

Caracterização do comportamento à tração do UHPFRC: influência da dosagem e orientação das fibras

Characterization of the tensile behaviour of UHPFRC: influence of fibre content and orientation

Amin Abrishambaf
Mário Pimentel
Sandra Nunes

Resumo

O comportamento à tração dos materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras de aço (UHPFRC) constitui a sua propriedade mecânica mais distintiva. O objetivo deste estudo consiste na avaliação experimental da influência da dosagem e da orientação das fibras no comportamento à tração do UHPFRC. Diferentes distribuições da orientação das fibras foram obtidas com recurso a um dispositivo que permite o seu alinhamento durante a betonagem dos provetes, através da aplicação de um campo magnético. O comportamento do UHPFRC foi caracterizado através de ensaios de tração direta sobre provetes prismáticos não entalhados e com restrição de rotação em ambas as extremidades. Estes ensaios permitiram quantificar o espaçamento das microfissuras, a extensão do ramo de endurecimento e o valor da resistência à tração. Ficou demonstrado que o desempenho dos provetes com as fibras orientadas paralelamente à direção de aplicação da força é significativamente melhorado face aos provetes sem orientação preferencial.

Abstract

The tensile behaviour of ultra-high performance cementitious composites reinforced with steel fibres (UHPFRC) constitutes its most distinctive mechanical property. The objective of the current study is to experimentally evaluate the influence of fiber content and orientation on UHPFRC tensile behaviour. Different fibre orientation profiles were obtained using a device that allows the alignment of the fibers through the application of an external magnetic field, while casting the specimens. The tensile behaviour of UHPFRC was characterized by direct tension tests on unnotched prismatic specimens with rotation restricted at both ends. These tests allowed quantifying the micro-crack spacing, the extension of the hardening branch and the tensile strength. It was demonstrated that the performance of the test specimens with the fibres oriented parallel to the applied force is significantly improved compared to the test specimens without preferential orientation.

Palavras-chave: Materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras (UHPFRC) / Orientação das fibras / Comportamento à tração / Endurecimento / Ensaio de tração direta

Keywords: Ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRC) / Fiber orientation / Tensile behaviour / Hardening / Uniaxial tensile test

Amin Abrishambaf

Universidade de Porto, Departamento de Engenharia Civil
Porto, Portugal
aminab@fe.up.pt

Mário Pimentel

Universidade de Porto, Departamento de Engenharia Civil
Porto, Portugal
mjsp@fe.up.pt

Sandra Nunes

Universidade de Porto, Departamento de Engenharia Civil
Porto, Portugal
snunes@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ABRISHAMBAF, A. [et al.] – Caracterização do comportamento à tração do UHPFRC: influência da dosagem e orientação das fibras. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 5. ISSN 2183-8488. (novembro 2017) 91-98.

1 Introdução

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos novos materiais compósitos que se baseiam numa matriz de base cimentícia na qual se incorporam fibras curtas com o objetivo de melhorar o comportamento à tração, tanto em termos de resistência como de ductilidade. Por exemplo, adicionando 2% de fibras de álcool polivinílico (PVA) numa matriz de base cimentícia apropriada, consegue-se um material muito dúctil e com endurecimento em tração (na literatura inglesa designados por *strain hardening cementitious composites* – SHCC), alcançando extensões de pico de até 6% [1]. No entanto, os SHCC apresentam uma resistência à tração relativamente baixa, na ordem dos 2 a 4 MPa. Este estudo incide sobre os designados materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras (*Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Cement Composites* – UHPFRC na sigla em inglês). O UHPFRC é constituído essencialmente por uma matriz cimentícia ultracompacta obtida por via da otimização da densidade de empacotamento das partículas constituintes (cimento, sílica de fumo, pó de quartzo, filer calcário, areia fina, entre outros) e por uma elevada dosagem de pequenas e esbeltas fibras de aço de alta resistência. A matriz tem geralmente uma relação água/ligante extremamente baixa, na ordem de $w/b < 0,2$ [2, 3]. Esta combinação permite a obtenção de desempenhos excelentes em termos de resistência à compressão (na ordem dos 120 a 220 MPa), ductilidade e durabilidade [4-6]. Do ponto de vista mecânico, a vantagem mais notável decorrente da incorporação de fibras de aço de elevada esbelteza numa matriz ultracompacta é o distinto comportamento à tração uniaxial que pode ser obtido. Uma vez ativadas após a fendilhação da matriz, as fibras de aço são capazes de transferir tensões significativas entre as faces das microfissuras. Tal como no SHCC, a curva que descreve a resposta à tração uniaxial do UHPFRC é, em geral, caracterizada por um ramo elástico-linear inicial, seguido de um ramo de endurecimento acompanhado da formação de múltiplas microfissuras, ver Figura 1. Enquanto a extensão do ramo de endurecimento do UHPFRC é geralmente cerca de 5 a 10 vezes inferior à do SHCC, a resistência à tração é cerca de 3 a 4 vezes superior. Após a tensão de pico as deformações localizam-se numa fenda macroscópica [7] que exhibe ainda uma elevada capacidade de dissipação de energia até ao anulamento da tensão de tração transferida. Na Figura 1, E_c é o módulo de elasticidade do compósito, σ_{mc} e ε_{mc} são a tensão e a extensão aquando da fendilhação da matriz, σ_{uc} e ε_{uc} são a resistência à tração e a correspondente extensão de pico, g_f é a energia dissipada por unidade de volume até a resistência à tração ser atingida e G_f é a energia dissipada por unidade de área da fenda crítica durante a fase de localização das deformações.

