

## **Evolução da hidratação e da microestrutura em pastas de cimento reciclado**

**Ana Carriço**

*Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt*

**José Alexandre Bogas**

*Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, abogas@tecnico.ullisboa.pt*

**José Tenza-Abril**

*Universidad de Alicante, Alicante, Espanha, ajt.abril@ua.es*

### **Resumo**

O presente trabalho focou-se na caracterização microestrutural de pastas produzidas com cimento reciclado termoativado (CR). Para este fim foram combinadas as técnicas de termogravimetria (TG), microscopia eletrónica de varrimento (MEV) e porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) com testes mecânicos de resistência à flexão e à compressão. A hidratação e a evolução da microestrutura do CR foram acompanhadas ao longo do tempo, entre as 8 horas e os 28 dias e comparadas com pastas de cimento Portland tipo I (CEM I) de igual a/c ou trabalhabilidade. O CR demonstrou ter uma reidratação efetiva com formação das fases C-S-H, AFm e AFt. As análises de TG e MEV revelaram a formação de fases AFm desde as 8 horas de hidratação do CR. Até aos 3 dias, o CR desenvolveu maior reatividade inicial e menor porosidade grosseira do que pastas com CEM I de igual a/c. Aos 28 dias, a porosidade total acessível foi semelhante em pastas com CR e CEM I de igual composição. No entanto, o diâmetro crítico das pastas com CR, entre as 8 horas e os 28 dias, aproximou-se do obtido em pastas de CEM I de igual trabalhabilidade. Concluiu-se que as pastas com CR desenvolveram duas estruturas: intrapartícula e interpartícula. A primeira é composta pelos produtos de hidratação internos, que se desenvolvem na porosidade interna das partículas de CR e a segunda composta pelos produtos de hidratação externos, formados num espaço matricial circundante às partículas de a/c mais reduzido, resultante da absorção de água das partículas de CR.

**Palavras-chave:** Cimento Reciclado Termoativado, Termogravimetria, Microscopia Eletrónica de Varrimento, Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

### **1 INTRODUÇÃO**

A recuperação da capacidade ligante de materiais cimentícios previamente hidratados por meio de ativação térmica tem, recentemente, vindo a ser explorada visando a produção de um novo ligante reciclado [1,2]. Estes cimentos reciclados termoativados (CR) são produzidos a partir de resíduos de materiais cimentícios com baixo teor de compostos carbonatados utilizando temperaturas de sinterização normalmente inferiores à etapa de descarbonatação (> 700 °C), evitando assim emissões de CO<sub>2</sub> relevantes.

As principais dificuldades reportadas na aplicação destes novos ligantes são a elevada necessidade de água, que requer relações água/cimento (a/c) elevadas e a hidratação rápida, que conduz a tempos de presa reduzidos [1,3]. Dependendo das condições do tratamento térmico, tipo de material precursor e relação a/c, a resistência à compressão das pastas com CR pode variar tanto quanto 8-32 MPa [4].

Um tópico que está ainda a ser investigado é a hidratação e a evolução da microestrutura destes novos ligantes reciclados. Nos poucos trabalhos publicados sobre o assunto, a morfologia e a porosidade de materiais cimentícios com CR foram avaliadas exclusivamente por análises qualitativas de Microscopia Eletrónica de Varrimento (MEV). Shui et al. [3] observaram algumas diferenças na morfologia dos produtos de hidratação do CR obtido com um tratamento térmico a 600 °C. O C-S-H apareceu na forma de feixes finos preenchendo vazios e estruturas em forma de favo de mel na superfície das partículas desidratadas, ligeiramente diferente da morfologia de folha e fibra observada em C-S-H de pastas de cimento Portland (OPC) hidratadas. O arranjo microestrutural da pasta de CR era também menos denso. Além disso, imagens MEV aos 3 e 7 dias mostraram pouco desenvolvimento entre essas idades. Balduco et al. [5] analisaram a microestrutura e a porosidade total de pastas produzidas com CR obtido de pastas de cimento com escória de alto forno tratadas a 500 °C, por meio de observações qualitativas em MEV e ensaios de saturação de água-vácuo, respetivamente. Os autores destacaram a diferente morfologia do C-S-H formado nas pastas recicladas quando comparada com a das pastas OPC. Além disso, as pastas recicladas apresentaram maior porosidade total do que as pastas OPC após 7 dias, o que foi atribuído à elevada área superficial e porosidade intrínseca das partículas de cimento desidratadas.

