

“Betão” de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas

Ultra-high performance fibre reinforced concrete

Ana Mafalda Matos

Sandra Nunes

Carla Costa

José Luís Barroso Aguiar

Resumo

No âmbito da investigação de Doutoramento da primeira autora, foi desenvolvido um UHPFRC mais eco-eficiente para aplicações de reabilitação/ reforço, utilizando materiais disponíveis no mercado Português. O novo UHPFRC, além de incorporar menores quantidades de cimento e sílica de fumo, contou ainda com a incorporação de um subproduto nacional, proveniente da indústria petrolífera. Além disso não foram aplicados tratamentos de cura.

Foram avaliadas várias propriedades, nomeadamente, evolução da retração autógena, resistência à compressão, tração uniaxial, bem como indicadores de durabilidade. O novo UHPFRC alcançou uma resistência à compressão de 147 e 156 MPa após 28 e 90 dias de cura em água, respetivamente; e resistências a tração e extensão de pico entre 11 a 15 MPa e 0,27-0,47%, respetivamente. O estudo da durabilidade do novo UHPC (sem fibras) demonstrou excelentes propriedades face a vários agentes agressivos e uma porosidade reduzida, praticamente sem poros capilares. Estes resultados combinados com a sua capacidade de auto-compactabilidade e baixa retração autógena confirmam a importância desta nova geração de “betões” tecnologicamente mais avançados para alcançar estruturas mais duráveis.

Palavras-chave: Betão de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas (UHPFRC) / Comportamento mecânico / Idades jovens / Durabilidade / Reabilitação

Abstract

In the scope of the PhD research of the first author, a greener UHPFRC was developed, using raw materials available in Portugal for rehabilitation/reinforcement applications. The new UHPFRC, besides incorporating lower quantities of cement and silica fume, included a national subproduct material from the oil industry.

Several properties were evaluated: autogenous shrinkage, compressive strength, uniaxial tensile strength, water absorption by capillarity, carbonation, chloride ion penetration, and susceptibility to expansive reaction (alkalis and external sulfates). The new UHPFRC achieved a compressive strength of 147 and 156 MPa after 28 and 90 days of water curing, respectively; a peak tensile strength of 11 to 15 MPa and peak strain between and 0.27-0.47%. The durability indicators of the new UHPC (without fibres) demonstrated excellent behaviour against various aggressive agents and a very low porosity with the absence of capillary pores. These results, combined with its self-compacting and low autogenous shrinkage, confirm the importance of this new generation of “concretes” for high-tech construction.

Keywords: Ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites (UHPFRC) / Mechanical behaviour / Early ages / Durability / Rehabilitation

Ana Mafalda Matos

PhD in Civil Engineering
Construct-LABEST-FEUP
Porto, Portugal
anamatos@fe.up.pt | <https://paginas.fe.up.pt/~anamatos/>

Sandra Nunes

PhD in Civil Engineering
Construct-LABEST-FEUP
Porto, Portugal
Delft University of Technology (TU Delft)
Delft, The Netherlands

Carla Costa

PhD in Chemical Engineering
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)
Lisboa, Portugal

José Luís Barroso Aguiar

PhD in Civil Engineering
CTAC-Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

MATOS, A. [et al.] – "Betão" de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Ed. LNEC. Série III. n.º 21. ISSN 2183-8488. (março 2023) 15-24.

1 Introdução

Os compósitos cimentícios de ultraelevado desempenho (UHPC) são uma das novas gerações de "betões" estruturais. Um dos grandes marcos para o desenvolvimento dos UHPC foi o "Reactive Powder Concrete" (RPC) [1, 2], com resistência à compressão superior a 200 MPa, no entanto, frágil. Assim, a utilização de fibras cumpre duas funções importantes: proporcionar ductilidade e melhorar a resistência à tração. A academia, a comunidade técnica e as indústrias em todo o mundo têm reunido esforços para fabricar compósitos cimentícios de ultraelevado desempenho reforçados com fibras (UHPRFC). Além disso, empresas privadas e órgãos governamentais de vários países Europeus e não só, têm vindo a render-se às vantagens do UHPRFC como solução para uma construção mais sustentável e resiliente. A maioria dos avanços nos UHPRFC têm sido realizados no Japão, França, Suíça, Alemanha, Dinamarca e EUA, alguns deles dando origem a misturas comerciais patenteadas [1]–[4]. Normalmente, a resistência à tração UHPRFC excede os 10 MPa, tais como DUCTAL® (12 MPa) [5], o "High-Performance Hybrid-Fibre Concrete" (12 MPa) [2], o "Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete with Low Fiber Contents" (13 MPa) [6]. Na Europa, o UHPRFC tem sido utilizado em pontes, nomeadamente na Alemanha, Áustria, Croácia, França, Itália, Holanda, Espanha e Suíça [2], [7]. A utilização do UHPRFC para fins arquitetónicos também pode ser vista nas fachadas do MuCEM em França, no Centre bus RATP de Thiais, no Estádio Jean Bouin, e no Edifício SWATCH na Suíça. Nos EUA, o UHPRFC tem sido aplicado em tabuleiros de pontes de betão pré-fabricado, pontes de betão pré-esforçado de vãos simples, e com UHPC fabricado "in-situ" para ligar componentes de pontes pré-fabricadas [8].