O comportamento à tração do UHPFRC atrás descrito é influenciado pelas características das fibras (geometria e esbelteza, esta última expressa através da razão entre o comprimento e o diâmetro, l_f/d_f), pela aderência entre as fibras e a matriz, e pela distribuição e orientação das fibras [8-12]. Enquanto a geometria das fibras e a aderência destas à matriz podem ser alvo de otimização durante o estudo da composição do UHPFRC, a sua distribuição e orientação no elemento estrutural dependem essencialmente da reologia do material no estado fresco, das condições de colocação e da geometria e dimensões do elemento estrutural [10, 13]. Dado que

a eficiência das fibras depende da sua orientação face às referidas tensões atuantes, a orientação preferencial das fibras ao longo de uma determinada direção origina um comportamento anisotrópico que importa saber caracterizar. Por outro lado, devido ao custo relativamente elevado das fibras de aço de alta resistência, e para certas tipologias estruturais, o desempenho à tração do UHPFRC pode ser otimizado através da orientação das fibras ao longo da direção das tensões principais de tração, procurando diminuir a sua dosagem. Este objetivo pode ser atingido através da adoção de um método de betonagem apropriado (o UHPFRC é, em geral, autocompactável e as fibras tendem a alinhar-se de acordo com o tipo de fluxo do material) ou até através da aplicação de um campo magnético externo durante a betonagem. O último pode ser facilmente implementado no âmbito da prefabricação. Se a influência da geometria e da dosagem das fibras no comportamento à tração do UHPFRC está bem reportada na literatura [7, 14, 15], a informação acerca da influência da orientação das fibras neste mesmo comportamento é mais escassa.

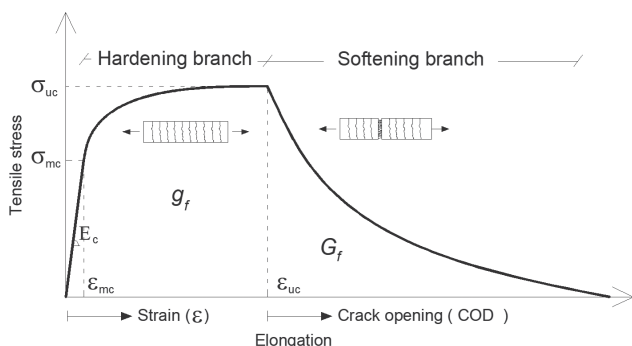


Figura 1 Representação esquemática do comportamento à tração do UHPFRC

O objetivo deste trabalho consiste na avaliação do efeito da orientação das fibras no comportamento à tração uniaxial do UHPFRC. Pretende-se investigar a sua influência não só na resistência de pico do composto, mas também na extensão do ramo de endurecimento da curva tensão-extensão. Para o efeito, foi desenvolvida uma campanha experimental contemplando provetes com duas dosagens de fibras (1,5% e 3,0% de volume) e três perfis de orientação distintos (fibras distribuídas aleatoriamente, fibras alinhadas preferencialmente na direção perpendicular e paralela à superfície de fratura). A orientação das fibras foi conseguida com recurso a um dispositivo que permite o alinhamento das fibras metálicas durante a betonagem dos provetes através da aplicação de um campo magnético. O comportamento à tração do UHPFRC é caracterizado através de ensaios de tração direta sobre provetes prismáticos não entalhados e com restrição de rotação em ambas as extremidades.

