Resistência ao corte de vigas e lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC

Shear strength of beams and slabs strengthened with a UHPFRC layer

Mário Pimentel Aurélio Sine Sandra Nunes

Resumo

A reabilitação e reforço de vigas e lajes de betão através de deposição de uma camada de compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC na sigla em Inglês) tem vindo a afirmar-se como uma técnica competitiva, possibilitando incrementos significativos da resistência à flexão na secção de momentos negativos. No entanto, este incremento da capacidade de carga pode ser condicionada pela resistência ao esforço transverso, sendo ainda limitados tanto a evidência experimental como os modelos mecânicos que permitam explicar a contribuição da camada de UHPFRC para o reforço face ao modo de rotura por corte.

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma campanha experimental em que se estudou o efeito da taxa de armadura longitudinal e o efeito de escala na resistência ao corte de vigas (ou faixas de laje) sem armadura transversal. Os resultados são comparados com as previsões de um modelo analítico.

Abstract

Strengthening existing reinforced concrete (RC) beams and slabs using a thin layer of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites (UHPFRC), plain or reinforced with ordinary steel bars, has been shown to be an effective way of increasing the flexural capacity in hogging moment regions. However, as the increase in the flexural strength can be very significant, the shear strength may govern the capacity of the strengthened element. In this regard, the available experimental evidence concerning the shear strength of composite RC-UHPFRC beams and slabs is relatively limited. In this work, the results of an experimental campaign are presented where the influence of important parameters was systematically evaluated, namely the reinforcement ratios in the original RC beam and the new UHPFRC layer, and the size effect. An analytical approach for calculating the shear strength is evaluated.

Palavras-chave: Compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) / Reforço / Esforço transverso

Keywords: Ultra-high performance fibre-reinforced cementitious composites (UHPFRC) / Reinforced concrete beams / Shear / strengthening

Mário Pimentel

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal mjsp@fe.up.pt

Aurélio Sine

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal

Laboratório de Engenharia de Moçambique, Instituto Público - LEM, IP

Moçambique

Sandra Nunes

CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal

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.

Pimentel, M. [et al.] – Resistência ao corte de vigas e lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 18. ISSN 2183-8488. (março 2022) 81-88.

1 Introdução

A reabilitação e reforço de vigas e lajes de betão armado com uma camada de UHPFRC betonada sobre a face superior do elemento existente tem-se revelado uma técnica eficiente [1], na medida em que é compatível com intervenções rápidas e permite aumentar de forma significativa a resistência à flexão das zonas de momento negativo [2][3]. Para além do reforço, também a durabilidade do elemento existente pode ser melhorada em virtude das excelentes propriedades do UPFRC relativas ao transporte de líquidos e gases [4], mesmo quando submetido a tensões de tração decorrentes das cargas de serviço. No caso de lajes, elementos nos quais o betão comprimido está fracamente solicitado, demonstra-se que a resistência à flexão pode ser facilmente duplicada. No que diz respeito ao incremento da resistência ao corte, a evidência experimental é ainda escassa [5][6][7] e indica que também pode ser significativo. A camada de UHPFRC atua não só como uma armadura adicional de grande rigidez, melhorando a capacidade de transferência de tensões de corte através das fissuras inclinadas, Figura 1 (a), mas possibilita ainda a formação do mecanismo resistente alternativo após a formação da fissura crítica de corte-flexão ilustrado na Figura 1 (b) [8][9][10].

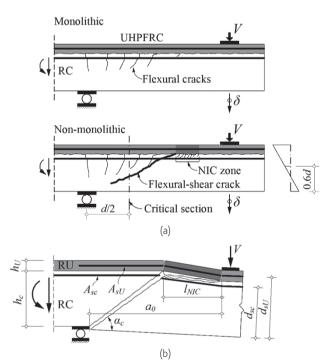


Figura 1 Rotura por corte-flexão de vigas compostas RC-UHPFRC

Neste trabalho apresentam-se os resultados de uma campanha experimental desenvolvida com o intuito de evidenciar o efeito na resistência ao esforço transverso de lajes e vigas sem estribos reforçadas com uma camada de UHPFRC, da taxa de armadura no substrato e na camada de reforço, assim como o efeito de escala normalmente associado aos modos de rotura caracterizados pela propagação de uma fissura crítica.

