, ou seja, um aumento de 27% relativamente ao betão de referência RC da mesma categoria.

6.1.3 Resistência à tração por flexão

Tal como foi referido anteriormente, a resistência à tração por flexão dos betões foi avaliada com recurso ao ensaio de flexão em provetes prismáticos de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ aos 28 dias de idade. Estes resultados foram correlacionados com as resistências à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade (Figura 53 e Figura 54).

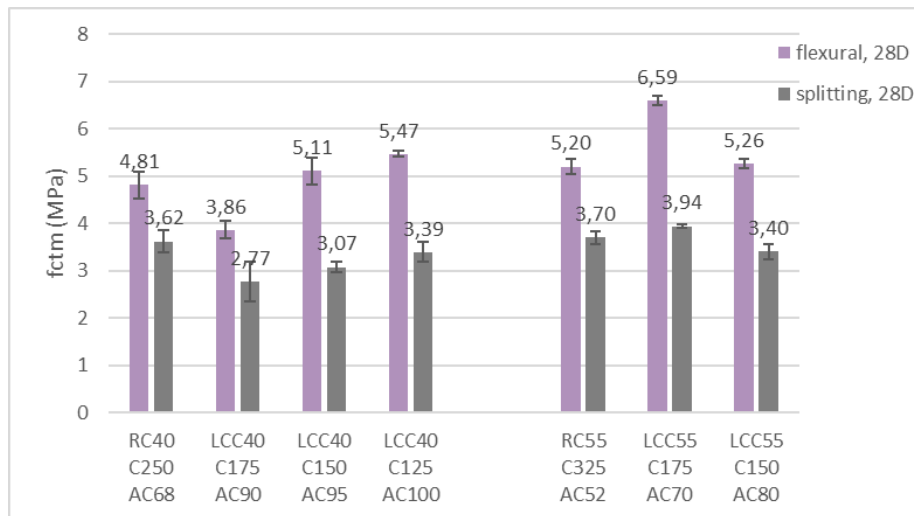


Figura 53: Resistências à tração por flexão comparativamente à resistência à tração compressão diametral.

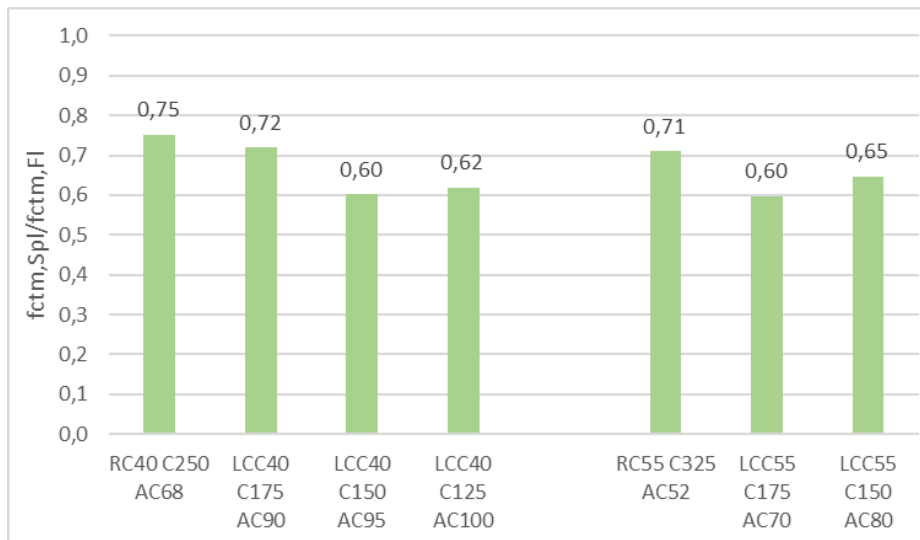


Figura 54: Rácio entre a resistência à tração por flexão e por compressão diametral.

Analisando os resultados foi possível concluir que as resistências à tração por flexão dos betões representam valores superiores relativamente à resistência à tração por compressão diametral, onde o rácio entre $f_{ctm, spl} / f_{ctm, fl}$ varia entre 0,6 e 0,75, sendo o rácio maior nos betões RC do que nos betões LCC.

6.1.4 Módulo de elasticidade

Tal como foi descrito anteriormente, o módulo de elasticidade foi determinado usando provetes prismáticos $100 \times 100 \times 400 \text{mm}^3$, para 28 e 90 dias de idade. As Figura 55 e Figura 60 apresentam os resultados obtidos, constando na última os rácios de evolução entre os 28 e 90 dias.

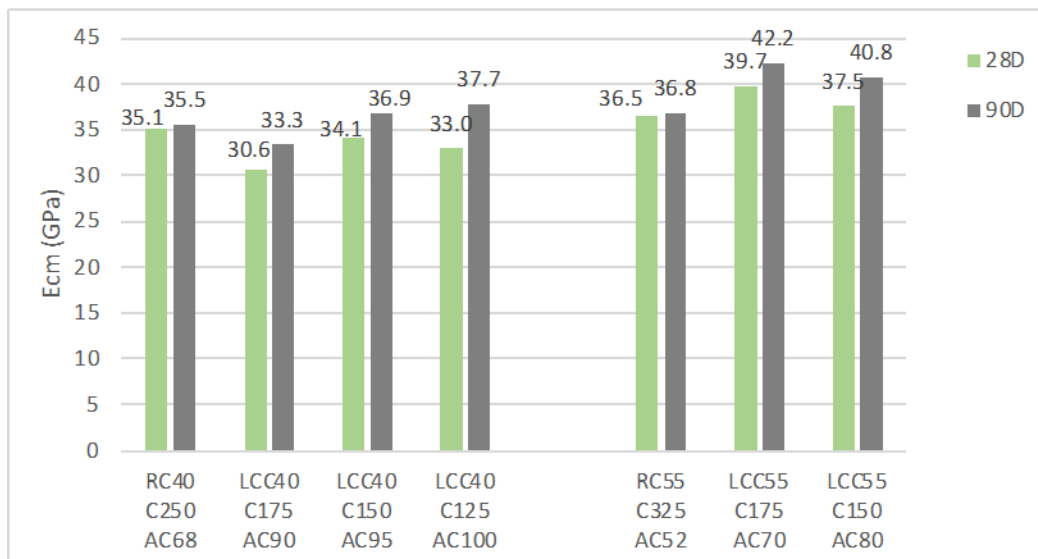


Figura 55: Módulo de elasticidade dos betões para 28 e 90 dias de idade.

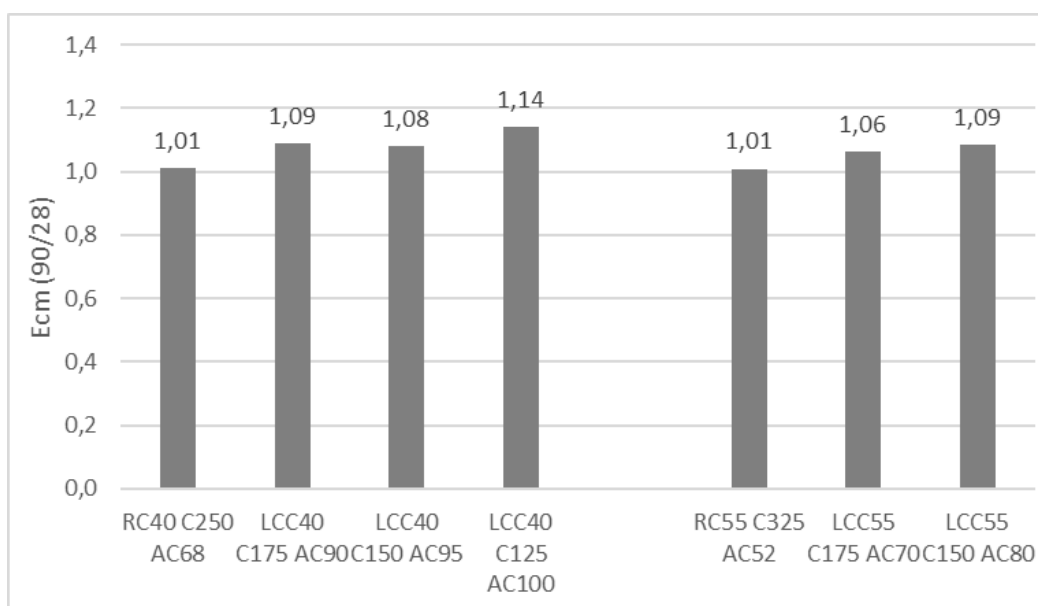


Figura 56: Rácio da evolução do módulo de elasticidade entre os 28 aos 90 dias de idade.