2 Programa experimental

2.1 Materiais e composições

As composições utilizadas neste estudo foram preparadas com misturas ternárias de cimento CEM I 42,5 R, fíler calcário e sílica de fumo, com densidades de 3,10, 2,68 e 1,38, respetivamente. A dimensão média das partículas de cimento e de fíler é de 14,6 e 5,36 μm , respetivamente. As partículas de sílica de fumo têm uma dimensão cerca de 50 a 100 vezes inferior às do cimento. O superplastificante adotado é constituído por carboxilatos modificados e apresenta uma densidade de 1,08 e 40% de teor de sólidos. Utilizou-se uma areia fina natural com um diâmetro máximo de 1 mm e uma massa volúmica de 2630 kg/m^3 (material seco). Foram utilizadas misturas com dois tipos de fibras (50% + 50%) lisas de seção circular com as características indicadas no Quadro I.

Quadro I Propriedades das fibras

Referência	Forma	Resistência f_{fy} (MPa)	Comprimento l_f (mm)	Diâmetro d_f (mm)	Esbelteza l_f/d_f
DM 9/0,175	lisa	2100	9	0,175	51
DM 12/0,175			12		69

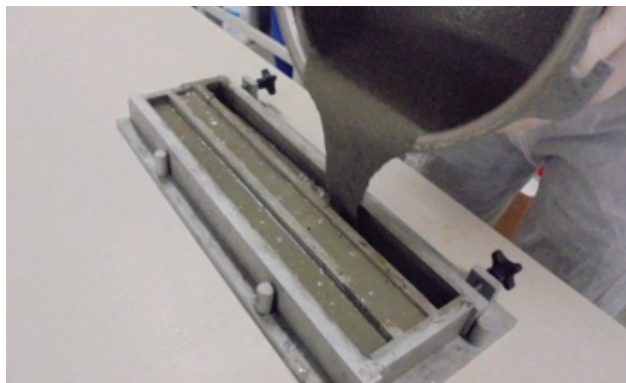
Selecionaram-se duas misturas, M1 e M2, com uma dosagem total de fibras, em volume, de 1,5% e 3,0%, tal como definidas no Quadro II. De modo a manter o volume global da mistura, retirou-se uma quantidade de areia correspondente ao volume de fibras adicionado. As composições foram obtidas por via de um processo de otimização descrito em [16]. Os valores obtidos nos ensaios de espalhamento e funil-V permitiram classificar as misturas como autocompactáveis, com excelente deformabilidade e elevada viscosidade e, portanto, baixo risco de segregação.

Quadro II Composição (kg/m^3) das misturas estudadas

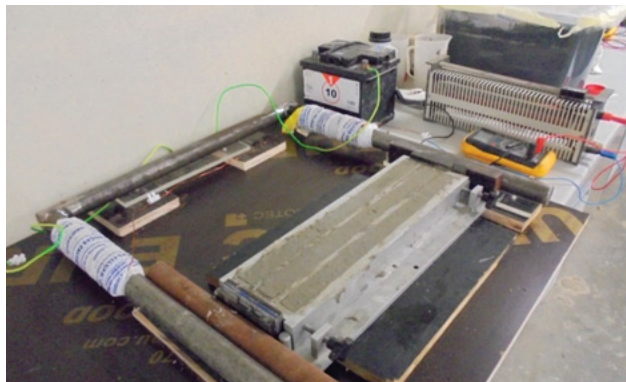
Constituinte	M 1	M 2
CEM I 42,5 R		794,90
Sílica de fumo		79,49
Fíler calcário		311,43
Água		153,76
Superplastificante		22,20
Areia	980,41	940,96
Fibras DM 9/0,175	58,88	117,75
Fibras DM 12/0,175	58,88	117,75
D_{flow} (mm)	–	288,5

