

# **CARATERIZAÇÃO DE UMA MISTURA COMERCIAL DE UM MATERIAL CIMENTÍCIO DE ULTRAELEVADO DESEMPENHO**

**JOÃO FILIPE SOUSA PEREIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientadora: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa  
Nunes

JUNHO DE 2021

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

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

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

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

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

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

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

Aos meus avós,  
aos meus pais e aos meus irmãos



## AGRADECIMENTOS

Quero desde já agradecer imenso à minha orientadora, a Professora Sandra Nunes, por todo o seu empenho, a sua dedicação, determinação, compreensão e principalmente pelo entusiasmo demonstrado desde o primeiro dia de trabalho neste projeto. Abraçou o tema com um espírito motivacional que me contagiou e me fez criar um enorme interesse a explorar este tema e a demonstrar as minhas máximas capacidades.

Queria realçar o meu especial agradecimento à Engenheira Paula Silva, ao Cláudio, Técnico de Laboratório, assim como ao Amin Abrishambaf por me terem recebido tão bem no laboratório e por todos os ensinamentos que me transmitiram ao longo destes meses.

Um especial agradecimento aos amigos que fiz na faculdade por tudo. Por estarem presentes em todos os momentos e por todos os altos e baixos que passamos juntos. Tenho um especial agradecimento pela minha namorada que acima de tudo sempre acreditou em mim e me deu todo o apoio necessário nestes últimos anos de Faculdade. Foi uma longa caminhada que fiz até este momento e sem ter encontrado as pessoas certas para estarem ao meu lado não sei se conseguiria tê-la terminado, por isso mesmo o meu sincero agradecimento.

Por último, mas sem dúvida o mais importante, o meu enorme agradecimento a toda minha família, em especial aos meus pais. Sem dúvida as pessoas que me fizeram tornar naquilo que sou hoje, que desde o início estiverem lá para me ajudar e aconselhar e por sempre acreditarem que eu iria atingir os meus objetivos, mesmo em alturas em que eu não acreditava, eram nesses momentos que eles acreditavam mais e me davam a força para poder continuar. Sem eles nunca teria vingado na vida e por isso a minha eterna gratidão.

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto PTDC/ECI-EST/30511/2017; e no âmbito do projeto iPBRail - Innovative Precast Bridges for RAILways, com referência POCI-01-0247-FEDER-039894, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do Programa Operacional Regional de Lisboa (Lisboa 2020), ao abrigo do Portugal 2020.



Cofinanciado por:





## RESUMO

A evolução na construção é algo visível em todo mundo. As cidades estão cada vez mais extensas, os edifícios cada vez mais altos e as estruturas em geral apresentam geometrias mais arrojadas. A busca pela diferença e pela superação nunca foi tão intensa como na atualidade. A engenharia civil tem acompanhado essa mesma mudança e inovação, nomeadamente com o surgimento de novos materiais capazes de responder a estas necessidades.

O betão armado é hoje em dia o material mais usado na construção, no entanto, este material apresenta ainda algumas debilidades como uma fraca resistência à tração, a por vezes insuficiente resistência à penetração de agentes agressivos que podem conduzir à degradação das armaduras, o excessivo peso próprio quando comparado com elementos estruturais em aço para atender a carregamentos similares, e o consumo excessivo de cimento que está a tornar insustentável a produção de betão nas quantidades atuais, devido à libertação de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera .

Os estudos científicos conduziram finalmente a um novo material denominado de Betão de Ultraelevado Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC). Este é um material que promete atender às necessidades atuais, melhorando as fragilidades e defeitos encontrados no betão armado.

O UHPFRC é um betão que fundamentalmente combina as características do betão de elevado desempenho, do betão reforçado com fibras e do betão auto-compactável. Esta conjugação permite a este betão apresentar uma elevada resistência mecânica, uma boa ductilidade, uma boa trabalhabilidade e uma durabilidade melhorada em comparação com o betão convencional, no entanto, apresenta um custo elevado e o seu comportamento ainda não foi completamente estudado o que tem impedido a sua aplicação de forma mais generalizada.

No âmbito desta dissertação, pretende-se caracterizar uma mistura comercial de UHPFRC. Serão apresentadas as características principais da composição, os princípios básicos para a formulação deste tipo de misturas, as principais propriedades mecânicas do material e será avaliada a sua durabilidade.

O principal objetivo deste trabalho consiste em perceber em que medida este material se distingue dos betões convencionais. Para além disso, será estabelecida uma comparação entre os resultados atingidos com os resultados obtidos anteriormente com uma mistura alternativa desenvolvida na FEUP. Serão ainda evidenciadas as vantagens e desvantagens de cada uma das misturas.

Pela campanha experimental realizada e tendo em conta os resultados obtidos, foi possível concluir que a mistura comercial de UHPFRC apresenta resultados muito satisfatórios quanto ao seu comportamento mecânico e as suas características de durabilidade. Atingindo valores muito superiores de resistência à compressão e tração do que os betões convencionais e atingindo um comportamento muito melhorado em diversos indicadores da durabilidade.

Em relação à comparação de comportamentos e resultados entre a mistura comercial estudada e a mistura alternativa desenvolvida na FEUP pode-se aferir que em todos os ensaios realizados a mistura comercial superou a mistura desenvolvida na FEUP. As maiores diferenças encontradas foram nos indicadores de durabilidade. No comportamento mecânico as diferenças não foram muito significativas, no entanto, a mistura comercial continuou a apresentar os melhores resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** UHPFRC, Características mecânicas, Durabilidade, Betão auto-compactável, Fibras de aço.





## Abstract

The evolution in constuction is something visible around the world. Cities are growing, buildings are getting taller, and structures in general have bolder geometries. The search for difference and overcoming difficulties has never been as intense as it is today. Civil engineering has been keeping up this same change and innovation, namely with the appearing of new materials that are capable of responding to these needs.

Reinforced concrete is nowadays the most used material in construction, however that material presents still presents some weaknesses such as a poor tensile strength, , sometimes insufficient resistance to the penetration of aggressive agents that can lead to degradation of the reinforcement, excessive self-weight when compared to structural steel elements to withstand similar loads, and excessive cement consumption that is making concrete production unsustainable in current quantities, due to the release of large amounts of CO<sub>2</sub> into the atmosphere .

Scientific studies have finally led to a new material called Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). This is a material that promise to meet current needs, improving the weaknesses and defects found in the reinforced concrete.

UHPFRC is a concrete that fundamentally combines the characteristics of high-performance concrete, fiber reinforced concrete and self-compacting concrete. This combination allows this concrete to have high mechanical strength, good ductility, good workability and better durability compared to the conventional concrete, however, it has a high cost and its behaviour has not yet been fully studied, which has prevented its application more generally.

In the scope of this dissertation, is intended to characterize a commercial UHPFRC mix. The main characteristics of the composition, the basic principles for the formulation of this type of mixtures, the main mechanical properties of the material will be presented and its durability will be evaluated.

The main goal of this work is to undersand to what extent this material differs from convencional concrete. Furthermore, a comparison will be established between the results achieved with those obtained previously with an alternative mixture developed at FEUP. The advantages and disadvantages of each mixture will also be highlighted.

From the experimental campaign carried out and taking into account the results obtained, it was possible to conclude that the comercial UHPFRC mix presents outstanding results in terms of its mechanical behavior and its durability characteristics. Achieving much higher values of compressive and tensile strength than conventional concretes and achieving a much improved behaviour in several indicators of durability.

Regarding the comparison of behaviours and results between the studied commercial mixture and the aternative mixture developed at FEUP, it can be seen that in all tests performed, the commercial mixture outperformed the mixture developed at FEUP. The biggest differences were found in the durability indicators. In terms of mechanical behaviour, de differences were not very significative, however, the commercial mixture continued to show the best results.

**KEYWORDS:** UHPFRC, Mechanical behaviour, Durability, Self-compacting concrete, Steel fibers.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2. PLANO DE TRABALHOS .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2 BETÃO DE ULTRAELEVADO DESEMPRENHO REFORÇADO COM FIBRAS .....</b>	<b>4</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	4
2.2. COMPOSIÇÃO DO UHPFRC .....	6
2.3. PROPRIEDADES DO UHPFRC .....	9
2.3.1. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA .....	10
2.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	11
2.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	11
2.4. DURABILIDADE .....	12
2.5. APLICAÇÕES DO UHPFRC .....	15
2.5.1. LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE PONTES .....	17
2.5.2. SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO BASEADAS EM UHPFRC .....	19
2.5.3. ELEMENTOS DE PONTES INTEGRALMENTE REALIZADOS COM UHPFRC .....	21
2.6. PERSPETIVA SOCIAL, ECONÓMICA E DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	23
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>25</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	25
3.2. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	27
3.2.1. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA .....	27
3.2.2. TRABALHABILIDADE .....	28
3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	29
3.3.1. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO .....	29
3.3.2. COMPORTAMENTO À TRAÇÃO .....	31
3.3.3. COMPORTAMENTO DE LIGAÇÃO DO UHPFRC COM O BETÃO CONVENCIONAL .....	35

<b>3.4. DURABILIDADE.....</b>	<b>36</b>
3.4.1. INTRODUÇÃO .....	36
3.4.2. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP) .....	36
3.4.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	37
3.4.4. RESISTIVIDADE SUPERFICIAL .....	39
3.4.4.1. Método de dois elétrodos .....	39
3.4.4.2. Método de 4 elétrodos.....	41
3.4.5. ENSAIO ACELERADO DE PENETRAÇÃO DE IÕES CLORETO .....	42
3.4.6. CARBONATAÇÃO .....	45
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	
.....	<b>47</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3. ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>47</b>
4.3.1. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO.....	47
4.3.2. COMPORTAMENTO À TRAÇÃO.....	50
4.3.3. COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO DO UHPFRC COM O BETÃO CONVENCIONAL .....	53
<b>4.4. DURABILIDADE.....</b>	<b>55</b>
4.4.1. INTRODUÇÃO .....	55
4.4.2. POROSIDADE AVALIADA POR MIP .....	55
4.4.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	56
4.4.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	57
4.4.5. PENETRAÇÃO DE IÕES CLORETO .....	59
4.4.6. RESULTADOS DA CARBONATAÇÃO.....	60
<b>5 COMPARAÇÃO COM A COMPOSIÇÃO</b>	
<b>DESENVOLVIDA NA FEUP .....</b>	<b>62</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>5.2. MATERIAIS E METODOLOGIAS .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>64</b>
5.4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	65
5.4.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	65
<b>5.5. DURABILIDADE.....</b>	<b>66</b>
5.5.1. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP) .....	66
5.5.2. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	67

5.5.3. PENETRAÇÃO DE CLORETOS .....	67
5.5.4. CARBONATAÇÃO .....	69
<b>6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	<b>71</b>
6.1. CONCLUSÃO .....	71
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	72
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução durante o último século do comportamento do betão à compressão relativo a betões usados em estruturas reais [4] .....	5
Figura 2.2- Resistência à compressão para diferentes razões água/cimento (A/C) [10] .....	7
Figura 2.3- Exemplo das proporções na mistura em volume de um UHPFRC e um betão convencional (NC) [13].....	8
Figura 2.4- Diagramas tensão/extensão em compressão de betões HPC, NC e UHPFRC [10] .	8
Figura 2.5- Diferentes tipos de fibras e micro-fibras [10]. .....	9
Figura 2.6-Illustração das famílias de betão que originaram o UHPFRC .....	9
Figura 2.7-Auto-compactabilidade betão. a) camada de pasta que envolve cada grão de agregado. b) Fissura “costurada” pelas fibras. c) Empacotamento ideal onde cada grão pequeno preenche espaços maiores originados pelos grãos de maiores dimensões [2]. .....	10
Figura 2.8- Efeito-Parede [18]. .....	12
Figura 2.9- – Conceitos de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão [20]. .....	13
Figura 2.10- – Sem risco de corrosão ou ataque [24]. .....	14
Figura 2.11- Corrosão induzida por carbonatação [24]. .....	14
Figura 2.12- Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar [24]. .....	14
Figura 2.13- Corrosão induzida por cloretos da água do mar [24]. .....	15
Figura 2.14- Ataque pelo gelo/degelo [24]. .....	15
Figura 2.15- Ataque químico [24]. .....	15
Figura 2.16-Dados da construção de pontes com UHPFRC nos últimos anos no Canadá [28]	16
Figura 2.17- Dados da construção de pontes com UHPFRC nos últimos anos nos EUA [28] ..	16
Figura 2.18-Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos de vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas com painéis pré-fabricados [19]. .....	17
Figura 2.19- Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos de plataforma da ponte pré-fabricados e vigas de suporte [28]. .....	18
Figura 2.20-Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos modulares da superestrutura [19]. .....	18
Figura 2.21-Ligações realizadas com UHPFRC entre vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas adjacentes [28]. .....	18
Figura 2.22-Ligações realizadas com UHPFRC entre um pilar de uma ponte existente e um novo elemento pré-fabricado [28]. .....	19
Figura 2.23-Sobreposição de um convés de uma ponte usando UHPFRC [28]. .....	20
Figura 2.24-Reforço de uma viga de aço existente usando um revestimento em UHPFRC [28]. .....	20

Figura 2.25-Reforço de uma estaca já existente ou de um pilar de uma ponte usando UHPFRC [28].	21
Figura 2.26-Comparação de vigas de uma ponte pré-esforçadas para a ponte Mars Hill, uma em betão convencional e a outra em UHPFRC [28].	22
Figura 2.27-Estacas em perfil H pré-fabricadas e pré-esforçadas [28].	22
Figura 2.28-Elemento de viga em forma de pi realizado em UHPFRC, pré-fabricado e pré-esforçado [28].	22
Figura 3.1-Geometria do provete de formato de Dog Bone (dimensões em mm) [37].	26
Figura 3.2-Procedimento de amassadura	27
Figura 3.3- Materiais constituintes da mistura de UHPFRC	27
Figura 3.4-Misturadora usada neste estudo	28
Figura 3.5- Ensaio de espalhamento para uma mistura com 2% de fibras.	29
Figura 3.6-Colocação do UHPFRC nos moldes cúbicos	29
Figura 3.7- Câmara de cura	30
Figura 3.8-Equipamento utilizado para os ensaios à compressão	30
Figura 3.9- Preparação dos provetes “Dog Bone”	31
Figura 3.10-Equipamento para o ensaio à tração uniaxial	32
Figura 3.11-Equipamento de transmissão de dados de medição acoplado aos LVDTs	32
Figura 3.12- Resposta idealizada de um material UHPFRC num ensaio de tração direta uniaxial [28].	33
Figura 3.13- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase elástica [28].	34
Figura 3.14- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase de multifissuração [28].	34
Figura 3.15-- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase da deformação localizada [28].	34
Figura 3.16-Ensaio de arrancamento [28].	35
Figura 3.17-Ensaio de arrancamento realizado numa viga reforçada com UHPFRC	35
Figura 3.18-Amostras para o ensaio MIP.	37
Figura 3.19-Preparação das amostras para o ensaio MIP	37
Figura 3.20-Ensaio da absorção de água por capilaridade.	38
Figura 3.21- Provete utilizado no ensaio da resistividade elétrica superficial (imagem da esquerda), provete foi mantido dentro de água (imagem da direita).	39
Figura 3.22-Equipamentos usados no ensaio da resistividade elétrica. Gerador de sinal (imagem da esquerda), Voltímetro e Amperímetro (imagem da direita).	40
Figura 3.23-Ensaio da resistividade elétrica pelo método de dois elétrodos.	40

Figura 3.24-Equipamento usado na realização do ensaio de resistividade elétrica pelo método de 4 elétrodos e respetiva calibração do mesmo.....	41
Figura 3.25- Representação esquemática da técnica dos 4 elétrodos [44].....	42
Figura 3.26-Amostras para o ensaio de penetração de cloretos sujeitas à câmara de vácuo. ...	43
Figura 3.27- Ensaio da resistência à penetração de iões cloreto. ....	43
Figura 3.28-Amostra sujeita a compressão diametral.....	44
Figura 3.29-Amostras pulverizadas com nitrato de prata. ....	45
Figura 3.30-Amostras para o ensaio da Carbonatação. ....	46
Figura 4.1-Ensaio de espalhamento .....	47
Figura 4.2- Valores da força compressiva regista nas três amostras aos 28 dias .....	48
Figura 4.3-Provetes após o ensaio à compressão.....	49
Figura 4.4-Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. ....	50
Figura 4.5-Resultados do ensaio de tração uniaxial para as diferentes dosagens de fibras aos 28 dias. ....	52
Figura 4.6-Microfissuras nos provetes ensaiados no ensaio de tração direta uniaxial. ....	53
Figura 4.7-Provetes com diferentes dosagens de fibras já ensaiados à tração direta uniaxial..	53
Figura 4.8-Amostras do ensaio de arrancamento.....	54
Figura 4.9-Valor do pico de resistência alcançado antes da rotura. ....	54
Figura 4.10- Resultados experimentais e regressão linear da absorção de água por capilaridade durante as primeiras 4 horas de contato com a água.....	57
Figura 4.11-Evolução da resistividade elétrica ao longo do tempo. ....	58
Figura 4.12- -Evolução da resistividade com o tempo de diversos UHPFRCs obtidos pelo método de 4 elétrodos juntamente com uma classificação proposta por Graybreal [28]. ....	58
Figura 4.13-Amostras após o ensaio da penetração rápida de cloretos aos 28 dias.....	60
Figura 4.14- Amostras ensaiadas à carbonatação aos 3 meses de idade. ....	61
Figura 5.1-Evolução com o tempo da resistência à compressão até aos 90 dias (UHPFRC-A). .....	65
Figura 5.2-Curvas dos ensaios da resistência à tração direta uniaxial aos 28 dias (UHPFRC-A). .....	65
Figura 5.3- Resultados do ensaio de tração direta uniaxial para 3% de fibras em volume das misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B.....	66
Figura 5.4- Resultados experimentais e regressão linear da absorção de água por capilaridade durante as primeiras 4 horas de contato com a água (UHPFRC-A).....	67
Figura 5.5- Amostras após o ensaio da penetração rápida de cloretos aos 28 dias (UHPFRC-A). .....	69



Figura 5.6- Provetes ensaiados após 12 e 3 meses na câmara de carbonatação acelerada, respetivamente, UHPFRC-A (figura da esquerda) e UHPFRC-B (figura da direita) ..... 69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Ensaio realizados durante a campanha experimental. ....	25
Tabela 3.2- Características dos provetes utilizados e idades dos ensaios. ....	26
Tabela 3.3-Proporções dos constituintes usados nas amassaduras.....	28
Tabela 3.4-Tensão e duração do teste de resistência à penetração de iões cloreto .....	44
Tabela 4.1- Resultados obtidos no ensaio à compressão. ....	48
Tabela 4.2-Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 1%) .....	51
Tabela 4.3- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 2%) .....	51
Tabela 4.4-- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 3%) .....	52
Tabela 4.5-- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 4%) .....	52
Tabela 4.6-Classificação da durabilidade e correspondentes limites da porosidade total (MIP) [45] .....	55
Tabela 4.7-Resultados do ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) .....	55
Tabela 4.8-Classificação da qualidade do betão com base nos valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 28 dias [45]. ....	56
Tabela 4.9-Resultados da absorção da água por capilaridade aos 28 dias ( $(\text{Kg}/\text{m}^2 \times \text{h}^{0,5})$ .....	57
Tabela 4.10-Resultados da resistividade elétrica ao longo do tempo, $R_e$ ( $\text{K}\Omega \times \text{cm}$ ).....	58
Tabela 4.11-Resistência à penetração de cloretos [47].....	59
Tabela 4.12-Características das amostras e do ensaio à penetração de cloretos. ....	59
Tabela 4.13- Coeficiente de difusão de cloretos ( $D_{ns}$ ) no ensaio de migração em regime não estacionário aos 28 dias de idade. ....	60
Tabela 5.1-Comparação de todos os resultados obtidos entre as duas misturas, UHPFRC-A e UHPFRC-B .....	64
Tabela 5.3-Resultados do teste da penetração rápida de cloretos (UHPFRC-A) .....	68





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO

Nos últimos anos tem-se assistido a uma revolução constante em busca de novas técnicas, novos equipamentos, novos processos e novos materiais que permitem que a construção evolua tornando possível a criação de estruturas mais irreverentes, mas sempre com uma preocupação na vertente económica da construção e da sustentabilidade. O betão é o material mais usado na construção, exatamente por ser um material que proporciona quer a versatilidade na construção, por ter características que lhe permitem assumir desde as formas mais básicas às mais arrojadas, como custos relativamente reduzidos na sua conceção [1].

No entanto, o betão é um material que tem certas deficiências como a baixa resistência à tração e ductilidade, assim como por vezes, insuficiente durabilidade. No campo das melhorias da capacidade de resistência à tração é de realçar o conhecido betão armado, que surge, exatamente, pela adição de um novo material que apresenta resistência à tração suficientemente elevada para que combinado com o betão, que por si só, já apresenta um bom comportamento a esforços de compressão, permita originar um material capaz de ter um bom comportamento para ambos os tipos de solicitações.

Contudo, a junção das armaduras ao betão acrescentou também mais condicionantes quanto à durabilidade do mesmo, uma vez que as armaduras são um elemento relativamente sensível e suscetível à corrosão. Por esse mesmo motivo, o estudo do betão tem conduzido a muitas evoluções quer na dosagem dos materiais constituintes, quer até nos métodos de fabrico, entre outros aspetos.

No seguimento desses estudos surge o betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras (UHPRFC), que apresenta claras melhorias na durabilidade uma vez que a sua composição apresenta uma grande compacidade incluindo apenas partículas finas ou muito finas, eliminando por completo o uso de agregados grossos, tornando a sua composição muito menos porosa e muito mais resistente à penetração de agentes agressivos.

Para além de melhorias claras na durabilidade este material conseguiu desmistificar uma ideia muito presente até então de que seriam os agregados grossos, nomeadamente a brita, que iriam conferir alta resistência mecânica à compressão na mistura de betão. No entanto, este material, mesmo não incorporando agregado grosso, permite alcançar resistências à compressão significativamente maiores dos que os demais betões (acima de 150MPa).

Apresenta como principais características o recurso a superplastificantes que permitem que a relação água/ligante possa ser reduzida até valores da ordem de 0,2, valores bem mais baixos do que os adotados nos betões convencionais que apresentam razões de água/cimento, em média, na ordem de 0,5. Para além disso, o facto de ser reforçado com uma quantidade significativa de fibras de aço (dosagens em geral, acima de 2% em volume) permite um aumento significativo na ductilidade, na rigidez e na resistência à tração.

A incorporação de fibras de aço numa matriz cimentícia já existia em misturas de betão convencional, em dosagens mais reduzidas, mas a sua junção a um betão de ultraelevado desempenho (UHPC), que para além das características mencionadas atrás pode também ser autocompactável, gera um betão com propriedades notáveis [2].

A indústria da pré-fabricação é uma indústria em crescimento sendo considerada o futuro da construção a nível mundial. De entre as suas vantagens em relação à produção de betão in-situ, é de realçar que permite colmatar alguns erros de execução em obra e reduzir a necessidade de mão de obra. É neste tipo de indústria que o UHPFRC tem sido mais usado e se consegue corresponder às exigências de elevada resistência e ductilidade requeridas pelas geometrias mais complexas [3].

Este material pode ser usado isoladamente ou em combinação com armaduras ordinárias ou de pré-esforço. Pode-se conceber alguns elementos usando este material como sendo o principal material estrutural e conseguindo assim reduzir a dimensão desses elementos (elementos pré-fabricados), porém este material apresenta um custo significativo e, por isso, é mais aplicado como camada de reforço de estruturas existentes de betão convencional. Essa camada de reforço pode ser aplicada quer em estruturas novas como para a reabilitação de estruturas existentes, nomeadamente a envolver alguns pilares e vigas ou em zonas localizadas na ligação do pilar à laje [1].

Este material foi aplicado no âmbito do Projeto de Investigação HIPERSLAB (PTDC/ECI-EST/30511/2017), como uma camada fina de reforço em lajes de estruturas existentes. No âmbito deste projeto será então necessário realizar a caracterização mecânica e de durabilidade deste material e fazer uma posterior comparação com uma mistura alternativa desenvolvida pela FEUP.

Os materiais UHPFRC apresentam claras vantagens face aos betões convencionais em termos da Sustentabilidade. Esta evidência é explicada pela substituição de parte do cimento por resíduos industriais que reagem com os produtos de hidratação do cimento, contribuindo para aumentar a resistência o adensamento da matriz cimentícia A substituição do cimento é de extrema importância, uma vez que a produção de cimento a nível mundial é atualmente responsável por uma percentagem significativa das emissões de CO<sub>2</sub>. A extensão da vida útil das estruturas com recurso a UHPFRC possibilitará também uma redução do número de intervenções de reparação/reforço ou substituição dessas mesmas estruturas, sendo mais uma vantagem em termos de sustentabilidade que estes materiais apresentam.

O surgimento de novos UHPFRC comerciais tem aumentado nos últimos anos, sendo fundamental que a par do surgimento destes materiais comerciais seja também realizado um acompanhamento de estudo, análise e caracterização dos novos materiais. Nesse sentido, os trabalhos de investigação, como o que se apresenta nesta dissertação, são importantes para o aumento do conhecimento sobre o seu comportamento.

Nesta dissertação pretende-se caracterizar uma mistura comercial de um UHPFRC, cujo fornecedor não será aqui identificado por questões de sigilo.