Analisando as figuras acima indicadas pode concluir-se que a evolução do módulo de elasticidade é mais notória nos LCC do que nos RC, uma vez que ambos os betões de referência RC apresentaram um aumento de apenas 1%, enquanto os LCC tiveram aumentos compreendidos entre 6 e 14 %, dos 28 para 90 dias.

Salienta-se que apesar de o betão de referência RC40_C250_AC68, ter uma dosagem de cimento de 250 kg/m³, o seu módulo de elasticidade aos 90 dias de idade foi ultrapassado pelos LCC da mesma classe de resistência, com a exceção do betão LCC40_C175_AC90. Os betões com maiores dosagens de cimento podem ter um menor módulo de elasticidade, uma vez que este parâmetro está altamente dependente da compacidade e da evolução da resistência. Este comportamento justifica-se essencialmente pela compacidade inicial mais elevada nos betões LCC, sendo o módulo progressivamente mais elevado para betões mais compactos. Por outro lado, só o aumento da compacidade não é suficiente, pois a redução de cimento dos betões LCC teve de ser progressivamente compensada pela adição de cinzas volantes. Aos 28 dias, esse efeito ainda não é significativo em termos de resistências e do módulo de elasticidade, mas a influência do efeito pozolânico fica claramente comprovado pelos aumentos de ambas as propriedades aos 90 dias nos LCC, resultando assim num material mais rígido, superando claramente os betões de referência.

6.2 Retração

Tal como descrito no capítulo anterior, este ensaio consiste em medir a diferença de comprimento de um provete após secagem sob condições específicas e o comprimento medido logo após desmoldagem, de preferência após 24 horas. Tendo em consideração que a retração nos provetes acontece maioritariamente por secagem, apesar das misturas terem diferentes parâmetros na formulação, quando se aumenta a compacidade das misturas e reduz-se a relação A/C, a retração por secagem é muito reduzida.

Na Figura 57 é apresentada a evolução das retrações de todas as misturas produzidas ao longo do tempo. Nota-se que os betões de referência RC apresentaram retrações mais elevadas e os betões LCC retrações muito baixas e isso deve-se principalmente à elevada compacidade e à reduzida dosagem de água, apesar de as relações A/C serem altas e de existir o efeito da pozolânico das adições, que também contribui para a retração. Em suma, dosagens de cimento baixas juntamente com reduzidas dosagens de água resultam em retrações menores.

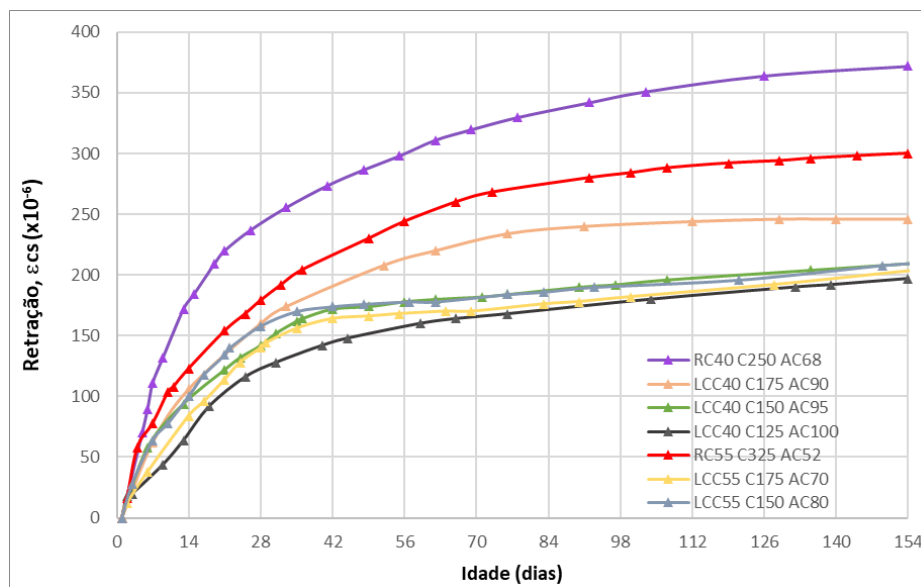


Figura 57: Evolução da retração de cada mistura produzida ao longo do tempo.

6.3 Durabilidade

6.3.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade refere-se à entrada de água na rede porosa do betão devida à diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a superfície dos poros capilares; a mesma é determinada pelo quociente entre o aumento do peso do provete e a área da face do provete que se encontra em contacto com a água, e é expressa em kg/m^2 ou em mg/mm^2 . Nas Figura 58 e Figura 59 apresentam-se a evolução da absorção de água por capilaridade das misturas LCC aos 28 e 56 dias de idade, respetivamente.

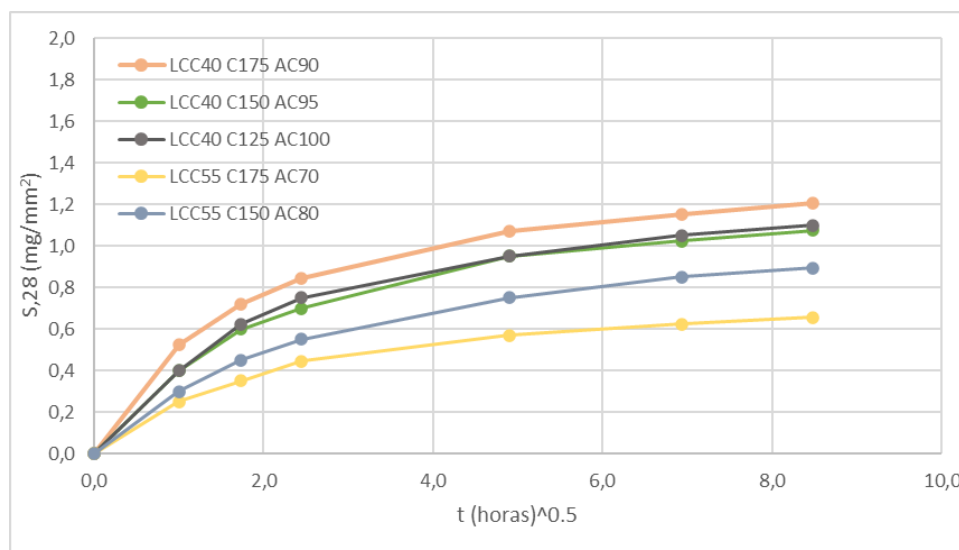


Figura 58: Evolução da quantidade de água absorvida por unidade de superfície aos 28 dias.

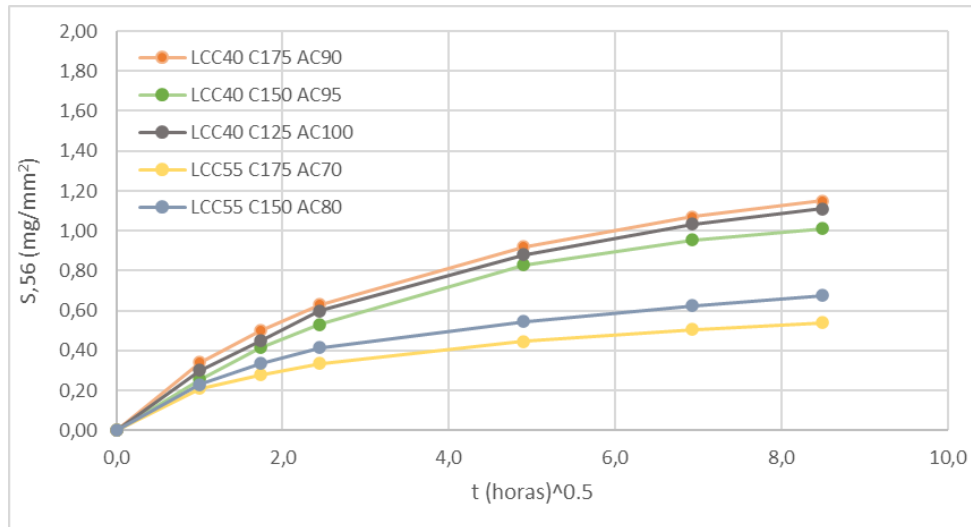


Figura 59: Evolução da quantidade de água absorvida por unidade de superfície aos 56 dias.

