

Argamassas de cimento reciclado: caracterização física e mecânica

Sofia Real

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, sofia.real@tecnico.ulisboa.pt

Ana Carriço

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt

José Alexandre Bogas

CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

O presente artigo tem por objetivo a caracterização de argamassas produzidas com incorporação de cimento reciclado termoativado (CR). Para tal, foi selecionada uma temperatura de tratamento de 700°C, de forma a obter a desidratação efetiva das partículas de CR sem descarbonatação significativa. Foi analisada a influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado termoativado e da relação água/ligante na necessidade de água e tempo de presa do CR, bem como nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. A microestrutura e o desenvolvimento da hidratação foram analisadas tendo em consideração ensaios de termogravimetria, difração de raios-x, calorimetria e microscopia eletrónica de varrimento. A substituição de CEM I 42.5R por 20, 50 e 100% de CR permitiu atingir ligantes enquadráveis nas classes de resistência 52.5, 42.5 e 32.5, respetivamente. A elevada exigência de água é o principal obstáculo à aplicação do CR. No entanto, este aspeto assumiu menor importância para percentagens de substituição até 50%. A resistência mecânica foi pouco afetada ou diminuiu até cerca de 12% para percentagens de incorporação até 20% e 50%, respetivamente. Conclui-se que o CR é uma alternativa promissora face às atuais adições minerais utilizadas na indústria cimenteira.

Palavras-chave: Cimento reciclado; Reidratação de resíduos de cimento; Termoativação; Comportamento no estado fresco; Resistência mecânica.

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland normal (CPN) tem elevados consumos energéticos e envolve a destruição de recursos naturais, bem como liberta uma quantidade significativa de gases com efeito de estufa, nomeadamente dióxido de carbono (CO_2), podendo chegar a cerca de 750-800 kg CO_2 /ton CPN [1]. Cerca de 85% das emissões de CO_2 durante a produção do CPN estão relacionadas com o processo de sinterização, dos quais 60% são atribuídos à descarbonatação do calcário [2]. De acordo com WBCSD e IEA [1], as emissões de CO_2 associadas à produção de CPN representam cerca de 5% das emissões antropogénicas globais de CO_2 . Por outro lado, os resíduos de construção e demolição, que incluem uma quantidade considerável de materiais cimentícios, constituem cerca de metade dos resíduos industriais [3], conduzindo a questões de gestão de resíduos. Assim, num futuro próximo, a indústria do cimento terá que alterar a sua estratégia de forma a atingir um objetivo tão exigente como a produção de cimentos eco-eficientes.

Neste sentido, o cimento reciclado de baixo carbono surge como uma alternativa sustentável ao CPN, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e emissões de CO_2 , mas também dando destino adequado aos resíduos de construção e demolição. Na última década, foram realizados vários trabalhos de investigação acerca da reativação e reidratação do cimento reciclado (CR) [4–9]. Dependendo de diversos fatores, como as condições de tratamento térmico, o material de origem, a finura do CR e a composição da pasta, têm sido obtidas diferentes conclusões. Serpell and Zunino [8] estudaram as propriedades de CR tratado a 700-900°C, tendo verificado que o CR tratado a 740°C conduziu a maior resistência à compressão do que o CR tratado a 860°C, devido à formação de um polimorfo mais reativo de C_2S ($\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$) a temperaturas mais reduzidas. Por outro lado, Wang et al. [9] observaram que o CR tratado a 450°C conduzia à maior resistência mecânica, devido à formação de tobermorite 0.96nm e jennite. Com base em microscopia de varrimento eletrónico (MEV), Zhang et al. [6] concluíram que a pasta de CR tratado a 600°C era extremamente porosa, com ligações fracas entre produtos de hidratação, levando a resistência mecânica reduzida. Balduccio et al. [10] reportaram que o desenvolvimento da resistência mecânica de pastas com CR tratado a 500°C foi mais rápido do que o de uma pasta com CPN, tendo atribuído os resultados à reidratação imediata do CR de área superficial elevada. Para relações água/ligante (a/l) de 0,6, a resistência à compressão apenas aumentou entre 13,6 e 14,6 MPa entre 3 e 28 dias, tendo atribuído a fraca evolução à reduzida rigidez das partículas desidratadas de CR. Bogas et al. [7] analisou as propriedades mecânicas e no estado fresco de argamassas com 20-100% de incorporação de CR de betão tratado a 350 e 600°C. Os autores observaram a redução progressiva da resistência à compressão com a percentagem de incorporação de CR, embora até 20% CR, a resistência à flexão não tenha sido significativamente afetada.

