



# Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**Caracterização da durabilidade e das propriedades  
diferidas de betões de elevado desempenho para  
fabrico de cascas.**

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Especialização em Construção Urbana

Autora

**Ana Carolina Simões Rodrigues**

Orientador

**Hugo Sérgio Sousa Costa**

Co-Orientador

**Ricardo Nuno Francisco do Carmo**

Coimbra, abril de 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO  
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR  
DE ENGENHARIA  
DE COIMBRA



***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

*The walls between art and engineering exist only in our minds, and few go beyond them.*

Theo Jansen

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta tese à minha avó, cuja força e amor continuam a ser a minha maior fonte de inspiração.

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

**AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível devido à contribuição de todos que fizeram parte deste percurso académico.

Agradeço ao professor Hugo Costa pelo apoio e paciência ao longo de todo o percurso e pelo seu olhar clínico imprescindível, tanto no laboratório, de forma literal, como na resolução de problemas.

Ao professor Ricardo do Carmo, pela motivação, a orientação prática e a visão clara, que me permitiram avançar de forma eficaz.

A todos os professores e professoras que contribuíram para o meu crescimento na área da engenharia, o meu sincero agradecimento.

Ao Departamento de Engenharia Civil, pela disponibilização do Laboratório de materiais de construção e do Laboratório de Estruturas, essenciais para a realização deste trabalho.

Ao António Amaral, pela amizade, pela boa disposição, pelo apoio técnico constante, pela disponibilidade e profissionalismo.

Aos meus familiares, amigos e colegas, pela companhia e pelo apoio contínuo, que tornaram este percurso mais significativo.

Agradeço a todos aqueles que caminharam ao meu lado, especialmente na reta final, oferecendo a motivação e força necessárias para concluir esta tese.

## RESUMO

O setor da construção civil representa uma das maiores fontes de consumo de recursos naturais e emissões de CO<sub>2</sub>, o que tem impulsionado a necessidade de desenvolvimento de construtivas mais sustentáveis e eficientes. Neste contexto, o desenvolvimento de soluções de elevado desempenho, como é o exemplo dos betões de elevado desempenho - UHPC (Ultra-High Performance Concrete), têm vindo a destacar-se como consequência das suas propriedades mecânicas superiores, elevada durabilidade e microestrutura ultradensa. Contudo, para a aplicação em elementos estruturais esbeltos, como as cascas ultrafinas do Projeto Pre-Shell é crucial caracterizar e compreender todo o comportamento deste material.

No âmbito deste estudo, foram formuladas diversas misturas, onde parte do cimento foi substituído por adições como cinzas volantes, sílica de fumo e escórias de alto forno, entre outras. Esta substituição visa reduzir o elevado impacte ambiental associado à produção de cimento Portland, reduzindo a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida e os respetivos custos associados, sem que as propriedades mecânicas, diferidas e de durabilidade do UHPC sejam comprometidas. A otimização destas misturas contribui para uma microestrutura ainda mais densa, garantindo um desempenho controlado das principais propriedades.

A presente dissertação tem como objetivo principal a caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas fundamentais ao desenvolvimento de cascas pré-fabricadas. De forma a atingir este objetivo, foi desenvolvido um programa experimental que considera uma análise do estado fresco, uma avaliação das propriedades mecânicas no estado endurecido e a realização de ensaios específicos para determinar o comportamento diferido e a resistência a condições de ambientes agressivos. Além disso, além da variação paramétrica dos agregados e das fibras de reforço, estudou-se a influência da incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs) com o intuito de melhorar a ecoeficiência das composições. Adicionalmente, foi realizado um estudo que permitiu avaliar o desempenho do UHPC após a exposição a temperaturas elevadas, simulando condições extremas como cenários de incêndio.

Os resultados obtidos permitem estabelecer uma relação entre a composição do UHPC, a idade do betão e as respetivas propriedades de desempenho, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a aplicação deste material em elementos estruturais. Os resultados experimentais e as análises realizadas nesta investigação promovem o desenvolvimento de soluções construtivas inovadoras, que além do elevado desempenho, durabilidade e sustentabilidade, respondam assim aos desafios atuais da engenharia civil.

**Palavras-chave:** UHPC, SCMs, desempenho mecânico, propriedades diferidas, durabilidade.

# *Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas*

## ***ABSTRACT***

The construction sector represents one of the largest sources of consumption for natural resources and CO<sub>2</sub> emissions, which has driven the need for the development of more sustainable and efficient constructions. In this context, the development of high-performance solutions, such as ultra-high performance concrete - UHPC, has been standing out as a consequence of its superior mechanical properties, high durability and ultra-dense microstructure. However, for application in slender structural elements, such as the ultra-thin shells of the Pre-Shell Project, it is crucial to characterize and understand the entire behavior of this material.

Within the scope of this study, several mixtures were formulated, where part of the cement was replaced by additions such as fly ash, smoke silica and blast furnace slag, among others. This replacement aims to reduce the high environmental impact associated with the production of Portland cement, reducing the amount of CO<sub>2</sub> emitted and the respective associated costs, without compromising the mechanical, deferred and durability properties of UHPC. The optimization of these mixtures contributes to an even denser microstructure, ensuring a controlled performance of the main properties.

The main objective of this dissertation is to characterize the durability and deferred properties fundamental to the development of prefabricated shells. In order to achieve this goal, an experimental program was developed that considers an analysis of the fresh state, an evaluation of the mechanical properties in the hardened state and the performance of specific tests to determine the deferred behavior and resistance to aggressive environmental conditions. In addition, in addition to the parametric variation of the aggregates and reinforcement fibers, the influence of the incorporation of supplementary cementitious materials (SCMs) was studied in order to improve the eco-efficiency of the compositions. Additionally, a complementary study was conducted to evaluate the performance of UHPC after exposure to elevated temperatures, simulating extreme conditions such as fire scenarios.

The results obtained allow us to establish a relationship between the composition of UHPC, the age of the concrete and its performance properties, contributing to the advancement of knowledge about the application of this material in structural elements. The experimental results and analyses carried out in this research promote the development of innovative construction solutions, which in addition to high performance, durability and sustainability, thus respond to the current challenges of civil engineering.

**Keywords:** UHPC, SCMs, mechanical performance, time-dependent properties, durability.

*Ana Rodrigues*

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

## ÍNDICE

Dedicatória .....	ii
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
<i>Abstract</i> .....	v
Índice.....	vii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tabelas .....	xii
Lista de siglas.....	xiv
Lista de símbolos .....	xvi
1 Introdução .....	18
1.1 Enquadramento do Tema .....	18
1.2 Objetivos e Motivação.....	19
1.3 Estrutura da Tese .....	19
1.4 Outputs.....	20
2 Betões de Elevado Desempenho.....	22
2.1 Enquadramento Histórico .....	22
2.2 Composições.....	23
2.3 Ecoeficiência.....	24
2.4 Viabilidade Económica do eco-UHPC .....	25
2.5 Evolução do Desempenho .....	26
2.6 Propriedades de Durabilidade .....	27
3 Programa Experimental .....	29
3.1 Materiais .....	29
3.1.1 Pasta Ligante – cimento e adições.....	29
3.1.2 Materiais Granulares .....	30
3.1.3 Água e adjuvantes.....	32
3.1.4 Fibras.....	32
3.2 Composição dos UHPC.....	35
3.2.1 Estratégias e parâmetros adotados .....	35
3.2.2 Eco-UHPCs .....	36
3.3 Programa Experimental.....	42

3.3.1	Estado fresco .....	43
3.3.2	Propriedades mecânicas no estado endurecido .....	45
3.3.3	Propriedades diferidas dos betões selecionados .....	49
3.3.4	Propriedades de desempenho de durabilidade .....	51
4	Análise de Resultados .....	58
4.1	Estado Fresco .....	58
4.1.1	Massa volúmica .....	58
4.1.2	Teor de ar .....	58
4.1.3	Espalhamento .....	59
4.1.4	Viscosidade .....	60
4.2	Propriedades no estado endurecido .....	60
4.2.1	Propriedades mecânicas .....	60
4.2.2	Propriedades diferidas .....	65
4.3	Desempenho em termos de Durabilidade .....	69
4.3.1	Resistência à carbonatação do betão .....	69
4.3.2	Resistência à carbonatação do betão após exposição a temperaturas elevadas 70	
4.3.3	Resistência à penetração dos cloretos .....	72
4.3.4	Resistência à penetração dos cloretos após exposição a temperaturas elevadas 74	
4.3.5	Resistividade elétrica .....	76
4.3.6	Absorção da água por capilaridade .....	77
4.3.7	Absorção da água sob pressão .....	82
5	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	84
5.1	Principais conclusões .....	84
5.2	Trabalhos Futuros .....	85
	Referências bibliográficas .....	87

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1 – Evolução ao longo dos anos: a) da produção de cimento (Aitcin, 2000); b) da resistência à compressão (Spasojevic, 2008).....	23
Figura 2.2 – Influência do rácio A/C no espalhamento - Slump flow (Tjaronge et al., 2003).....	23
Figura 3.1 - Amostras: a) CEM I 52,5R; b) fíler calcário; c) cinza volante.....	29
Figura 3.2 - Amostras: a) sílica de fumo; b) pó de vidro moído; c) escórias de alto forno.....	29
Figura 3.3 - Amostras: a) escória de forno elétrico; b) pozolana natural de Cabo Verde.....	30
Figura 3.4 - a) areia fina 0/1mm Guia (G0/1); b) areia grossa 2/4mm (G2/4).....	31
Figura 3.5 - a) areão 4/8 (G4/8); b) argila expandida Leca XS 1/2mm) (L-XS). ...	31
Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos agregados naturais. ....	31
Figura 3.7 – Micro fibras metálicas. ....	33
Figura 3.8 – Macrofibras metálicas.....	33
Figura 3.9 – Fibras poliméricas.....	34
Figura 3.10 – Fibras de vidro. ....	34
Figura 3.11- Aerómetro. ....	44
Figura 3.12- Caracterização do Teor de ar. ....	44
Figura 3.13- Ensaio de fluidez (mini funil-V). ....	45
Figura 3.14- Ensaio de caraterização da resistência à compressão dos UHPCs desenvolvidos.....	46
Figura 3.15- Ensaio de caraterização da resistência à flexão.....	47
Figura 3.16 - Ensaio do módulo de elasticidade.....	49
Figura 3.17- <i>Inserts</i> metálicos e medição da retração em provetes 40×40×160 mm <sup>3</sup> . ....	50
Figura 3.18- <i>Inserts</i> metálicos e medição da retração em provetes de 100×100×500 mm <sup>3</sup> . ....	50
Figura 3.19- Ensaio de fluência.....	51
Figura 3.20- Esquema da estratégia adotada – Ensaios de durabilidade. ....	52
Figura 3.21 – Ensaio de Carbonatação: a) aplicação de revestimento/pintura; b) câmara de carbonatação acelerada; c) profundidade de carbonatação.....	52
Figura 3.22 – Preparação do ensaio de difusão de cloretos: exsicador e soluções..	54

Figura 3.23 – Ensaio de Migração de iões cloreto.....	54
Figura 3.24 – Imagem representativa do método de medição da profundidade dos cloretos.....	55
Figura 3.25 – Ensaio de resistividade elétrica: equipamento e procedimento de ensaio, respetivamente. ....	56
Figura 3.26 – Configuração do ensaio de penetração de água sob pressão. ....	57
Figura 4.1- Caracterização da Massa Volúmica. ....	58
Figura 4.2- Caracterização do Teor de ar. ....	59
Figura 4.3- Caracterização do Espalhamento. ....	59
Figura 4.4- Curvas tensão-extensão do ensaio de tração direta nos provetes M0, M3 e M4.....	63
Figura 4.5- Evolução da retração das misturas M0, M3 e M4 ao longo do tempo. ....	66
Figura 4.6 – a), b) e c) Evolução da retração das misturas nos provetes 40×40×160 mm <sup>3</sup> com a idade, por séries, para os provetes 40×40×160mm <sup>3</sup> .....	68
Figura 4.7 – Evolução da fluência das misturas M0, M3 e M4 ao longo do tempo. ....	69
Figura 4.8 – Provede de ensaio à carbonatação acelerada, profundidade de carbonatação em provede sujeito a exposição térmica. ....	70
Figura 4.9 – Valores médios da profundidade de carbonatação, Cdepth (mm), após tratamento térmico e exposição a carbonatação acelerada durante 28, 56 a 90 dias, para as misturas M0 e M4.....	71
Figura 4.10- Profundidade de penetração de cloretos. ....	72
Figura 4.11- Resultados do ensaio de migração dos cloretos aos 28 e 90 dias.. ....	73
Figura 4.12- Provetes de ensaio à migração de cloretos em regime não-estacionário após exposição às temperaturas indicadas.....	75
Figura 4.13- Provetes de ensaio à migração de cloretos em regime não-estacionário após exposição às temperaturas indicadas.....	76
Figura 4.14- Variação da resistividade elétrica média em função da idade do betão. ....	77
Figura 4.15- Gráfico da variação da resistividade elétrica média em função da idade do betão. ....	77
Figura 4.16- Ensaio de Absorção Capilar: a) provetes na estufa; b) caixa de ensaio; c) pesagem dos provetes.....	78
Figura 4.17 - Variação da absorção capilar em função de $t(\text{min})^{0,5}$ , nos betões de referência. ....	80

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

Figura 4.18 - Variação da absorção capilar em função de $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 1- Variação do tipo de Agregados. ....	80
Figura 4.19 - Variação da absorção capilar em função de $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 2 - Variação do tipo de Fibras. ....	81
Figura 4.20 - Variação da absorção capilar em função de $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 3 - Variação do tipo de Adições. ....	81
Figura 4.21 - Variação da absorção capilar em função de $t(\text{min})^{0,5}$ , Betões Leves. .	82
Figura 4.16- Ensaio de absorção da água sob pressão. ....	82

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Tabela comparativa das propriedades de durabilidade do Betão Convencional e do UHPC.....	28
Tabela 3.1 – Massas volúmicas dos ligantes.....	30
Tabela 3.2 -Massas volúmicas dos agregados.....	32
Tabela 3.3 - Propriedades das fibras de metálicas. ....	33
Tabela 3.4 - Propriedades das fibras poliméricas. ....	34
Tabela 3.5 - Propriedades das fibras de vidro.....	35
Tabela 3.6 - Composição ponderal tradicional do UHPC.....	35
Tabela 3.7 - Descrição e siglas dos materiais utilizados.....	37
Tabela 3.8 - Composição das misturas de referência. ....	38
Tabela 3.9 - Composição da Série 1, variação do tipo de agregado. ....	39
Tabela 3.10 - Composição da Série 2, variação do tipo de fibras.....	40
Tabela 3.11 - Composição da Série 3, variação do tipo de adições.....	41
Tabela 3.12 – Composição da Série de Betões Leves.....	42
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio do mini Funil V para as misturas selecionadas.	60
Tabela 4.2 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à compressão aos 28, 56, 90 e 150 dias.....	60
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade, aos 56 dias.....	61
Tabela 4.4 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à tração por flexão, aos 150 dias.....	61
Tabela 4.5 – Resultados dos valores máximos de tensão, do ensaio de flexão pura. ....	63
Tabela 4.6 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à tração por flexão, aos 150 dias.....	64
Tabela 4.7 – Resultados dos valores das resistências mecânicas à tração por compressão diametral, série betões caracterizados.....	64
Tabela 4.8 – Resultados dos valores da Energia de Fratura.....	64
Tabela 4.9 - Resultados da profundidade de carbonatação, $C_{depth}$ (mm), após tratamento térmico aos 28 dias e exposição a carbonatação acelerada durante 28, 56 a 90 dias. ....	71
Tabela 4.10 - Resultados obtidos no ensaio de migração dos cloretos aos 28 e 90 dias.....	73

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

Tabela 4.11 - Classificação em função do coeficiente de difusão de cloretos, D....	74
Tabela 4.12 - Valores de resistividade dos betões em estudo. ....	76
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	79

## LISTA DE SIGLAS

A/C – Água/Cimento

A/L - Água/Ligante

AASHTO T - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AC - Antes de Cristo

CEM - cimento

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

DOI - Digital Object Identifier

EC2 - Eurocódigo 2

Eco-UHPC - betões de ultra-elevado desempenho ecológicos

FA - Cinza Volante Classe F

FIB - Fédération internationale du béton (Federação Internacional do Betão)

G0/1 - Areia fina 0/1 Guia

G2/4 - Areia Grossa 2/4mm

G4/8 - Areia grossa 4/8

GEFS - Escória de Forno Elétrico

GGBS - Escória Moída de Alto Forno

GP – Pó de Vidro

ISEC-IPC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra - Instituto Politécnico de Coimbra

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

L XS - Argila Expandida Leca XS

LF - Filer Calcário

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP EN - *European Norm*

NT - *NORDTEST*

Pre-Shell – *Prefabricated Ultra-Thin Concrete Shells*

PZZ - Natural Pozzolana

SCMs - Supplementary Cementitious Materials (Materiais Cimentícios Suplementares)

SF - Sílica de Fumo

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

SiO - Monóxido de Silício

SiO<sub>2</sub> - Dióxido de Silício

SO<sub>3</sub> - Óxido Sulfúrico

UHPC - *Ultra-High Performance Concrete*

UHPFRC - *Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$  - Área da secção transversal do provete

$C_{depth}$  - Profundidade de carbonatação

$D$  - Coeficientes de difusão de ião cloreto, em regime não estacionário

$D_{médio}$  - Coeficientes de difusão de ião cloreto médios, em regime não estacionário

$E_c$  - Módulo de elasticidade

$F$  - Carga máxima à rotura

$f_c$  - Resistência à compressão

$f_{cf}$  - Resistência à flexão

$f_{cm}$  - Tensão média de rotura aos 28 dias de idade

$f_{ct}$  - Resistência à tração por compressão diametral

$f_{ctm,f}$  - Resistência à tração por flexão aos 28 dias de idade

$S$  - Secção do provete em contacto com água

$S_a$  - Quantidade de água absorvida, por unidade de superfície

$t$  - Idade do Betão, em dias

$\alpha$  - Coeficiente que varia com o tempo,  $t$ , considerando condições de cura e secagem

$\beta$  - Coeficiente de endurecimento do betão

$\beta$  - Coeficiente de endurecimento do betão

$\Delta L_m$  - Alongamento médio registado

$\epsilon$  - Extensão

$\epsilon_{a,n}$  - Extensão correspondente à tensão  $\sigma_a$  medida no  $n$ -ésimo ciclo da carga

$\epsilon_{b,n}$  - Extensão correspondente à tensão  $\sigma_b$  medida no  $n$ -ésimo ciclo da carga

$\epsilon_c$  - Deformação de fluência

$\epsilon_{ce}$  - Deformação elástica

$\epsilon_{cs}$  - Extensão de retração total do betão

$\rho$  - Resistividade elétrica

$\sigma$  - compacidade do betão

$\sigma_0$  - tensão aplicada no ensaio de fluência

$\sigma_a$  - Tensão máxima aplicada

$\sigma_b$  - Tensão inicial aplicada

$\varphi_c$  - Coeficiente de fluência

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do Tema

Desde o século XIX que o betão assume um papel central na construção civil, sendo amplamente utilizado face às suas características, o baixo custo e a facilidade de produção que assume (Appleton, 2005). Na atualidade, o setor da construção constitui uma das maiores fontes de consumo de recursos naturais e de emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo assim para o aumento significativo do consumo de energia global e para a exploração intensiva de recursos naturais. Neste cenário, o estudo e desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes revela-se não só importante, mas fundamental para reduzir os impactos ambientais e energéticos negativos provocados pela construção civil (Scrivener et al., 2018).

Os avanços tecnológicos na área dos betões estruturais permitiram o desenvolvimento de betões como os betões de elevado desempenho - UHPC (Ultra-High Performance Concrete). Atualmente, esta solução atinge facilmente resistências superiores a 150 MPa (Eide & Hisdal, 2012; Yoo & Banthia, 2016), apresentando baixa porosidade e uma matriz densa, resultado da otimização granulométrica dos seus constituintes, da incorporação de partículas ultrafinas e fibras de elevada resistência e de uma relação água/ligante otimizada (Gowda et al., 2021; Zhou et al., 2021).

O UHPC (Ultra-High Performance Concrete) tem vindo a destacar-se como um material inovador no setor da construção, respondendo à necessidade de soluções construtivas ecoeficientes. Contudo, associado ao elevado consumo de cimento nas composições tradicionais do UHPC, estão os custos elevados e o impacto ambiental significativo, nomeadamente pela emissão de CO<sub>2</sub> - cerca de 850 kg de CO<sub>2</sub> são emitidos para a atmosfera por cada tonelada de cimento Portland produzida (Li et al., 2011; Turner & Collins, 2013). Como resposta a estes desafios, o avanço tecnológico na indústria do betão tem-se focado na produção de UHPC com menores quantidades de cimento, recorrendo à substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCMs), como cinzas volantes, sílica de fumo e escórias, mantendo as propriedades mecânicas e a durabilidade pretendidas (Zhang & Zhao, 2017).

A aplicação de UHPC em elementos estruturais esbeltos, como é o exemplo das cascas finas pré-fabricadas, implica uma caracterização e compreensão ainda mais aprofundadas das propriedades diferidas (Schmidt & Fehling, 2005; Richard & Cheyrezy, 1995). A compreensão destas propriedades, nomeadamente a fluência e a retração, influenciam diretamente a estabilidade dimensional e o desempenho a longo prazo das estruturas, sendo determinantes para a fiabilidade dos elementos fabricados. Paralelamente, a análise da durabilidade destas peças assume um papel relevante, pois a resistência do material à penetração de agentes agressivos – como

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

os cloretos e o dióxido de carbono – é fundamental para o prolongamento da vida útil das infraestruturas (Spasojevic, 2008; Nematollahi et al., 2011).

Neste contexto, a presente dissertação aborda o desenvolvimento e a caracterização de betões UHPC, produzidos com menores quantidades de cimento do que o habitual para este tipo de betões. A caracterização está focada essencialmente na análise da durabilidade e das propriedades diferidas destes betões. O foco deste trabalho assenta na indústria da pré-fabricação, tendo sido realizado de forma a contribuir para os objetivos de um projeto de investigação designado Pre-Shell (2023), cujo objetivo principal consistiu em produzir cascas modulares prefabricadas em UHPC, assembladas e estabilizadas com recurso a pré-esforço.

### **1.2 Objetivos e Motivação**

A crescente procura por soluções construtivas mais sustentáveis e eficientes tem impulsionado a investigação e o desenvolvimento de soluções ecoeficientes no setor da construção civil. Neste sentido, o objetivo principal desta dissertação passa pelo desenvolvimento de soluções de eco-UHPC e respetiva caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas.

Para isto, foi realizado o estudo de diversas composições de eco-UHPC adotando uma abordagem de composição centrada na redução da quantidade de cimento e respetiva substituição por adições/resíduos, mantendo as características das propriedades diferidas e de durabilidade dos UHPC convencionais.

Nas composições desenvolvidas, procedeu-se à variação dos seguintes parâmetros: fração granulométrica dos agregados, adições e fibras, otimizando as misturas de forma a obter os melhores resultados.

A caracterização diferida e da durabilidade deste material passa pela caracterização de propriedades no estado fresco, breve consideração de propriedades mecânicas no estado endurecido do UHPC, caracterização de propriedades diferidas e estudo da influência da incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em parâmetros de durabilidade do UHPC. Além destes, também se define como objetivo a análise da influência da exposição dos UHPCs a temperaturas elevadas nas propriedades de durabilidade.

Com este estudo, pretende-se fornecer dados experimentais relevantes para a caracterização do UHPC, promovendo a sua aplicação em estruturas inovadoras e sustentáveis, reforçando assim o seu potencial como material de elevado desempenho no setor da construção.

### **1.3 Estrutura da Tese**

A dissertação está organizada em cinco capítulos, onde se inclui o presente capítulo.

No Capítulo 1, foi apresentada a introdução ao tema, com o enquadramento, os objetivos e a motivação do estudo, bem como a descrição da estrutura da tese.

O Capítulo 2 dedica-se à revisão bibliográfica de betões de elevado desempenho, desde o enquadramento histórico do uso de soluções de elevado desempenho, passando pela análise dos materiais e parâmetros de composição, até a discussão sobre ecoeficiência, propriedades diferidas e durabilidade dos materiais.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental de atualização, detalhando os materiais utilizados, as estratégias de composição do UHPC – incluindo as variantes eco-UHPC – e os métodos de caracterização experimental, tanto no estado fresco como no resistido. Neste, são apresentadas as várias composições, divididas por séries, que serão à frente caracterizadas a nível de desempenho.