Analisando os gráficos acima, verifica-se que há uma redução muito pouco significativa da absorção capilar entre os 28 e os 56 dias, indicando que o efeito pozolânico da cinza volante não possui influência relevante na absorção de água por capilaridade.

Observando o gráfico da Figura 60, que inclui os valores da absorção capilar dos betões de referência RC40 e RC55 aos 28 dias de idade, é possível constatar que, apesar de os betões de referência terem uma dosagem de cimento muito superior em comparação aos LCC, o aumento da compactação e a adição de cinzas volantes faz com que os LCC tenham um teor de água reduzido, sendo a absorção de água por capilaridade mais reduzida que a dos betões de referência. Comparando ainda os valores entre os betões de referência, comprova-se também que apesar da dosagem de cimento ser importante, a compactação tem um papel determinante, sendo o betão RC40-C250 o que tem uma capilaridade muito superior à dos restantes, sendo cerca do triplo da do betão que tem metade do teor de cimento (LCC40-C125-AC100).

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

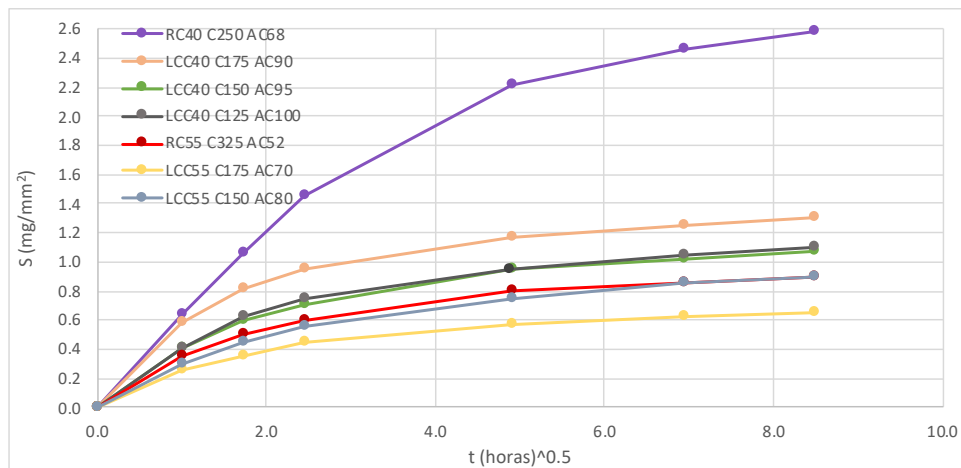


Figura 60: Evolução da absorção capilar dos LCC's e dos RC's aos 28 dias de idade.

6.3.2 Resistividade

O objetivo deste ensaio é avaliar o grau de resistência em relação à penetração dos cloretos e convém recordar que quanto maior a resistividade maior é a resistência à penetração dos cloretos. Observando a Figura 61 verifica-se que a resistividade dos betões de referência, a partir dos 28 dias de idade, não aumenta. Contudo, o mesmo não se verifica para os betões LCC; à medida que a dosagem de cimento vai sendo substituída pela cinza volante a resistividade vai aumentando mais com o tempo. Outro aspeto a salientar é que os betões de referência RC40 e RC55 têm os valores de resistividade mais reduzidos, logo após os 14 dias

A quantidade de cimento no betão não tem uma correlação direta com a variação da resistividade, e isso é muito visível no gráfico abaixo onde nos betões de referência, com dosagens de 250 e 325 kg/m³ respetivamente, a resistividade praticamente não alterou aos 28 dias, sendo os valores 7,3 e 7,8 kΩ.cm.

Em contrapartida, nos betões LCC os aumentos da resistividade com a idade foram muito significativos. A redução da quantidade de cimento e a substituição do mesmo por cinza volante, provocou uma subida substancial da resistividade; no betão LCC40_C125_AC100 com a menor dosagem de cimento, e com a maior dosagem de cinzas volantes e com a maior compactidade, teve a maior resistividade aos 90 dias de idade com um valor de 75,3 kΩ.cm.

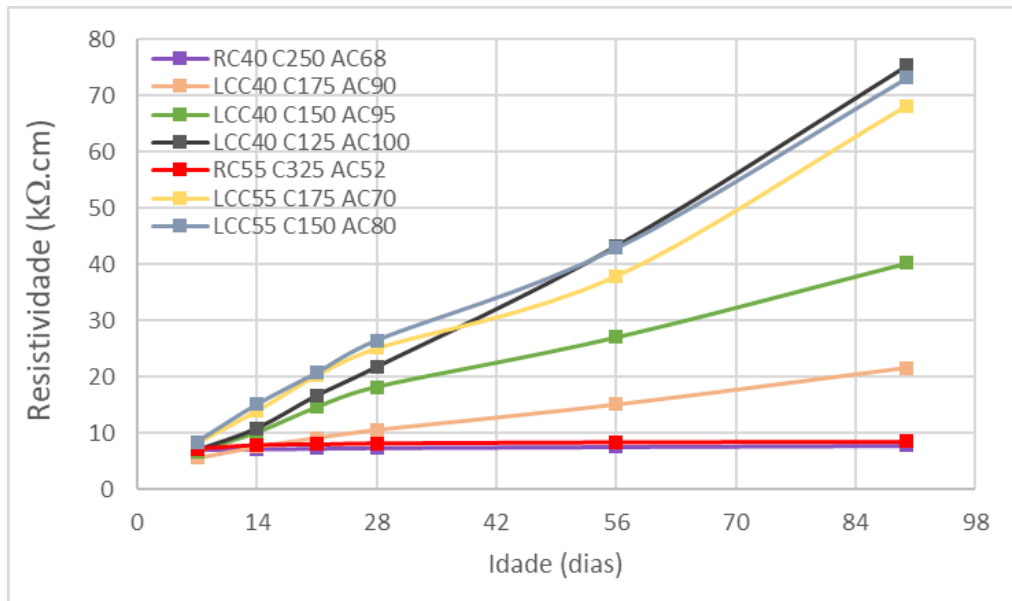


Figura 61: Variação da resistividade para cada mistura com a idade.

Em suma, os efeitos pozolânicos das cinzas volantes nas misturas afetam diretamente a grau de resistividade, ou seja, à medida que sobe a dosagem de cinza volante maior será a resistividade. Conseqüentemente, espera-se que estes betões apresentem elevadas resistências à penetração de cloretos.

6.3.3 Difusão dos cloretos

A avaliação da resistência à difusão dos cloretos foi realizada usando o coeficiente de difusão de cloretos, D_m ; quanto maior for o coeficiente menor é a resistência do betão à difusão dos cloretos pelo seu interior; ou seja, a evolução do coeficiente é inversa à resistência à difusão. Os resultados dos ensaios de difusão de cloretos, seguindo a especificação do LNEC E463 (E463 LNEC, 2004) estão representados nas Figura 62 e Figura 63.

Em termos quantitativos é possível concluir que aos 28 dias de idade, os valores deste coeficiente são muito altos para todas as misturas, representando baixa resistência à migração dos cloretos. No entanto, aos 90 dias houve decréscimos muito significativos para os betões LCC e pouco significativos para os betões de referência. Mais uma vez, a razão para esta redução é o efeito pozolânico causado pela cinza volante e pelo cimento, criando elevado teores de aluminato tricálcico (C_3A). A redução do teor de cimento é parcialmente compensada pelo aumento da compactidade, a qual tem também influência na redução do D_m .

