

## Retração autogénea em betão de ultra-elevado desempenho



Ana Mafalda  
Matos<sup>1</sup>



Sandra Nunes<sup>2</sup>



Carla Costa<sup>3</sup>



J. L. Barroso  
Aguiar<sup>4</sup>

### Resumo

O reforço de estruturas recorrendo à aplicação de camadas exteriores de betão de ultra elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) tem-se revelado uma técnica extremamente promissora. Um desafio importante quando se aplica uma camada de reforço sobre um betão existente é a restrição conferida pelo substrato à deformação livre da nova camada gerando tensões internas de tração. Como o UHPFRC pode apresentar um comportamento com endurecimento à tração a sua utilização nestas aplicações pode ser mais adequada. No entanto, este material exhibe, tipicamente, elevada retração autogénea devido à relação água/ligante bastante baixa, utilização de adições extremamente finas e sem adição de agregado grosso.

Neste contexto, o presente trabalho visa o estudo e a caracterização da evolução da retração autogénea de betão de ultra elevado desempenho com e sem fibras metálicas (1.5% e 3.0%, do volume total da mistura) e, ainda, com incorporação de um agente promotor de cura interna como uma medida de mitigação da retração autogénea. O ECat é um resíduo gerado pela indústria petrolífera que, para além de exibir elevada pozolanicidade, apresenta uma superfície específica muito elevada promovendo uma absorção de água significativa (cerca de 30% em massa) que deverá libertar durante a cura e, por isso, apresenta um elevado potencial para ser incorporado nas misturas de UHPFRC.

Os resultados revelaram que o ECat pode de facto atuar como reservatório interno na cura, nomeadamente nas misturas com dosagens de 20% e 30% de substituição de areia por ECat, nas quais se observou um desempenho melhorado em termos de redução da retração autogénea, sem perturbação excessiva da trabalhabilidade, e ainda com benefícios na resistência à compressão. Como seria expectável, a introdução de fibras na matriz cimentícia reduziu significativamente a retração autogénea.

**Palavras-chave:** betão de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras, retração autogénea, cura interna, catalisador exausto de cracking catalítico.

---

<sup>1,2</sup> Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, CONSTRUCT, Porto, Portugal; e-mail: [ana.matos@fe.up.pt](mailto:ana.matos@fe.up.pt), [snunes@fe.up.pt](mailto:snunes@fe.up.pt)

<sup>3</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal; e-mail: [carlacosta@dec.isel.ipl.pt](mailto:carlacosta@dec.isel.ipl.pt)

<sup>4</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Território, Ambiente e Construção, Guimarães, Portugal; e-mail: [aguiar@civil.uminho.pt](mailto:aguiar@civil.uminho.pt)

## 1. INTRODUÇÃO

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (“Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete”-UHPFRC) é caracterizado pela sua notável resistência mecânica (resistência à compressão >150 MPa e resistência à tração 10-20 MPa), capacidade de exibir endurecimento em tração (3-10 % de extensão de pico), e permeabilidade extraordinariamente baixa. A sua utilização em elementos pré-fabricados permite reduzir/evitar o uso de armaduras ordinárias devido à resistência à tração conferida pelas fibras de aço conduzindo a elementos mais esbeltos e leves. No que se refere a aplicações de reparação/reforço, o UHPFRC é geralmente aplicado em camadas finas (com ou sem armadura) para substituir camadas carbonatadas e/ou fissuradas por uma nova camada muito resistente e impermeável. Embora o UHPFRC seja um material de construção promissor, a sua utilização na prática ainda está no início em virtude das suas características não estarem totalmente estabelecidas. Isto é particularmente verdade no que se refere ao conhecimento limitado sobre o desenvolvimento das propriedades mecânicas nas primeiras idades; as deformações provocadas por retração e por fluência e o seu impacto na durabilidade.