Em resumo, este domínio de investigação ainda se encontra relativamente inexplorado, com várias incertezas na sua produção, comportamento de hidratação e respetivas propriedades no estado fresco e endurecido, nomeadamente tendo em conta diferentes parâmetros de mistura das argamassas. Assim, este estudo pretende analisar a influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado termoativado e da relação a/l na necessidade de água e tempo de presa do CR, bem como nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

2 PROGRAM EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

A pasta de origem (PO) foi produzida com CEM I 42.5R (CPN) e uma relação água/cimento (a/c) de 0,40, tendo atingido uma resistência à compressão aos 28 dias de cerca de 45 MPa. Após a produção, a PO foi curada em água durante pelo menos 3 meses. De seguida, a PO foi submetida a diversos processos de britagem e moagem, de forma a reduzir a dimensão das suas partículas. Finalmente, as partículas finas de PO foram peneiradas abaixo de 125 μm . Com base noutros trabalhos experimentais [7,11,12] e na análise termogravimétrica (TG), selecionou-se uma temperatura de tratamento de 700°C, de forma a obter a desidratação efetiva das partículas de PO sem descarbonatação significativa. As partículas de PO foram termoativadas num forno horizontal, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min entre a temperatura ambiente e a de tratamento (700°C), seguida de um período de residência de 5 horas e de arrefecimento no forno até temperatura ambiente.

2.2 Composição das argamassas

As argamassas foram produzidas com rácio cimento: areia de 1:3 em massa, de acordo com a NP EN 196-3 [13]. Para a produção das argamassas, foi utilizada areia natural siliciosa de 2 granulometrias: 35% areia fina (2620 kg/m³) e 65% areia grossa (2610 kg/m³), combinadas de forma otimizar a compacidade da mistura. Estas foram secas previamente para controlar melhor a água efetiva da mistura. Adicionalmente, nas misturas com relação a/l reduzida, foi utilizado superplastificante (SP).

Tabela 1. Composição das argamassas

Designação	MA0	MA20	MA50	MA100	MB0	NT20	MC0	MC20	MC50	MC100	MD0	MD20	MD50
% CR	0	20	50	100	0	20	0	20	50	100	0	20	50
a/l	0,5	0,5	0,56	0,67	0,67	0,5	0,58	0,58	0,58	0,58	0,4	0,4	0,4
M _{CR}	0	96	231	432	0	95	0	92	228	451	0	101	250
M _{CPN}	482	383	231	0	444	380	463	368	228	0	507	404	250
M _{água}	241	240	258	290	297	238	269	267	265	262	203	202	200
SP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,4	1,3	2
Espalhamento	187	171	183	169	-	168	195	194	166	163	189	177	161
MV _{fresca}	2180	2140	2100	1970	2160	2140	2210	2190	2140	2060	2150	2130	2030
f _{cm,3d}	26,6	33,2	18,1	3,4	17,5	27,4	26,3	22,1	23,8	16,4	49,1	46,1	35,2
f _{ctm,3d}	4,6	6,1	3,3	1,3	3,9	4,9	5,6	4,9	4,5	3,7	8,1	8,7	6,3
f _{cm,7d}	44,7	48,1	33	6	27,1	36	39,9	32,2	29,4	21,6	61,5	61,7	49,1
f _{ctm,7d}	7,9	7,6	5,6	2,1	5,6	7,1	7,1	7,5	6	4,3	10,1	9,6	8,7
f _{cm,28d}	65,1	59,7	47,1	23,1	44,2	48,4	51,3	45,6	39,7	27,1	76,5	74,9	66,9
f _{ctm,28d}	10,8	8,4	8,2	5	8,7	8,1	9,2	8,2	7,8	6,2	11,9	10,7	9,2