## **1.2.PLANO DE TRABALHOS**

O presente trabalho inclui, numa primeira fase, a caracterização do comportamento mecânico da mistura comercial de UHPFRC em estudo e, numa segunda fase, a caracterização de vários parâmetros indicadores da durabilidade deste material. Um dos principais objetivos deste estudo consiste em comparar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica e de durabilidade com os resultados obtidos com uma mistura desenvolvida anteriormente na FEUP, conseguindo assim uma análise mais crítica deste material pelo facto de termos bases comparativas. Até à data ainda não foram

desenvolvidas escalas de classificação dos indicadores de durabilidade específicas para os materiais da família dos UHPFRC, por isso, torna-se importante estabelecer uma comparação entre composições da mesma natureza.

O trabalho iniciou-se com uma revisão bibliográfica de modo a compreender que estudos já foram realizados sobre esta categoria de materiais e que género de ensaios tinham sido adotados, assim como, quais os resultados obtidos. Em seguida, foi efetuada a descrição da composição do material e dos procedimentos de ensaio adotados. Para os ensaios de caracterização mecânica foram testadas quatro dosagens de fibras, de modo a compreender a influência que uma pequena alteração na dosagem das fibras provoca no comportamento à tração do material. De realçar que o custo das fibras tem um impacto muito significativo no custo total do UHPFRC por metro cúbico (pode representar cerca de 2/3 do custo total), daí a importância de compreender bem a melhorias que se alcançam em termos do comportamento mecânico do UHPFRC com o aumento da dosagem de fibras.

Foram posteriormente realizados os ensaios de durabilidade e, por fim, procedeu-se à discussão e interpretação dos resultados obtidos, incluindo uma comparação com uma mistura desenvolvida anteriormente na FEUP.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos incluindo o presente. Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma descrição pormenorizada de cada capítulo:

O capítulo 1 trata da introdução ao tema desta dissertação, abordando o âmbito e objetivos do trabalho, assim como o plano de trabalhos.

No capítulo 2 apresenta-se o material em estudo, descrevendo a história do desenvolvimento deste material, a descrição das suas características principais, bem como, a apresentação de algumas aplicações do material.

No capítulo 3 descreve-se a campanha experimental desenvolvida para a caracterização das propriedades mecânicas e da durabilidade, a composição do material assim como os procedimentos de amassadura e ensaio.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e a respetiva análise dos resultados.

No capítulo 5 é apresentada a comparação dos resultados obtidos com o UHPFRC comercial e a composição desenvolvida na FEUP.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões finais do trabalho desenvolvido nesta dissertação, assim como os possíveis desenvolvimentos futuros.

No capítulo 7 são colocadas as referências bibliográficas.

# 2

## BETÃO DE ULTRAELEVADO DESEMPRENHO REFORÇADO COM FIBRAS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Durante o século XIX, os progressos alcançados na tecnologia do betão foram muito limitados. O enorme programa de reconstrução após a segunda guerra mundial resultou numa queda substancial na qualidade do betão. Foi só no final da década de 1980 que se deu uma revolução tecnológica, claramente um resultado de abordagens científicas que rapidamente substituíram as abordagens empíricas, que até então eram as únicas disponíveis [4].

No início dos anos 50, quando Otto Graf conseguiu produzir um betão com uma capacidade resistente à compressão de 70 MPa, a indústria da construção, de um modo geral, não demonstrou muito interesse nesse novo produto. Mesmo em 1966, quando Kurt Walz provou que, usando métodos especiais de produção, era possível melhorar a capacidade resistente do betão à compressão até 140 MPa, a indústria mostrou relutância a esta inovação. Só quando os avanços científicos começaram a ganhar mais expressão nos desenvolvimentos de misturas de betão é que foi possível atrair a atenção do mercado, nomeadamente com a possibilidade da adição de pequenas quantidades de sílica de fumo e superplastificantes adequados, que vieram permitir alcançar um betão de alta resistência e com boa trabalhabilidade. Estas inovações permitiram que novas ideias sobre potenciais aplicações pudessem começar a materializar-se [5].

A Figura 2.1 mostra a evolução da resistência à compressão. Os valores exibidos nesta imagem não correspondem a resultados de estudos laboratoriais, mas sim os valores máximos realmente usados na construção de grandes estruturas. Por exemplo os dois últimos pontos desta figura correspondem a:

- A ponte L'Île de Ré, construída por Bouygues entre 1987 e 1988 com 80 MPa [6], que abriu caminho à utilização de betões de elevada resistência em grandes construções.
- O interior da torre de arrefecimento da central nuclear de Cattenom com mais de 2000 vigas pré-fabricadas produzidas entre 1997 e 1999 com uma mistura de UHPFRC, atingindo uma resistência à compressão de 200 MPa [7], sendo esta a primeira aplicação industrial significativa deste material.



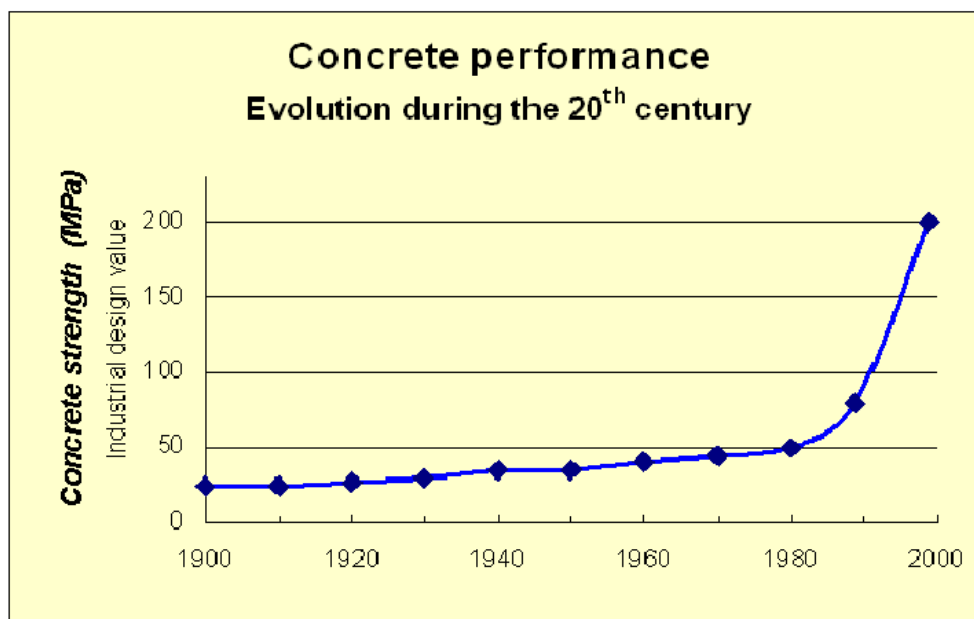


Figura 2.1 – Evolução durante o último século do comportamento do betão à compressão relativo a betões usados em estruturas reais [4]

Com o avanço da tecnologia e capacidade de caracterizar melhor outras propriedades, novas propriedades começaram a ser exigidas, nomeadamente, a durabilidade. Foi possível produzir betões com resistências de compressão até 200 MPa e contendo dosagens de fibras até 2,5% por volume ( $175\text{Kg/m}^3$ ). A fim de produzir betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras com uma resistência à compressão da ordem de 150-200 MPa, é importante respeitar as regras básicas seguintes:

- O tamanho máximo das partículas deve ser inferior ao das misturas tradicionais de betão, porque as partículas grandes traduzem-se em zonas de concentração de tensões que levam a uma diminuição da capacidade resistente do material. Hoje em dia, o tamanho máximo das partículas para um betão de ultraelevado desempenho geralmente é inferior a 2mm. No entanto, também foram desenvolvidos betões de elevado desempenho com um tamanho máximo de partículas de 8mm [5].

- É importante otimizar a densidade de empacotamento de todas as partículas sólidas. Uma elevada densidade de empacotamento pode ser alcançada com a ajuda de materiais finos, o que reduz as tensões de contacto e garante que as micro-fissuras só se formem a partir de um nível de tensão mais elevado. A microestrutura é, principalmente, muito densa, o que resulta não só numa resistência elevada, mas também numa resistência muito maior a todas as formas de ataque que danificam o betão ou a armadura, como por exemplo a penetração de cloretos e a carbonatação [5].

- A quantidade de água utilizada deve ser tal para que o cimento consiga desenvolver todas as suas reações de hidratação. As partículas restantes de cimento não hidratadas, em seguida, atuam como enchimento [5].

- É ainda necessário incorporar uma quantidade suficiente de fibras de aço curtas, a fim de garantir um comportamento à tração bastante melhorado (maior resistência à tração e maior ductilidade) [5].

Hans Hendrik Bache, investigador dinamarquês, foi o primeiro a reconhecer e a aplicar estes princípios. Desenvolveu um material reforçado com uma elevada quantidade de fibras de aço. O material foi denominado de CRC (Compact Reinforced Concrete) e as primeiras publicações datam de 1981 [8].

Este material é ainda hoje produzido, especialmente para o fabrico de elementos pré-fabricados, sendo a Dinamarca o país onde se apostou mais neste produto.

Richard e Cheyrezy aprofundaram as ideias de Bache em 1994. Cooperando com a Lafarge, foi então criada uma nova mistura designada de “Reactive Powder Concrete “. Uma das primeiras aplicações desta mistura envolveu a substituição de vigas de aço por betões de ultraelevado desempenho em torres de arrefecimento de uma central elétrica em Cattenom, na França. As vigas de aço tiveram de ser substituídas por estarem num ambiente extremamente agressivo dentro das torres de arrefecimento e não resistiam aos processos de corrosão a que estavam sujeitas. É de salientar que não foi o facto de esta mistura de betão ter capacidades resistentes muito elevadas que foi determinante na decisão tomada, mas sim a durabilidade deste material em conjugação com a vida útil prevista, sem manutenções e reparações [5] .

Foi a constatação de que este material poderia ser caracterizado não só pela sua capacidade resistente, mas também pelas suas outras propriedades intrínsecas, que conduziu a que este material adquirisse a designação de betão ultraelevado desempenho (UHPC).

Um dos principais desafios que um novo material tem de enfrentar é a competitividade em termos de custo. Nos dias de hoje, os UHPC custam em média 4 a 5 vezes mais do que um betão convencional, o que à primeira vista representa um entrave para a sua aplicação prática. Contudo, deve-se fazer esta análise comparativa tendo em conta o custo de todo o projeto. Um exemplo desta realidade é a ponte pedonal japonesa Sakata Mirai, que possui um peso próprio cerca de 20% menor em comparação com uma solução betão convencional [9] e que por essa mesma razão os custos das fundações foram consequentemente bastante mais reduzidos. De acordo com as informações fornecidas pelos promotores, o custo final do projeto foi 10% inferior que o custo da solução em betão convencional [5] .

## 2.2.COMPOSIÇÃO DO UHPFRC

Em betões correntes, a proporção de água para cimento (A/C) é da ordem de 0,4 para 0,6. Para obter um betão de elevado desempenho, a relação de A/C deve diminuir para valores inferiores a 0,4. Esta redução é possível graças à adição de um adjuvante (superplastificante), que permite a produção de betão com as quantidades mínimas de água (quase apenas a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento), mantendo uma trabalhabilidade adequada. Num betão de elevado desempenho, se desejarmos, podemos complementar a redução de A/C com uma extensão do espectro granular através de adições de tamanho micrómetro ultrafino (geralmente consistindo de sílica ativa), sendo cerca de 100 vezes menor do que o tamanho das partículas de cimento. Para obter um UHPFRC, devemos diminuir ainda mais a razão A/C para valores inferiores a 0,25 (cerca de 0,16 a 0,2).

A Figura 2.2 ilustra como a relação A/C afeta a resistência à compressão da mistura. Deve-se também adicionar uma quantidade significativa de adições ultrafinas (normalmente sílica ativa) na ordem de 20% da massa de cimento. O tamanho do agregado de UHPFRC também é muito pequeno em comparação com o do betão convencional (o maior tamanho das partículas é da ordem de grandeza dos milímetros) e é dada uma maior atenção à natureza dos agregados, que devem apresentar resistência mecânica suficiente para evitar tornarem-se em eventuais pontos frágeis que poderão comprometer a resistência. O material resultante é extremamente compacto e tem características mecânicas e de desempenho de durabilidade notáveis [4] .

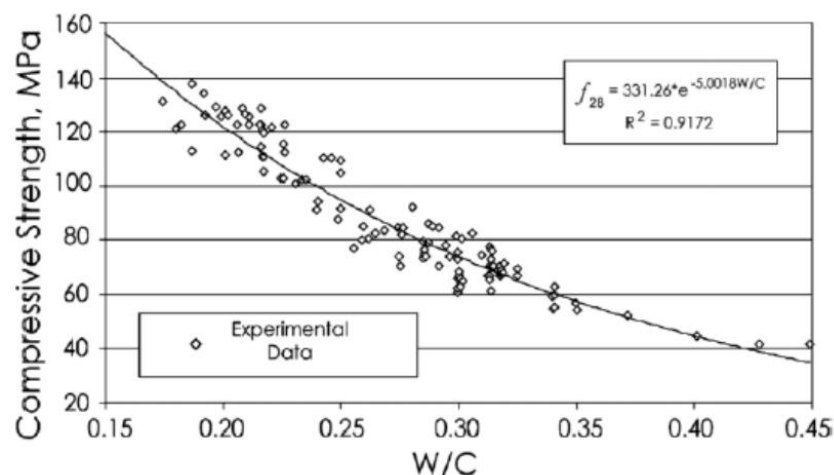


Figura 2.2- Resistência à compressão para diferentes razões água/cimento (A/C) [10]

Na Figura 2.3 encontram-se ilustradas as diferenças entre as composições de um betão convencional e um UHPFRC, mantendo-se o volume de ar nas duas composições. Analisando a figura podemos reparar que o volume de pasta no UHPFRC é maior a 2,5 vezes o volume de pasta presente num betão convencional, devido essencialmente ao volume ocupado pelas partículas grossas presentes num betão convencional [11]. No que se refere à pasta constatamos também que a relação água/ligante, como o esperado, diminuiu de 0,45 para 0,19 entre um betão convencional e um UHPFRC.

Na Figura 2.4 encontra-se representado o comportamento à compressão de um betão convencional (NC), de um betão de elevado desempenho (HPC) e de um betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC). O HPC é um betão que é usado em situações de carga muito elevadas, sejam elas de carácter estático ou dinâmico, e também é recomendável para casos de exposição a ambientes muito agressivos. O UHPFRC apresenta-se como sendo uma evolução relativamente ao desempenho do HPC, principalmente na sua capacidade resistente à compressão e tração, assim como também apresenta melhor ductilidade [12]

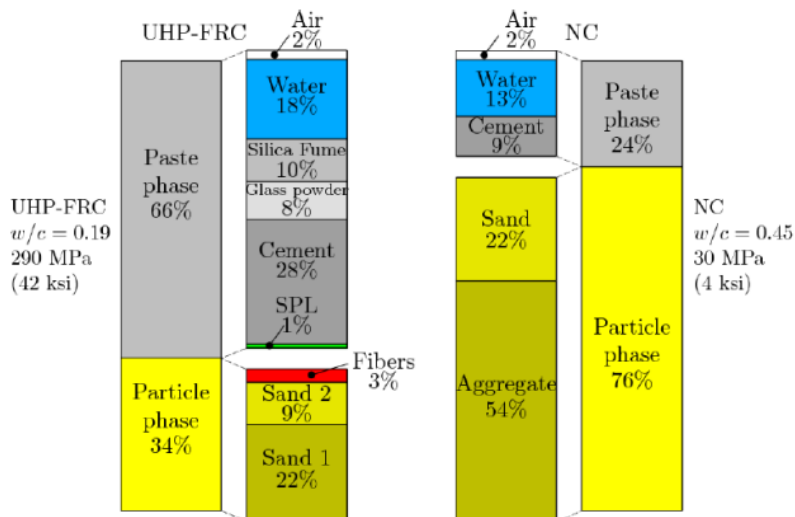


Figura 2.3- Exemplo das proporções na mistura em volume de um UHPFRC e um betão convencional (NC) [13]

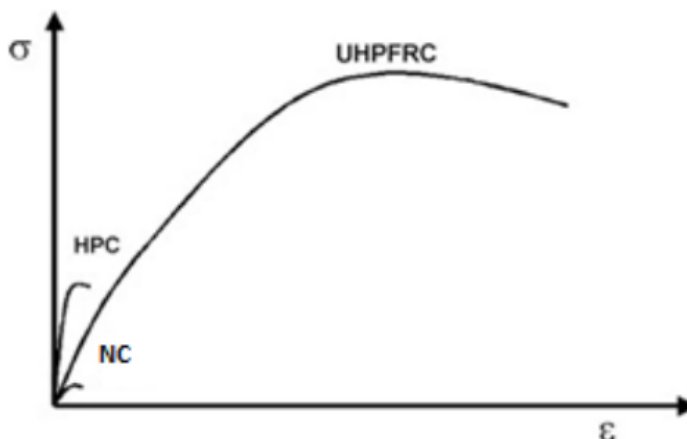


Figura 2.4- Diagramas tensão/extensão em compressão de betões HPC, NC e UHPFRC [10]

Com tal formulação, obtém-se com relativa facilidade a resistência à compressão acima de 150 MPa, mas como consequência, o material torna-se mais frágil, apresentando uma rotura muito frágil em compressão (“explosiva”) com o desaparecimento de qualquer domínio plástico. Para evitar este problema, é necessário adicionar fibras para restaurar o comportamento dúctil na compressão. Para usos estruturais (quando o desempenho mecânico do material é necessário para garantir a resistência estrutural) usam-se tipicamente dosagens de fibras da ordem de 2 a 3% em volume, ou seja, 160 a 240 Kg/m<sup>3</sup>, para garantir um comportamento dúctil em flexão.

Para implementar tais proporções de fibras, elas são geralmente curtas e lisas para perturbarem menos o empacotamento das partículas sólidas. As fibras são, tipicamente, pequenas agulhas em aço de elevada resistência. Na Figura 2.5 são mostrados alguns exemplos de fibras usadas. A sua dimensão deve ser compatível com a dos agregados, apresentando um comprimento de 12 a 20 mm e um diâmetro de 0,1 a 0,3 mm. Alguns UHPFRC incluem vários tamanhos de fibras que podem ter comportamentos complementares (as microfibras podem melhorar a ancoragem das fibras maiores e “costurar” as primeiras micro-fendas). A inclusão das fibras na mistura UHPFRC acrescenta também uma resistência à tração e a corte bastante interessante (cerca de 8 a 11 MPa em tração direta e 25 a 40 MPa em flexão) que permite dispensar totalmente ou parte da armadura passiva.

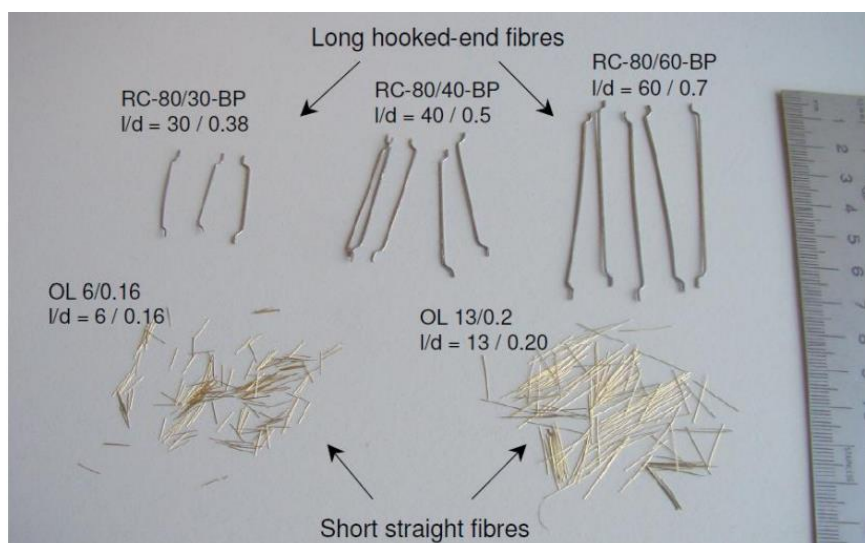


Figura 2.5- Diferentes tipos de fibras e micro-fibras [10].

### 2.3. PROPRIEDADES DO UHPFRC

O betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras pode ser entendido como um betão que apresenta, simultaneamente, as características dos três seguintes tipos de betão (ilustração representada na Figura 2.6):

- Betão reforçado com fibras;
- Betão de elevado desempenho;
- Betão auto compactável.

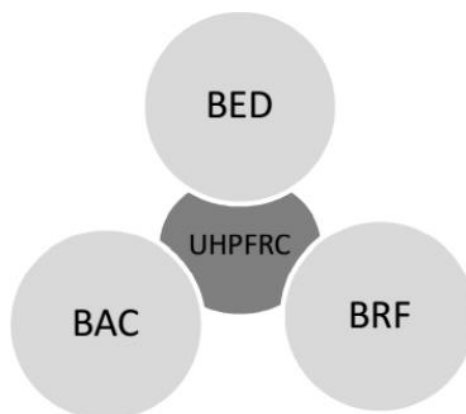


Figura 2.6-Ilustração das famílias de betão que originaram o UHPFRC

As propriedades de um betão auto compactável (BAC) refletem-se na capacidade que uma mistura de betão tem no escoamento no interior dos moldes, depositando-se de forma natural e sem necessidade de vibração. A porosidade e a microestrutura do BAC apresentam características melhoradas relativamente

às encontradas no betão convencional [14]. Na Figura 2.7 é possível verificar a importância dessas propriedades na envoltória da pasta com os grãos de agregado.

As propriedades de um betão reforçado com fibras (BFR) possibilitam um ganho na resistência à tração do UHPFRC, conferem ductilidade ao material e evitam roturas frágeis quando o material é sujeito a esforços de tração. Na Figura 2.7 é possível perceber que a presença de fibras na mistura tem um papel fundamental na limitação da propagação da fissuração.

As propriedades de um betão de elevado desempenho (BED) estão relacionadas com as alterações que permitem que o betão alcance elevadas resistências à compressão, nomeadamente, com a possibilidade de redução da razão A/C e do aumento da densidade de empacotamento das partículas que constituem o esqueleto sólido do betão (ver Figura 2.7).

O comportamento à tração do UHPFRC é muito dependente da distribuição e orientação das fibras. Na maioria das aplicações pretende-se que as fibras se disponham de uma forma aleatória, e com uma distribuição uniforme ao longo do elemento estrutural, para evitar zonas de fragilidade que podem comprometer a resistência do elemento estrutural. Quando se utilizam misturas de UHPFRC que são auto compactáveis é preciso atender à possível influência que o fluxo do material tem na orientação e distribuição final das fibras nos elementos estruturais.

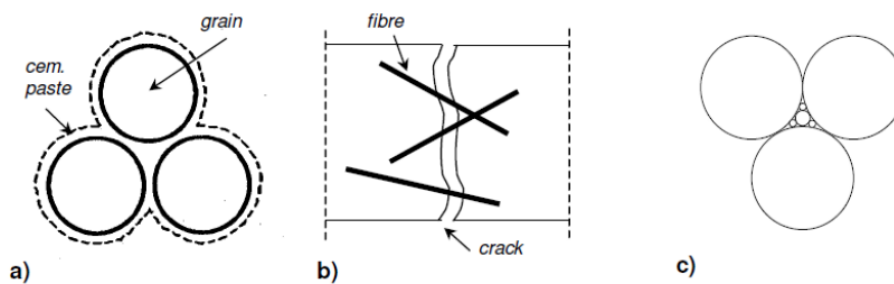


Figura 2.7-Auto-compactabilidade betão. a) camada de pasta que envolve cada grão de agregado. b) Fissura “costurada” pelas fibras. c) Empacotamento ideal onde cada grão pequeno preenche espaços maiores originados pelos grãos de maiores dimensões [2].

### 2.3.1. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA

Alguns UHPFRC são sujeitos a um tratamento térmico aplicado várias horas após o betão ganhar presa. Este tratamento consiste em aquecer o elemento a uma temperatura muito alta (cerca de 90°C) e humidade relativa próxima da saturação por aproximadamente 48 horas. Este tratamento pode aumentar significativamente a durabilidade e eliminar a retração por secagem e reduzir, de forma muito substancial, os efeitos da fluência. No entanto, é também possível aplicar o UHPFRC sem qualquer tratamento térmico, o que não os impede de desenvolver, muito rapidamente, uma resistência superior a 70 MPa depois de algumas horas. Estas misturas costumam apresentar um período dormente mais longo que os betões convencionais. Quando o material começa a ganhar presa, o aumento da resistência é muito rápido [4].

Ao contrário do betão convencional, o UHPFRC tem uma relação A/C muito mais baixa, o que provoca que a parcela da retração autógena seja muito mais significativa que a parcela da retração por secagem. O coeficiente de fluência para UHPFRC sem tratamento térmico é comparável ao coeficiente obtido para um HPC com sílica ativa (o coeficiente de fluência de longo prazo é da ordem de 0,8 a 1,0). Após

um tratamento térmico, o coeficiente de fluência diminui drasticamente (passa para valores entre 0,2 e 0,5) [4]. Esses aspetos têm muitas implicações sobre o desempenho e as condições de uso do UHPFRC:

-No caso do pré-esforço por pré-tensão, um tratamento térmico irá influenciar as perdas de pré-esforço, na verdade, o tratamento térmico começa apenas algumas horas após o fim de presa. É feito após a liberação dos cabos e depois de ser aplicado o pré-esforço, de modo que a retração geral causa perdas de pré-esforço [4].