Quando uma camada de argamassa ou betão fresco é aplicada sobre um betão existente a restrição conferida pelo substrato para a nova camada gera tensões de tração internas. A magnitude destas tensões internas, que pode eventualmente resultar em fissuração prematura, depende do desenvolvimento das propriedades do material durante as primeiras idades. O UHPFRC exhibe um comportamento melhorado à tração podendo apresentar um ramo de endurecimento e, por conseguinte, a sua utilização torna-se apropriada para aplicações de reparação/reforço. Todavia, devido à sua relação água-ligante extremamente baixa e ao facto de ter na sua composição adições extraordinariamente finas (sem qualquer agregado grosso) é propenso a apresentar grandes deformações devido à retração autogénea. Neste sentido, têm sido realizados alguns estudos com intuito de reduzir a retração autogénea deste material. A cura externa e cura interna são duas possíveis abordagens para mitigar a retração autogénea. Todavia, alguns estudos relatam que a cura externa não é suficientemente eficiente uma vez que a microestrutura do UHPFRC é demasiado densa para permitir a penetração de água [1], [2]. A cura interna parece ser um método mais eficaz para reduzir a retração autogénea no UHPFRC. Atualmente, os agentes de cura internos mais populares são polímeros superabsorventes (SAP) [3]-[5]. Apesar de reduzirem a retração autogénea, as possíveis desvantagens da sua incorporação no UHPFRC não podem ser desprezados, particularmente: destabilização do sistema de vazios (originando vazios superiores a 600 µm na matriz cimentícia [1], [6], [7]); atraso das reações de hidratação do cimento (aumentando o tempo de presa); e, redução da resistência mecânica [2], [5], [8]-[10]. Adicionalmente, o número de aplicações práticas é limitado devido aos elevados custos envolvidos [11].

Tendo em consideração estas desvantagens, este trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade de utilização de um resíduo gerado pela indústria de refinaria de petróleo como agente de cura interna. O resíduo estudado é o catalisador de equilíbrio exausto (ECat) gerado nas unidades de “cracking” catalítico em leito fluidificado. Nestas unidades, otimiza-se o processo de conversão de uma fração de hidrocarbonetos, em moléculas mais leves de gases e gasolina, com maior valor acrescentado. Quando o catalisador já não apresenta a necessária atividade catalítica tem que ser substituído [12]. Estima-se que, anualmente, se produzam cerca de 840.000 toneladas de ECat em todo o mundo [13]. Atualmente, a maior parte destes catalisadores exaustos são enviados para aterros sanitários, a solução ambientalmente menos desejável. A quantidade de ECat exausto gerada pode ser facilmente incorporada na produção de betão, já que estudos recentes apontam para uma produção mundial de cimento de 4,3 bilhões de toneladas [14].

Químico-mineralogicamente, o ECat é constituído por diversos aluminossilicatos sendo a sua principal fase ativa o zeólito-Y que tem uma estrutura cristalina tridimensional definida por túneis e cavidades que lhe confere elevada área superficial (interna e externa) específica. Consequentemente, o ECat apresenta atividade pozolânica potencial já confirmada na bibliografia [15]-[23] e, por isso, pode ser usado como adição em materiais à base de cimento. Neste contexto, contribui para o aumento das resistências mecânicas à compressão e à flexão [15], [18], [20], [24]-[26], contribuindo para a durabilidade dos materiais, nomeadamente, aumentando a resistência ao ingresso de cloretos e sulfatos bem como, reduzindo a suscetibilidade de ocorrência de reações alcális-silica [21], [24], [26]. Adicionalmente, uma vez que a elevada superfície específica do ECat promove uma absorção de água

significativa (cerca de 30% em massa), este resíduo apresenta elevado potencial para ser incorporado como agente de cura interna em UHPFRC. Contudo, são escassos os estudos que se encontram na literatura sobre a utilização de ECat neste tipo de betões [15].

Neste contexto, o presente trabalho visou o estudo da trabalhabilidade, resistência à compressão e da evolução da retração autogénea de betões de elevado desempenho sem fibras e com fibras (1,5% e 3,0%, em volume). Adicionalmente foi estudado o efeito do ECat nas misturas sem fibras (10% a 40%, em substituição parcial de agregado) face à retração autogénea.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL E RESULTADOS**

### **2.1. Materiais e Procedimentos**

As misturas investigadas foram preparadas com cimento (CEM I 42.5 R), fíler calcário (BETOCARB P1 – OU), e sílica de fumo (Centrilit Fume SX em suspensão aquosa com 50% de teor de sólidos), com densidades de 3.10, 2.68 e 1.38 g/cm<sup>3</sup>, respetivamente. O adjuvante utilizado foi um superplastificante constituído por carboxilatos modificados, com densidade de 1.08 e 40% de teor em sólidos. Como agregado utilizou-se uma areia fina natural com um diâmetro máximo de 1 mm, massa volúmica de 2.63 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 0.02%, e ECat com massa volúmica 2.66 g/cm<sup>3</sup> e absorção de 28%. A elevada superfície específica do ECat (150 m<sup>2</sup>/g) [26] promove uma absorção significativa de água que foi tida em consideração na quantidade total de água adicionada à mistura. Além disso, o tempo de mistura das argamassas foi aumentado no início do procedimento em relação ao convencional de modo a permitir a saturação ECat. A distribuição granulométrica dos materiais sólidos utilizados na produção das misturas apresenta-se na Figura 1.