No Capítulo 4, é apresentada a análise e discussão detalhada dos resultados obtidos, discutindo os dados relativos ao estado fresco, às principais propriedades mecânicas, às propriedades diferidas e, por fim, às de durabilidade, de forma a evidenciar as correlações entre os diferentes parâmetros de comparação.

Por último, o Capítulo 5 sintetiza as conclusões do trabalho, realçando as contribuições e implicações dos resultados para o desenvolvimento de soluções construtivas sustentáveis e para a implementação do projeto Pré-Shell.

## 1.4 Outputs

No âmbito do projeto Pre-Shell – Prefabricated Ultra-Thin Concrete Shells, foram desenvolvidos três artigos científicos que contribuem significativamente para a compreensão e avanço das temáticas abordadas nesta tese.

O primeiro artigo, intitulado “The influence of SCMs, fibres and superplasticizer on the chloride diffusion coefficient of eco-UHPC” da autoria de Ana Rodrigues, Hugo Costa, Ricardo Carmo e Eduardo Júlio, investiga a forma como a incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs), fibras e superplastificantes afeta o coeficiente de difusão dos cloretos em betões de ultra-elevado desempenho ecológicos (eco-UHPC). Este estudo é fundamental para compreender a durabilidade destes materiais em ambientes agressivos, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade e desempenho duradouro discutidos na presente dissertação. O artigo, apresentado na conferência fib Symposium 2023, está publicado e pode ser consultado através do DOI: 10.1007/978-3-031-32519-9\_90.

O segundo artigo, desenvolvido para “Avaliação da durabilidade do UHPC após exposição a temperaturas elevadas.” da autoria de Ana Rodrigues, Hugo Costa, Ricardo Carmo e António Correia, avalia a durabilidade do UHPC após a exposição a temperaturas elevadas. Este trabalho, desenvolvido para as 8<sup>as</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos e nas 3<sup>as</sup> Jornadas de Proteção Civil, realizadas no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), é relevante para atender ao comportamento do UHPC em situações de incêndio ou outras condições extremas

### ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

de temperatura, completando as análises de resistência e estabilidade térmica abordadas nesta investigação.

Por fim, refere-se o terceiro artigo, intitulado “Development of eco ultra-high performance concrete for the prefabrication of ultra-thin concrete shells”, publicado na revista *Structural Concrete* e desenvolvido por Hugo Costa, Ricardo do Carmo, Tiago Rodrigues, Ana Rodrigues e Eduardo Júlio e com o DOI 10.1002/suco.202400588. Este estudo centra-se no desenvolvimento de UHPC ecológico para a pré-fabricação de cascas de betões ultrafinas, contribuindo para a inovação na construção de estruturas leves e resistentes, utilizando materiais sustentáveis, o que está em consonância com as diretrizes de eficiência e sustentabilidade exploradas nessa tese.

O projeto Pre-Shell – Prefabricated Ultra-Thin Concrete Shells, por outro lado, destaca a viabilidade da utilização de eco-UHPC na produção de cascas finas de betão, evidenciando a importância da seleção adequada de materiais e técnicas de pré-fabricação para melhorar a eficiência e a sustentabilidade das estruturas.

A integração dos resultados destes artigos na tese reforça a compreensão sobre a influência dos materiais e processos de fabrico na durabilidade e desempenho de cascas finas de betão, contribuindo para o avanço do conhecimento na área da inovação no setor da construção.

## 2 BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO

### 2.1 Enquadramento Histórico

Desde os primórdios da humanidade, o betão assume um papel fundamental na construção, com registos que remontam a 500 AC em Lepenski Vir, na atual Sérvia. Na Roma antiga, a utilização de cal com cinza vulcânica originou um cimento hidráulico de elevada durabilidade para a construção em betão, como demonstrado em inúmeras construções como a cúpula do Panteão. O advento do cimento Portland, no século XIX transformou o rumo da história do betão, permitindo, através de processos de calcinação, a produção de um material com resistência e durabilidade superiores.

A evolução do betão ao longo dos últimos dois séculos é marcada por um aumento significativo da produção de cimento e pela melhoria progressiva da resistência à compressão dos materiais disponíveis, como pode ser analisado na Figura 2.1. Esta evolução demonstra não só os avanços tecnológicos e científicos na engenharia dos materiais, mas também a crescente procura por soluções mais eficientes e resistentes para satisfazer as exigências estruturais modernas.

Na década de 1990, com o aumento dos critérios estruturais, emergiram soluções de elevado desempenho, em particular, de Betões de Elevado Desempenho (UHPC). Estes betões, são caracterizados por resistências frequentemente superiores a 150 MPa e uma microestrutura ultradensa, obtida através da otimização da relação água/ligante e da incorporação de adições finas e fibras (Richard & Cheyrezy, 1995; Schmidt & Fehling, 2005; Eide & Hisdal, 2012; Yoo & Banthia, 2016).

O controlo do rácio água/ligante (A/C) revelou-se determinante para a obtenção de matrizes compactas, sendo que a sua dedução está fortemente associada ao aumento da resistência e densificação do betão, como é evidenciado na Figura 2.2. Esta relação, demonstrada por Tjarone et al. (2023), evidencia que mesmo uma pequena redução no rácio A/C pode ter impacto direto na trabalhabilidade e, simultaneamente, na melhoria da compacidade da matriz.

Contudo, o consumo elevado de cimento, associado à quantidade significativa de emissão de CO<sub>2</sub>, levou ao estudo e desenvolvimento de composições com menor teor de cimento, através da substituição parcial por materiais cimentícios suplementares (SCMs), como cinzas volantes, sílica de fumo e escórias, contribuindo para uma maior sustentabilidade (Zhang & Zhao, 2017).

Desde então, o interesse pelo uso do cimento na construção tem vindo a crescer de forma constante, impulsionado pelas vantagens que este material proporciona. A crescente aplicação do betão, associado à elevada necessidade de construção, como consequência do desenvolvimento e aumento populacional, impõe a necessidade de desenvolver soluções de qualidade superior, tanto a nível de resistência com a nível de durabilidade. A acelerada afluência à urbanização e a valorização dos espaços

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

construtivos, influenciadas pelo mercado imobiliário, levaram à necessidade de construção em altura nas cidades, onde os desafios estruturais se intensificam, pois, a exposição a cargas elevadas exige elementos com maior capacidade de suporte e menor massa. Assim, as soluções construtivas de elevado desempenho tornam-se imprescindíveis para a garantia de estruturas mais seguras, eficientes e sustentáveis.

Atualmente, o UHPC não se destaca apenas pela sua elevada resistência mecânica, mas também pela durabilidade que garante, resultado de uma microestrutura ultradensa e de baixa porosidade.

Assim, a evolução histórica do betão, desde as suas primeiras utilizações até ao desenvolvimento do UHPC, evidencia a importância e a procura contínua de materiais com melhor desempenho, durabilidade e, ainda, menor impacto ambiental. Este contexto fundamenta o papel de uma caracterização rigorosa das propriedades mecânicas, diferidas e de durabilidade, em estruturas modernas, especialmente para aplicações de cascas pré-fabricadas, onde se exige um controlo elevado de qualidade e desempenho a longo prazo.

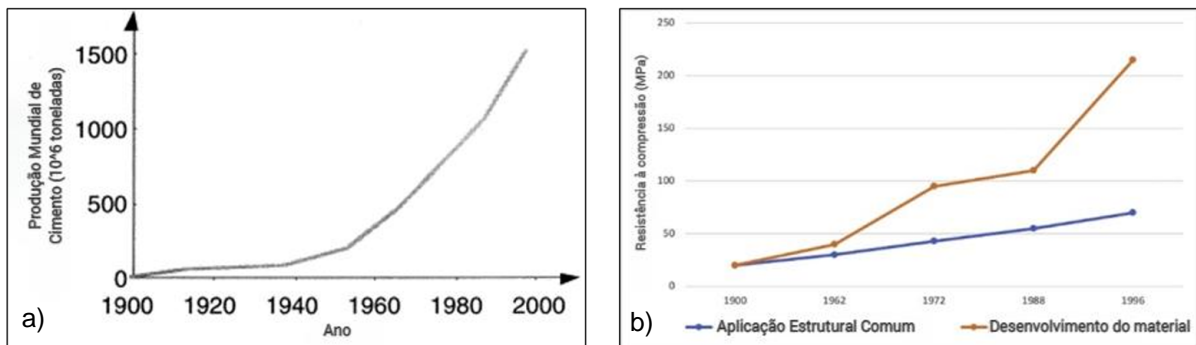


Figura 2.1 – Evolução ao longo dos anos: a) da produção de cimento (Aitcin, 2000); b) da resistência à compressão (Spasojevic, 2008).

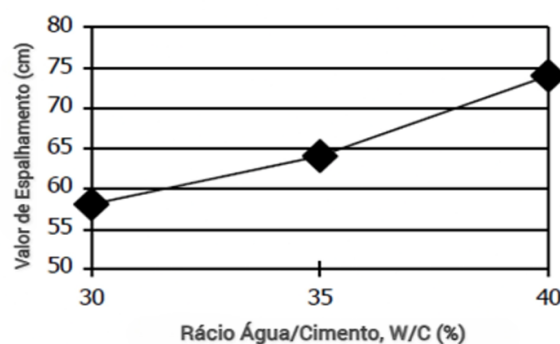


Figura 2.2 – Influência do rácio A/C no espalhamento - Slump flow (Tjaronge et al., 2003).

## **2.2 Composições**

A evolução dos UHPC, no que diz respeito à sua composição, evoluiu de forma significativa, com o objetivo central de otimizar a matriz e alcançar desempenhos de

elevado desempenho em termos de resistência, durabilidade e controlo das propriedades diferidas. Esta otimização tem como base a adequação dos seus constituintes principais, nomeadamente os agregados, a pasta ligante e as fibras, bem como na especificação das composições da mistura.

No que diz respeito à pasta ligante, os UHPC foram inicialmente concebidos com dosagens elevadas de cimento Portland, de forma a garantir uma microestrutura mais densa. Recentemente, vimos a assistir à incorporação de materiais cimentícios suplementares (SCMs) de forma a reduzir a quantidade de cimento, minimizar a apegada de carbono e, ao mesmo tempo, manter – ou até melhorar – as propriedades mecânicas e de durabilidade do betão. Esta estratégia tem-se revelado crucial para atingir índices baixos de relação água/cimento (Zhang & Zhao, 2017).

Relativamente aos agregados, os UHPC caracterizam-se por integrar agregados predominantemente finos, com uma granulometria cuidadosamente otimizada para promover o empacotamento máximo das partículas para reduzir a porosidade. O controlo da dimensão dos agregados é fundamental para atingir uma matriz densa e homogénea, inclusive, estudos demonstram que a otimização da distribuição granulométrica assume um dos principais pilares para o desempenho superior dos UHPC (Fehling et al., 2014, Voort et al., 2008).

A incorporação das fibras surge como forma de colmatar a necessidade de melhorar a durabilidade, a facilidade de aplicação, o desempenho mecânico (Juvandes, L., 2011), ductilidade, a resistência à tração e o controlo do comportamento diferido, nomeadamente da fluência e da retração. As fibras, de origem metálica ou sintética, permitem compensar o comportamento frágil consequente da microestrutura ultradensa do UHPC, contribuindo para a absorção de energia e para a prevenção da fissuração. A evolução na utilização deste constituinte tem vindo a possibilitar a obtenção de composições com um desempenho melhor em termos de deformação e energia de fratura, aspetos essenciais para a aplicação de elementos estruturais esbeltos (Cheyrezy et al., 1995; Fehling et al., 2014).

Em suma, as principais variações de composições de UHPCs têm sido exaustivamente investigadas de forma a adaptar as misturas às exigências de desempenho e sustentabilidade impostas. Esta diversidade de estratégias passa pelo estudo da relação água/cimento, das dosagens de cimento e SCMs, a granulometria dos agregados e o tipo e quantidade de fibras incorporadas, permitindo obter UHPCs à altura das existentes exigências para aplicações modernas e a produção de elementos pré-fabricados de elevada eficiência estrutural.

### **2.3 Ecoeficiência**

Face ao peso significativo da quantidade de CO<sub>2</sub> e outros gases com efeitos de estufa libertados para a atmosfera com a produção do cimento Portland, a sustentabilidade tem sido uma questão cada vez mais debatida na área da construção. A produção de 1 tonelada de cimento Portland implica, em média, a libertação de 800 a 1000 kg de

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

CO<sub>2</sub> devido à eliminação do calcário e à queima de combustíveis fósseis (Yu, Spiesz, Brouwers, 2014).

Sendo o cimento Portland a base do material de construção mais utilizado, o betão, a redução da parcela de cimento incorporada neste material contribui para uma construção mais sustentável; por outro lado, a substituição parcial do cimento por outros materiais mais baratos é também uma vantagem do ponto de vista económico.

A obtenção da resistência mecânica desejada ( $f_{cm,28} > 150$  MPa) nos UHPC mais tradicionais requer uma dosagem de cimento elevada, geralmente igual ou superior a 1000 kg/m<sup>3</sup> (Wu et al., 2016), isto corresponde a um valor aproximadamente 3 vezes maior ao que é utilizado no betão corrente, tornando estes betões pouco “amigos do ambiente” e de custo económico elevado. De forma a contornar este obstáculo, procurou-se reduzir as dosagens de cimento, recorrendo a materiais cimentícios suplementares (SCMs), tais como a sílica de fumo, a cinza volante, entre outros, como substitutos parciais (Worrell et al., 2001). A introdução destes materiais torna o betão mais sustentável e económico, diminuindo a dosagem de cimento necessária à mistura, garantindo um desempenho equivalente ao do UHPC tradicional. (Ghafari et al., 2014) desenvolveram UHPC ecoeficiente, com a introdução de uma adição de nano-sílica, para a qual foram obtidos valores de resistência à compressão de 150 MPa, usando dosagens de cimento de 650 kg/m<sup>3</sup> (Zhao, 2017).

A densificação da matriz dos UHPC é uma mais alia para os parâmetros de avaliação da durabilidade, da mesma forma que contribui para a sua ecoeficiência e para a definição de uma solução mais sustentável.

### **2.4 Viabilidade Económica do eco-UHPC**

A crescente preocupação ambiental na construção civil tem impulsionado a investigação e o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, como os UHPC, como já foi visto anteriormente. Estudos revelam que as misturas de UHPC com menor custo são também as que apresentam um maior impacte ambiental. A escolha ótima de UHPC depende do cenário de aplicação e das escolhas do decisor final, enfatizando a necessidade de análises de avaliações de sustentabilidade tanto para as composições tradicionais como para as ecoeficientes (Ghafari et al., 2014). Este tipo de análises permite identificar oportunidade de melhoria para alcançar produtos com bom desempenho ambiental e económico.

A composição das composições de UHPC tem influência direta tanto nos custos como no impacto ambiental destas soluções. Por um lado, o cimento é o componente que causa maior impacte ambiental, seguido pelas microfibras metálicas e fibras poliméricas híbridas. Por outro lado, as microfibras metálicas são o componente que causa maior impacte ambiental, seguido das fibras poliméricas híbridas, das macro fibras metálicas, do cimento e do superplastificante (Silvestre,

Fontoura, 2025). Desta forma, podemos afirmar que o desempenho económico dos UHPC depende não apenas da percentagem de substituição do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCMs), mas também da quantidade e tipo de fibras incorporadas (Zhao, 2017).

Conforme evidenciado no projeto Pre-Shell, em termos de desempenho económico, a comparação entre misturas de UHPC tradicionais e alternativas, que incorporam SCMs, revelou que as misturas mais rentáveis são as que contêm micro-filer calcário e farinha de vidro reciclado.

Por fim, é relevante referir que a otimização das misturas de UHPC deve considerar simultaneamente custos, impacto ambiental e desempenho mecânico, garantido que a sustentabilidade e a previsão económica na construção civil.

## 2.5 Evolução do Desempenho

Ao longo do século XX, a evolução do desempenho do betão foi marcada por avanços que permitiram o aumento progressivo das resistências e durabilidade dos materiais constituintes. No início do século, as resistências à compressão situaram-se na ordem dos 20 aos 40 MPa. Contudo, com o avanço e introdução de métodos para reduzir a relação água/cimento observou-se um aumento substancial na densidade da matriz e, conseqüentemente, nas resistências mecânicas. Este avanço foi possível a partir do emprego de plastificantes e, posteriormente, de superplastificantes na composição dos betões. Estudos desenvolvidos por Tjaronge et al. (2003) afirmam que uma redução de 10% na relação água/cimento pode diminuir significativamente o espalhamento, evidenciando uma menor trabalhabilidade do betão, mas ao mesmo tempo resultando numa matriz mais compacta e resistente.

O desenvolvimento de soluções de elevado desempenho, o UHPC representou um avanço significativo no mundo da construção. A evolução destes betões remonta ao final do século XX, quando investigadores procuravam desenvolver materiais com resistências mecânicas superiores e maior durabilidade. O desenvolvimento inicial do UHPC permitiu uma multiplicidade de aplicações, tanto a nível estrutural como arquitetónico, contribuindo para estruturas com maior tempo de vida útil e melhor desempenho.

A introdução e desenvolvimento de superplastificantes no Japão na década de 1980 permitiu a redução da relação água/ligante e a obtenção de matrizes mais densas. Além disso, a otimização da distribuição granulométrica dos agregados e a utilização de materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes e escórias de alto forno, contribuíram para a melhoria das propriedades do UHPC. A utilização de materiais cimentícios suplementares, designados por SCMs, não só melhora as características mecânicas e de durabilidade do UHPC, como também promove a sustentabilidade ambiental. Ao substituir parcialmente o cimento Portland, os SCMs

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

reduzem a pegada de carbono associada à produção de cimento, além de valorizarem subprodutos industriais, alinhando-se com práticas de construção mais ecológicas.

Atualmente, o UHPC é usado em diversas aplicações, incluindo pavimentos de pontes, passagens pedonais e elementos mais esbeltos que exigem alta resistência e durabilidade. A sua utilização em painéis e fachadas combina estética e desempenho estrutural, enquanto colunas e vigas esbeltas beneficiam da alta resistência para reduzir dimensões e peso. Além disso, o UHPC tem sido usado na reabilitação de infraestruturas existentes, oferecendo soluções eficazes para prolongar a vida útil de estruturas degradadas.

Embora o custo inicial do UHPC seja superior ao do betão convencional, os benefícios a longo prazo, como a redução da necessidade de manutenção e o aumento da durabilidade das estruturas, justificam o investimento. A contínua investigação e o desenvolvimento neste domínio prometem expandir ainda mais as aplicações e melhorar a viabilidade económica do UHPC no futuro.

### **2.6 Propriedades de Durabilidade**

No que diz respeito às propriedades de durabilidade, foram pesquisadas as resistências à penetração de cloretos, à carbonatação, à absorção capilar, à água sob pressão e ainda a resistividade elétrica. Estes parâmetros, bem como os respetivos ensaios realizados, foram objeto de estudo para os betões UHPC. O desempenho destes parâmetros demonstra ser bastante influenciado pela evolução verificada em função dos materiais e dos parâmetros de composição. A introdução de adições, bem como a incorporação de fibras resultam em soluções com performance bastante positiva relativamente a estes ensaios.

A elevada compactação característica da microestrutura dos UHPC, a baixa relação água/ligante e a porosidade reduzida, são fatores que demonstram alguma vulnerabilidade neste tipo de betões quando expostos a temperaturas elevadas. No que a este assunto diz respeito, o foco do presente estudo consiste em analisar o comportamento dos UHPC a alguns parâmetros de durabilidade após a sua exposição a temperaturas elevadas, de forma a simular cenários semelhantes aos de incêndio. Do ponto de vista mecânico, sabe-se que até uma temperatura de aproximadamente 500°C é possível ocorrer um ganho de resistência (Rodrigues, T. (2023)), à semelhança do já registado na literatura. Após exposição a uma temperatura de 700°C, verificam-se danos visíveis significativos, e há perdas de resistência mecânica na ordem dos 50%. Acima dos 800°C, as perdas de resistência podem atingir os 80% (Liang X. et al., 2018). Além disso, sabe-se que na situação descrita anteriormente, há tendência para a ocorrência de fendilhação, apesar do reforço com fibras, o que prejudica não só a sua resistência mecânica, mas também a sua durabilidade.

De forma a fornecer uma referência quantitativa das propriedades de durabilidade do UHPC em comparação com o betão convencional, a Tabela 2.1 apresenta valores

típicos de absorção capilar, profundidade de carbonatação e penetração de cloretos para ambos os materiais.

Tabela 2.1- Tabela comparativa das propriedades de durabilidade do Betão Convencional e do UHPC.

Propriedade	Betão Convencional	UHPC
Absorção Capilar [mm/s <sup>0,5</sup> ]	0,1 – 0,5	0,004 – 0,010
Profundidade de Carbonatação em 50 anos [mm]	10 – 50	< 0,5
Coefficiente de Difusão de Cloretos [m <sup>2</sup> /s]	$6,0 \times 10^{-12}$ a $10 \times 10^{-12}$	$0,4 \times 10^{-12}$ a $3,0 \times 10^{-12}$

Estes valores ilustram a superioridade do UHPC em termos de durabilidade, atribuída à sua microestrutura densa e baixa porosidade. A absorção capilar significativamente reduzida no UHPC limita a penetração de água e substâncias nocivas, enquanto a profundidade de carbonatação quase nula indica uma maior resistência à degradação química. Além disso, a baixa penetração de cloretos reflete uma proteção eficaz contra a corrosão das armaduras, fator crítico para a longevidade das estruturas de betão armado.

## *Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas*

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiais

Atendendo aos parâmetros de composição e aos materiais habitualmente considerados na bibliografia, foram selecionados os materiais descritos de seguida. Estes foram avaliados e caracterizados em termos físicos e geométricos.

##### 3.1.1 Pasta Ligante – cimento e adições

Para os betões desenvolvidos, recorreu-se a um ligante composto por cimento do tipo CEM I 52,5R da Cimpor, combinado com dois dos seguintes ligantes (Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3): filer calcário, cinza volante Classe F, sílica de fumo, pó de vidro moído em moinho de bolas, escória moída de alto forno, escória de forno elétrico e pozolana natural moída.



Figura 3.1 - Amostras: a) CEM I 52,5R; b) filer calcário; c) cinza volante.



Figura 3.2 - Amostras: a) sílica de fumo; b) pó de vidro moído; c) escórias de alto forno.

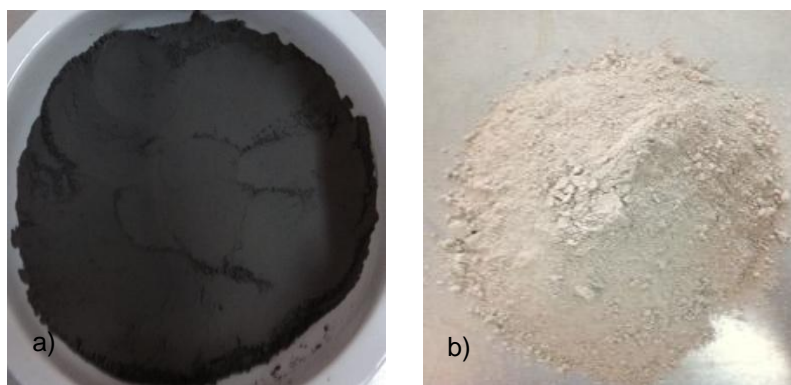


Figura 3.3 - Amostras: a) escória de forno elétrico; b) pozolana natural de Cabo Verde.

As massas volúmicas destes materiais foram caracterizadas, os valores são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Massas volúmicas dos ligantes.

Pó da matriz	Massa volúmica [kg/dm <sup>3</sup> ]
Cimento CEM I 52.5R	3,12
Fíler calcário	2,70
Cinza volante	2,35
Sílica de fumo	2,20
Pó de vidro moído	2,65
Escória moída de alto-forno	2,80
Escória moída de forno elétrico	2,60
Pozolana natural moída	2,20

### 3.1.2 Materiais Granulares

Os UHPCs são normalmente caracterizados por resistências à compressão muito elevadas; desta forma, é fundamental que os materiais granulares a utilizar acompanhem a resistência à compressão que se pretende atingir (Fernandes, 2011). Para a produção dos betões, foram selecionados os seguintes materiais granulares (Figura 3.4 e Figura 3.5): areia fina 0/1mm da Guia (G0/1); areia grossa 2/4mm (G2/4), obtida por peneiração de areia 2/4mm e; areão 4/8mm (G4/8); além destes, para o UHPC do modelo reduzido foi selecionada a argila expandida Leca XS 1/2mm (L-XS).