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

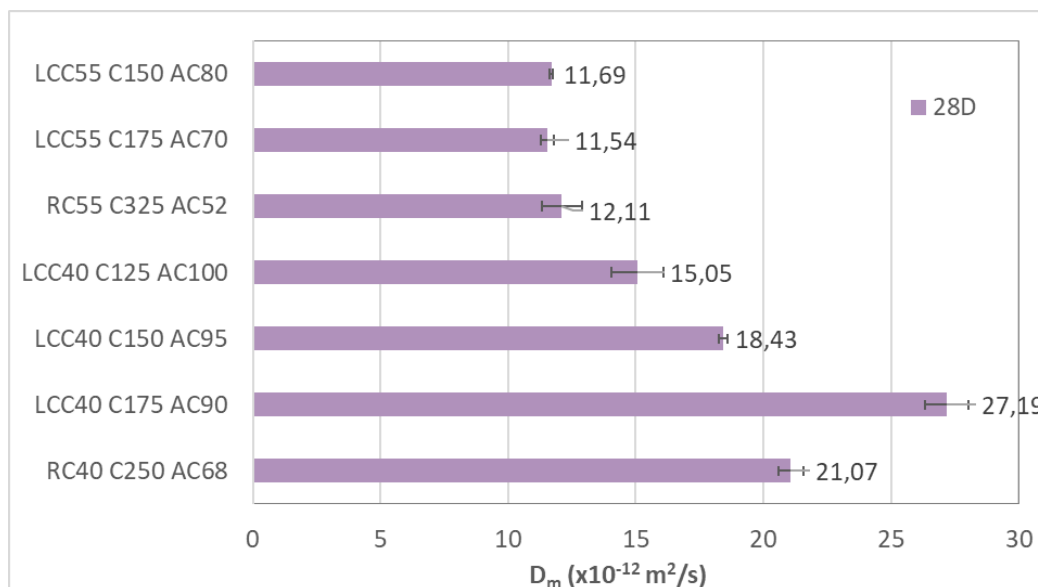


Figura 62: Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias de idade.

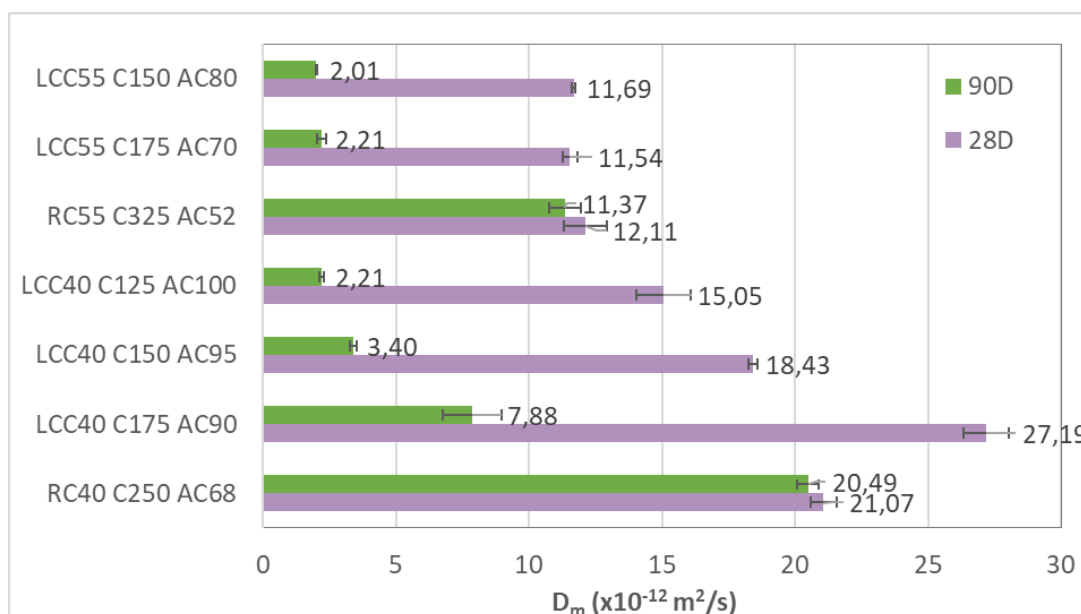


Figura 63: Coeficiente entre os coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 90 dias de idade.

Quando ocorre a difusão dos iões cloreto, a pasta de cimento possui uma certa capacidade química e física para fixar uma certa quantidade de iões cloreto. Essa fixação origina reações principalmente com um dos componentes do cimento, que é o aluminato tricálcico, originando o chamado cloroaluminato conhecido como sal de Friedel. Logo, quanto maior a quantidade de cimento no betão maior a capacidade do betão em concentrar iões cloretos no seu interior. Relativamente ao efeito pozolânico das cinzas volantes, é constatado que quando se faz adição de cinza volante nas misturas, a permeabilidade reduz-se significativamente, o que resulta também numa menor penetração de iões cloreto.

Tendo em conta esta justificação compreende-se a variação pouco significativa do coeficiente de difusão dos cloretos dos betões de referência, entre os 28 e os 90 dias de idade, onde a variação para o RC55 foi de 12,11 para $11,37 \times 10^{-12}$ m²/s, o que corresponde a uma redução de 6,11% e para o RC40 foi de 21,07 para 20,49 m²/s. Relativamente aos betões LCC, a variação já é bastante significativa; aos 90 dias de idade, a variação do coeficiente de difusão de cloretos reduziu drasticamente, podendo isso ser justificado pela reduzida dosagem de cimento logo pouca quantidade de aluminato tricálcico, e pela ação a longo prazo do efeito pozolânico. Este efeito consiste na reação lenta entre o hidróxido de cálcio com o material silicioso das cinzas volantes muito finas, possuindo assim uma resistividade superficial muito alta.

O gráfico da Figura 64 relaciona a razão entre o coeficiente de difusão de cloretos aos 90 e 28 dias de idade com os rácios pozolana/ligante (Poz/Binder) e pozolana/Pó ligante (Poz/Powder).

O rácio Poz/Binder indica, a dosagem de cinza volante relativo ao somatório das dosagens de cinza volante com o cimento Portland, sendo esse somatório o chamado ligante. O rácio Poz/Powder faz referência à quantidade de cinza volante relativa à dosagem total de pó, ou seja, cinza volante, filler calcário e cimento Portland.

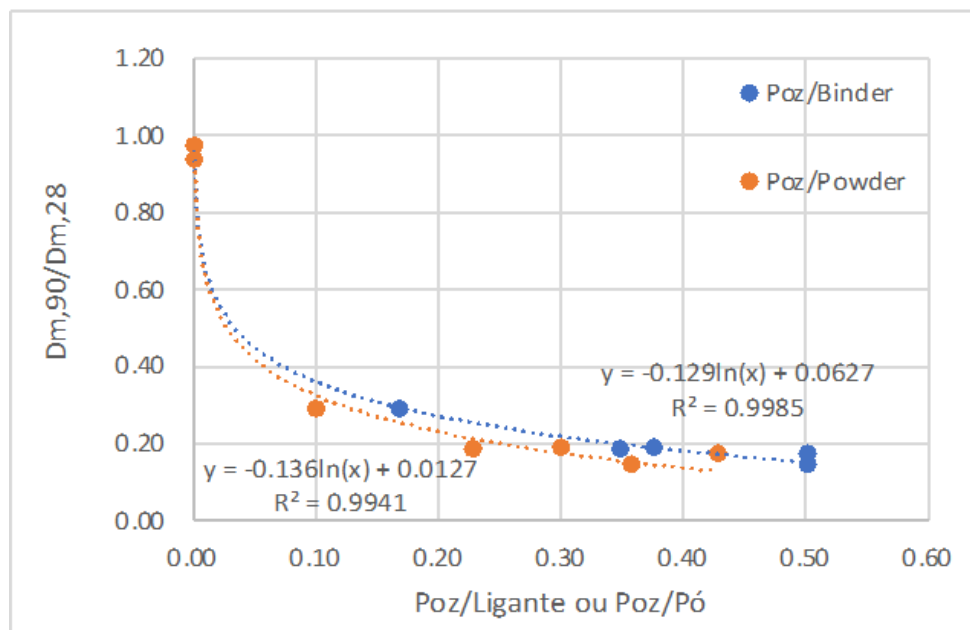


Figura 64: Variação do coeficiente de difusão de cloretos relativamente a quantidade de pozolana nas misturas.

A equação que mais se aproxima dos pontos, os quais representam os resultados dos vários betões, é uma regressão logarítmica. Chega-se à conclusão que quanto mais se aumenta as cinzas volantes nas misturas, maior é a redução do coeficiente entre os 28 e 90 dias, logo maior é o ganho percentual de resistência à difusão de cloretos; ou seja, aumentando a relação pozolana/ligante, reduz-se a difusão dos cloretos a longo prazo. Além disso, com uma adição de cinzas

volantes de apenas 20% em relação ao ligante, consegue-se obter uma redução do coeficiente de difusão de cerca de 70%, a qual corresponde a um ganho de resistência muito elevado.

6.3.4 Carbonatação

Os provetes expostos a um ambiente com elevada concentração de CO₂ e foram consideradas 4 períodos de exposição (14, 28, 56 e 90 dias). Neste caso, constatou-se que a influência das cinzas volantes na redução dos mecanismos de transporte é relativamente baixa ou nula. Abaixo encontram-se representados os gráficos com a evolução da profundidade de carbonatação (Figura 65 e Figura 66), para os diferentes períodos de exposição, iniciados aos 28 dias.

