

Determinação da resistência à tração de camadas de UHPFRC com base em ensaio não-destrutivo

Sandra Nunes ⁽¹⁾, Mário Pimentel ⁽¹⁾ e Amin Abrishambaf ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5506>

RESUMO

No presente artigo apresenta-se um procedimento para estimar a resistência à tração de camadas de materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras de aço (Ultra-High Performance Fibre-Reinforced cement Composites – UHPFRC na sigla em Inglês), recorrendo a um modelo mecânico simples proposto inicialmente por Naaman [1]. Este procedimento baseia-se na aplicação de um método de ensaio não-destrutivo (NDT), desenvolvido na FEUP, que permite avaliar a dosagem e um coeficiente de orientação das fibras; e em ensaios laboratoriais de tração para estimar a tensão de aderência fibra-matriz equivalente, assumindo um comportamento rígido-plástico. Foi desenvolvido um programa experimental que permitiu estabelecer a relação entre o coeficiente de orientação determinado pelo método NDT e os parâmetros de orientação determinados a partir de análise de imagem. Finalmente, seguindo o procedimento proposto, foi estimada a resistência à tração de diversos provetes, com uma gama variada de dosagens e orientação das fibras, e comparada com os resultados experimentais. A boa correlação encontrada demonstra o potencial do método NDT proposto para a implementação de procedimentos de controle de qualidade em aplicações com UHPFRC.

PALAVRAS-CHAVE: materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras de aço (UHPFRC); resistência à tração, ensaio não-destrutivo.

1.- INTRODUÇÃO

O comportamento à tração dos materiais cimentícios de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras de aço (UHPFRC) é influenciado pelas características das fibras (geometria e esbelteza (l_f/d_f)), pela aderência entre as fibras e a matriz, e pela distribuição e orientação das fibras [2]. 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. Isto implica que não é possível definir uma resposta à tração para o UHPFRC intrínseca, devendo por isso ser definida a resposta à tração representativa do

material aplicado na estrutura de modo a obter previsões fiáveis do comportamento estrutural.

Em geral, o alinhamento preferencial das fibras ao longo de uma determinada direção confere ao material um comportamento anisotrópico que pode ser descrito pela função distribuição de probabilidade de orientação das fibras, por tensores de orientação ou através de parâmetros de orientação escalares como, por exemplo, o número de orientação definido por:

$$\eta_{\theta,i} = \frac{1}{N_f} \sum_{n=1}^{N_f} \cos \theta_n \quad (1)$$

onde N_f corresponde ao número de fibras que atravessam a secção normal ao eixo i e $\cos \theta_n$ é a projeção, segundo o eixo i , de um vetor unitário colinear com a n -ésima fibra.

2.- MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

As composições utilizadas neste estudo foram preparadas com misturas ternárias de cimento CEM I 42.5 R, filer 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 filer 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 aparente de 1.08 e 40% 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).

Quadro 1. Composição (kg/m^3) das misturas estudadas.

<i>Constituinte</i>	<i>1.5%</i>	<i>3%</i>
CEM I 42.5 R	794.90	
Sílica de fumo	79.49	
Filer 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

Foram utilizadas misturas com dois tipos de fibras metálicas (50%+50%) lisas de secção circular ($d_f=0.175\text{mm}$), com comprimentos $l_f=9$ e 12mm , e elevada resistência à tração (2100 MPa). Testaram-se misturas com dosagens totais de 1.5% e 3%, em volume. De

modo a manter o volume global da mistura, retirou-se uma quantidade de areia correspondente ao volume de fibras adicionado, tal como indicado no Quadro 1. No estado fresco as misturas apresentaram excelente deformabilidade e elevada viscosidade, sem risco de segregação, podendo ser classificadas como auto-compactáveis.

3.- MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO BASEADO NA MEDIÇÃO DA INDUTÂNCIA MAGNÉTICA

3.1.- Princípios de funcionamento

No âmbito de um trabalho anterior, Nunes et al. [3] desenvolveram um indutor que consiste num núcleo de ferrite em forma de U com uma bobina de fio de cobre enrolada em torno de cada uma das pernas do núcleo (ver Figura 1). Ao estabelecer uma corrente elétrica através do enrolamento de cobre, é gerado um campo magnético. A indutância, L , do circuito magnético resultante é definida como a quantidade de fluxo magnético (Φ) que é produzida para uma determinada corrente elétrica (I) e pode ser medida usando um medidor RLC.