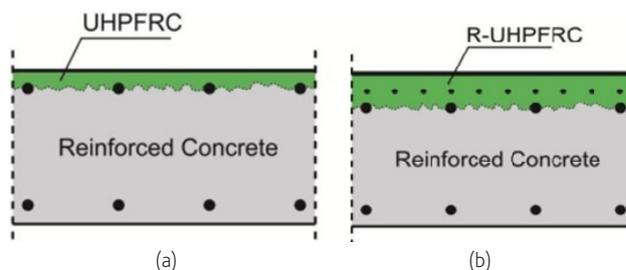


Figura 1 Configuração de elementos estruturais mistos, combinando UHPRFC e betão armado convencional: a) camada UHPRFC (espessura 25-40 mm) apenas com função protetora; b) camada R-UHPRFC (espessura de 40-80 mm) com função de reforço estrutural e proteção [9]

Apesar do seu custo relativamente elevado, o UHPRFC pode ser uma solução muito competitiva para a reabilitação e/ou reforço de áreas específicas de infraestruturas de betão armado ou pré-esforçado (pontes, viadutos, estruturas marítimas). Este conceito foi proposto no *Structural Maintenance and Safety Laboratory* da EPFL, liderado pelo Prof. Dr. E. Bruhwiler, no âmbito do projeto SAMARIS 14 "UHPRFC para reabilitação" [9]. A aplicação de camadas finas (20-65 mm) de UHPRFC, que podem ser reforçadas, substituindo o betão convencional carbonatado e/ou fissurado, tem como premissa a melhoria das propriedades mecânicas e a impermeabilização de (parte de) elementos estruturais expostos a ambientes agressivos

e/ou cargas elevadas (ver Figura 1). Além disso, permite o aumento da vida útil e a redução dos custos de operação e manutenção. Esta solução já foi aplicada em vários países com resultados promissores [2], [4], [10], [11].

No âmbito da investigação de Doutoramento da primeira autora [13], desenvolveu-se uma composição UHPC/UHPFRC utilizando materiais disponíveis em Portugal e tendo em vista aplicações de reparação/reabilitação/reforço com betonagem “*in situ*” (compósito auto-compactável). Para além disso, foram tidos em consideração os fatores de custo e ecoeficiência, tentando minimizar a dosagem de cimento e sílica de fumo e incorporando na composição um subproduto proveniente da indústria petrolífera Portuguesa, o catalisador exausto da unidade de *cracking* catalítico em leito fluidizado (ECat). Nesse sentido, foi realizado um trabalho experimental com o objetivo de conceber e otimizar um UHPFRC [14], [15], caracterizar o seu comportamento mecânico, 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 [16]. As propriedades de transporte simulando condições de serviço, ou seja, diferentes níveis de fissuração, bem como o efeito da penetração de cloretos foram também avaliadas em cooperação com a TU-Delft [17], [18]. Este artigo apresenta o UHPC/UHPFRC desenvolvido bem como a sua caracterização fundamental nos estados fresco e endurecido, ao nível mecânico e indicadores de durabilidade.

2 Desenvolvimento e caracterização do UHPC/UHPFRC

2.1 Materiais constituintes e composição otimizada

O cimento Portland do tipo e classe CEM I 42.5 R foi utilizado como ligante principal. Como adições utilizaram-se micro sílica de fumo e filler calcário. O adjuvante foi um superplastificante à base de carboxilatos modificados. O agregado contemplou (em volume) 85% de areia fina com um diâmetro máximo de 1 mm, massa volúmica de 2580 kg/m³ e absorção de água de 0,02%, e 15% de ECat com massa volúmica 2660 kg/m³ e absorção de 30%. Por último, utilizaram-se micro-fibras metálicas (diâmetro de 0,21 mm e comprimento 13 mm), com resistência à tração de 2750 MPa e módulo de elasticidade 200 GPa num volume de 3% por metro cúbico de UHPFRC.

O Planeamento de experiências (combinando métodos estatísticos, análise de regressão e técnicas de otimização) permitiu atingir os vários requisitos de desempenho do UHPC, nomeadamente, auto-compactabilidade, baixa retração autógena, elevada durabilidade e resistência à compressão mínima de 130 MPa sem tratamentos térmicos ou outros processos de cura acelerados [14], [15].

As composições ótimas do novo compósito com fibras (UHPFRC) e sem fibras (UHPC) apresentam-se na Tabela 1. O comportamento mecânico é apresentado para a matriz combinada com fibras (UHPFRC) e o estudo da durabilidade na matriz sem fibras (UHPC), essencialmente porque o efeito das fibras seria

secundário nos indicadores de durabilidade convencionais. Na Tabela 1 é apresentado adicionalmente uma composição de UHPC anteriormente desenvolvida, mais próxima de composições UHPC comerciais, e utilizada para efeitos de comparação no que se refere à retração autógena (Secção 2.2.1).

Tabela 1 Composição do novo compósito com e sem fibras metálicas, UHPFRC e UHPC, respetivamente, e “UHPC referência” para comparação no ensaio de retração (secção 2.2.1 e 3.1)

	Material constituinte	UHPC (kg/m ³)	UHPFRC (kg/m ³)	UHPC referência (kg/m ³) [19]
Ligante	Cimento	690,19	690,19	794,90
	Sílica de fumo	33,56	33,56	39,74
	Filler calcário	250,58	250,58	311,43
Agregados	ECat	155,50	155,50	–
	Areia	852,10	775,00	1018,60
Adjuvante	Superplastificante	19,50	19,50	30,30
Água	Total*	207,50*	207,50*	182,20
Fibras	Micro fibras metálicas	–	235,00	–
Rácios				
	Água/ligante (w/b)	0,165		0,156
	Água/cimento (w/c)	0,233		0,223

(*) dos quais 46.64 kg/m³ correspondem a água de absorção

2.2 Caracterização do UHPC/UHPFRC

2.2.1 Estado fresco e retração autógena

Imediatamente após a mistura, foi realizado o ensaio de espalhamento utilizando o cone japonês para argamassas auto-compactáveis de acordo com os procedimentos da EFNARC [20].