-Por outro lado, no caso de pré-esforço por pós-tensão, aplicar um tratamento térmico para UHPFRC, antes do esticamento dos cabos tende a reduzir muito significativamente as perdas de pré-esforço devido a uma combinação de falta de retração por secagem e diminuição drástica na deformação por fluência [4].

Essas observações são relevantes no caso do uso de elementos UHPFRC conectados a uma estrutura de metal [15] [16] [17] ou outro material.

### 2.3.2.RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As dispersões obtidas nas resistências à compressão são geralmente baixas devido à qualidade e homogeneidade das pré-misturas comerciais habitualmente usadas na maioria das aplicações práticas. É de realçar que os valores elevados de resistência atingidos (de 150 a 250 MPa) obrigam a reduzir o tamanho dos provetes em comparação com os betões convencionais (caso contrário, seria necessário aumentar a capacidade das prensas de ensaio) e é necessário um cuidado especial na sua preparação. Esses requisitos levam algumas empresas a realizar verificações usando provetes cúbicos pela sua facilidade de fabrico, sendo necessário realizar uma boa calibração e justificar as curvas de correlação entre as resistências obtidas em cubos e aquelas obtidas em provetes cilíndricos [4].

O desenvolvimento das composições de betão têm vindo a fornecer misturas cada vez mais densas que minimizam os vazios e aumentam drasticamente a sua capacidade resistente (de 150 a 250 MPa). No entanto, esta maior compacidade conduz a roturas mais frágeis, o que justifica a necessidade de incorporar fibras nestes betões [4].

### 2.3.3.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O maior desafio para as misturas de UHPFRC, e o que os distingue radicalmente de outros betões, é o seu comportamento à tração, em particular, após ser atingida a resistência da matriz cimentícia. Com um controle correto na preparação da mistura (formulação, tempo de mistura), consegue-se uma baixa dispersão da resistência à tração da matriz cimentícia. No entanto, a questão fundamental deste material é obter controle e garantir a resistência após a fissuração em qualquer estrutura sabendo que a resistência obtida dependerá da dosagem e orientação das fibras, que dependem das condições de colocação:

-Qualquer fluxo potencial durante a amassadura tende a orientar as fibras na direção desse mesmo fluxo [4];

-As fibras próximas às paredes tendem a ser orientadas paralelamente a essas mesmas paredes, como ilustrado na Figura 2.8. Este fenómeno ocorre apenas para uma profundidade menor ou igual ao comprimento das fibras. Tem tanto mais influência na resistência à tração quanto mais a espessura do elemento se aproximar do comprimento das fibras [4].

-Em alguns casos pode ocorrer uma orientação preferencial das fibras devido à ação da gravidade (assentamento das fibras) antes de ser atingida a presa [4].

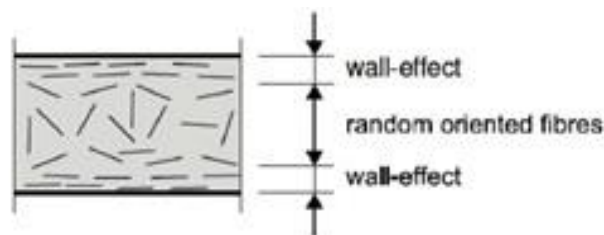


Figura 2.8- Efeito-Parede [18].

## 2.4. DURABILIDADE

O tempo de vida útil das estruturas está condicionada pela sua durabilidade. Devido ao número elevado de estruturas em betão armado degradadas atualmente, as questões relacionadas com os parâmetros de durabilidade são cada vez mais importantes. Estruturas mais duráveis são também mais sustentáveis, uma vez que é possível uma melhor gestão de recursos naturais e minimizam-se os resíduos inerentes à construção. Uma estrutura é considerada durável se durante o seu funcionamento em serviço conservar os requisitos de projeto em termos de segurança, funcionalidade e estética, sem necessitar de uma manutenção não prevista inicialmente [19].

Os efeitos provocados pelo meio ambiente nas estruturas de betão são de tal modo complexos que, de modo a melhorar o desempenho das estruturas de betão, não se pode apenas melhorar a qualidade dos materiais utilizados. Para se conseguir um melhor desempenho terá que se atuar na fase do projeto de estrutura e arquitetura, a nível dos processos de execução da obra e nos procedimentos relativos à sua inspeção e manutenção [20].

Os principais fatores que influenciam a durabilidade e as suas consequências práticas no desempenho de uma estrutura de betão podem ser descritos como ilustrado na Figura 2.9 :

- Projeto estrutural (especificação do betão, pormenorização e cofragem);
- Materiais (betão e armaduras);
- Execução (desempenho dos operários);
- Cura (humidade e calor).

Os quatro fatores mencionados estão diretamente relacionados com a qualidade de uma estrutura de betão e, conseqüentemente, com o desempenho ao longo da sua vida útil. Esses fatores definem a natureza e a distribuição dos poros no material, e por conseguinte, influenciam os mecanismos de transporte de substâncias na sua rede porosa, levando a uma degradação física, química e/ou biológica, mais ou menos rápida, do material incluindo as armaduras do betão, de modo que, irá afetar a durabilidade da estrutura [20].

A durabilidade de uma estrutura de betão armado depende sobretudo da capacidade com que a camada superficial de betão protege as armaduras internas do “ataque provocado”, essencialmente, pela entrada de agentes externos na rede porosa. De modo que, uma maior durabilidade é conseguida se fenómenos como a absorção de água por capilaridade, a carbonatação e a penetração de cloretos forem colmatados. A composição e as propriedades do betão, assim como a espessura de recobrimento das armaduras é que influenciam a resistência de uma estrutura a esses mesmos fenómenos. [21] [22].



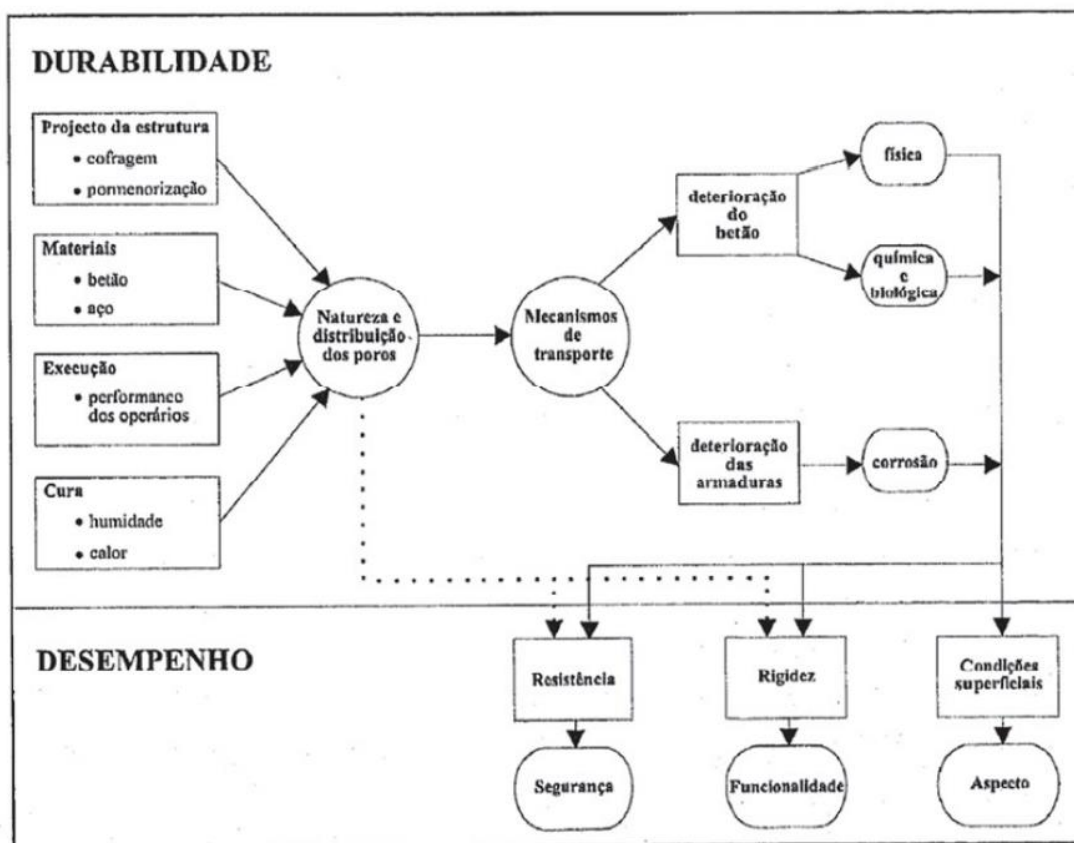


Figura 2.9- – Conceitos de durabilidade e desempenho de uma estrutura de betão [20].

A durabilidade do betão armado pode ser afetada pelos seguintes fatores [23]:

- Condições ambientais a que o betão está exposto, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cloretos, humidade [23];
- Reações químicas expansivas internas, como é o caso de reações álcalis-agregado, e reações sulfáticas [23];
- Ações físicas que normalmente são tratadas no cálculo estrutural, por exemplo, ações térmicas, retração, fluência, desgaste e erosão [23];

A especificação LNEC E-464 [24], apresenta as classes de exposição do betão baseadas nas norma NP EN 206-1, sendo ilustradas nos quadros seguintes:

**Quadro 1 – Sem risco de corrosão ou ataque**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
X0	Para betão sem armaduras: Todas as exposições, excepto ao gelo/degelo, abrasão ou ao ataque químico	Betão enterrado em solo não agressivo. Betão permanentemente submerso em água não agressiva. Betão com ciclos de molhagem/secagem não sujeito a abrasão, gelo/degelo ou ataque químico.
	Para betão armado: muito seco	Betão armado em ambiente muito seco. Betão no interior de edifícios com muito baixa humidade do ar.

Figura 2.10- – Sem risco de corrosão ou ataque [24].

**Quadro 2 – Corrosão induzida por carbonatação**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com excepção das áreas com humidade elevada. Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva.
XC2	Húmido, raramente seco	Betão armado enterrado em solo não agressivo. Betão armado sujeito a longos períodos de contacto com água não agressiva.
XC3	Moderadamente húmido	Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento. Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g., cozinhas, casas de banho).
XC4	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem. Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2

Figura 2.11- Corrosão induzida por carbonatação [24].

**Quadro 3 – Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XD1	Moderadamente húmido	Betão armado em partes de pontes afastadas da acção directa dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Húmido, raramente seco	Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; piscinas.
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado directamente afectado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos <sup>(1)</sup> . Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (v.g., algumas piscinas ou partes delas). Lajes de parques de estacionamento de automóveis <sup>(2)</sup> e outros pavimentos expostos a sais contendo cloretos.

(1) No nosso país estas situações deverão ser consideradas na classe XD1; (2) Idem, se relevante

Figura 2.12- Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar [24].

**Quadro 4 – Corrosão induzida por cloretos da água do mar**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com água do mar	Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais. Betão armado em áreas costeiras perto do mar, directamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios.
XS2	Submersão permanente	Betão armado permanentemente submerso.
XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos	Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos, desde 10 m acima do nível superior das marés (5 m na costa Sul de Portugal Continental) até 1 m abaixo do nível inferior das marés. Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., túneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de protecção suplementares.

Figura 2.13- Corrosão induzida por cloretos da água do mar [24].

**Quadro 5 – Ataque pelo gelo/degelo**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XF1	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, sem produtos descongelantes	Betão em superfícies verticais expostas à chuva e ao gelo. Betão em superfícies não verticais mas expostas à chuva ou gelo.
XF2	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, com produtos descongelantes	Betão, tal como nas pontes, classificável como XF1, mas exposto aos sais descongelantes directa ou indirectamente.

Figura 2.14- Ataque pelo gelo/degelo [24].

**Quadro 6 – Ataque químico**

XA1	Ambiente químico ligeiramente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno
XA2	Ambiente químico moderadamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno
XA3	Ambiente químico altamente agressivo, de acordo com a EN 206-1, Quadro 2	Terrenos naturais e água no terreno

Figura 2.15- Ataque químico [24].

## 2.5. APLICAÇÕES DO UHPFRC

A primeira ponte norte americana a usar UHPFRC foi construída em Sherbrooke, Quebec, Canadá em 1997 [25]. Esta era uma ponte pedonal pré-fabricada e pré-esforçada com estrutura aberta em treliça. A FHWA (Federal Highway Administration) começou a investigar o uso destes materiais para infraestruturas rodoviárias em 2001 e tem trabalhado com o departamento de transporte do estado para implementar a tecnologia desde 2002. A primeira ponte dos EUA a empregar o UHPFRC foi construída em Wapello County, Iowa em 2006, esta ponte é conhecida como Mars Hill Bridge. A ponte possui três vigas deste material pré-fabricadas e pré-esforçadas. As geometrias da secção transversal das vigas foram otimizadas para aproveitar as propriedades mecânicas do material. Desde essas aplicações iniciais, o interesse no uso do UHPFRC, como material de construção de pontes, aumentou significativamente. Não só tem havido uma quantidade significativa de trabalhos de investigação conduzidos pelo FHWA, como por grupos de investigação e agências de transportes do estado, mas o próprio número de pontes construídas com este material tem aumentado de forma significativa desde

2006. Esta tendência é apresentada na Figura 2.16 e na Figura 2.17, que mostram o número cumulativo de pontes construídas desde 2006 nos EUA e Canadá que empregam este material. Até ao fim de 2016, havia mais de 180 pontes construídas nos EUA e Canadá [26] [27].

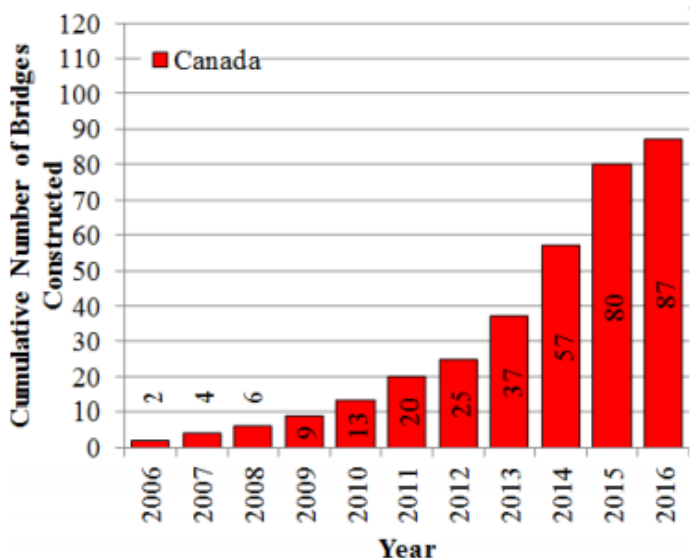


Figura 2.16-Dados da construção de pontes com UHPFRC nos últimos anos no Canadá [28]

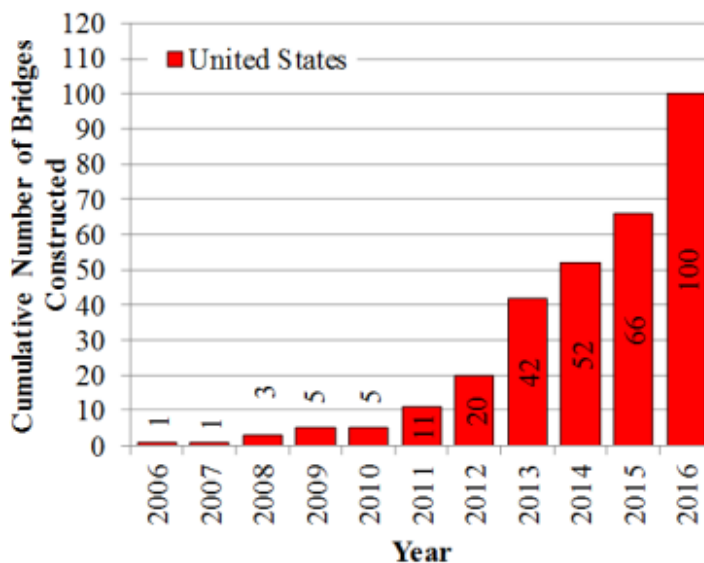


Figura 2.17- Dados da construção de pontes com UHPFRC nos últimos anos nos EUA [28]

Atualmente, a aplicação norte-americana mais popular de UHPFRC na construção de pontes é para ligações entre elementos de ponte pré-fabricados. Além disso, este é também o ponto mais comum para proprietários de pontes interessados em adicionar UHPFRC aos seus projetos e construções.

### 2.5.1. LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE PONTES

Os elementos pré-fabricados oferecem vantagens em termos de qualidade dos componentes e cronograma de construção. No entanto, o seu uso apresenta desafios em termos de montagem de elementos e desempenho das ligações instaladas. As ligações entre os elementos pré-fabricados das pontes e os seus elementos adjacentes são normalmente criados usando armaduras de reforço entrelaçadas. Essas regiões de ligação são formadas e preenchidas com materiais de argamassa produzidos em obra. Essas ligações fornecem continuidade estrutural e são essenciais para a transferência de forças entre elementos [28].

As zonas de ligação, que naturalmente, são mais suscetíveis a “ataques” do meio ambiente, são o local onde mais frequentemente se coloca um reforço com materiais UHPFRC, conseguindo-se assim aumentar a capacidade resistente aos ambientes agressivos que possam existir, face à resistência que um betão convencional acarreta. As Figura 2.18, Figura 2.19 e Figura 2.20 ilustram algumas localizações comuns onde o UHPFRC é usado para realizar a ligação entre tabuleiros adjacentes de pontes pré-fabricadas [28].

Duas aplicações adicionais de ligações com UHPFRC são mostradas na Figura 2.21 e na Figura 2.22. A Figura 2.21 ilustra como o UHPFRC tem sido usado para conectar vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas adjacentes. O uso deste material nesta aplicação elimina a necessidade de pós-tensão transversal na estrutura. Na verdade, esse detalhe cria um reforço contínuo de betão superficial na parte superior das zonas de ligação capaz de transmitir os esforços de corte, flexão, tração axial e compressão axial entre os elementos conectados. Isso simplifica muito o projeto e construção desses sistemas [28].

A Figura 2.22 ilustra o uso do material na zona de ligação entre um pilar da ponte e uma viga. Os pilares de betão armado normalmente empregam armaduras de maior diâmetro em comparação com outros elementos, como os tabuleiros de pontes. Assim, o comprimento de amarração necessário para desenvolver essas ligações pode ser muito grande. Isso pode ser especialmente desafiante ao tentar usar sistemas pré-fabricados. Usando o material UHPFRC, os detalhes da ligação pilar-viga podem ser muito simplificados. [28].

Concluída em 2014, a ponte rodoviária Hooper é um exemplo de uma ponte em que o UHPFRC foi usado em ligações existentes entre os pilares de betão armado e as vigas pré-fabricadas, tal como indicado na Figura 2.22. A reconstrução da superestrutura também empregou o uso de painéis pré-fabricados de betão. Usando materiais de argamassa de conexão convencionais, o comprimento da emenda sobreposta seria superior a 1 metro. A conexão foi reduzida para 305mm de comprimento. Além disso, o uso de UHPFRC reduziu a necessidade de reforço secundário dentro da região de conexão [28].

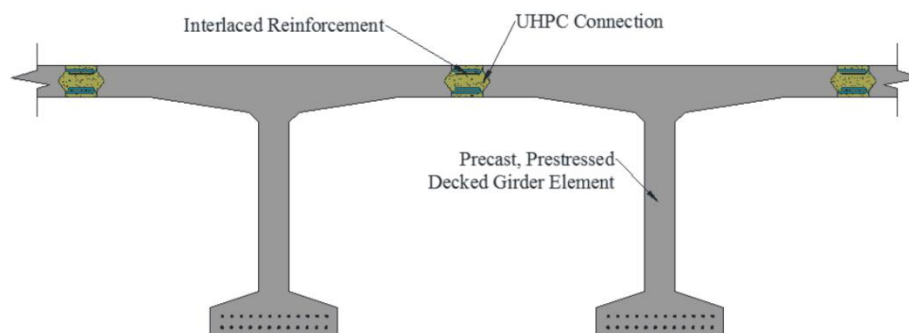


Figura 2.18-Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos de vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas com painéis pré-fabricados [19].

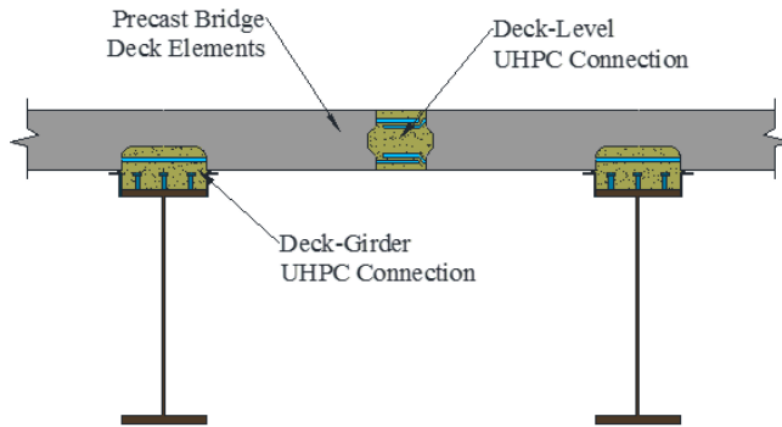


Figura 2.19- Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos de plataforma da ponte pré-fabricados e vigas de suporte [28].

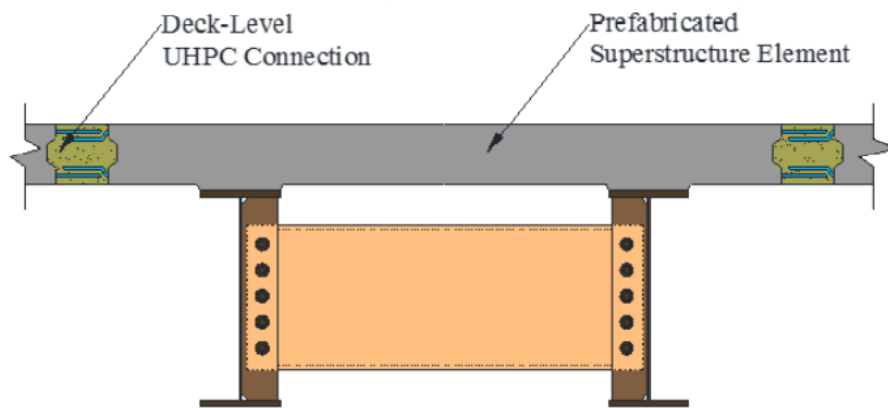


Figura 2.20-Ligações realizadas com UHPFRC entre elementos modulares da superestrutura [19].

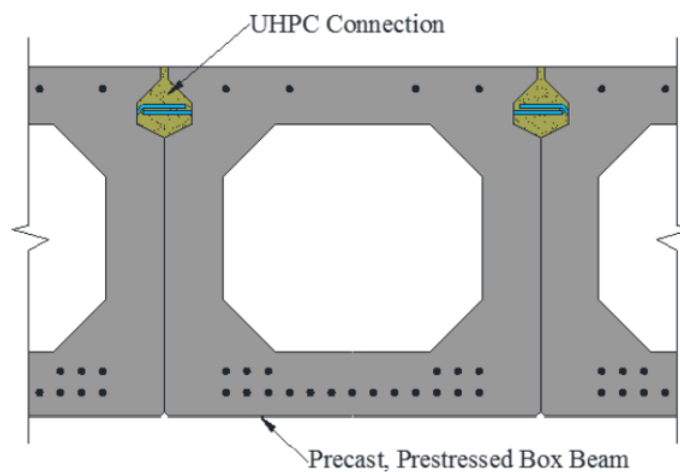


Figura 2.21-Ligações realizadas com UHPFRC entre vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas adjacentes [28].

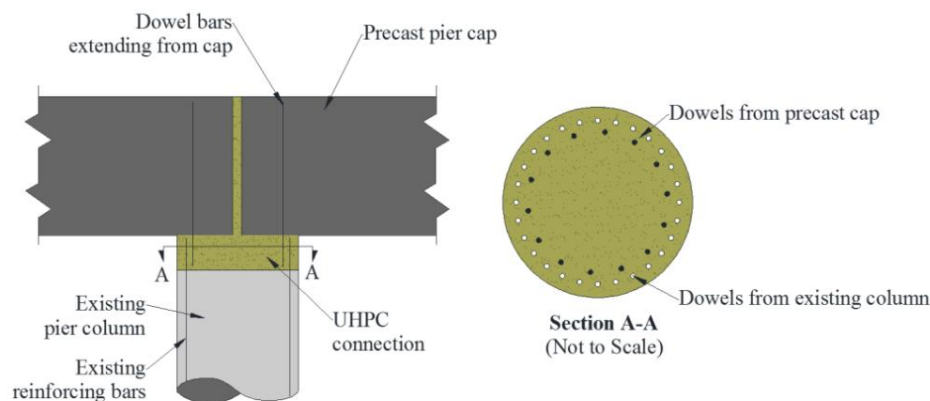


Figura 2.22-Ligações realizadas com UHPFRC entre um pilar de uma ponte existente e um novo elemento pré-fabricado [28].

### 2.5.2.SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO BASEADAS EM UHPFRC

Algumas das soluções de reabilitação de pontes baseadas em UHPFRC, sendo consideradas na América do Norte, incluem sobreposições com o uso deste material com lajes de ligação em UHPFRC para reabilitar juntas de expansão deterioradas, usando um revestimento com esse material para reabilitar vigas de aço e pilares [28].