2.2 Provetes

Foram betonadas 5 séries de 6 provetes prismáticos (num total de 30) com dimensões $430 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$ para determinação da resposta à tração em ensaios de tração direta, ver Figuras 2 e 3. Cada uma das séries de 6 provetes corresponde a uma determinada dosagem (1,5% ou 3%) ou perfil de orientação de fibras: fibras não orientadas, orientadas longitudinalmente (0°) ou transversalmente (90°). No caso da dosagem de 1,5% de fibras não foram produzidos provetes com fibras a 90° na medida em que seria expectável um comportamento demasiado frágil para estes provetes durante o ensaio de tração direta. Os provetes com fibras não orientadas foram betonados depondo o material em várias posições ao longo do molde de forma a minimizar o fluxo do material (Figura 2(a)). Este procedimento foi adotado com vista a evitar o alinhamento das fibras na direção do fluxo num molde relativamente estreito e comprido [17]. Os provetes com fibras predominantemente orientadas na direção longitudinal (0°) ou transversal (90°) foram betonados com o molde posicionado no interior de um eletroímã em forma de "U" com capacidade de orientar as fibras aço no interior do UHPFRC durante a betonagem, ver Figura 2(b). A orientação 0° ou 90° foi obtida rodando convenientemente o molde no interior do eletroímã, sabendo que as linhas do campo magnético têm a direção perpendicular às pernas do "U".



(a)



(b)

Figura 2 Provetes para ensaio à tração direta: (a) betonagem dos provetes "não orientados", (b) produção dos provetes com orientação das fibras a 0°

Os provetes foram desmoldados às 24 horas e colocados na câmara de cura. Uma semana antes dos ensaios os provetes foram retirados da câmara e secos. Seguindo o procedimento proposto por Graybeal *et al.* [18] foram coladas quatro placas de alumínio, tal como se ilustra na Figura 3, utilizando para o efeito uma fina camada de resina epóxi Sikadur® 330 US, de elevado módulo de elasticidade e resistência. Estas placas têm uma espessura constante de 4,8 mm ao longo de 98 mm, exibindo uma transição linear até 1 mm de espessura numa das extremidades. As placas de alumínio foram mantidas sob pressão constante contra os provetes durante 3 dias para permitir a cura da resina. Em seguida, procedeu-se à retificação das faces das placas de alumínio para garantir o paralelismo das mesmas e assegurar as melhores condições de fixação nas amarras da prensa de ensaio.

2.3 Arranjo experimental

Os ensaios foram conduzidos numa prensa universal muito rígida sob controlo de deslocamento a uma velocidade de constante de $0,002 \text{ mm/s}$. As fixações na extremidade são materializadas por amarras hidráulicas que asseguram restrição da rotação. A minimização dos momentos fletores parasitas decorrentes de eventuais desvios no posicionamento do provete foi conseguida à custa da preparação cuidada dos provetes, nomeadamente, a retificação das chapas de alumínio após a cura da resina, e a adoção de procedimentos rigorosos de colocação dos mesmos na prensa. A pressão de fixação lateral nas amarras hidráulicas foi definida a 40 MPa para garantir a inexistência de escorregamentos entre as amarras e os provetes, ver Figura 4(a). De modo a conseguir um melhor ajuste entre as amarras e o provete e facilitar a aplicação da carga em tração, inicialmente, os provetes foram carregados em compressão até aos 12 MPa e, seguidamente, carregados em tração até à separação completa do provete em duas partes [18]. Foram instalados dois LVDT's em faces opostas de cada um dos provetes para medir não só a deformação durante o ensaio mas também para avaliar a flexão decorrente de qualquer eventual excentricidade no sistema (Figura 4(b)). Deve referir-se que, devido à existência das placas de alumínio e ao espaço limitado entre o provete e as amarras, não foi possível instalar LVDT's nas faces laterais do provete. No entanto, é importante notar que a prensa utilizada nos ensaios é muito rígida nesta direção, sendo a rotação do provete impedida pelo sistema de amarração nas extremidades. Para além disso, durante a instalação do provete, foram tidos cuidados especiais para assegurar o perfeito alinhamento do provete relativamente ao sistema de amarração.

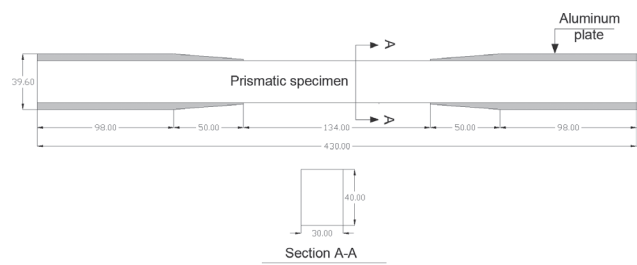


Figura 3 Geometria dos provetes para ensaio à tração uniaxial (dimensões em mm)