Para medição do tempo de fim de presa foi preenchido um molde de Vicat e adotado o procedimento da secção 6.3 da norma NP EN 196-3 [21].

A retração autógena foi aferida seguindo o procedimento da norma ASTM C 1698 [22]. O ensaio consiste fundamentalmente na produção de uma argamassa que é colocada num tubo corrugado, com 440 mm de comprimento e diâmetro médio 28,5 mm, apresentado na Figura 2. O molde é selado para prevenir a perda de massa por secagem e é conservado a temperatura constante (20 ± 2°C). A retração foi registada continuamente, a cada 60 segundos, através de um transdutor de deslocamentos e de um sistema de aquisição dataTaker DT500. De acordo com esta norma, a avaliação da alteração de comprimento do provete deve ser realizada a partir do tempo de fim de presa da composição a estudar. Assim, no momento correspondente ao tempo de fim de presa os

provetes foram pesados e foi avaliado o seu comprimento que foi assumido como o seu comprimento inicial. Após 7 dias cada provete foi pesado novamente e a variação da massa do mesmo foi utilizada na validação do resultado aferido no ensaio [22].



Figura 2 Tubo corrugado utilizado no ensaio de retração autogénea

2.2.2 Caracterização mecânica

A resistência à compressão foi avaliada em provetes cúbicos (50 mm³), de acordo com a ASTM C109/C109M [23]. Os provetes foram curados em água e ambiente controlado (T = 20 ± 2 °C) e os ensaios decorreram aos 2,7, 28 e 90 dias de idade.

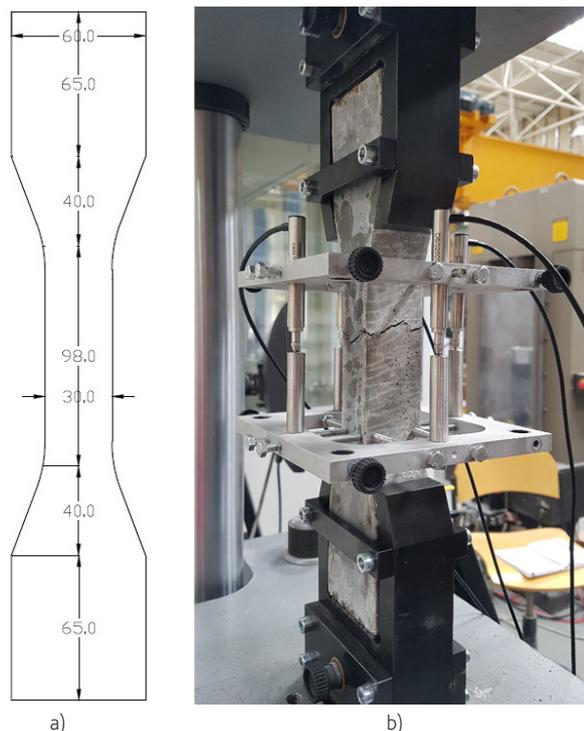


Figura 3 a) Geometria do provete “dog bone” (dimensões em mm); b) Instalação experimental para ensaio de tração uniaxial.

A resistência à tração uniaxial foi avaliada em provetes com geometria “dog-bone” (ver esquema na Figure 3 a), sendo testada uma secção com comprimento 92 mm e secção transversal 30 × 40 mm². Após 28 dias de cura em ambiente controlado (T = 20 ± 2 °C, HR > 95%), os provetes foram ensaiados em controlo de deslocamento, a uma taxa de 0,003 mm/s, numa prensa Instron com uma capacidade de 300 kN. O alongamento dos provetes foi medido por meio de um sistema de quatro LVDTs (sensibilidade 150 mV/V/mm) acoplados ao longo do comprimento da secção testada e em cada uma das faces dos provetes (ver Figura 3 b).

2.2.3 Estudo da Durabilidade

A Tabela 2 apresenta os indicadores avaliados no estudo da durabilidade do UHPC, (cuja composição foi apresentada na Tabela 1). Em geral, os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos descritos nas normas ou recomendações em vigor (Tabela 2), exceto no que se refere à porosimetria de mercúrio, sendo neste caso utilizado um procedimento interno que se explica de seguida.

A medição da porosidade foi realizada num porosímetro Poremaster – 60. Este equipamento permite medir poros entre 200 a 0,0035 μ_m de diâmetro equivalente. O diâmetro de poro, D_p, cujo mercúrio foi introduzido a uma determinada pressão, P_{in}, calcula-se segundo a Equação 1, onde γ = 0,480 N/m é a tensão superficial do mercúrio e θ = 140° 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, o objetivo foi verificar a suscetibilidade da composição UHPC desenvolvida relativamente à reação alcalis-silica (ASR) e sulfatos de origem externa, pelo que a composição testada foi a apresentada na Tabela 1 (UHPC). Por último, no que se refere ao ensaio de reatividade aos álcalis, além da cura prevista na norma ASTM C 1260 [24], ou seja, 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.

2.2.4 Carbono Incorporado

O carbono incorporado no UHPFRC desenvolvido foi estimado como sendo o somatório da quantidade de emissões de CO₂ atribuídas à produção de 1 m³ de cada material constituinte.

Foram utilizados valores de referência dos níveis de CO₂ incorporado nos materiais constituintes do betão fornecidas nas referências [55], [56], [57], como indicado na Tabela 3 (secção 3.4). O CO₂ incorporado no Ecat foi considerado nulo, de acordo com a norma ISO 14044 [58], uma vez que o Ecat foi utilizado diretamente na composição UHPFRC sem qualquer etapa de processamento e substituindo um recurso natural, a areia.