Nota: M_{CR}, M_{CPN}, M_{água}, MV_{fresca} em kg/m³; SP em % massa de ligante; Espalhamento em mm; f_{cm} e f_{ctm} em MPa

As misturas foram produzidas com diferentes percentagens de incorporação (0, 20, 50 e 100%) de CR termoativado a 700°C com trabalhabilidade (MA0-MA100) ou relação a/l (MC0-MC100) semelhante

(Tabela 1). Foram ainda produzidas misturas com relação a/l reduzida (MD0-MD50), para avaliar o potencial máximo do CR. Finalmente, para efeitos de comparação, foi produzida uma mistura com CPN e a mesma relação a/l do que a MA100 (MB0), bem como uma mistura com 20% CR não tratado (NT20), para analisar a influência do efeito de filler e do restante cimento anidro na capacidade de reidratação do CR. As argamassas foram produzidas de acordo com as recomendações da NP EN 1015-2 [14].

2.3 Métodos de ensaio

Após a sua produção, as partículas de CR foram caracterizadas por análise termogravimétrica (TG) e difração de raios-x (DRX). Para a DRX, as amostras foram pulverizadas e analisadas a 5-60°C, com um passo de 0,03° e de 100s, através do equipamento a *PANalytical X'Pert Pro* com radiação $\text{CuK}\alpha$. A TG foi realizada com recurso ao equipamento *SETARAM*, modelo *TGA92* com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, a partir da temperatura ambiente até 1000°C. Além disso, tendo em conta as curvas da TG, o grau de hidratação (α) do cimento hidratado foi estimado de acordo com a Eq. (1), em que W_n corresponde à quantidade de água necessária à hidratação completa do cimento anidro (0,23 para CPN [7]) e W_b à água não evaporável, determinada de acordo com a Eq.(2), em que L_{dh} corresponde à perda de água ligada aos produtos de hidratação e à decomposição do gesso e ettringite, L_{dx} à desidroxilação do CH, L_{dc} à decarbonatação da calcite e L_{dca} ao fator corretivo que tem em conta a perda de massa devido à decarbonatação do filler e outros compostos carbonatados no cimento anidro.

$$\alpha = \frac{W_b}{W_n} \times 100 \quad (1)$$

$$W_b = L_{dh} + L_{dx} + 0.41 \times (L_{dc} - L_{dca}) \quad (2)$$

A calorimetria dos cimentos foi realizada de acordo com o método A da NP EN 196-11 [15] (mistura externa), a uma temperatura constante de 20°C, num calorímetro *TAM Air Instruments – Watwers Sverige AB*. As amostras com cerca de 6 g foram previamente misturadas com água destilada e posicionadas rapidamente no calorímetro (menos de 4 mins). O calor de hidratação foi medido durante cerca de 7 dias. Devido ao facto de a estabilização das amostras no calorímetro demorar cerca de 45 mins, as medições só foram iniciadas após esse período.

A consistência normal e o tempo de presa foram determinados de acordo com a NP EN 196-3 [13]. A caracterização das argamassas no estado fresco, nomeadamente espalhamento e massa volúmica fresca, foi realizada de acordo com a EN 1015-3 [16] e a EN 1015-6 [17], respetivamente. A caracterização mecânica das argamassas (resistência à compressão e à flexão) foi realizada de acordo com a EN 1015-2 [14]. Para tal, 3 provetes de 160x40x40 mm foram produzidos para cada idade de ensaio, tendo sido curados em câmara de 95% HR até à idade de ensaio (3, 7, 28 e 90 dias).