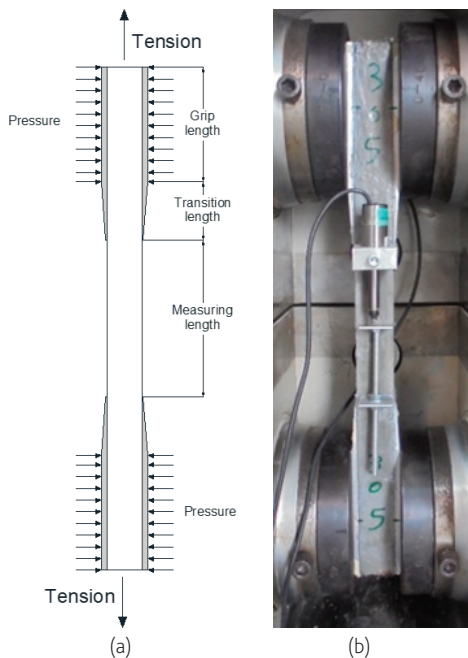


Figura 4 Arranjo experimental do ensaio de tração direta: (a) pressão lateral conferida pelo sistema hidráulico de amarração, (b) fotografia de um provete durante o ensaio

3 Resultados e discussão

3.1 Observações gerais

As curvas força-alongamento para todos os provetes válidos são apresentadas na Figura 6. Foram considerados válidos os provetes nos quais a localização da fenda ocorreu dentro do campo de medida dos LVDT's, não sendo portanto afetada pelas perturbações induzidas pela fixação lateral do provete. Em cada uma das séries, pelo menos 4 dos 6 provetes ensaiados foram considerados válidos. A tensão foi determinada simplesmente dividindo a força registada pela área da seção transversal do provete. O alongamento foi determinado fazendo a média dos registos dos LVDT's posicionados em faces opostas. Note-se que em todos os casos apresentados os desvios entre as leituras de cada um dos LVDT's foram negligenciáveis, indiciando serem desprezáveis as deformações de flexão decorrentes das excentricidades do sistema.

No caso dos provetes com fibras orientadas a 0° (1,5% e 3,0%) e dos provetes com 3% de fibras sem orientação preferencial, as curvas tensão alongamento evidenciam as três fases do comportamento descritas anteriormente: (1) fase elástica; (2) fase de endurecimento acompanhado da formação de múltiplas microfendas; (3) fase de amolecimento caracterizada pela localização das deformações numa fissura crítica. Nos provetes com 3,0% de fibras orientadas a 90° (isto é, perpendiculares à tensão de tração aplicada) o ramo de endurecimento não é visível em todos os provetes ensaiados e

quando existe é muito reduzido. Os provetes com 1,5% de fibras não orientadas não exibiram ramo de endurecimento, tendo-se iniciado o amolecimento e conseqüente localização das deformações com a fendilhação da matriz.