Tabela 2 Resumo do programa experimental de durabilidade

Denominação do Ensaio	Referência normativa	Idade à data de ensaio (dias)	Número de provetes	Dimensão e geometria dos provetes (mm)
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 [25]	28 (+ 14 dias a 40 °C até atingir massa constante)	5	Prismas 40 × 40 × 45
Resistividade elétrica	Método dos 2 elétrodos RILEM TC-154 [26]	7, 14, 21 e 28 dias	3	Cubos 50
Resistência à penetração de cloretos	E-463 [27]	28 dias	6	Cilindros h = 50, Ø = 100
Resistência à carbonatação	E-391 [28]	Até 1 ano	3	Prismas 40 × 40 × 160
Ataque por sulfatos de origem externa	E-462 [29]	–	6	Prismas 20 × 20 × 160
Reação álcalis sílica	ASTM C 1260 [24]	–	3	Prismas 25 × 25 × 285
	ASTM C 1260 [24] cura húmida 28 dias	28	3	

3 Resultados e Discussão

3.1 Estado fresco e retração autogénea

As duas composições, UHPC e UHPFRC, alcançaram a auto-compactabilidade, apresentando diâmetros de espalhamento finais médios de 312 mm e 282 mm, respetivamente. Os tempos de fim de presa foram em média 2h para a composição com ou sem fibras.

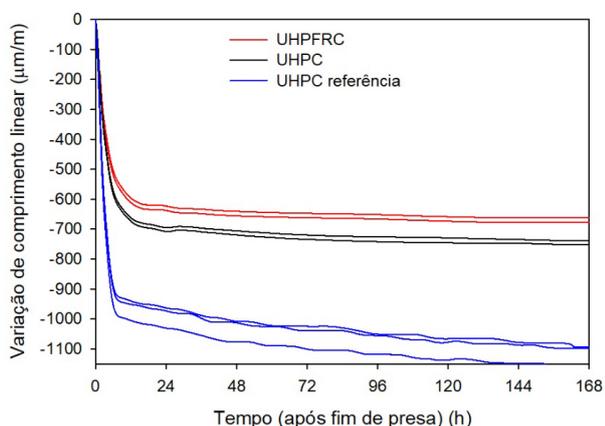


Figura 4 Variação de comprimento linear dos provetes UHPC, UHPFRC no ensaio de retração autogénea

Tendo em consideração a baixa relação água/ligante e o elevado teor cimento típico das famílias UHPC, antecipar-se-ia uma elevada

retração autogénea. De facto, as composições tradicionais de UHPC (cimento + elevado teor de SF) tipicamente atingem valores superiores a 1000 µm/m aos 7 dias de idade (“UHPC referência”, Figura 4). A Figura 4 mostra que a mistura UHPC em estudo (“UHPC”) apresenta significativamente menos retração autógena (cerca de 700 µm/mm aos 7 dias) atribuída à quantidade significativa de água absorvida pelo ECat e que será utilizada ao longo da cura para a prossecução das reações de hidratação dos ligantes hidráulicos. A quantidade de água extra absorvida pelo ECat na mistura atual foi de 46,6 L/m³, o que é semelhante à capacidade de absorção de água de polímeros superabsorventes ou agregados leves frequentemente utilizados para a cura interna de UHPC [3].

3.2 Caracterização mecânica

A figura 5a) apresenta a evolução da resistência à compressão do UHPFRC até 90 dias. Foram alcançadas resistências à compressão de 147 MPa e 156 MPa, respetivamente, após 28 dias e 90 dias, sem qualquer tipo de cura acelerada. Relativamente ao comportamento à tração, os resultados individuais (curvas cinzentas) e a respetiva média (curva negra) representam-se na Figura 5b). Depreende-se que o UHPFRC apresentou uma resistência de pico entre 11 MPa a 15 MPa e uma extensão de pico entre 0,27% a 0,47%, respetivamente, aos 28 dias. O comportamento obtido corrobora os resultados relatados na literatura sobre outros UHPFRC com o mesmo teor de fibras [6]. Foi ainda observado endurecimento em tração na maioria dos provetes, particularmente, para os que teriam uma orientação mais favorável das fibras.

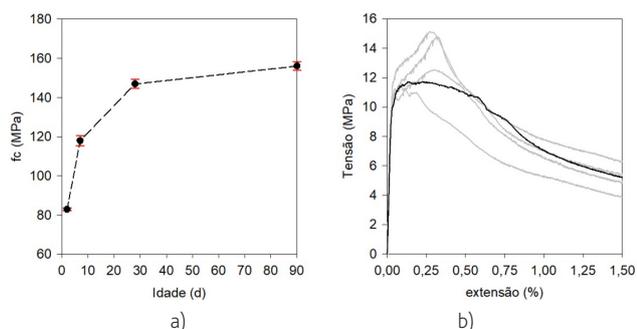


Figura 5 a) Evolução da resistência à compressão; b) Resistência à tração aos 28 dias, do UHPFRC

3.3 Estudo da durabilidade

3.3.1 Porosidade

A distribuição de tamanho dos poros do UHPC apresenta-se na Figura 6. 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. A mediana do tamanho dos poros corresponde a 8,8 nm e a porosidade total foi de 4,83%. 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, tipicamente a porosidade das famílias UHPC localiza-se fundamentalmente no gel dos compostos de silicato de cálcio hidratados (C-S-H) [31], [32], [33]. Dada a proporção água/ligante muito baixa e a elevada densidade de empacotamento das partículas, o UHPC é caracterizado por uma baixa porosidade. Esta é a principal razão pela qual o UHPC devidamente produzido apresenta uma resistência extremamente elevada a agentes agressivos líquidos ou gasosos.