O uso de UHPFRC como uma camada aplicada para a reabilitação de pontes de betão armado deterioradas é uma solução emergente que pode potencialmente permitir décadas de serviço da ponte renovada sem a necessidade de uma substituição completa do tabuleiro da ponte, conceito ilustrado na Figura 2.23. Como um material de sobreposição, o UHPFRC pode fornecer um reforço estrutural e proteção contra a entrada de contaminantes usando uma camada de material de apenas 25mm a 50mm. Isso minimiza o volume necessário de material, diminuindo assim o peso próprio adicional na estrutura da ponte em comparação com algumas soluções tradicionais de sobreposição. A investigação e desenvolvimento na base deste conceito foi desenvolvida na Suíça e foi implementada em várias pontes rodoviárias suíças. Um exemplo notável da aplicação deste conceito foi no viaduto de Chillon, com 2,1 Km de extensão, que faz fronteira com as margens do lago de Genebra [28].

Este conceito viu a sua primeira implementação nos Estados Unidos em maio de 2016 num sistema reforçado de três vãos com lajes de betão localizada em Brandon, Iowa. Esta ponte foi projetada e construída na década de 1960, e embora tenha um baixo tráfego médio diário, transporta grandes camiões com carregamento agrícola. O tabuleiro da ponte estava a começar a apresentar zonas degradadas ao longo do eixo mais próximo aos drenos e em cada extremidade nas juntas de dilatação. É provável que a deterioração esteja relacionada com a entrada de água, carregada com cloretos no betão, e passando pelas juntas de dilatação, levando à corrosão da armadura e ao desgaste relacionado com os ciclos de gelo-degelo. A deterioração progrediu ao ponto de serem necessárias ações de manutenção. Uma solução de reforço com UHPFRC foi selecionada para reparar o tabuleiro deteriorado. Este projeto foi considerado um projeto de demonstração para soluções com camadas de reforço de UHPFRC [28].

O departamento de transportes de Connecticut tem liderado esforços para desenvolver um sistema baseado em soluções de UHPFRC para reparação de vigas de aço deterioradas, por meio de um trabalho da Universidade de Connecticut [29]. Conceitos semelhantes ao da Figura 2.24 foram estudados em larga escala, sendo realizados vários testes experimentais e modelação numérica detalhada. O aço



corroído é removido da viga e são soldados conectores ao aço intacto. O UHPFRC permite o aumento da resistência ao corte da viga, bem como o aumento da resistência à flexão no suporte.

Por último, a adição deste material na reabilitação de estruturas foi também identificado como uma solução emergente para atualizar a força e ductilidade de elementos de suporte da superestrutura, como estacas cravadas e pilares das pontes. Este conceito é ilustrado na Figura 2.25, que mostra uma estaca de betão ou o pilar de uma ponte empregando um revestimento de UHPFRC. Tradicionalmente, as estacas e pilares são reabilitadas usando um reforço baseado num revestimento com um molde de aço pré-fabricado, lâminas de polímero reforçadas com fibras de carbono ou então uma camada volumosa de betão como revestimento. Investigadores canadianos demonstraram que o desempenho sísmico de um pilar de uma ponte com emendas de sobreposição deficientes na zona da dobradiça pode ser significativamente melhorado com um revestimento de UHPFRC [30].

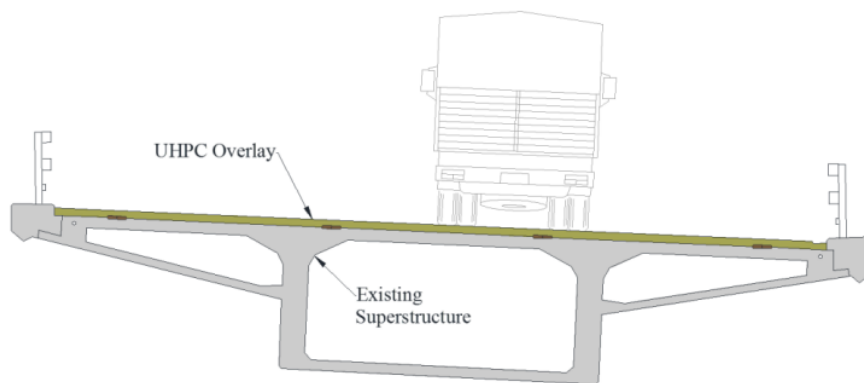


Figura 2.23-Sobreposição de um convés de uma ponte usando UHPFRC [28].

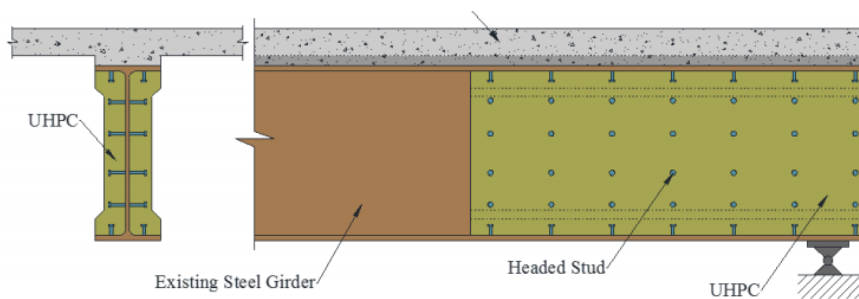


Figura 2.24-Reforço de uma viga de aço existente usando um revestimento em UHPFRC [28].



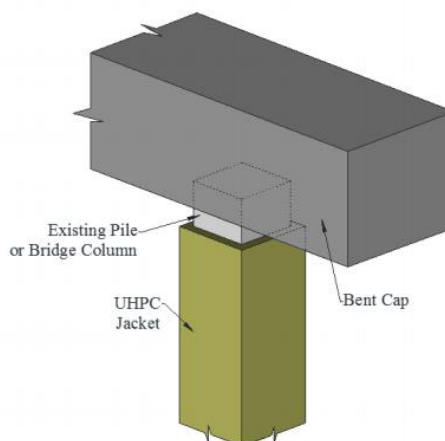


Figura 2.25-Reforço de uma estaca já existente ou de um pilar de uma ponte usando UHPFRC [28].

### 2.5.3.ELEMENTOS DE PONTES INTEGRALMENTE REALIZADOS COM UHPFRC

As propriedades mecânicas e de durabilidade do UHPFRC permitem modificações benéficas em relação a soluções de componentes de pontes em betão convencional. Estas também permitem o desenvolvimento de componentes estruturais, anteriormente consideradas impraticáveis. Usando o UHPFRC, os sistemas de vigas pré-fabricadas podem ser desenvolvidos com ênfase na abordagem do seu transporte e também na criação de pontes mais duradouras por meio de uma maior ductilidade que este material acarreta ou permitindo que os vãos da superestrutura sejam mais leves.

Em todos os casos em que os elementos de uma ponte foram integralmente realizados em UHPFRC na América do Norte, esses elementos eram pré-fabricados. Inaugurada em 2006, a ponte Mars Hill foi a primeira ponte rodoviária nos Estados Unidos a usar integralmente este material. Esta ponte de 33,5m de extensão foi originalmente projetada usando vigas pré-fabricadas de betão convencional, e foi planeada para ser uma ponte de 3 vãos com dois pilares intermédios. Usando as propriedades do UHPFRC, a ponte poderia ser construída com um único vão com 3 vigas de suporte com um espaçamento de 2,7m entre elas. A viga original, com perfil em T com 1143mm de profundidade, foi melhorada de modo a fazer um uso mais otimizado das propriedades do material. A viga que daí resultou era 25% mais leve do que a original. Uma comparação entre a viga original e a viga otimizada é mostrada na Figura 2.26 [28].

Investigadores da Iowa State University (ISU) desenvolveram um novo perfil H pré-fabricado em UHPFRC para fundações profundas [31], como mostrado na Figura 2.27. Usando este material nestes perfis foi possível reduzir a secção transversal em comparação com o padrão de estacas pré-fabricadas e pré-esforçadas em betão convencional sem comprometer a resistência da estaca. A secção transversal reduzida também melhorou a facilidade de colocação da própria estaca com a inclinação pretendida. Tendo aproximadamente o mesmo peso de uma estaca de aço de tamanho semelhante, a estaca em UHPFRC era mais leve, mais fácil de manusear e transportar do que estacas em betão convencional. As características melhoradas de durabilidade podem reduzir potencialmente os custos de manutenção e ajudam a prolongar a vida útil de algumas pontes, especialmente, aquelas sujeitas a ambientes mais agressivos [28].

Vários investigadores do TFHRC (Turner-Fairbank Highway Research Center) desenvolveram e testaram uma série de elementos estruturais em forma de pi, aqui referidas como vigas mestras. Uma ilustração dessas vigas é mostrada na Figura 2.28. Duas gerações de vigas foram testadas experimentalmente e uma família dessas vigas foi criada através de um extenso estudo analítico usando

a análise de elementos finitos [31] [32] [33]. As vigas mestras foram desenvolvidas para alcançar especificamente as propriedades mecânicas avançadas de UHPFRC, sendo desenvolvidas para serem leves e de perfil reduzido.

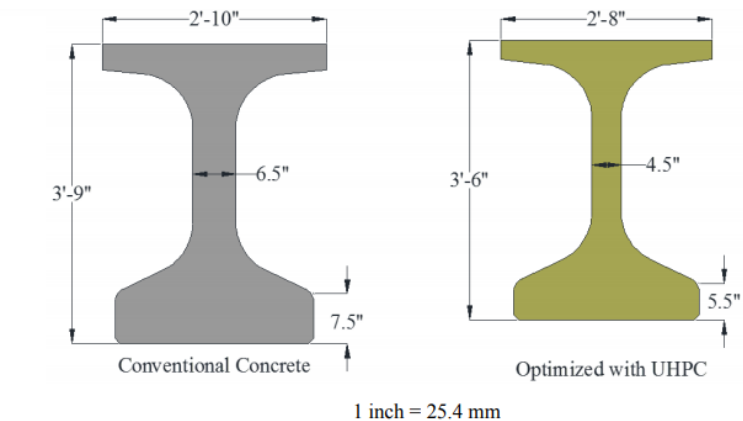


Figura 2.26-Comparação de vigas de uma ponte pré-esforçadas para a ponte Mars Hill, uma em betão convencional e a outra em UHPFRC [28].

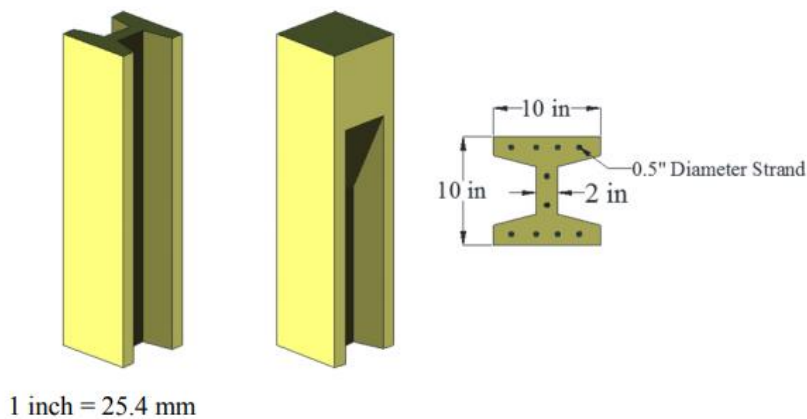


Figura 2.27-Estacas em perfil H pré-fabricadas e pré-esforçadas [28].



Figura 2.28-Elemento de viga em forma de pi realizado em UHPFRC, pré-fabricado e pré-esforçado [28].

## 2.6. PERSPETIVA SOCIAL, ECONÓMICA E DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Em termos de emissões de CO<sub>2</sub> inerentes à produção de materiais UHPFRC, é de salientar que estes materiais contêm mais volume de cimento do que um betão convencional, e que portanto, produzem mais CO<sub>2</sub> e consomem mais energia na sua produção. No entanto, a experiência com o UHPFRC mostra que, se usado de forma adequada, os elementos estruturais produzidos com estes materiais podem ter dimensões muito mais reduzidas em comparação a elementos estruturais de betão convencional, com as mesmas resistências, ao ponto que, numa análise global da estrutura, poder-se observar, que de facto, as emissões de CO<sub>2</sub> são inferiores para estruturas em UHPFRC [4].

A estrutura de UHPFRC fornece, para todos os efeitos, um ligeiro ganho em termos de pegada de CO<sub>2</sub> inicial e energia em comparação com uma solução convencional. Também confere um ganho significativo em termos de durabilidade, leveza e economia global do material. Portanto, é importante incorporar uma antecipação de ganhos de sustentabilidade possibilitados por soluções UHPFRC, isto é particularmente relevante na busca de estruturas com uma vida útil extensa. No futuro, a escolha de um material em detrimento de outro numa obra será em função da vida útil de cada material. Considerações de sustentabilidade terão cada vez mais importância e por essa mesma razão é necessário ter em conta esse aspeto [4].

Um exemplo prático desta temática é o caso da ponte Gärtnerplatz em Kassel. Esta ponte foi concebida usando um projeto híbrido com uma estrutura treliçada, e para a sua construção foi realizado um estudo comparativo entre um projeto de uma ponte pré-esforçada de um betão convencional e uma ponte construída na sua totalidade em UHPFRC, apresentando as mesmas condições de implantação, nomeadamente, o mesmo vão e a mesma capacidade resistente de carga, no âmbito de uma avaliação da vida útil da estrutura. O resultado obtido foi o de que a produção e a manutenção da solução realizada integralmente com o material UHPFRC causaria apenas 40% das emissões de CO<sub>2</sub> de uma ponte realizada em betão convencional. Estes resultados demonstram bem as potencialidades, em termos de sustentabilidade, que os materiais UHPFRC conseguem atingir [34].

Os desafios que o setor da construção enfrenta nos dias de hoje são bem conhecidos. A construção é responsável por entre 35 e 40% do gasto de energia e entre 35 e 40% das emissões de gases de efeito de estufa. Este é certamente o setor em que o progresso mais significativo deve ser alcançado ao longo da próxima década para atender aos desafios ambientais na era vindoura do aquecimento global. O material mais usado na construção é o betão convencional, que já chega a consumos de material de mais de 20 mil milhões de toneladas por ano. O betão é e vai continuar a ser a espinha dorsal para o desenvolvimento sustentável da nossa sociedade. Nenhum outro material de construção (metal, madeira, tijolo, etc.) está disponível em quantidade significativa no nosso planeta, e nenhum desses materiais pode chegar a mil milhões de toneladas por ano para fins de construção [34].

Os desafios ambientais que se colocam, nomeadamente energia, recursos naturais, mudanças climáticas, etc., apresentam, portanto, muitas oportunidades para os cientistas e engenheiros poderem causar um impacto duradouro nos benefícios da sua profissão e da sociedade em geral. Como tal, o desenvolvimento e implementação do UHPFRC pode um dia ser visto como apenas o início de uma nova era do que é verdadeiramente o desenvolvimento sustentável do betão como um material a granel de alta tecnologia na vanguarda dos materiais da ciência e engenharia que podem ser ajustados, não apenas para atender aos clássicos requisitos de resistência, rigidez e durabilidade, mas também para contribuir para a redução da pegada ambiental do nosso consumo de betão. Assim, será adicionado um novo “valor de betão verde” para o desenvolvimento da nossa sociedade em termos de crescimento económico e progresso social. Esses três componentes (crescimento económico, desenvolvimento social

e proteção ambiental) são a definição de desenvolvimento sustentável conforme estabelecido na declaração do Rio de Janeiro sobre o meio ambiente 1992 [4] .

## 3

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

## 3.1. INTRODUÇÃO

No âmbito desta dissertação e do projeto de investigação HIPERSLAB (PTDC/ECI-EST/30511/2017), em desenvolvimento no Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural (LABEST), foram realizados vários ensaios com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico e de durabilidade de uma mistura comercial de UHPFRC, que por motivos de confidencialidade, não será identificada neste trabalho.

Este capítulo inclui ensaios com 4 dosagens de fibras (1%, 2%, 3% e 4% por volume) com o intuito de perceber a influência da dosagem de fibras no comportamento à tração do material, suportando a escolha da dosagem de fibras a adotar. É de realçar que em grande parte das aplicações práticas a dosagem de fibras mais usual é de 2%. Um dos principais motivos que justifica essa escolha está relacionada com o elevado custo das fibras em relação ao custo total de todos os componentes do material.

Neste capítulo serão descritos os ensaios realizados bem como as normas seguidas na sua realização. Todos os ensaios foram realizados no LABEST do Departamento de Engenharia Civil da FEUP. Na Tabela 3.1 são referidos os ensaios realizados e as normas seguidas. Na Tabela 3.2 apresentam-se as características dos provetes utilizados e as idades dos ensaios.

Tabela 3.1- Ensaios realizados durante a campanha experimental.

Ensaio	Normas / Recomendações
Ensaio de espalhamento	EFNARC [35]
Resistência à Compressão	NP EN 12390-3 [36]
Resistência à Tração	Procedimento interno LABEST/FEUP [37]
Ensaio de Arrancamento	EN 1542; EN 1015-12; EN 1348
Resistividade Elétrica	RILEM TC-154 [38]
Absorção de Água por Capilaridade	LNEC E 393 [39]; RILEM TC 116-PCD [40]
Penetração de Cloretos	LNEC E 463 [41]
Carbonatação	RILEM CPC-18 [42]
Porosidade e dimensão dos poros	MIP (técnica)

Tabela 3.2- Características dos provetes utilizados e idades dos ensaios.

Ensaio	Geometria do provete	Dimensões (m)	Nº de provetes	% de fibras por vol.	Idade do ensaio (dias)
Resistência à Compressão	Cubo	L=0,100m	3	2%	28
Resistência à Tração	Dog Bone	Figura 3.1	5 5 5 5	1% 2% 3% 4%	28
Resistividade Elétrica	Cilindro	D=0,100m; h=0,250m	1	0%	Ao longo do tempo
Absorção de Água por Capilaridade	Prisma	L <sub>1</sub> =0,040m; L <sub>2</sub> =0,040m; h=0,160m	6	0%	28
Penetração de Cloretos	Cilindro	D=0,100m; h=0,100m	4	0%	28
Carbonatação	Prisma	L <sub>1</sub> =0,040m; L <sub>2</sub> =0,040m; h=0,16m	2	0%	28
MIP	cilindros	Dimensão reduzida	Não especificado	0%	28

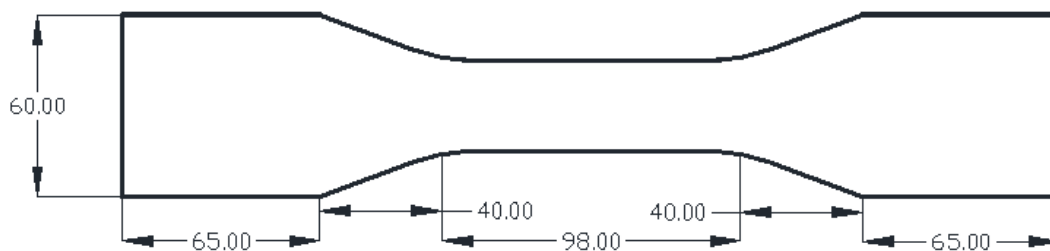


Figura 3.1-Geometria do provete de formato de Dog Bone (dimensões em mm) [37]

### 3.2. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

#### 3.2.1. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Foi seguido um procedimento de amassadura estudado anteriormente adaptasse adaptado à mistura comercial de UHPFRC e à misturadora disponível na FEUP, de forma a obter uma mistura autocompactável. A Figura 3.2 ilustra o procedimento de amassadura. É de realçar que a fase de introdução “Premix 2” só deve ocorrer após a mistura passar para uma fase fluida.

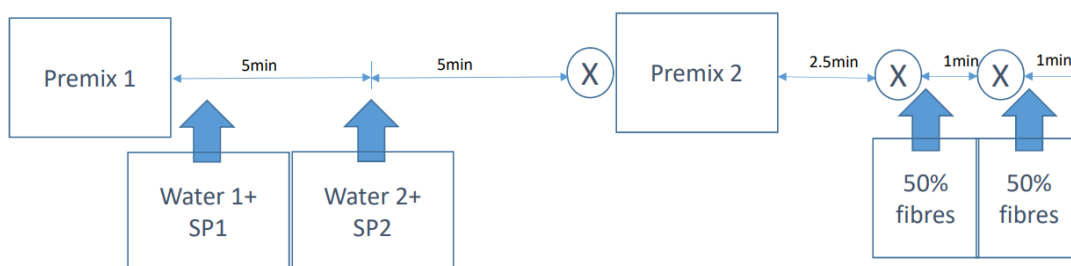


Figura 3.2-Procedimento de amassadura

Com base no procedimento de amassadura, foram preparadas as quantidades de cada material a utilizar, tendo sempre as quantidades de material para a primeira parte de mistura (Premix 1 + água 1 + adjuvante 1) e para a segunda parte da amassadura (Premix 2 + água 2 + adjuvante 2). Na Figura 3.3 encontram-se ilustrados os constituintes da mistura, sendo que a pré-mistura consiste no conjunto dos constituintes secos usados na produção desta mistura comercial UHPFRC e encontra-se ilustrada na imagem da esquerda, enquanto na imagem da direita podemos identificar a água e o adjuvante, sendo que o adjuvante 1 e 2 são o mesmo, apenas com a diferença em termos de quantidade.



Figura 3.3- Materiais constituintes da mistura de UHPFRC

Para a realização dos ensaios mecânicos foram incorporadas na mistura fibras metálicas lisas  $l_f=14\text{mm}$  e  $\phi_f=0,2\text{mm}$  de elevada resistência. Como já mencionado anteriormente, foram realizadas amassaduras com 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de fibras, em termos de volume. A Figura 3.4 ilustra a misturadora usada neste trabalho.



Figura 3.4-Misturadora usada neste estudo

Ao longo desta dissertação foi necessária a realização de diversas amassaduras para a realização de todos os ensaios já mencionados. As amassaduras que foram efetuadas para a realização dos ensaios descritos na Tabela 3.1 seguiram os procedimentos de amassadura representados na Figura 3.2 e tomaram como proporções de componentes as descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3-Proporções dos constituintes usados nas amassaduras

1º parte da amassadura	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	2º parte da amassadura	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Fibras	Massa (kg/m <sup>3</sup> )
Pré-mistura 1	1729,8	Pré-mistura 2	404,1	0-4%	0-314
Água 1	104,10	Água 2	24,32		
Adjuvante 1	28,60	Adjuvante 2	6,68		

### 3.2.2. TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade nos betões é um dos aspetos fundamentais, pois é uma das propriedades que está relacionada com a capacidade de um betão se adaptar a uma determinada geometria pretendida e mede também a facilidade com que o betão pode ser trabalhado em obra. Ora esta característica ganha uma ainda maior importância quando entramos no campo dos UHPFRC, em que a trabalhabilidade também irá afetar a distribuição e orientação das fibras, o que, como anteriormente foi referido, é de extrema importância no comportamento mecânico dos elementos que envolvem este material.

No âmbito desta dissertação foi realizado o ensaio de espalhamento que é ilustrado na Figura 3.5. Para a realização deste ensaio procedeu-se a uma amassadura com dosagem de fibras de 2%. Este ensaio consistiu em encher um molde cónico com a mistura UHPFRC, removendo o excesso de material, em seguida o molde foi lentamente levantado e o UHPFRC fluiu até que nenhum movimento fosse detetado. O diâmetro de espalhamento obtido pelo material foi medido seguindo a direção de maior espalhamento (d1) e a sua perpendicular (d2), conforme ilustrado na Figura 3.5.



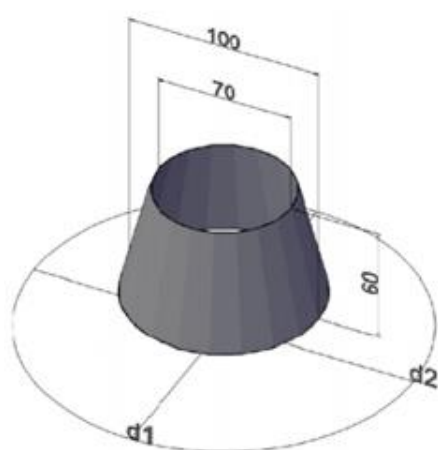


Figura 3.5- Ensaio de espalhamento para uma mistura com 2% de fibras.

### 3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 3.3.1.COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Foram preparados três provetes cúbicos com 10 cm de dimensão. A Figura 3.6 ilustra o processo de enchimento dos provetes, assim como os moldes usados. Os provetes foram desmoldados dia e meio após a amassadura e posteriormente foram colocados numa câmara de cura durante 28 dias, a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa (HR) de aproximadamente 95%, como podemos observar na Figura 3.7.



Figura 3.6-Colocação do UHPFRC nos moldes cúbicos



Figura 3.7- Câmara de cura

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no LABEST, seguindo as normas mencionadas na Tabela 3.1, utilizando uma prensa universal servo-comandada, com uma capacidade máxima de 2700KN, que se ilustra na Figura 3.8. Adotou-se o controlo por imposição de deslocamento, tendo-se fixado a uma velocidade de aplicação da carga de 0,01mm/s constante até à rotura.



Figura 3.8-Equipamento utilizado para os ensaios à compressão

A resistência à compressão é obtida pela seguinte expressão:

$$F_c = \frac{F}{A}$$

Equação 3.1- Cálculo da resistência à compressão

Sendo que:

F<sub>c</sub> – Resistência à compressão, em MPa;

F – Carga máxima à rotura, em KN;

A – Área da secção transversal, em mm<sup>2</sup>

### 3.3.2.COMPORTAMENTO À TRAÇÃO

O comportamento à tração foi estudado recorrendo a ensaios de tração direta uniaxial. Foram ensaiados provetes com 4 dosagens de fibras. Para cada dosagem de fibras, foram ensaiados 5 provetes do tipo “Dog Bone”.