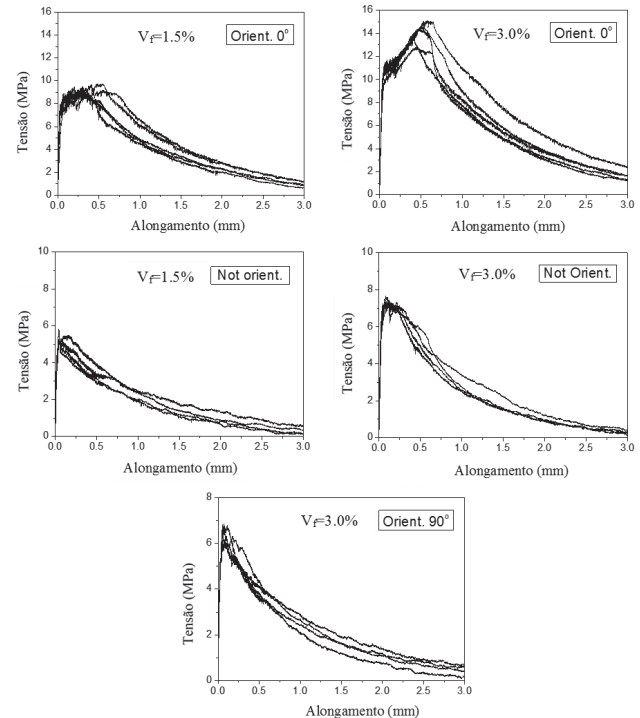


Figura 5 Curvas tensão-alongamento para todos os provetes válidos

Durante a fase elástica o alongamento medido corresponde à deformação elástica do compósito no campo de medida. Nesta fase a diferença entre as curvas é diminuta em virtude de a deformação elástica ser muito pouco afetada pela dosagem e orientação das fibras. Tal como referido acima, e dependendo da dosagem de fibras e da sua orientação, após a fendilhação da matriz pode ser observado um ramo de endurecimento (ou um patamar horizontal). A existência desta fase depende do número de fibras que são ativadas em cada uma das microfissuras. A probabilidade de uma fibra intersectar o plano da fissura, e ser portanto ativada, aumenta com a dosagem e com o cosseno do ângulo que a fibra faz com a normal à superfície de fratura [8]. No caso de misturas com dosagens elevadas (3,0%), ou no caso de as fibras estarem predominantemente orientadas a 0° , o número de fibras ativadas é suficiente para assegurar que a tensão que pode ser transmitida pelas fibras é superior àquela que leva à fendilhação da matriz, pelo que é satisfeita a condição necessária à ocorrência de múltiplas fendas ao longo do provete. Quando a capacidade das fibras se esgota numa das microfissuras, o provete entra em regime de amolecimento, concentrando-se toda a deformação na fenda crítica enquanto as outras descarregam. Nos provetes com baixa dosagem de fibras ou com fibras orientadas de forma desfavorável, o número de fibras passíveis de serem ativadas é reduzido e a tensão decresce imediatamente após a primeira

fendilhação da matriz, caso em que não se observa patamar ou ramo de endurecimento. Tal como é evidenciado nos gráficos da Figura 5, nestas duas últimas fases a dispersão de resultados dentro de cada série aumenta em virtude de a resposta experimental ser largamente condicionada pela distribuição e orientação das fibras, que naturalmente varia de provete para provete.



Figura 6 Padrões de fendilhação representativos dos provetes ensaiados

Na Figura 6 são apresentadas imagens dos padrões de fendilhação observados em provetes representativos de cada uma das dosagens e perfis de orientação estudados, após aspensão da superfície com álcool. Os provetes com $V_f = 3,0\%$ e fibras predominantemente orientadas a 0° exibiram um padrão de fendas muito denso e com aberturas muito reduzidas. Nos provetes com $V_f = 1,5\%$ e fibras predominantemente orientadas a 0° observou-se também um padrão de fendas regularmente espaçadas, embora com

espaçamento e abertura superiores. Nos provetes com $V_f = 3,0\%$ e fibras não orientadas são ainda visíveis várias fendas, embora o espaçamento seja muito superior aos anteriores e algo irregular. No caso dos provetes com $V_f = 3,0\%$ e fibras predominantemente orientadas a 90° , o espaçamento entre as poucas fissuras observadas é ainda maior. Por oposição, nos provetes com $V_f = 1,5\%$ e fibras não orientadas apenas é visível uma fenda, corroborando o que foi descrito anteriormente.

No caso de fibras de aço curtas, lisas e de alta resistência, a resistência à tração do compósito é condicionada pela aderência das fibras e nunca pela cedência do aço. Esse facto foi confirmado por observação das superfícies de fratura dos provetes ensaiados. Após a separação do provete verifica-se que as fibras foram arrancadas da face oposta.

3.2 Influência da dosagem e da orientação das fibras nos parâmetros de fratura

Na Figura 7 é apresentada uma comparação entre as curvas tensão-extensão obtidas efetuando a média das curvas de cada uma das séries ensaiadas. Os valores das extensões foram determinados dividindo o alongamento medido pelos LVDT's pelo seu comprimento de referência (134 mm). Esta figura permite uma avaliação imediata do efeito da dosagem e da orientação das fibras no comportamento à tração do UHPFRC, nomeadamente na tensão de pico e na extensão do patamar ou ramo de endurecimento.

No Quadro III são apresentados os valores médios e respetivos desvios padrão dos parâmetros de fratura que caracterizam a curva tensão-alongamento do UHPFRC em função da dosagens e orientação das fibras. Cada um dos parâmetros está definido na Figura 1 e na Seção 1 deste artigo. O valor de G_{β} apresentado no Quadro III foi obtido através da área abaixo do gráfico tensão – abertura de fenda (após a localização da fenda) até uma abertura de fenda de 3 mm.