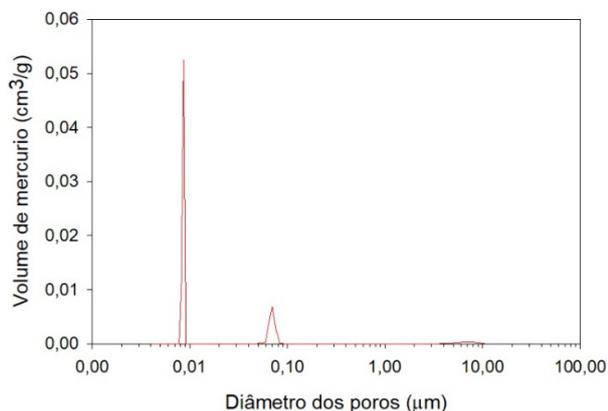


Figura 6 Distribuição do tamanho dos poros do UHPC

Além disso, é geralmente aceite que os materiais pozolânicos, neste caso, sílica de fumo e Ecat, contribuem para o refinamento

da estrutura dos poros dos materiais à base de cimento de duas formas: pelo efeito de físico (enchimento), no qual as partículas preenchem os espaços entre os grãos de cimento e os espaços entre grãos de cimento e agregados; e o efeito pozolânico que consiste na sua reação com o hidróxido de cálcio (formado durante a reação de hidratação do cimento) para produzir quantidades adicionais de C-S-H. Cwirzen [34] 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 [35] foi medida uma porosidade total de 3,0% em circunstâncias similares de cura. A revisão bibliográfica mostra que a porosidade média do UHPC/UHPFRC corresponde a 6,4% para uma relação água/ligante entre 0,13-0,22 e uma resistência à compressão entre 100-279 MPa [36].

3.3.2 Absorção de água por capilaridade

Quando comparado com um betão convencional de boa qualidade (w/c = 0,40), que tipicamente apresenta um coeficiente de absorção de 0,09 mg/(mg/mm².min^{0,5}) [37], o UHPC apresenta uma absorção de água muito baixa, valor médio 0,014 ± 0,006 mg/(mm².min^{0,5}), ver Figura 7. Este resultado pode atribuir-se ao baixíssimo teor de água, à ausência de agregados grossos e à densa matriz cimentícia que proporciona uma porosidade capilar quase inexistente.

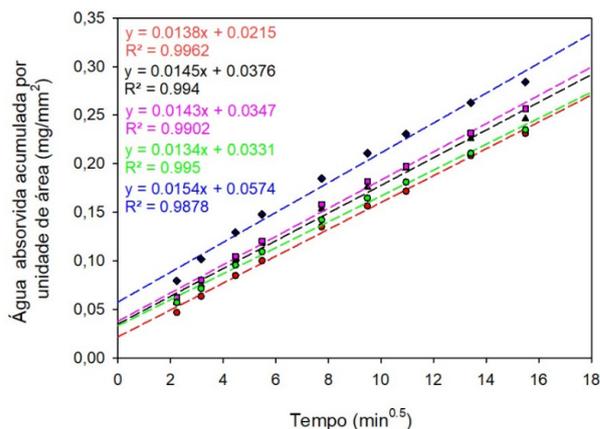


Figura 7 Regressão linear para a absorção de água por capilaridade nas primeiras 4h de ensaio

3.3.3 Resistividade elétrica

A Figura 8 apresenta o desenvolvimento da resistividade elétrica, de provetes de UHPC saturados, até aos 42 dias de idade, bem como uma classificação indicativa da durabilidade de acordo com [38]. 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 221,42 ± 16,09 Ω.m, o que indica uma matriz muito compacta. Também é de esperar que compostos 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 $\Omega \cdot m$ [39]. A Figura 8 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.

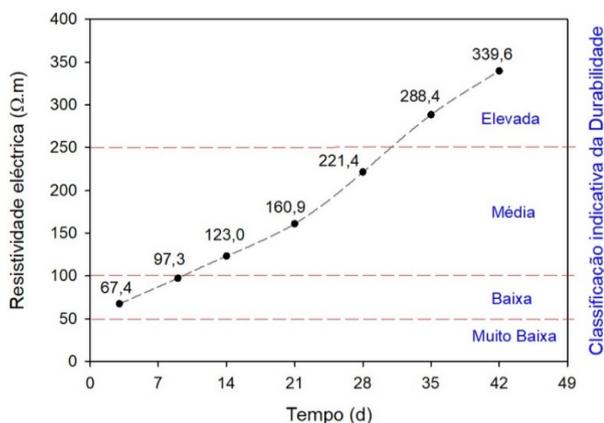


Figura 8 Evolução da resistividade elétrica do UHPC

3.3.4 Resistência à penetração de cloretos

O ensaio preconizado pela especificação do LNEC E-463 [27] 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 V 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, como se ilustra na Figura 9.



Figura 9 Superfícies divididas dos provetes cilíndricos após ensaio de resistência aos cloretos aos 28 dias; entrada de cloretos pelo lado da superfície inferior (profundidade de penetração de iões de cloreto na parte mais clara)

O UHPC apresentou um $D_{nssm} = 2,01 \times 10^{-12} \pm 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$. Este resultado indica que o UHPC apresenta uma elevada resistência à penetração de cloretos. Aparentemente a estrutura densa e compacta do UHPC dificultou a entrada deste agente agressivo, o que corrobora os resultados obtidos nos ensaios de porosidade e absorção de água por capilaridade.