Para a análise MEV, aos 28 dias, foram recolhidas amostras de argamassa com 40x40x6 mm, colocadas em isopropanol durante cerca de 7 dias de forma a parar a hidratação e secas a 60°C durante 2 dias. De seguida, as amostras foram seccionadas com 10x10 mm e cobertas com uma liga de ouro-paládio para evitar a acumulação de carga elétrica durante a observação. As amostras foram observadas num microscópio de varrimento eletrónico *Hiachi S2400*, acoplado a um espectrómetro de raios-x de energia dispersiva da *Bruker*.

3 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Caracterização do cimento reciclado termoativado

3.1.1 Análise termogravimétrica e difração de raios-x

A Fig. 1 apresenta as curvas da TG e TG diferencial (dTG) do CPN e NT utilizados neste estudo, onde podem ser essencialmente observadas três áreas principais de perda de massa: até cerca de 450°C, devido à desidratação dos C-S-H e à decomposição de outros produtos de hidratação, como o gesso e a ettringite (L_{dh}); 430-550°C, devido à desidroxilação do CH (L_{dx}); acima de 550°C, essencialmente entre 700 e 800°C, devido à descarbonatação da calcite (L_{dc}) [7,9,11,18,19]. Com base nas Eq. (1) e (2) e na Fig. 1, estimou-se um α de 82% para o NT, que simula adequadamente uma pasta bem hidratada.

A Fig. 2 apresenta a análise de DRX do CPN, NT e CR anidro e hidratado. O CPN apresenta os seus principais compostos bem definidos, nomeadamente C_3S , que não se forma no CR. Entre outras fases cristalinas, identificou-se gesso, usualmente utilizado para controlar a rapidez de hidratação dos aluminatos de cálcio (Fig. 2). O NT exhibe essencialmente as fases cristalinas CH, ettringite e calcite (Fig. 2). Não foi possível identificar outros produtos nanocristalinos existentes, como o C-S-H. Os elevados picos de CH confirmam o elevado grau de hidratação do NT, conforme observado na TG. Além disso, o NT apresentou uma quantidade considerável de calcite (Fig. 2), possivelmente decorrente das fases de moagem e armazenamento durante a produção do CR.