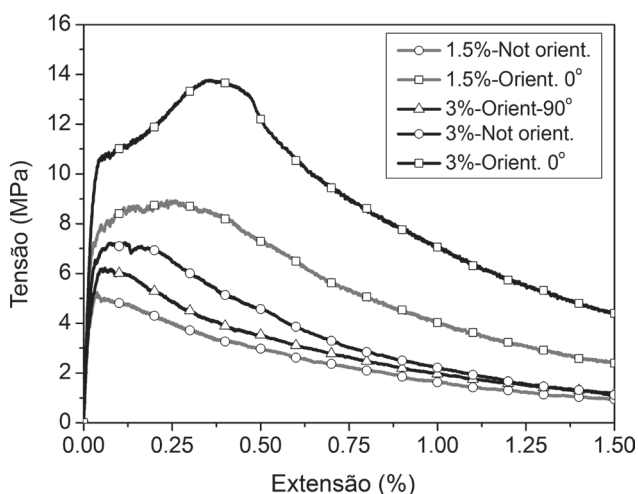


Figura 7 Curvas tensão-extensão médias para cada uma das séries ensaiadas (a extensão tem significado físico até à tensão de pico)

Quadro III Parâmetros de fratura para cada uma das séries ensaiadas

Série		σ_{mc} (MPa)	σ_{uc} (MPa)	ε_{uc} (%)	g_f (kJ/m ³)	G_{β} (kJ/m ²)
$V_f = 1,5\%$	Orient. Média	7,18	8,92	0,39	37,63	8,95
	0° D. Pad.	0,43	0,42	0,05	0,55	0,77
	Não Média	5,26	5,26	–	–	5,20
	orient. D. Pad.	0,24	0,14	–	–	0,75
	Orient. Média	10,42	14,05	0,46	60,81	14,31
	0° D. Pad.	0,38	0,86	0,07	0,94	2,74
$V_f = 3,0\%$	Não Média	6,72	7,35	0,26	22,89	5,70
	orient. D. Pad.	0,38	0,1	0,06	0,36	0,62
	Orient. Média	5,98	6,38	0,14	10,07	5,50
	90° D. Pad.	0,40	0,34	0,06	0,34	0,91

Fica bem patente após a análise dos resultados que a influência da orientação das fibras pode ter mais impacto na resposta do material do que a dosagem. Através da orientação das fibras, e no caso dos provetes com $V_f = 1,5\%$, foi inclusivamente possível passar de um comportamento com amolecimento da resposta após a primeira fissuração, característico dos provetes com fibras não orientadas, para um comportamento claramente dúctil com patamar de endurecimento, ao mesmo tempo que a resistência à tração aumentou cerca de 70%. Este facto põe em evidência os desafios que se colocam na modelação do comportamento anisotrópico de estruturas de UHPFRC sempre que exista orientação preferencial das fibras numa dada direção. A comparação entre os resultados dos provetes com $V_f = 1,5\%$ e fibras predominantemente orientadas a 0° e dos provetes com $V_f = 3,0\%$ sem orientação preferencial demonstram que, mesmo com metade da dosagem de fibras, é possível obter um desempenho à tração superior desde que a orientação das fibras seja favorável.

No caso dos provetes com $V_f = 3,0\%$ observou-se uma variação de 70% da resistência à tração entre os provetes com fibras predominante orientadas a 90° e 0°. Por seu lado, a energia absorvida pelo UHPFRC até à resistência de pico, g_p , mais do que duplicou, sendo que este parâmetro é muito sensível ao número de fendas formadas durante o patamar de endurecimento. A variação dos resultados entre os provetes com fibras orientadas predominante a 90° e os provetes sem orientação preferencial não é tão vincada, o que indicia que a orientação das fibras na direção transversal não terá sido tão bem sucedida. Este facto será posteriormente confirmado com recurso a técnicas de análise de imagem de superfícies polidas e paralelas aos planos de fratura, de forma a permitir obter a distribuição do ângulo de orientação das fibras na secção transversal de cada um dos provetes, utilizando a metodologia seguida pelos autores em trabalhos anteriores [19].

4 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se um estudo experimental desenvolvido com o objetivo de colmatar a lacuna existente relativa à quantificação do efeito da orientação das fibras na curva tensão-alongamento do material em tração uniaxial. O arranjo experimental desenvolvido

para alinhar as fibras revelou-se adequado, permitindo obter perfis de orientação muito distintos de uma forma eficiente. Apesar de serem ensaios morosos e dispendiosos, os ensaios à tração direta efetuados mostraram-se adequados para caracterizar o comportamento do material. O sistema de fixação demonstrou um bom desempenho e permite a utilização de provetes prismáticos de dimensões reduzidas. Os resultados obtidos permitiram confirmar a enorme influência da orientação das fibras no comportamento à tração do UHPFRC, tanto no que diz respeito à resistência à tração como ao desenvolvimento do patamar ou ramo de endurecimento, assim como no padrão de microfendilhação dos provetes. Ficou ainda bem evidenciado que não existe uma lei de comportamento intrínseca para o material, mas antes que esta depende fortemente de todos os fatores extrínsecos que possam condicionar a orientação das fibras, tais como as condições de colocação.