A partir de cada amassadura foi possível encher 5 moldes em forma de Dog Bone. Logo, os provetes com a mesma dosagem de fibras foram obtidos de uma mesma amassadura, tentando desta forma garantir uma distribuição homogénea das fibras pelos 5 provetes. Para além desse aspeto, é de realçar que se optou por uma distribuição aleatória de fibras sem nenhuma orientação preferencial. Esta justifica-se pelo facto de as solicitações nas estruturas, na sua maioria, não terem uma única direção predominante. Assim, obtém-se uma caracterização do comportamento à tração esperado do material, independente da orientação da solicitação. A Figura 3.9 ilustra a preparação destas amostras.



Figura 3.9- Preparação dos provetes “Dog Bone”

Os provetes foram desmoldadas dia e meio após a amassadura e deixados a curar na câmara de cura a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa (HR) de aproximadamente 95% por 28 dias.

O equipamento utilizado na realização deste ensaio foi uma máquina de ensaio universal Instron com capacidade máxima de 300 KN. Os testes foram realizados sob o controlo de deslocamentos a uma velocidade de 0,003mm/s. A Figura 3.10 e a Figura 3.11 descrevem a configuração do teste de tração uniaxial com ambas as extremidades rotuladas. Antes de iniciar o ensaio o provete foi submetido a três ciclos de carga entre 2% e 20% da resistência à tração da matriz. Foram instalados quatro LVDTs, um em cada face do provete, usando uma estrutura de suporte de alumínio para registar o alongamento ao longo de uma base de medida de 92mm.



Figura 3.10-Equipamento para o ensaio à tração uniaxial

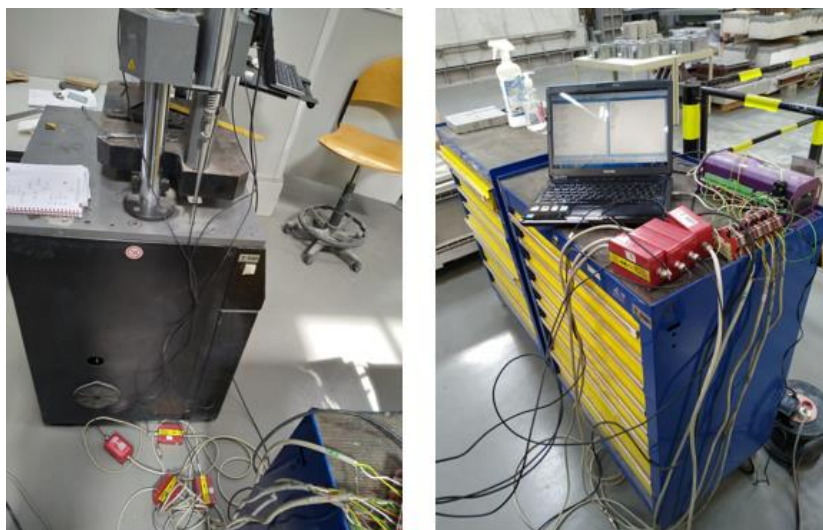


Figura 3.11-Equipamento de transmissão de dados de medição acoplado aos LVDTs

O procedimento do ensaio de tração direta uniaxial descrito fornece uma compreensão completa do comportamento mecânico à tração da mistura UHPFRC. A Figura 3.12 representa uma resposta idealizada de um UHPFRC num ensaio de tração direta uniaxial.

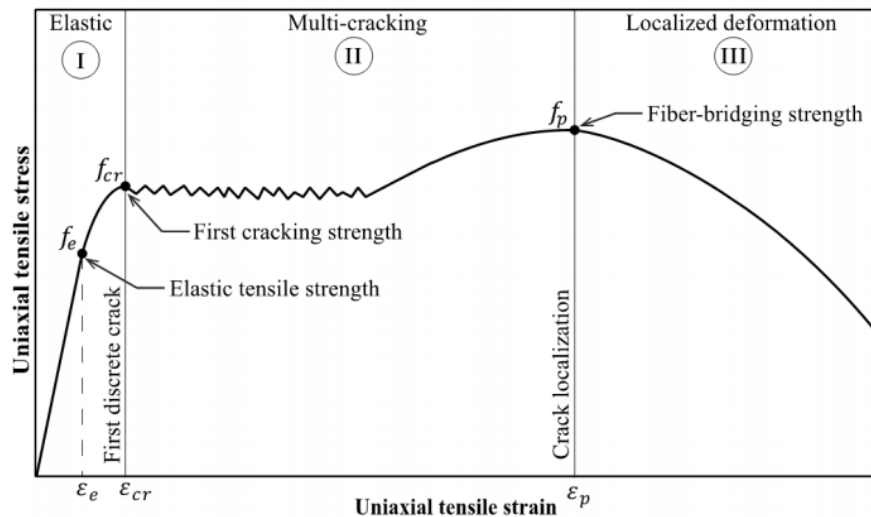


Figura 3.12- Resposta idealizada de um material UHPFRC num ensaio de tração direta uniaxial [28].

A resposta idealizada pode ser dividida em três fases distintas:

-Fase 1:

- A fase elástica refere-se à deformação elástica global do material antes da formação de quaisquer fissuras discretas. É caracterizado por uma resposta linearmente elástica inicial, descrita pelo módulo de elasticidade,  $E$ , como ilustrado na Figura 3.13. Como o material é tracionado além da sua deformação elástica,  $\varepsilon = Fe/E$ , as microfissuras começam a formar-se envolvendo as fibras e resultando numa perda de rigidez. O comportamento passa a não ser linear, até que a primeira resistência à fissuração,  $F_{cr}$ , seja alcançada [28].

-Fase 2:

- A fase de multifissuração, refere-se à parte do comportamento onde o material exibe uma formação de múltiplas fissuras até que a deformação se localize numa fenda única e discreta. Devido à resistência pós-fissuração do UHPFRC, fornecida pelas fibras, o material nesta fase acumula deformação até ser atingido um pico de resistência. A resposta de multifissuração pode ser caracterizada por um pseudo- patamar de tensão, onde ocorre um endurecimento por tensão e a carga continua a aumentar à medida que se formam mais fissuras, conforme mostrado na Figura 3.14. A fase de multifissuração termina quando tanto a tensão ou a deformação atingirem a resistência de pico das fibras,  $F_p$ , ou a sua deformação correspondente,  $\varepsilon_p$  [28].

-Fase 3:

- A fase de deformação localizada, refere-se à parte do comportamento onde a deformação é localizada numa fissura individual, que se continua a alargar conforme as fibras vão atingindo o seu pico de resistência, deslocando-se ao longo da fissura e saindo da matriz, como mostrado na Figura 3.15. Durante esta fase, o restante do material descarrega elasticamente e, portanto, a resposta é baseada na deformação e não na tensão [28].

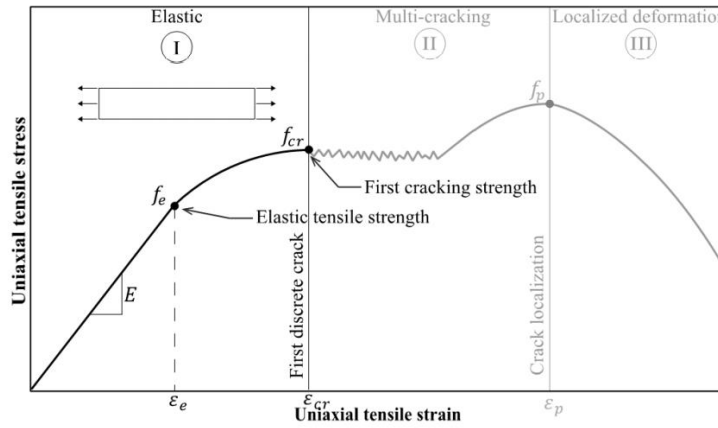


Figura 3.13- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase elástica [28].

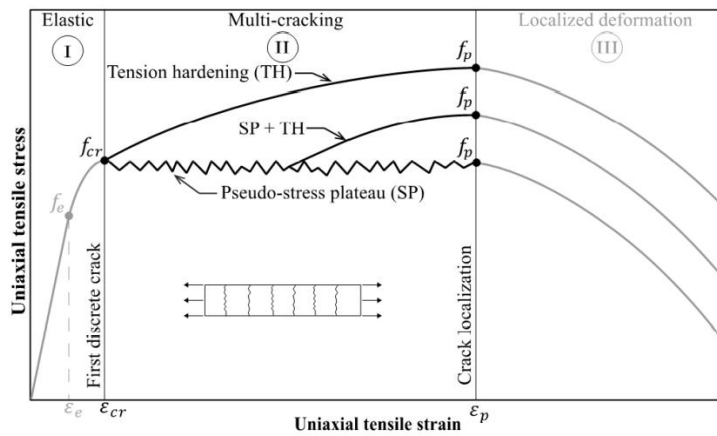


Figura 3.14- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase de multifissuração [28].

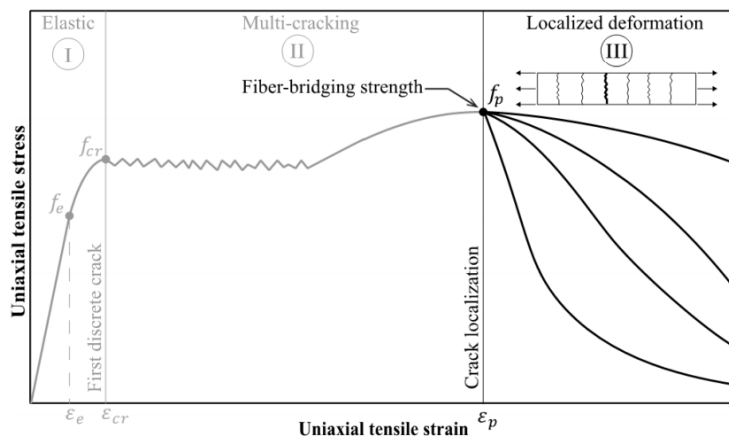


Figura 3.15-- Resposta idealizada de um material UHPFRC a um teste de tração direta uniaxial, realçando a fase da deformação localizada [28].



### 3.3.3.COMPORTAMENTO DE LIGAÇÃO DO UHPFRC COM O BETÃO CONVENCIONAL

A resistência da interface de ligação entre o betão convencional e o UHPFRC foi avaliada usando métodos baseados nas normas descritas na Tabela 3.1. A Figura 3.16 ilustra o método de ensaio usado para avaliar a resistência da ligação [28]. O ensaio realizado denomina-se de ensaio de arrancamento e, no âmbito desta dissertação, foi realizado em vigas de betão convencional reforçadas com uma camada superficial de UHPFRC que já tinham sido anteriormente testadas à flexão, como ilustrado na Figura 3.17. Na preparação para o ensaio, discos de 50mm de diâmetro foram colocados na superfície de UHPFRC, e a ligação entre esse disco e a amostra foi realizada através de uma resina epóxi, que foi deixada a curar durante 24 horas.

O ensaio consiste na perfuração do disco, atravessando a camada de UHPFRC e penetrando um pouco na camada de betão convencional. A força de tração é aplicada ao disco de aço a uma taxa constante de  $34,5 \pm 13,8$  KPa/s até ocorrer a rotura. A carga de rotura é então registada e a tensão pode ser calculada. Se a rotura ocorrer na interface de UHPFRC-betão convencional, então a verdadeira força de ligação pode ser avaliada. Se a rotura ocorrer no substrato de betão ou no UHPFRC, então a resistência à tração do material pode ser avaliada e a resistência de ligação da interface pode ser reconhecida como superior ao valor alcançado. Finalmente, o ensaio deve ser rejeitado se a rotura ocorrer na interface epóxi-UHPFRC. Devem ser realizados pelo menos três testes válidos e calcular a média de resultados para qualquer modo de rotura específico [28].

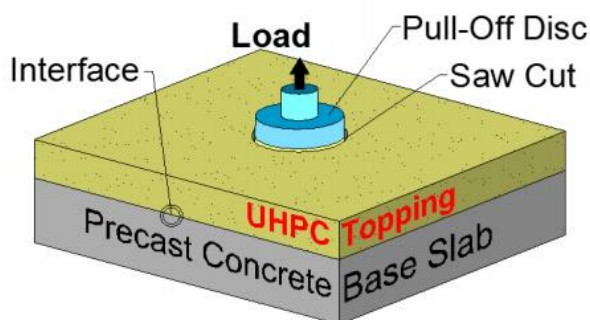


Figura 3.16-Ensaio de arrancamento [28]



Figura 3.17-Ensaio de arrancamento realizado numa viga reforçada com UHPFRC

### 3.4.DURABILIDADE

#### 3.4.1.INTRODUÇÃO

É bem aceite que um fator chave na conceção de uma mistura UHPFRC é melhorar as micro e macro propriedades da mistura, afetando assim a durabilidade e o desempenho mecânico. Este subcapítulo é focado no desempenho da durabilidade. A melhoria das propriedades microestrutura é tipicamente alcançada através do aumento da densidade de empacotamento das partículas sólidas. Nos UHPFRC usa-se habitualmente uma maior proporção de cimento e outros materiais cimentícios, como por exemplo as cinzas volantes e a micro sílica, em comparação com os betões convencionais ou os betões de elevada resistência (NSC ou HSC). Além disso, usa-se também uma muito baixa proporção de A/C. Todos estes aspetos irão reduzir a quantidade e o tamanho da porosidade total do material.

Uma vez que a durabilidade dos materiais cimentícios está diretamente relacionada com a capacidade deste dificultar a permeabilidade dos agentes endógenos, como por exemplo os iões de cloreto, espera-se que ao analisar a microestrutura, este tipo de material exiba uma durabilidade muito melhorada em comparação com o NSC e o HSC.

Vários investigadores estudaram as propriedades iniciais dos materiais UHPFRC. Para o crescente uso de UHPFRC é crucial fornecer uma boa compreensão de como este material funcionará durante a sua vida útil, e se o tempo de serviço é significativamente aumentado em comparação com o NSC e HSC. Todos os estudos realizados em materiais UHPFRC com base no estudo da sua durabilidade concluíram que a durabilidade desta classe de materiais é superior ao do NSC e HSC, principalmente devido ao refinamento da sua menor microestrutura [28].

#### 3.4.2.POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP)

Uma distribuição típica de tamanho de poros para matrizes de cimento hidratado abrange uma ampla gama de tamanhos de poros, com diâmetros desde a ordem de nanómetros a centímetros. O tamanho dos poros e a sua distribuição, bem como o seu grau de continuidade são os fatores mais significativos que determinam as propriedades de transporte da matriz de cimento.

A porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) é um dos principais métodos usados para a caracterização da estrutura dos poros dos UHPFRC, quanto à sua porosidade total e aos diâmetros dos poros críticos.

A porosidade total e a distribuição do tamanho dos poros foram determinados aos 7 e 28 dias por MIP usando um instrumento Autopore IV 9500 (Micrómetros), que permite medir tamanhos de poros de 400  $\mu\text{m}$  a 0,004  $\mu\text{m}$ .

As amostras realizadas para este ensaio não continham fibras na sua mistura, e a amassadura realizada cumpriu as proporções mencionadas na Tabela 3.3. A Figura 3.18 ilustra a preparação dos provetes para este ensaio.





Figura 3.18-Amostras para o ensaio MIP.

Este teste utilizou um ângulo de contato de  $140^\circ$ , uma tensão superficial de  $485 \text{ mN / m}$ , e aplicou uma baixa e alta pressão de 0,5 e 3300 psi, respetivamente. Previamente aos testes, as reações de hidratação foram interrompidas aos 7 e 28 dias, com uma imersão das amostras durante 7 dias em álcool isopropílico (99,8%) e uma secagem a  $40^\circ\text{C}$  em estufa durante 48 horas. Por fim, as amostras foram sujeitas a uma secagem a vácuo por 24 horas. A Figura 3.19 ilustra a preparação das amostras para o ensaio.



Figura 3.19-Preparação das amostras para o ensaio MIP

### 3.4.3.ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção por capilaridade é um fenómeno comum em estruturas porosas como as de betão convencional ou as de UHPFRC. Corresponde à absorção de água pela rede porosa da matriz cimentícia do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entra a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares. Este mecanismo ocorre se o betão está sujeito a ciclos de molhagem e secagem e é proporcional à raiz quadrada do tempo e ao raio capilar [20].

O procedimento do ensaio consistiu na colocação dos provetes na câmara de cura por 14 dias e uma posterior secagem até aos 28 dias, a uma temperatura de  $40^\circ\pm 1^\circ\text{C}$ , contudo um dos requisitos para a realização do ensaio é a de que os provetes não podem apresentar variações de massa, por esse motivo

os provetes ainda foram colocados a secar, até atingirem uma massa constante, considerando-se o provete seco, quando a diferença entre as duas pesagens sucessivas  $m_i$  e  $m_{i+1}$ , decorrido 4 horas de intervalo entre elas, seja inferior a 0.1%  $m_i$  em massa.

Imediatamente antes do ensaio foram medidas as massas iniciais de cada provete ( $m_0$ ), em seguida, a face moldada do provete foi imersa em água até uma altura máxima de 3mm dentro de um recipiente conforme ilustrado na Figura 3.20. A água absorvida por capilaridade foi medida através da massa dos provetes  $m(t)$  em intervalos de tempo de  $t=5$  min; 10 min; 20 min; 30 min; 1h; 1:30h; 2h; 3h; 4h e 24h após o contacto com a água. Para cada intervalo de tempo especificado foi calculada a massa de água de absorção de cada provete testado,  $(m(t)-m_0)$ , e dividida pela área da superfície em contacto com a água, obtendo-se os valores da absorção de água por unidade de área ( $g/m^2$ ) [43].

O resultado dos ensaios de absorção de água por capilaridade obtidos por diversos autores têm validado a dependência linear da quantidade de água absorvida com a raiz quadrada do tempo nas primeiras quatro horas de ensaio, e a determinação do coeficiente de absorção capilar foi obtido segundo a Equação 3.2 [20].

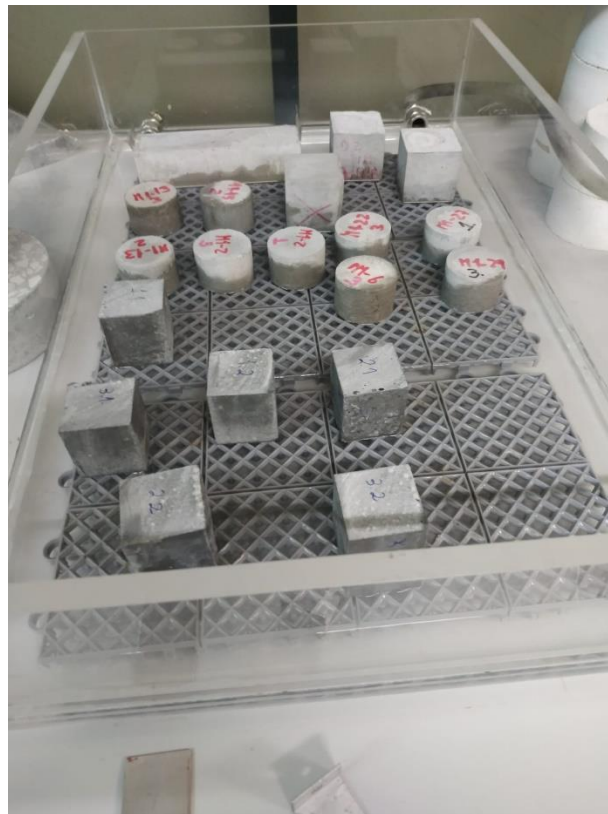


Figura 3.20-Ensaio da absorção de água por capilaridade.

$$A = a_0 + St^{0.5}$$

Equação 3.2

Onde:

A - Representa a quantidade de água absorvida por unidade de área da face em contacto com a água desde o início do ensaio ( $\text{g}/\text{m}^2$ );

$a_0$  - corresponde à água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto ( $\text{g}/\text{m}^2$ );

S - Corresponde ao coeficiente de absorção ( $\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{min}^{0,5})$ );

t - É o tempo de ensaio (min).

#### 3.4.4.RESISTIVIDADE SUPERFICIAL

Uma forma rápida e não destrutiva de avaliar a condutividade elétrica em materiais de betão é medindo a resistividade elétrica da superfície. Os testes de resistividade superficial conduzidos neste estudo foram executados de acordo com a norma descrita na Tabela 3.1. Neste trabalho usou-se um provete cilíndrico para avaliar a resistividade do material em estudo e aplicaram-se dois métodos: o método de dois elétrodos e o método de 4 elétrodos.

O provete de UHPFRC não incorporou fibras pelo facto de que as fibras poderiam criar um caminho condutor de corrente que, naturalmente, iria afetar a os resultados da resistividade. A amostra foi desmoldada dia e meio após a amassadura e foi mantida dentro de água potável como ilustrado na Figura 3.21. O provete foi sendo retirado da água em diferentes idades para medir a resistividade superficial em função do tempo e uma vez que este ensaio se trata de um ensaio não destrutivo todos ensaios de resistividade foram efetuados sobre o mesmo provete.



Figura 3.21- Provete utilizado no ensaio da resistividade elétrica superficial (imagem da esquerda), provete foi mantido dentro de água (imagem da direita).

##### 3.4.4.1.Método de dois elétrodos

A medição da resistividade pelo método de dois elétrodos na amostra cilíndrica foi realizada a partir de dois elétrodos exteriores e medida em duas direções (invertendo-se os polos de corrente).

Na técnica dos 2 elétrodos utilizaram-se dois multímetros e um gerador de sinal. Um dos multímetros foi usado para medir a intensidade de corrente enquanto o outro foi usado para medir a diferença de potencial (V). O gerador de sinal utilizado permite a emissão de uma corrente contínua ou uma corrente alternada através de diferentes tipos de ondas. No presente estudo foi utilizada uma corrente alternada com um tipo de onda sinusoidal com uma frequência de 100 Hz, a ilustração destes equipamentos encontra-se representada na Figura 3.22.

O provete foi retirado da câmara de cura poucos instantes antes da realização do ensaio de resistividade elétrica e foi limpo com um pano húmido para remover o excesso de água superficial. De modo a garantir um bom contacto elétrico, entre o elétrodo e o betão foi colocado um pano húmido cortado na forma da secção do provete, entre a amostra e o elétrodo (chapa de aço inox de 1.95 mm de espessura) onde se colocaram os pontos de corrente e depois realizou-se o mesmo ensaio mas com os polos invertidos, como ilustrado na Figura 3.23. A resistividade elétrica do provete ( $\rho$ ) é dada pela Equação 3.3.



Figura 3.22-Equipamentos usados no ensaio da resistividade elétrica. Gerador de sinal (imagem da esquerda), Voltímetro e Amperímetro (imagem da direita).

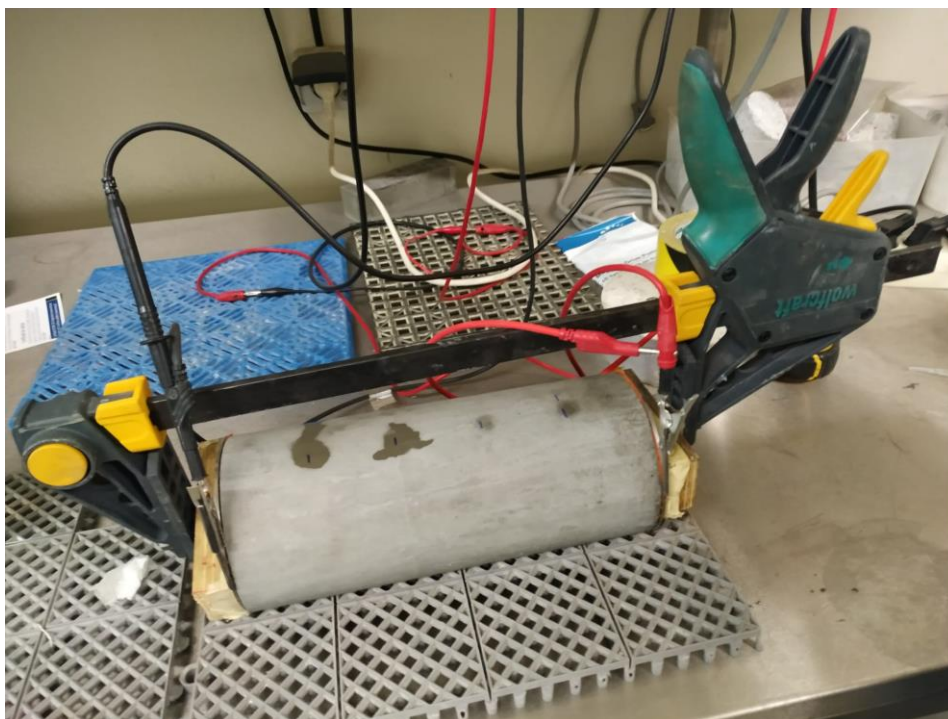


Figura 3.23-Ensaio da resistividade elétrica pelo método de dois elétrodos.

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad R = \rho \times \frac{L}{A} \quad R = \frac{V}{I}$$

Equação 3.3



Onde:

R - Resistência elétrica ( $\Omega$ );

I - Intensidade de corrente (A);

V - Diferença de potencial (Volts);

$\rho$  - Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ );

A - Área do eléctrodo que esteve em contacto com a amostra ( $m^2$ );

L - Distância entre os eléctrodos (m).