O presente trabalho focou-se no desenvolvimento microestrutural de pastas de cimento recicladas entre as 8 horas e os 28 dias. Para este propósito foi realizado um estudo aprofundado combinando termogravimetria (TG), microscopia eletrónica de varrimento e porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) complementados com ensaios de resistência à flexão e à compressão a 1, 3, 7 e 28 dias. De modo a realizar uma análise comparativa foram também produzidas pastas com OPC de igual composição e igual trabalhabilidade.

## **2 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Produção de cimento reciclado e pastas de cimento reciclado**

A pasta de origem (PO) foi produzida com cimento tipo I 42,5 R e um a/c de 0,55. Os prismas produzidos (150x150x300 mm) foram sujeitos a uma cura com 95% de humidade relativa (HR) durante 28 dias, sendo posteriormente mantidos em ambiente de laboratório durante, pelo menos, 4 meses. A resistência à compressão média determinada de acordo com a EN 12390-3 [6], em cubos, aos 28 dias foi de 41 MPa.

Após a cura, os provetes foram britados e moídos mecanicamente até uma granulometria inferior a 250 µm. O resíduo obtido foi então tratado termicamente num forno elétrico rotativo de eixo horizontal a uma temperatura máxima de 700 °C. Esta temperatura máxima foi assim definida considerando trabalhos anteriores bem como os resultados obtidos no ensaio de termogravimetria (secção 3.1). O tratamento térmico foi composto por três patamares: aquecimento a uma taxa de 10 °C/min até à temperatura máxima; permanência de 3 horas a esta temperatura; e arrefecimento

dentro do forno até temperatura ambiente. Finalmente, o CR obtido foi armazenado em contentores selados até à produção das pastas.

As pastas com CR foram produzidas com consistência normal (EN 196-3 [7]) o que conduziu a um a/c de 0,72. Para comparação, foram produzidas pastas com cimento tipo I 42.5 R (CEM I) com consistência normal (a/c = 0,31) e com o mesmo a/c das pastas de CR (a/c = 0,72). Todas as pastas foram produzidas numa misturadora planetária durante um total de 8 minutos.

## 2.2 Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada em duas fases: antes do tratamento térmico e após a hidratação das pastas de CR. As amostras foram mantidas em água até ao ensaio, sendo posteriormente moídas de forma a passar no peneiro de 125  $\mu\text{m}$ . Para o ensaio foi utilizada uma termobalança da Mettler Toledo, com ambiente de  $\text{N}_2$  e uma taxa de aquecimento de 10  $^\circ\text{C}/\text{min}$ , desde a temperatura ambiente (25  $^\circ\text{C}$ ) até 950  $^\circ\text{C}$ . Nas amostras hidratadas a água combinada foi calculada de acordo com a equação (1) em que  $WB_{\text{CSH-CH}}$  corresponde à perda de massa até ao início da fase de descarbonatação e  $L_{\text{dc}}$  e  $L_{\text{dca}}$  correspondem à fase de descarbonatação da pasta hidratada e do cimento anidro, respetivamente.

$$WB = WB_{\text{CSH-CH}} + 0.41 (L_{\text{dc}} - L_{\text{dca}}) [\%] \quad (1)$$

## 2.3 Microscopia eletrónica de varrimento

Para a microscopia eletrónica de varrimento (MEV) foram produzidos 3 prismas por composição (160x40x40 mm). Após 7 horas de cura, um dos prismas foi desmoldado e cortado em fatias de 4 mm. Ao perfazer as 8 horas, as fatias foram colocadas em isopropanol (>90% pureza) de modo a parar a hidratação das amostras. O isopropanol foi trocado após 1, 3, 12 e 24 horas. Finalmente, as amostras foram secas em estufa a 60  $^\circ\text{C}$  durante 24 horas. O mesmo procedimento foi adotado para as amostras recolhidas aos 1, 3 e 28 dias.

## 2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A porosidade aberta e a distribuição de tamanho de poros a diferentes idades foram determinadas através de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) com recurso a um *Poremaster-60 GT – Quantachrome*. As amostras foram sujeitas ao pré-condicionamento descrito em 2.3, sendo, no entanto, submetidas a uma secagem a 40  $^\circ\text{C}$  em vácuo. As amostras, com cerca de 0.5-1.0  $\text{cm}^3$ , foram inseridas no penetrómetro e fechadas com uma tampa em aço. O penetrómetro foi primeiramente colocado numa câmara a baixa pressão e evacuado a uma pressão de 30 mmHg. Seguidamente o penetrómetro foi preenchido com mercúrio e a pressão aumentada gradualmente até 0,35 MPa. Após este passo, o conjunto foi colocado numa câmara a alta pressão, onde a pressão foi aumentada até 410 MPa. A distribuição do tamanho de poros pode ser estimada pela equação de Washburn (2) sabendo o volume introduzido a cada patamar de pressão. Na equação (2),  $d$  designa o diâmetro do poro,  $\gamma$  a tensão superficial (0.480 N/m a 20  $^\circ\text{C}$ ),  $\theta$  o ângulo de contacto (assumido 140 $^\circ$  [8]) e  $p$  a pressão do mercúrio.