2 Cálculo da resistência ao corte

O modelo aqui descrito foi desenvolvido na EPFL [9] e [10] e serve de base às provisões da norma Suíça SIA 2052-2016 [11] para o dimensionamento de vigas e lajes mistas betão armado-UHPFRC. A resistência ao corte é determinada recorrendo ao teorema do limite superior da teoria da plasticidade considerando o mecanismo de rotura esquematizado na Figura 1 (b). Após manipulação matemática das equações do trabalho exterior e da dissipação associada ao mecanismo de rotura assumido [8], obtém-se a seguinte equação para o esfoço transverso resistente de uma laje/viga sem armadura transversal:

$$V_{Rt} = V_{\rho c,c} + V_{\rho c,U} \tag{1}$$

em que a parcela atribuível ao betão vem dada por:

$$V_{pc,c} = \frac{1}{2} f_{ce} b \left[\frac{x}{\sin \alpha_c} (1 - \cos \alpha c) \right]$$
 (2)

e a parcela atribuível à camada de UHPFRC por:

$$V_{\rho c,U} = 2 \frac{M_U}{I_{NIC}} \tag{3}$$

A variável $M_{_U}$ é o momento fletor resistente da camada de UHPFRC que, de acordo com o mecanismo considerado, forma duas rótulas plásticas. Este momento pode ser estimado de forma simplificada e conservativa por:

$$M_{U} = f_{syU} \rho_{sU} h_{U} b(h_{U}/2 - x_{U}/2) + f_{Utu} b(h_{U} - x_{U})(h_{U}/2 - x_{U})$$
(4)

em aue

$$x_{U} = \begin{cases} \frac{h_{U}f_{Utu}}{0.5f_{Uc} + f_{Utu}}; \rho_{sU} = 0\\ \frac{\rho_{sU}h_{U}f_{syU}}{0.5f_{uv}}; \rho_{sU} > 0 \end{cases}$$
 (5)

e $\rho_{su} = A_{su}/(h_u.b)$ é a taxa de armadura na camada de reforço.

Sendo este um modelo baseado no teorema do limite superior torna-se necessário encontrar o mecanismo associado à menor carga de colapso. Notando que a distância livre entre a face do apoio e a placa onde é introduzida a força vale (ver Figura 1 (b)):

$$I_{NIC} = a_0 - \frac{d_{sc}}{tq\alpha_c} \tag{6}$$

é necessário encontrar o ângulo α_c que minimiza V_g . Note-se que quanto menor for l_{NIC} , maior será a parcela equilibrada pela camada de UHPFRC, $V_{\rho c,U'}$ e menor a parcela equilibrada pelo betão, $V_{\rho cc}$. Em geral o ângulo α_c é próximo de 30°.

Sendo este um modelo baseado na teoria da plasticidade, não permite descrever os efeitos de escala normalmente associados aos modos de rotura que envolvem a dissipação de energia ao longo de uma fissura localizada.

3 Campanha experimental

3.1 Geometria e armaduras das vigas

A campanha experimental compreendeu o ensaio de 16 vigas com o esquema estático e secções transversais tipo identificados na Figura 2. A Tabela 1 apresenta o resumo de todos os parâmetros que definem a geometria e a armadura das vigas ensaiadas. As vigas estão divididas em 3 séries: VT – com o objetivo de estudar o efeito da taxa de armadura e a espessura da camada de reforço; VB – com o objetivo de estudar o efeito da taxa de armadura no substrato; VS – com o objetivo de estudar o efeito de escala. A série VT contém ainda duas vigas de referência, a viga VT1 representativa da viga original antes do reforço e a viga VT2 com a mesma altura e armadura que a viga reforçada VT-RU2. Em geral, a camada de reforço tem 50 mm de espessura. As vigas da série VS são geometricamente idênticas mas com dimensões distintas, com alturas totais de 230, 460 e 690 cm. Na série VS foram também ensaiadas 3 vigas de referência (VS1, VS2 e VS3).