#### 3.4.4.2.Método de 4 eléctrodos

O método dos 4 eléctrodos consiste em usar uma sonda Wenner de 4 pinos. Uma diferença de potencial de corrente alternada (AC) é aplicada pelo aparelho de resistividade superficial nos pinos externos da sonda de Wenner gerando um fluxo de corrente no material de betão. A diferença de potencial resultante entre os dois pinos é medida. Este potencial junto com a corrente usada são utilizados para calcular a resistividade elétrica do material.

Foram realizadas quatro medições no provete, respetivamente na orientação de 0, 90, 180 e 270°, em relação à direção da primeira medição. O resultado da resistividade é calculado através da Equação 3.4 e a média das quatro medições em cada provete. A resistividade neste método é apelidada de aparente, devido ao facto de a equação utilizada assumir que o material é homogéneo e semi-indefinido.

O equipamento usado para medição da resistividade elétrica na técnica dos 4 eléctrodos aplica uma corrente alternada com uma frequência de 72 Hz e uma impedância de entrada de  $12 K\Omega \times cm$  e a distância entre os eléctrodos é de 50 mm. Antes da realização do ensaio procedeu-se à calibração do equipamento, em que tínhamos de verificar se de facto a impedância de entrada seria de  $12 \pm 1 K\Omega \times cm$ , e de facto, em todas as calibrações realizadas obtivemos esses mesmos  $12 K\Omega \times cm$ , como ilustrado na Figura 3.24.

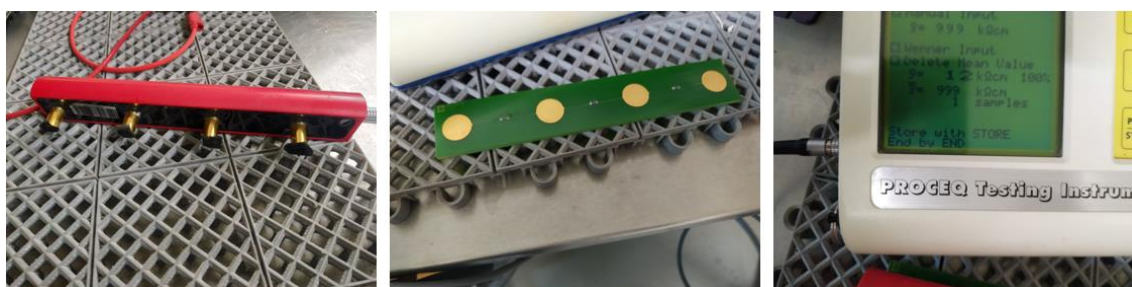


Figura 3.24-Equipamento usado na realização do ensaio de resistividade elétrica pelo método de 4 eléctrodos e respetiva calibração do mesmo.

Na Figura 3.25 encontra-se ilustrada uma representação esquemática com as linhas de corrente e linhas equipotenciais do ensaio.

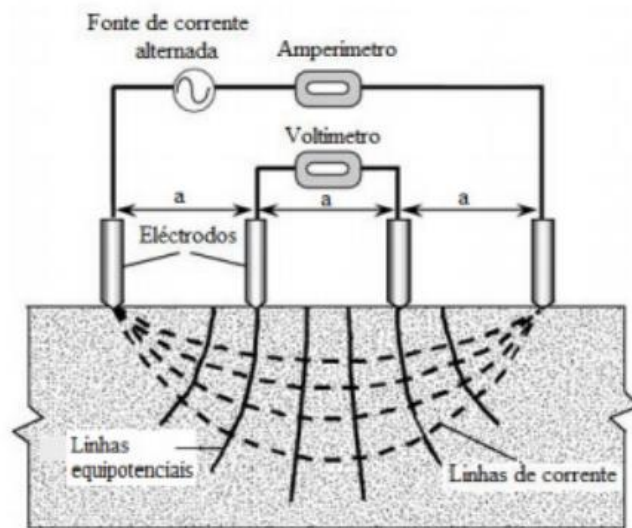


Figura 3.25- Representação esquemática da técnica dos 4 elétrodos [44].

$$\rho = K \times Re \quad K = 2 \times \pi \times a \quad Re = \frac{V}{I}$$

Equação 3.4

Onde:

$\rho$  - Resistividade elétrica ( $\Omega.m$ );

$a$  - Espaçamento entre os elétrodos (m);

$V$  - Diferença de potencial (Volts);

$I$  - Intensidade de corrente (Amps);

$Re$  - Resistência elétrica ( $\Omega$ ).

#### 3.4.5. ENSAIO ACELERADO DE PENETRAÇÃO DE IÕES CLORETO

A capacidade de o betão resistir à entrada de iões cloreto pode resultar num período significativamente mais durável do betão. A resistência à entrada de cloretos foi avaliada segundo as normas descritas na Tabela 3.1. O método fornece uma indicação rápida da resistência à penetração de iões cloreto.

Os provetes realizados tinham as características apresentadas na Tabela 3.2 e desses provetes foi cortado um disco de 50mm de altura da parte central dos cilindros, sendo esse disco que foi usado no ensaio. Na preparação destes provetes não foram incorporadas fibras, à semelhança do que se fez no ensaio da resistividade.

Após o corte, os provetes foram sujeitos a um tratamento por vácuo. Ambas as superfícies de extremidade foram expostas e reduziu-se a pressão absoluta do recipiente de vácuo para uma pressão entre 1- 5 KPa. Manteve-se o vácuo por 3 horas e, com a bomba de vácuo ainda ativa, encheu-se o recipiente com uma solução saturada de  $Ca(OH)_2$ . No fim dessas 3 horas ainda se manteve a situação de vácuo por mais uma hora antes de se permitir que o ar entrasse novamente no recipiente. Após a

entrada do ar e o fim do pré-condicionamento, os provetes ainda foram deixados em contacto com a solução por mais 18 horas. A Figura 3.26, ilustra o processo explicado.



Figura 3.26-Amostras para o ensaio de penetração de cloretos sujeitas à câmara de vácuo.

O ensaio consistiu na aplicação de um potencial elétrico nas extremidades do provete, sendo que os iões cloreto foram obrigados a migrar de uma extremidade, que está sujeita a uma carga negativa e imersa numa solução de cloreto de sódio, NaCl, para a outra extremidade, que está carregada positivamente e imersa numa solução de hidróxido de sódio, NaOH [2].

Para sabermos o tempo e a tensão de ensaio necessária aplicou-se uma corrente de 30 V e mediu-se a intensidade de corrente. Com esse valor recorrendo-se à Tabela 3.4 verificou-se o tempo necessário para o ensaio, que pode ser de 6 horas, que é o tempo mínimo, até 96 horas, que é o tempo máximo de ensaio, enquanto a tensão de corrente pode variar de 10 V a 60 V. A Figura 3.27 representa a realização deste ensaio.



Figura 3.27- Ensaio da resistência à penetração de iões cloreto.

Tabela 3.4-Tensão e duração do teste de resistência à penetração de iões cloreto

Initial current $I_{30V}$ (with 30 V) (mA)	Applied voltage $U$ (after adjustment) (V)	Possible new initial current $I_0$ (mA)	Test duration $t$ (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Após a realização deste ensaio, os provetes foram partidos por meio de compressão diametral, como ilustrado na Figura 3.28 e pulverizou-se a parte aberta das amostras com uma solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) como ilustrado na Figura 3.29. A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata mediu-se a profundidade de penetração, com uma folga de 10 mm a cada bordo e uma precisão de 0,1mm. Finalmente, com base nessa medição, calculou-se o coeficiente de difusão dos cloretos através da Equação 3.5 e de acordo com a especificação do LNEC.



Figura 3.28-Amostra sujeita a compressão diametral





Figura 3.29-Amostras pulverizadas com nitrato de prata.

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

Equação 3.5

Sendo:

D, o coeficiente de difusão no estado não estacionário, x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup> /s;

U, o valor absoluto da tensão aplicada, V;

T, o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

L, a espessura do provete, mm;

x<sub>d</sub>, o valor médio da profundidade de penetração, mm;

t, a duração do ensaio, horas.

#### 3.4.6.CARBONATAÇÃO

A carbonatação consiste na formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) a partir da reação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) com os produtos de hidratação do cimento, CH ou CSH. Assim, esse processo reduz o pH das matrizes cimentícias e pode provocar a corrosão das armaduras.

O processo de carbonatação depende de diversas variáveis, nomeadamente da composição do ligante (tipo de cimento e materiais cimentícios suplementares) e da relação A/C, bem como das condições ambientais, nomeadamente a concentração de CO<sub>2</sub> e humidade. Independentemente das condições ambientais, a resistência à carbonatação é determinada principalmente pela porosidade do material.

Em materiais UHPFRC, conforme discutido anteriormente, há uma redução significativa da porosidade que impede a permeabilidade ao gás diminuindo a taxa de carbonatação. No entanto, o uso de um elevado teor de adições pode reduzir significativamente ou mesmo esgotar o teor de portlandite (devido à reação pozolânica) levando a um aumento da suscetibilidade à carbonatação do material.

Nesse sentido, foi realizado um ensaio acelerado de carbonatação da mistura comercial de UHPFRC, com o objetivo de determinar se a carbonatação podia ser uma fragilidade deste material e se sim qual seria a gama de valores de penetração no material. Para o efeito foi usada uma amassadura sem incorporação de fibras, a Figura 3.30 ilustra os provetes ensaiados.



Figura 3.30-Amostras para o ensaio da Carbonatação.

As amostras foram devidamente em água a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 14 dias e em seguida em ar, estando sujeito à mesma temperatura e a uma humidade relativa (HR) de  $50 \pm 5\%$ , até que se atingiu os 28 dias. Após essa preparação, as amostras foram introduzidas numa câmara de carbonatação, com uma HR de 60%, a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e uma alimentação de ar com 5% de  $\text{CO}_2$ , estas condições foram mantidas ao longo de todo o ensaio.

# 4

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se apresentar os resultados dos ensaios referidos no capítulo anterior, assim como realizar uma análise e discussão dos mesmos. Irá ser realizada uma análise aos resultados dos ensaios da caracterização mecânica, nomeadamente dos ensaios da resistência à compressão e tração. Serão também apresentados os resultados de diversos indicadores da durabilidade do material, designadamente dos ensaios de resistividade elétrica, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos, carbonatação e o ensaio de MIP.

### 4.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

Os resultados obtidos através do ensaio de espalhamento foram de  $d_1=293\text{mm}$  e  $d_2=265\text{mm}$ , como ilustrado na Figura 4.1. Os valores de espalhamento obtidos são bastante satisfatórios e comparáveis com resultados obtidos anteriormente com o mesmo tipo de mistura.

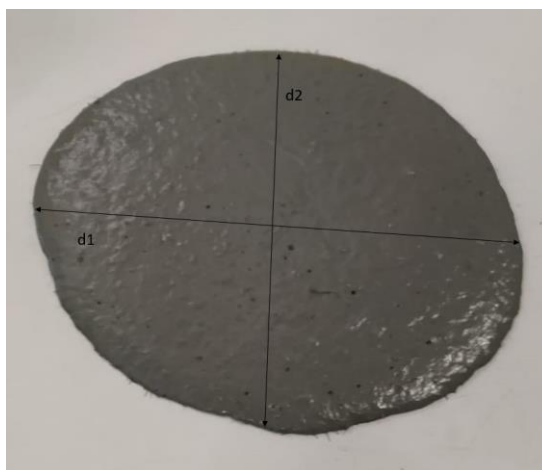


Figura 4.1-Ensaio de espalhamento

### 4.3. ENSAIOS MECÂNICOS

#### 4.3.1. COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO

Os resultados da resistência à compressão da mistura UHPFRC estudada são apresentados na Tabela 4.1 e o respetivo gráfico ilustrativo na Figura 4.2. A resistência à compressão foi determinada a partir da força máxima alcançada durante o ensaio.

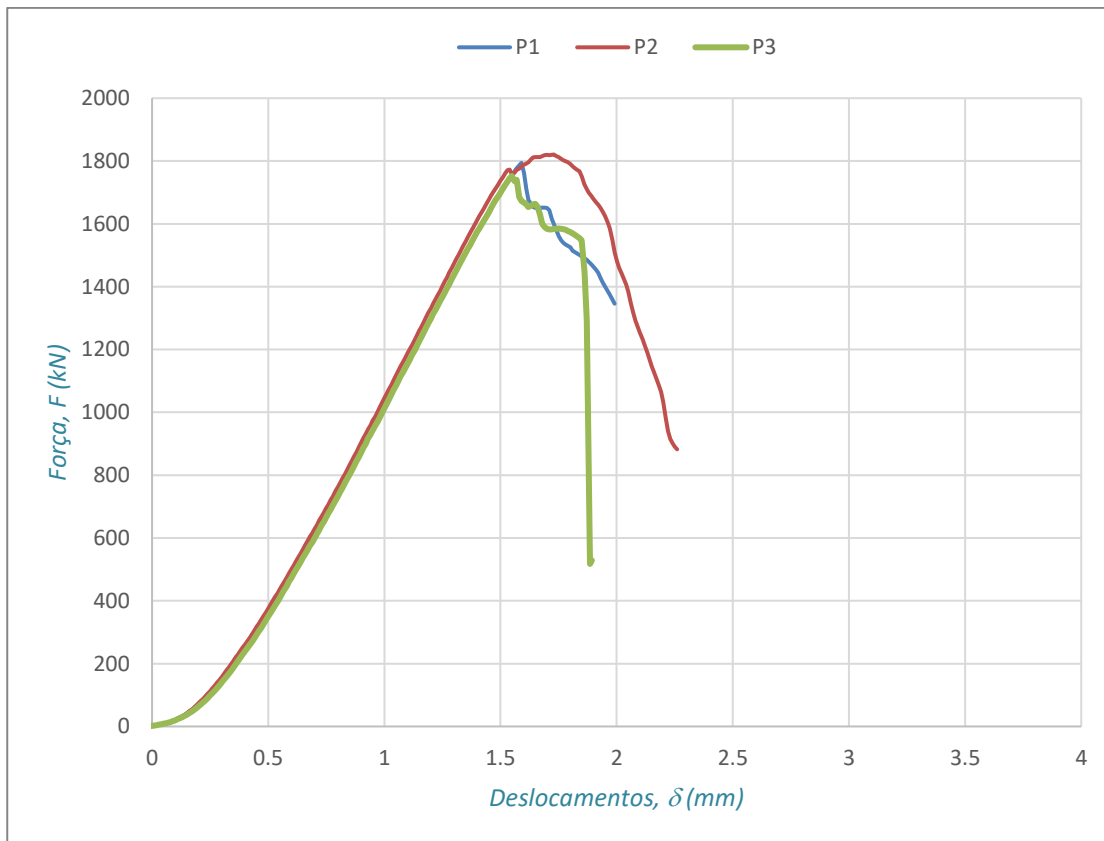


Figura 4.2- Valores da força compressiva regista nas três amostras aos 28 dias

Tabela 4.1- Resultados obtidos no ensaio à compressão.

Referência da amostra	Força máxima (KN)	Área (mm <sup>2</sup> )	fc,cube (MPa)	fcm,cube (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	δ (%)	Massa (g)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
P1	1794,15	10000	179,4	178,91	3,5	1,9	2459	2459
P2	1820,80		182,1				2491	2491
P3	1752,25		175,2				2507	2507



Figura 4.3-Provetes após o ensaio à compressão

A Figura 4.3 ilustra as três amostras que foram ensaiadas à compressão. Como mencionado no capítulo 2, devido à gama de valores de resistência à compressão das misturas típicas de UHPFRC estarem compreendidas entre 150 e 250 MPa optou-se por realizar estes ensaios com amostras cúbicas em vez das amostras usais de cilindros. Esta suposição veio a confirmar-se nestes ensaios, pois obtivemos um valor médio das três amostras ensaiadas de 178,91 MPa, como representado na Tabela 4.1.

As três amostras foram produzidas usando a mesma amassadura e tendo as mesmas dimensões. A massa volúmica das amostras revelou-se similar e portanto, como o esperado, a gama de valores da resistência à compressão atingidos pelas três amostras não teve uma dispersão significativa (1.9 %).

Podemos observar a resistência à compressão da mistura de UHPFRC estudada ao longo do tempo através do gráfico apresentado na Figura 4.4. Um aspeto que é realçado neste gráfico é que ainda há uma evolução importante da resistência ao longo do tempo.

Consegue-se observar que, de facto, os valores da resistência à compressão de misturas UHPFRC são bem mais elevados do que os demais betões. Os betões convencionais têm a sua resistência à compressão conferida essencialmente pelas suas partículas grossas, como por exemplo a brita, no entanto, foi possível comprovar que a perda desses elementos na mistura não prejudicou a resistência à compressão final do material, antes pelo contrário, uma vez que verificamos que essa mesma resistência aumentou e de forma significativa.

O facto de a mistura de UHPFRC incorporar apenas partículas finas e apresentar valores reduzidos de relação A/C poderia provocar uma rotura frágil no material quando sujeito a este ensaio, o que não foi observado. O motivo de não se ter verificado essa mesma rotura frágil é explicado pela existência de fibras de aço na mistura, que apesar de não adicionarem ganhos de pico de resistência, concederam ductilidade ao material.

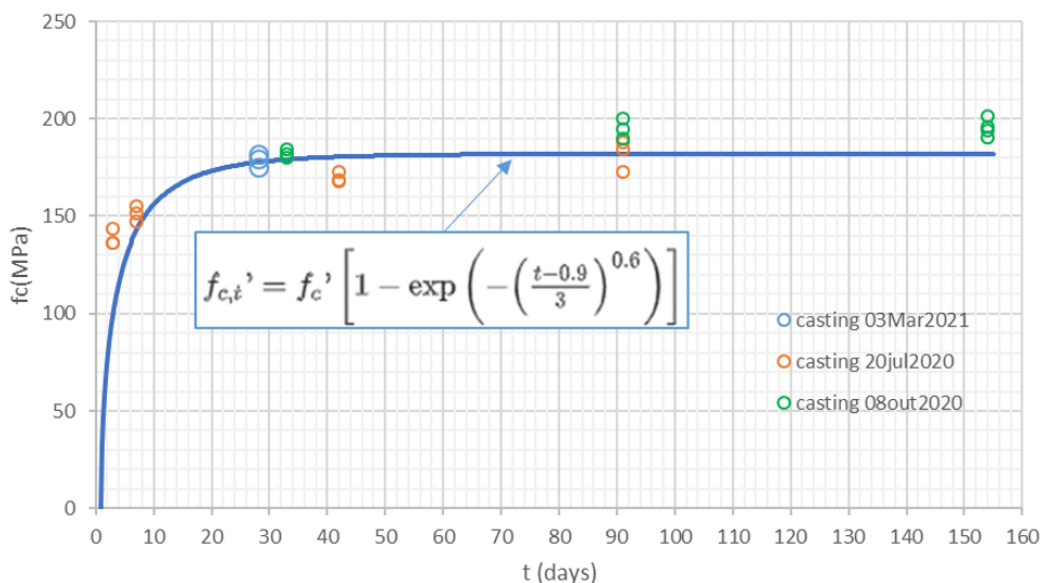


Figura 4.4-Evolução da resistência à compressão ao longo do tempo.

#### 4.3.2.COMPORTAMENTO À TRAÇÃO

Os resultados do ensaio de tração direta uniaxial aos 28 dias são apresentados para as dosagens de fibras de 1%, 2%, 3% e 4% são apresentados nas Tabela 4.2,Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5. A tensão foi calculada dividindo a carga máxima pela área da secção transversal da amostra e o valor da deformação é calculado pela média das leituras de deslocamentos dos quatro LVDTs dividindo pelo comprimento da base de medida.

Ao examinar os resultados obtidos para as composições com diferentes dosagens de fibras, pode-se concluir que as diferentes percentagens de fibras por volume presentes na mistura têm um efeito significativo na resposta à tração do material. Aumentar a dosagem de fibras melhorou a resistência geral aos esforços de tração, aumentando as tensões finais do composto.

As tensões finais registadas aumentam em aproximadamente 15% quando o volume de fibras foi aumentado de 1 para 2% e de 2 para 3%, notando-se uma quebra de aumento de tensão ganha na passagem de 3 para 4%, onde o ganho de resistência foi de sensivelmente 6%. Pode-se concluir que uma percentagem de fibras por volume de 2% ou 3% já atingem valores muito satisfatórios de resistência à tração.

O gráfico ilustrativo dos resultados obtidos está presenta na Figura 4.5, onde se pode realizar uma melhor análise comparativa entre os resultados da resistência à tração para as diferentes dosagens de fibras aos 28 dias. É de referir que alguns dos provetes ensaiados não se encontram representados no gráfico, uma vez que a fissura de rotura se localizou fora da zona de medição dos LVDTs, e portanto, tornou-se desprezável as suas curvas de desenvolvimento de tensão-deformação, mas no entanto, podemos aproveitar os resultados da tensão máxima obtida desses provetes.

Podemos também destacar na Figura 4.5 que uma dosagem de fibras superior em volume não se traduz obrigatoriamente num maior ganho de resistência à tração. Esses resultados podem ser explicados por vários motivos, nomeadamente, alguns provetes apresentarem uma orientação das fibras mais adequada com a orientação do carregamento o que melhora o comportamento e resposta a essa solicitação, assim

como também alguns provetes podem ter ficado com maior conteúdo de fibras da amassadura realizada, pois não é possível garantir uma distribuição uniforme e equitativa das fibras em cada provete. Estes motivos vêm confirmar a importância de se realizar vários provetes para os ensaios, de modo a podermos calcular o valor médio obtido, sendo esse o valor de referência do ensaio.

Aumentar a dosagem de fibras também mudou a resposta do pseudo-planalto de tensão para o endurecimento por deformação. De um modo geral, as amostras registaram um endurecimento por deformação. Os materiais examinados neste estudo mostram um planalto de tensão, conforme a deformação aumenta após a primeira fenda, ou endurecimento por deformação, aumentando a tensão conforme novas fissuras se formam. Aumentando a dosagem de fibras na matriz, a resistência geral a esforços de tração foi melhorada, aumentando a tensão de fendilhação, a resistência final e, em vários casos, alterando a resposta do material na zona de tensão de endurecimento por deformação.

Tabela 4.2-Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 1%)

Referência da amostra	Força máxima (KN)	Área (mm <sup>2</sup> )	fct (MPa)	fctm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$\delta$ (%)
DB 1.1	11,0	1200	9,2	9,4	1,07	11,38
DB 1.2	11,5		9,6			
DB 1.3	13,3		11,1			
DB 1.4	10,8		9			
DB 1.5	9,8		8,2			

Tabela 4.3- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 2%)

Referência da amostra	Força máxima (KN)	Área (mm <sup>2</sup> )	fct (MPa)	fctm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$\delta$ (%)
DB 1.1	14,0	1200	11,7	10,5	1,90	18,10
DB 1.2	11,2		9,3			
DB 1.3	9,3		7,8			
DB 1.4	14,5		12,1			
DB 1.5	14,1		11,8			

Tabela 4.4-- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 3%)

Referência da amostra	Força máxima (KN)	Área (mm <sup>2</sup> )	fct (MPa)	fctm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	δ (%)
DB 1.1	12,2	1200	10,2	12,1	2,26	18,68
DB 1.2	17,6		14,7			
DB 1.3	15,3		12,8			
DB 1.4	14,8		12,3			
DB 1.5	12,4		10,3			

Tabela 4.5-- Resultados da resistência à compressão aos 28 dias (fibras 4%)

Referência da amostra	Força máxima (KN)	Área (mm <sup>2</sup> )	fct (MPa)	fctm (MPa)	Desvio padrão (MPa)	δ (%)
DB 1.1	12,0	1200	10	12,9	2,43	18,84
DB 1.2	14,9		12,4			
DB 1.3	20,0		16,7			
DB 1.4	16,0		13,3			
DB 1.5	14,7		12,3			

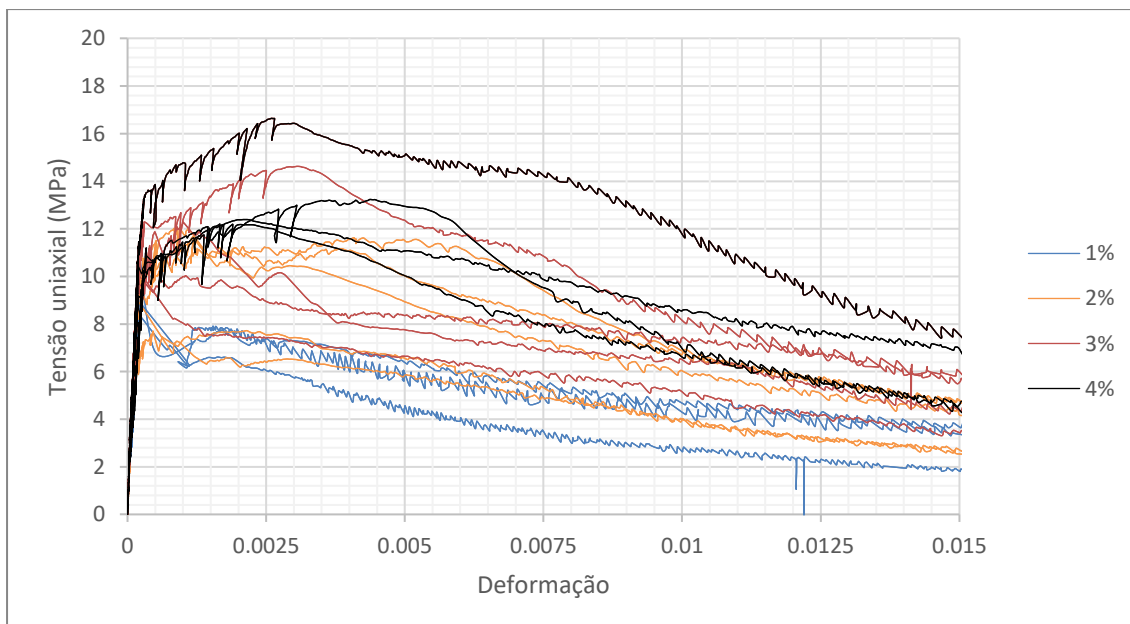


Figura 4.5-Resultados do ensaio de tração uniaxial para as diferentes dosagens de fibras aos 28 dias.



