

Durabilidade de um material cimentício de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas

Ana Mafalda Matos¹ Sandra Nunes² José L. Barroso-Aguiar³ Carla Costa⁴

RESUMO

Este estudo apresenta a avaliação de indicadores de durabilidade de uma mistura de UHPC cuja composição foi previamente otimizada em termos de ecoeficiência e custo bem como, especialmente concebida para aplicações de reabilitação e/ou reforço com betonagem “in-situ”. Recorrendo a técnicas de ensaio comumente implementadas, nomeadamente porosidade, resistividade elétrica, absorção de água por capilaridade, penetração de cloretos e reações expansivas, caracteriza-se a durabilidade deste novo material. Adicionalmente apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes.

Palavras-chave: compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPRFC), durabilidade, catalisador exausto de *cracking* catalítico, eco-eficiência, reabilitação.

1. INTRODUÇÃO

O compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPRFC) é um material de construção avançado constituído por um elevado teor de micro-fibras metálicas de elevada resistência (geralmente mais de 2% em volume), incorporadas numa matriz cimentícia ultracompacta. Esta combinação proporciona um desempenho mecânico notável, nomeadamente, resistência à compressão superior a 150 MPa, resistência à tração (uniaxial) acima de 7 MPa, passível de apresentar endurecimento em tração. Além disso, apresenta permeabilidade extremamente reduzida, e como premissa, o alcance de maior durabilidade.

De facto, estudos anteriores confirmam que, contrariamente ao betão convencional, a densa microestrutura do UHPRFC possui poucos poros capilares e cujo diâmetro varia entre 0,1-0,001 μm , tipicamente localizados dentro do C-S-H [1]. A porosidade total é principalmente dependente do tratamento térmico e da relação w/c, e a literatura indica valores de porosidade total entre 2.9-15.2% [2], [3], [4], [5], [6]. A permeabilidade do UHPRFC à água, à pressão atmosférica, é também extremamente baixa, uma vez que estudos apontam para coeficientes de absorção de água por capilaridade entre 0.005-0.06 ($\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$) [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], dependendo, nomeadamente, do regime de cura, da w/c e da incorporação de adições. A profundidade de penetração máxima de CO_2 observada em provetes de UHPC foi de 2 mm [14]. Os estudos encontrados na literatura, seguindo metodologias de ensaio, composições e procedimentos de cura distintos, são unânimes quanto à extraordinariamente baixa permeabilidade do UHPC face a este gás agressivo [5], [10], [15], [16], [17], [18]. No que se refere a reações expansivas, poucos estudos ainda abordam o tema, contudo não existem indícios das misturas de UHPC serem suscetíveis ao ataque por sulfatos ou álcalis [19].

¹Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. ana.matos@fe.up.pt

²Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. snunes@fe.up.pt

³Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Território, Ambiente e Construção, Guimarães, Portugal. aguiar@civil.minho.pt

⁴Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. carlacosta@dec.isel.pt

Todavia, o elevado custo do UHPFRC, cujo teor em cimento varia entre 750-1000 kg/m³ e o teor em sílica de fumo pode atingir 20% da massa de cimento, gerando um consumo elevado de adjuvante 15 vezes superior ao betão convencional, dificulta uma utilização generalizada em estruturas correntes. Porém este material pode ser competitivo em situações particulares, tais como, reabilitação e/ou reforço de zonas específicas de infraestruturas de betão armado ou pré-esforçado (pontes, viadutos, estruturas marítimas). Aplicado em camadas finas (20-65mm), com ou sem armadura, substituindo camadas carbonatadas e/ou fissuradas, o UHPFRC permite uma franca melhoria das propriedades mecânicas e a impermeabilização dos elementos estruturais expostos a ambientes agressivos e/ou sujeitos a esforços elevados. Prevê-se assim, um aumento da vida útil da estrutura bem como a redução de operações e custos de manutenção.