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas

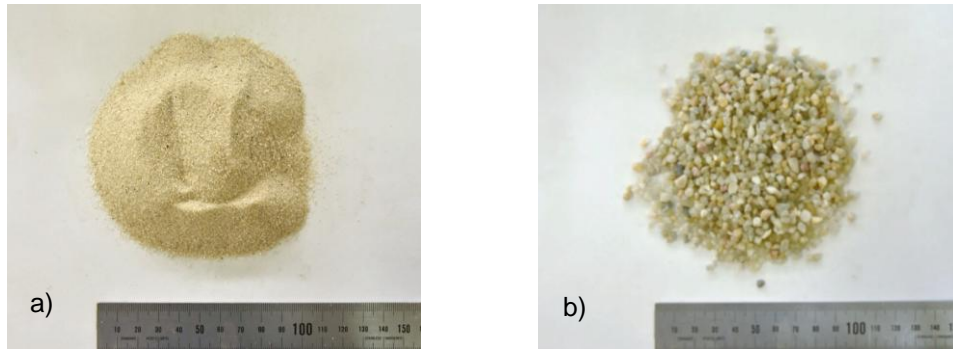


Figura 3.4 - a) areia fina 0/1mm Guia (G0/1); b) areia grossa 2/4mm (G2/4).

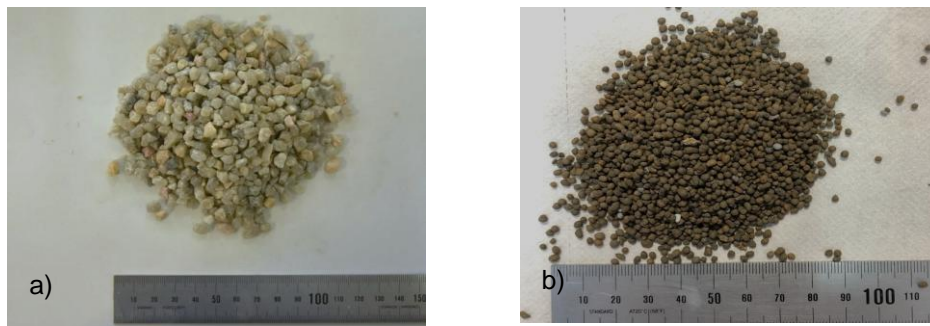


Figura 3.5 - a) areão 4/8 (G4/8); b) argila expandida Leca XS 1/2mm (L-XS).

Atendendo aos procedimentos contemplados na NP EN 933 (2014), procedeu-se à análise granulométrica dos materiais granulares. O procedimento da norma referida contempla as seguintes fases: recolha da amostra do agregado; secagem e pesagem; peneiração sem lavagem, recorrendo às séries de peneiros europeias, e registo das massas do material retido em cada peneiro. Com o recurso a uma folha de cálculo, foi determinada a percentagem de passados em cada um dos peneiros, e traçou-se a respetiva curva granulométrica (Figura 3.6). Procedeu-se ainda à determinação das massas volúmicas, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.2.

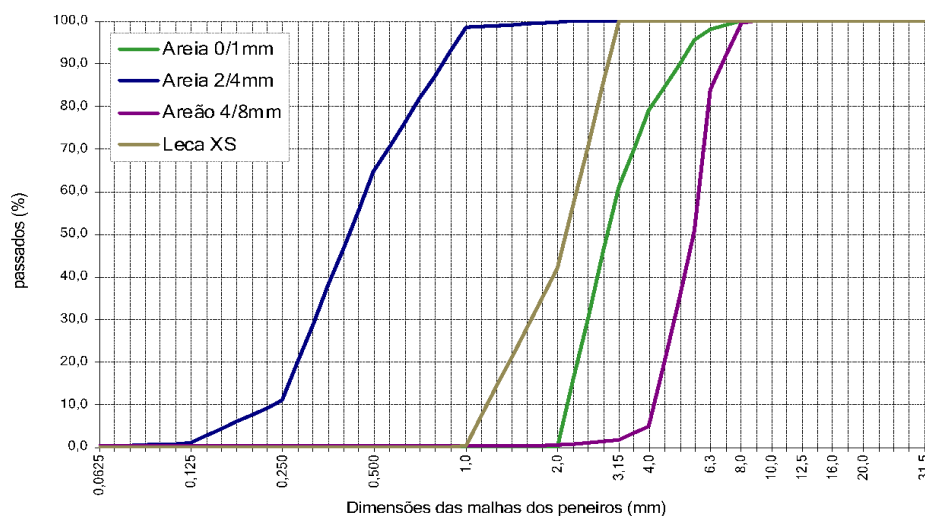


Figura 3.6 – Curvas granulométricas dos agregados naturais.

Tabela 3.2 -Massas volúmicas dos agregados.

Material granular	Massa volúmica [kg/dm <sup>3</sup> ]	Absorção 15 min. [%]
Areia Fina 0/1mm	2,63	-
Areia 2/4mm	2,63	-
Areão 4/8mm	2,63	-
Leca XS 1/2mm	0,98	6

### 3.1.3 Água e adjuvantes

No processo de amassadura das misturas, utilizou-se água da rede pública de abastecimento, uma vez que esta garante a qualidade adequada à produção dos betões.

O adjuvante selecionado foi MasterEasy 5025 (BASF) que permite reduzir até 20% a proporção usada nas composições originais. De acordo com as fichas técnicas, este tipo de superplastificante, à base de éter-carboxilatos, tem um grande poder redutor de água e plastificante, melhorando desta forma quer o acabamento quer a textura da superfície do betão, aumentando ainda a resistência inicial e final do betão. Ademais, o superplastificante contribui para um comportamento reológico excelente do betão, com viscosidade reduzida e uma trabalhabilidade melhorada, excelente coesão e consistência fluida.

### 3.1.4 Fibras

A introdução de fibras na composição dos betões de ultraelevado desempenho é fundamental para garantir o seu desempenho geral. A incorporação deste constituinte tem como objetivo aumentar as resistências destes à tração, direta e por flexão, e, desta forma, permitir a dispensa parcial ou até mesmo total das armaduras passivas.

#### 3.1.4.1 Fibras metálicas

No presente estudo, utilizaram-se dois tipos distintos de fibras metálicas: microfibras de aço Bekaert OL13/0.16 e macro fibras de aço Dramix 3D 80/30 (Figura 3.7 e Figura 3.8). As características deste material, apresentadas de forma sumária na Tabela 3.3, podem ser consultadas na ficha técnica deste material.

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas



Figura 3.7 – Micro fibras metálicas.



Figura 3.8 – Macrofibras metálicas.

Tabela 3.3 - Propriedades das fibras de metálicas.

Propriedades do Material	Microfibras	Macrofibras
Resistência à Tração [MPa]	3 000	2 300
Módulo de Elasticidade [GPa]	200	200
Densidade [kg/dm <sup>3</sup> ]	7,85	7,85
Diâmetro [mm]	0,16	0,38
Comprimento [mm]	13	30

### 3.1.4.2 Fibras poliméricas

As fibras poliméricas incorporadas são macro fibras híbridas (polipropileno e polietileno) CHRYSO S25mm (Figura 3.9) que apresentam, de acordo com a ficha técnica do produto, as características apresentadas na Tabela 3.4.



Figura 3.9 – Fibras poliméricas.

Tabela 3.4 - Propriedades das fibras poliméricas.

Propriedades do Material	Fibras Poliméricas
Resistência à Tração [MPa]	650
Módulo de Elasticidade [GPa]	5
Densidade [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,92
Diâmetro [mm]	0,30 a 0,5
Comprimento [mm]	25

#### 3.1.4.3 Fibras de vidro

Além das fibras descritas anteriormente, foram utilizadas fibras de vidro. As fibras selecionadas foram microfibras de 12 mm (Figura 3.10), cujas características são apresentadas na Tabela 3.5.



Figura 3.10 – Fibras de vidro.

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

Tabela 3.5 - Propriedades das fibras de vidro.

Propriedades do Material	Fibras de vidro
Resistência à Tração [MPa]	1 700
Módulo de Elasticidade [GPa]	72
Densidade [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,68
Diâmetro [mm]	0,01
Comprimento [mm]	12

### **3.2 Composição dos UHPC**

#### **3.2.1 Estratégias e parâmetros adotados**

A composição do UHPC de base e das soluções alternativas, incorporando fibras e adições à matriz ligante foi estruturada com base na revisão bibliográfica, focada no desenvolvimento de soluções mais sustentáveis de UHPC. Numa fase inicial, considerou-se o UHPC tradicional (Tabela 3.6), que constitui a solução corrente de mercado, como base de comparação não só em termos de custo, mas também em termos da composição. As composições tradicionais comportam dosagens de cimento próximas de 900 kg/m<sup>3</sup> e dosagens elevadas de sílica de fumo e de microfibras de aço, aumentando assim não apenas o custo/m<sup>3</sup>, mas também a sua pegada ecológica, associada à produção de cimento e das fibras de aço, através da libertação de CO<sub>2</sub>, e do consumo de energia não renovável.

Tabela 3.6 - Composição ponderal tradicional do UHPC.

Cimento Portland	Sílica de Fumo	Farinha de Quartzo	Areia Fina	Superplast.	Água	Macrofibras de aço
1,00	0,20	0,20	1,00	0,04	0,25	0,15 a 0,20

A revisão bibliográfica permitiu identificar que, na última década, tem sido efetuado um esforço no sentido de desenvolver soluções de UHPC mais ecoeficientes e mais económicas, em particular reduzindo a dosagem de cimento Portland para valores que rondam os 550 a 650 kg/m<sup>3</sup>, garantindo o nível de desempenho pretendido. Um dos parâmetros de referência estabelecidos remete para a fixação da dosagem de cimento Portland CEM I 52.5R nos 600 kg/m<sup>3</sup>, tendo sido testada complementarmente uma mistura com dosagem de 500 kg/m<sup>3</sup>. Além da dosagem de cimento, procurou reduzir-se a dosagem habitual de pó na matriz, que usualmente se fixa entre os 1100 e os 1200 kg/m<sup>3</sup>, para um valor de 1000 kg/m<sup>3</sup>. Com este valor, é possível garantir a fluidez, trabalhabilidade e estabilidade necessárias a uma mistura

de UHPC. A quantidade complementar de pó na matriz ligante,  $400 \text{ kg/m}^3$ , foi atribuída a uma mistura de fíler calcário com cinza volante, esta é uma opção sustentada por estudos desenvolvidos anteriormente (Robalo, 2022). Considerando o betão de referência, definiram-se diferentes séries de misturas, nas quais se variaram os seguintes parâmetros: as proporções dos agregados, considerando um máximo de 20% de areia grossa ou de areão; o tipo e proporções de fibras de reforço, micro e macro fibras de aço, macro fibras poliméricas e microfibras de vidro; e o tipo e proporção de diferentes adições, como substitutos parciais do cimento Portland.

### 3.2.2 Eco-UHPCs

A composição de base do UHPC, designada de M0, foi definida como mistura de referência para a análise comparativa com os betões desenvolvidos. A composição desta mistura foi realizada de acordo com o desempenho pretendido e os parâmetros identificados na revisão bibliográfica como mais significativos. A mistura foi ainda validada em função do desempenho verificado em ensaios preliminares realizados. A fluidez apresentada foi considerada adequada; a estabilidade e reologia no estado fresco, combinado com os resultados das resistências mecânicas também foram avaliados. No que diz respeito aos agregados, definiu-se uma incorporação de 20% de areia grossa 2/4 mm de modo a reduzir a dosagem de superplastificante em relação à perspetiva tradicional, que contempla apenas areia fina 0/1 mm. O valor desejado do ar na matriz fixou-se entre 1,0% a 1,5%, sendo este um intervalo que garante habitualmente uma boa fluidez da matriz deste tipo de betões, baixa viscosidade para libertar o ar e sem se verificar o fenómeno de segregação; para o efeito, o teor de superplastificante foi ajustado em cada mistura.

Em função dos materiais selecionados, estabeleceram-se designações simplificadas utilizadas nas composições, sendo apresentada na Tabela 3.7 uma síntese das mesmas.

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

Tabela 3.7 - Descrição e siglas dos materiais utilizados.

Sigla	Descrição do material
CEM	CEM I 52,5 R
SF	Silica de Fumo
GP	Pó de Vidro
FA	Cinza Volante Classe F
LF	Filer Calcário
GGBS	Escória Moída de Alto Forno
GEFS	Escória de Forno Elétrico
PZZ	Pozolana Natural
Water	Água
S. Plast	Super Plastificante MG526
Micro Steel = OL13/.16	Micro Fibras Metálicas OL13/.16
Macro Steel 3D	Macro Fibras Metálicas 3D 30mm
Polymer Hybrid	Fibras Poliméricas Híbridas 25mm
G0/1	Areia fina 0/1 Guia
G2/4	Areia grossa 2/4
G4/8	Areia grossa 4/8
L XS	Argila Expandida Leca XS (1-3mm)

Como referido anteriormente, o plano experimental foi organizado considerando os parâmetros estabelecidos, e seguindo uma organização por séries, nas quais se fizeram variar os materiais granulares utilizados (Série 1), os tipos de fibras (Série 2) e as adições (Série 3), a partir da composição do betão de referência M0. Com a finalidade de executar um modelo reduzido para ensaio sísmico, estabeleceu-se ainda uma última série de betões leves.

A composição da mistura M0 consiste numa matriz com 1000 kg de pó, em que 60% correspondem a cimento CEM I 52.5R, 25% a cinza volante e os restantes 15% são compostos por filer. A razão A/L foi fixada em 0,21, resultando assim numa relação A/C=0,35. A mistura de agregados é de 80% de areia fina 0/1 mm e 20% de areia grossa 2/4 mm. Definiu-se que reforço de fibras na mistura base seria 100% assegurado por microfibras de aço OL13/0.16; e a quantidade de superplastificante foi ajustada de forma a atingir a fluidez adequada sem segregação. A mistura M0 sem fibras (M0-SF), é resultado dos mesmos parâmetros, no entanto, sem a incorporação das fibras de reforço, sendo apenas ajustada a proporção dos agregados e o teor de superplastificante em função desta alteração. De forma complementar, além da mistura M0, desenvolveu-se e testou-se ainda a mistura M0500, característica de uma

menor dosagem de cimento (50% do pó da matriz), e com um ajuste nas proporções das adições. A composição das misturas de referência é resumida na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Composição das misturas de referência.

Sigla	Referência		
	M0 kg/m <sup>3</sup>	M0-SF kg/m <sup>3</sup>	M0-500 kg/m <sup>3</sup>
CEM	600	600	500
SF			
GP			
FA	250	250	300
LF	150	150	200
GGBS			
GEFS			
PZZ			
Water	210	210	210
S. Plast	21	21	19
Micro Steel OL13/.16	157		157
Macro Steel 3D			
Polymer Hybrid			
G0/1	854,1	854,1	799,7
G2/4	213,5	213,53	199,9
G4/8			
L XS			

A série 1 (Tabela 3.9) corresponde à série na qual se procedeu à variação dos agregados integrados na mistura, incorporando 20% de agregado mais grosso (areia 2/4 mm e areão 4/8 mm), respetivamente nas misturas M0 e M2, relativamente à mistura M1, tradicionalmente com unicamente areia fina 0/1 mm.

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

Tabela 3.9 - Composição da Série 1, variação do tipo de agregado.

Sigla	Mistura	
	M1	M2
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
CEM	600	600
SF		
GP		
FA	250	250
LF	150	150
GGBS		
GEFS		
PZZ		
Water	210	210
S. Plast	24	21
Micro Steel OL13/.16	157	157
Macro Steel 3D		
Polymer Hybrid		
G0/1	1012,4	
G2/4		812
G4/8		203
L XS		

Na Série 2, procedeu-se à variação da combinação de fibras a incorporar nas misturas. Comparativamente à mistura de referência M0, apenas com microfibras de aço, optou-se pela incorporação de microfibras de aço e macro fibras de aço, pela combinação de fibras poliméricas com microfibras de aço e, posteriormente, com microfibras de vidro, como é representado na Tabela 3.10. A combinação híbrida de microfibras com macro fibras, do mesmo material ou combinando com outro não metálico, é justificada com base nas limitações suportadas pela bibliografia no que toca a usar isoladamente fibras não metálicas (Meng & Khayat, 2018; Ryu *et al.*, 2011). Desta forma, visou em promover-se sinergias de desempenho, resistências e ductilidade, com a adição parcial de macro fibras de aço (misturas M3 e M3B) e com a adição parcial de macrofibras poliméricas (mistura M4); formulou-se e analisou-se ainda uma combinação de microfibras de vidro com macrofibras poliméricas (M4B).

Tabela 3.10 - Composição da Série 2, variação do tipo de fibras.

Sigla	Mistura			
	M3 kg/m <sup>3</sup>	M3-B kg/m <sup>3</sup>	M4 kg/m <sup>3</sup>	M4-B kg/m <sup>3</sup>
CEM	600	600	600	600
SF				
GP				
FA	250	250	250	250
LF	150	150	150	150
GGBS				
GEFS				
PZZ				
Water	210	210	210	210
S. Plast	18	16,8	21	30
Micro steel OL13/.16	117,8	78,5	117,8	
Macro steel 3D	39,3	78,5		
Polymer Hybrid			9,2	27,6
G0/1	818	757,2	801,5	13,3
G2/4				
G4/8	204,5	189,3	200,3	940,1
L XS				

Na Série 3 as variações passaram pela combinação de adições, comparativamente ao implementado na composição M0, na qual a adição incorporada foi a cinza volante com fíler calcário. Verificou-se a necessidade de ajustar o superplastificante incorporado em função do tipo e da proporção de adições, fez-se também variar a proporção do fíler e das respetivas adições complementares (escória de alto forno e pozolana natural, respetivamente designadas por misturas M5 e M7), entre 150 e 250 kg/m<sup>3</sup>, das quais resultam as designações M5' e M7'. Para uma última mistura, M9, foi definida uma dosagem reduzida de sílica de fumo definida (5% do pó), pelo que o fíler assume uma quantidade de 35% do pó na matriz.

A Série de Betões leves é constituída combinações de diferentes proporções de Leca XS combinadas areia fina 0/1 mm, partindo da composição de referência M0, variando o teor de microfibras de aço incorporadas, de maneira a obter um compromisso adequado entre os valores desejados para a consistência, massa volúmica, rigidez e resistência mecânica. As misturas denominadas por M0-L1.7 resultam da consideração de 100% de agregado como Leca XS, fazendo variar a percentagem de fibras entre 1 e 2% do volume. No entanto, a falta de areia fina demonstrou ser um fator prejudicial em termos de trabalhabilidade, particularmente

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

na mistura com 2% de fibras. As misturas M0-L1.9 são resultado de uma proporção combinada de agregados, maioritariamente de Leca XS e complementada com 15 a 20% de areia fina 0/1 mm, tendo-se variado a dosagem de fibras entre 1 e 1,5% em volume, permitindo assim ter a trabalhabilidade adequada e as propriedades mecânicas desejadas.

Tabela 3.11 - Composição da Série 3, variação do tipo de adições.

Sigla	Mistura				
	M5	M6	M7	M8	M9
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
CEM	600	600	600	600	600
SF					50
GP				150	
FA					
LF	250	250	250	250	350
GGBS	150				
GEFS		150			
PZZ			150		
Water	210	210	210	210	210
S. Plast	28,2	30	30	27	23,4
Micro Steel OL13/.16	157	157	157	157	157
Macro Steel 3D					
Polymer Hybrid					
G0/1	830,9	852,4	796,6	818	827,4
G2/4		213,1	199,2	204,5	206,9
G4/8	207,7				
L XS					

Tabela 3.12 – Composição da Série de Betões Leves.

Sigla	Mistura			
	M0 L1,7 F1	M0 L1,7 F2	M0 L1,9 F1	M0 L1,9 F1,5
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
CEM	600	600	600	600
SF				
GP				
FA	250	250	250	250
LF	150	150	150	150
GGBS				
GEFS				
PZZ				
Water	214,1	213,5	190	190
S. Plast	22,2	22,2	22,22	22,22
Micro steel OL13/.16	78,5	157	78,5	117,75
Macro steel 3D				
Polymer Hybrid				
G0/1			269,08	266,16
G2/4				
G4/8				
L XS	401,6	391,8	355,67	297,54

### 3.3 Programa Experimental

Após o desenvolvimento das composições, procedeu-se à produção a caracterização das misturas. A produção de betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras (UHPC) requer uma composição otimizada constituída por elevadas quantidades de cimento, adições naturais, agregados finos, superplastificante, fibras e água. A seleção destes componentes foi realizada de forma criteriosa, face à influência significativa que cada um tem nas propriedades finais da matriz do betão. A elevada dosagem de cimento adotada nesta solução pode assegurar uma resistência elevada; contudo, como foi referido anteriormente, tal abordagem pode ser economicamente inviável e prejudicial para o ambiente. A incorporação de adições naturais, substituindo parcialmente o cimento por materiais reciclados contribui para a sustentabilidade do betão e melhora a compactação da matriz, visto que as partículas destes materiais são mais refinadas que o próprio cimento. Alternativas como esta são fundamentais para alcançar a resistência e durabilidade pretendidas, permitindo, além disso, a otimização das composições de forma a obter os melhores resultados possíveis com os recursos disponíveis.

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

Além destes, existem outros fatores que devem ser considerados aquando da escolha dos materiais da composição do betão, como a reologia, A/L pretendido, a disponibilidade dos materiais, o custo, o cumprimento de normas estabelecidas, a aplicabilidade, entre outros.

Os materiais selecionados incluem cimento CEM I 52.5R, adições em pó de vidro, cinza volante, filer calcário, escória de alto forno, escória de alto forno elétrico, pozolana natural e sílica de fumo. A água utilizada provém da rede pública, e o superplastificante escolhido foi o MasterEase 5025. Os agregados selecionados são 3 tipos: Areia fina 0/1mm, Areia grossa 2/4mm e Areão 4/8mm. Foram escolhidas fibras de reforço que se distinguem em: microfibras em aço de 13 mm de comprimento e macro fibras de aço Dramix Steel 3D de 30 mm de comprimento, fibras poliméricas de 25 mm de comprimento e fibras de vidro de 12 mm de comprimento.

No presente capítulo é apresentada a descrição e condições dos ensaios e os resultados obtidos no estudo em questão.

### **3.3.1 Estado fresco**

No presente subcapítulo, procedeu-se à caracterização das misturas no estado fresco, analisando as mesmas em termos de: massa volúmica e teor de ar, espalhamento e fluidez.

#### *3.3.1.1 Massa volúmica*

A massa volúmica registada no estado fresco deve coincidir com a massa prevista para a composição em estudo. A determinação deste parâmetro, passa pela determinação da massa do betão no estado fresco de um dado volume, compactado com os meios previstos. Os procedimentos adotados para o presente ensaio são os definidos na norma NP EN 12350-6 (2009).

O valor da massa volúmica é determinado pela seguinte Equação(1):

$$\text{Massa volúmica} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (1)$$

Na quantificação da massa volúmica ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ),  $m_1$  corresponde à massa do molde vazio (kg),  $m_2$  é a massa do molde completamente cheio do betão em análise, compactado (kg), e  $V$  diz respeito ao volume do molde ( $\text{dm}^3$ ).

#### *3.3.1.2 Teor de ar*

A percentagem de teor de ar, medido no estado fresco, deve corresponder a um valor muito próximo do previsto inicialmente, na composição da composição. Este ensaio foi realizado com recurso a um equipamento específico, um aerómetro de um litro, apresentado na Figura 3.11, que tem como base o princípio da lei de Boyle-Mariotte. Os procedimentos adotados para o presente ensaio são os definidos na norma NP EN 12350-7 (2019).



Figura 3.11- Aerómetro.

### 3.3.1.3 Espalhamento

De forma a avaliar a consistência das misturas de UHPC, foi efetuado o Ensaio de Mini-Espalhamento (Mini Slump-Flow Test) para betões fluídos, com base nos procedimentos preconizados na norma NP EN 12350-5 (2019), ainda que tenham sido feitas alterações ao método normalizado. A Figura 3.12 demonstra o ensaio realizado.



Figura 3.12- Caracterização do Teor de ar.

O valor do espalhamento (SF - Slump-flow) é determinado através da seguinte Equação (2):

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (2)$$

em que, SF corresponde ao valor do espalhamento (mm),  $d_1$  é o maior diâmetro do espalhamento (mm) e  $d_2$  o espalhamento a 90° de  $d_1$  (mm).