Foram, ainda, incluídas na composição microfibras metálicas, com diferentes comprimentos (9 e 12 mm), superfície lisa, secção circular (diâmetro de 0.175 mm) e 2100 MPa de resistência à tração.

O Quadro 1 apresenta a composição das misturas testadas. Neste quadro constata-se que se preparou uma mistura de referência - apenas com cimento e sílica de fumo (SF) – quatro argamassas SF e com incorporação de ECat - SF+ECat10, SF+ECat20, SF+ECat30 e SF+ECat40 - e duas argamassas com SF e com fibras num teor de 1.5% e 3.0% - SF+F1.5% e SF+F3.0%. A razão volumétrica entre água a ligante (V<sub>w</sub>/V<sub>b</sub>), considerando como ligante o material reativo cimento e sílica de fumo, foi mantida constante para todas as misturas. O ECat e as fibras foram incorporados nas misturas como substituição parcial de agregado. A dosagem do superplastificante foi ajustada, quando necessário.

As misturas foram ensaiadas no estado fresco (diâmetro de espalhamento), durante o endurecimento (tempo de fim presa e retração autogénea) e no estado endurecido (resistência à compressão). Imediatamente após a amassadura, foi preenchido um molde de Vicat [26] a fim de determinar o tempo de fim de presa (adaptando o procedimento da secção 6.3 da norma NP EN 196-3 [27]) e moldaram-se provetes para medição da retração autogénea. Ainda no estado fresco foi aferido o diâmetro de espalhamento (D<sub>flow</sub>) das argamassas utilizando o cone japonês [28]. Os resultados obtidos nos ensaios do estado fresco referidos são apresentados na Quadro 1. Foram também moldados prismas (4x4x16cm<sup>3</sup>) para avaliar a resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.

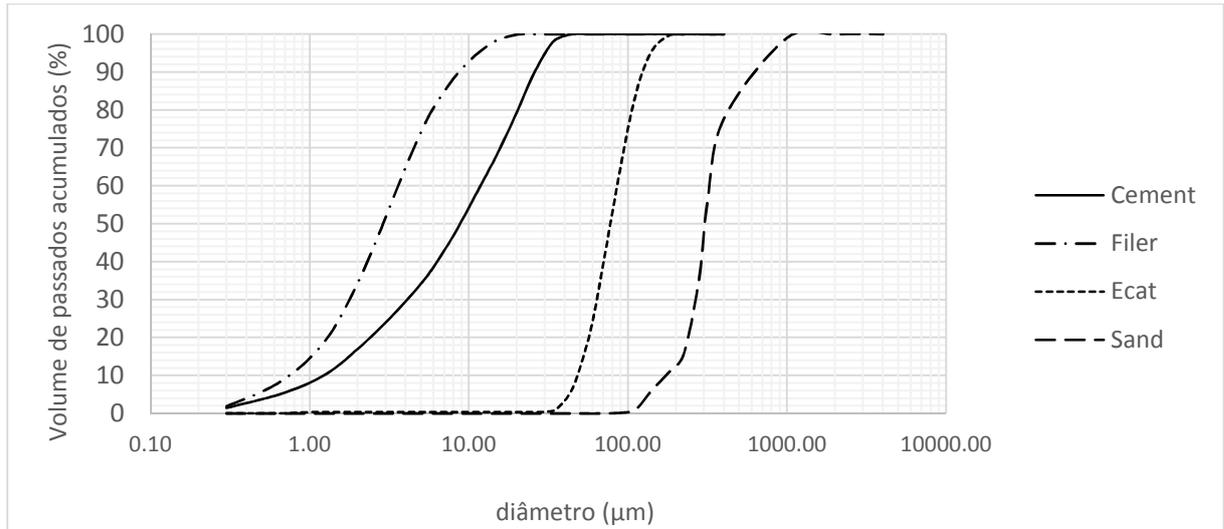


Figura 1 - Distribuição granulométrica dos materiais sólidos utilizados nas misturas de UHPFRC.