Neste contexto, os autores desenvolveram uma mistura de UHPFRC utilizando materiais locais (disponíveis em Portugal) e tendo em vista aplicações de reparação/reforço com betonagem “in situ” (matriz auto compactável). Para além disso, foram tidos em consideração os fatores custo e ecoeficiência, tentando minimizar a dosagem de cimento e sílica de fumo e incorporando na matriz um resíduo proveniente da indústria petrolífera, o catalisador exausto de *cracking* catalítico (ECat). No seguimento desse estudo, desenvolveu-se um trabalho experimental com o objetivo de analisar diversos indicadores da durabilidade da matriz sem fibras, nomeadamente: porosidade, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica, difusão por migração de cloretos em regime não estacionário, carbonatação e suscetibilidade a reações expansivas. Os resultados obtidos para um período de cura até aos 28 dias de idade, são apresentados e analisados. Adicionalmente foi caracterizado o comportamento mecânico do UHPFRC (com 3% em volume de fibras metálicas), nomeadamente, evolução da resistência à compressão e comportamento à tração uniaxial.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais, proporções, procedimentos e caracterização do estado fresco

O cimento Portland do tipo CEM I 42.5 R foi utilizado como ligante principal. Como adições utilizaram-se micro sílica de fumo e fíler calcário. O adjuvante utilizado foi um superplastificante à base de carboxilatos modificados. Como agregado utilizou-se uma areia fina com um diâmetro máximo de 1 mm, massa volúmica de 2580 kg/m³ e absorção de água de 0.02%, e ECat com massa volúmica 2660 kg/m³ e absorção de 30%. Por último, utilizaram-se micro-fibras metálicas ($\phi=0.21\text{mm}$, $l_f=13\text{mm}$), apresentando resistência à tração de 2750 MPa e módulo de elasticidade 200 GPa. Os ensaios de durabilidade foram realizados numa matriz cimentícia de ultraelevado desempenho sem fibras (denominado doravante UHPC). A caracterização do comportamento mecânico foi aferida numa composição incluindo 3% em volume de microfibras metálicas, designado por UHPFRC. As proporções das misturas de UHPC e UHPFRC apresentam-se na Figura 1. Os provetes foram produzidos numa misturadora de acordo com os requisitos previstos na NP EN 196-1 [20]. Após a amassadura, a auto compactabilidade das misturas foi avaliada recorrendo ao mini cone recomendado por Okamura et al [21], originando um espalhamento de 312mm e 283mm para o UHPC e UHPFRC, respetivamente. Finalmente, foram moldados os provetes e após 24 horas procedeu-se à desmoldagem, iniciando a cura em ambiente controlado (temperatura=20±2°C e HR>95%) até à idade de ensaio.

2.2 Caracterização mecânica do UHPFRC

2.2.1 Evolução da resistência à compressão

A resistência à compressão foi avaliada em cubos (50 mm) de acordo com a ASTM C109/C109M [22]. A evolução desta propriedade no UHPFRC representa-se na Figura 2-a.

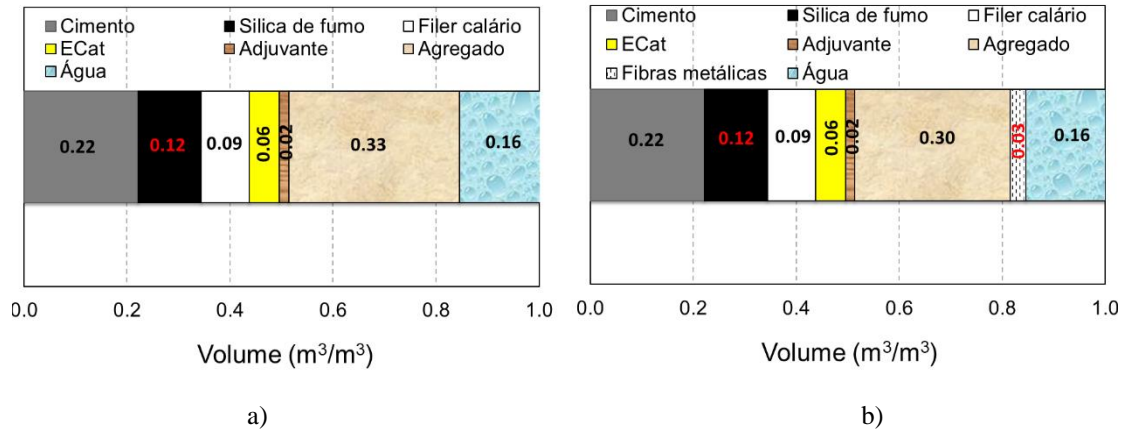


Figura 1 – Composições de: a) UHPC e b) UHPFRC.