Quando o indutor em forma de U é colocado sobre uma camada UHPFRC (ver Figura 1), a indutância do circuito magnético varia com a permeabilidade magnética do compósito sobre o qual o fluxo magnético é estabelecido. Com base num modelo físico simplificado de uma camada de UHPFRC, com uma distribuição 2D das fibras, Nunes et al. [3] demonstraram que a permeabilidade magnética relativa do compósito depende da dosagem e orientação das fibras, em relação à direção de medição. Enquanto a relutância magnética da sonda permanecer desprezável quando comparada com a da camada de UHPFRC, o que é válido para as dosagens de fibras habituais no UHPFRC e dada a elevada permeabilidade relativa da ferrite, foi também demonstrado que a permeabilidade magnética relativa do UHPFRC segundo uma determinada direção i ($\mu_{r,i}$) pode ser facilmente calculada a partir de valores de indutância medidos usando a seguinte aproximação

$$\mu_{r,i} \cong L_i / L_{air} \quad (2)$$

onde onde L_{air} é a indutância medida colocando a sonda no ar longe de qualquer objeto magnético.

3.2.- Determinação da dosagem de fibras

Através do modelo físico simplificado verificou-se também que o valor médio da permeabilidade magnética relativa, $\mu_{r,mean}$, obtido a partir de medições em duas direções ortogonais i e j , e dado pela Equação (3), é praticamente independente da orientação da fibras e aumenta linearmente com a dosagem de fibras (ver Figura 2a). Isto foi também confirmado pelos resultados de medições efetuadas em provetes com dosagens de fibras bem controladas, tanto com orientação aleatória como bem orientados, e cobrindo uma gama alargada de distribuições de orientação das fibras [3].

$$\mu_{r,mean} = 0.5 \cdot (\mu_{r,i} + \mu_{r,j}) \quad (3)$$

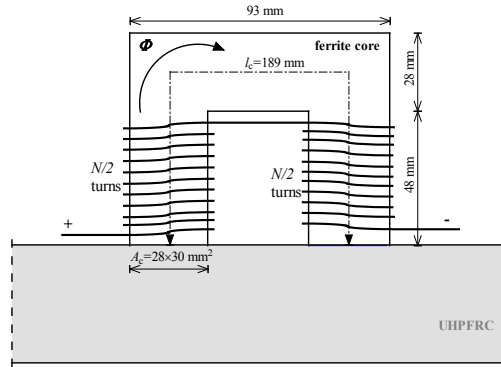


Figura 1. Representação esquemática do indutor sobre uma camada de UHPFRC

Para um dado material e geometria das fibras, é então possível calibrar a relação linear entre $\mu_{r,mean}$ e a dosagem de fibras V_f . A equação de regressão linear obtida é independente da matriz e representa uma assinatura das fibras (ou mistura de fibras) adotadas. No caso da mistura de fibras adotada no presente estudo, a equação de regressão obtida é mostrada na Figura 2b e dada por:

$$\mu_{r,mean} = 1.0 + 4.12 \cdot V_f \quad (3)$$

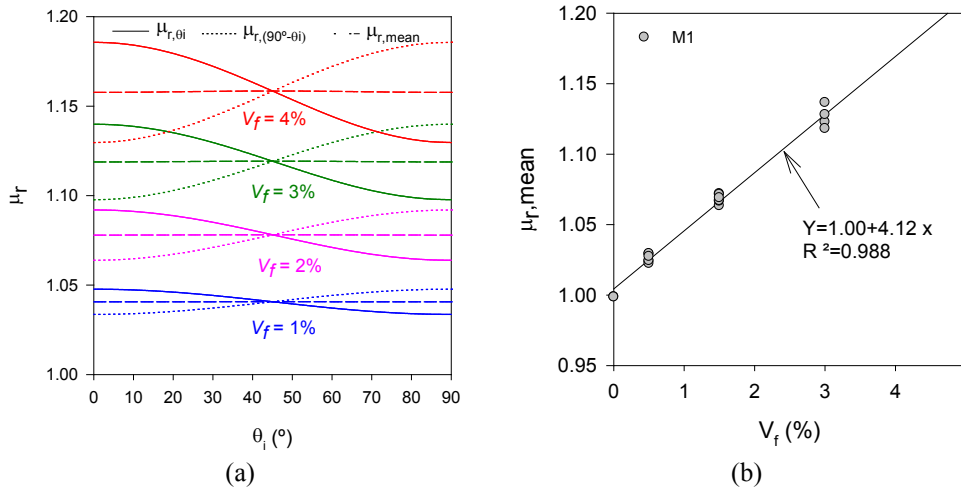


Figura 2. (a) Variação de $\mu_{r,i}$, $\mu_{r,j}$ e $\mu_{r,mean}$ com o ângulo θ_i (°); (b) Ajuste da equação reta que relaciona V_f e $\mu_{r,mean}$, para uma mistura de fibras de $l_f = 9$ e 12 mm (50% de cada) e $d_f = 0.175$ mm.

3.3.- Determinação do coeficiente de orientação NDT

A partir dos mesmos valores de $\mu_{r,i}$ e $\mu_{r,j}$ pode ser definido o coeficiente de orientação ($\rho_i - \rho_j$) para identificar a direção da orientação preferencial das fibras e fornecer uma medida escalar da anisotropia na distribuição de fibras no que respeita às direções i e j :

$$(\rho_i - \rho_j) = 0.5 \frac{\mu_{r,i} - \mu_{r,j}}{\mu_{r,mean} - 1} \quad (4)$$

Com base no modelo teórico apresentado em [3], este coeficiente mostrou-se praticamente independente do conteúdo de fibras. Os valores positivos indicam a orientação das fibras ao longo da direção i enquanto os valores negativos indicam a orientação das fibras ao longo da direção j . Para além disso, verificou-se que $(\rho_i - \rho_j)$ varia linearmente com $\cos^2 \theta$, como se mostra na Figura 3a assumindo que todas as fibras têm a mesma orientação (ou seja, a função de distribuição de probabilidade do ângulo de orientação das fibras é do tipo delta de Dirac).

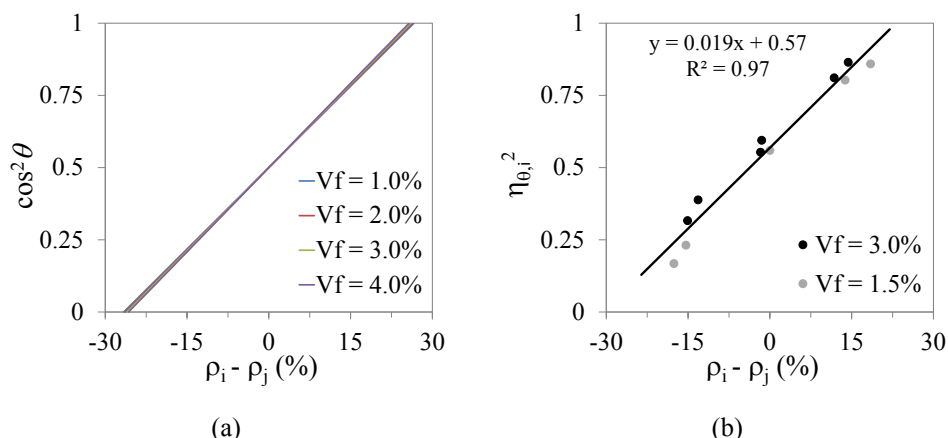


Figura 3. (a) Relação entre o coeficiente de orientação NDT ($\rho_i - \rho_j$) e $\cos^2 \theta$ prevista pelo modelo; (b) Relação linear observada entre $(\rho_i - \rho_j)$ e $\eta_{\theta,i}^2$ determinado através de análise de imagem.

No caso de distribuições reais de orientação das fibras, a evidência experimental disponível mostra que $(\rho_i - \rho_j)$ e $\eta_{\theta,i}^2$ estão de facto correlacionados linearmente (ver Figura 3b). Os pontos correspondem a dados experimentais obtidos após a análise da imagem de provetes com dois teores de fibras e uma gama alargada de perfis de orientação das fibras, obtidos com recurso a um dispositivo que permite o alinhamento das fibras metálicas durante a betonagem dos provetes, através da aplicação de um campo magnético. Para detalhes sobre esta campanha experimental, consultar [4].