Quadro 1 - Composição das argamassas estudadas e resultados dos ensaios no estado fresco.

Mistura	SF	SF+	SF+	SF+	SF+	SF+	SF+
Constituinte	[kg/m <sup>3</sup> ]	ECat10	ECat20	ECat30	ECat40	F1.5%	F3.0%
		[kg/m <sup>3</sup> ]					
Cimento (c)	794.90	794.90	794.90	794.90	794.90	794.90	794.90
Sílica de fumo (sf)	79.49	79.49	79.49	79.49	79.49	79.49	79.49
Filer (f)	311.43	311.43	311.43	311.43	311.43	311.43	311.43
Areia	1019.86	917.88	815.89	713.90	611.92	1019.86	1019.86
Água de absorção	-	28.90	180.82	209.72	238.62	-	-
Água livre	153.76	153.76	153.76	153.76	153.76	153.76	153.76
Sp	13.75	13.75	13.75	17.90	24.74	13.75	13.75
ECat	-	103.23	206.45	309.68	412.91	-	-
Fibras 9 mm	-	-	-	-	-	58.88	117.75
Fibras 12 mm	-	-	-	-	-	58.88	117.75
w/c	0.22	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Sp/(c+sf+f) (%)	1.20	1.20	1.20	1.65	2.46	1.20	1.20
Vw/Vb	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
ECat/areia (%)	0	10	20	30	40	0	0
Dflow (mm)	275	307	290	289	289	254	239
Tempo de fim de presa (hh:mm)	02:40	02:20	02:00	01:40	01:50	02:15	02:15

## 2.2. Resultados da resistência à compressão

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma NP EN 196-1 [27]. Esta propriedade mecânica foi aferida para as idades de 7 e 28 dias no que se refere às misturas sem fibras e apenas na idade mais jovem nas composições com fibras. Os provetes, três para cada composição e idade, foram conservados nos moldes durante 24 horas subsequentes ao seu fabrico, após

as quais foram desmoldados e imediatamente imersos em água e mantidos em ambiente com temperatura controlada (Temp.=20°C) até à data de ensaio. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 2.

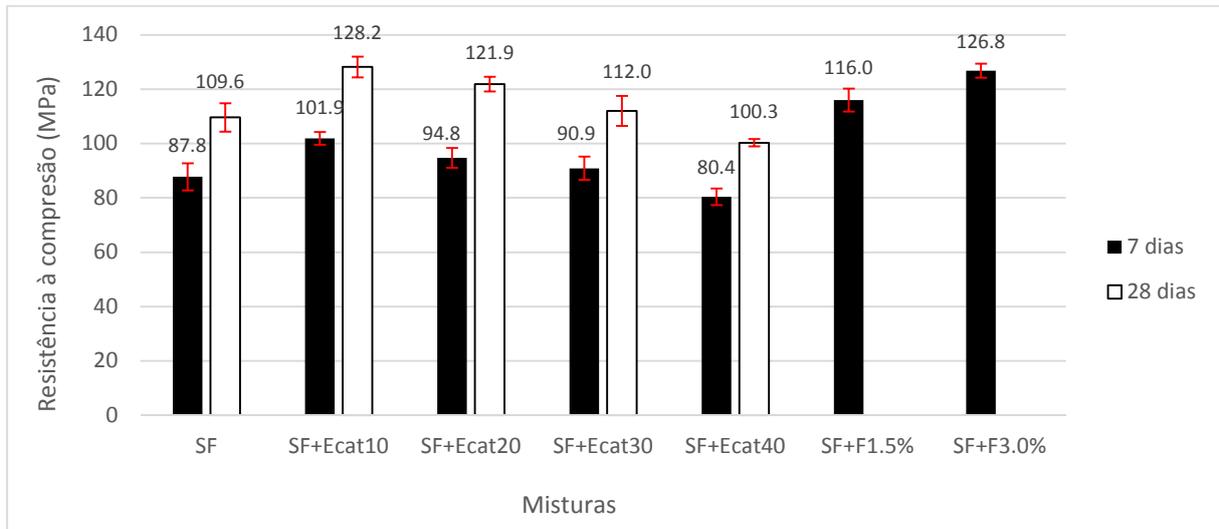


Figura 2 - Resultados de resistência à compressão.