2.2.2 Comportamento à tração uniaxial

A resistência à tração foi avaliada em provetes com geometria “dog-bone” (ver esquema Figure 2-c), sendo testada uma secção com comprimento 92 mm e secção transversal 30x40 mm. Após 28 dias de cura húmida os provetes foram ensaiados em controlo de deslocamento, a uma taxa de 0,003 mm/s, usando uma prensa Instron com uma capacidade de 300 kN. O alongamento dos provetes foi medido por meio de um sistema de quatro LVDTs (sensibilidade 150mV/V/mm) acoplados ao longo do comprimento da secção testada e em cada uma das faces dos provetes. Os resultados individuais (curvas cinzentas) e a respetiva média (curva vermelha) representam-se na Figura 2-b.

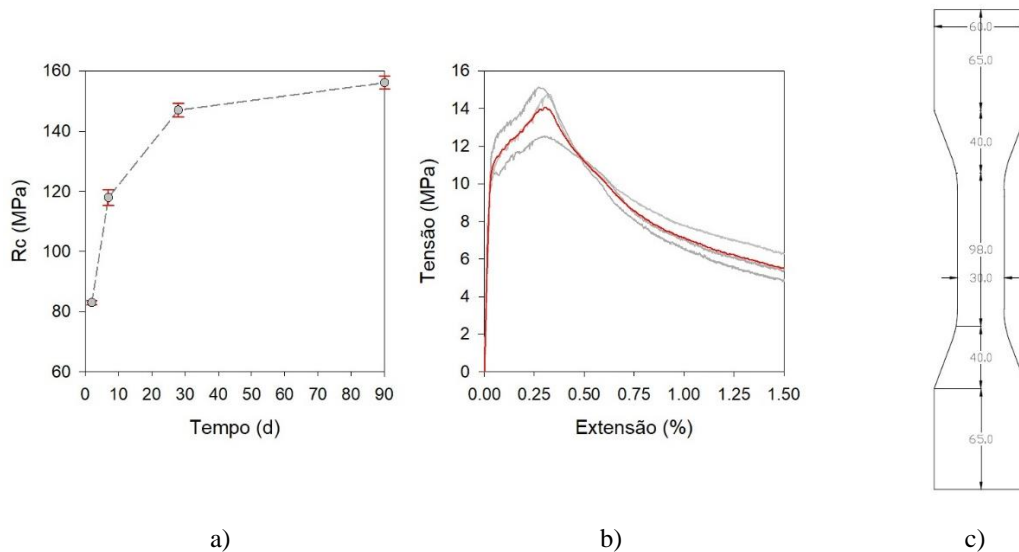


Figura 2. a) Evolução da resistência à compressão; b) Resistência à tração aos 28 dias; c) Geometria do provete “dog-bone” utilizado no ensaio de tração.

2.3 Estudo da Durabilidade

O programa experimental de durabilidade realizado apresenta-se no Quadro 1. Em geral, foram seguidas as normas ou recomendações em vigor, exceto no que se refere à porosimetria de mercúrio, sendo neste caso utilizado um procedimento interno.

A porosimetria de mercúrio foi realizada num porosímetro Poremaster – 60. Este porosímetro permite medir poros entre 200 a 0,0035 μm . O porosímetro possui duas câmaras de baixa pressão que são utilizadas na etapa de determinação da massa volúmica aparente, determinação da distribuição de tamanhos de poros superiores a 7 μm e como etapa preparativa do ensaio a alta pressão. A câmara de alta pressão permite determinar a distribuição de tamanhos de poros até 0,0035 μm . O diâmetro de

poro, D_p , cujo mercúrio foi introduzido a uma determinada pressão, P_{In} , calcula-se segundo a Eq. 1, onde $\gamma = 0,480$ N/m é a tensão superficial do mercúrio e $\theta = 140^\circ$ é o ângulo de contacto entre o mercúrio e as paredes dos poros.

$$D_p = \frac{-4\gamma \times \cos \theta}{P_{In}} \quad (1)$$

No que concerne às reações expansivas, (ASR e sulfatos), o objetivo foi verificar a suscetibilidade da mistura de UHPC desenvolvida relativamente às reações expansivas, pelo que a composição testada foi a apresentada na Figura 1-a. Por último, no que se refere ao ensaio de reatividade aos álcalis, além da cura preconizada, 80°C durante 24 horas, o ensaio foi também realizado em provetes curados a 20°C e HR>95% durante 28 dias e posteriormente colocados na solução de hidróxido de cálcio a 80°C.

Quadro 1. Programa experimental para avaliação da durabilidade do UHPC.