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

### *3.3.1.4 Fluides*

Recorrendo ao mini funil-V (Figura 3.13), foi realizado o ensaio de fluidez, de acordo com a norma NP EN 12350-9 (2010). O tempo de escoamento do funil V foi medido também para avaliar a estabilidade das misturas. Neste ensaio, o funil é preenchido com 1,1 dm<sup>3</sup> de UHPC, posto isto, a saída inferior é aberta, permitindo assim o escoamento do betão. O tempo de fluxo do funil V corresponde ao tempo decorrido, T, em segundos, entre a abertura da saída inferior e o instante em que a luz se torna visível do fundo, quando observada do topo do funil.



Figura 3.13- Ensaio de fluidez (mini funil-V).

Este ensaio foi realizado para a mistura M0 e para as misturas com diferentes tipos de fibras, metálicas e híbridas (aço e poliméricas), M3 e M4, visto que, nas restantes misturas se prevê um comportamento em todo semelhante à mistura M0, uma vez que apresentaram um comportamento similar no ensaio de espalhamento.

### **3.3.2 Propriedades mecânicas no estado endurecido**

A presente dissertação tem como foco a análise das propriedades diferidas e de desempenho de durabilidade das misturas selecionadas de UHPC. Neste contexto, as propriedades mecânicas das mesmas, no estado endurecido, serão apresentadas de forma sucinta, dado que a caracterização e análise aprofundada dessas propriedades foi já realizada numa outra dissertação desenvolvida no âmbito do mesmo projeto de investigação – o projeto Pre-Shell – intitulada “Desenvolvimento e caraterização mecânica de eco-betões de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras para pré-fabricação modular.”, da autoria de Tiago Rodrigues (Rodrigues, 2023).

#### *3.3.2.1 Resistência à compressão*

Para o ensaio de resistência à compressão, foram seguidos os procedimentos definidos na norma NP EN 196-1 (2017).

Após a realização do ensaio, é determinada a resistência à compressão,  $f_c$ , recorrendo à Equação (3):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

em que,  $f_c$  é a resistência à compressão, em MPa,  $F$  é a carga máxima à rotura em Newtons (N), e  $A_c$  é a área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada, em  $\text{mm}^2$ .

A análise e estimativa da evolução da resistência média à compressão com a idade, foi definida recorrendo à correspondente curva de endurecimento, utilizando as Equações (4) e (5) do EC2 (2004):

$$f_{cm}(t) = \beta(t) * f_{cm} \quad (4)$$

com

$$\beta(t) = \exp\left\{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\} \quad (5)$$

onde  $f_{cm}(t)$  é a tensão média de rotura do betão à compressão à idade  $t$  (dias),  $t$  é a idade do betão, em dias,  $f_{cm}$  é a tensão média de rotura aos 28 dias de idade,  $\beta(t)$  é um coeficiente de endurecimento do betão, que varia com a idade do betão, e o coeficiente  $s$  (ou  $s_c$ ) é o coeficiente que depende do tipo/classe de cimento. Para as misturas em estudo, adotou-se um coeficiente  $s$  de 0,35, pois enquadra-se melhor na evolução das resistências medidas, e deve-se ao elevado teor de adições utilizado (40%), muitas delas com efeito pozolânico ou hidráulico latente.



Figura 3.14- Ensaio de caracterização da resistência à compressão dos UHPCs desenvolvidos.

Para a realização destes ensaios, foram produzidos provetes prismáticos de dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$ , estes foram inicialmente ensaiados à flexão de 3 pontos e posteriormente à compressão entre placas de  $40 \times 40 \text{mm}^2$ . Foram ensaiados 2

### ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

provetes por idade à flexão, para cada mistura, e 4 provetes por ensaio de compressão por idade para cada mistura. Além disso, foram ensaiados 2 provetes cúbicos (com 50 mm de aresta) à compressão, como elemento de comparação com os resultados dos ensaios mencionados anteriormente - por idade e para cada mistura, nas idades: 28, 56, 90 e 150 dias.

Na caracterização da resistência à compressão das metades dos provetes prismáticos, cada provete é ensaiado entre pratos de 40×40 mm<sup>2</sup>, sendo depois determinando o valor médio da resistência à compressão.

#### *3.3.2.2 Resistência à flexão*

A caracterização da resistência à flexão pura das misturas selecionadas foi realizada de acordo com os procedimentos preconizados na norma NP EN 12390-5 (2009), semelhantes aos procedimentos seguidos para a realização do ensaio de resistência à tração por flexão simples, diferindo nos pontos de aplicação da carga. No presente caso, a força é aplicada em dois pontos, posicionados nos terços do vão. A carga aplicada pelo atuador é distribuída por 2 roletes de aço (Figura 3.15) de forma a originar unicamente flexão pura no terço central do provete. Para este ensaio foram usados 2 provetes de dimensões 50×50×300 mm<sup>3</sup>, com os roletes superiores a distanciarem-se 67 mm entre si, e os roletes inferiores de apoio afastados 200 mm. De forma a medir rigorosamente a força aplicada e a deformação, foram usados no ensaio, além de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN, LVDTs para medir o deslocamento médio no terço central. Recorreu-se à Equação (6) para determinar a tensão máxima aplicada nos provetes:

$$f_{cf} = \frac{F}{2} \times \frac{1}{3} \times 0,2 \quad (6)$$

onde  $f_{cf}$  é a resistência à flexão,  $W$  é o módulo de flexão.



Figura 3.15- Ensaio de caracterização da resistência à flexão.

### 3.3.2.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade em compressão das diferentes composições de betão foi ensaiado e calculado com base nos procedimentos definidos na especificação LNEC E397 (1993). Para este fim, foram utilizados provetes prismáticos de dimensões  $50 \times 50 \times 300 \text{ mm}^3$ , aos quais foi aplicada uma carga de compressão cíclica, entre um valor mínimo e máximo de tensão. As deformações resultantes de cada ciclo foram medidas até que a diferença verificada entre ciclos consecutivos atendesse ao critério de convergência.

A carga máxima aplicada foi determinada com base na tensão de rotura à compressão do betão,  $f_{cm}$ . Para a medição das deformações, foram fixadas pastilhas “demec” nas duas faces opostas do provete, medindo-se a deformação através da variação da dimensão longitudinal registada por um alongâmetro, como é mostrado a Figura 3.16. Os procedimentos descritos na norma são apresentados seguidamente de forma resumida:

- I. Fixação das pastilhas “demec” nas faces do provete (Figura 3.16.);
- II. Centrar o provete na máquina de ensaio;
- III. Aplicação de uma tensão inicial de 0,5 MPa ( $\sigma_b$ ) e leitura da extensão verificada ( $\epsilon_b$ );
- IV. Aumento contínuo da tensão de forma contínua, a uma velocidade de  $0,5 \pm 0,1$  MPa por segundo, até atingir a tensão máxima,  $\sigma_a$ . Manter a tensão aplicada por 30 segundos. As leituras das extensões são realizadas até 60 segundos;
- V. As diferenças nas extensões ( $\epsilon_a - \epsilon_b$ ) entre as várias bases de medida nas faces do provete não devem exceder 10%. Caso contrário, a carga deve ser removida e provete recentrado;
- VI. Repetição dos ciclos de carga até que a diferença de variação da extensão entre ciclos consecutivos seja inferior a 10% na diferença de extensões ( $\epsilon_a - \epsilon_b$ ) entre as medições nas faces.

Após a realização do ensaio, o módulo de elasticidade,  $E_c$ , é calculado usando a seguinte expressão:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{(\sigma_a - \sigma_b)}{(\epsilon_{a,n} - \epsilon_{b,n})} \times 10^3 \quad (7)$$

sendo:  $E_c$  o módulo de elasticidade em GPa;  $\sigma_a$  a tensão máxima aplicada (em MPa);  $\sigma_b$  é a tensão inicial aplicada, de 0,5 MPa;  $\epsilon_{a,n}$  é a extensão correspondente à tensão  $\sigma_a$  medida no n-ésimo ciclo da carga-descarga e;  $\epsilon_{b,n}$  é a extensão correspondente à tensão  $\sigma_b$  medida no n-ésimo ciclo da carga-descarga.

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

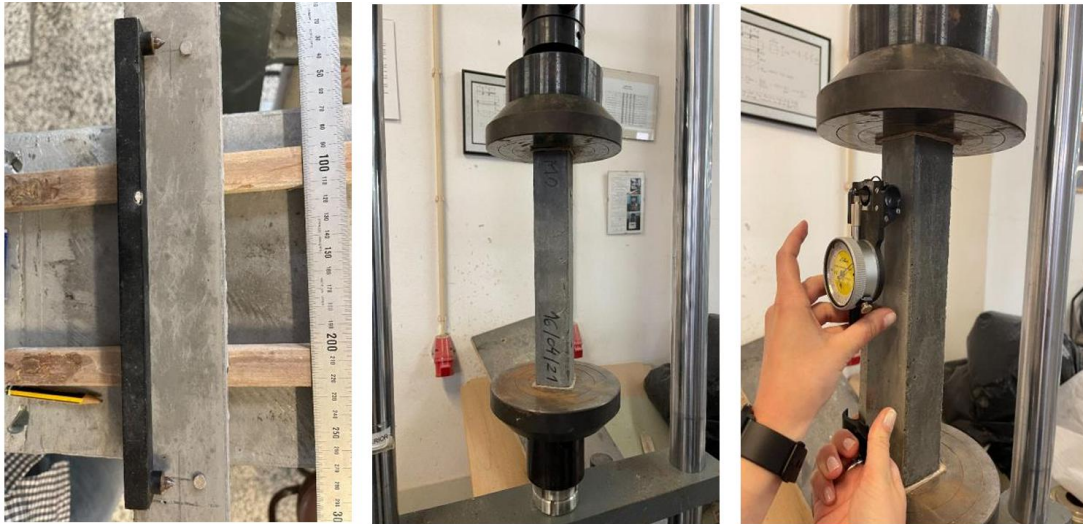


Figura 3.16 - Ensaio do módulo de elasticidade.

### **3.3.3 Propriedades diferidas dos betões selecionados**

#### *3.3.3.1 Retração*

A variação dimensional causada pelos efeitos combinados da retração por secagem e da retração autogénea é designada por retração do betão. A retração por secagem é consequente da evaporação da água na superfície do betão, por outro lado, a retração autogénea ocorre durante o endurecimento do betão, nos primeiros dias de cura. A retração está relacionada com a resistência do betão e com a sua relação água-cimento, sendo tanto maior quanto menor a relação água-cimento. Nos betões de elevada resistência a retração autogénea exige especial atenção, pois pode assumir valores elevados em função dos parâmetros e constituintes usados.

Para a realização do ensaio acompanharam-se os procedimentos descritos na norma EN 12617-4 (2002) e na especificação LNEC E398 (1993). Foram produzidos e ensaiados provetes de duas dimensões distintas: provetes 40×40×160 mm<sup>3</sup> e provetes maiores com as dimensões 100×100×500 mm<sup>3</sup>. A deformação por retração é registada de forma direta recorrendo a um dispositivo de elevada precisão, destinado para o efeito. Para a realização da medição, são aplicados inserts metálicos (mostrados na Figura 3.17 e Figura 3.17) no decorrer da betonagem dos provetes. O valor da extensão da retração,  $\epsilon_{cs}$ , dos provetes corresponde à diferença de valores entre o comprimento inicial dos provetes medido na desmoldagem (às 24h de cura) e o valor do comprimento registado após a secagem do betão em diferentes idades, a dividir pelo comprimento inicial do provete, Equação (8):

$$\epsilon_{cs} = \frac{d_f - d_i}{d_i} \quad (8)$$

Onde:  $\epsilon_{cs}$  é a extensão de retração,  $d_i$  a distância, (mm), entre os pontos de referência no início do ensaio, e  $d_f$  a distância, (mm), entre os pontos de referência à idade específica de ensaio.

Durante todo o período do ensaio, os provetes são mantidos numa câmara termo-higrométrica, calibrada com uma temperatura de 20°C (+/-2°C) e uma humidade relativa de 50% (+/-5%). Assim, pode garantir-se que as retrações medidas não sofrem influência da variação das condições ambientais.



Figura 3.17- *Inserts* metálicos e medição da retração em provetes 40×40×160 mm<sup>3</sup>.



Figura 3.18- *Inserts* metálicos e medição da retração em provetes de 100×100×500 mm<sup>3</sup>.

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

### **3.3.3.2 Fluência**

Têm-se por fluência do betão o aumento da deformação registada ao longo do tempo quando este é sujeito a um nível de tensão constante, é, portanto, uma propriedade diferida e é consequência do comportamento viscoelástico do betão. Os ensaios de fluência em compressão foram realizados de acordo com a norma LNEC E399 (1993), e o coeficiente de fluência em função da idade,  $\varphi_c(t)$ , foi calculado a partir da Equação (9):

$$\varphi_c = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{ce}} \quad (9)$$

Os carregamentos foram realizados aos 28 dias de idade e colocados na câmara higrotérmica, calibrada para uma temperatura de 20°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) e uma humidade relativa de 50% ( $\pm 5\%$ ). Os provetes produzidos para este tipo de ensaio foram provetes prismáticos de dimensões 100×100×400 mm<sup>3</sup>, estes foram carregados com o auxílio de um equipamento hidráulico específico (Figura 3.19).



Figura 3.19- Ensaio de fluência.

### **3.3.4 Propriedades de desempenho de durabilidade**

O desempenho dos betões relativamente à durabilidade refere-se à capacidade de o betão desempenhar a função que lhe é atribuída, durante o período de vida preconizado, resistindo às ações dos agentes agressivos do meio a que é exposto. Neste sentido, foram avaliados indicadores do nível de desempenho do betão, como: a resistência à penetração de cloretos, a resistividade elétrica, a resistência à carbonatação, a resistência à penetração de água por absorção capilar e por pressão. Os parâmetros, bem como os respetivos ensaios realizados, são descritos no presente capítulo. O esquema apresentado a seguir, na Figura 3.20, resume a estratégia definida para o estudo do desempenho dos betões em termos de durabilidade.

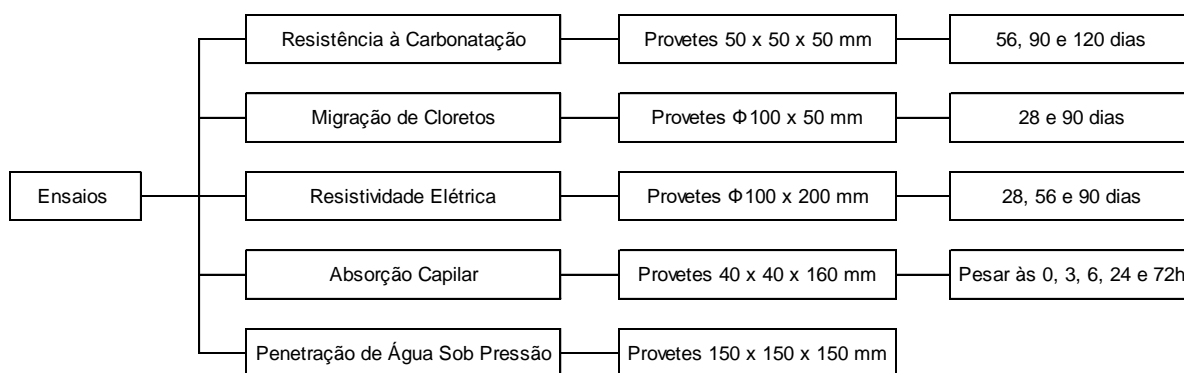


Figura 3.20- Esquema da estratégia adotada – Ensaio de durabilidade.

### 3.3.4.1 Resistência à carbonatação do betão

A carbonatação do betão é um dos principais fenómenos de degradação das estruturas de betão. A incorporação de materiais cimentícios complementares como adições ao cimento e parte substituta do mesmo, é uma estratégia que permite contornar grande parte do problema da carbonatação.

O ensaio de carbonatação acelerada consiste na exposição dos provetes, durante um período de termo estabelecido, a um ambiente controlado propício à carbonatação acelerada, isto é, a uma câmara com um ambiente de elevada concentração de  $\text{CO}_2$ . Posteriormente, os provetes são fraturados ao meio e é medida a profundidade de carbonatação nos provetes nos períodos estabelecidos (Figura 3.21). O ensaio foi executado recorrendo a provetes cúbicos de 50 mm.



Figura 3.21 – Ensaio de Carbonatação: a) aplicação de revestimento/pintura; b) câmara de carbonatação acelerada; c) profundidade de carbonatação.

Paralelamente à superfície da face exposta, desenvolve-se a frente de carbonatação; a profundidade de carbonatação a determinar corresponde à distância entre a superfície da face do provete e a linha da frente de carbonatação. Após a realização do ensaio, a zona carbonatada irá apresentar-se incolor, por outro lado, a zona não carbonatada, onde o pH do betão é superior a 8, apresentará uma coloração carmim.

### ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

Foram produzidos provetes numa quantidade que atendesse à necessidade de avaliar a carbonatação para diferentes períodos de exposição. Neste estudo foram considerados 2 provetes de cada mistura para cada período de exposição estabelecido. Os períodos de exposição definidos foram: 56, 90 e 120 dias, visto que se previam valores de profundidade de carbonatação muito reduzidos.

#### *3.3.4.2 Resistência à carbonatação após exposição a temperaturas elevadas*

No seguimento do ensaio descrito anteriormente, avaliou-se o comportamento das misturas selecionadas após exposição a diferentes patamares de temperatura. Estabeleceu-se que a exposição seria realizada aos 28 dias de idade, e os três patamares de temperatura definidos foram: 200°C, 400°C e 600°C. De acordo com a bibliografia, a exposição a temperaturas acima dos 600°C torna a recuperação destes betões inviável, desta forma, considerou-se relevante avaliar o efeito da temperatura até 600°C, não sendo, pelas razões descritas, producente avaliar a durabilidade dos UHPC acima destes valores.

Os provetes produzidos para este ensaio foram provetes cúbicos de 50 mm que, depois de expostos a temperaturas elevadas foram impermeabilizados e colocados na câmara de carbonatação acelerada. Os períodos de exposição na câmara foram definidos para: 56, 90 e 120 dias.

#### *3.3.4.3 Resistência à penetração de cloretos*

O dióxido de carbono presente no betão atua como catalisador para a redução do pH do mesmo, tornando este meio mais propício para a penetração dos iões cloreto. A resistência de um material à penetração dos cloretos pode ser avaliada através da determinação do coeficiente de difusão dos cloretos, sendo tanto maior a resistência quanto menor o coeficiente. Este parâmetro pode ser obtido através do ensaio de migração de cloretos realizado em regime não estacionário, Figura 3.22 e Figura 3.23. Para a realização do ensaio, seguiram-se os procedimentos preconizados na especificação do LNEC E463 (2004), que, por sua vez, tem por base o método descrito na norma NT Build 492 (1999).

Este ensaio pode ser realizado em betões novos ou em desenvolvimento, ou até mesmo em betões extraídos de uma obra já com alguns anos de vida. O ensaio consiste na aplicação, de um potencial elétrico, entre os topos do provete, que irá forçar, por migração, o transporte dos iões de cloreto através do betão. Posteriormente, os provetes são fraturados ao meio e pulverizados em ambas as secções de fratura obtidas com uma solução de nitrato de prata. Na zona do betão onde se verifica a difusão dos iões de cloreto, ocorre uma reação química e é formado um precipitado de cloreto de prata de cor branca/prateada que é facilmente perceptível, permitindo, deste modo, medir a profundidade de penetração dos cloretos.

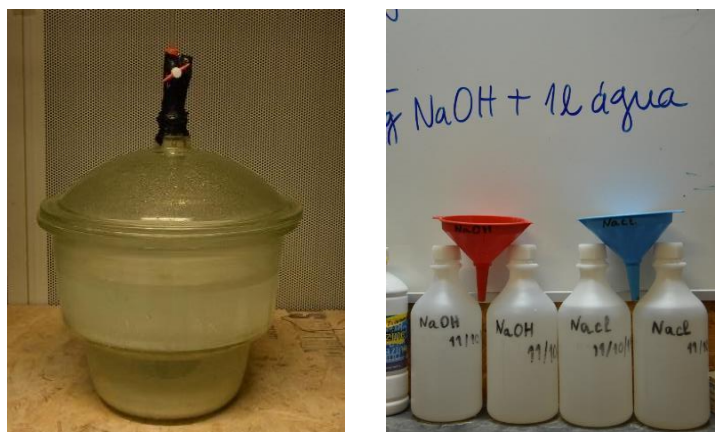


Figura 3.22 – Preparação do ensaio de difusão de cloretos: excicador e soluções.

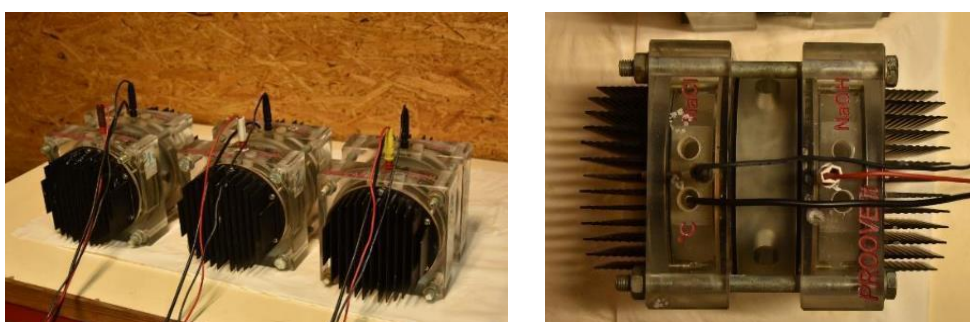


Figura 3.23 – Ensaio de Migração de iões cloreto.

O coeficiente de difusão dos cloretos é determinado a partir da Equação (10), com base nos valores obtidos anteriormente.

$$D = \frac{0,0239 (273 + T)L}{2} * \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (10)$$

Em que:

D é o coeficiente de difusão no estado estacionário ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ); U corresponde ao valor absoluto da voltagem aplicada (V); T ao valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ( $^{\circ}\text{C}$ ); L representa a espessura do provete (mm);  $x_d$  é o valor médio da profundidade de penetração (mm) e; t diz respeito à duração do ensaio (horas).

O ensaio foi realizado recorrendo ao sistema *PROOVE* *it*, utilizando três células em simultâneo, para caracterizar cada mistura. Estes elementos possuem abas de refrigeração de forma a manter uma temperatura aproximadamente constante ao longo do ensaio, no entanto, ocorre sempre um diferencial que é registado e utilizado no processo de cálculo. Para o presente ensaio produziram-se provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. A profundidade do precipitado branco/prateado é medida de acordo com a representação apresentada na Figura 3.24.

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas

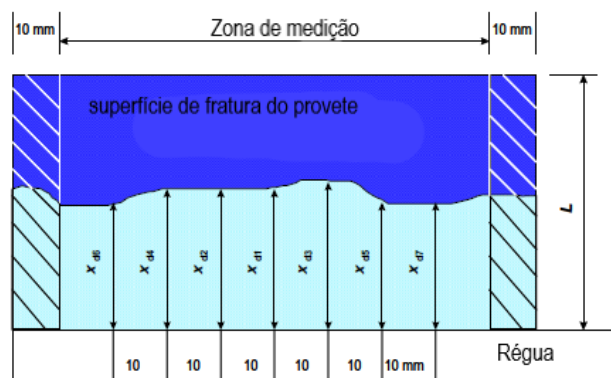


Figura 3.24 – Imagem representativa do método de medição da profundidade dos cloretos.

Consideraram-se 3 provetes para cada período de exposição estabelecido tendo estes sido definidos para: 28 e 90 dias. As misturas ensaiadas correspondem às selecionadas anteriormente (M0, M3 e M4), e ainda a mistura M9, face à necessidade de substituição da adição de cinzas por sílica de fumo na produção do protótipo do projeto.

O equipamento utilizado foi programado para indicar, em cada instante, os valores da intensidade da corrente e da temperatura ao longo do ensaio, bem como o valor absoluto da voltagem aplicada e a duração do ensaio.

Após a realização do ensaio, os provetes foram divididos ao meio e pulverizados com a solução de nitrato de prata, como o procedimento indica. Na presença de cloretos, a solução reage quimicamente formando um precipitado de cloreto de prata de cor branca/prateada visível a olho nu.