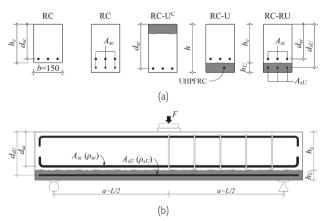


Figura 2 Geometria das vigas ensaiadas: (a) secções transversais tipo; (b) alçado tipo

3.2 Materiais

As vigas foram betonadas com betão pronto com máxima dimensão do agregado $d_g=14$ mm. As propriedades obtidas à data do ensaio das vigas estão resumidas na Tabela 2, sendo que $f_{ct,sp}$ se refere à resistência à tração por compressão diametral. Ao contrário dos demais, o betão das vigas VS revelou um acréscimo muito significativo da resistência entre os 28 dias e os cerca de 280 dias de idade à data do ensaio. O aço em varão utilizado é da classe de resistência A500, com a exceção dos varões Ø6 da viga VBO-RU que são em A400.

O UHPFRC consiste numa mistura desenvolvida na FEUP, estando a sua composição definida em [12]. A mistura é autocompactável, com matriz cimentícia constituída por cimento, filer calcário, sílica de fumo e areia fina. A dosagem de fibras é de 3% em volume (236 kg/m³), tendo sido empregue uma mistura de fibras lisas de aço de alta resistência com comprimentos $l_f = 9$ e 12 mm e diâmetro $d_f = 0,175$ mm (50% de cada). O comportamento à tração foi

Tabela 1 Especificações das vigas ensaiadas

Série	Vigas	Secção tipo	h [mm]	a = L/2 [mm]	Substrato em betão				Camada de reforço UHPFRC			
					<i>ի_շ</i> [mm]	d _{sc} [mm]	Varões	ρ _{sc} [%]	<i>ի_ս</i> [mm]	d _{su} [mm]	Varões	ρ _{sυ} [%]
VT	VT1	RC	215	600	215	180	3ф12	1,26	-	-	-	-
	VT2	RC	250	600	250	200	3ф12 + 3ф10	1,93	-	-	-	-
	VT-U3	RC-U	230	600	200	180	3 ¢ 12	1.26	30	-		0,00
	VT-U5		250	600	200	100	5ψ12		50	-	= 0,0	0,00
	VT-RU1	RC-RU	250	600	200	180	3φ12	1,26	50	225	2ф10	2,09
	VT-RU2										Зф10	3,15
	VT-RU3										3ф12	4,52
	VBO-RU	RC-RU	250	600	200	180	2ф6	0,21		225	3ф12	4,52
VB	VB1-RU						2ф10	0,58	50			
	VB2-RU						2φ12	0,84				
	VS1	RC	200	600	200	180	3ф12	1,26	-	-	-	-
VS	VS2		400	1200	400	360	6ф12					
	VS3		600	1800	600	540	9φ12					
	VS1-RU	RC-RU	230	600	200	180	3ф12	1,25	30	215	2ф8	2,24
	VS2-RU		460	1200	400	360	6ф12		60	430	4φ8 2,24 6φ8	
	VS3-RU		690	1800	600	540	9φ12		90	645		

caracterizado em [12]. Com base no modelo desenvolvido em [13] é possível estimar que numa camada de 50 mm de espessura com orientação aleatória das fibras o material exiba endurecimento sob tração direta com a tensão limite de elasticidade $f_{\textit{Ute}}$, resistência à tração $f_{\textit{Utu}}$ e a extensão de tração correspondente à tensão de pico $\varepsilon_{\textit{Utu}}$ indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 Propriedades mecânicas do betão e do UHPFRC

	(dat	Betão a de ens	saio)	UHPFRC (28 dias)					
Série	<i>E_c</i> [GPa]	f_{c} [MPa]	$f_{\scriptscriptstyle ct,sp}$ [MPa]	<i>E_u</i> [GPa]	$f_{ u_c}$ [MPa]	$f_{_{Ute}}$ [MPa]	$f_{\scriptscriptstyle Utu} \ ext{[MPa]}$	ε _{Utu} [‰]	
VT a)	31	35	3,1						
VB	28	37	2,8	48	135	7,0	7,8	2,5	
VS	33	50	3,8						

a) exceto VT2, em que f_c = 28 MPa e $f_{ct,sp}$ = 2,6 MPa.