<i>Denominação do Ensaio</i>	<i>Referência normativa</i>	<i>Idade à data de ensaio (dias)</i>	<i>Número de provetes</i>	<i>Dimensão e geometria dos provetes (mm)</i>
Porosimetria de mercúrio	-	28 (+7 dias a 40°C até atingir massa constante)	1	Cilindros h=9, Ø=20
Absorção de água por capilaridade	RILEM TC 116-PCD [23]	28 (+14 dias a 40°C até atingir massa constante)	5	Prismas 40x40x45
Resistividade elétrica	RILEM TC-154 [24]	7, 14, 21 e 28 dias	3	Cubos 50
Resistência à penetração de cloretos	E-463 [25]	28 dias	6	Cilindros h=50, Ø=100
Resistência à carbonatação	E-391 [26]	28 dias	3	Prismas 40x40x160
Ataque por sulfatos de origem externa	E-462 [27]	-	6	Prismas 20x20x160
Reação álcalis sílica	ASTM C 1567 [28]	-	3	Prismas 25x25x285
	ASTM C 1567 [28] cura húmida 28 dias	28	3	

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais obtidos apresentam-se no Quadro 2. Adicionalmente apresenta-se uma classificação indicativa (com base na literatura) relativa aos parâmetros de durabilidade face aos resultados obtidos.

3.1 Porosidade

A distribuição de tamanho dos poros do UHPC apresenta-se na Figura 5-a. A partir de 3,5 nm (limite inferior do porosímetro), a distribuição do tamanho dos poros do UHPC é bimodal, com um pico dominante no diâmetro de poros de aproximadamente 8 nm, seguido por uma diminuição acentuada nos diâmetros de poros maiores que este valor. Após um pico bastante menor no diâmetro de 70 nm, não subsistem mais poros cujo diâmetro seja superior a 100 nm. Além disso, a mediana do tamanho

dos poros corresponde a 8,8 nm. A porosidade total de medida no MIP foi de 4,83%. Dada a proporção água ligante muito baixa e o empacotamento denso dos materiais sólidos na matriz, o UHPC é caracterizado por uma baixa porosidade. Esta é a principal razão pela qual o UHPC devidamente produzido apresenta uma resistência particularmente alta à carbonatação e penetração dos íons cloreto. Além disso, é geralmente aceite que os materiais pozolânicos, neste caso, sílica de fumo e Ecat, melhoram a estrutura dos poros de duas formas: pelo efeito de enchimento, no qual as partículas pozolânicas preenchem os espaços entre os grãos de cimento e os espaços entre grãos de cimento e agregados; e o efeito pozolânico no qual ocorre a reação com o hidróxido de cálcio para produzir quantidade adicional de silicatos de cálcio hidratados, levando a uma redução suplementar no tamanho dos poros e na porosidade capilar durante a hidratação. Cwirzen [4] obteve uma porosidade de 5.8% para um UHPC (w/b=0.17) sujeito a cura húmida a 20°C durante 28 dias. No UHPC desenvolvido por Pyoa and Kim [11], foi medida uma porosidade total de 3.0% em circunstâncias similares de cura. Contrariamente ao betão convencional, a densa microestrutura do UHPC, além de apresentar um volume de poros francamente menor, quase não possui poros capilares. De facto, a porosidade UHPFRC localiza-se fundamentalmente no gel C-S-H [29], [2], [3].

Quadro 2. Indicadores de durabilidade obtidos.

<i>Indicador de durabilidade</i>		<i>Resultados</i>	<i>Classificação da durabilidade (indicativa)</i>
Porosidade	por intrusão de mercúrio (%)	4.83%	Muito alta [30]
Resistividade elétrica - ρ ($\Omega.m$)	28 dias	221.42±16.09	Média [30] Elevada [31]
Resistência à penetração de cloretos	D_{nssm} ($\times 10^{-12}m^2/s$)	1.986 ± 0.131	Alta [30] Extremamente alta [32]
	Teor de cloretos (% massa de cimento+adições)		<0.20% [33] para classes XS/XD
	[0-5] mm	0,157%	
	[5-10] mm	0,080%	
[10-15] mm	0,019%		
	Profundidade de penetração de cloretos (mm)	6.596 ± 0.395	
Coeficiente de absorção de água por capilaridade - S ($mg/(mm^2.min^{1/2})$)		0.014 ± 0.001	
Profundidade de carbonatação (mm)	3 meses	0.00	
Reações expansivas	Expansão ASR (%) Cura ASTM C 1567 Cura húmida 28 dias	0.0180±0.002 0.0721±0.002	
	Expansão sulfatos (%)	0.00	