### 3.3.4.4 Resistência à penetração de cloretos após exposição a temperaturas elevadas

No seguimento do ensaio descrito anteriormente, analisou-se o comportamento das misturas selecionadas após exposição a diferentes patamares de temperatura. A exposição a temperaturas elevadas foi realizada aos 28 dias de idade, e os patamares de temperatura definidos foram: 200°C, 300°C, 400°C e 500°C. Estabeleceu-se o limite de 500°C pois, acima desta temperatura, há uma perda de resistência significativa. Por outro lado, os provetes sofrem *spalling* para temperaturas iguais ou superiores a 500°C, como a literatura já fazia prever (Dias, A. et al., 2020). O protocolo de exposição foi efetuado com uma rampa de aquecimento em mufla de laboratório, com uma taxa de 3 a 5 °C/min, seguida de patamar de 20 min à temperatura alvo, e arrefecimento natural até à temperatura ambiente. Posteriormente, procedeu-se ao ensaio de determinação do coeficiente de penetração dos cloretos, de forma igual à descrita no capítulo anterior.

Os provetes produzidos para este ensaio foram provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura.

#### 3.3.4.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é um parâmetro que, além da facilidade de execução e baixo custo, permite obter boas correlações com outros ensaio como, por exemplo, com a resistência à penetração de cloretos (A.Ardani & Tanesi, 2012), o que faz deste um ensaio prático para analisar a durabilidade do betão.

A execução do ensaio teve em consideração o Método de Resistividade Superficial (SR), seguindo a norma americana AASHTO T 358 (2015), definida para estimar a penetração dos cloretos. Para a realização deste ensaio recorreu-se a um equipamento específico para este fim, o Resipod da Proceq (Figura 3.25)- uma sonda Wenner de 4 pontos projetada para medir a resistividade elétrica do betão num ensaio não destrutivo.



Figura 3.25 – Ensaio de resistividade elétrica: equipamento e procedimento de ensaio, respetivamente.

Considera-se de bom grado aplicar o método em provetes cilíndricos com 100 ou 150 mm de diâmetro e com um comprimento nominal de 200 ou 300 mm, com uma dimensão máxima de agregado admitida de 38 mm. A realização do ensaio ocorre a partir da aplicação de uma corrente alternada nos pontos extremos da sonda, gerando assim linhas de fluxo de corrente, a diferença de potencial é medida nos pontos internos.

Note-se que, a avaliação da potencial resistência à penetração de cloretos com base na resistividade elétrica não deve ser aplicada a betões com fibras, uma vez que as fibras interferem significativamente na condutividade elétrica, alterando os resultados e, conseqüentemente, a sua interpretação.

#### 3.3.4.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade diz corresponde ao fenómeno de entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares, que resultam da diferença de pressão entre a superfície livre da água, no exterior do betão, e a superfície nos poros capilares. Verifica-se que a intensidade destas forças depende do diâmetro capilar dos elementos (Zhou et al., 2019). Este parâmetro é obtido a partir da divisão do

### ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

aumento de peso ( $M_i - M_0$ ) pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água, este parâmetro expressa-se em  $\text{kg}/\text{m}^2$  e calcula-se através da Equação (11) :

$$S_a = \frac{M_i - M_0}{S} \quad (11)$$

O parâmetro  $S_a$  representa a quantidade de água absorvida, por unidade de superfície, no instante  $t_i$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ),  $M_i$  corresponde à massa do provete ao fim do tempo  $t_i$  (kg),  $M_0$  corresponde à massa do provete seco, no instante  $t_0$  (kg) e  $S$  é a secção do provete em contacto com água ( $\text{m}^2$ ).

Os provetes produzidos para este ensaio foram provetes de dimensões  $50 \times 50 \times 150 \text{ mm}^3$ . Os resultados analisados correspondem a um valor médio dos valores recolhidos para os 2 provetes ensaiados para cada mistura.

A execução deste ensaio seguiu os procedimentos preconizados na especificação LNEC E393 (1993).

#### *3.3.4.7 Penetração da água sob pressão*

O ensaio de penetração de água sob pressão permite avaliar a resistência de um provete cúbico, neste caso de aresta de 150 mm, à penetração de água, sob ação de uma pressão externa.

Os procedimentos seguidos para a execução deste ensaio são os definidos na norma NP EN 12390-8 (2019), na Figura 3.26 pode observar-se o sistema de ensaio.



Figura 3.26 – Configuração do ensaio de penetração de água sob pressão.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 Estado Fresco

#### 4.1.1 Massa volúmica

Os resultados deste parâmetro são apresentados à frente, na Figura 4.1. As variações registadas entre as várias misturas devem-se essencialmente ao facto de o teor de ar ser superior ao previsto, em particular na mistura M4B, fator que conduz à redução da massa volúmica.

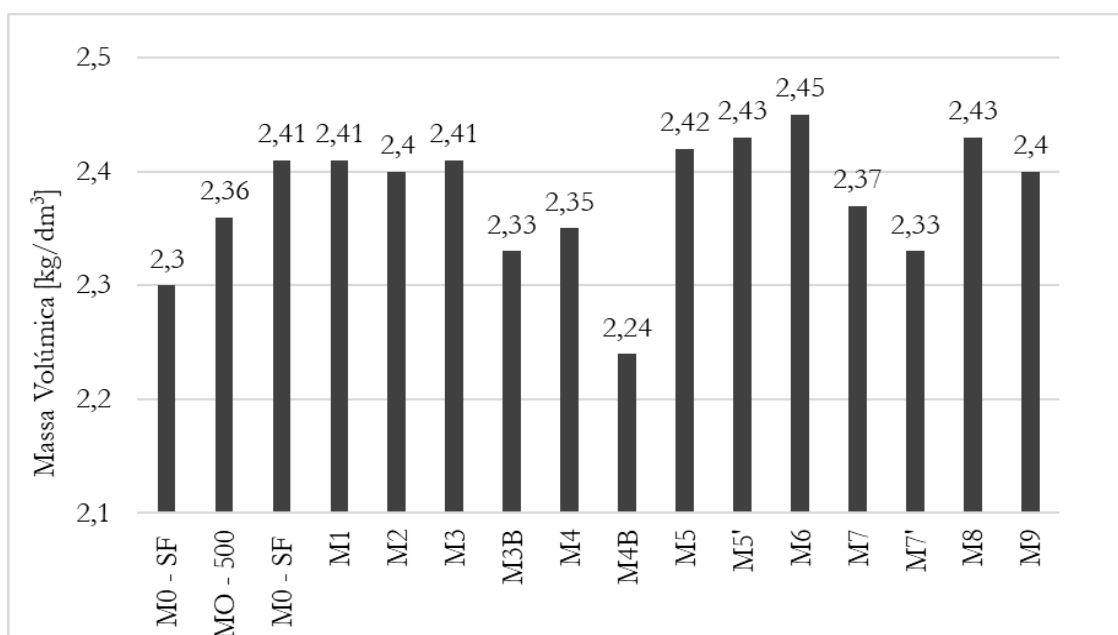


Figura 4.1- Caracterização da Massa Volúmica.

#### 4.1.2 Teor de ar

Na Figura 4.2 estão apresentados os resultados da caracterização do teor de ar. Pode verificar-se o registo de desvios entre o valor previsto e o valor medido em algumas misturas. Apesar do aumento da percentagem de superplastificante, com o objetivo de atingir um nível similar de trabalhabilidade e fluidez entre as misturas, verificou-se que algumas das misturas tiveram dificuldade em libertar o ar. Destacam-se a maioria das misturas com teor de ar entre abaixo de 2,0%; algumas misturas excedem ligeiramente 2,0%, o que afetou a capacidade de empacotamento de partículas em certas misturas. A mistura com maior dosagem de macro fibras de aço, a M3B, apresentou uma percentagem de teor de ar superior à média.

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas

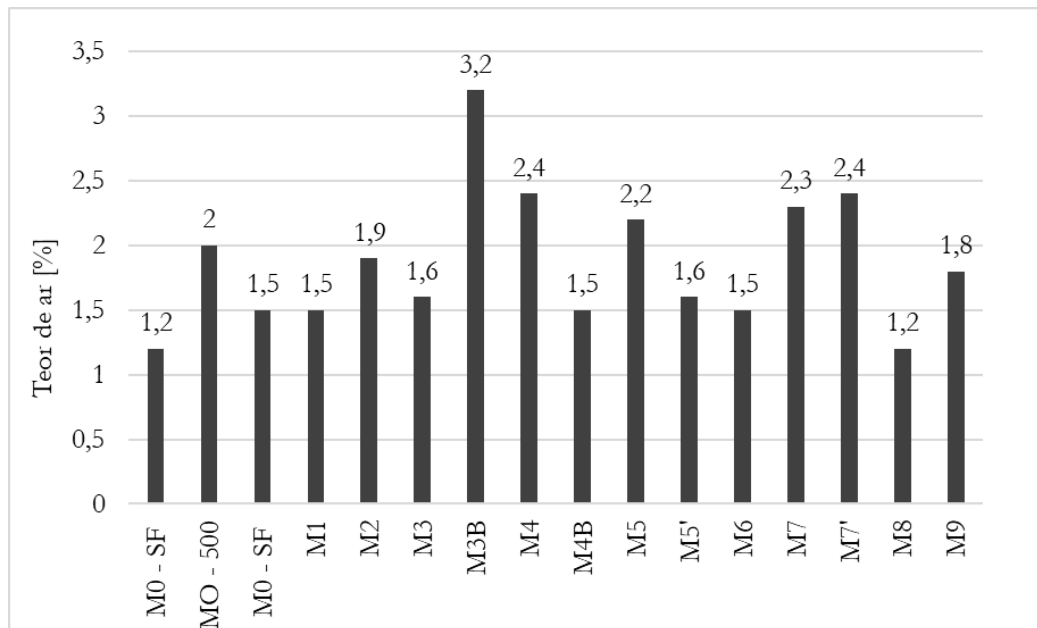


Figura 4.2- Caracterização do Teor de ar.

### 4.1.3 Espalhamento

Os resultados obtidos para a caracterização do espalhamento são apresentados à frente na Figura 4.3. O superplastificante incorporado foi ajustado de modo a aproximar o espalhamento a um valor próximo de 30 cm. Contudo, em algumas misturas, não foi possível atingir esse valor, pois havia risco de ocorrência de segregação caso fosse utilizada uma quantidade maior do que o desejável de adjuvante. Por outro lado, e em particular nas misturas M4, registou-se também uma limitação do espalhamento devido à dificuldade em escoar as fibras.

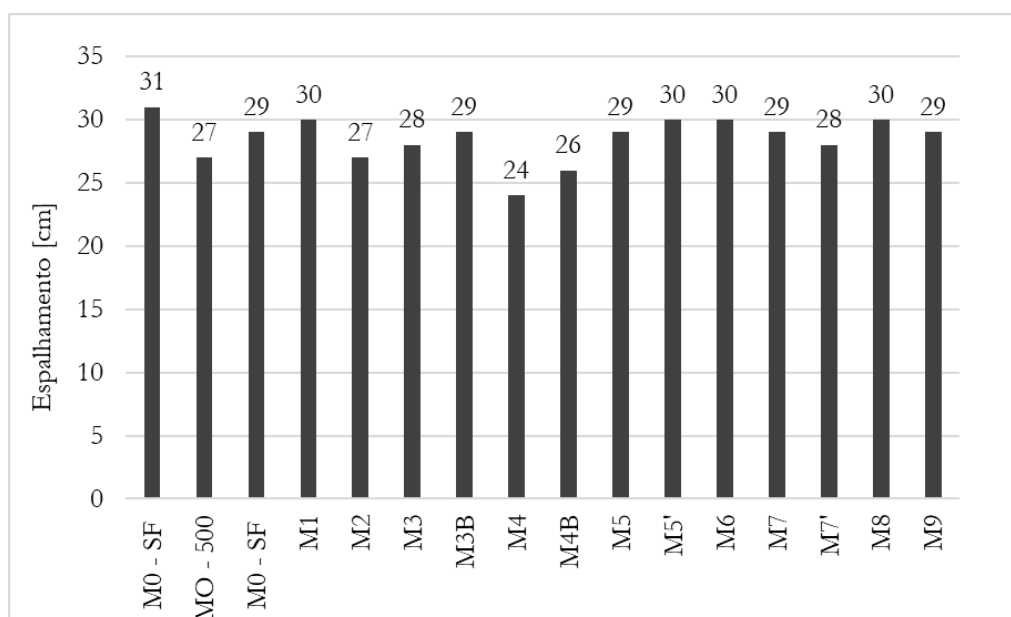


Figura 4.3- Caracterização do Espalhamento.

#### 4.1.4 Viscosidade

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.1, onde se verifica que a mistura M0, com apenas microfibras teve um bom escoamento, com um tempo T de 41s. As restantes misturas (M3 e M4), apesar de serem naturalmente fluidas, tinham na sua composição uma combinação híbrida de macro fibras e microfibras, e verificou-se que as macro fibras dificultaram a passagem da mistura pelo funil, ou seja, as fibras rígidas de aço tendem a entupir ou atrasar o escoamento, em particular na mistura M3. Para este caso é aconselhado não o uso do mini Funil V, mas sim o Funil V, como descrito na norma NP EN 12350-9 (2010).

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio do mini Funil V para as misturas seleccionadas.

Mistura	M0	M3	M4
Tempo (s)	41	-	-

## 4.2 Propriedades no estado endurecido

### 4.2.1 Propriedades mecânicas

De forma a avaliar o desempenho global das diversas composições de eco-UHPC, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por flexão, resistência à tração direta, módulo de elasticidade, energia de fratura e tensão residual. Com base nos resultados obtidos, foram elaboradas as tabelas: Tabela 4.2, Tabela 4.3, Tabela 4.4, Tabela 4.5, Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8.

Tabela 4.2 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à compressão.

Mistura	$f_{ctm\ 28}$ [MPa]	$f_{ctm\ 56}$ [MPa]	$f_{ctm\ 90}$ [MPa]	$f_{ctm\ 150}$ [MPa]
M0	135,9	149,8	154,2	162,8
M0-SF	104,6	113,3	123,9	142,6
M0-500	126,6	135,9	147,3	167,4
M1	122,9	128,1	134,4	154,4
M2	111,7	123,6	138,1	158,5
M3	131,4	145,9	152,2	161,7
M3-B	130,9	129,9	128,7	129,2
M4	108,5	124,2	128,5	148,1
M4-B	88,2	93,9	93,3	92,1
M5	131,2	134,8	138,1	164,8
M6	108,0	113,2	118,5	132,5
M7	125,5	131,1	137,8	164,7
M8	105,1	122,4	143,5	154,8
M9	125,3	132,4	141,0	156,3

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

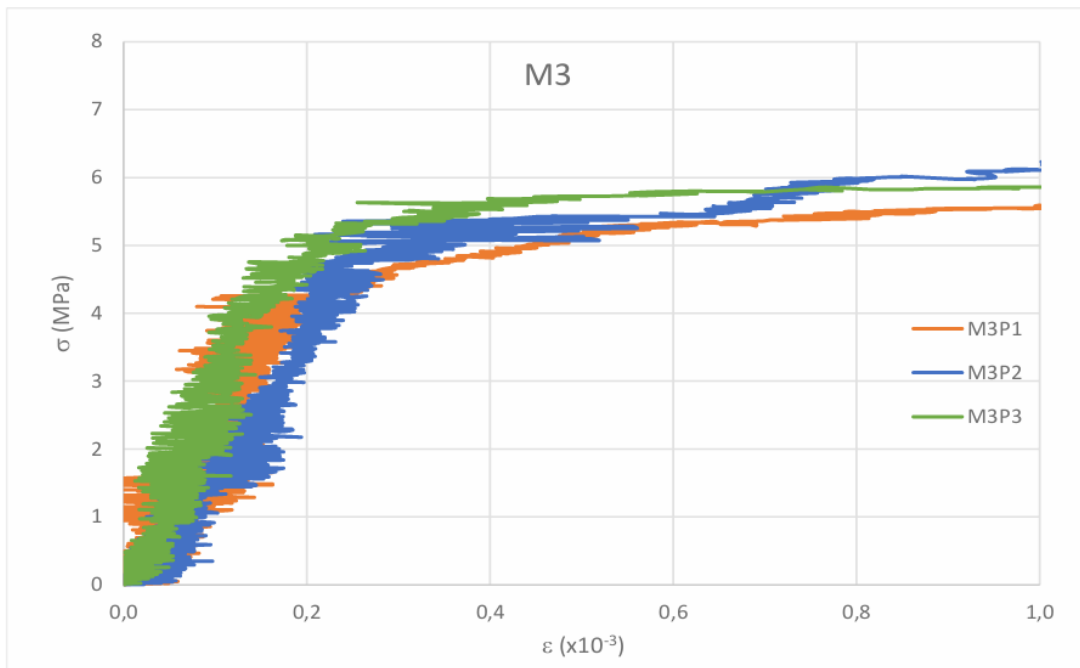
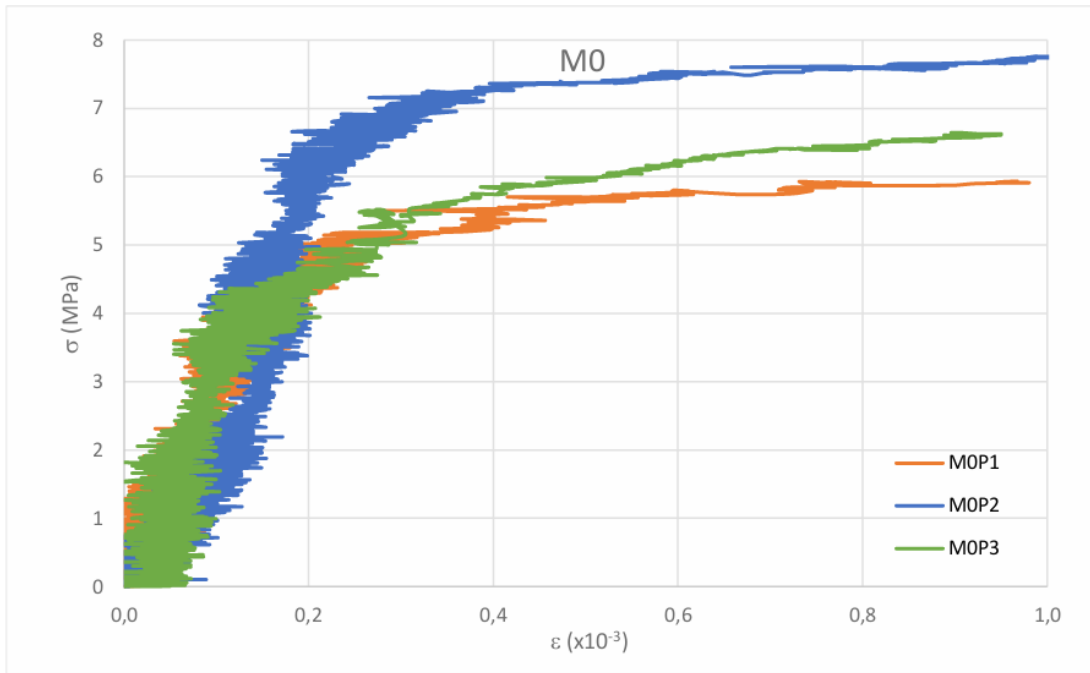
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade, aos 56 dias.

Mistura	E [GPa]
M0	40,0
M0-SF	34,6
M0-500	33,1
M1	37,7
M2	40,6
M3	34,6
M3-B	34,4
M4	35,8
M4-B	28,0
M5	40,6
M6	37,5
M7	37,3
M8	34,0
M9	37,9

Tabela 4.4 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à tração por flexão, aos 150 dias.

Mistura	$f_{ctm,f 28}$ [MPa]	$f_{ctm,f 56}$ [MPa]	$f_{ctm,f 90}$ [MPa]	$f_{ctm,f 150}$ [MPa]
M0	37,3	38,0	42,7	41,9
M0-SF	9,3	12,6	12,4	13,1
M0-500	35,9	37,0	38,3	39,5
M1	41,0	45,1	50,1	50,7
M2	30,7	33,1	35,2	38,9
M3	43,1	45,4	45,1	46,2
M3-B	46,8	46,6	47,4	47,9
M4	31,0	31,4	32,0	34,3
M4-B	14,1	16,7	16,2	15,4
M5	32,0	33,2	34,6	35,2
M6	35,0	34,9	34,1	34,9
M7	43,3	44,0	44,7	44,8
M8	26,6	30,9	34,7	37,3
M9	33,5	35,8	36,3	37,0

A rigidez das misturas em análise é semelhante, como demonstram as curvas de tração-extensão, Tabela 4.5. Os módulos de elasticidade médios em tração correspondem a 28 GPa, valores inferiores aos caracterizados em compressão em cerca de 25%.



**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

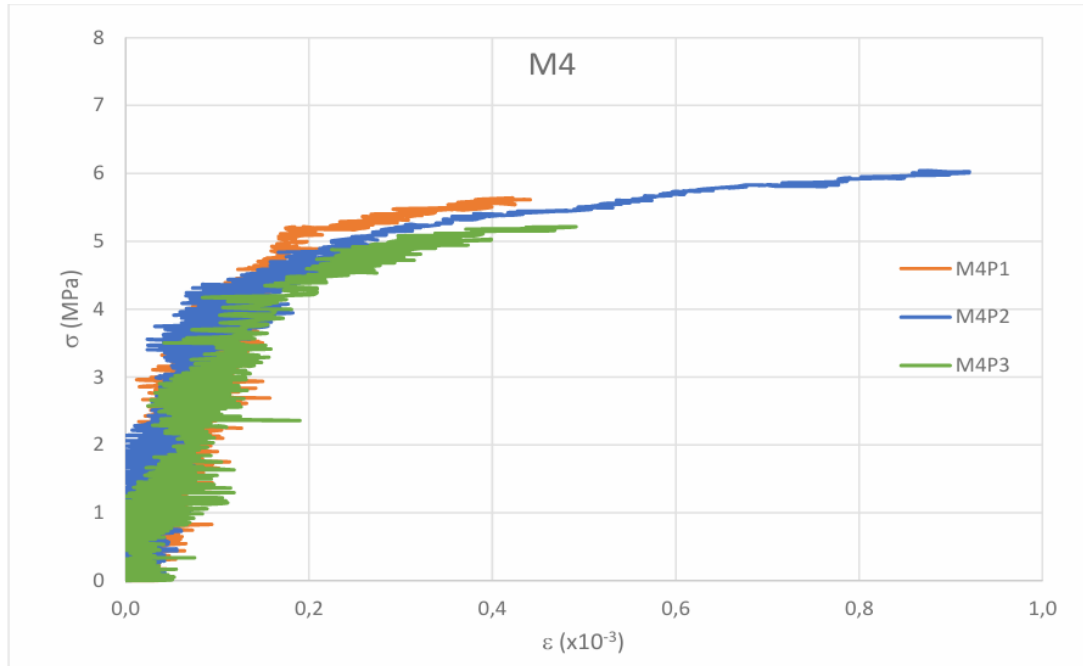


Figura 4.4- Curvas tensão-extensão do ensaio de tração direta nos provetes M0, M3 e M4.

Tabela 4.5 – Resultados dos valores máximos de tensão, do ensaio de flexão pura.

Mistura	Tensão [MPa]
M0	36,9
M0-SF	27,2
M0-500	9,6
M1	39,1
M2	31,5
M3	31,4
M3-B	33,2
M4	19,7
M4-B	8,9
M5	29,4
M6	24,1
M7	28,5
M8	21,3

Na Tabela 4.6 podem ser observados os valores das resistências mecânicas à tração por compressão diametral para todas as misturas aos 150 dias de idade do betão.

Tabela 4.6 – Resultados dos valores médios das resistências mecânicas à tração por flexão, aos 150 dias.

Mistura	$f_{ct}$ [MPa]
M0	15,8
M0-SF	10,4
M0-500	4,6
M1	14,9
M2	15,3
M3	12,1
M3-B	10,0
M4	12,5
M4-B	5,2
M5	12,0
M6	10,6
M7	14,8
M8	9,7
M9	13,4

Na caracterização mais aprofundada das misturas M0, M3 e M4, realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos valores das resistências mecânicas à tração por compressão diametral, série betões caracterizados.

Mistura	$f_{ct}$ [MPa]
M0	11,1
M3	12,0
M4	8,4

Através dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão simples, foi possível calcular a energia de fratura das misturas (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Resultados dos valores da Energia de Fratura.