3.3 Procedimento de reforço

O recobrimento das vigas das séries VB e VS foi removido com recurso a hidrodemolição com jato de água de alta pressão, ver Figura 3 (a). Este procedimento permitiu remover uma camada de cerca de 10 mm, expondo o agregado grosso e criando uma superfície rugosa. Nas vigas da série VT foi utilizado um martelo pneumático para efetuar esta remoção da camada superior. Este procedimento não é, no entanto, aconselhável em virtude da possibilidade de danificação do betão do substrato e da menor qualidade da superfície final. A superfície foi limpa e, antes da betonagem das camadas de reforço, foi mantida saturada para não absorver água do material do reforço. A betonagem do UHPFRC consistiu simplesmente na deposição do material, tal como se evidencia na Figura 3 (b).

3.4 Arranjo experimental e instrumentação

As vigas foram testadas sob a ação de uma carga a meio vão aplicada com um servoatuador com controlo de deslocamento do êmbolo a uma taxa de 0,02 mm/s. A instrumentação consistiu na colocação de 7 LVDTs para medir os deslocamentos identificados na Figura 4. Aqui apenas se apresentarão as curvas esforço transverso versus deslocamento a meio vão $(\delta_{\rm o})$.





Figura 3 Reforço das vigas: (a) Hidrodemolição de 10 mm da camada de recobrimento superior; (b) betonagem da nova camada de UHPFRC.

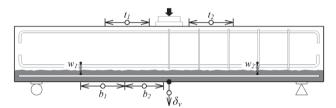


Figura 4 Instrumentação das vigas

4 Resultados e discussão

Padrões típicos de fendilhação de vigas das séries VT e VB são apresentados na Figura 5. Na Figura 6 apresenta-se uma fotografia da viga VS-RU2 após o ensaio. Em geral as vigas reforçadas evidenciaram um comportamento similar. Após uma fase em que apenas eram visíveis fendas verticais de flexão, a abertura de fendas no betão designadas por NIC (near interface cracks) na Figura 1 (a), imediatamente acima da interface entre o betão e a camada de UHPFRC, permitiu o desenvolvimento visível da fissura crítica de corte-flexão. Este instante marca o fim da fase em que a secção compósita tem funcionamento monolítico e pode facilmente ser identificado nas curvas força-deslocamento da Figura 7 por um máximo local da força. Aquando da propagação da fenda diagonal

a força desce ligeiramente, sendo recuperada em seguida. Após este instante desenvolve-se o mecanismo alternativo identificado na Figura 1 (b), no qual a camada de UHPFRC funciona como uma viga sujeita a dupla curvatura sendo responsável pelo equilíbrio de uma fração da força de corte atuante. A rotura ocorre quando a fenda diagonal atravessa o betão comprimido na face superior das vigas, junto à placa de introdução de carga. As vigas da série VS evidenciaram um comportamento ligeiramente distinto na medida em que após a propagação da fenda diagonal de corte-flexão, a carga não mais recuperou os valores anteriormente atingidos, pelo que esse instante corresponde à rotura das vigas.

Os resultados estão resumidos na Tabela 3 e as curvas esforço transverso — deslocamento a meio vão na Figura 7. Verifica-se que no caso das vigas sem armadura na camada de reforço a ductilidade aumentou significativamente face à viga de referência VT1. Verificou-se também que a resistência vem praticamente limitada pela capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas. Já no caso das vigas contendo armadura na camada de reforço foram obtidos acréscimos de resistência muito significativos, tendo sido possível em certos casos duplicar a resistência ao corte da viga de referência.