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um trabalho em curso, estando correntemente a ser efetuada a análise de imagem de superfícies polidas de todos os provetes ensaiados com vista a caracterizar a orientação das fibras e assim poder obter informação quantitativa acerca da estrutura da fase fibrosa que possa ser usada no estabelecimento de modelos preditivos do comportamento do material, assim como o desenvolvimento de métodos não destrutivos de avaliação do conteúdo e orientação das fibras no UHPFRC [20].

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da FCT.

Referências

- [1] Li, V. C.; Mishra, D. K.; Wu, H. C. – "Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites". *Materials and Structures*, Vol. 28, pp. 586–595, 1995.
- [2] Naaman, A.; Wille, E. K. – "The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)", *Third Int. Symposium of UHPC 2012*, Kassel, Germany, p. 3-15, 2012.
- [3] Rossi, P. – "High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFRCC): The LCPC experience". *ACI Materials Journal* Vol. 94, pp. 478–483, 1997.
- [4] Yoo, D. Y.; Lee, J. H.; Yoon, Y. S. – "Effect of fibre content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fibre reinforced cementitious composites". *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 742–753, 2013.
- [5] Tran, N. T.; Tran, T. K.; Jeon, J. K.; Park, J. K.; Kim, D. J. – "Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates". *Cement and Concrete Research*, Vol. 79, pp. 169–184, 2016.
- [6] Charron, J. P.; Denarié, E.; Brühwiler, E. – "Permeability of ultra high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses". *Materials and Structures*, Vol. 40, pp. 269–277, 2007.

- [7] Wille, K.; El-Tawil, S.; Naaman, A. E. – "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading". *Cement and Concrete Composite*, Vol. 48, pp. 53–66, 2014.
- [8] Bastien-Masse, M.; Denarié, E.; Brühwiler, E. – "Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers". *Cement and Concrete Composite*, Vol. 62, pp. 111-125, 2016.
- [9] Lee, Y.; Kang, S. T.; Kim, J. K. – "Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2030-2041, 2010.
- [10] Yoo, D. Y.; Zi, G.; Kang, S. T.; Yoon, Y. S. – "Biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete with different fibre lengths and placement methods". *Cement and Concrete Composite*, Vol. 63, pp. 51-66, 2015.
- [11] Abrishambaf, A.; Barros, J. A. O.; Cunha, V. M. C. F. – "Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels". *Cement and Concrete Research*, Vol. 51, pp. 57-66, 2013.
- [12] Abrishambaf, A.; Cunha, V. M. C. F.; Barros, J. A. O. – "The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete". *Fracture and Structural Integrity*, Vol. 31, pp. 38-53, 2015.
- [13] Torrijos, M. C.; Barragan, B. E.; Zerbino, R. – "Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1078–1085, 2010.
- [14] Kim, D.J.; Park, S. H.; Ryu, G. S.; Koh, K. T. – "Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers". *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 4144–4155, 2011.
- [15] Pyo, S.; Wille, K.; El-Tawil, S.; Naaman, A. E. – "Strain rate dependent properties of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under tension". *Cement and Concrete Composite*, Vol. 56, pp. 15-24, 2015.
- [16] Ribeiro, F.; Nunes, S. – "Betões de elevado desempenho reforçado com fibras". *BE2012 - Encontro Nacional Betão Estrutural*, Porto, Portugal, 2012.
- [17] Boulekbache, B.; Hamrat, M.; Chemrouk, M.; Amziane, S. – "Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1664-1671, 2010.
- [18] Graybeal, B. A.; Baby, F. – "Development of direct tension test method for ultra-high-performance fibre-reinforced concrete". *ACI Materials Journal*, Vol. 110, pp. 117-186, 2013.
- [19] Ribeiro, F.; Pimentel, M.; Nunes, S. – "Caracterização da distribuição e orientação das fibras no UHPFRC", in *5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 2014.
- [20] Nunes, S.; Pimentel, M.; Carvalho, A. – "Non-destructive assessment of fibre content and orientation in UHPFRC layers based on a magnetic method". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 72, pp. 66-79, 2016.