### 2.3. Resultados da retração autógena

Para medição da retração autógena foi seguido o procedimento da norma ASTM C 1698 [29]. O ensaio consiste fundamentalmente na produção de uma argamassa que é colocada num tubo corrugado, com 440mm de comprimento e diâmetro médio 28.5mm. O molde é selado para prevenir a perda de massa por secagem e é conservado a temperatura constante ( $23\pm 1^\circ\text{C}$ ). A retração foi registada continuamente, com intervalos temporais de 60 segundos, através de um transdutor de deslocamentos e de um sistema de aquisição dataTaker DT500 (ver Figura 3).

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 mistura (Quadro 1, apresentado na secção 2.1). No momento correspondente ao tempo de fim de presa os provetes foram pesados e medido o seu comprimento sendo este assumido como o seu comprimento inicial.

Após 7 dias cada provete foi pesado novamente e aferida a variação da massa, sendo esta medida utilizada na validação dos resultados do ensaio [29]. A Figura 4 apresenta o desenvolvimento de retração autógena das misturas testadas. Cada curva corresponde à média da variação de comprimento de três provetes. O Quadro 2 apresenta os resultados de retração autógena às 24 horas e aos 7 dias, juntamente com a variação da massa.



Figura 3 - Ensaio de retração autógena.

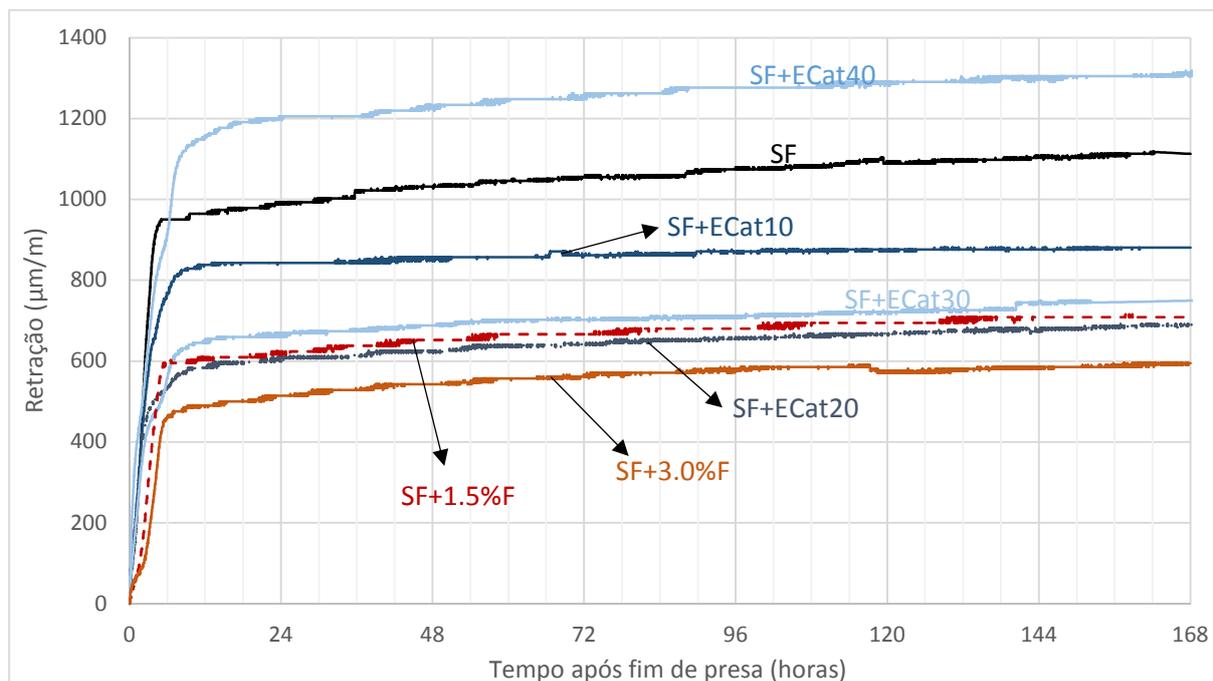


Figura 4 - Retração autogénea das misturas.

Quadro 2 – Retração autogénea (coeficiente de variação entre parenteses) e variação de massa.