O modelo descrito na secção 2 foi utilizado para calcular a resistência das vigas reforçadas, estando os resultados também expostos na Tabela 3. Constata-se que o modelo é conservativo para as vigas de reduzida espessura, representativas da dimensão de lajes correntes

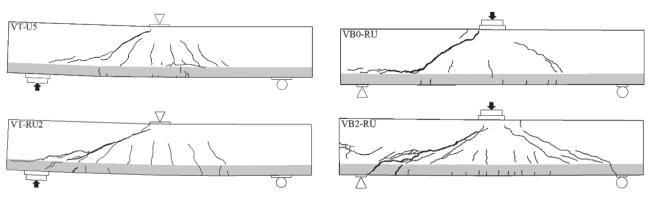


Figura 5 Padrão de fendilhação representativo de vigas da série VT e VB



Figura 6 Padrão de fendilhação da viga VS2-RU após o ensaio

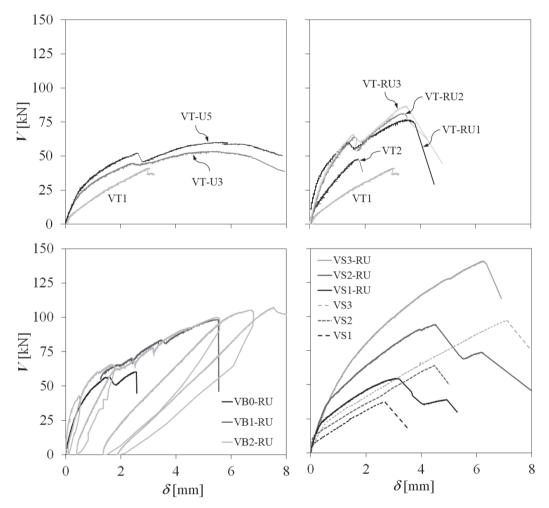


Figura 7 Curvas esfoço transverso – deslocamento a meio vão

de edifícios. No entanto, tal como seria de esperar num modelo baseado na teoria da análise limite, não é capaz de reproduzir o efeito de escala e fornece estimativas não conservativas da resistência para as vigas de maior espessura (VS2-RU e VS3-RU). Na referência [8] é descrito um modelo capaz de produzir com grande precisão a carga correspondente à propagação da fissura crítica e que pode ser usado de forma conservativa para prever a resistência ao corte de vigas ou lajes de maior espessura, tendo em conta o efeito de escala.

Tabela 3 Resumo dos resultados experimentais e comparação com os valores calculados

Beam	V <i>cri</i> t ^{exp} [kN]	VR ^{exp} [kN]	<i>VR^{calc}</i> [kN]	VR ^{exp} / V _{flex}	VR ^{exp} / VR ^{calc}
VT1	41,1	41,1	-	0,83	-
VT2	46,9	46,9	-	0,51	_
VT-U3	44,8	53,4	38,4	0,91	1,39
VT-U5	52,1	60,2	43,9	0,91	1,37
VT-RU1	61,0	76,8	64,5	0,82	1,19
VT-RU2	63,0	81,3	69,0	0,76	1,18
VT-RU3	66,9	86,8	71,9	0,70	1,21
VB0-RU	56,3	60,3	66,2	0,72	0,91
VB1-RU	57,5	98,3	69,2	1,01	1,42
VB2-RU	65,8	107,1	72,5	1,01	1,48
VS1	37,6	37,6	-	0,74	-
VS2	64,0	64,0	-	0,63	-
VS3	97,1	97,1	-	0,64	-
VS1-RU	54,5	54,5	54,3	0,71	1,00
VS2-RU	94,1	94,1	109,0	0,62	0,86
VS3-RU	140,6	140,6	163,6	0,61	0,86

 V_{crit} esfoço transverso correspondente à propagação da fenda crítica de corte – flexão V_o esfoço transverso na rotura

5 Conclusões

Foi desenvolvida uma campanha experimental para estudar de forma sistemática o efeito de diversas variáveis na resistência ao esfoço transverso de lajes/vigas de betão armado reforçadas na face tracionada com uma camada de UHPFRC. As variáveis analisadas foram o efeito de escala, a taxa de armadura na viga original, a taxa de armadura da camada de reforço e a espessura da camada. Foram ainda ensaiadas vigas de referência, sem reforço.