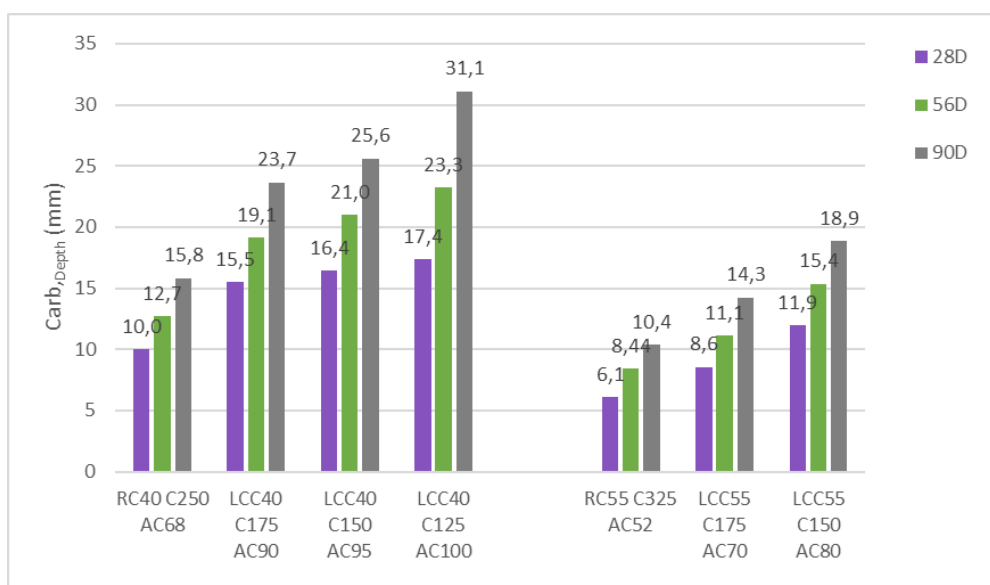


Figura 65: Evolução da profundidade de carbonatação, mm, para cada mistura para os períodos de exposição (28, 56 e 90 dias).

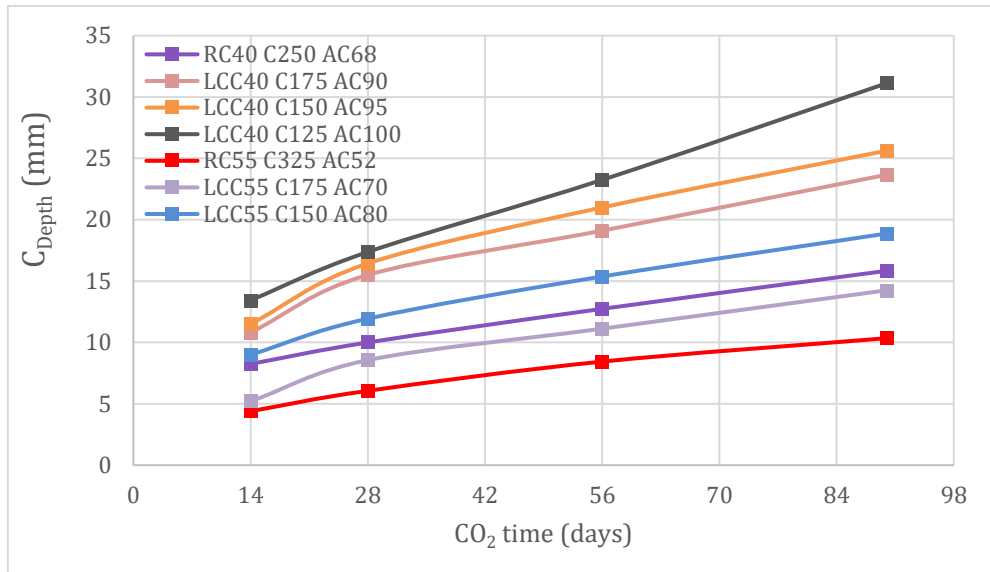


Figura 66: Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo de exposição acelerada ao CO₂.

No que respeita à carbonatação, considera-se que um betão tem um bom comportamento em termos de durabilidade, se a profundidade de carbonatação for a mínima possível, ou seja, quando menor esse parâmetro melhor para durabilidade do betão. Analisando os gráficos acima, constata-se que os betões com as maiores dosagens de cimento, RC40 e o RC55, foram aqueles que tiveram profundidades de carbonatação mais reduzidas, para cada nível de resistência. De um modo geral, conclui-se que a dosagem de cimento é determinante para a resistência à carbonatação; apesar de a redução progressiva de cimento nas misturas LCC ser compensada pelo aumento da compactidade e pelo aumento do teor de adição pozolânica, para o desempenho equivalente ou melhorado das restantes propriedades mecânicas e de durabilidade, o mesmo não se verifica na carbonatação. A redução progressiva do teor de cimento provoca um aumento progressivo da profundidade de carbonatação. Além disso, a compactidade apresenta também a influência na redução da carbonatação, a qual se traduz igualmente no aumento da resistência mecânica. Dos betões LCC, apenas o LCC55_C175_AC70 apresentou uma evolução da carbonatação mais reduzida que o betão RC40, apenas porque possui uma compactidade muito alta associada a um teor de cimento de 175 kg/m³ e a uma relação água/ligante moderada. Os restantes betões LCC possuem profundidades de carbonatação maiores, apesar das compactidades serem altas e das quantidades de cinzas volantes também serem progressivamente elevadas.

6.4 Tensão de aderência

A rotura dos provetes poderia ocorrer de duas formas possíveis, uma por aderência e a outra por *splitting* do provete de betão. Em todos os ensaios realizados, a rotura ocorreu por aderência, não ocorreu separação do provete

de betão, devido à elevada resistência à tração dos betões. Em termos gerais, pode-se também salientar que o ensaio com o betão LCC40_C125_AC100 teve resultados com elevada variação na tensão de aderência, possivelmente devido a qualquer ocorrência na compactação do betão ou no manuseamento dos moldes em fresco. Além disso, neste betão foram produzidos apenas 4 provetes por razões logísticas da produção.

A tensão de aderência foi determinada usando a seguinte expressão (Eq. (6.3)):

$$\tau = \frac{F_a}{A} \quad (6.3)$$

Onde:

- F_a – Força aplicada, em N;
- A – Área da zona do varão em contacto com o betão, ou seja, o perímetro do varão multiplicado pela altura do varão aderente ao betão, que é 5 vezes o diâmetro do varão, em mm^2 .

A relação tensão-escorregamento resultante dos ensaios pull-out para os vários betões está apresentada nas figuras abaixo (Figura 67 a Figura 71).