Mistura	SF	SF+ ECat10	SF+ ECat20	SF+ ECat30	SF+ ECat40	SF+1.5%F	SF+3.0%F
Retração autogénea 24h (µm/m)	989 (±3%)	843 (±3%)	607 (±8%)	664 (±5%)	1201 (±5%)	617 (±2%)	514 (±4%)
Retração autogénea 7 dias (µm/m)	1118 (±3%)	881 (±3%)	687 (±6%)	750 (±6%)	1305 (±5%)	709 (±0%)	595 (±4%)
Variação da massa das amostras (%)	-0.17	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13

### 3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 3.1. Estado fresco

Os resultados das argamassas no estado fresco (Quadro 1) revelaram que a substituição parcial de agregado por ECat pode diminuir a consistência das mesmas. Substituições até 20% não tiveram praticamente efeito na consistência, porém para dosagens superiores foi necessário aumentar a dosagem de superplastificante de modo a preservar o valor de Dflow. Este efeito do ECat corrobora resultados obtidos noutros estudos [12], [15], [30]-[32]. De facto, o tamanho das partículas do ECat é inferior ao tamanho das partículas de areia e a área superficial específica do ECat é muito maior do que a da areia, portanto, a substituição do ECat pode ser útil na redução da segregação [32]. Adicionalmente, também

se constatou que, em geral, quanto maior a percentagem de substituição de agregado por ECat, menor é o tempo de fim de presa. Estes resultados também estão de acordo com resultados anteriores [25].

### **3.2. Resistência à compressão**

No que se refere às propriedades mecânicas (Figura 2) constatou-se que tanto aos 7 como aos 28 dias de cura as misturas com dosagens até 30% de substituição de agregado por ECat, apresentaram resistência à compressão ligeiramente mais elevada relativamente à SF. Estes resultados podem ser explicados pela elevada e prematura reatividade pozolânica do ECat [15], [23], [33]. os produtos de reação gerados pela reação do ECat com o CH são aluminossilicatos de cálcio hidratados (C-A/S-H), produzindo-se assim produtos de hidratação semelhantes aos do cimento (C-S-H) que melhoram a ligação pasta-agregado e, por conseguinte, podem concorrer para a melhoria das propriedades mecânicas. Todavia, verificou-se que as composições apresentam uma diminuição aproximadamente linear da resistência à compressão com o aumento da incorporação ECat, independentemente da idade de cura. Esta tendência pode dever-se às alterações na distribuição granulométrica das misturas de areia-ECat (Figura 1) que podem acarretar uma diminuição da capacidade de empacotamento e, conseqüentemente, comprometer o desenvolvimento da resistência. Mais ainda, este fenómeno também pode explicar a necessidade extra de superplastificante nas argamassas com maior nível de substituição de areia por ECat.

### **3.3. Retração autógena**

A retração autógena de todas as misturas apresentou um forte aumento, nomeadamente nas primeiras seis horas após o fim de presa. Posteriormente, a retração autógena continua a aumentar, porém de forma muito mais moderada. Ao fim 24 horas, a retração autógena atingiu, em média, cerca de 90% da retração apresentada no fim do ensaio. A intensa retração autógena nas primeiras idades está intimamente relacionada com o consumo de água livre durante a reação de hidratação e o seu desenvolvimento ao longo do tempo depende igualmente do grau de hidratação da mistura [34]-[37].

A incorporação de ECat conduziu a uma redução da retração autógena de aproximadamente 32% e 38%, quando 20% e 30% de areia foi substituído por ECat, respetivamente, relativamente à mistura SF. Reduções mais baixas foram observadas para uma dosagem de substituição de 10% areia pelo ECat (ver Figura 4). Ao contrário dos anteriores, verificou-se um forte aumento da retração autógena na mistura ECat40, sendo que neste caso é inclusive superior à da SF. Este comportamento pode dever-se à forte redução do volume de areia relativamente ao volume de ligante na mistura ECat40, ou seja, apesar ter sido introduzido na mistura como substituto parcial de areia, o ECat é, efetivamente, um material pozolânico. Neste contexto, a carência de areia na mistura ECat40 gera uma estrutura menos rígida pelo que pode conduzir ao aumento de deformação, nomeadamente nas primeiras horas. Não obstante, este efeito parece sobrepor-se ao de reservatório de água para a prossecução da cura interna da argamassa. Além disso, pode-se esperar que, depois de uma dada dosagem a dispersão de partículas de ECat na matriz torna-se menos uniforme e o seu efeito como reservatório de água interno para atenuar a retração autógena é menos eficiente.