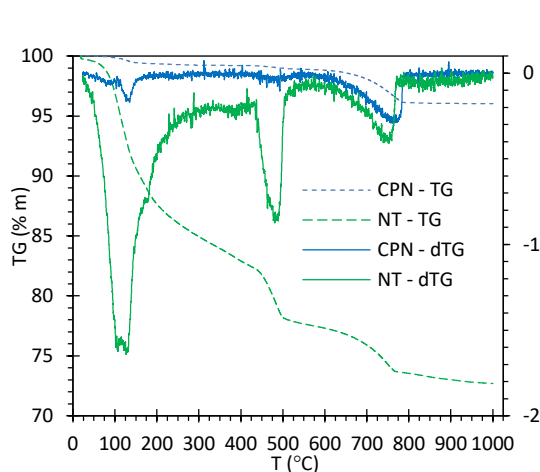


Figura 1. Análise termogravimétrica (TG) e TG diferencial (dTG) do CPN e do NT

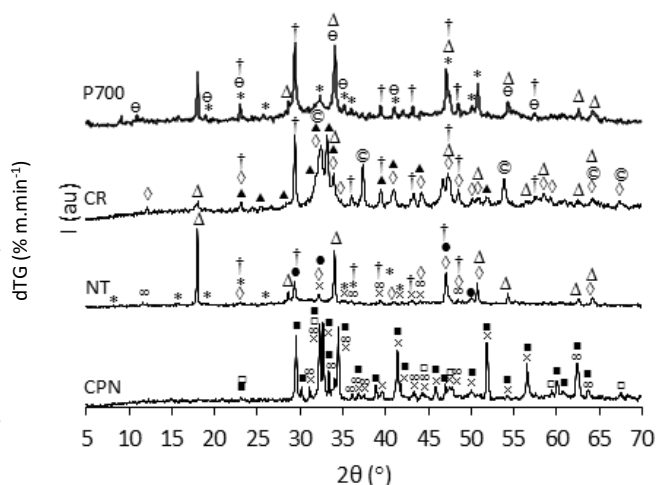


Figura 2. Análise de difração de raios-x do CPN, NT e CR. Legenda: \diamond – Brownmillerite; \odot – CaO; \dagger – Calcite; \square – C_4AF ; \times – β - C_2S ; \blacktriangle – α' - L - C_2S ; \blacksquare – C_3S ; \bullet – C-S-H; Δ – CH; * – Ettringite; ∞ – Gesso; Θ – Hemicarboaluminato de cálcio hidratado

O CR apresentou várias transformações relevantes, nomeadamente a redução de CH acompanhada de formação de CaO. Além disso, observou-se o aumento da intensidade dos picos da calcite em comparação com o NT, o que sugere que parte do CaO gerado pela desidroxilação do CH possa ter-se transformado em calcite. Outros autores reportaram fenómenos semelhantes [5,9]. Adicionalmente, foram identificados picos de um polimorfo de C_2S , que refletem a desidratação e despolimerização do C-S-H. Este novo nesossilicato apresentou uma estrutura semelhante ao polimorfo α' - L - C_2S .

Em geral, o P700 apresentou produtos de hidratação semelhantes aos do NT, nomeadamente CH e ettringite, confirmando a reidratação do CR (Fig. 2). O P700 também apresentou calcite, resultante de carbonatação que terá provavelmente ocorrido durante as fases de moagem, tratamento térmico e armazenamento. Adicionalmente, o P700 também exibiu um composto menos comum, hemicarboaluminato de cálcio hidratado. Wang et al. [9] também identificou este composto, através de análises DRX e MEV, tendo sugerido que parte da calcite no produto anidro terá reagido rapidamente com os aluminatos, formando novos compostos hidratados, contribuindo para a maior reatividade inicial do CR. O mesmo foi reportado por Baldusco et al. [10].

3.1.2 Necessidade de água e tempo de presa

A Tabela 2 apresenta os resultados de consistência normal e tempo de presa realizados em pastas com incorporação de diferentes percentagens de CR. A água necessária para atingir uma consistência normal aumentou com a percentagem de incorporação de CR. O CR exigiu mais do que o dobro da água para atingir a mesma consistência. A mesma tendência é reportada na literatura [4,9,11]. Shui et al. [4] referem que tal se deve essencialmente ao aumento da área superficial das fases desidratadas e à formação de CaO livre. De facto, dado que o CR tem CaO na sua composição, parte da água da mistura reage imediatamente com este composto e parte evapora devido à natureza exotérmica desta reação. De acordo com Xinwei et al. [11], a necessidade de água mais elevada é o resultado da maior absorção e maior superfície específica do CR comparativamente ao CPN. Em contraste com a estrutura cristalina compacta apresentada pelo CPN, a Fig. 3 demonstra a natureza mais porosa e superfície mais rugosa do CR, que resulta num aumento significativo da área superficial das partículas, refletindo-se na necessidade de água. Adicionalmente, Yu e Shui [20] também atribuiu a elevada necessidade de água à aglomeração de partículas de CR, não deixando uma quantidade de água suficiente para garantir uma consistência normal. No entanto, neste estudo, para percentagens de incorporação de CR até 50%, a necessidade de água não foi significativamente aumentada (Tabela 2). O efeito lubrificante proporcionado pelas partículas finas de CPN permite a redução do contacto e fricção entre partículas mais grosseiras, melhorando a coesão e trabalhabilidade da pasta [7].