3.3.5 Carbonatação

O UHPC não apresentou carbonatação após 1 ano de exposição a uma concentração de CO_2 de 5%. Outros estudos já sugeriam a elevada resistência das famílias UHPC a este gás, nomeadamente, Tafraoui *et al.* [40] e Pierard *et al.* [41], nos quais as condições de teste e tempo de exposição foram similares. Não obstante, para tempos de exposição superiores, Scheydt and Muller [42] obtiveram uma profundidade carbonatada de 0,18 mm após 3 anos a 20 °C e HR = 65%, Ferdosian [43] obteve 0,04 mm após 190 dias, num ambiente com 4% de concentração de CO_2 a 20 °C e RH = 55%, e Andrade e Torres [44] observaram 1 mm carbonatação após 16 anos em ambiente interno ou externo.

3.3.6 Reações expansivas

De acordo com a escassa literatura existente sobre o tema da expansibilidade resultante da reação da sílica com os álcalis [45], [46], o UHPC apresentou uma expansão bastante reduzida, ver Figura 10. A sua estrutura densa e compacta terá retardado a entrada dos álcalis na matriz, o que originou uma expansão extremamente baixa ($0,018 \pm 0,002\%$) comparada com o limite normativo [30] ($0,1\%$) após 28 dias de imersão em solução alcalina. Os provetes UHPC curados em água 28 dias apresentaram uma expansão superior relativamente aos provetes curados termicamente, como seria de esperar ($0,072 \pm 0,002\%$), ainda assim abaixo do limite normativo.

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 [47], [48]. Os resultados indicam que o UHPC mitiga as reações expansivas.

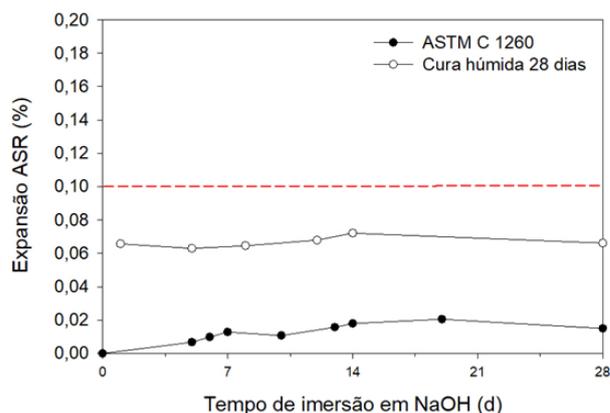


Figura 10 Alteração no comprimento dos provetes UHPC no ensaio ASR (a linha horizontal tracejada refere-se ao limite normativo admissível)

3.4 Carbono incorporado

A Tabela 3 apresenta estimativa de carbono incorporado em 1 m³ do UHPFRC desenvolvido bem como, a contribuição de cada material constituinte expressa em 103 kg CO₂-eq/m³ e a percentagem desse contribuído relativamente ao valor total de carbono incorporado estimado. Deste resultado constata-se, que o carbono incorporado deve-se principalmente ao fabrico de microfibras metálicas (50,1%) e à produção de cimento (45,9%).

Tabela 3 Potencial de aquecimento global (GWP) para a produção de 1 m³ do UHPFRC desenvolvido

Material constituinte	Quantidade kg/m ³	GWP kg CO ₂ -eq/kg	GWP × 103 g CO ₂ -eq/m ³
Cimento	690,19	0,8330 [50]	574,93 (45,9%)
Silica de fumo	33,56	0,7900 [51]	26,51 (2,1%)
Filer calcário	250,58	0,0712 [52]	4,31 (0,3%)
ECat	155,50	0 [53]	0,00
Areia	775,00	0,0011 [52]	0,82 (0,1%)
Superplastificante	19,50	0,9440 [52]	18,40 (1,5%)
Fibras metálicas	235,0	2,6700 [50]	627,45 (50,1%)
Total:			1252 (100%)

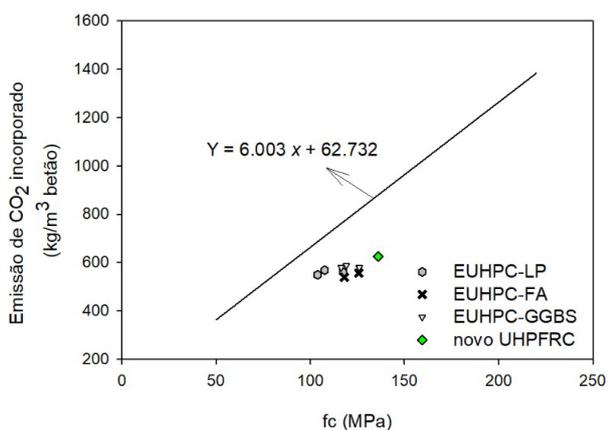


Figura 11 Carbono incorporado da composição desenvolvida (novo UHPFRC) e de outros UHPC mais eco eficientes (adaptado da Referência [49])

Com base na literatura, Yu *et al.* [49] sugerem uma linha de tendência entre a resistência à compressão e o carbono incorporado para as famílias UHPC (calculadas a partir dos valores de CO₂ incorporados para cada componente de betão). A regressão linear que representa essa tendência, bem como a equação correspondente, são ilustradas na Figura 11. A mistura desenvolvida no presente estudo está abaixo da linha de tendência, o que significa que o novo UHPC apresenta

um impacto ambiental inferior, estando próximo dos UHPC mais eco eficientes propostos por Yu *et al.* [49]. EUHPC-LP, EUHPC-FA e EUHPC-GGBS referem-se a diferentes misturas de UHPC incorporando filler calcário, cinzas volantes e escória granulada de alto-forno moída como substituto do cimento, respetivamente [49].