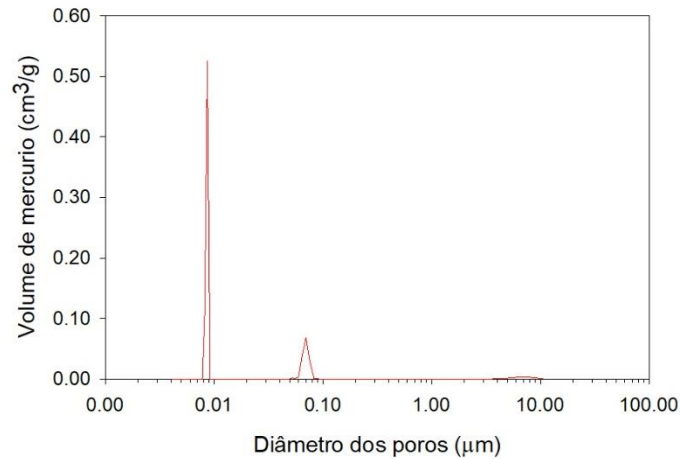


Figura 3 – a) Distribuição do tamanho dos poros do UHPC.

3.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por ação capilar é dependente da raiz quadrada do tempo e pode ser modelada pela seguinte equação [34]:

$$A = A_0 + S \times t^{0.5} \quad (2)$$

onde A (mg/mm^2) é a absorção de água por unidade de área da superfície do provete desde o momento em que mesmo foi colocado em contacto com a água, S é o coeficiente de absorção de água, t é o tempo decorrido desde o momento em que mesmo foi colocado em contacto com a água até ao fim do ensaio e A_0 (mg/mm^2) é a água inicialmente absorvida por poros em contato com a água. A equação acima forneceu um bom ajuste dos resultados experimentais, apresentando coeficientes de correlação lineares superiores a 0,98 (ver Figura 4).

Quando comparado com um betão convencional de boa qualidade ($w/c=0,40$), que tipicamente apresenta um coeficiente de absorção de $0.09 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ [35], o UHPFRC apresenta uma absorção de água muito baixa, $0.014 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$. Isso pode ser atribuído ao baixíssimo teor de água, à ausência de agregados grossos e à densa matriz cimentícia que proporciona uma porosidade capilar significativamente menor.

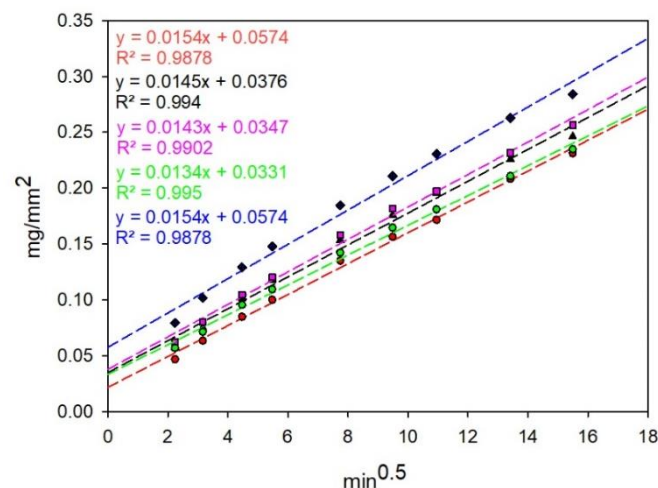


Figura 4 - Regressão linear para a absorção de água por capilaridade nas primeiras 4h de ensaio.

3.3 Resistividade elétrica

O desenvolvimento da resistividade elétrica, de provetes saturados, até aos 42 dias de idade é apresentado na Figura 5, bem como uma classificação indicativa da durabilidade de acordo com [30]. Como esperado, a resistividade elétrica evolui com a idade devido à contínua hidratação dos materiais cimentícios, levando a uma rede de poros mais fina com menos conectividade. O resultado de resistividade aos 28 dias de idade foi 221 $\Omega\cdot m$, o que indica uma matriz muito compacta. Também é de esperar que compósitos cimentícios com maior resistência mecânica apresentem maior resistividade elétrica. Como referência, após 10 anos espera-se que um betão de agregado denso incorporando >5% de sílica de fumo e submerso a 20°C, apresente uma resistividade de 300 a 1000 $\Omega\cdot m$ [36]. A Figura 5 também sugere que a resistividade elétrica continuará a aumentar além dos 42 dias. A avaliação desta grandeza não teve continuidade devido a limitação do equipamento de medição.