A introdução de fibras metálicas nas misturas originou um decréscimo significativo da retração autógena como seria de esperar. Após 24h a mistura sem fibras (SF) atingiu 987 $\mu$ m/m de retração enquanto as mesmas misturas com 1.5% e 3.0% de fibras apenas apresentavam 617 e 514  $\mu$ m/m, o que corresponde a uma diminuição de 38% e 48%, respetivamente. Este efeito manteve-se até ao final do tempo de leitura da retração.

De acordo com estudos anteriores [38]-[42], a utilização de fibras conduz a redução da retração da matriz de cimento, uma vez que esta é restringida pelas ligações interfaciais fibras-matriz que se geram, e dando origem a uma matriz mais coesa e ligada, mitigando de certa forma a deformação. A retração do UHPFRC é também dependente teor em fibras, sendo a percentagem ótima aproximadamente 3%, a partir deste valor não se observam reduções significativas da retração autógena [38]-[42].

#### 4. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a eficiência do ECat, quando usado como um substituto parcial de agregado, na mitigação da retração autogénea de UHPFRC.

Os resultados revelaram que as partículas ECat podem de facto atuar como reservatórios internos na matriz de UHPFRC, alimentando os poros capilares como uma fonte de água para a prossecução da hidratação da pasta cimentícia da sua vizinhança.

Entre as dosagens de incorporação estudadas, as misturas com 20% e 30% de substituição de areia por ECat demonstraram melhor desempenho em termos de redução da retração autogénea sem perturbar excessivamente a trabalhabilidade, e ainda melhoraram a resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Assim, esperam-se melhorias acrescidas através da substituição conjunta de parte do ligante (cimento + SF + filer) e parte do agregado fino pelo ECAT, sem prejudicar outras propriedades como trabalhabilidade, resistência à compressão e durabilidade.

Adicionalmente, a incorporação de ECat em UHPFRC pode minimizar a quantidade de resíduo enviada para aterro, transformando-o num subproduto com valor acrescentado.

Como seria expectável, a introdução de fibras na matriz originou uma redução significativa da retração autogénea, tanto maior quanto maior a percentagem de incorporação de fibras.

#### 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 Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P. e Bolsa FCT PD/BD/113636/2015, atribuída no âmbito do Programa de Doutoramento em Construção Eco-Eficiente e Reabilitação (EcoCoRe). Os autores agradecem também o apoio do Dr. Eng.º Lino Maia. Agradecimentos também são devidos à Secil, GALP ENERGIA (refinaria de Sines), Sika e KrampeHarex pelo fornecimento de cimento, ECat, adjuvantes e fibras, respetivamente.

#### REFERÊNCIAS

- [1] D. P. Bentz and W. J. Weiss, “Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review,” USA, 2011.
- [2] D. P. Bentz and O. M. Jensen, “Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 6, pp. 677–685, Aug. 2004.
- [3] O. M. Jensen and P. F. Hansen, “Water-entrained cement-based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 6, pp. 973–978, 2002.
- [4] G. Ye, N. Van Tuan, and H. Huang, “Rice Husk Ash as smart material to mitigate autogenous shrinkage in high ( ultra-high ) performance concrete,” in *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT2013)*, At Kyoto, Japan, 2013.
- [5] A. M. Soliman and M. L. Nehdi, “Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age,” *Mater. Struct.*, vol. 44, pp. 879–899, 2011.
- [6] K. Kovler and O. M. Jensen, “Report rep041 : Internal Curing of Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 196-ICC,” 2007.
- [7] V.-T.-A. Van, C. Röbber, D.-D. Bui, and H.-M. Ludwig, “Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 270–278, 2014.
- [8] V.-T.-A. Van, C. Röbber, D.-D. Bui, and H.-M. Ludwig, “Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 270–278, Oct. 2014.
- [9] D. P. Bentz, M. R. Geiker, and K. K. Hansen, “Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 1075–1085, Jul.