4 Conclusões

Pela primeira vez, no presente estudo, o catalisador exausto de cracking catalítico (ECat), um resíduo gerado nalgumas refinarias de petróleo, foi utilizado como agente de cura interna mitigando a retração autogénea do UHPFRC.

O novo UHPFRC alcançou uma resistência à compressão de 147 e 156 MPa após 28 e 90 dias de cura em água, respetivamente; e resistência à tração e extensão de pico entre 11 a 15 MPa e 0,27-0,47%, respetivamente.

Os resultados de porosidade avaliados com recurso a MIP (MIP < 5%), o coeficiente de absorção de água por capilaridade (0,014 mg/(mm²min^{0.5})), a baixa penetração de cloretos, carbonatação nula, bem como mitigação de reações expansivas, apontam para uma excelente durabilidade.

Apesar da mistura concebida apresentar dosagens inferiores de cimento e sílica de fumo, quando comparada com misturas comerciais, e de não se terem adotado tratamentos de cura, os resultados obtidos indicaram que o UHPFRC/UHPC apresenta características mecânicas e de durabilidade equivalentes.

A estrutura granular densa do UHPC, e baixa razão água/ligante, proporcionada por uma seleção e proporções adequadas e otimizadas dos materiais constituintes, explicam este ultraelevado desempenho. Adicionalmente, a incorporação de ECat pode contribuir para minimizar a quantidade deste subproduto enviado para aterro, conferindo-lhe valor acrescentado bem como reduzir a exploração de recursos naturais.

Agradecimentos

Este estudo foi apoiado financeiramente por: Financiamento de Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático – UIDP/04708/2020 do CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); pelo projeto POCL-01-0145-FEDER-031777 - "UHPGRADE – Nova geração de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras para reabilitação e reforço das infraestruturas" financiado por fundos FEDER através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais (PIDDAC) através da FCT/MCTES; 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, Chryso Portugal, 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] Graybeal, B.; Brühwiler, E.; Kim, B.S.; Toutlemonde, F.; Voo, Y.L.; Zaghi, A. – "International Perspective on UHPC in Bridge Engineering," *Journal of Bridge Engineering*, vol. 25, no. 11, p. 04020094, Nov. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001630.
- [2] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J.; Leutbecher, T.; Frohlich, S. – *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples*. Berlin, Germany: Ernst & Sohn, Wiley, 2014. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [3] Tayeh, B.A.; Bakar, B.H.A.; Johari, M.A.M.; Voo, Y.L. – "Evaluation of Bond Strength between Normal Concrete Substrate and Ultra High Performance Fiber Concrete as a Repair Material," *Procedia Engineering*, vol. 54, pp. 554–563, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.050.
- [4] Huang, Y.; Grünewald, S.; Schlangen, E.; Luković, M. – "Strengthening of concrete structures with ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPRC): A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 336, p. 127398, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127398.
- [5] Li, V.C. – "Complete characterisation of tensile properties of Ductal® UHPRC according to the French recommendations," in *International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, 2003, vol. 1, no. 3, pp. 21–34. Accessed: May 17, 2022. [Online]. Available: <http://jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/jact/1.215?from=Google>
- [6] Wille, K.; Kim, D.J.; Naaman, A.E. – "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 44, no. 3, pp. 583–598, Apr. 2011, doi: 10.1617/S11527-010-9650-4/TABLES/8.
- [7] Graybeal, B.A.; Russel, H.G. – "Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. Publication N.o FHWA-HRT-13-060," 2013.
- [8] McDonagh, M.D.; Foden, A.J.; Brinckerhoff Andrew Foden, P.J.; Brinckerhoff, P. – "Benefits of Ultra-High Performance Concrete for the Rehabilitation of the Pulaski Skyway", First International Interactive Symposium on UHPC, Des Moines, Iowa, July 18-20, 2016.
- [9] "Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme SAMARIS Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure WP 14: HPRCC (High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites) for rehabilitation Deliverable D25b Guidelines for the use of UHPRC for rehabilitation of concrete highway structures," 2006.
- [10] Brühwiler, E. – "Rehabilitation and strengthening of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete," in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, 2012, pp. 72–79.
- [11] Nabaei, S.; Nendaz, S. – "Rehabilitation of transportation infrastructures: the potential of new materials," IABSE Conference: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva, Switzerland, September 2015, published in *Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, pp. 1195-1202 .
- [12] Wassmann, K.; Brühwiler, E.; Lunk, P. – "Strengthening of RC Slabs using UHPRC – Concepts and Applications", 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials, Kassel, Germany, March 9-11, 2016.
- [13] Matos, A.M. – "Design of eco-efficient ultra-high performance fibre reinforced cement-based composite for rehabilitation/strengthening applications," Porto, 2020. Accessed: Dec. 26, 2021. [Online]. Available: https://sigarra.up.pt/reitoria/en/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=381627
- [14] Matos, A.M.; Nunes, S.; Costa, C.; Barroso-Aguiar, J.L. – "Spent equilibrium catalyst as internal curing agent in UHPRC," *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103362.
- [15] Matos, A.M.; Nunes, S.; Costa, C.; Barroso-Aguiar, J.L. – "Rheology and Processing of Construction Materials RheoCon2 & SCC9," *RILEM Bookseries*, vol. 23, pp. 552-559, 2020.
- [16] Matos, A.M.; Figueiredo, S.C.; Nunes, S.; Schlangen, E. – "Durability of fibre reinforced cementitious composites: coupling mechanical and chloride environment loads," in *72nd RILEM Annual Week and SLD4 conference & CONMOD2018 symposium*, 2018, pp. 721-732.
- [17] Matos, A.M.; Chaves-Figueiredo, S.; Nunes, S.; Schlangen, E. – "Durability of an UHPRC under mechanical and chloride loads," *Construction and Building Materials*, vol. 311, no. December, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125223.
- [18] Matos, A.M.; Nunes, S.; Barroso Aguiar, J.L. – "Capillary Transport of Water in Cracked and Non-cracked UHPRC Specimens," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 244-259, May 2019, doi: 10.3151/JACT.17.244.
- [19] Abrishambaf, A.; Pimentel, M.; Nunes, S.; Costa, C. – "Multi-level study on UHPRC incorporating ECat," *Construction and Building Materials*, vol. 318, p. 125976, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125976.
- [20] Okamura, H.; Ouchi, M. – "Self-Compacting Concrete," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5-15, 2003, doi: 10.3151/jact.1.5.
- [21] I. P. da Q. IPQ – "NP EN 196-1. Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação das resistências mecânicas," *Norma Portuguesa*, p. 37, 2006.
- [22] ASTM – "ASTM C 1698-09. Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar," vol. i, no. C. pp. 1-8, 2013. doi: 10.1520/C1698-09.2.
- [23] "ASTM C109/C109M – Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)".
- [24] "ASTM C1260 – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)".
- [25] RILEM, "RILEM TC 116-PCD – Permeability of concrete as a criteria of its durability," *Materials and Structures*, vol. 32, no. April, pp. 174-179, 1999.
- [26] Polder, R. *et al.* – "Test methods on site measurement of resistivity of concrete – A RILEM TC-154 technical recommendation," *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 603-611, 2000.
- [27] LNEC – "E 463-2004. Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário." LNEC, Lisbon, Portugal, pp. 1-8, 2004.
- [28] LNEC – "LNEC E 391:1993. Determinação da resistência à carbonatação." LNEC, Lisbon, Portugal, pp. 1-2, 1993.
- [29] LNEC – "E 462. Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos." LNEC, Lisbon, Portugal, p. 4, 2004.
- [30] "ASTM C 1567 – 04 – Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) 1." ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, p. 5, 2004.
- [31] Wang, W.; Liu, J.; Agostini, F.; Davy, C.A.; Skoczylas, F.; Corvez, D. – "Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRC) under progressive aging," *Cement and Concrete Research*, vol. 55, pp. 1–13, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.09.008.
- [32] Heinz, D.; Dehn, F.; Urbonas, L. – "Fire Resistance of Ultra High Performance Concrete (UHPC) – Testing of Laboratory Samples