Tabela 2. Consistência normal e tempo de presa de CR

Desig.	%CR	Consistência normal (a/l)	Tempo de presa (min)	
			Inicial	Final
CPN	0	0,27	120	200
CR1	20	0,33	145	210
CR2	50	0,38	125	180
CR3	100	0,65	15	32

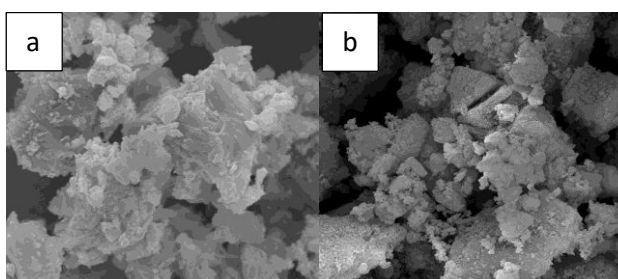


Figura 3. Imagens MEV de CPN (a) e CR (b)

O CR exibiu tempos de presa inicial e final muito curtos (15 e 32 mins) (Tabela 2), não tendo preenchido os requisitos da NP EN 197-1 [21], que sugere um mínimo de 45 mins para o tempo de presa inicial. Esta tendência também foi reportada por outros autores [4,7] e pode ser atribuída à rápida reidratação das fases desidratadas de CR com área superficial e reatividade elevadas [4,6,10]. A influência da percentagem de incorporação de CR não foi clara (Tabela 2). Quando comparada com o CPN, a incorporação de 20 e 50% CR conduziu a um ligeiro incremento e uma ligeira redução do tempo de

presa, respetivamente. De facto, até 50% de substituição de CR, o tempo de presa parece ter sido essencialmente controlado pelo CPN, com pequenas variações entre as diferentes percentagens de CR. No entanto, Yu and Shui [20] reportaram a redução progressiva do tempo de presa com a incorporação de 5 a 30% CR, tendo atribuído os resultados ao fenómeno de hidratação promovido pelos nesossilicatos do CR.

3.1.3 Calor de hidratação

A Fig. 4 apresenta a taxa de calor de hidratação e o calor de hidratação acumulado ao longo do tempo de pastas com CR ou CPN e relação a/l de 0,7. Durante as primeiras 4 horas, o CR apresentou uma taxa de calor mais elevada do que o CPN (Fig. 4). Entre 45 e 90 mins, o calor libertado pelo CR foi cerca de 2,8 vezes superior ao do CPN. Outros autores obtiveram conclusões semelhantes [4,6,9]. Zhang et al. [6] reportaram uma taxa de libertação de calor 10 vezes superior em CR tratado a 600°C do que em CPN, seguido de um decréscimo acentuado do calor de hidratação. De acordo com Shui et al. [4], a maior reatividade inicial do CR resulta da sua maior área superficial e da instabilidade dos produtos de hidratação, que tendem a repolimerizar rapidamente. Além disso, Baldusco et al. [10] afirmam que o elevado calor de hidratação inicial não pode ser atribuído unicamente à hidratação do CaO. Após 6 horas, a tendência inverteu-se e o CPN apresentou um calor de hidratação acumulado mais elevado do que o CR (Fig. 4). Após 24 horas e 7 dias, o calor de hidratação acumulado do CPN foi cerca de 42 e 46% mais elevado do que o do CR, respetivamente. Estas diferenças teriam sido menores, caso os primeiros 45 mins tivessem sido medidos. Assim, o CR apresenta maior reatividade inicial e, ao longo do tempo, tende a desenvolver menos reações de hidratação do que o CPN. Por outras palavras, o CR apresenta uma fase de hidratação mais rápida e uma fase de aceleração de menor relevância, o que justifica os tempos de presa obtidos (Tabela 2).