Mistura	Energia de Fratura [MPa]
M0	17,9
M3	24,8
M4	16,9

Embora todas as misturas tenham sido formuladas com parâmetros relevantes, as misturas M0, M3 e M4 foram selecionadas para efetuar uma avaliação mais específica de caracterização. A mistura M0, composta exclusivamente por microfibras metálicas, serviu como referência e evidenciou um equilíbrio satisfatório entre

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

resistência e estabilidade dimensional. A mistura M3, que incorpora macro fibras metálicas, mostrou-se particularmente vantajosa, registando um aumento notório na energia de fratura e um comportamento pós-fendilhação melhorado, o que é crucial para a resistência à tração e para a transferência eficaz de tensões na matriz. Por fim, a mistura M4, que utiliza uma solução híbrida (combinação de microfibras metálicas com fibras poliméricas), apresentou um perfil equilibrado, combinando boa resistência mecânica com uma ductilidade adequada, apesar de evidenciar uma ligeira tendência para um aumento da retração em comparação com a mistura M0.

A decisão de avançar na fase de caracterização das propriedades diferidas e de durabilidade apenas com as misturas M0, M3 e M4 deve-se à sua representatividade das variáveis críticas que afetam o desempenho a longo prazo do UHPC. Estas três composições capturam as principais variações introduzidas – desde a referência convencional (M0), passando pela otimização do reforço com macrofibras (M3), até à solução híbrida (M4) – permitindo uma análise focada e aprofundada dos parâmetros diferidos (retração, fluência e energia de fratura) e dos indicadores de durabilidade (absorção capilar, profundidade de carbonatação e coeficiente de difusão dos cloretos). Esta abordagem evita redundâncias e concentra os esforços analíticos nos sistemas com maior potencial para aplicações em cascas pré-fabricadas, contribuindo para o avanço das soluções sustentáveis no setor da construção civil.

A análise dos resultados dos ensaios anteriormente referidos, para a caracterização mecânica das misturas, foi realizada de forma aprofundada em Rodrigues, T. (2023).

### **4.2.2 Propriedades diferidas**

#### *4.2.2.1 Retração: Resultados da retração dos provetes de 100x100x500 mm<sup>3</sup>*

Ao analisar a Figura 6.69, pode constatar-se que o desenvolvimento dos valores de retração é mais acentuado nas idades iniciais dos provetes, período em que ocorre a maior parte da retração dos provetes, parte por secagem e parte autógena. Nestas idades iniciais, as retrações são semelhantes entre as várias misturas, começando a divergir em torno dos 14 dias de idade e tendendo a estabilizar por volta dos 56 dias. A mistura M4 apresenta valores maiores de retração, cerca de 12% superiores à mistura M0. A mistura M3, por outro lado, apresenta menor retração, cerca de 5% inferior à mistura de referência M0. A principal diferença entre as duas composições reside nos tipos de fibras incorporadas: a mistura M3 micro e macro fibras metálicas, enquanto a mistura M4 combina microfibras metálicas e macro fibras poliméricas. Desta forma, podemos concluir que o tipo de fibras influencia o desenvolvimento da retração, sendo que as fibras metálicas proporcionam um controlo melhor da retração dos provetes relativamente às fibras poliméricas, facto já esperado face à maior rigidez das primeiras.

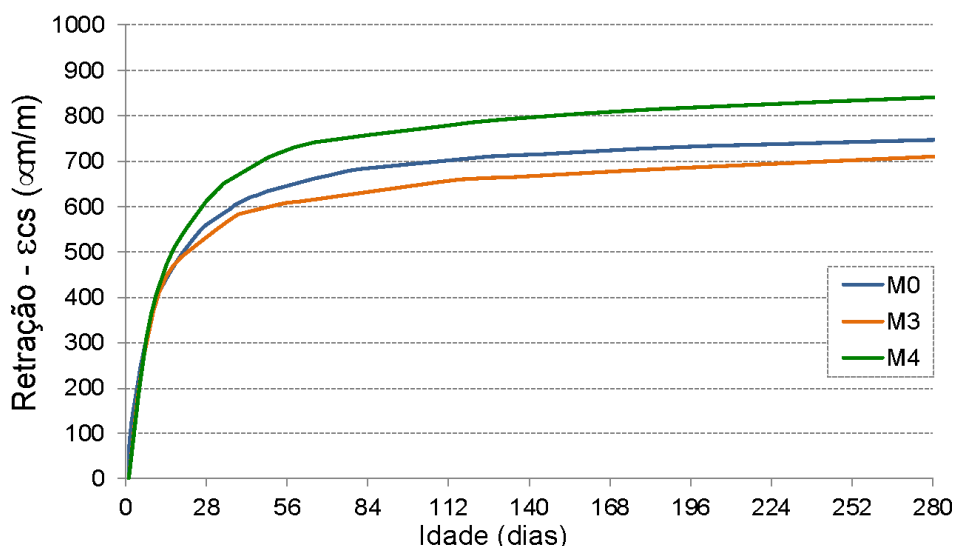


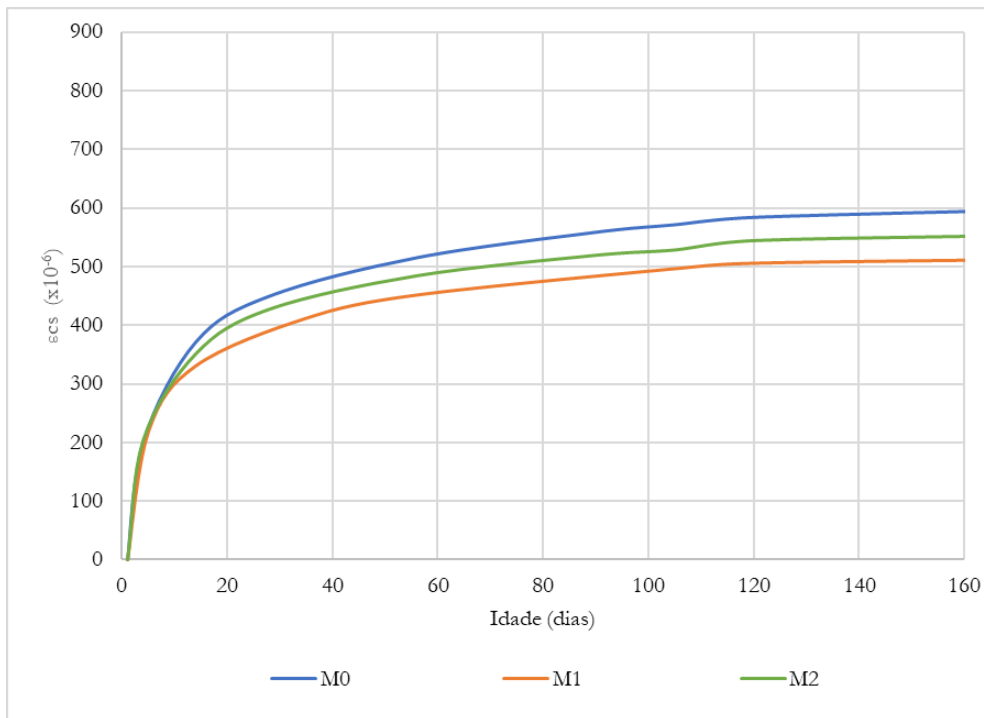
Figura 4.5- Evolução da retração das misturas M0, M3 e M4 ao longo do tempo.

#### 4.2.2.2 Retração: Resultados de retração dos provetes de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$

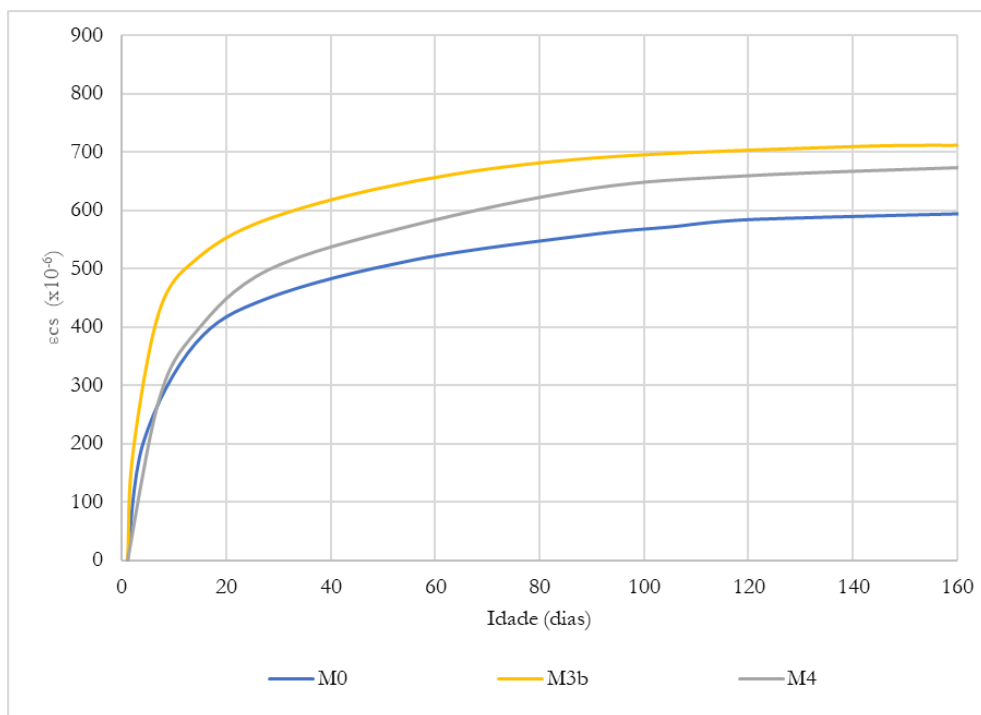
Através da análise dos resultados de retração obtidos na Figura 4.6, em provetes de dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , pode verificar-se que a evolução da retração é similar em termos de forma da curva. Embora, em algumas misturas, se verifique um desenvolvimento de retração mais acentuado em idades mais jovens, todas as misturas tendem a estabilizar depois dos 90 dias de idade, o que é comum neste tipo de caracterização. É de destacar que na mistura de referência, M0, os valores de deformação estabilizam em cerca de  $600 \mu\text{m/m}$ . Na série 1, não se constata que a dimensão dos agregados influencie a amplitude da curva de retração, situando-se os valores, após estabilização, numa gama de valores entre 500 e  $600 \mu\text{m/m}$ . Na série 2, a mistura M3B apresenta valores de retração mais acentuada nas idades jovens e estabiliza mais cedo, mas ambas as misturas com macro fibras, de aço (M3B) ou poliméricas (M4), desenvolvem uma retração superior à da mistura referência M0, em cerca de 12% e 17%, respetivamente. Esta influência poderá ser consequência do aumento de teor de ar originado pela adição das macro fibras às misturas. Na série 3 não se verifica uma variação significativa entre as diferentes composições, sendo que os valores de retração se situam entre 600 e  $670 \mu\text{m/m}$ . A mistura M6 é a que apresenta maiores valores de retração com a idade, tendo a adição de escória de forno elétrico (GEFS) uma influência significativa, aumentando a amplitude de retração em cerca de 47% em relação à mistura de referência M0. A presença da escória de forno elétrico na mistura M6 pode influenciar o processo de hidratação do betão e principalmente a compactidade e microestrutura da matriz, afetando assim a retração. Na mistura M7, podemos verificar que a retração evolui rapidamente em idade jovem, mas estabiliza cedo. Destaca-se que a relação água-cimento entre todas as misturas em estudo é de 0,35.

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

a) Série 1



b) Série 2



## c) Série 3

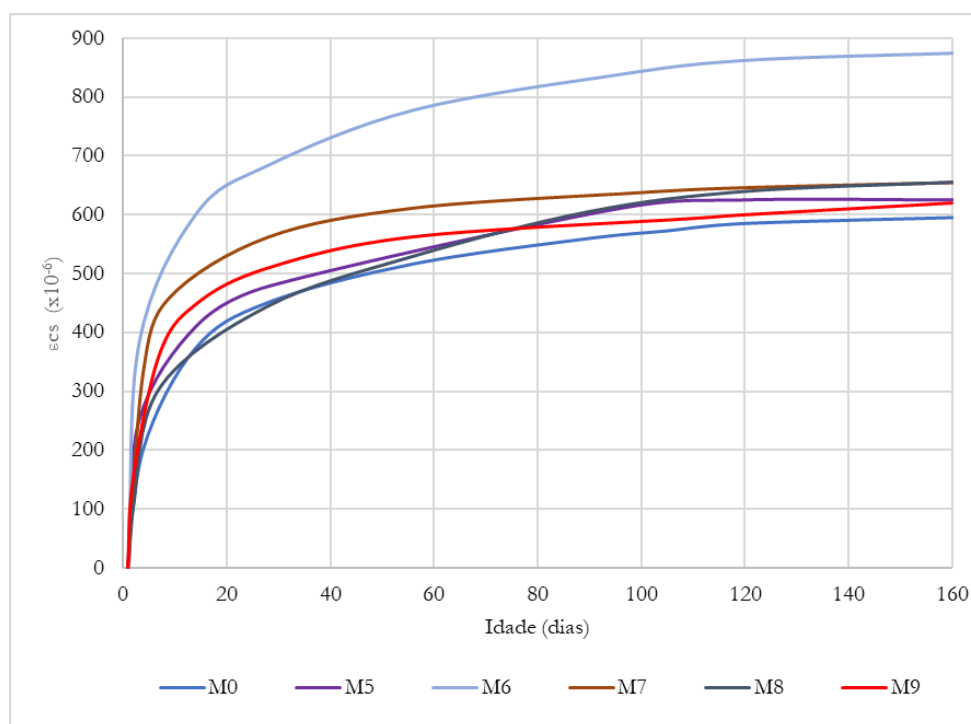


Figura 4.6 – a), b) e c) Evolução da retração das misturas nos provetes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  com a idade, por séries, para os provetes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

Comparando os resultados obtidos para as retrações nos provetes  $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$  com os provetes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , verificamos que os valores de retração nos provetes de maior dimensão são ligeiramente superiores aos correspondentes nos provetes de menor dimensão, nas misturas M0 e M4, cerca de 13%, embora seja habitual registar-se o contrário. Este resultado pode ser justificado pelo facto de a retração total em misturas de UHPC ser essencialmente dominada pela componente de retração autógena, sendo a componente de secagem, geralmente afetada pela dimensão do elemento, frequentemente negligenciável, essencialmente pela reduzida percentagem de teor de ar das misturas, associada a reduzidos rácios A/C (Sun et al., 2022).

#### 4.2.2.3 Fluência

Na Figura 4.7 é apresentada a evolução do comportamento de fluência ao longo do tempo para as várias misturas. É possível verificar um forte desenvolvimento de deformação nos primeiros dias, com tendência a estabilizar a partir dos 28 dias de ensaio, ou seja, aos 56 dias de idade das misturas. A mistura de referência, M0, apresenta menores valores do coeficiente de fluência, comparativamente às misturas M3 e M4. Estas últimas têm resistências à compressão inferiores à da mistura M0 e ainda uma compactidade menor, provocada pela maior percentagem de teor de ar, resultando numa matriz com menor resistência à deformação viscoelástica, em cerca de 4 e 10%, para M3 e M4, respetivamente, relativamente à mistura M0. A mistura M4, com macro fibras poliméricas, apresenta uma menor resistência e rigidez,

## ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

demonstrando maior deformabilidade por fluência em relação à mistura M3, que incorpora macro fibras metálicas.

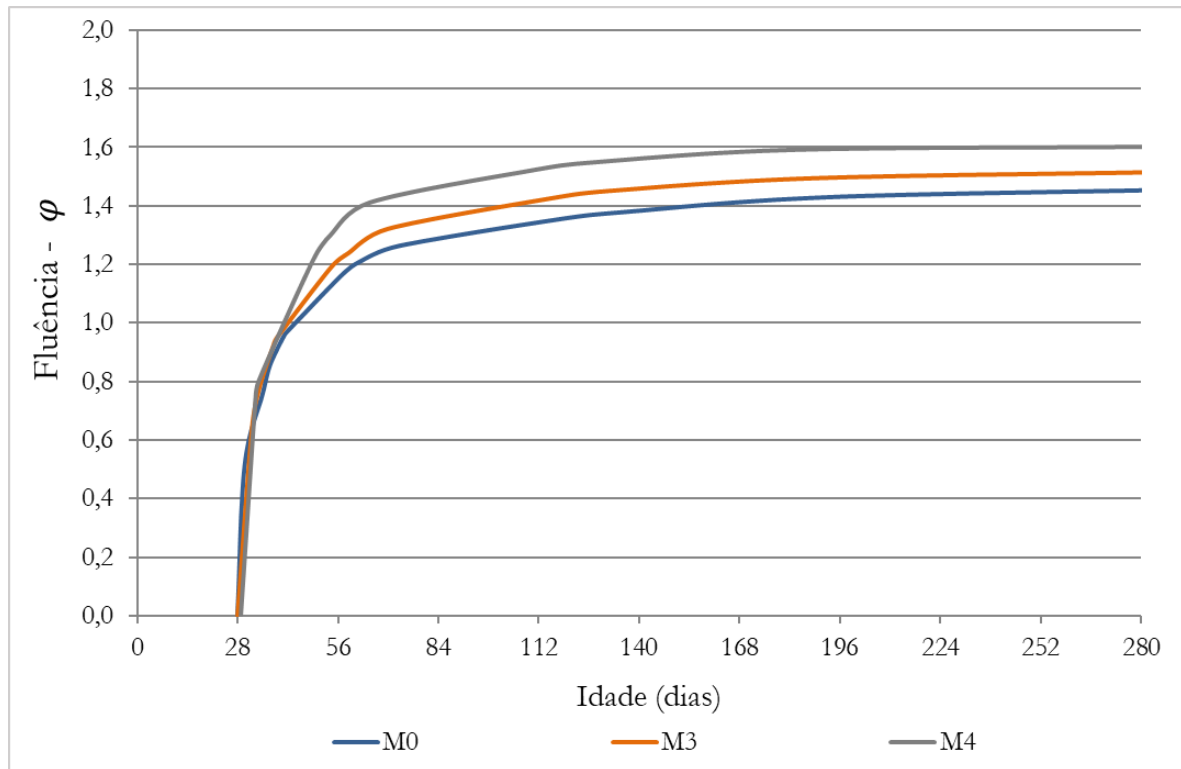


Figura 4.7 – Evolução da fluência das misturas M0, M3 e M4 ao longo do tempo.

### **4.3 Desempenho em termos de Durabilidade**

A durabilidade do betão está relacionada, principalmente, com a sua capacidade de resistir ao ataque de agentes agressivos. Esta capacidade depende essencialmente da estrutura interna do betão, sobretudo da matriz ligante, uma vez que os agregados utilizados são inertes cuja porosidade aberta é reduzida. A durabilidade das estruturas de betão depende do desenvolvimento de mecanismos de deterioração, normalmente associados à penetração de agentes agressivos provenientes do ambiente. De forma a caracterizar o desempenho do betão em termos de durabilidade, são realizados ensaios que nos permitem obter indicadores de desempenho do betão, como a resistência à carbonatação, resistência à penetração dos cloretos, resistividade elétrica e a absorção de água por capilaridade.

#### **4.3.1 Resistência à carbonatação do betão**

Os resultados obtidos com o ensaio de carbonatação acelerada, para as misturas selecionadas (M0, M3, M4 e M9), em termos de profundidade média de carbonatação,  $C$ , foi nula para em todos os períodos de exposição analisados (56, 90 e 120 dias). Este resultado é consequência do elevado grau de empacotamento da matriz, associada a uma dosagem de cimento significativa, embora

consideravelmente reduzida para um UHPC tradicional. Além da redução da quantidade de cimento na composição das misturas em estudo, e da respetiva substituição por outro tipo de adições naturais, nomeadamente cinzas volantes, sílica de fumo ou outros materiais pozzolânicos, não se verificaram indícios de carbonatação. A redução da permeabilidade do betão da difusão do CO<sub>2</sub>, consequentes do aumento da sua compacidade (densificando a matriz), são resultado da dosagem significativa de cimento Portland (Houst et al. 1994). Desta forma, os resultados obtidos corroboram que as misturas desenvolvidas são altamente resistentes à carbonatação, mesmo em condições de propícias à ocorrência da mesma.

#### 4.3.2 Resistência à carbonatação do betão após exposição a temperaturas elevadas

De forma análoga ao ensaio descrito no capítulo anterior, foi avaliado o comportamento das misturas selecionadas relativamente à sua resistência à carbonatação após a sua exposição a temperaturas elevadas. Neste sentido, definiu-se que a exposição seria realizada aos 28 dias de idade dos betões, e definiram-se três patamares de temperatura a avaliar: 200°C, 400°C e 600°C, além dos 20°C. A bibliografia defende que a recuperação de betões se torna inviável após a sua exposição a temperaturas acima dos 600°C pelo que se considerou relevante limitar a avaliação deste efeito da temperatura aos 600°C.

O protocolo de exposição proposto segue uma rampa de aquecimento em mufla de laboratório, com uma taxa de 3 a 5 °C/min para os provetes caracterizados, seguida de uma estabilização no respetivo patamar de ensaio durante 20 minutos, finalizando com um arrefecimento lento.

Para a realização deste ensaio, foram produzidos provetes cúbicos de 50 mm das misturas M0 e M4, unicamente com microfibras metálicas ou uma combinação híbrida de fibras, respetivamente. Após o procedimento de aquecimento e respetivo arrefecimento, os provetes foram impermeabilizados em todas as faces exceto a face de ensaio, e foram depois colocados na câmara de carbonatação acelerada. Os períodos de exposição na câmara foram definidos para: 28, 56 e 90 dias de idade. Na Figura 4.8 apresenta-se um provete cortado e ensaiado, onde é possível identificar a profundidade de carbonatação.

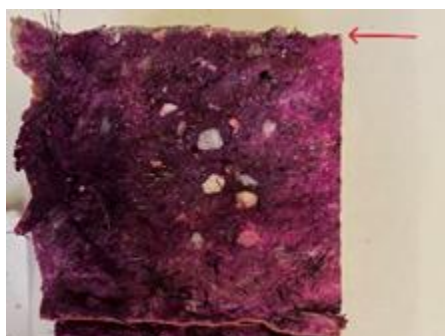


Figura 4.8 – Provetes de ensaio à carbonatação acelerada, profundidade de carbonatação em provete sujeito a exposição térmica.

### **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

Os UHPC são caracterizados por terem uma microestrutura muito compacta, uma baixa relação água/ligante e uma porosidade reduzida, fatores muito relevantes para o aumento da durabilidade, mas, por outro lado, podem representar uma vulnerabilidade em situações de exposição a temperaturas elevadas (Rodrigues, A. et al., 2024). Os valores verificados para a profundidade de penetração encontram-se dentro de uma escala de valores bastante reduzidos, no entanto, pode perceber-se que a exposição a elevadas temperaturas tem influência na resistência do betão à penetração de CO<sub>2</sub>, mesmo que numa escala reduzida. Quando comparados com os valores obtidos para betões expostos à temperatura ambiente ( $\pm 20^{\circ}\text{C}$ ), onde não se identificou qualquer profundidade de penetração, pode verificar-se a influência dos diferentes patamares de temperaturas de exposição. Os resultados obtidos para as misturas M0 e M4 são apresentados na Tabela 4.9 e na Figura 4.9.

Tabela 4.9 - Resultados da profundidade de carbonatação,  $C_{\text{depth}}$  (mm), após tratamento térmico aos 28 dias e exposição a carbonatação acelerada durante 28, 56 a 90 dias.