$$d = -\frac{4\gamma \times \cos \theta}{p} \quad (2)$$

## 2.5 Resistência à flexão e à compressão

A resistência à flexão e à compressão foram determinadas de acordo com a EN 1015-11 [9]. Para tal foram produzidos 12 prismas que, após 24 horas foram desmoldados e colocados numa câmara com 95% de HR até à idade de ensaio. A cada idade foram ensaiados 3 prismas por composição. As duas metades resultantes do ensaio de resistência à flexão foram utilizadas para o ensaio de resistência à compressão. Estes ensaios foram realizados a 1, 3, 7 e 28 dias.

## 3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 3.1 Termogravimetria

Na Figura 1 e 2 apresentam-se as curvas termogravimétrica (TG) e respetiva derivada (DTG) para a pasta de cimento hidratada que deu origem ao CR, PO, assim como para as diferentes idades de hidratação das pastas com CR.

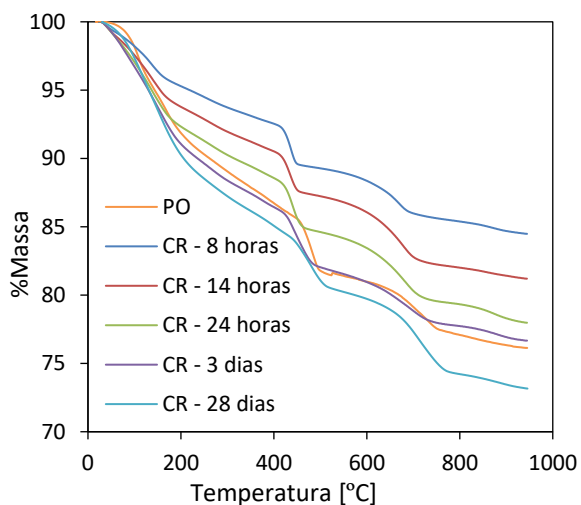


Figura 1. TG de PO e de pastas com CR a diferentes idades de hidratação

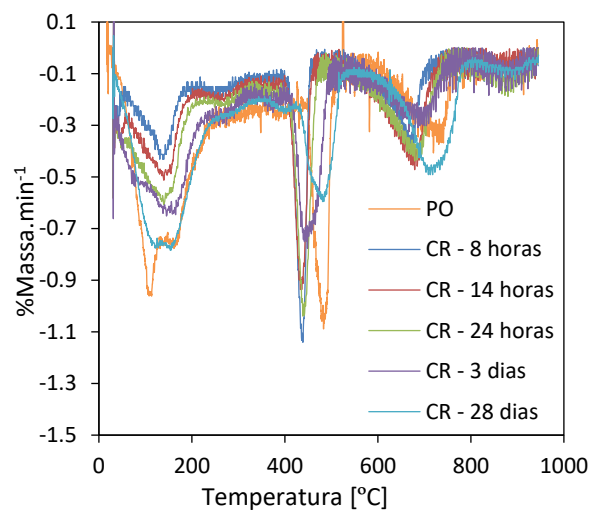


Figura 2. DTG de PO e de pastas com CR a diferentes idades de hidratação

Em comparação com a pasta PO (assim como com as pastas CEM0.72 e CEM0.31), verifica-se que a pasta com CR apresentou menor quantidade de perda de massa abaixo de 200 °C e sem um pico bem definido na DTG próximo de 105-115 °C (Figura 2). Isto poderá ser dever-se à menor formação de etringite, tendo sido preferencial a reidratação de fases AFm (carbonato ou sulfato), conforme será demonstrado posteriormente na análise MEV (3.3). De facto, observa-se que a partir das 8 horas as pastas CR apresentam picos de perda de massa próximos a 140-180 °C e picos endotérmicos fracos mas amplos entre 250-300 °C, que devem estar associados à desidratação das fases de AFm [10]. Deste modo, é esperado que se encontrem fases AFm em pastas CR, mesmo em idades mais jovens, como se poderá ver na análise MEV (3.3).

Na Tabela 1 apresenta-se a percentagem de água combinada, WB (Equação 1), das pastas de CR e CEM I, a diferentes idades de hidratação.

Tabela 1. Água combinada (WB) para as pastas de CR e CEM com a/c de 0.72 e 0.31 a diferentes idades.