- and Column under Load", International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, September 13 - 15, 2004, Kassel, Germany.
- [33] Herold, G.; Müller, H.S. – "Measurement of porosity of ultra high strength fiber reinforced concrete," *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, pp. 685-694, 2004.
- [34] Cwirzen, A. – "The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete," *Advances in Cement Research*, vol. 19, no. 1, pp. 25-33, Jan. 2007, doi: 10.1680/adcr.2007.19.1.25.
- [35] Pyo, S.; Kim, H.K. – "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 459-466, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.109.
- [36] Matos, A.M.; Nunes, S.; Costa, C.; Aguiar, J.L.B. – "Durability of an UHPC containing spent equilibrium catalyst," *Construction and Building Materials*, vol. 305, p. 124681, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124681.
- [37] Neville, A.M. – *Properties of concrete*, 5th ed. Longman Group Limited, 1995.
- [38] Baroghel-Bouny, V. – "Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Association Française de Génie Civil | AFGC | Paris." Scientific and Technical Report of the French Civil Engineering Association, AFGC, Bagneux, p. 252, 2004.
- [39] Polder, R.B. – "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation," *Construction and Building Materials*, vol. 15, no. 2-3, pp. 125-131, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0950-0618(00)00061-1.
- [40] Taфраoui, A.; Escadeillas, G.; Vidal, T. – "Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 980-987, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169.
- [41] Pierard, J.; Cauberg, N.; Remy, O. – "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.
- [42] Scheydt J.; Müller, H. – "Microstructure of ultra high performance concrete (UHPC) and its impact on durability," in *3rd International Symposium on on Ultra High Performance Concrete*, 2012, pp. 349-356.
- [43] Ferdosian, I. – "Material Development and Self-healing Capacity of Eco-Efficient Ultra-High Performance Concrete (EEUHPC)," Universidade do Minho, 2016.
- [44] Andrade C.; Torres, J. – "Long term carbonation of UHPC," in *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*, 2013, pp. 249-256.
- [45] Benjamin, G. – "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete," no. FHWA-HRT-06-103, p. 186, 2006.
- [46] Piérard, J.; Doods, B.; Cauberg, N. – "Durability evaluation of different types of UHPC," RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013 – October 1-3, 2013, Marseille, France.
- [47] Piérard, J.; Doods, B.; Cauberg, N. – "Evaluation of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests," in *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, 2012, pp. 371-376.
- [48] Chuang, M.L.; Huang, W.H. – "Durability Analysis Testing on Reactive Powder Concrete," *Advanced Materials Research*, vol. 811, pp. 244-248, Sep. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.811.244.
- [49] Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H.J.H. – "Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses," *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, pp. 383-394, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024.
- [50] Stengel, T.; Schießl, P. – "Life cycle assessment (LCA) of ultra high performance concrete (UHPC) structures," in *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Elsevier, 2014, pp. 528-564. doi: 10.1533/9780857097729.3.528.
- [51] Hossain, Md. U.; Poon, C.S.; Dong, Y.H.; Xuan, D. – "Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 597-608, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.048.
- [52] Müller, H.S.; Haist, M.; Vogel, M. – "Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime," 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039.
- [53] "ISO 14044:2006 – Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines." International Organization for Standardization, pp. 1-46, 2006.