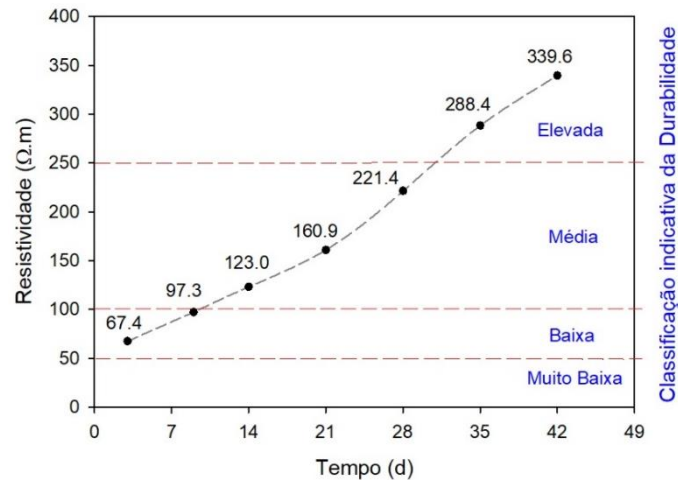


Figura 5 - Evolução da resistividade elétrica do UHPC.

3.4 Resistência à penetração de cloretos

O ensaio preconizado pela especificação do LNEC E-463 [25] é um método acelerado que permite o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos (D_{nssm}). O ensaio foi realizado aplicando uma voltagem de 40 Volts durante 24 horas. Em seguida, cada provete foi dividido axialmente e uma solução de nitrato de prata 0,1 M foi pulverizada numa das seções recém-divididas. A profundidade de penetração de iões cloretos pode então ser medida a partir da precipitação visível de cloreto de prata branca como se ilustra na Figura 6. Com base nestes resultados determinou-se o coeficiente de difusão aparente de cloretos, $1,99 \times 10^{-12} m^2/s$. Este resultado indica que o UHPC apresenta uma elevada resistência à penetração de cloretos. Aparentemente a densa e compacta estrutura do UHPC dificultou a entrada deste agente agressivo, o que corrobora com os resultados obtidos nos ensaios de porosidade e absorção de água por capilaridade. A outra metade do provete foi utilizada para determinar o teor de cloretos. As amostras em pó para análise química foram retiradas a partir da face que foi exposta à solução de cloretos e na direção da penetração dos mesmos. O método de amostragem adotado foi “dry drilling method”, de acordo com a RILEM TC 178-TMC [37], sendo retiradas amostras correspondentes a profundidades de aproximadamente 0-5mm, 5-10mm e 10-15mm. A determinação do teor dos iões cloreto seguiu o procedimento descrito na NP EN 196-2. De acordo com a NP EN 206-1 [33] o teor de cloretos de um betão, expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento+adições do tipo II, não deve exceder 0.4% no caso de betão armado e classe exposição ambiental XC, XF ou XA, e 0.2% no caso de classe de exposição XD ou XS. Após o ensaio acelerado, onde uma solução de 10% NaCl (bastante superior ao expectável numa exposição em ambiente marítimo, cuja concentração em sais é de cerca de 3.5%) foi forçada a entrar no provete através da voltagem aplicada, o teor de cloretos ficou abaixo dos limites mínimos para as classes de exposição aos cloretos mais severas.



Figura 6 – Profundidade de penetração de cloretos (parte mais clara) de um provete de UHPC após o ensaio de migração em regime não estacionário.



Figura 7 – Provete UHPC não carbonatado após 3 meses de exposição a CO₂ (5±0.1%).

3.5 Carbonatação

A resistência do UHPC ao dióxido de carbono foi medida pelo ensaio de carbonatação acelerada no qual os provetes foram sujeitos a um ambiente enriquecido em CO₂ (5% CO₂), humidade (65%) e temperatura (23°C) favoráveis à carbonatação. Após 3 meses nesse ambiente foi cortada 1 fatia de aproximadamente 1 cm de cada um dos provetes e pulverizada com uma solução de 0.1% fenolftaleína. Toda a superfície dos provetes apresentou cor rosada, ver Figura 7. Considera-se a amostra não carbonatada quando a fenolftaleína se transforma em cor-de-rosa e carbonatada se permanece incolor. Os resultados obtidos indicaram que o UHPC não se apresenta carbonatado. Outros estudos já sugeriam a elevada resistência do UHPC a este gás carbónico, nomeadamente, Tafroui et al. [10] e Pierard and Cauberg [17], nos quais as condições de teste e tempo de exposição foram similares. Não obstante, para tempos de exposição superiores, Scheydt and Muller [5] obtiveram uma profundidade carbonatada de 0.18mm após 3 anos a 20°C e HR=65%, Ferdosian [18] obteve 0.04mm após 190 dias, num ambiente com 4% de concentração de CO₂ a 20°C e RH=55%, e Andrade e Torres [15] 1 mm de UHPFRC carbonatado após 16 anos no ambiente interno e externo, exposto à chuva ou a qualquer evento climático.