Pastas	WB [%]				
	8 horas	14 horas	1 dia	3 dias	28 dias
CR (a/c = 0.72)	8,7	10,6	13,0	14,8	17,8
CEM0.72 (a/c = 0.72)	5,6	8,7	13,6	13,1	18,1
CEM0.31 (a/c = 0.31)	7,0	10,3	11,0	11,4	16,2

Conforme esperado, para todas as misturas, a WB aumentou com a idade das amostras (Tabela 1). A elevada WB das pastas de CR indica que a maioria dos produtos de hidratação foram recuperados, demonstrando assim a capacidade de reidratação do CR. Comparativamente às pastas de CEM0.72, a WB das pastas com CR foi superior até aos 3 dias e ligeiramente inferior aos 28 dias. Isto sugere uma reatividade inicial superior nas pastas com CR como reportado na literatura [2], devendo-se à elevada superfície específica do CR e à elevada solubilidade dos produtos desidratados. Nas pastas de cimento com a/c mais reduzido (CEM0.31) a WB após 14 horas foi inferior às restantes devido à menor quantidade de água capilar disponível para as reações de hidratação.

### 3.2 Massa volúmica e resistência à flexão e à compressão

Na Tabela 2 apresentam-se a resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) e a resistência à flexão ( $f_{ctm}$ ), bem como os respetivos coeficientes de variação aos 28 dias ( $CV_{28d}$ ).

Tabela 2. Massa volúmica aos 28 dias ( $\rho_{28d}$ ), resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) e à flexão ( $f_{ctm}$ )

Pasta	Resistência à compressão ( $f_{cm}$ )					Resistência à flexão ( $f_{ctm}$ )				
	1d	3d	7d	28d	$CV_{28d}$	1d	3d	7d	28d	$CV_{28d}$
	[MPa]				[%]	[MPa]				[%]
CR (w/c=0,72)	4,5	13,8	15,6	18,0	5,4	1,1	2,6	3,0	3,0	6,6
CEM0.72	7,8	14,0	19,0	26,5	5,4	1,8	3,7	3,8	4,5	16,4
CEM0.31	58,5	57,2	71,7	80,1	4,5	7,0	8,2	9,2	11,1	3,4

A resistência à compressão das pastas com CR, comparada às pastas com CEM I de igual a/c, foi semelhante aos 3 dias e cerca de 32% menor aos 28 dias. Este comportamento também é documentado por outros autores [3,5] e é atribuído a um desenvolvimento mais rápido da resistência mecânica em pastas com CR devido à sua maior área superficial das suas partículas. No entanto, a 1 dia, a resistência à compressão do CR foi 43% inferior à do CEM I com o mesmo a/c. Possivelmente, a maior dimensão das partículas e a sua propensão à aglomeração contribuem para este comportamento [11].

No entanto, há uma aparente contradição, uma vez que a resistência à compressão das pastas com CR parece ter acelerado até aos 3 dias. Isso pode ser explicado pela maior proximidade das partículas de CR, uma vez que absorvem parte significativa da água de mistura e outra parte é imediatamente

consumida na hidratação da cal livre. Por outras palavras, o sistema fora das partículas tem uma relação a/c mais baixa e, portanto, em idades iniciais, a matriz pode ser rapidamente densificada, ou seja, a interligação entre os produtos de hidratação externos pode formar-se mais cedo. Por exemplo, negligenciando a água evaporada durante a produção da pasta e assumindo 15% de cal livre em peso (% em peso) de cimento reciclado (análise TG) e 30% de absorção de água pelas partículas de CR, o a/c disponível fora das partículas de cimento seria cerca de 0,37. Isso também significa que, devido à rugosidade da superfície das partículas e aglomeração das mesmas, a necessidade de água de CR seria cerca de 20% maior do que a de CEM I (em comparação com o a/c da pasta CEM0.31).

Naturalmente, a resistência à compressão da pasta de CEM I com consistência normal (CEM0.31) foi muito superior à das pastas com CR. Neste caso, a resistência à compressão aos 3/28 dias das pastas de CR foi cerca de 75/77% inferior ao das pastas CEM0.31. A redução da resistência à compressão nas pastas CR foi semelhante entre 3 e 28 dias, o que pode confirmar a hipótese levantada anteriormente, a respeito da proximidade das partículas de cimento. Na verdade, para pastas com CEM I e a/c de 0,31, as partículas de cimento estão mais próximas umas das outras e o desenvolvimento de resistência pode ser bastante elevado em idades iniciais.