- 2001.
- [10] K. J. Folliard and N. S. Berke, “Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 9, pp. 1357–1364, 1997.
  - [11] H. X. D. Lee, H. S. Wong, and N. R. Buenfeld, “Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 194–208, Oct. 2016.
  - [12] N. T. Castellanos and J. T. Agredo, “Using spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst as pozzolanic addition - a review,” *Ing. E Investig.*, vol. 30, no. 2, pp. 35–42, 2010.
  - [13] F. Ferella, V. Innocenzi, and F. Maggiore, “Oil refining spent catalysts: A review of possible recycling technologies,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 108, pp. 10–20, Mar. 2016.
  - [14] “Key facts & figures | CEMBUREAU.” [Online]. Available: <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>. [Accessed: 31-Mar-2016].
  - [15] L. S. Martínez, “Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC),” Universidad Politecnica De Valencia, 2007.
  - [16] Y.-S. Tseng, C.-L. Huang, and K.-C. Hsu, “The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 782–787, 2005.
  - [17] B. Pacewska, M. Bukowska, I. Wili ska, and M. Swat, “Modification of the properties of concrete by a new pozzolan - A waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 145–152, 2002.
  - [18] B. Pacewska, I. Wili ska, M. Bukowska, and W. Nocu -Wczelik, “Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1823–1830, 2002.
  - [19] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, and S. Velázquez, “Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 603–609, 2003.
  - [20] S. Y. . Chan and X. Ji, “Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, no. 4, pp. 293–300, Aug. 1999.
  - [21] J. June, U. Politecnica, E. Zornoza, P. Garcés, M. V Borrachero, and J. Payá, “Durability Properties of Mortars Partially Substituted with Spent Catalytic Cracking Catalyst,” in *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2010.
  - [22] C. Costa and P. Marques, “Low-carbon cement with waste oil-cracking catalyst incorporation,” in *IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*, 2012, pp. 3–11.
  - [23] P. R. Da Silva and C. Costa, “Fresh Properties and Compressive Strength of self-compacting concrete containing waste fluid catalytic cracking catalyst,” in *7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, 2013.
  - [24] R. Neves, C. Vicente, A. Castela, and M. F. Montemor, “Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 308–314, Jan. 2015.
  - [25] N. Su, H.-Y. Fang, Z.-H. Chen, and F.-S. Liu, “Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 11, pp. 1773–1783, Nov. 2000.
  - [26] C. Costa, M. S. Ribeiro, and N. Brito, “Effect of Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation on Durability of Mortars,” *Mater. Sci. Appl.*, vol. 5, no. November, pp. 905–914, 2014.
  - [27] I. P. da Q. IPQ, “NP EN 196-1. Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação das resistências mecânicas.,” *Norma Port.*, p. 37, 2006.

- [28] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-Compacting Concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [29] ASTM, “ASTM C 1698-09. Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar,” vol. i, no. C. pp. 1–8, 2013.
- [30] K. C. Hsu, Y. S. Tseng, F. F. Ku, and N. Su, “Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1815–1820, 2001.
- [31] J. Payá, J. Monzó, and M. V. Borrachero, “Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 57–61, 2001.
- [32] N. Su, Z.-H. Chen, and H.-Y. Fang, “Reuse of spent catalyst as fine aggregate in cement mortar,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, pp. 111–118, 2001.
- [33] C. Costa and P. Marques, “Low-Carbon Cement with Waste Oil-Cracking Catalyst Incorporation,” *IEEE-IAS/PCA 54th Cement Industry Technical Conference*. IEEE, San Antonio, USA, 2012.
- [34] A. Kamen, “Comportement au jeune âge et différé d’un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques,” vol. 3827, p. 246, 2007.
- [35] A. Loukili, “Etude du retrait et du fluage de bétons à ultra-hautes performances,” Nantes, 1996.
- [36] M. Kazemi Kamyab, “Autogenous Shrinkage and Hydration Kinetics of SH-UHPFRC under Moderate to Low Temperature Curing Conditions,” *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland*, 2013.
- [37] A. Loukili, A. Khelidj, and P. Richard, “Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 577–584, 1999.
- [38] P. S. Mangat and M. Motamedi Azari, “A theory for the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices,” *J. Mater. Sci.*, vol. 19, no. 7, pp. 2183–2194, 1984.
- [39] D.-Y. Yoo, H.-O. Shin, J.-M. Yang, and Y.-S. Yoon, “Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 122–133, 2014.
- [40] J. Zhang and V. C. Li, “Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite,” *J. Eng. Mech.*, no. January, pp. 37–44, 2001.
- [41] A. Kamen, “Time Dependent Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC),” no. 1, pp. 1–8, 2006.
- [42] M. B. Eide, J.-M. Hisda, and L., “Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art. COIN Project report 44-2012,” Oslo, 2012.