3.6 Reações expansivas

De acordo com a escassa literatura existente sobre o tema da expansibilidade resultante da reação com os álcalis [38], [14], o UHPC apresentou uma expansão bastante reduzida. A sua estrutura densa e compacta terá retardado a entrada dos alcalis na matriz, o que originou uma expansão extremamente baixa (0.01%) comparada com o limite normativo [28] (0.1%) após 14 dias de imersão em solução alcalina. No que se refere ao ataque por sulfatos de origem externa, a expansão permaneceu aproximadamente nula durante 26 semanas de imersão em sulfato de sódio, corroborando com estudos anteriores [39], [40]. Os resultados indicam que o UHPC não é susceptível às reações expansivas.

4. CONCLUSÕES

Os parâmetros de durabilidade de um UHPC desenvolvido para aplicações de reparação/reabilitação/reforço aplicado “in situ” usando materiais locais (Portugal) foram investigados, cobrindo uma ampla gama de ensaios. Apesar da mistura concebida apresentar dosagens inferiores de cimento e sílica de fumo, quando comparada com misturas comerciais, os resultados dos ensaios de durabilidade indicaram que o UHPC apresenta excelentes propriedades no que se refere resistência à penetração de vários agentes agressivos. Assim, a baixa penetração de cloretos, associada a um coeficiente de absorção de água muito baixo de 0.01 mg/(mm².min^{1/2}) e a uma carbonatação nula, bem como mitigação de reações expansivas, apontam para uma excelente durabilidade. A estrutura densa do UHPC, devido a uma relação água/ligante muito baixa e considerável teor de finos, bem como a introdução de ECat, são as principais razões para este comportamento melhorado. As propriedades mecânicas também se encontram na gama de valor esperados para um UHPFRC (R_{c,90d}>150 MPa e R_{t,28d}>7 MPa).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P. através da bolsa de doutoramento PD/BD/113636/2015, atribuída no âmbito do Programa de Doutoramento em Construção Eco-Eficiente e Reabilitação (EcoCoRe). Agradecimentos também são devidos à Secil, Euromodal, GALP ENERGIA (refinaria de Sines), Sika e Dramix pelo fornecimento de cimento, sílica de fumo e agregado fino, ECat, adjuvantes e fibras metálicas, respetivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Wang, J. Liu, F. Agostini, C. A. Davy, F. Skoczylas, and D. Corvez, “Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 55, pp. 1–13, 2014.
- [2] D. Heinz, F. Dehn, and L. Urbonas, “Fire Resistance of Ultra High Performance Concrete (UHPC) – Testing of Laboratory Samples and Column under Load,” in *International symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2004.
- [3] G. Herold and H. S. Müller, “Measurement of porosity of ultra high strength fiber reinforced concrete,” *Int. Symp. Ultra High Perform. Concr.*, pp. 685–694, 2004.
- [4] A. Cwirzen, “The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 25–33, Jan. 2007.
- [5] J. Scheydt and H. Müller, “Microstructure of ultra high performance concrete (UHPC) and its impact on durability,” in *3rd International Symposium on on Ultra High Performance Concrete*, 2012.
- [6] M. Alkaysi, S. El-Tawil, Z. Liu, and W. Hansen, “Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC),” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 66, pp. 47–56, 2016.
- [7] N. Roux, C. Andrade, and M. A. Sanjuan, “Experimental study of durability of reactive powder concretes,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 1996.
- [8] L. Franke, G. Deckelmann, and H. Schmidt, “Behaviour of ultra-high-performance concrete with respect to chemical attack,” in *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 2008.
- [9] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, and L. Durães, “Optimization of UHPC by adding nanomaterials,” *3rd Int. Symp. UHPC Nanotechnol. High Perform. Constr. Mater.*, no. March 2016, pp. 71–78, 2012.
- [10] A. Tafraoui, G. Escadeillas, and T. Vidal, “Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 980–987, Jun. 2016.
- [11] S. Pyo and H.-K. Kim, “Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 459–466, Jan. 2017.
- [12] Y. Chen, R. Yu, X. Wang, J. Chen, and Z. Shui, “Evaluation and optimization of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of Layered Double Hydroxides (LDHs),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 177, pp. 51–62, Jul. 2018.
- [13] A. Rajasekar, K. Arunachalam, M. Kottaisamy, and V. Saraswathy, “Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 350–356, May 2018.
- [14] J. Piérard, B. Dooms, and N. Cauberg, “Durability evaluation of different types of UHPC,” in *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013 –*, 2013.
- [15] C. Andrade and J. Torres, “LONG TERM CARBONATION OF UHPC,” in *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*, 2013.
- [16] L. Juanhong, S. Shaomin, and W. Lin, “Durability and Micro-structure of Reactive Powder Concrete,” *J. Wuhan Univ. Technol. - Mater. Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 506–509, 2009.
- [17] Pi, N. Cauberg, and O. Remy, “Evaluation of durability and cracking tendency of ultra high performance concrete,” *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Proceedings of the 8th Int. Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, vol. 1. pp. 695–700, 2009.