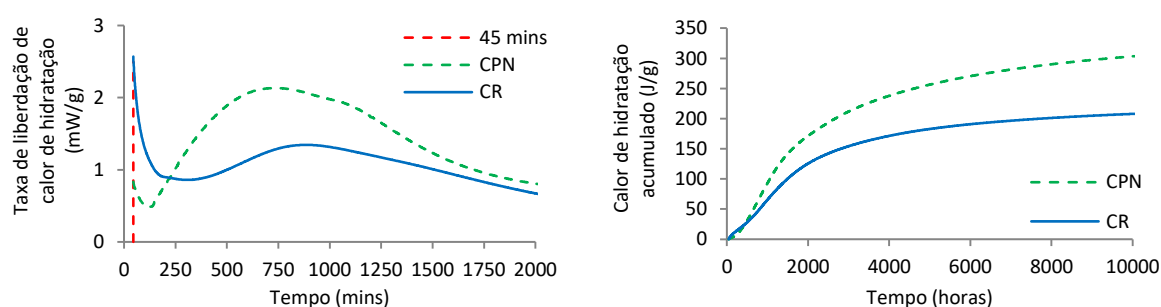


Figura 4. Taxa de libertação de calor de hidratação e calor de hidratação acumulado de pastas com relação a/l de 0,7 e CR ou CPN

3.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

3.2.1 Influência da percentagem de incorporação de cimento reciclado termoativado

A Fig. 5 apresenta a resistência à compressão (f_{cm}) aos 28 dias de argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CR e diversas relações a/l. Em geral, observou-se a redução destas propriedades com o aumento da percentagem de incorporação de CR. Inclusivamente, em argamassas com a mesma relação a/l (MC e MD), a incorporação de CR levou ao decréscimo da f_{cm} , sugerindo que

as pastas com CR são menos densas. Para 100% CR, a f_{cm} atingiu apenas cerca de 53% da argamassa correspondente apenas com CPN. Assim, o incremento da percentagem de incorporação de CR levou a maiores reduções de f_{cm} nas argamassas MA, devido à sua relação a/l mais elevada. Neste caso, as f_{cm} das argamassas MA com 20, 50 e 100% CR foram cerca de 92, 72 e 36% da MA0, respetivamente. No entanto, apesar da elevada relação a/l, a MA100 atingiu cerca de 23,1 MPa aos 28 dias, demonstrando a reatividade efetiva do CR. Outros autores reportaram resistências à compressão significativamente mais reduzidas, mesmo considerando pastas com relações a/l inferiores [4,7,11]. Aos 3 dias, as resistências à compressão (f_{cm}) e à flexão (f_{ctm}) da NT20 foram cerca de 3% mais elevadas do que as da argamassa de referência de igual relação a/l (MA0), comprovando o potencial contributo do NT para os efeitos de filler e nucleação (Tabela 1). Por outro lado, aos 7 e 28 dias, as f_{cm} da NT20 foram cerca de 19 e 26% inferiores às da MA0, respetivamente, confirmando a inexistência de reatividade do NT. Além disso, a f_{cm} da NT20 foi cerca de 18, 25 e 19% inferior à MA20 de igual relação a/l aos 3, 7 e 28 dias, respetivamente, reforçando a capacidade de hidratação do CR. De referir ainda que a f_{cm} e a f_{ctm} da MA20 aos 3 e 7 dias foram mais elevadas do que as da MA0 (Tabela 1). Yu e Shui [20] também referem maior resistência à compressão aos 3 e 28 dias em pastas com 5%CR tratado a 650°C do que em pastas de referência com a mesma relação a/l de 0,3. Estes resultados podem ser atribuídos aos efeitos de filler e nucleação promovidos pelas partículas finas de CR.