	C28				C56				C90			
	20°C	200°C	400°C	600°C	20°C	200°C	400°C	600°C	20°C	200°C	400°C	600°C
M0	0,0	0,0	0,5	2,0	0,0	0,0	0,5	3,0	0,0	1,0	1,0	-
	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,5	1,0	-
M4	0,0	0,0	0,5	1,0	0,0	0,0	0,5	2,0	0,0	1,0	1,5	2,5
	0,0	0,0	0,5	2,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,8	1,0	3,0

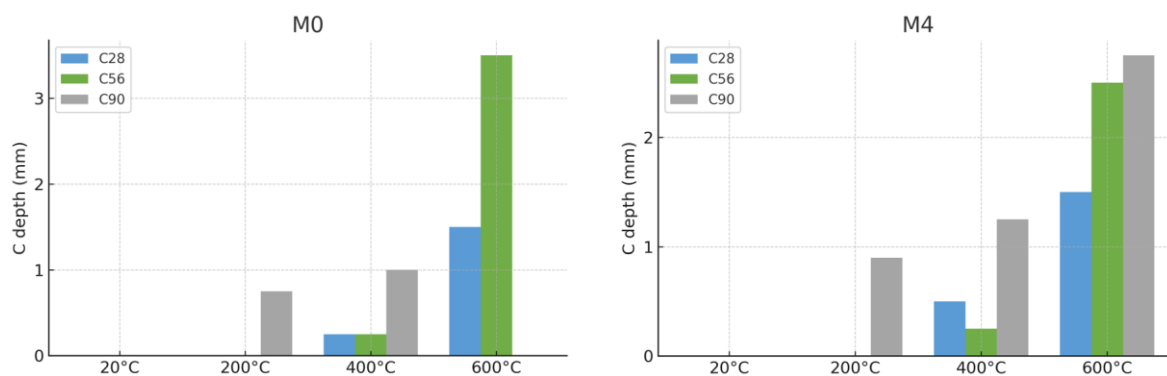


Figura 4.9 – Valores médios da profundidade de carbonatação,  $C_{\text{depth}}$  (mm), após tratamento térmico e exposição a carbonatação acelerada durante 28, 56 a 90 dias, para as misturas M0 e M4

É relevante referir que, durante o processo de aquecimento de alguns provetes, se verificaram roturas fortemente explosivas antes de se atingir a temperatura alvo, particularmente em temperaturas acima de 500 °C. Uma das razões que pode ter

desencadeado tal comportamento passa pela utilização de uma taxa de aquecimento elevada na fase ascendente. No entanto, considerando uma igual ocorrência para uma taxa mais baixa e, como referido na literatura (Biró, A. et al., 2021), a transformação do quartzo a temperaturas localizadas entre os 550 e os 600°C é acompanhada de um aumento de volume, que contribui para o aparecimento de fendas. A utilização de uma fração mais grossa de areia média de quartzo, 2/4mm, pode ser a origem deste tipo de ocorrência, uma vez que a mesma não ocorre habitualmente para composições de UHPC com areia fina 0/1mm (Robalo, K., 2022) incorporada. De forma a amenizar este problema, adotou-se um protocolo com um aquecimento mais lento, de 3 a 5 °C/min, mais adequado à dimensão dos provetes usados, evitando a existência de grandes diferenciais de temperatura.

#### 4.3.3 Resistência à penetração dos cloretos

Para o estudo da resistência à penetração dos cloretos, foram considerados 3 provetes para cada período de exposição, ou seja, aos 28 e 90 dias. As misturas de análise foram as selecionadas anteriormente, M0, M3 e M4, bem como a M9 – face à necessidade de substituição de cinzas por sílica de fumo na produção do protótipo do projeto. O equipamento utilizado foi programado para indicar, em cada instante, os valores da intensidade da corrente e da temperatura ao longo do ensaio, bem como o valor absoluto da voltagem aplicada e a duração do ensaio.

A Figura 4.10 representa a profundidade de penetração de cloretos, após a reação química descrita anteriormente.



Figura 4.10- Profundidade de penetração de cloretos.

A Tabela 4.10 e Figura 4.11 a apresentam os valores dos coeficientes de difusão de ião cloreto médios obtidos, em regime não estacionário,  $D_{médio}$ .

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas

Tabela 4.10 - Resultados obtidos no ensaio de migração dos cloretos aos 28 e 90 dias.

Mistura	D médio ( $\times 10^{-12}$ ) m <sup>2</sup> /s	
	28 dias	90 dias
M0-SF	0,85	0,50
M0	1,71	1,23
M3	1,26	0,96
M4	1,28	1,00
M9	1,56	1,14

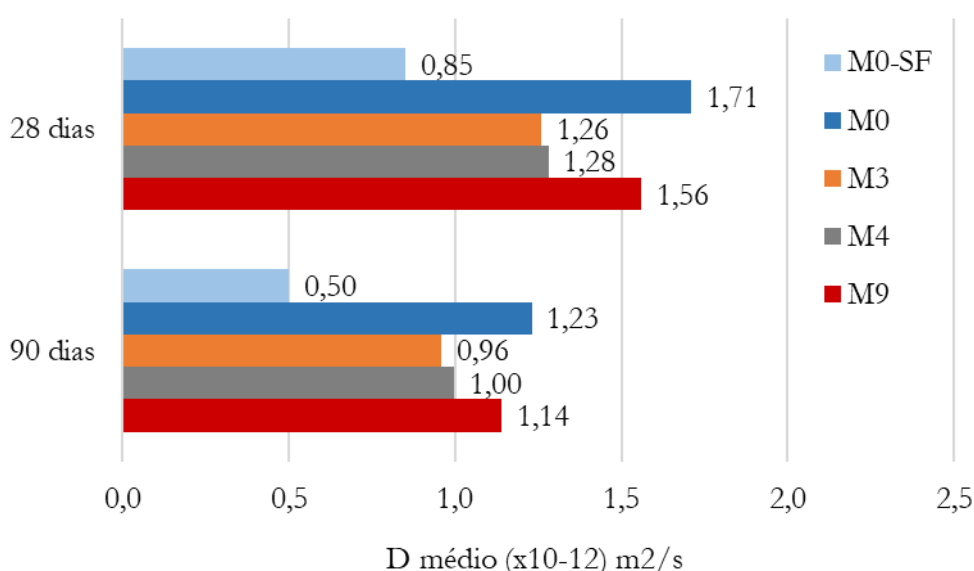


Figura 4.11- Resultados do ensaio de migração dos cloretos aos 28 e 90 dias..

Os coeficientes de difusão obtidos variaram entre os seguintes valores: de 0,85 a 1,71  $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, aos 28 dias e; de 0,50 a 1,23  $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, aos 90 dias.

Constatou-se que o coeficiente de difusão dos cloretos, diminui com o aumento da idade do betão, para todas as misturas, como resultado do efeito pozolânico verificado com a maturidade do betão e do refinamento e densificação da matriz ao longo do tempo. O menor coeficiente de difusão foi verificado para a mistura M0-SF, o que pode ser justificado pelo facto de, nas misturas sem fibras, o teor de ar tender a ser menor, compactando melhor e fechando mais a matriz. Os restantes betões apresentam valores de coeficiente de difusão ligeiramente superiores, embora numa gama semelhante de amplitudes. A relação A/C é constante para todas as misturas, à semelhança das adições utilizadas nas misturas M0, M3 e M4; apenas a

quantidade e tipo de fibras variam entre cada mistura. A mistura M0, M3 e M9, têm valores baixos e semelhantes entre si no que diz respeito ao teor de ar na matriz, a mistura M4 destaca-se e apresenta um teor de ar incorporado um pouco mais alto. Previa-se que o teor de ar na matriz tivesse uma maior influência nos resultados, o que não aconteceu. Ainda assim, o betão M0, regista o valor mais alto para o coeficiente de difusão quando comparado os betões M3, M4 e M9. Contudo, apesar das diferenças relativas referidas, estes valores constituem variações de valores muito reduzidos em termos absolutos. Os valores da mistura M9 são próximos dos de M0, ainda que inferiores.

O tratamento dos resultados foi avaliado considerando os limites apresentados por Luping (Luping et al., 2005) para a classificação dos betões em função do coeficiente de difusão de cloretos, D, medido através do ensaio de migração (Tabela 4.11). Os betões ensaiados foram classificados como betões de resistência muito boa quer para os 28 quer para os 90 dias de idade pois apresentam um D inferior a  $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , atendendo que este comportamento tende a melhorar em idades mais avançadas, face ao efeito pozolânico e à densificação da matriz.

Tabela 4.11 - Classificação em função do coeficiente de difusão de cloretos, D.

Classificação	Coeficiente de difusão de cloretos
Muito boa resistência	$D < 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Boa resistência	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \leq D < 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Resistência moderada	$8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \leq D < 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Não adequado para ambientes agressivos	$D > 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

#### 4.3.4 Resistência à penetração dos cloretos após exposição a temperaturas elevadas

A resistência dos UHPC à penetração de iões cloreto após exposição a altas temperaturas foi avaliada de forma semelhante ao procedimento utilizado para a carbonatação. Aos 28 dias de idade, os provetes cilíndricos (100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura) das misturas M0 e M4 foram expostos a temperaturas de 200 °C, 300 °C, 400 °C e 500 °C, com uma taxa de aquecimento de 3 a 5°C/min, seguido de um patamar de 20 minutos na temperatura alvo. Após o tratamento térmico, os provetes foram submetidos ao ensaio de migração dos cloretos, conforme o procedimento descrito anteriormente. A aparência dos provetes ensaiados, após a exposição aos diferentes patamares de temperatura definidos (200°C, 300°C, 400°C e 500°C), é apresentada na Figura 4.12.

### ***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

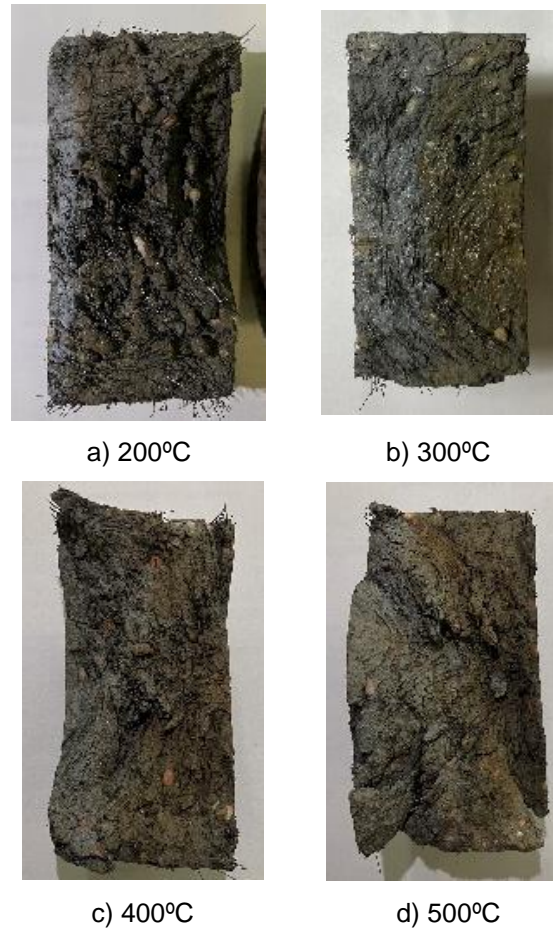


Figura 4.12- Provetes de ensaio à migração de cloretos em regime não-estacionário após exposição às temperaturas indicadas.

Os resultados do ensaio de penetração dos cloretos nas misturas em estudo comprovam que o aumento da temperatura de exposição provoca um aumento significativo na profundidade de penetração de cloretos, em ambas as misturas analisadas. A mistura M0, constituída unicamente com microfibras metálicas, apresenta um aumento significativo do coeficiente de difusão de cloretos, logo a partir os 200°C, duplicando o valor apresentado a 20°C. Este coeficiente continua a subir acentuadamente até, aproximadamente, os 400°C, atingindo valores mais de 20 vezes superiores aos registados aos 20°C.

A mistura M4, que incorpora uma combinação híbrida de fibras, apresentou um aumento semelhante no coeficiente de difusão de cloretos. Contudo, não se observa o mesmo fenómeno de estabilização, sendo que o coeficiente de migração dos cloretos continua a aumentar com a evolução da temperatura de exposição, pelo menos até os 500°C.

É importante destacar que a perda de desempenho é significativa desde logo para uma exposição de 200°C pelo que, a partir deste patamar, a perda de resistência à penetração de cloretos demonstra-se muito elevada.

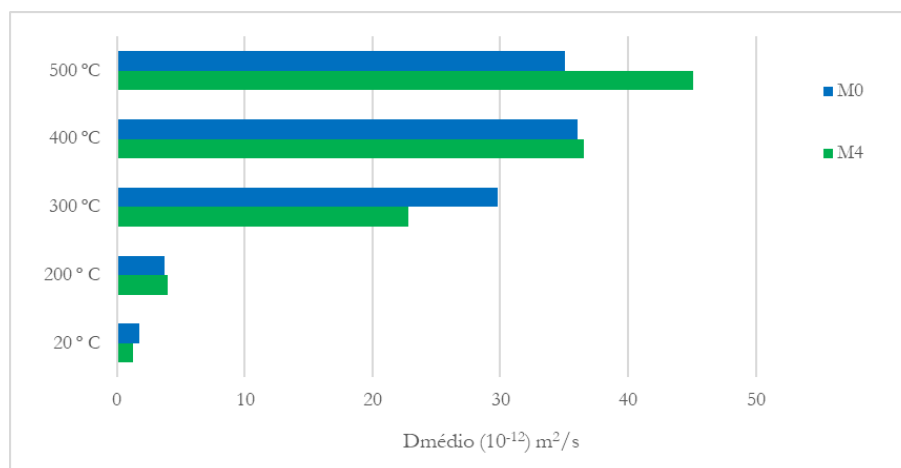


Figura 4.13- Provetes de ensaio à migração de cloretos em regime não-estacionário após exposição às temperaturas indicadas.

#### 4.3.5 Resistividade elétrica

O presente ensaio é caracterizado como não destrutivo pelo que, para a realização do mesmo, foi usado um único provete por mistura no qual são realizadas todas as leituras. Os resultados obtidos são apresentados à frente, na

Tabela 4.12, na Figura 4.14 e Figura 4.15, para as misturas selecionadas: M0-SF, M0, M3 e M4.

Tabela 4.12 - Valores de resistividade dos betões em estudo.

Betões	Resistividade, $\rho$ , (k $\Omega$ cm)		
	28 dias	56 dias	90 dias
M0	5,2	9,0	11,7
M3	5,9	7,5	9,2
M4	9,1	9,4	13,3
M0-SF	43,3	77,5	112,5

A durabilidade no que respeita à penetração de cloretos é tanto maior quanto maior for o valor da resistividade elétrica do betão (Soldado et al., 2021). Os resultados obtidos permitem-nos afirmar que os valores aumentam com o desenvolvimento da idade dos betões. A partir das primeiras idades, o betão M0-SF apresenta valores significativamente elevados, com tendência a evoluírem como consequência do efeito pozolânico. Como foi evidenciado anteriormente, a presença das fibras influencia o campo elétrico das restantes misturas, não sendo por isso correto fazer uma análise comparativa dos resultados obtidos para os betões com e sem fibras metálicas. Contudo, é de notar que as fibras interferem substancialmente na leitura deste parâmetro, reduzindo os valores da resistividade em cerca de 90%.

## Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas

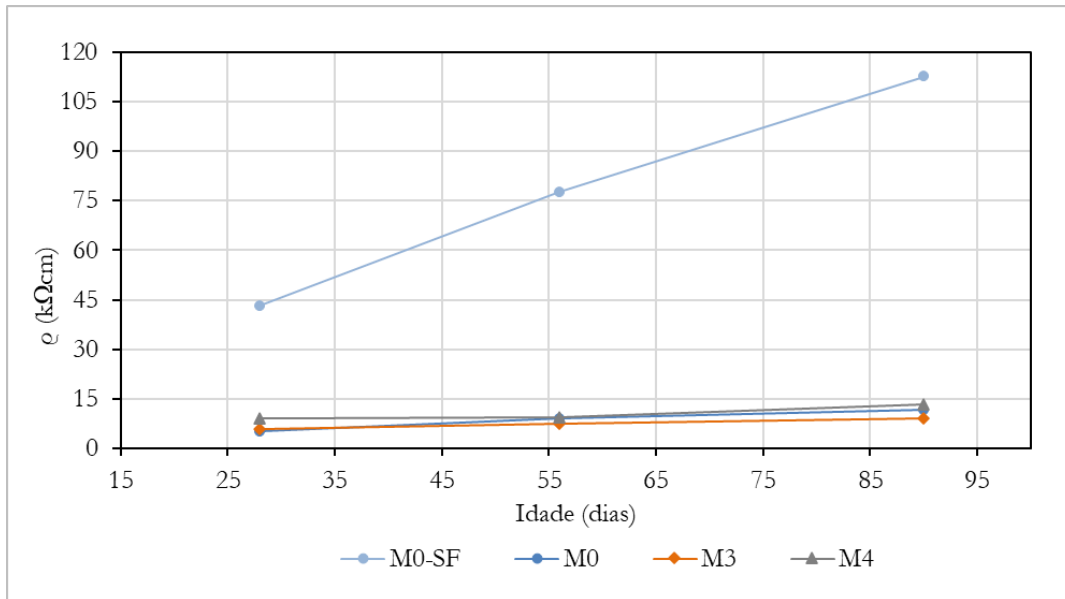


Figura 4.14- Variação da resistividade elétrica média em função da idade do betão.

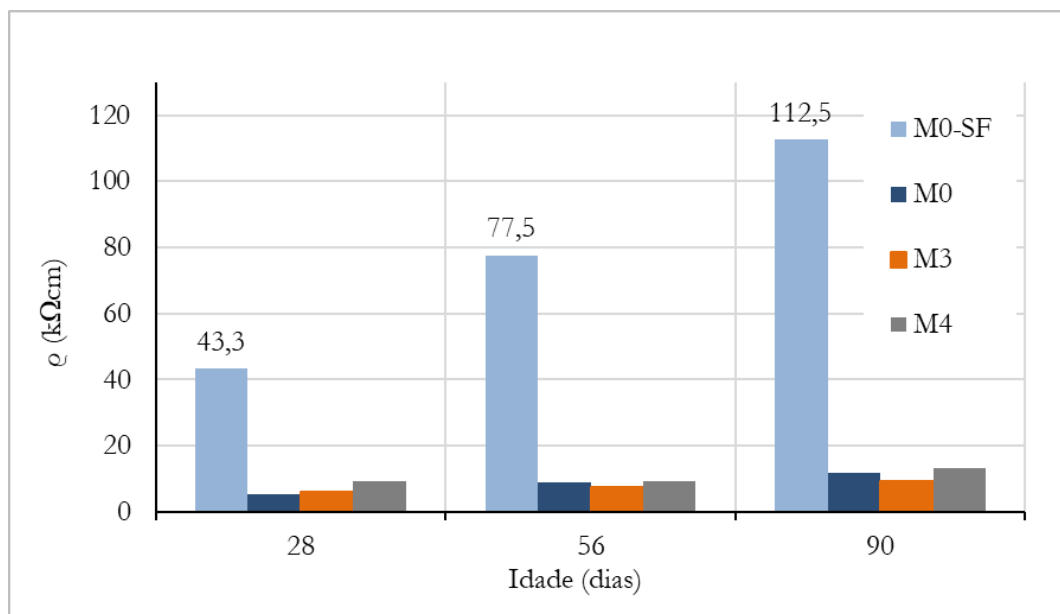


Figura 4.15- Gráfico da variação da resistividade elétrica média em função da idade do betão.

### 4.3.6 Absorção da água por capilaridade

A pesagem dos provetes no decorrer das várias fases do ensaio permite analisar a evolução da absorção por capilaridade. Na Figura 4.16 são apresentados alguns dos procedimentos de ensaio.

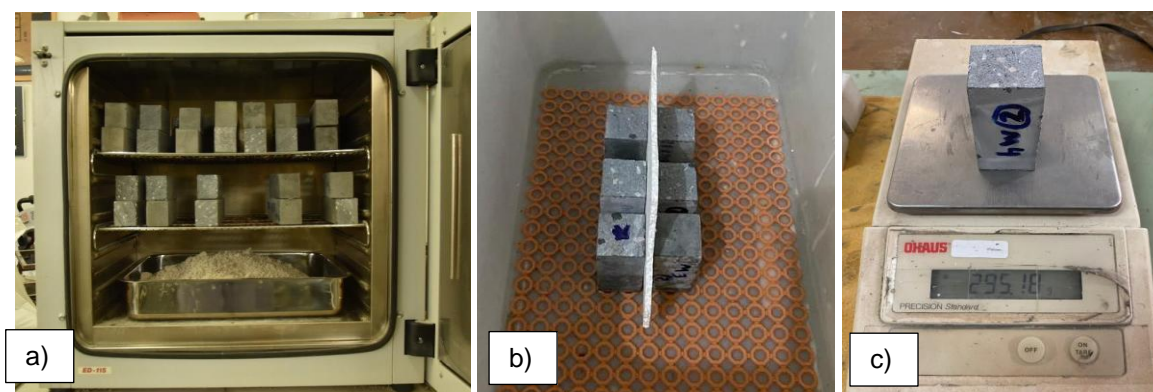


Figura 4.16- Ensaio de Absorção Capilar: a) provetes na estufa; b) caixa de ensaio; c) pesagem dos provetes.

Na Tabela 4.13 são apresentados os resultados obtidos para análise do parâmetro  $S_a$ , absorção de água por capilaridade, para os betões de referência e para os betões das diferentes séries, incluindo os betões leves. Este parâmetro foi calculado através da divisão do aumento de massa ( $M_i - M_0$ ) pela área da face inferior de cada provete e permite-nos concluir quais são os betões com maior capacidade de estanquidade à água.

Observa-se que a absorção capilar é mais acentuada nas fases iniciais, tendendo a diminuir ao longo do tempo. Inicialmente, ocorre a saturação rápida dos poros acessíveis, seguida de uma saturação mais lenta dos poros isolados. Após 72h, os valores de absorção tornam-se semelhantes na generalidade das misturas.

Na análise dos betões de referência, a mistura M0 revela um valor muito baixo de absorção, atingindo  $1,9 \text{ mg/mm}^2$  às 72 horas, o que evidencia a baixa permeabilidade da matriz. A variante sem fibras, M0-SF, apresenta cerca de 20% inferior, possivelmente devido à maior compactidade e menor dimensão dos poros capilares resultantes da ausência de microfibras. Por outro lado, a mistura com menor dosagem de cimento, M0-500, demonstra um aumento do teor de ar da matriz, originando uma rede capilar mais significativa e, conseqüentemente, uma maior absorção capilar aproximadamente, 70% superior a M0.

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

	Misturas	Absorção capilar, Sa (mg/mm <sup>2</sup> )					
		0h	3h	6h	24h	48h	72h
Ref.	M0	0	0,98	1,15	1,53	1,76	1,88
	M0-500	0	2,06	2,18	2,76	3,10	3,18
	M0-SF	0	0,70	0,84	1,2	1,42	1,56
Série 1	M1	0	0,57	0,69	0,99	1,09	1,19
	M2	0	1,10	1,18	1,50	1,70	1,78
Série 2	M3	0	0,57	0,67	1,03	1,22	1,30
	M3-B	0	0,54	0,62	1,04	1,24	1,32
	M4	0	0,82	0,93	1,26	1,49	1,59
	M4-B	0	1,08	1,24	1,7	1,86	1,94
Série 3	M5	0	0,76	0,82	1,2	1,3	1,38
	M6	0	0,98	1,16	1,52	1,62	1,74
	M7	0	0,64	0,74	1,00	1,16	1,24
	M8	0	0,92	1,06	1,46	1,7	1,84
Betões leves - modelo reduzido	D1.7 F1	0	0,66	0,74	1,02	1,20	1,32
	D1.7 F2	0	0,54	0,62	0,96	1,24	1,38
	D1.9 F1	0	0,26	0,3	0,58	0,74	0,88
	D1.9 F1.5	0	0,52	0,68	0,96	1,20	1,32

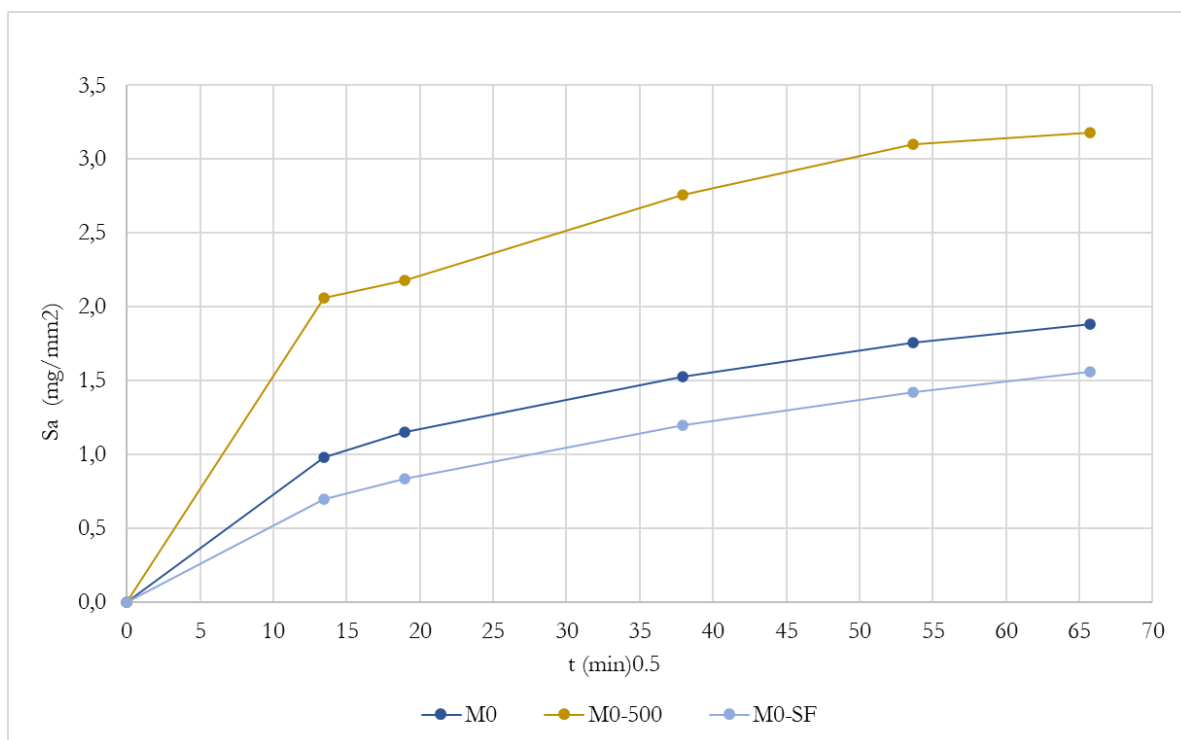


Figura 4.17 - Variação da absorção capilar em função de  $t(\text{min})^{0,5}$ , nos betões de referência.