### **3.3 Microscopia eletrónica de varrimento**

A Figura 3 apresenta as microscopias realizadas às pastas CEM0.72, CR e CEM0.31 às 8 horas e 1, 3 e 28 dias. Após 8 horas de hidratação, nas pastas CEM0.72, foi possível identificar o crescimento dos primeiros produtos de hidratação na superfície das partículas de cimento (Figura 3a). Estes produtos apresentavam uma morfologia do tipo agulha divergente e estavam presentes apenas na superfície das partículas, sem interligações relevantes, o que resultou numa estrutura com elevada porosidade e fraca consolidação. Os poros capilares são grandes e altamente interconectados (Figura 3a). A esta idade, não foram encontradas fases AFt nas pastas CEM0.72.

A pasta de CR às 8 horas apresentou uma morfologia diferente, consistindo num aglomerado de partículas reidratadas de CR com elevada área superficial. Conforme observado na análise de TG, produtos de hidratação foram desenvolvidos em toda a pasta. No entanto, os produtos de hidratação externos não eram abundantes ou apresentavam uma estrutura solta e desconectada. Conforme mostrado na Figura 3b, foi possível identificar partículas grandes e porosas com apenas alguns produtos de hidratação na superfície. Embora pouco abundante, foi observado o desenvolvimento de produtos de hidratação com uma morfologia tipo placa, provavelmente associados a fases de CH e AFm (Figura 3b). Em pastas de CEM I comuns, as fases AFm não se formam tão cedo. No entanto, a análise de TG também corrobora a possível formação de fases AFm na pasta com CR a partir das 8 horas (3.1). O desenvolvimento de fases iniciais de AFm, ao contrário do que ocorre nas pastas CEM I, pode ser explicado pelos diferentes mecanismos de hidratação das pastas com CR. De facto, uma vez que o desenvolvimento da microestrutura das pastas com CR é baseado num processo de reidratação, é provável que as fases AFm já se encontrassem formadas e prontas para desenvolver a sua estrutura original. Além disso, a elevada descarbonatação observada na pasta com CR, está de acordo com a formação das fases carbonatadas.