Foi possível confirmar o acréscimo de resistência ao esfoço transverso que é possível obter com esta técnica, sendo possível em muitos casos duplicar a resistência ao corte sem armadura transversal da viga de referência.

As cargas de rotura experimentais foram comparadas com a resistência calculada com o modelo que serve de base à norma Suiça SIA 2052-2016, tendo-se concluído que o modelo é conservativo

quando aplicado a lajes com espessuras típicas de lajes correntes de edifícios. No entanto o modelo não é conservativo quando aplicado a elementos espessos, na medida em que não reproduz o efeito de escala.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base (UIDB/04708/2020) e programático (UIDP/04708/2020) da Unidade de Investigação CONSTRUCT — Instituto de I&D em Estruturas e Construções — através da FCT/MCTES (PIDDAC); projeto UHPGRADE (PTDC/ECI-EST/31777/2017) financiado pelo FEDER através do COMPETE2020-POCI e por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Os autores agradecem o apoio do "Laboratório de Engenharia de Moçambique, Instituto Público (LEM, IP) e da Fundação Calouste Gulbenkian através da bolsa de doutoramento nº144945 atribuída ao segundo autor, e a colaboração das empresas LimpaCanal, Concremat, Secil, Omya Comital, Sika, MC-Bauchemie e Krampeharex.

Referências

- Brühwiler, E.; Denarié, E. (2013) Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. Structural Engineering International 23 (4): 450-57.
- [2] Habel, K.; Denarié, E.; Brühwiler, E. (2007) Experimental Investigation of Composite Concrete and Conventional Concrete Members. ACI Structural Journal, no. 104: 93-101.
- [3] Oesterlee, C. (2010) Structural Response of Reinforced UHPFRC and RC Composite Members. École Polytechniqueet Fédérale de Lausanne, PhD Thesis.
- [4] Matos, A. M.; Nunes, S.; Costa, C.; Barroso Aguiar, J.L. (2021) Durability of na UHPFRC containing spent equilibrium catalyst. Construction and Building Materials, 305, 124681.
- [5] Noshiravani, T.; Brühwiler, E. (2013) Experimental Investigation on Reinforced Ultra-High- Performance Fiber-Reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Combined Bending and Shear. ACI Structural Journal 110 (2).
- [6] Noshiravani, T.; Brühwiler, E. (2013) Rotation Capacity and Stress Redistribution Ability of R-UHPFRC-RC Composite Continuous Beams: An Experimental Investigation. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 46 (12): 2013-28.
- [7] Pimentel, M.; Nunes, S. (2016) Experimental Tests on RC Beams Reinforced with a UHPFRC Layer Failing in Bending and Shear. Proc. of 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials (HiPerMat).
- [8] Sine, A. (2021) Strengthening of reinforced concrete elements with UHPFRC. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. PhD Thesis.
- [9] Noshiravani, T.; Brühwiler, E. (2014) Analytical Model for Predicting Response and Flexure-Shear Resistance of Composite Beams Combining Reinforced Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete and Reinforced Concrete. Journal of Structural Engineering.
- [10] Bastien-Masse, M.; Brühwiler, E. (2016) Contribution of R-UHPFRC Strengthening Layers to the Shear Resistance of RC Elements. Proc. of HiPerMat 2016-4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials.

 $V_{\it flex}$ esfoço transverso correspondente ao esgotamento da capacidade em flexão calculada

Resistência ao corte de vigas e lajes reforçadas com uma camada de UHPFRC Mário Pimentel, Aurélio Sine, Sandra Nunes

- [11] SIA 2052 2016 Béton fibré ultra-performant (BFUP) Matériaux, dimensionnement et execution.
- [12] Abrishambaf, A.; Pimentel, M.; Nunes, S. 2017 "Influence of Fibre Orientation on the Tensile Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites." Cement and Concrete Research, 28-40.
- [13] Abrishambaf, A.; Pimentel, M.; Nunes, S. (2019) A Meso-Mechanical Model to Simulate the Tensile Behaviour of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Cementitious Composites. Composite Structures 222.