É possível também identificar as microfissuras que foram surgindo antes da fissura condicionante, como ilustrado na Figura 4.6. Pode-se também observar as diferentes disposições de fibras para as quatro dosagens realizadas, como ilustrado na Figura 4.7.



Figura 4.6-Microfissuras nos provetes ensaiados no ensaio de tração direta uniaxial.



Figura 4.7-Provetes com diferentes dosagens de fibras já ensaiados à tração direta uniaxial

#### 4.3.3.COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO DO UHPFRC COM O BETÃO CONVENCIONAL

Como explicado no capítulo anterior, a amostra do ensaio de arrancamento foi formada pela perfuração na direção perpendicular à superfície, penetrando o disco, a camada de UHPFRC e um pouco da camada de betão convencional. Uma carga de tração foi aplicada em seguida, até que ocorresse a rotura.

Das três amostras ensaiadas apenas se conseguiu extrair uma da viga e realizar as consequentes medições e cálculos. As restantes duas romperam na zona de ligação do disco com o UHPFRC, concluindo-se assim que se deveria ter prolongado mais o tempo de cura da resina epóxi. No entanto, numa das amostras, a carga de rotura e modo de rotura foram registados, tendo calculado a respetiva tensão. A amostra exibiu uma rotura na interface entre o UHPFRC e o betão convencional, como ilustrado na Figura 4.8, e então, a verdadeira força de adesão pôde ser avaliada.

A resistência de adesão foi registada pelo equipamento imediatamente antes da rotura, sendo que o equipamento estava programado para registar e guardar o maior valor de resistência alcançado durante o decorrer do ensaio, e esse valor foi de 3,10 MPa. Devido ao facto de que a adesão entre um UHPFRC e um betão convencional pode ser afetada por diversos parâmetros do material, seriam esperadas algumas diferenças entre os valores das restantes amostras, no entanto, estudos anteriores da resistência de adesão entre materiais UHPFRC e betões convencionais apresentam resultados semelhantes ao atingido neste ensaio, o que nos dá alguma segurança quanto ao resultado obtido neste ensaio.



Figura 4.8-Amostras do ensaio de arrancamento.



Figura 4.9-Valor do pico de resistência alcançado antes da rotura.

#### 4.4.DURABILIDADE

##### 4.4.1.INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo irão ser apresentados os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade, e será realizada uma classificação da mistura comercial estudada, com base em cada indicador da durabilidade. É importante mencionar que a classificação usada foi desenvolvida para betões convencionais, e que por essa razão, será expectável que materiais UHPFRC se enquadrem sempre na melhor classe.

##### 4.4.2.POROSIDADE AVALIADA POR MIP

Uma classificação de durabilidade potencial é proposta com base na porosidade medida por MIP, como mostrada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6-Classificação da durabilidade e correspondentes limites da porosidade total (MIP) [45]

Porosidade total MIP (%)	Classificação de durabilidade
>16	Muito baixa
13-16	Baixa
9-13	Média
6-9	Alta
3-6	Muito alta

Tabela 4.7-Resultados do ensaio da porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP)

Amostras	Porosidade total aos 7 dias (%)	Área total dos poros aos 7 dias (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro médio dos poros aos 7 dias (µm)	Porosidade total aos 28 dias (%)	Área total dos poros aos 28 dias (m <sup>2</sup> /g)	Diâmetro médio dos poros aos 28 dias (µm)
A7.1	2,12	1,844	0,0195	-	-	-
A7.2	1,24	0,860	0,0242	-	-	-
A7.3	2,40	1,518	0,0267	-	-	-
A28.1	-	-	-	1,98	0,269	0,1251
A28.2	-	-	-	1,76	0,695	0,0434
A28.3	-	-	-	1,82	0,491	0,0639
Média das amostras	1,92	1,407	0,0235	1,85	0,485	0,0775

Podemos então concluir pela análise dos resultados presentes na Tabela 4.7 e pela classificação presente na Tabela 4.6 que tanto aos 7 dias como aos 28 dias a classificação quanto à durabilidade desta mistura comercial de UHPFRC é de muito alta.

#### 4.4.3.ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O grupo de trabalho da RILEM TC 230-PSC propôs uma classificação da qualidade do betão em função do coeficiente de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias, tal como indicado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8-Classificação da qualidade do betão com base nos valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 28 dias [45].

Coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $\text{Kg/m}^2 \times \text{h}^{0.5}$ )	Qualidade do betão
>15	Muito fraco
10-15	Fraco
6-10	Bom
<6	Muito bom

Ao analisar-se os resultados obtidos pelo ensaio completo de absorção de água por capilaridade (4h) aos 28 dias, consegue-se obter os valores dos parâmetros da Equação 3.2. Com os valores dos parâmetros e com os coeficientes obtidos no ensaio somos capazes de apresentar as retas de regressão linear do ensaio, apresentadas na Figura 4.10, e através da inclinação dessas retas de ajuste consegue-se obter o valor final da absorção de água por capilaridade.

Esses valores são apresentados na Tabela 4.9. Em seguida pode-se calcular o valor médio das amostras ensaiadas e é esse o valor que nos caracteriza melhor a absorção por capilaridade da mistura comercial de UHPFRC estudada.

É de realçar que o valor da amostra P 1,1 não foi tido em consideração para o cálculo do valor médio, uma vez que este apresentava um coeficiente de correlação muito baixo. O valor final da absorção de água por capilaridade é de  $0,0105 \text{ Kg/m}^2 \times \text{h}^{0.5}$  e a classificação que podemos atribuir de acordo com a Tabela 4.8 é a de uma mistura UHPFRC com uma qualidade muito boa.

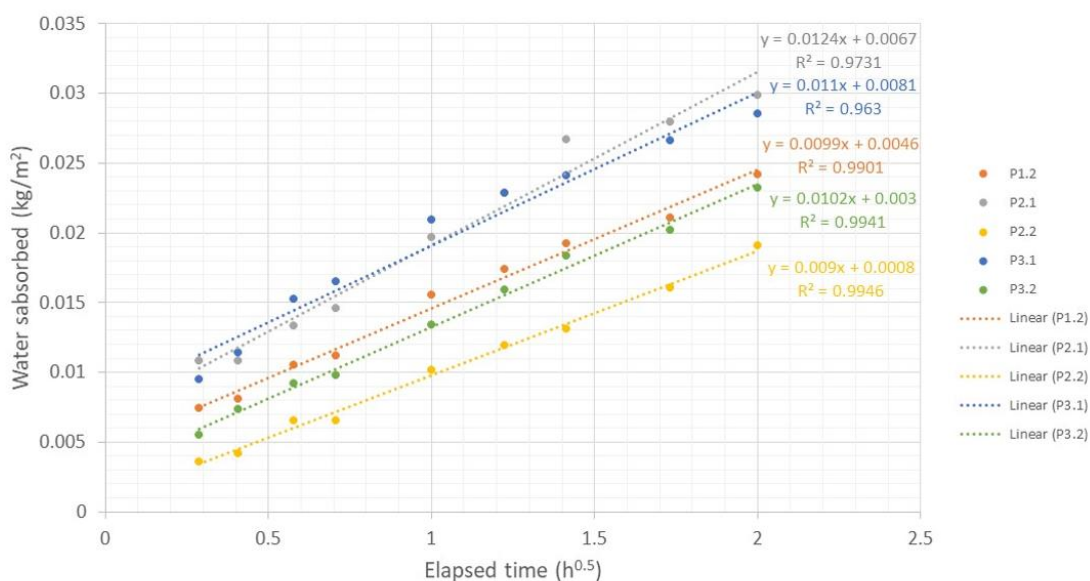


Figura 4.10- Resultados experimentais e regressão linear da absorção de água por capilaridade durante as primeiras 4 horas de contato com a água.

Tabela 4.9-Resultados da absorção da água por capilaridade aos 28 dias ( (Kg/m² × h<sup>0,5</sup>).

Amostras	Absorção por capilaridade	Média	Desvio Padrão
P 1,1	-	0,0105	0,00128
P 1,2	0,0099		
P 2,1	0,0124		
P 2,2	0,009		
P 3,1	0,011		
P 3,2	0,0102		

#### 4.4.4.RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Como seria de esperar os valores de resistividade elétrica atingidos pelo método de 4 elétrodos são diferentes dos valores atingidos pelo método de 2 elétrodos, devido às condições de fronteira utilizadas em cada técnica. Na técnica dos 2 elétrodos os elétrodos são colocados nas extremidades dos provetes e as suas dimensões são maiores em comparação com os elétrodos da outra técnica. O tamanho dos elétrodos tem um efeito importante na medição dos valores dos resultados da resistividade elétrica e na prática era então expectável que o método dos dois elétrodos fosse menos preciso [46].

Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 4.10 e o gráfico correspondente na Figura 4.11. É de realçar que o último valor medido através do método dos 4 elétrodos poderá ser maior do que o apresentado, uma vez que se atingiu a máxima capacidade do equipamento utilizado. Em suma, pode-se concluir através da análise dos resultados e da Figura 4.12, que apresenta um gráfico com uma classificação proposta Graybeal [28], que os valores atingidos por ambos os métodos (2 e 4 elétrodos)

encontram-se na zona classificada como de penetração de iões de cloreto negligenciável, pelo que podemos assumir que a mistura comercial de UHPFRC estudada apresenta uma boa resistência a esse efeito.

Tabela 4.10-Resultados da resistividade elétrica ao longo do tempo, Re (KΩ×cm).

Técnica usada	Idade em dias						
	2	5	7	14	21	28	56
2 elétrodos	8,11	15,68	23,00	77,32	162,90	238,85	406,85
4 elétrodos	18	43,17	63,5	208,5	470,83	736,8	999*

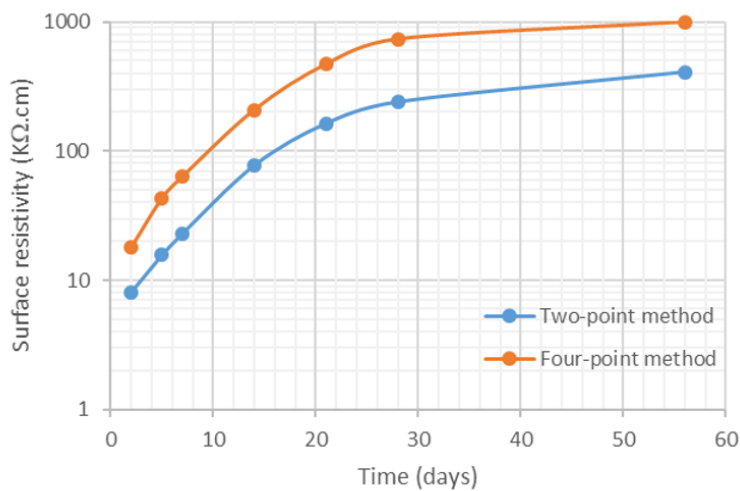


Figura 4.11-Evolução da resistividade elétrica ao longo do tempo.

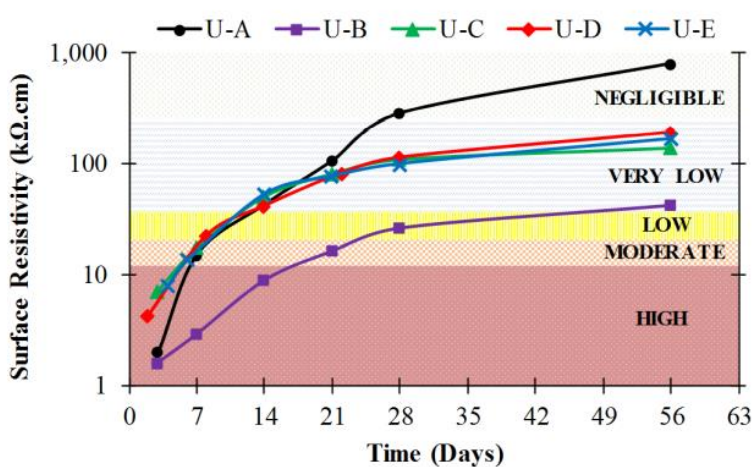


Figura 4.12- -Evolução da resistividade com o tempo de diversos UHPFRCs obtidos pelo método de 4 elétrodos juntamente com uma classificação proposta por Graybreal [28].



## 4.4.5. PENETRAÇÃO DE IÕES CLORETO

A resistência à penetração de cloretos pode ser quantificada com base na classificação apresentada na Tabela 4.11 [47], a partir dos resultados do coeficiente de difusão em regime não estacionário ( $D_{ns}$ ) obtido de acordo com a especificação do LNEC E-463

Tabela 4.11-Resistência à penetração de cloretos [47]

$D_{ns}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Resistência do betão
>15	Reduzida
10-15	Moderada
5-10	Elevada
2,5-5	Muito elevada
<2,5	Ultra elevada

Quanto menos tempo de ensaio for necessário quer dizer que essa amostra vai apresentar valores do coeficiente de difusão mais elevados, e consequentemente, apresentará um desempenho de resistência à penetração de cloretos mais fraco.

É possível verificar que todas as amostras atingiram um valor de intensidade da corrente elétrica inicial inferior a 5 mA, o que pela Tabela 3.4 conduziu a um ensaio com um tempo de duração de 96 horas e uma corrente contínua de 60 V durante o ensaio, como se pode comprovar na Tabela 4.12.

De acordo com a Tabela 4.11 e com a Tabela 4.13 todas as composições apresentam uma resistência à penetração de cloretos classificada como sendo ultra elevada. Estes resultados, com uma classificação máxima atribuída em termos de resistência à penetração de cloretos, estão em concordância com a profundidade de penetração atingida, em que o valor de penetração mais elevado registado neste ensaio foi de apenas 2mm.

Tabela 4.12-Características das amostras e do ensaio à penetração de cloretos.

Amostras	Espessura da amostra (mm)	Tensão de corrente (V)	Duração do ensaio (h)	Temperatura (°C)
P1	51,29	60,58	96	22,19
P2	48,92	60,58	96	22,11
P3	51,08	60,59	96	22,17
P4	50,92	60,58	96	21,95

Tabela 4.13- Coeficiente de difusão de cloretos (Dns) no ensaio de migração em regime não estacionário aos 28 dias de idade.

Amostras	Dns ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Dns, med ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Desvio padrão ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Coeficiente de variação $\delta(\%)$	Penetração (mm)
P1	0,0664	0,076	0,012	15,601	1,50
P2	0,0727				1,67
P3	0,0716				1,60
P4	0,0933				2,00

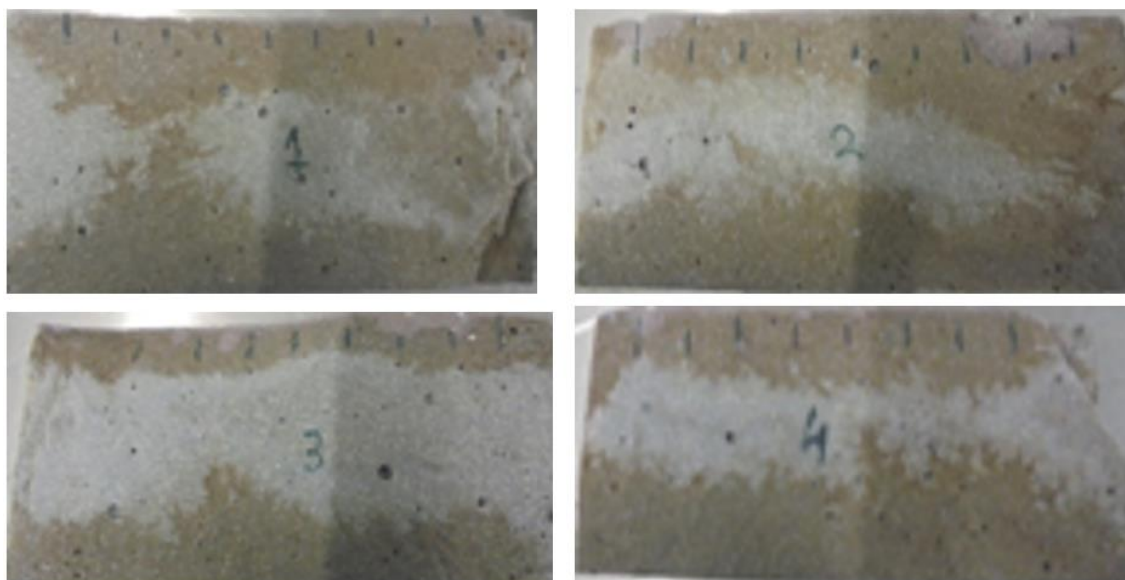


Figura 4.13-Amostras após o ensaio da penetração rápida de cloretos aos 28 dias.

#### 4.4.6.RESULTADOS DA CARBONATAÇÃO

A fim de medir a profundidade de carbonatação, foi cortada uma fatia de material em cada amostra. A fatia teve de ter uma espessura suficiente para que não houvesse hipótese de penetração de CO<sub>2</sub> por intermedio da superfície da extremidade do provete, podendo esta afetar as medições observadas nas superfícies laterais. Em seguida limpou-se a fatia cortada para eliminar as poeiras existentes devido ao corte, e pulverizou-se com uma solução de fenolftaleína, que serve de indicador para identificação do pH do betão.

Como se pode observar na Figura 4.14 as amostras não apresentam sinais de carbonatação, uma vez que as faces da fatia apresentam apenas a cor rosa.



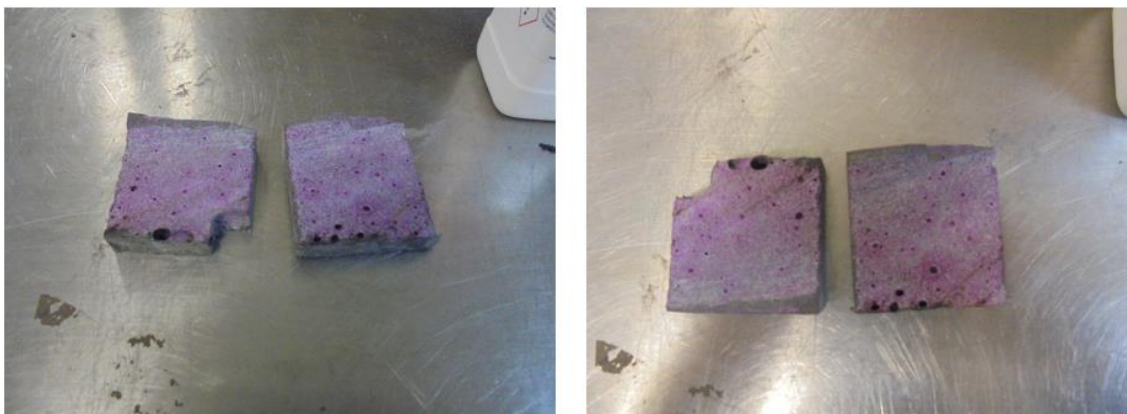


Figura 4.14- Amostras ensaiadas à carbonatação aos 3 meses de idade.

## 5

## COMPARAÇÃO COM A COMPOSIÇÃO DESENVOLVIDA NA FEUP

### 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma análise e comparação de resultados entre a mistura comercial de UHPFRC estudada e caracterizada nos capítulos anteriores e uma mistura de UHPFRC desenvolvida pela FEUP. Ao longo deste capítulo designar-se-á a mistura desenvolvida na FEUP por UHPFRC-A e a mistura comercial estudada por UHPFRC-B.

### 5.2. MATERIAIS E METODOLOGIAS

A Tabela 5.1 apresenta as composições das duas misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B. Na observação dos materiais usados em cada mistura UHPFRC, não podemos realizar uma comparação entre os ligantes e os agregados usados pois o UHPFRC-B não especifica realmente os materiais presentes na sua mistura. No entanto podemos reparar no somatório dos materiais secos (excluindo as fibras), em que na mistura UHPFRC-B é usado uma quantidade de 2133,9 Kg/m<sup>3</sup>, enquanto na mistura de UHPFRC-A essas quantidades variam entre 1604,8 e 1681,9 (variações devidas à quantidade de areia de sílica usadas). Ora, tendo esses valores em consideração e o facto de essas diferenças virem a ser traduzidas numa maior quantidade de água usada na mistura de UHPFRC-A, é de esperar uma diferença em termos da razão água/ligante nas duas composições, o que se poderá traduzir em diferenças de comportamento e de resultados obtidos nos ensaios realizados.

Tabela 5.1- Composição das misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B (kg/m<sup>3</sup>)

Materiais Constituintes	UHPFRC-A		UHPFRC-B	
Pasta	Cimento	690.19	Pré-mistura	2133.9
	Sílica de fumo	33.56		
Agregados	Filamentos de calcário	250.58	Superplastificante F2	35.28
	ECat	155.48		
	Areia de sílica	852.11 / 775.01	Total	128.42
Adjuvantes	superplastificante	19.49		
Água	Total*	207.50		
Fibras	Fibras metálicas com $l_f=13\text{mm}/\phi_f=0,2\text{mm}$	0 / 235 ( $V_f=3\%$ )	Fibras metálicas com $l_f=14\text{mm}/\phi_f=0,2\text{mm}$	314 ( $V_f=4\%$ )

Pela comparação dos procedimentos de amassadura da mistura UHPFRC-A e UHPFRC-B, ilustrados na Figura 5.1 e na Figura 3.2 (respetivamente), observa-se que ambos são muito idênticos, com as diferenças a existirem devido ao facto de que na mistura UHPFRC-A os materiais secos (com a exclusão das fibras metálicas) não estarem já misturados. Pelo que o processo de amassadura dessa mistura teve de passar, primeiramente, por uma fase de homogeneização desses materiais, adicionando-se em seguida o superplastificante e, por fim, as fibras. Realça-se ainda o tempo de amassadura das duas misturas, sendo que a mistura UHPFRC-A totaliza 16 min enquanto a mistura UHPFRC-B totaliza 14,5 min.

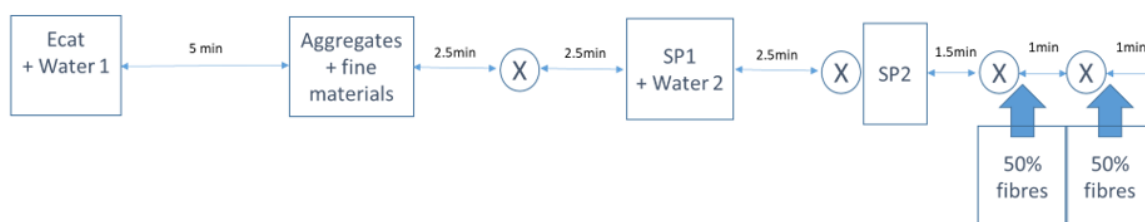


Figura 5.1-Procedimento de amassadura da mistura UHPFRC-A

### 5.3. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A mistura de UHPFRC-A exibiu um diâmetro no ensaio de espalhamento de 282,5mm, no entanto, esse foi o resultado obtido com uma mistura sem fibras. Em seguida foi realizado o mesmo ensaio, mas com uma incorporação de 3% fibras em volume e observou-se um decréscimo do diâmetro atingido de 9,4%, sendo o resultado obtido de 255,9 mm.

O valor atingido na mistura UHPFRC-B foi de um diâmetro máximo de 293mm, no entanto, a mistura apenas tinha 2% de fibras em volume. Contudo, mesmo comparando com os resultados obtidos para a mistura UHPFRC-A sem incorporação de fibras, verifica-se que a mistura UHPFRC-B apresenta uma ligeira melhoria na trabalhabilidade.

#### 5.4. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

A Tabela 5.2 apresenta a média dos resultados obtidos nos diversos ensaios de caracterização do UHPFRC no estado endurecido, para ambas as composições UHPFRC\_A e UHPFRC B.

Tabela 5.2-Comparação de todos os resultados obtidos entre as duas misturas, UHPFRC-A e UHPFRC-B

Propriedades	Média dos Resultados	
	UHPFRC-A	UHPFRC-B
Resistência à compressão (MPa)	118 (7d)	151 (7d)
	147 (28d)	179 (28d)
	156 (91d)	195 (91d)
Resistência à tração (Vf=3%) (MPa)	10,6 (28d)	12,1 (28d)
Porosidade (MIP)	-	1,92% (7d)
	9,94% (28 d)	1,85% (28d)
	7,15% (91d)	-
Absorção de água por capilaridade (kg/(m <sup>2</sup> ×h <sup>0,5</sup> ))	0,111 (28d)	0,0105 (28d)
Resistividade elétrica (kΩ.cm)	-	737 (28 d)
Coeficiente de difusão de cloretos $D_{nssm}$ (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	2,01 (28d)	0,076 (28d)
	0,36 (91d)	-
Carbonatação	0 (1 ano exposto)	0 (3 meses exposto)

#### 5.4.1.RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como ilustrado na Tabela 5.2 os valores da resistência à compressão são mais elevados em todas as idades testadas na composição UHPFRC-B em relação à composição UHPFRC-A, sendo que aos 28 dias foi observado uma diferença de 22% entre as duas misturas. Os gráficos representativos dos dois ensaios são ilustrados na Figura 5.2 e na Figura 4.4.