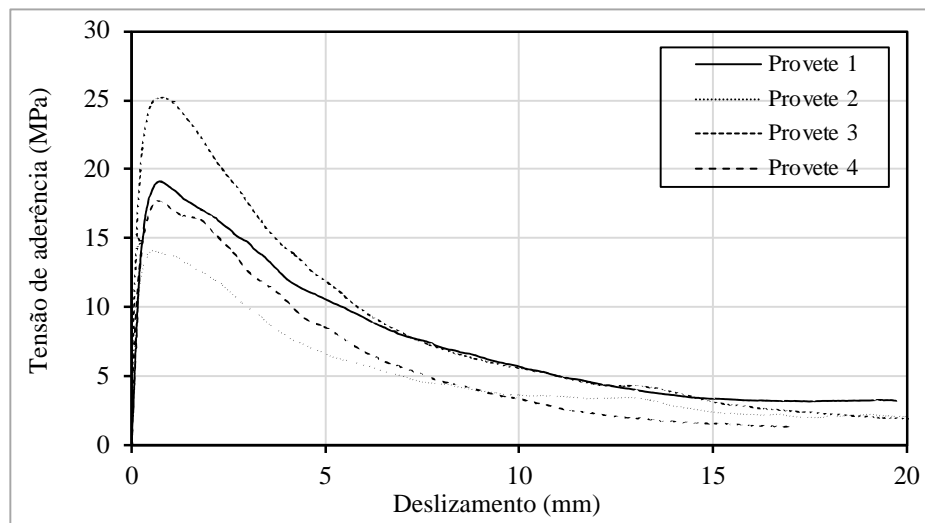


Figura 67: Aderência LCC40_C125_AC100

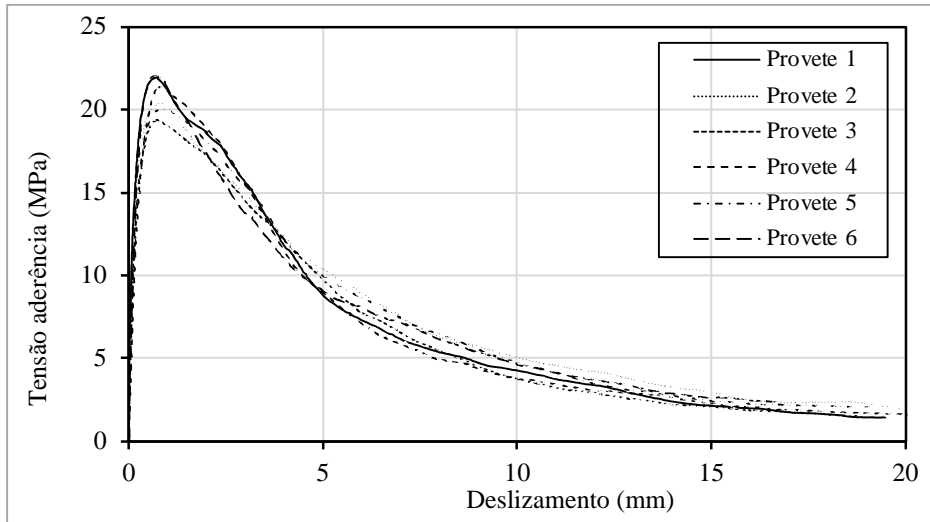


Figura 68: Aderência LCC40_C150_AC95

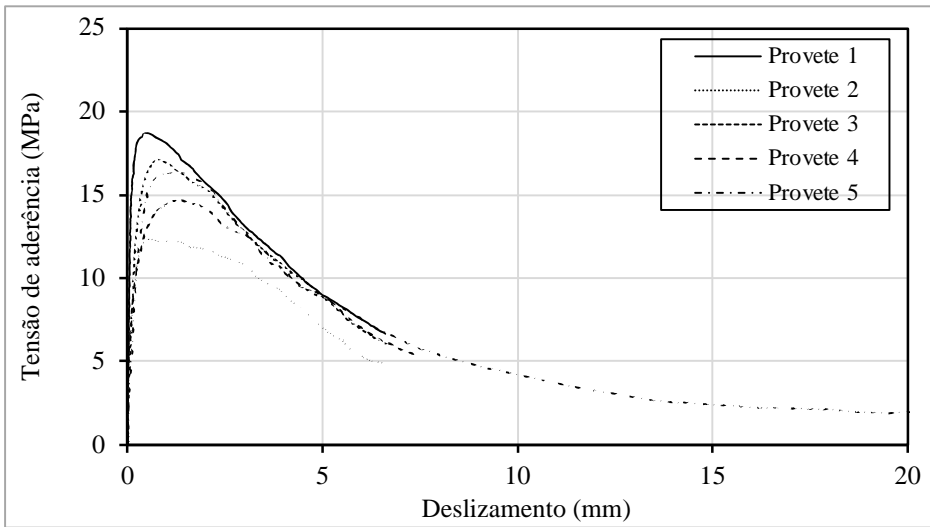


Figura 69: Aderência LCC40_C175_AC90

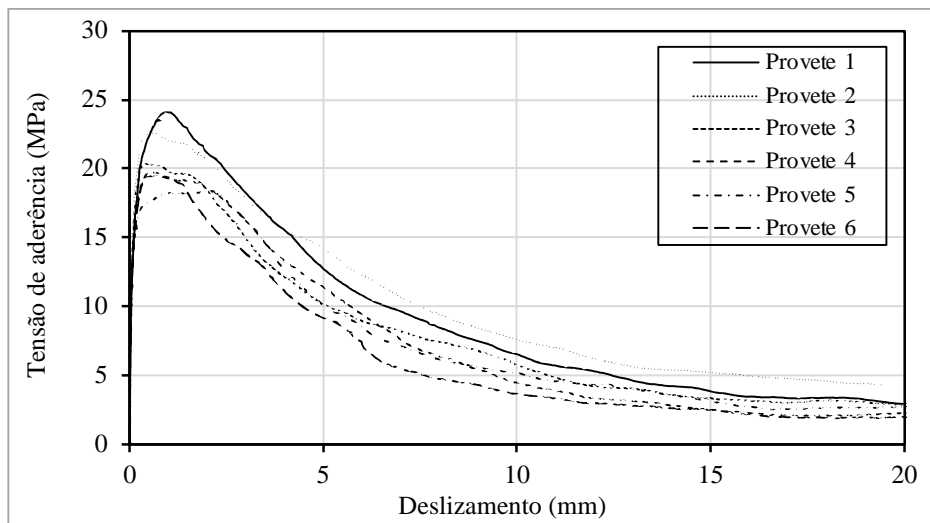


Figura 70: Aderência LCC55_C150_AC80

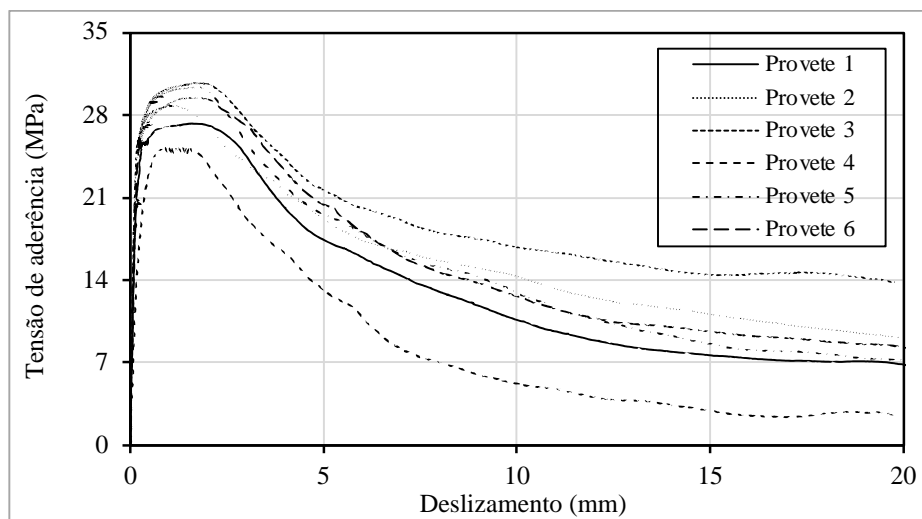


Figura 71: Aderência LCC55_C175_AC70

Após a obtenção das várias curvas de tensão de aderência para as várias misturas foi possível determinar a tensão média de aderência e a tensão máxima de aderência. A tensão média τ_m corresponde à média das tensões de aderência quando os deslocamentos são 0,01; 0,1 e 1,0 mm (ver Eq. (6.4)) e a tensão máxima corresponde à tensão quando é aplicado a força máxima.

$$\tau_{b,avg} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad (6.4)$$

Segundo a EN 10080 a tensão de aderência deve ser corrigida tendo em consideração a resistência à compressão aos 28 dias do betão de referência e a resistência do betão do provete ensaiado no dia do ensaio (ver Eq. (6.5)).

$$\tau_{dm} = \frac{1}{5\pi} \times \frac{F_a}{d^2} \times \frac{f_{cm}}{f_c} \quad (6.5)$$

Onde:

- d – Diâmetro do varão (mm);
- F_a – Força aplicada (N);
- f_{cm} – Tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias do betão de referência (MPa);
- f_c – Tensão de rotura do betão à compressão do provete ensaiado (MPa).

Nas Tabela 12 e Tabela 13 são apresentados os valores da tensão média de aderência, da tensão média corrigida relativamente ao betão de referência e a tensão máxima também corrigida relativamente ao betão de referência.