Na série 1 os valores de absorção capilar são igualmente muito reduzidos, sendo quase coincidentes entre M2 e M0. A mistura M1 revelou ter uma matriz com uma rede capilar de menor dimensão, pois tem menos 37% de absorção em relação a M0.

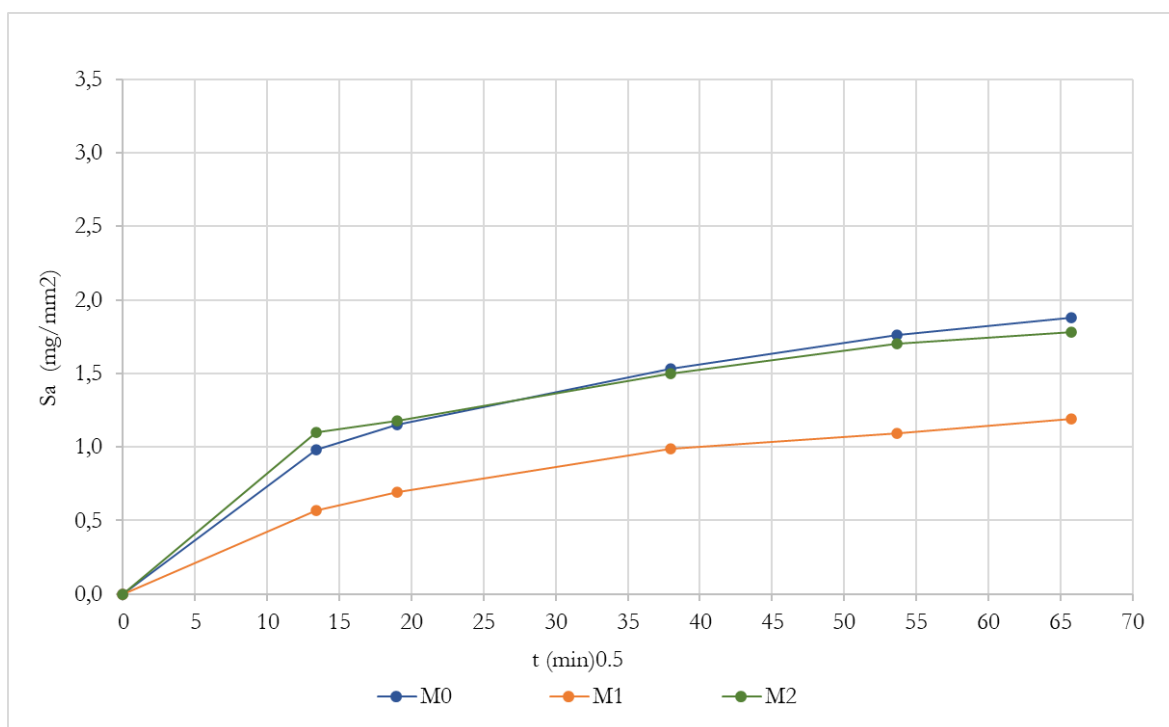


Figura 4.18 - Variação da absorção capilar em função de  $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 1- Variação do tipo de Agregados.

**Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

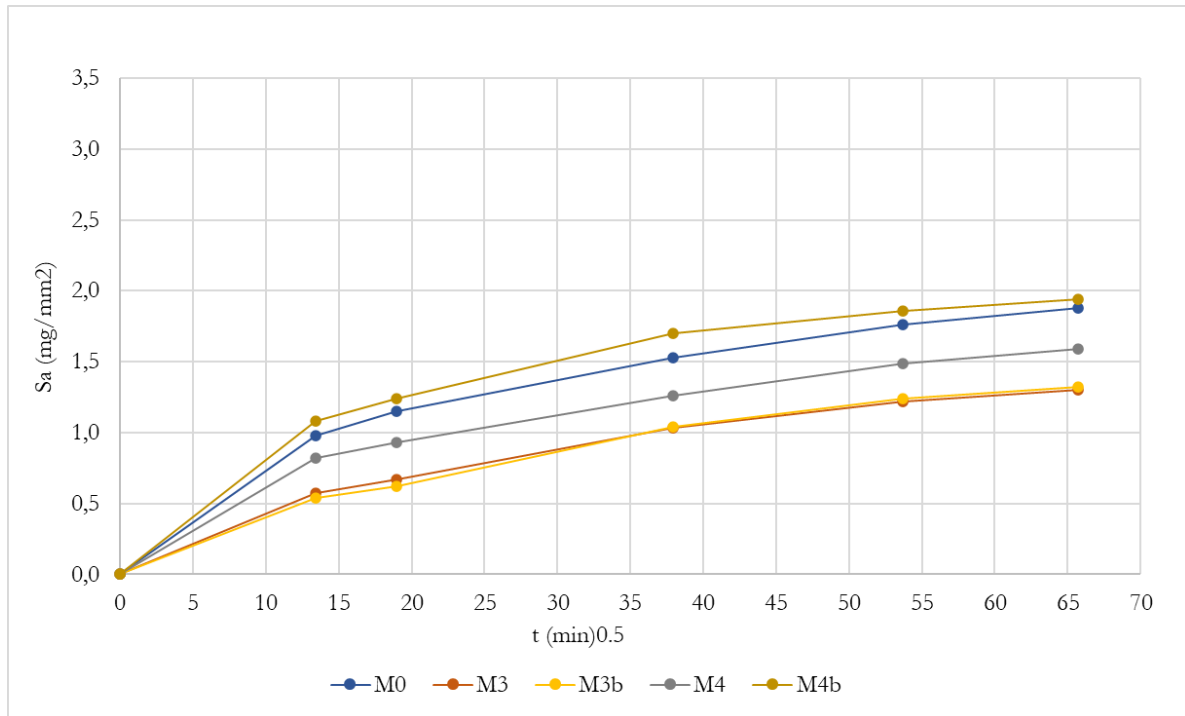


Figura 4.19 - Variação da absorção capilar em função de  $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 2 - Variação do tipo de Fibras.

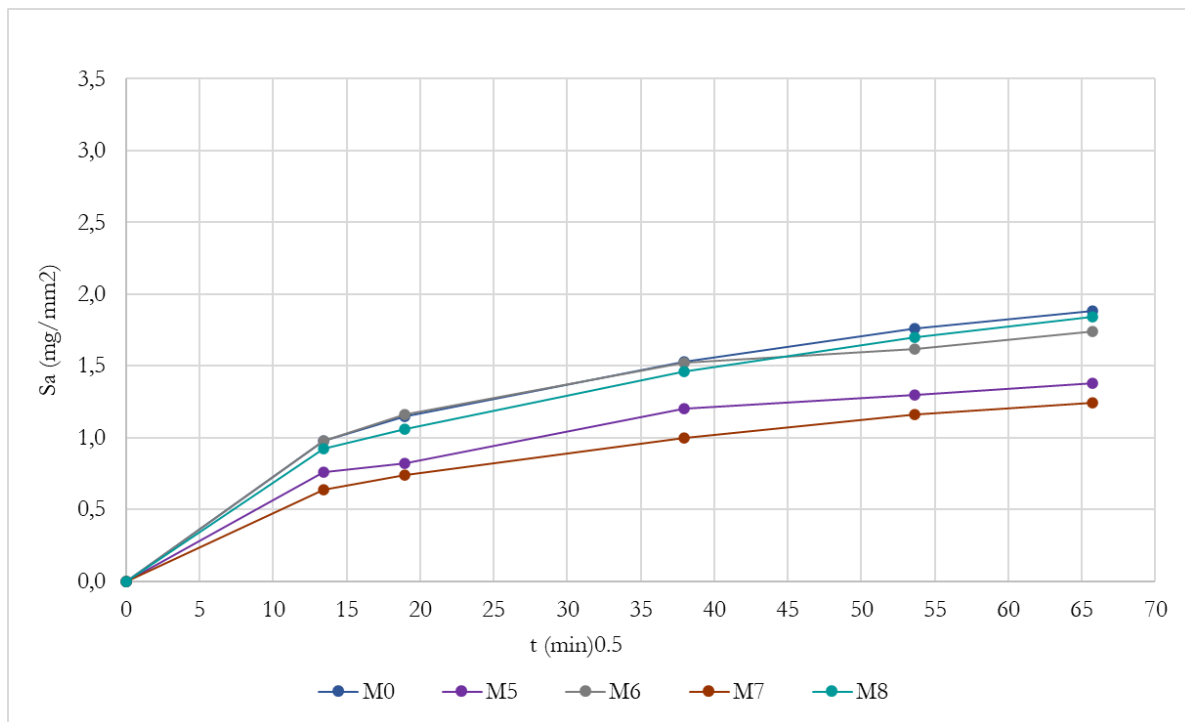


Figura 4.20 - Variação da absorção capilar em função de  $t(\text{min})^{0,5}$ , na série 3 - Variação do tipo de Adições.

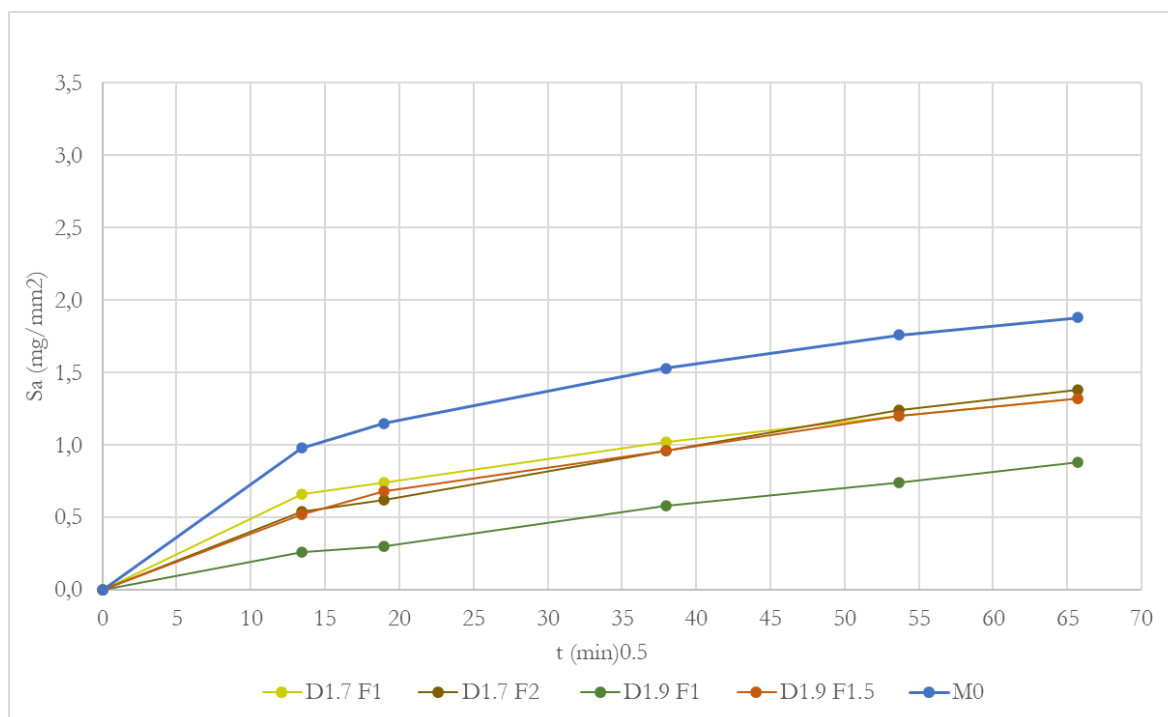


Figura 4.21 - Variação da absorção capilar em função de  $t(\text{min})^{0,5}$ , Betões Leves.

#### 4.3.7 Absorção da água sob pressão

Os valores experimentais obtidos com o ensaio de profundidade de penetração da água sob pressão durante  $72 \pm 2\text{h}$  são nulos para os três provetes de tamanho iguais para cada tipo de betão.



Figura 4.22- Ensaio de absorção da água sob pressão.

A permeabilidade à água é condicionada por diversos fatores como a relação A/C, o uso de SCMs, bem como a porosidade característica das misturas. A porosidade reduzida característica das misturas selecionadas e a elevada densidade das mesmas

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

faziam prever os resultados obtidos em ensaio, visto que uma matriz ultradensa e muito fechada dificulta a penetração da água nos provetes. No caso de estudo, a penetração da água foi totalmente impedida.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Principais conclusões

Considerando todo o estudo e trabalho realizado na presente dissertação, conclui-se que a viabilidade de desenvolver eco-UHPCs que mantêm os níveis desejados de resistência mecânica para a produção de cascas pré-fabricadas, enquanto promovem a sustentabilidade melhoram as propriedades diferidas. Com base nos resultados experimentais obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- A produção do UHPC corrente requer tradicionalmente elevadas quantidades de cimento, o que contribui significativamente para a emissão de CO<sub>2</sub>. Neste estudo, conseguimos desenvolver uma composição de UHPC com uma dosagem de cimento reduzida para 600 kg/m<sup>3</sup>, o que representa uma redução de aproximadamente 33% face às formulações comerciais mais correntes (900 kg/m<sup>3</sup>), sem comprometer as propriedades mecânicas essenciais. Esta redução traduz-se num potencial de redução equivalente de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de betão, promove uma utilização mais eficiente dos recursos naturais.
- A substituição parcial do cimento por adições minerais, os chamados materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes, escórias ou pozolanas naturais, foi avaliada quanto à sua influência nas propriedades diferidas do UHPC. As misturas com menores dosagens de ligante apresentaram reduções de retração superiores a 25% e fluência cerca de 20% inferior, mantendo o desempenho funcional desejado. Esta melhoria está associada à menor reatividade da matriz e à presença de partículas pozolânicas com comportamento mais estável.
- Do ponto de vista da durabilidade, a substituição de fibras metálicas por fibras híbridas teve um impacto positivo na difusão dos cloretos. A mistura M4 registou uma redução de 59% no coeficiente de difusão de cloretos aos 90 dias em relação a M0. Estes resultados evidenciam a eficácia de uma matriz mais densa e com menos condutividade elétrica na proteção contra a penetração de iões agressivos.
- As análises dos ensaios à carbonatação acelerada em condições de temperatura ambiente demonstraram um comportamento uniforme e positivo entre as misturas. Aos 120 dias, todas as misturas apresentaram profundidade de carbonatação nula. Este desempenho confirma a elevada alcalinidade e baixa permeabilidade da matriz dos eco-UHPCs estudados.
- A exposição a temperaturas elevadas compromete significativamente a durabilidade do UHPC. A mistura M0 apresentou um aumento de aproximadamente 1700% no coeficiente de difusão de cloretos aos 300°C, revelando uma perda severa de resistência à penetração de agentes agressivos

## **Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas**

com o aumento da temperatura. Por outro lado, embora a carbonatação não apresente uma perda tão elevada, existe um aumento da carbonatação progressivo com o aumento da temperatura de exposição. Após o aquecimento, a mistura M0 apresentou 3,0 mm aos 600°C, face a 1,0 mm aos 400°C, ou seja, um aumento de 200%, evidenciando uma progressiva perda de proteção alcalina com a temperatura.

- Relativamente à ocorrência de *spalling* com a exposição a elevadas temperatura, a mistura M4, com fibras poliméricas, demonstrou maior resistência ao *spalling* acima dos 500°C, com a ausência de roturas explosivas. A fusão das fibras criou microcanais que aliviaram a pressão interna, ao contrário das misturas com fibras exclusivamente metálicas, que se demonstraram mais suscetíveis a este fenómeno.

Em suma, a tese desenvolvida evidencia a teoria de que é possível desenvolver UHPC sustentáveis com dosagens reduzidas de cimento e incorporação de materiais suplementares cimentícios, mantendo ou melhorando as propriedades diferidas e a durabilidade necessárias para a produção de cascas pré-fabricadas. As estratégias adotadas não só contribuem para a redução do impacte ambiental associado à produção de betão, mas também promovem a eficiência e a sustentabilidade na construção para soluções de novas estruturas ou de reabilitação das existentes.

### **5.2 Trabalhos Futuros**

Dando continuidade ao trabalho desenvolvido, sugere-se aprofundar o estudo de eco-UHPCs com adições minerais alternativas, como pozolanas naturais e resíduos finos industriais, ainda pouco explorados em formulações de elevada compacidade. Esta abordagem poderá permitir uma redução adicional do teor de cimento, contribuindo para soluções mais sustentáveis sem comprometer o desempenho técnico.

Nesse sentido, a substituição de fibras convencionais por fibras recicladas, como PET ou aço de pneus, sugere uma estratégia promissora de reforço mais sustentável para reduzir o impacto ambiental. A avaliação do seu comportamento em matrizes densas, bem como a otimização de soluções híbridas com diferentes tipos de geometrias de fibras, poderá revelar combinações mais eficientes em termos mecânicos e económicos. Paralelamente, será relevante estudar o comportamento diferido das formulações mais promissoras em condições de exposição mais representativas da realidade, incluindo ambientes com variações térmicas e de humidade, ou em elementos tensionados, como os usados na pré-fabricação.

No campo da durabilidade, justifica-se o alargamento dos ensaios a ambientes agressivos simulados, como atmosferas salinas, ciclos gelo-degelo e exposição a

agentes químicos, de forma a consolidar o desempenho a longo prazo das soluções desenvolvidas.

Considerando o comportamento observado para temperaturas elevadas, torna-se essencial continuar a investigação acima dos 700°C, com foco na influência do tipo de fibras na formação de fissuras térmicas e no controlo de *spalling*, fenómeno crítico em matrizes tão densas como o UHPC.

Finalmente, recomenda-se o desenvolvimento de métodos integrados de avaliação da sustentabilidade, capazes de relacionar impacto ambiental, durabilidade, desempenho técnico e custos ao longo do ciclo de vida, permitindo decisões de projeto mais fundamentadas e alinhadas com os princípios da construção sustentável.

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Aïtcin, P. C. (2000). Cements of yesterday and today - concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1349–1359. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [2] Costa, A., & Appleton, J. (2002). Estruturas de betão I: Parte II - Materiais.
- [3] Costa, H., Carmo, R., Rodrigues, T., Rodrigues, A., & Correia, A. (2023). Development of eco ultra-high performance concrete for the prefabrication of ultra-thin concrete shells. <https://doi.org/10.1002/suco.202400588>
- [4] Dias, A., Amancio, F., Rafael, M. & Cabral, A. (2020). Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. *Revista Matéria*. ISSN 1517-7076 artigos e-12629, 2020
- [5] Eide, M. B., & Hisdal, J.-M. (2012). Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) - State of the art. [www.coinweb.no](http://www.coinweb.no)
- [6] EN 1992-1-1. (2010). Eurocódigo 2 : Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade
- [7] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., & Susanne, F. (2014). Ultra High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples.
- [8] Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Durães, L. (2014). The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Materials and Design*, 59(January), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>
- [9] Gowda, T. S., Hiremath, S. M. K. A., & Ranganath, R. V. (n.d.). Microstructure and Flexural behaviour assessment of Early strength Ultra High Performance Concrete proportioned by sustainable methodology [Manuscript Draft]
- [10] Juvandes, L., (2011). Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas. 1<sup>as</sup> Jornadas de Materiais de Construção – Porto.
- [11] Liang, X., Wu, C., Yu, S., Chen, Z. & Li, Z. (2018). Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.241>
- [12] LNEC E397-1993 (1993), Determinação do módulo de elasticidade em compressão – LNEC, Lisboa.
- [13] LNEC E398-1993 (1993), Determinação da retracção e da expansão – LNEC, Lisboa.

- [14] LNEC E399-1993 (1993), Determinação da fluência em compressão – LNEC, Lisboa.
- [15] LNEC E399-1993 (1993), Determinação da fluência em compressão – LNEC, Lisboa.
- [16] LNEC E463-2004 (2004), Betões. Determinação da resistência à penetração de cloretos. Ensaio de imersão – LNEC, Lisboa.
- [17] Nematollahi, B., Saifulnaz, M. R., & Voo, Y. L. (2011). Ultra High Performance Concrete (UHPC) Technology from Material to Structure: A review. In International Building & Infrastructure Technology Conference (pp. 359–366).
- [18] NP EN 12350-5:2019 (2019), Ensaios do betão fresco – Parte 5: Ensaio da mesa de espalhamento – IPQ, Lisboa.
- [19] NP EN 12350-6. (2009). Ensaios do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica.
- [20] NP EN 12350-7. (2019). Ensaios do betão fresco. Parte 7: Determinação do teor de ar. Métodos pressiométricos.
- [21] NP EN 12350-9. (2010). Ensaios do betão fresco. Parte 9: Betão autocompactável. Ensaio de escoamento no funil V.
- [22] NP EN 12390-5. (2009). Ensaios do betão fresco. Parte 5: Ensaio da mesa de espalhamento
- [23] NP EN 12390-8. (2019). Ensaios do betão endurecido. Parte 8: Profundidade de penetração da água sob pressão.
- [24] NP EN 196-1. (2017). Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.
- [25] NP EN 933-1. (2014). Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica - Método da peneiração.
- [26] NT Build 492 (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.
- [27] PRE-SHELL – Prefabricated Ultra Thin Concrete Shells. (2019–2023). Projeto financiado pelo FEDER no âmbito do POCI, com a referência POCI-01-0247-FEDER-039735. <https://www.spiral.pt/projetos>
- [28] Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)

***Caracterização da durabilidade e das propriedades diferidas de betões de elevado desempenho para fabrico de cascas***

- [29] Rodrigues, A., Costa, H., Carmo, R., & Correia, A. (2023). Avaliação da durabilidade do UHPC após exposição a temperaturas elevadas. 8<sup>as</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos e 3<sup>as</sup> Jornadas de Proteção Civil.
- [30] Rodrigues, A., Costa, H., Carmo, R., & Júlio, E. (2023). The Influence of SCMs, Fibres and Superplasticizer on the Chloride Diffusion Coefficient of eco-UHPC. *fib Symposium 2023 – Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*, pp. 907–916. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_90)
- [31] Rodrigues, T. (2023). Desenvolvimento e caracterização mecânica de eco-betões de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras para pré-fabricação modular. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra.
- [32] Scrivener, K., John, V., & Gartner, E. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [33] Spasojevic, A. (2008). Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design, PhD thesis, Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [34] Tjaronge, M. W., Djamaluddin, A. R., Lemba, N. R., & Kalesaran, I. (2003). Influence of Water To Cement Ratio (W/C) on Slump Flow and Compressive Strength of Self Compacting Concrete (SCC) Containing Portland Pozzolan Cement. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 14(1), 106–111.
- [35] Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- [36] Ullah, R., Qiang, Y., Ahmad, J., Vatin, N. & Mohammed A. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials* 2022, 15, 4131. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>
- [37] Voort, T. V., Suleiman, M., & Sritharan, S. (2008). Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
- [38] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy*

- and the Environment, 26, 303–329.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- [39] Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8–14.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>
- [40] Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
- [41] Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Research*, 56, 29–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>
- [42] Zhang, J., & Zhao, Y. (2017). Development of sustainable ultra-high performance concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 61(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012076>
- [43] Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X., Hu, X., & Shi, C. (2021). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. *Cement and Concrete Composites*, 124, 104242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104242>