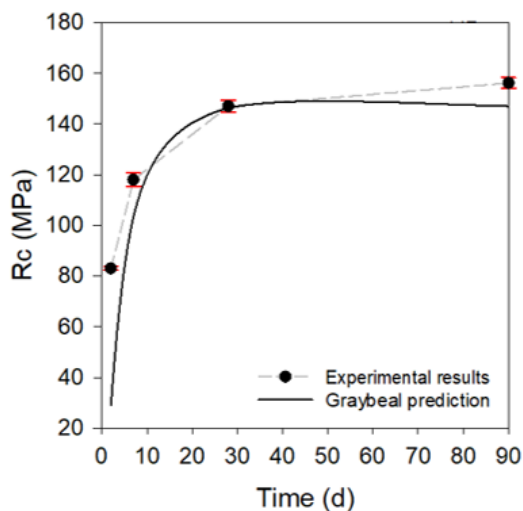


Figura 5.2-Evolução com o tempo da resistência à compressão até aos 90 dias (UHPFRC-A).

#### 5.4.2.RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Dos seis provetes da mistura UHPFRC-A ensaiados à tração direta uniaxial apenas 4 foram considerados válidos, sendo esses os ensaios em que a fenda condicionante ocorreu dentro do intervalo medido pelos LVDTs. A Figura 5.3 ilustra as curvas dos resultados dos ensaios realizados, sendo que todos os provetes tinham uma dosagem de 3 % de fibras em volume. As curvas a cinzento representam os resultados individuais de cada provete, enquanto a curva vermelha representa a média dos resultados obtidos.

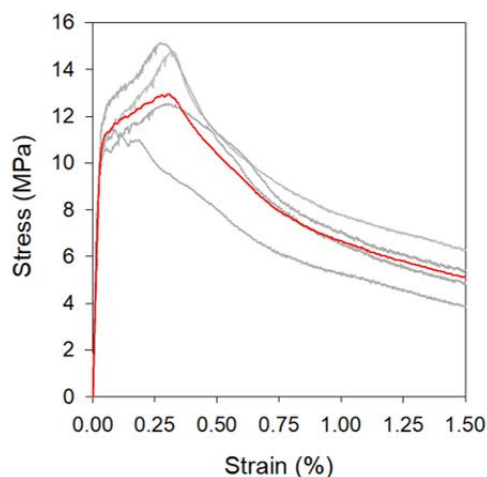


Figura 5.3-Curvas dos ensaios da resistência à tração direta uniaxial aos 28 dias (UHPFRC-A).

As diferenças evidenciadas pelas curvas de resultados podem ser explicadas pela disposição aleatória das orientações das fibras na mistura. Em todas as curvas individuais podemos observar as três fases principais do ensaio mencionadas no capítulo 3, nomeadamente, a fase elástica, a fase de endurecimento por tensão e a fase da deformação localizada. Estas três fases também podem ser observadas na Figura 5.4, onde é apresentada uma comparação das curvas de resultados obtidos neste ensaio para 3% de fibras em volume das duas misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B.

Comparando os resultados obtidos pelas duas misturas de UHPFRC, concluímos que a resistência à tração da mistura UHPFRC-B aos 28 dias para provetes de 3% de fibras em volume, é superior em 14% face à resistência à tração da mistura UHPFRC-A, como ilustrado a Tabela 5.2.

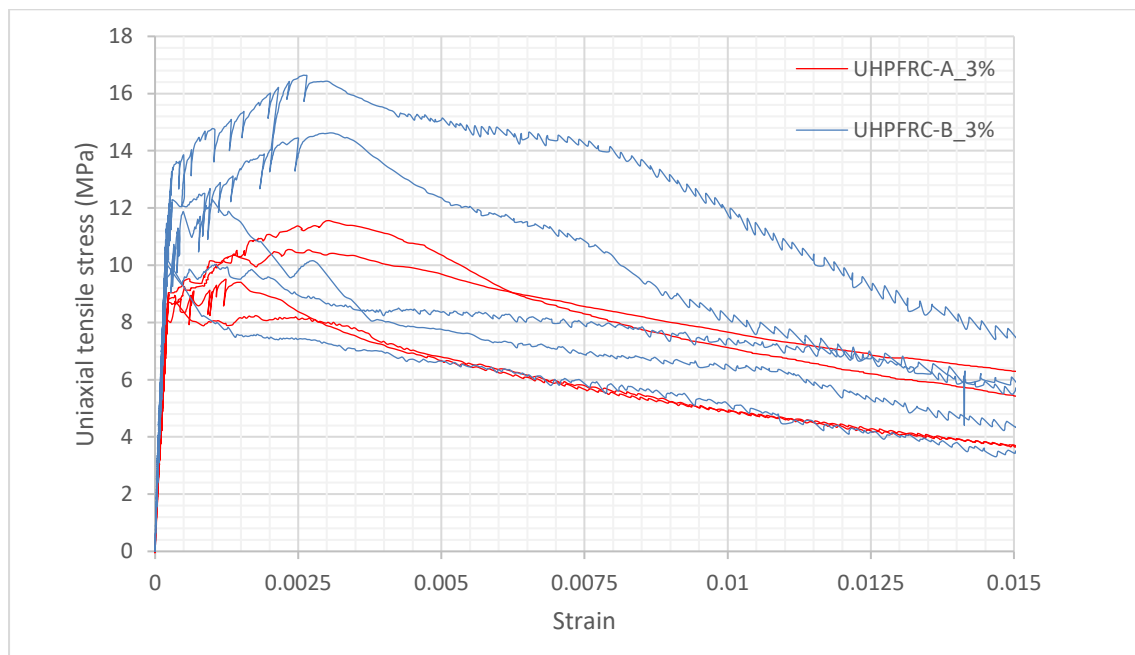


Figura 5.4- Resultados do ensaio de tração direta uniaxial para 3% de fibras em volume das misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B.

## 5.5. DURABILIDADE

### 5.5.1. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO (MIP)

Na mistura UHPFRC-A obteve-se uma porosidade total aos 28 dias de 9,94%, de acordo com a Tabela 5.2, e uma evolução dessa porosidade para 7,15 % aos 91 dias, devido essencialmente à continuidade dos processos de hidratação.

De acordo com a Tabela 4.6, pode-se classificar a durabilidade da mistura com base nos seus valores de porosidade total. Realizando essa análise verificamos que aos 28 dias a mistura UHPFRC-A tem uma classificação de média durabilidade e aos 91 dias, reduzindo-se a porosidade total, já se apresenta como uma mistura de alta durabilidade.

Os valores apresentados da mistura UHPFRC-A se analisados individualmente são bastante satisfatórios, uma vez que os parâmetros de durabilidade têm um fator decisivo ao longo do tempo de vida útil de uma estrutura e a tendência observada é a de que a porosidade da mistura está a sofrer uma

redução relativamente acentuada com o tempo, sendo que aos 91 dias já é considerado que apresenta uma alta durabilidade.

Comparando os resultados da mistura UHPFRC-A com os da mistura UHPFRC-B, verifica-se uma diferença significativa, uma vez que, logo aos 7 dias a mistura UHPFRC-B apresenta muito alta durabilidade, classificação essa não atingida pela outra mistura nem aos 91 dias. Como a porosidade está diretamente relacionada com a resistência que uma mistura apresenta à penetração de agentes agressivos, esta primeira comparação indicia que, possivelmente, a mistura UHPFRC-B irá apresentar também melhor desempenho nos restantes indicadores da durabilidade.

#### 5.5.2.ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Podemos observar os resultados obtidos pelas duas misturas na Figura 5.5 e na Figura 4.10 . Analisando os resultados obtidos pela mistura UHPFRC-A, apresentados na Tabela 5.2, conclui-se que a classificação atribuída por via deste ensaio é a de um betão de muito boa qualidade, uma vez que os resultados obtidos são bem inferiores aos mínimos necessários para se poder atribuir esta classificação, de acordo com a Tabela 4.8.

Analisando os resultados obtidos pela mistura UHPFRC-B, verifica-se que existe uma proporção de resultados entre as duas misturas de 1/10, sendo que se a mistura UHPFRC-A já obtido a classificação máxima de durabilidade neste parâmetro, a mistura UHPFRC-B ainda apresenta essa classificação mais pronunciada.

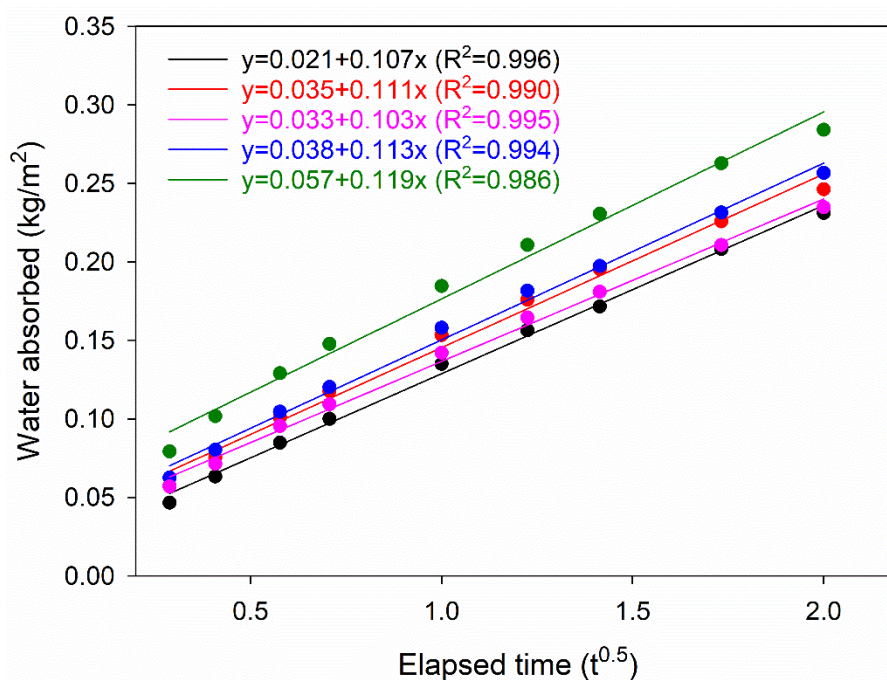


Figura 5.5- Resultados experimentais e regressão linear da absorção de água por capilaridade durante as primeiras 4 horas de contato com a água (UHPFRC-A).

#### 5.5.3.PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Analisando primeiramente o ensaio realizado à mistura de UHPFRC-A, com os resultados apresentados na Tabela 5.3, é de realçar que as amostras ensaiadas aos 28 dias apresentaram um valor de intensidade

inicial entre 20 e 30 mA, o que pela Tabela 3.4 conduziu a um ensaio com um tempo de duração de 24 horas e uma corrente contínua de 40 V durante o ensaio. Essas características iniciais do ensaio conduziram a resultados naturalmente diferentes em relação aos da mistura UHPFRC-B, que pelos seus resultados iniciais esteve sujeito a um ensaio de 96 horas e a uma corrente contínua de 60 V.

Tendo esse aspeto em consideração, era então esperado que os resultados do coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias fosse mais elevado na mistura de UHPFRC-A. Porém, esse aspeto não é algo que justifique uma diferença de valores de uma proporção de mais de 1/100 entre os resultados do coeficiente de difusão de cloretos das misturas UHPFRC-A e UHPFRC-B, como observado na Tabela 5.2, mesmo se comparado o valor registado aos 91 dias, a diferença de valores entre as misturas ainda é na ordem de 1/10. Em relação à penetração dos cloretos registada na mistura de UHPFRC-B a máxima penetração observada foi de 2mm, resultado cerca de três vezes inferior ao registado na mistura UHPFRC-A.

Podemos concluir que apesar de um muito melhor resultado obtido pela mistura UHPFRC-B, ambas as misturas apresentam uma resistência ultra elevada à penetração dos cloretos, de acordo com a classificação presente na Tabela 4.11.

A Figura 5.6 e a Figura 4.13 ilustram as amostras das duas misturas após o ensaio da penetração rápida de cloretos aos 28 dias, sendo que a penetração de cloretos pode ser identificada na amostra pela cor mais clara.

Tabela 5.3-Resultados do teste da penetração rápida de cloretos (UHPFRC-A)

Amostras	Idade da amostra	t (h)	U (V)	Temperatura durante o ensaio (°C)	Xd (mm)	Dns ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
B1.1	28 dias	24	40	22,07	5,68	1,77
B1.2				21,51	6,43	2,03
B1.3				21,79	6,07	1,91
B2.1				22,0	6,39	1,99
B2.2				21,72	6,78	2,12
B2.3				21,86	6,60	2,09
A1.1	91 dias	96	60	-	6,58	0,36
A1.2				-	7,28	0,39
A1.3				-	7,60	0,41
A2.1				-	7,23	0,39
A2.2				-	6,44	0,34
A2.3				-	5,52	0,29





Figura 5.6- Amostras após o ensaio da penetração rápida de cloretos aos 28 dias (UHPFRC-A).

#### 5.5.4.CARBONATAÇÃO

Como indicado na Tabela 5.2, e observado na Figura 5.7, não foi registado nenhum valor de penetração no ensaio da carbonatação, concluindo-se assim que ambas as misturas apresentam um excelente comportamento a este fenómeno.



Figura 5.7- Provetes ensaiados após 12 e 3 meses na câmara de carbonatação acelerada, respetivamente, UHPFRC-A (figura da esquerda) e UHPFRC-B (figura da direita)



# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desta dissertação teve como principal objetivo estudar as propriedades mecânicas e de durabilidade das composições de betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras propostas pelo projeto anteriormente referenciado. O início deste projeto consistiu numa procura de informação sobre as características do material já estudadas anteriormente, nomeadamente alguns indicadores de durabilidade selecionados para este tipo de betão. Numa fase seguinte deste trabalho verificamos a interação das fibras metálicas com a matriz cimentícia nos estudos de caracterização do comportamento mecânico da mistura comercial de UHPFRC, e posteriormente passamos à caracterização do material quanto à sua durabilidade. Após o comportamento mecânico e as características de durabilidade estarem devidamente caracterizadas passamos a uma comparação de resultados entre a mistura comercial estudada e a uma mistura de UHPFRC desenvolvida pela FEUP, com objetivo de destacar os pontos positivos e negativos dos dois materiais.

O enquadramento histórico do betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) é mencionado no capítulo dois, onde se apresentou uma revisão bibliográfica do UHPFRC e onde é explicado que é um betão caracterizado como uma extensão das famílias dos betões de elevado desempenho (HPC), dos betões reforçados com fibras (FRC) e dos betões autocompactáveis (BAC). Neste capítulo foi apresentada a composição tipo deste betão, algumas propriedades do estado fresco e endurecido, os fundamentos científicos que mudaram a tecnologia do betão, as aplicações que este material pode ter e ainda alguns aspetos económicos e de sustentabilidade associados a misturas UHPFRC.

A campanha experimental foi apresentado no capítulo três, onde foram descritos os ensaios realizados nesta dissertação, assim como as normas seguidas, as características dos provetes ensaiados, o procedimento de amassadura utilizado e ainda a composição estudada. Foram realizadas amassaduras com e sem incorporação de fibras metálicas, sendo que os ensaios mecânicos foram aplicados a provetes realizados com misturas com fibras e os ensaios de durabilidade a provetes com misturas sem fibras. O programa experimental realizado para analisar a durabilidade da mistura comercial de UHPFRC incluiu os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP), os de absorção de água por capilaridade, os de penetração rápida de cloretos, os de resistividade elétrica com a técnica dos 2 elétrodos e com a técnica dos 4 elétrodos, e os de carbonatação. Para além dos ensaios de durabilidade foram realizados também alguns ensaios mecânicos, nomeadamente, os de resistência à compressão, os de resistência à tração e os de força de adesão.

Da análise dos resultados apresentados no capítulo quatro, foi possível concluir que os pontos fortes da mistura estudada são a elevada resistência à compressão, a elevada resistência à tração, uma boa força de adesão com betões convencionais, uma baixa porosidade, uma baixa penetração de água por capilaridade, uma elevada resistência à penetração de cloretos e uma elevada resistividade elétrica.

Por fim, foi realizada uma comparação entre a mistura comercial de UHPFRC estudada e um material UHPFRC desenvolvido, anteriormente, pela FEUP. Essa comparação foi apresentada no capítulo cinco, onde analisamos os diferentes resultados obtidos por ambas as misturas. É possível concluir que a mistura comercial de UHPFRC supera a mistura desenvolvida pela FEUP em todas as análises e

caracterizações realizadas. É de realçar que apesar dos resultados obtidos pela mistura desenvolvida na FEUP serem um pouco inferiores, são mesmo assim resultados satisfatórios e que demonstram que a mistura apresenta um excelente comportamento mecânico e características excepcionais de durabilidade, muito superiores aos demais betões.

Em suma, as misturas UHPFRC apresentam inúmeras vantagens em relação aos betões anteriormente desenvolvidos. A sua resistência mecânica é muito superior, as suas características de durabilidade também o são, apresentando elevado potencial para o desenvolvimento de uma nova geração de estruturas mais sustentáveis.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Os resultados de resistência mecânica e de durabilidade apresentados nesta dissertação revelaram-se bastante satisfatórios e animadores quanto à utilização do betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras, no entanto é importante que se realize uma investigação ainda mais profunda tendo em conta alguns parâmetros não estudados, como a retração e a fluência. É necessário que os projetos de investigação no âmbito deste material continuem, para que cada vez mais as propriedades deste betão estejam mais caracterizadas o que, naturalmente, conduzirá a uma melhor compreensão deste tipo de misturas, para que num futuro próximo se possam projetar estruturas com o betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras. É também importante uma avaliação mais profunda na definição de custos inerentes à utilização do UHPFRC, e quanto à sua viabilidade económica a longo prazo.

Um desenvolvimento importante para o futuro seria estipular um método de dimensionamento de composições que considere as propriedades específicas de cada material constituinte e que aponte a uma composição aperfeiçoada, capaz de satisfazer todos os requisitos essenciais a um bom desempenho, e à segurança estrutural. Tendo em conta este princípio, seria fundamental dispor ou desenvolver modelos numéricos que relacionem as propriedades do betão no estado fresco e endurecido com as características e quantidades dos materiais constituintes.

# 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ribeiro, F., Betão de elevado desempenho reforçado com fibras. Dissertação de mestrado, Faculdade de engenharia da Universidade do Porto. 2012.
- [2] Soares, C.R.P., Ensaaios não-destrutivos para a caracterização de betões de elevado desempenho reforçado cm fibras, in Engenharia Civil.Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto., 2013.
- [3] J. Barros, E. Pereira, A. Ribeiro, and V. Cunha, Compression and bending behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete. University of Minho, 2003.
- [4] F. Toutlemonde and J. Resplendino, Designing and Building with UHPFRC. 2013.
- [5] S. F. Ekkehard Fehlig, Michael Schmidt, Joost Walraven, Torsten Leutbecher, Ultra-High Performance Concrete UHPC, 2014.
- [6] R. P, A new generation of UHP concrete: Ductal®. Damage resistance and micromechanical analysis, Proceedings of the 3d International RILEM Workshop (HPFRCC 3), Mainz, pp.101-111, no. 3. 1999.
- [7] Vernet C, UHPC microstructure and related durability performances – laboratory assessment and field experience examples, PCI/FHWA 3rd Symposium on HPC, Orlando, USA. 2003.
- [8] H. H. Bache, Densified Cement Ultra/Fine Particle-Based Materials. In: 2nd Intl. Conf. on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Ontario, Canada, 1981.
- [9] K. Tanaka, Y., Maekawa, K., The innovation and application of UHPFRC Bridges in Japan, in Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, Part III, New Frontiers for Bridges (eds F. Toutlemonde and J. Resplendino), John Wiley & Sons., 2010.
- [10] S. D. Gutiérrez, R.M., L.N. Díaz, Pozzolans on the performance of fiber reinforced mortars. Cement and Concrete Composites, 2005.
- [11] Resplendino, J. State of the art of design and construction of UHPFRC Structures in France. Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, 2012.
- [12] K. P. Justs J., Shakhmeno G., Mironovs V., Cavitation Treatment of Nano and Micro Filler and Its Effect on the Properties of UHCP. 2012.
- [13] A. Naaman, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. University of Michigan, U.S.A. Chapter 3.
- [14] J. . Walraven, From High-Strength to High-Performance to Defined-Performance Concrete. 6th International Symposium on High-Strength/High-Performance Concrete, Leipzig, 2002.
- [15] Toutlemonde F, Innovative design of ultra-high performance fiber\_reinforced concrete ribbed slab: experimental validation and preliminary detailed analyses”, 7th Int. Symp. on Utilization of HSC/HPC, Washington D.C., USA, vol. 53, no. 9. 2005.
- [16] Toutlemonde F, Validation of connection details between a UHPFRC ribbed slab and steel girders for a new composite bridge deck type, 8HSC-HPC, Tokyo. 2008.
- [17] Toutlemonde F, Experimental validation of a ribbed UHPFRC bridge deck, 2nd Int. Symp. on Ultra High Performance Concrete, Kassel, no. June, p. 176, 2008.

- [18] Markovic, I. High-Performance Hybrid-Fibre Concrete - Development and Utilization. Delft University. .
- [19] Andrade C., Vida útil e vida residual das estruturas de hormigón, Seminário. LNEC, 1996.
- [20] J. Coutinho, Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem. FEUP. 1998.
- [21] P. C. Kreijger, The skin of the concrete. Composition and properties. Materials and Structures, 1984.
- [22] K. J. . C. . Basheer L, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and Building Materials, 2001.
- [23] M. Salta, Estruturas de betão: Fatores e requisitos de durabilidade - Seminário Manutenção e reparação de estruturas, Duratinet, 2013.
- [24] L. E. 464, Betões metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais, 2007.
- [25] M. C. Blais, P. Y., Precast, Prestressed Pedestrian Bridge—World’s First Reactive Powder Concrete Structure, pp. 60–71, 1999.
- [26] FHWA, Ultra-High Performance Concrete - Deployments, 2017.
- [27] FHWA, Ultra-High Performance Concrete - Deployments, 2nd Int. Symp. Ultra High Perform. Concr., 2017.
- [28] Z. B. Haber, I. D. la Varga, B. A. Graybeal, B. Nakashoji, and R. El-Helou, Properties and Behavior of UHPC-Class Materials, Fhwa-Hrt-18-036, no. March, p. 153, 2018.
- [29] K. M. Zmetra, Repair of Corrosion Damaged Steel Bridge Girder Ends by Encasement in Ultra-High Strength Concrete, 2015.
- [30] J. F. G. Massicotte, B., M. A. Dagenais, Bridge Pier Seismic Strengthening Using UHPFRC Cover. In 9th International Conference on Short and Medium Span Bridges, 15. Calgary, Canada., 2014.
- [31] B. A. Graybeal, Practical means for determination of the tensile behavior of ultra-high performance concrete, 2006.
- [32] B. A. Graybeal, Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, FHWA-HRT-06-103. FHWA-HRT-06-103. Washington DC., 2006.
- [33] L. C. Zhang, G., B. A. Graybeal, Development of a Family of Ultra-High Performance Concrete Pi-Girders., 2013.
- [34] D. Schmidt, M. and Jerebic, Basis for Sustainable Structures – the Gaertnerplatz Bridge in Kassel, in Ultra High Performance Concrete (UHPC), 2nd Intl. Symp. on Ultra High Performance Concrete, Structural Materials & Engineering Series No. 10 (eds E. Fehling, M. Schmidt, and S. Stür. 2008.
- [35] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, Rep. from EFNARC, vol. 44, no. February, p. 32, 2002.
- [36] LNEC, NP EN 12390-3 Resistência à compressão, 2011.
- [37] A. Abrishambaf, M. Pimentel, and S. Nunes, An eco-firnedly UHPC for structural application: tensile mechanical response, RILEM-fib X International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, BEFIB2020, Valencia, Spain, 2020.

- [38] R. B. Polder, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. Construction and Building Materials. 2001.
- [39] LNEC E 393, Betões determinação da absorção de água por capilaridade, 1993.
- [40] RILEM TC 116-PCD, Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability, 1999.
- [41] L. E. 463, BETÕES determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário, 2004.
- [42] Anon, CPC-18 measurement of hardened concrete carbonation depth, Mater. Constr., vol. 21, no. 126, pp. 453–455, 1988.
- [43] F. M. G. de Jesus, CARATERIZAÇÃO DA DURABILIDADE DOS BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS, 2014.
- [44] K. Gowers and S. Millard, Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, ACI Mater. J., pp. 536–541, 1998.
- [45] R. M. Ferreira, Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Diss. apresentada à Esc. Eng. do minho para a obtenção do grau mestre em Eng. Civ. - Mater. e Reabil. da construção, p. 246, 2000.
- [46] R. . Polder, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. Construction and Building Materials, vol. 33, pp. 603–611, 2001.
- [47] O. . Gjørv, Proceedings, Symposium on Concrete for Marine Structures, Ed. por P.K. Mehta, CANMET/ACI, 1996.
- [48] José Barroso Aguiar, Ana Mafalda Matos, Sandra Nunes, Carla Costa, Durability of an UHPC containing spent equilibrium catalyst. Construction and Building Materials.