Tabela 12: Tensão média de aderência (MPa)

Provete/ Betão	LCC40_C125 _AC100*	LCC40_C150 _AC45	LCC40_C175 _AC90	LCC55_C150 _AC80	LCC55_C175 _AC70
1	8.58	11.99	11.15	13.52	14.80
2	7.48	10.44	6.41	13.49	16.67
3	13.10	9.51	8.03	12.37	17.14
4	9.09	9.64	7.48	11.82	11.76
5		9.96	7.01	11.34	17.16
6		10.55		12.14	15.71
τ_m	9.56	10.35	8.02	12.45	15.55
Fator de correção	1.03	0.98	0.94	0.99	0.97
τ_m	9.85	10.14	7.54	12.33	15.08

Tabela 13: Tensão máxima de aderência (MPa)

Provete/ Betão	LCC40_C125 _AC100*	LCC40_C150 _AC45	LCC40_C175 _AC90	LCC55_C150 _AC80	LCC55_C175 _AC70
1	19.1	21.9	18.7	24.1	27.3
2	14.1	20.4	12.4	22.6	28.8
3	25.2	19.4	17.1	20.3	30.7
4	17.7	21.4	14.7	19.7	25.2
5		20.0	16.3	18.3	30.4
6		22.0		19.5	29.5
τ_{max}	19.03	20.85	15.84	20.75	28.65
Fator de correção	1.03	0.98	0.94	0.99	0.97
τ_{max}	19.60	20.43	14.89	20.54	27.79

Considerando os betões da classe LCC40, o efeito pozolânico das cinzas volantes teve uma influência positiva na tensão média de aderência e na tensão máxima de aderência, visto que nestes betões a tensão de aderência aumentou com o acréscimo desta adição. Por exemplo, nas duas das misturas da classe de resistência LCC40, mais propriamente as LCC40_C150_AC95 e LCC40_C175_AC90, houve um aumento relevante da tensão média de aderência. Provavelmente a principal razão para esse aumento de aderência advém do aumento do índice de compactidade, conforme comprovado em estudo de (Freitas, 2016) e da dosagem de cinza volante.

Para os betões da classe de resistência de 40MPa, o intervalo de variação do índice de compactidade é de 82,6% para 84,1%, ou seja, variou 1,5%, enquanto na classe de resistência de 55MPa o índice de compactidade dos LCC variou apenas 0,1%, ou seja de 86,0% para 86,1%.

A mistura LCC40_C125_AC100, com uma dosagem de cinzas volante de 125 kg/m³ e 125 kg/m³ de cimento Portland, teve uma tensão média de aderência de 9,85 MPa, superior a 7,54 MPa correspondente ao LCC40_C175_AC90 com

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

uma dosagem de cinzas volantes de 35 kg/m^3 e de 175 kg/m^3 de cimento Portland. O valor percentual da diferença entre estas duas tensões é de 23%, em relação à mistura LCC40_C125_AC100, ou seja, constata-se que as cinzas volantes são benéficas para a aderência aço-betão, mas com influência combinada com a compacidade. Analisando os valores da tensão média de aderência dos betões da classe LCC55, verifica-se que houve um acréscimo de cerca de 2,75 MPa na tensão de aderência entre o LCC55_C150_AC80 e o LCC55_C175_AC70.

Para ambas as classes de resistência, a relação A/C foi aumentada, à medida que a dosagem de cimento foi reduzindo. Portanto, apesar de a compacidade ter uma influência significativa no aumento da aderência, a mesma não é isolada e não consegue dissociar-se de influência de outros parâmetros, tais como as adições e a relação A/C, as quais afetam conjuntamente as resistências mecânicas.

Na Figura 72 apresenta-se uma relação entre a tensão de aderência e a relação A/C, verificando-se que quanto maior é a relação A/C, tendencialmente menor é a tensão de aderência.

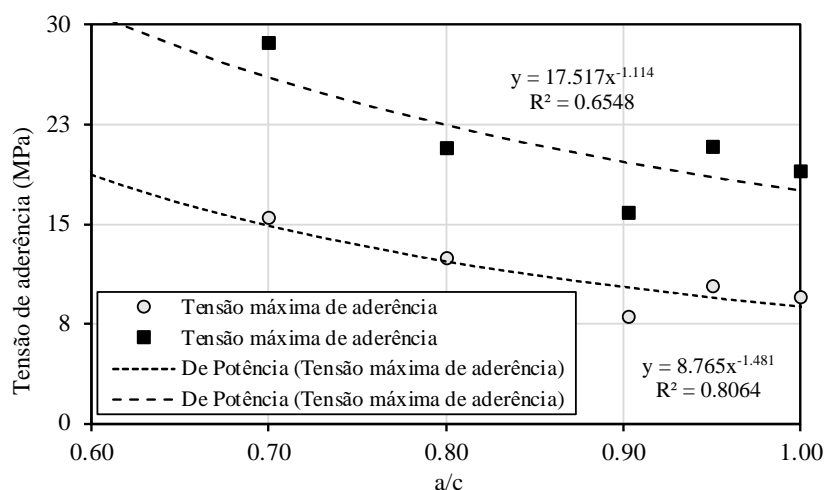


Figura 72: Correlação entre a tensão de aderência e a relação A/C.

7 CONCLUSÕES

7.1 Principais Conclusões

O presente estudo foca-se nas propriedades mecânicas, durabilidade e aderência aço-betão dos betões LCC com reduzido teor de cimento. O objetivo principal consistiu em avaliar a influência da redução da quantidade cimento, combinado com o ajuste de outros parâmetros para manter a resistência à compressão, nas propriedades caracterizadas. De uma maneira geral, para compensar a redução da dosagem de cimento foi necessário usar adição progressiva de cinzas volantes e aumentar a compacidade da matriz. Usando esta abordagem verificou-se que, em geral, o efeito pozolânico das cinzas volantes nas idades mais avançadas tem influência em diversas propriedades, não apenas mecânicas, mas também de durabilidade.

Propriedades mecânicas:

- Para todos os betões LCC, de ambas as classes de resistência, há aumentos significativos das resistências à compressão e à tração com a idade tempo, tanto maiores quanto maior for o teor de adição pozolânica. O aumento da resistência à compressão dos LCC, entre os 28 e os 90 dias de idade varia entre 13 e 27% para a classe de 40 MPa e entre 21 e 27% para a classe de 55MPa. Os betões de referência RC40 e RC55, apenas com cimento e fíler, têm um aumento de resistência, entre os 28 e os 90 dias, de aproximadamente 10%.
- A resistência à tração dos LCC tem igualmente uma elevada influência dos parâmetros variados, além da elevada evolução da resistência à tração por compressão diametral entre os 28 aos 90 dias de idade; os LCC desenvolvem aumentos de resistência à tração muito elevados entre essas idades, entre 27 e 40%, enquanto nos betões de referência o aumento ronda os 5%. As resistências à tração por compressão diametral representam cerca de 60 a 70% dos valores correspondentes na resistência à flexão.
- Relativamente ao módulo de elasticidade, os betões LCC desenvolvem valores elevados, progressivamente com o aumento da compacidade. Além disso, a tendência de evolução entre os 28 e os 90 dias de idade é significativa para esta propriedade, para ambas as classes de resistência, com aumentos entre idades situados entre 6 e 14% nos betões LCC; contudo, nos betões de referência, a evolução é negligenciável, com apenas 1%. Além da influência da evolução significativa da resistência mecânica, o próprio refinamento da matriz pelo efeito pozolânico terá influência combinada no aumento registado.

Durabilidade:

- Em termos de absorção de água por capilaridade, tanto os betões de referência RC como os LCC, entre os 28 e os 56 dias de idade não apresentaram diferença relevante, concluindo-se que o efeito pozolânico das cinzas volantes não interfere de forma significativa na absorção capilar. Contudo, o aumento da compacidade tem um papel fundamental na redução da capilaridade, com uma influência muito superior à do teor de cimento.

- Em relação à resistividade elétrica, a adição de cinzas volantes tem uma influência relevante, tanto maior quanto maior for a dosagem, mesmo com a redução do teor de cimento. Nos betões de referência, a resistividade estabiliza aos 28 dias e não evolui mais; contudo, nos LCC verifica-se que o aumento da dosagem de cinzas volantes, mesmo com a redução do teor de cimento, promove um aumento significativo da resistividade, o que constitui um indicador do aumento da resistência à difusão de cloretos.

- A resistência à migração de cloretos nos LCC, caracterizada pelo coeficiente de difusão de cloretos, é reduzida para a caracterização aos 28 dias, embora tenha uma melhoria com o aumento da compacidade do betão, apesar da redução de teor de cimento. O desempenho dos betões de referência, apenas com cimento e filler não evolui significativamente com a idade. Contudo, o efeito pozolânico mais tardio das cinzas volantes na matriz dos LCC promove um ganho elevado de resistência à difusão de cloretos, de 28 para 90 dias de idade, entre 70 e 80%, para dosagens de cinza em relação ao ligante de cerca de 20 a 40%. O desempenho de durabilidade, relativa à penetração de cloretos, dos betões LCC com adição de cinzas volante deve ser avaliado para idades avançadas, pelo menos iguais a 90 dias, pois apresentam elevada resistência à migração dos iões cloreto.