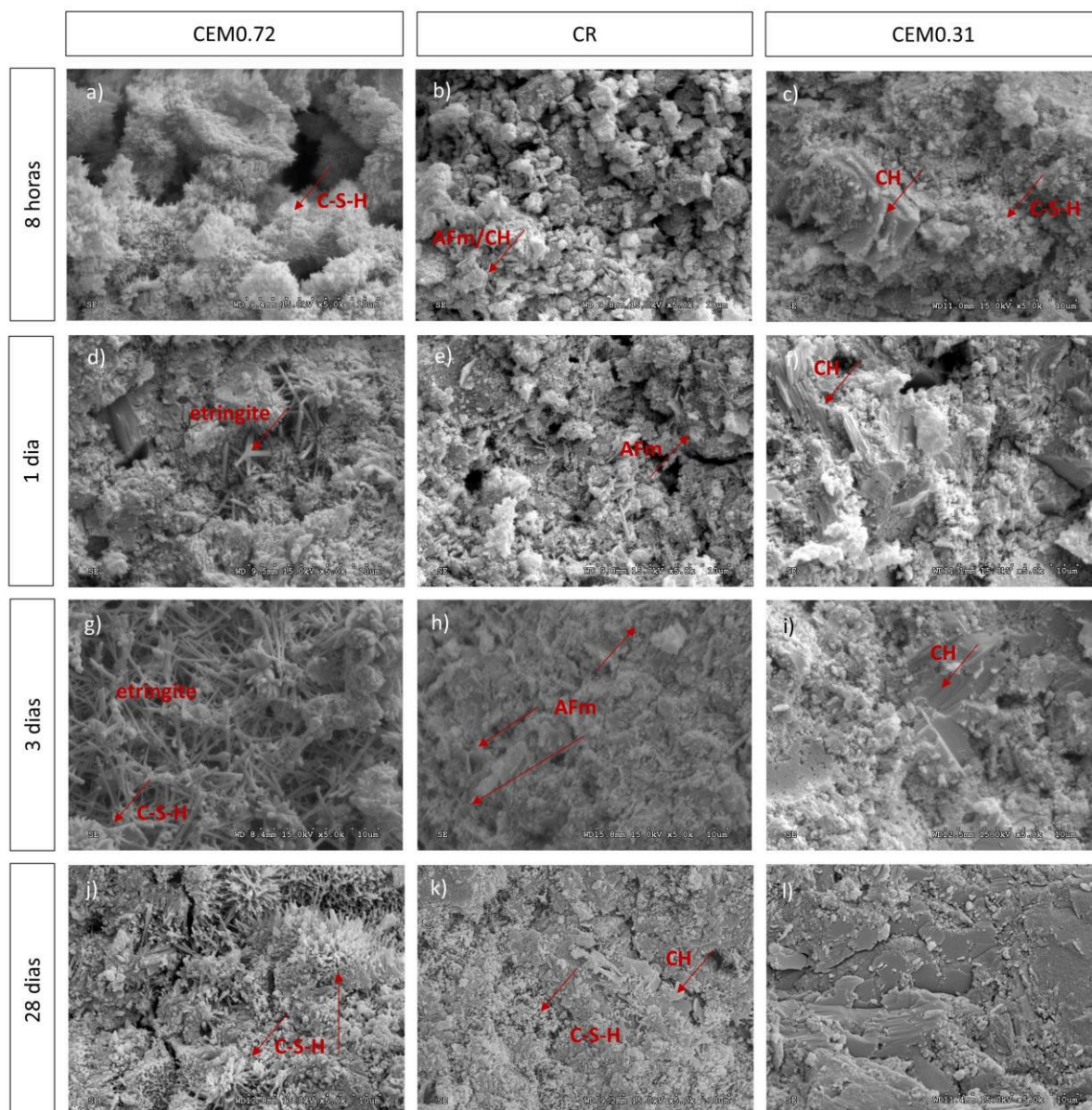


Figura 3. Micrografias das pastas CEM0.71, CR e CEM0.31 às 8 horas e a 1, 3 e 28 dias

Contrariamente às restantes pastas, às 8 horas, CEM0.31 apresentou uma microestrutura mais densa (Figura 3c), devido à sua menor relação a/c. Nestas pastas a maior proximidade entre partículas, permitiu uma melhor ligação entre produtos de hidratação externos, tendo sido encontrados cristais de CH nos espaços porosos (Figura 3c).

Às 24 horas, a hidratação progrediu nas pastas CEM0.72 e CR, sendo que esta última desenvolveu uma microestrutura ligeiramente mais densa, enquanto a primeira ainda era altamente porosa. Devido à elevada porosidade das pastas CEM0.72, foi possível observar cristais grandes de etringite e CH (Figura 3d). A presença de fases AFt foi menos evidente nas pastas com CR, no entanto, foi possível observar fases AFm (Figura 3e). Com a mesma idade, a estrutura da pasta CEM 0.31 apresentava baixa porosidade, com formação de C-S-H de grande densidade (Figura 3f), o que explica a elevada resistência mecânica apresentada por estas pastas após um dia (Tabela 2).

Após 3 dias, as pastas CEM0.72 mostraram uma estrutura porosa com uma grande quantidade de etringite entre as partículas de cimento hidratadas (Figura 3g). A presença de AFm também foi observada, mas com menor relevância. Foi identificado C-S-H com morfologia do tipo agulha divergente que, de acordo com [12], pode ser encontrado na presença de sulfatos (Figura 3g).

As pastas CR aos 3 dias revelaram uma estrutura mais densa (Figura 3h) com a ligação progressiva dos produtos de hidratação externos. As partículas de CR encontravam-se cobertas com produtos de hidratação e os monossulfatos incorporados no C-S-H. O CH também era abundante, preenchendo a estrutura da pasta (Figura 3h). A microestrutura dos produtos hidratados entre as partículas de CR parecia mais densa do que a das pastas CEM0.72 com igual relação a/c. No entanto, a esta idade a resistência mecânica foi semelhante nestas misturas. Conforme discutido em 3.2, a natureza porosa das partículas de CR absorverá parte da água de mistura, o que reduz a relação a/c e o espaço disponível entre partículas de CR. Deste modo, a microestrutura formada pelos produtos de hidratação externa tende a ser mais densa e próxima daquela apresentada pelas pastas CEM0.31 de trabalhabilidade semelhante. No entanto, as partículas de CR tendem a manter a estrutura interna da pasta de cimento de origem após a desidratação (a/c de 0,55), portanto, a sua resistência é inferior à das partículas de cimento comum. Na verdade, Zhang et al. [13] mostraram que a dureza da partícula CR era uma ordem de magnitude menor do que a das partículas de CEM I. Isto pode ser suficiente para controlar o comportamento mecânico da pasta de cimento, justificando a resistência mecânica equivalente nas pastas CR e CEM0.72. Este fenómeno deve ser mais relevante em idades posteriores, em que um limite de resistência é atingido nas partículas de CR, enquanto o desenvolvimento de produtos de hidratação entre as partículas de cimento é aumentado continuamente. Portanto, em idades posteriores, espera-se que a resistência mecânica possa ser maior nas pastas CEM0.72 do que nas CR, conforme encontrado em 3.2.