- [18] I. Ferdosian, “Material Development and Self-healing Capacity of Eco-Efficient Ultra-High Performance Concrete (EEUHPC),” Universidade do Minho, 2016.
- [19] Ben Graybeal, “Ultra-High Performance Concrete. FHWA Publication No: FHWA-HRT-11-038,” Georgetown Pike, McLean, VA, 2011.
- [20] IPQ, “NP EN 196-1. Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação das resistências mecânicas.” Instituto Portugues da Qualidade, Lisboa, Portugal, p. 37, 2006.
- [21] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi, “Self-compacting concrete,” *Struct. Concr.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–17, Mar. 2000.
- [22] ASTM International, “ASTM C109/C109M - 16: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [23] RILEM, “RILEM TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criteria of its durability,” *Mater. Struct.*, vol. 32, no. April, pp. 174–179, 1999.
- [24] R. Polder, “Test methods on site measurement of resistivity of concrete – A RILEM TC-154 technical recommendation,” *Mater. Struct.*, vol. 33, pp. 603–611, 2000.
- [25] LNEC, “E 463-2004. Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.” LNEC, Lisboa, Portugal, pp. 1–8, 2004.
- [26] LNEC, “LNEC E 391-1993. Determinação da resistência à carbonatação.” LNEC, Lisboa, Portugal, pp. 1–2, 1993.
- [27] LNEC, “E 462-2004. Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos.” LNEC, Lisboa, 2004.
- [28] ASTM International, “ASTM C 1567 - 04: Standard Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method).” ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, p. 5, 2004.
- [29] W. Wang, J. Liu, F. Agostini, C. A. Davy, F. Skoczylas, and D. Corvez, “Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 55, pp. 1–13, Jan. 2014.
- [30] V. Baroghel-Bouny, “Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Association Francaise de Genie Civil | AFGC | Paris.” Scientific and Technical Report of the French Civil Engineering Association, AFGC, Bagneux, p. 252, 2004.
- [31] O. Sengul, “Use of electrical resistivity as an indicator for durability,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 434–441, Dec. 2014.
- [32] “RILEM TC 230-PSC. Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability State-of-the-Art Report,” 2015.
- [33] IPQ, “NP EN 206. Concrete Specification, performance, production and conformity.” Instituto Portugues da Qualidade, Lisbon, Portugal, pp. 1–103, 2017.
- [34] C. Hall, B. Marchese, and F. D ’amore, “Water sorptivity of mortars and concretes: a review,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 42, no. 147, pp. 105–109, 1990.
- [35] A. M. Neville, *Properties of concrete*, 5th ed. Longman Group Limited, 1995.
- [36] R. B. Polder, “Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, no. 2–3, pp. 125–131, Mar. 2001.
- [37] Vennesland, M. A. Climent, and C. Andrade, “Recommendation of RILEM TC 178-TM. Testing and modelling chloride penetration in concret. Methods for obtaining dust samples by means of grinding concrete in order to determine the chloride concentration profile,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 46, no. 3, pp. 337–344, 2013.
- [38] G. Benjamin A., “Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete,” no. FHWA-HRT-06-103, p. 186, 2006.
- [39] J. Piérard, B. Dooms, and N. Cauberg, “Evaluation of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests,” in *Hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 2012.
- [40] M. L. Chuang and W. H. Huang, “Durability Analysis Testing on Reactive Powder Concrete,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 811, pp. 244–248, Sep. 2013.