- Em relação à resistência à carbonatação, os betões LCC apresentam maior profundidade de carbonatação, comparativamente aos betões de referência. Apesar de a adição de cinzas volantes combinada com o aumento da compacidade igualar ou melhorar diversas propriedades, estas não têm influência relevante na resistência à carbonatação, apenas apresentam influência indireta através das resistências mecânicas. Por outro lado, a redução progressiva do teor de cimento provoca um aumento progressivo da profundidade de carbonatação, reduzindo assim a resistência à carbonatação. Os LCC são mais suscetíveis ao fenómeno da carbonatação, comparativamente a betões com teor corrente de cimento, e as adições pozolânicas combinada com a elevada compacidade da mistura não compensa totalmente o efeito da redução da dosagem de cimento. Isto significa que em condições de exposição mais agravadas à carbonatação, podem usar-se betões LCC mas com o cuidado de garantir elevada compacidade e não se reduzir excessivamente o teor de cimento.

Aderência aço-betão LCC

A tensão de aderência entre o aço e betão-LCC diminui à medida que a relação A/C aumenta. Nos betões LCC, a compacidade e o efeito pozolânico das cinzas volantes também influenciam de forma positiva a tensão média de aderência e a tensão máxima de aderência.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

Os betões LCC estão definitivamente na agenda do desenvolvimento sustentável do betão estrutural. Os betões com reduzido teor de cimento têm atualmente uma dependência elevada da utilização de cinzas volantes como material suplementar em substituição parcial do cimento; apesar de a influência da cinza volante no comportamento destes betões ter já um bom nível de desenvolvimento, há ainda modelos de previsão a desenvolver, em função dos parâmetros de composição. Contudo, há outros materiais que podem apresentar iguais ou melhores vantagens. Existe variedade de material pozolânico natural ou produzido artificialmente que poderá ser usado com essa finalidade, além das cinzas volantes e das escórias de alto forno, designadamente: pozolanas naturais; outros resíduos industriais (escórias, lamas, cinzas, etc.) e agrícolas; metacaulinos e argilas calcinadas. Contudo, o nível de conhecimento atual sobre o comportamento de betões correntes necessita de ser ajustado à realidade destes betões LCC, uma vez que a compacidade e o tipo de adições têm um papel determinante na influência das propriedades mecânicas e de durabilidade. Assim, dependendo dos parâmetros de formulação e das adições usadas, é importante caracterizar e desenvolver métodos de previsão de comportamento, quer mecânico quer da durabilidade nos betões LCC, em função do tipo de adições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.M. Neville, J. J. B. (2010). Concrete Technology. In P. E. LIMITED (Ed.), *Concrete Technology* (Second Edi, pp. 257–259). Pearson Education Limited.
- AASHTO -T-358. (2015). *Método padrão de teste para indicação da resistividade superficial do betão á penetração de iões cloreto*.
- Arantes, R. (2020). *Determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Bentz, D. P., Hansen, A. S., & Guynn, J. M. (2011). Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 824–831.
- Camões, A. (2011). Eco-efficient concrete with low cement content. *Metacaulino in Portugal: Production, Application and Sustainability*, d, 13.
- Choi, O. C., Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D., & McCabe, S. L. (1991). Bond of epoxy-coated reinforcement: bar parameters. *ACI Materials Journal*, 88(2), 207–217.
- Costa, A. (2006). *Durabilidade de Estruturas de Betão*. Instituto Superior Técnico.
- Costa, A., & Appleton, J. (2002). *Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado* (p. 70). Instituto Superior Técnico.
- Coutinho, J. (1999). *Agregados para argamassas e betões*. (p. 90). FEUP Porto.
- Coutinho, M. (2004). *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento das cofragens*. Universidade do Porto.
- Crauss, C. (2010). *Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial*. Universidade Federal De Santa Maria.
- E372 LNEC. (1993). *Água de amassadura para betões*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- E391 LNEC. (1993). *Determinação da resistência à carbonatação*, Lisboa.
- E393 LNEC. (1993). *Determinação da absorção de água por capilaridade* Lisboa.
- E397 LNEC. (1993). *Determinação do módulo de elasticidade em compressão*, Lisboa.
- E398 LNEC. (1993). *Determinação da retração e da expansão*, Lisboa.
- E463 LNEC. (2004). *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*, Lisboa.
- EN 10080. (2005). *Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General*. 69.
- Fennis, S. A. A. M., & Walraven, J. C. (2012). Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. *Heron*, 57(2), 73–101.

- Fernandes, R. (2000). *A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto*. Universidade de São Paulo.
- fib. (2000). Bond of reinforcement in concrete: state-of-art report. In *fib Bulletin No. 10*.
- fib. (2002). Grouting of tendons in prestressed concrete. In *fib Bulletin No. 20*.
- Freitas, E. R. (2016). Aderência entre varões de aço inox e betão com baixa dosagem de ligante. *Anais Da Semana de Ciência e Tecnologia*, 4(0), 53–62.
- Fusco, P. B. (2013). Técnica de armar as estruturas de concreto. In Pini (Ed.), *Pini: Vol. 2ª edição*.
- Ige, O. E., Olanrewaju, O. A., Duffy, K. J., & Collins, O. C. (2022). *Environmental Impact Analysis of Portland Cement (CEM1) Using the Midpoint Method*. 17.
- IPQ. (2000). *Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção* (Vol. 2). Instituto Português de Qualidade.
- ISEC. (2021). *Relatório de consórcio do projeto MCPool*.
- Leonhardt, F., & Monnig, E. (2008). *Construções de Concreto* (I. Ltda (ed.); Second Edi, Vol. 1).
- Louro, S. (2011). *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA*. Universidade de Aveiro.
- Mattos, P. (2017). *Durabilidade do Betão Auto-Compactável de Elevado Desempenho Face ao ataque químico*. Universidade do Minho.
- NP EN 12390-3. (2009). *Resistencia à compressão de provetes*. Instituto português da qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12390-5. (2009). *Resistência à flexão de provetes*. Instituto Português da Qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 12390-6. (2011). *Resistencia à tracao por compressão dos provetes*. Instituto Português da Qualidade. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NT BUILD 492. (1999). *Concrete, mortar and cement-based repair materials - Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*.
- Pereira, T. (2019). *Aderência entre varões de aço e betão com baixa dosagem de ligante e incorporação de agregados reciclados*. Instituto Superior Técnico.
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C. A. (2014). Eco-friendly concretes with reduced water and cement content - Mix design principles and application in practice. *Construction and Building Materials*, 67, 413–421.
- Robalo, K., Costa, H., Nuno, R., & Carmo, F. (2018). *Influência da adição de pozzolanas naturais e de cinzas de combustão no desempenho de betões eco eficientes com baixo teor de cimento*. December.

Estudo das propriedades mecânicas, durabilidade e aderência de betões de baixo teor de cimento

- Robalo, K., Soldado, E., Costa, H., do Carmo, R., Alves, H., & Júlio, E. (2021). Efficiency of cement content and of compactness on mechanical performance of low cement concrete designed with packing optimization. *Construction and Building Materials*, 266.
- Romulo Dinalli da Silva. (2006). *Estudo de aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos*.
- Silva, J. M. E. S. (2014). *Durabilidade do Betão - Caracterização de amostras de betão recolhidas ao longo de dois túneis da Região Autónoma da Madeira*. Universidade da Madeira.
- Soares, S. (2020). *Análise da aderência entre varões de aço e elementos de betão*. Universidade Nova de Lisboa.
- Soldado, E., Antunes, A., Costa, H., Do Carmo, R., & Júlio, E. (2021). Influence of pozzolan and slag additions and of recycled aggregates on the mechanical and durability performances of concrete with low cement content. *Fib Symposium, 2021-June*, 332–341.
- Teixeira, E. (2011). *Ataques químicos no betão*. Universidade de Évora.
- USGS. (2023). *Mineral Commodity Summaries*.
- Wermelinger De Matos, L. (2015). Análise Dos Métodos De Redução De Emissão De Co2 Em Uma Indústria De Cimento. *Xi Congresso Nacional De Excelência Em Gestão, 1*, 1–14.