O fator de orientação das fibras $\alpha_{0,i}$ (outro parâmetro de orientação escalar utilizado comumente) pode ser definido como a probabilidade de uma fibra interseccionar uma superfície plana normal ao eixo i , podendo ser obtido através de:

$$\alpha_{0,i} = n_{f,i} \frac{A_f}{V_f} \quad (5)$$

onde $n_{f,i}$ corresponde ao número de fibras que atravessa uma superfície unitária normal ao eixo i e A_f é a área da secção transversal de cada fibra. O mesmo procedimento de análise de imagem foi adotado para estabelecer a relação entre o número de orientação $\eta_{\theta,i}$, e o fator de orientação $\alpha_{0,i}$, como mostrado na Figura 4 [4, 5]. Os resultados experimentais sugerem que:

$$\alpha_{0,i} \approx \eta_{\theta,i}^2 \quad (6)$$

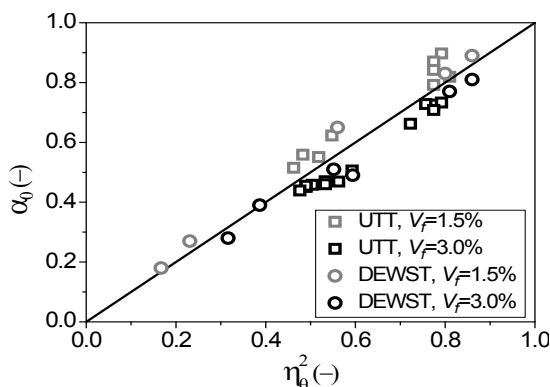


Figura 4. Relação entre $\eta_{\theta,i}^2$ e $\alpha_{0,i}$.

Aceitando que $\alpha_{0,i} = \eta_{\theta,i}^2$, os resultados apresentados na Figura 4 indicam que, no caso da mistura de fibras adotada, a seguinte relação linear pode ser usada para determinar o fator de orientação da fibra a partir do indicador de orientação NDT [4, 5]:

$$\alpha_{0,i} = 0.57 + 1.85 \cdot (\rho_i - \rho_j) \quad (7)$$

4.- RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO UHPFRC

4.1.- Modelo físico

A resistência à tração do UHPFRC, $f_{U_t,u}$, é geralmente regida pela perda de ligação das fibras à matriz seguida pelo arrancamento das fibras, sendo esta última fase que determina o início da fase de amolecimento nas curvas tensão-alongamento. Considerando um comportamento rígido-plástico para descrever a lei de aderência fibra-matriz e um comprimento de ancoragem médio igual $l_f/4$ é possível estimar $f_{U_t,u}$ através da seguinte equação:

$$f_{Ut,u,i} = \alpha_{0,i} \cdot \alpha_{1,i} \cdot \tau_f \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \quad (8)$$

onde o índice $(\cdot)_i$ refere-se à direção perpendicular à superfície da fratura, τ_f é a tensão de aderência equivalente (comportamento rígido-plástico) na ligação fibra-matriz e $\alpha_{1,i}$ é o fator de eficiência das fibras, aqui definido como o valor esperado da função de eficiência das fibras $g(\theta)$:

$$\alpha_{1,i} = \int_0^{\pi/2} g(\theta) \cdot f_i(\theta) \cdot d\theta \quad (9)$$

Na equação anterior, $f_i(\theta)$ é a função de densidade de probabilidade do ângulo de orientação das fibras que cruzam o plano normal à direção i , θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$), e $g(\theta)$ é definido como a relação entre a força de arrancamento de uma fibra orientada de um ângulo θ e a força de arrancamento de uma fibra alinhada ($\theta \approx 15^\circ$ a 20°).

4.2.- Previsão do fator de eficiência das fibras

Seguindo propostas anteriores, a função de eficiência foi considerada como $g(\theta) = 1.0$ para $\theta \leq 60^\circ$. Assim, para os ângulos de orientação no intervalo $60^\circ < \theta \leq 90^\circ$, a eficiência das fibras de aço será desprezada [6], caso em que a equação (9) fica simplesmente $\alpha_{1,i} = F_i(60^\circ)$, sendo $F_i(\theta)$ a função de distribuição cumulativa de θ . Esta função pode ser estabelecida com base em técnicas de análise de imagem. Laranjeira et al [7] concluíram que os primeiro e segundo momentos de θ estão correlacionados e ambos podem ser expressos como função do número de orientação, $\eta_{\theta,i}$. Os resultados da análise de imagem apresentados em [4, 5] confirmam esta proposta e mostram que, de facto, é possível obter boas estimativas de $\alpha_{1,i}$, em função de $\eta_{\theta,i}$ (ou $\alpha_{0,i}$).