Após 28 dias, as pastas CEM0.72 e CR mostraram estruturas mais densas (Figura 3j,k). Grãos de cimento anidro ou partículas CR originais já não são facilmente identificados nesta idade. A pasta CR é caracterizada por uma estrutura mais refinada, com produtos de hidratação mais bem distribuídos e porosidade mais fina que a pasta CEM0.72. No entanto, o volume poroso total não é necessariamente menor na pasta CR, conforme será discutido na próxima secção. Conforme observado em idades anteriores, a pasta CEM 0.31 aos 28 dias apresentou uma estrutura muito densa com baixa porosidade capilar (Figura 3i).

### **3.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio**

As análises de PIM foram realizadas de acordo com 2.3, para cada pasta de cimento às 8 e 14 horas e aos 1, 3 e 28 dias. Conforme esperado, a porosidade total diminuiu progressivamente com a idade, independentemente do tipo de ligante e composição da pasta (Figura 4).



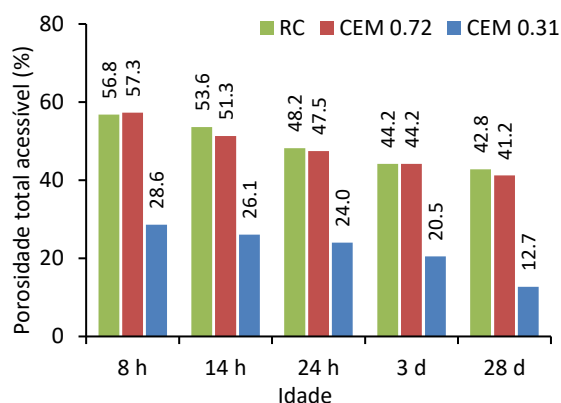


Figura 4. Porosidade total das pastas CR, CEM0.72 e CEM0.31 às 8 e 14 horas e aos 1, 3 e 28 dias.

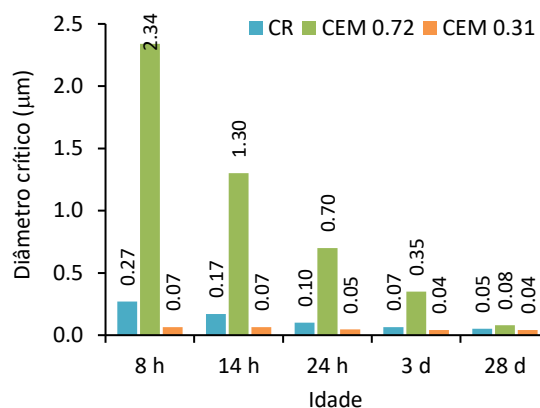


Figura 5. Porosidade total das pastas CR, CEM0.72 e CEM0.31 às 8 e 14 horas e aos 1, 3 e 28 dias.

A porosidade total acessível foi semelhante nas pastas CR e de CEM I de igual a/c, o que significa que, como para as pastas CEM I comuns, a porosidade das pastas CR é essencialmente afetada pela relação a/c. Portanto, a porosidade total não foi afetada pelo facto de parte da água de mistura ser absorvida pelas partículas de CR. De facto, o a/c e a porosidade diminuem em torno das partículas de CR, mas isso é compensado pela maior porosidade interna das partículas. Entre as 8 horas e os 28 dias, a porosidade total foi semelhante nas pastas CR e CEM0.72, o que sugere que o grau de hidratação também deve ser equivalente em ambas as pastas. Como esperado, pastas de cimento de trabalhabilidade semelhante, com menor relação a/c (CEM0.31), apresentaram uma porosidade total muito inferior.

Embora as pastas CR e CEM0.72 tenham porosidade total equivalente, a distribuição do tamanho dos poros e a microestrutura foram muito diferentes. Conforme verificado em 3.3, a microestrutura da pasta CR era mais refinada, estando associada a uma estrutura menos grosseira do que a das pastas CEM0.72. De facto, o diâmetro crítico (o ponto de inflexão da etapa de intrusão principal), que corresponde ao diâmetro de poro com a maior taxa de intrusão de mercúrio por variação de pressão, foi cerca de uma ordem de magnitude inferior ao das pastas CEM 0.72 (Figura 5). Por outro lado, a porosidade mais grosseira de CEM0.72 é explicada pela elevada relação a/c, que provoca um afastamento entre as partículas de cimento anidras ou parcialmente hidratadas. Isto ocorre principalmente em idades jovens, nas quais o grau de hidratação é reduzido. Além disso, a microestrutura das pastas CR é definida pela porosidade das partículas de CR e pela porosidade da pasta envolvente, que apresenta menor relação a/c, devido à água absorvida pelas partículas. Conforme discutido em 3.2, a relação a/c entre partículas pode ser inferior a 0,4. Isto explica o diâmetro crítico das pastas CR ser mais próximo do encontrado nas pastas de cimento com a/c de 0,31 (Figura 5) e também corrobora a análise MEV em 3.3, onde foi observado que a estrutura externa da pasta CR é mais densa e compacta do que a da pasta CEM0.72.