No caso de uma orientação das fibras muito favorável, apenas um número insignificante de fibras se encontra orientado com $\theta > 60^\circ$, conduzindo a $\alpha_1 \approx 1.0$. Para cenários de orientação menos favoráveis, os resultados da análise de imagem apresentados em [4, 5] evidenciam uma relação linear entre α_1 e $\eta_{\theta,i}$ (ver Figura 5). A linha sólida, a cinza, corresponde aos valores $F_i(60^\circ)$ que são obtidos assumindo uma distribuição gaussiana para θ , com desvio padrão e média determinados a partir de $\eta_{\theta,i}$, de acordo com Laranjeira et al [7]. Pode-se observar que para $\eta_{\theta,i} > 0.55$ os valores de $\alpha_{1,i}$ obtidos através da função gaussiana se ajustam bem ao dados experimentais. Considerando a relação linear entre α_1 e $\eta_{\theta,i}$ e tendo em conta a equação (6), pode-se sugerir a seguinte equação simples que relaciona diretamente $\alpha_{1,i}$ com $\alpha_{0,i}$.

$$\alpha_{1,i} = 1.686 \cdot \sqrt{\alpha_{0,i}} - 0.406, \quad 0 \leq \alpha_1 \leq 1 \quad (10)$$

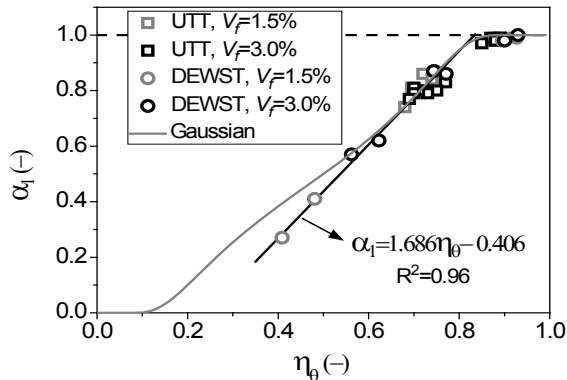


Figura 5. Relação entre o fator de eficiência das fibras e o número de orientação.

4.3.- Estimativa da tensão de aderência fibra-matriz equivalente

A relação tensão de aderência-escorregamento na ligação da fibra à matriz pode ser determinada através de ensaios de arrancamento de fibras. Alternativamente, considerando que apenas se desconhece τ_f , a equação (8) indica que τ_f pode ser determinado a partir de resultados de ensaios laboratoriais de caracterização do comportamento à tração, ajustando uma equação do tipo $f_{U,t,u} = \lambda \cdot \tau_f$ aos dados experimentais, como exemplificado na Figura 6, onde $\lambda = \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot V_f l_f / d_f$. Os ensaios de caracterização do comportamento à tração podem ser ensaios de tração uniaxial ou qualquer outro tipo de ensaio indirecto bem estabelecido, que exija procedimentos de análise inversa para determinar a resistência à tração.

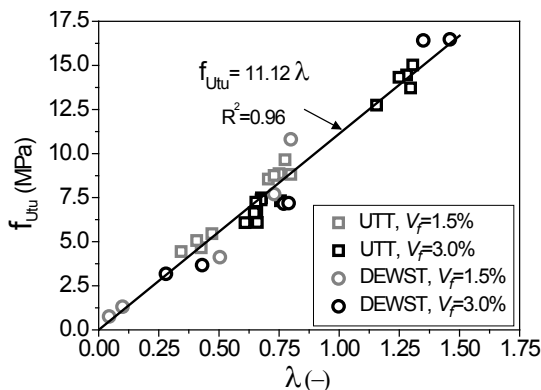


Figura 6. Estimativa da tensão de aderência equivalente, com base nos resultados da análise de imagem e ensaios de tração uniaxial e DEWST.

Na Figura 6 apresentam-se resultados de $f_{U,t,u}$ obtidos a partir de 22 ensaios de tração uniaxial [5] e 11 ensaios “Double-Edge Wedge-Splitting (DEWS)” [4, 8] versus o parâmetro λ , determinado com os valores de α_0 e α_1 obtidos através de análise de imagem de planos paralelos à superfície de fratura. De facto, a análise de regressão linear dos dados

usando a equação $f_{Ut,u} = \tau_f \cdot \lambda$ conduz a um coeficiente de determinação de 0,96 e $\tau_f = 11.1\text{MPa}$. É também interessante constatar que os resultados dos ensaios de tração uniaxial e DEWS podem ser ajustados pela mesma linha. Após estimar τ_f , as medições de NDT em conjunto com as equações (7), (8) e (10) foram usadas para estimar os valores de $\sigma_{N,peak} \approx f_{Ut,u}$ de 36 provetes testados através do ensaio DEWS. A comparação entre os valores previstos e experimentais apresenta-se na Figura 7 onde se observa uma boa concordância, ilustrando o elevado potencial do procedimento desenvolvido para avaliar o efeito da orientação das fibras sobre o comportamento à tração do UHPFRC.

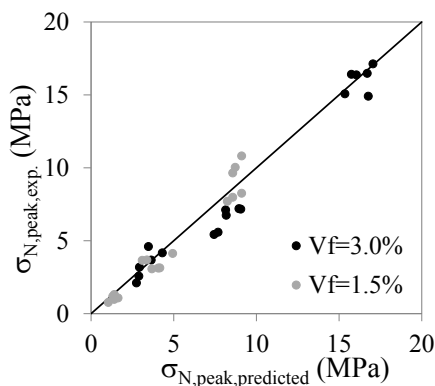


Figura 7. Comparação entre 36 valores de $\sigma_{N,peak}$ obtidos experimentalmente e as respectivas previsões usando as medições NDT e aplicando as equações (7), (8) e (10).

5.- CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia que permite estimar a resistência à tração de camadas de UHPFRC a partir de medições da indutância magnética, ao longo de duas direções ortogonais. Demonstrou-se ainda que:

- A partir destas medições, é possível obter dois indicadores escalares que se correlacionam com a dosagem de fibras (V_f) e com o fator de orientação ($\alpha_{0,i}$).
- O fator de eficiência das fibras ($\alpha_{l,i}$) pode ser determinado a partir de $\alpha_{0,i}$.
- V_f , $\alpha_{0,i}$ e $\alpha_{l,i}$ podem ser usados para estimar $f_{Ut,u}$ recorrendo a um modelo mecânico simples.

A implementação desta metodologia para uma nova mistura de UHPFRC envolve as seguintes tarefas:

- Determinação de τ_f por meio de ensaios de arrancamento ou através do procedimento descrito na secção 4.2.
- Calibração da equação da reta que relaciona V_f com $\mu_{r,mean}$ tal como descrito na secção 3.2.
- Calibração da equação da reta que relaciona α_0 com $(\rho_i - \rho_j)$ tal como demonstrado na secção 3.3

Depois de realizado este trabalho, caso se altere a matriz cimentícia do UHPFRC, mantendo as fibras, apenas será necessário voltar a determinar τ_f , uma vez que as medições da indutância são independentes das propriedades da matriz. O método NDT proposto revela assim um elevado potencial para a implementação de procedimentos de controle de qualidade em aplicações com UHPFRC.

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] Naaman, A.E. (2008). High performance fiber reinforced cement composites. In: Shi, C., Mo, Y.L. (eds.) High-Performance Construction Materials: Science and Applications, pp. 91–153.
- [2] Bastien-Masse M; Denarié E; Brühwiler E. (2016) Effect of fiber orientation on the in-plane tensile response of UHPFRC reinforcement layers. Cement and Concrete Composite Vol. 62, pp. 111-125.
- [3] Nunes, S.; Pimentel, M.; Carvalho, A. (2016). 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.
- [4] Nunes, S.; Pimentel, M.; Ribeiro, F.; Milheiro-Oliveira, P.; Carvalho, A. (2017). Estimation of the tensile strength of UHPFRC layers based on non-destructive assessment of the fibre content and orientation, Cement and Concrete Composites, Vol. 83, pp. 222-238.
- [5] 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, 97, pp. 28–40.
- [6] Foster S. J. (2001). On Behavior of High-Strength Concrete Columns: Cover Spalling, Steel Fibers, and Ductility. ACI Structural Journal. 98:583–589.
- [7] Laranjeira, F.; Grünwald, S.; Walraven, J.; Blom, C.; Molins, C.; Aguado, A. (2011). Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. Materials & Structures; 44:1093–1111.
- [8] Di Prisco, M., Ferrara L., Lamperti M.G.L. (2013). Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. Materials & Structures, 46:1893–1918.