Em comparação com a pasta CEM0.72, verifica-se também que, após 3 dias, a estrutura dos poros da pasta CR não se altera, principalmente no que diz respeito ao diâmetro crítico (Figura 5). Uma possível explicação é o facto de que a estrutura porosa das pastas recicladas ser limitada pela estrutura de poros das partículas de origem. De facto, a estrutura interna de CR não pode ser alterada significativamente após a reidratação, sendo afetada pela relação a/c da pasta de origem. Portanto,

pode-se concluir que quanto menor o a/c do betão de origem e quanto maior a finura do CR, maior será o seu desempenho mecânico. Estas duas condições são essenciais para a obtenção de cimentos reciclados com propriedades melhoradas. A finura não só aumenta as propriedades cimentícias do CR, como também reduz a sua porosidade mais grosseira, permitindo obter pastas hidratadas com uma microestrutura refinada.

#### 4 CONCLUSÕES

A resistência mecânica das pastas CR foi semelhante à das pastas de CEM I de igual a/c até aos 3 dias. No entanto, aos 28 dias a resistência à compressão foi 32% menor, o que poderá ser atribuído à menor densidade das partículas de CR e à menor formação de produtos de hidratação externos entre partículas. A análise PIM confirmou que a porosidade total das pastas CR foi essencialmente afetada pela relação a/c, sendo semelhante às pastas de CEM I de igual composição. No entanto, o diâmetro crítico foi uma ordem de grandeza inferior aos desta pasta, aproximando-se do das pastas de igual trabalhabilidade, o que indica que as pastas com CR desenvolvem uma estrutura externa mais densa que as pastas de CEM I de igual a/c. As pastas CR podem ser caracterizadas por uma estrutura de hidratação dupla: produtos de hidratação internos que se desenvolvem na porosidade das partículas de CR; e produtos externos que se desenvolvem na matriz circundante às partículas de CR. Nesta matriz circundante, o espaço disponível para os novos produtos de hidratação é menor, reduzindo a relação a/c e aumentando a densidade desta região. Conclui-se que será possível obter uma microestrutura melhorada, assim como valores de resistência à compressão mais elevados, em CR finamente moídos e obtidos a partir de betão de baixo a/c.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Shui, Z., Xuan, D., Wan, H. *et al.* (2008) Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment, *Constr. Build. Mater.* 22 1723–1729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012>.
- [2] Wang, J., Mu, M., Liu, Y. (2018) Recycled cement, *Constr. Build. Mater.* 190 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>.
- [3] Shui Z., Xuan, D., Chen, W. *et al.* (2009) Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures, *Constr. Build. Mater.* 23 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>.
- [4] Carriço, A., Bogas, J.A., Guedes M. (2020) Thermoactivated cementitious materials - a review, *Constr. Build. Mater.* 250 118873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>.
- [5] Baldusco, R., Nobre, T.R.S, Angulo, S.C. *et al.* (2019) Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement, *J. Mater. Civ. Eng.* 31 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725).

- [6] EN 12390-3. 2009, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens. CEN.
- [7] EN 196-3. 2016, Methods of testing cement. Part 3: Determination of setting times and soundness. CEN.
- [8] Cook, R.A., Hover, K.C. (1991) Experiments on the contact angle between mercury and hardened cement paste, *Cem. Concr. Res.* 21 1165–1175. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90077-U](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90077-U).
- [9] EN1015-11. 1999, Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN.
- [10] Lothenbach, B., Durdziński, P., De Weerd, K. (2016) Chapter 5 -Thermogravimetric analysis, in: B. Scrivener, Karen L.; Snellings, Ruben; Lothenbach (Ed.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor and Francis Group, 2016: pp. 177–211.
- [11] Yu, R., Shui, Z. (2013) Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials, *Constr. Build. Mater.* 49 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>.
- [12] Scrivener, K., Bazzoni, A., Mota, B. *et al.* Chapter 8 – Electron microscopy, in: B. Scrivener, Karen L.; Snellings, Ruben; Lothenbach (Ed.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor and Francis Group, 2016: pp. 353–417.
- [13] Zhang, L., Ji, Y., Huang, G. *et al.* (2018) Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag, *Constr. Build. Mater.* 164 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>.