3.2.2 Influência da relação a/l

Na Fig. 5, é possível observar que a redução da f_{cm} aos 28 dias com a incorporação de CR seguiu tendências semelhantes para as relações a/l de 0,4 e 0,58. Adicionalmente, para 100% CR (MA100 e MC100), a f_{cm} atingiu cerca de 53% da argamassa de referência com apenas CPN, tanto para a relação a/l de 0,67 (MB0) e de 0,58 (MC0) (Tabela 1). Assim, a eficiência das argamassas de CR parece não ter sido significativamente afetada pela relação a/l. De facto, nas argamassas com relação a/l de 0,58 (MC) e 0,40 (MD), a incorporação de 20% CR conduziu à redução de 11 e 2% da f_{cm} , respetivamente. Para o mesmo conjunto de argamassas, mas com 50% CR, a redução da f_{cm} foi de cerca de 23 e 12%, respetivamente. Por um lado, tal pode estar relacionado com um efeito de filler e nucleação mais eficiente proporcionado pelo CR em microestruturas mais densas. Por outro lado, a adição de SP nas argamassas MD poderá ter contribuído para uma melhor dispersão e reatividade do CR. A Fig. 6 apresenta a f_{cm} aos 28 dias de argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CR em função da relação a/l. Com base nas regressões lineares, estimou-se que a f_{cm} aos 28 dias de argamassas com relação a/l de 0,5 e 20, 50 e 100% atingiria cerca de 60, 50 e 30 MPa, respetivamente. Tal significa que, de acordo com a NP EN 197-1 [21], cimentos compostos com CEM I 42.5R e 20, 50 e 100% CR têm potencial para atingir as classes de resistência 52.5, 42.5 e 32.5, respetivamente. De referir que é possível produzir argamassas trabalháveis com incorporação de até 50% CR atingindo f_{cm} e f_{ctm} até cerca de 67 e 9 MPa, respetivamente (Tabela 1). Desta forma, tendo em conta a necessidade urgente de encontrar ligantes mais eficientes cruciais para a implementação do exigente roteiro de redução de carbono da industria europeia do cimento, o CR parece ser uma solução promissora. As argamassas com 100% CR apresentaram um incremento mais reduzido da f_{cm} com a redução de relação a/l (Fig. 6). De acordo com Zhang et al. [6], devido à reduzida rigidez das partículas porosas de CR, ocorre uma espécie de patamar de resistência, a partir do qual a f_{cm} estabiliza. Além disso, o desenvolvimento da microestrutura da pasta é diferente, no qual parte dos produtos de hidratação se

formam no interior das partículas porosas de CR e não participam no desenvolvimento de produtos de hidratação externos, que garantem a coesão dos constituintes da argamassa.

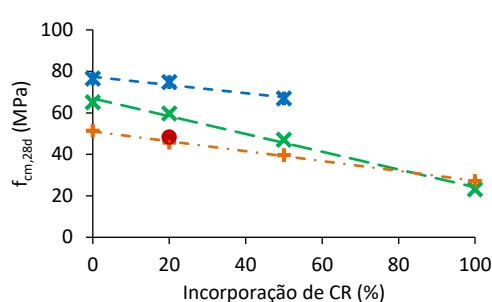


Figura 5. Resistência à compressão aos 28 dias, $f_{cm,28d}$, de argamassas com diferentes % de incorporação de CR

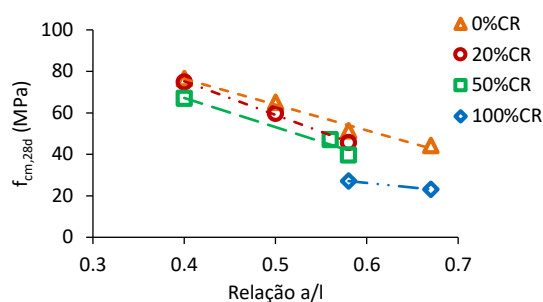


Figura 6. Resistência à compressão aos 28 dias, $f_{cm,28d}$, de argamassas com diferentes % de incorporação de CR em função da relação a/l

3.2.3 Influência da idade de ensaio

A Fig. 7 apresenta a resistência à compressão de argamassas MA ao longo do tempo. Contrariamente ao reportado por outros autores [4,6,7], a evolução da resistência das argamassas com 100% CR foi mais reduzida do que a das argamassas de CPN com a mesma trabalhabilidade (MA0) ou a mesma relação a/l (MB0). De facto, a f_{cm} da MA100 aos 3 e 28 dias foi cerca de 13 e 36% da da MA0 e cerca de 19 e 52% da da MB0, respetivamente. O mesmo comportamento foi observado para a f_{ctm} (Tabela 1).

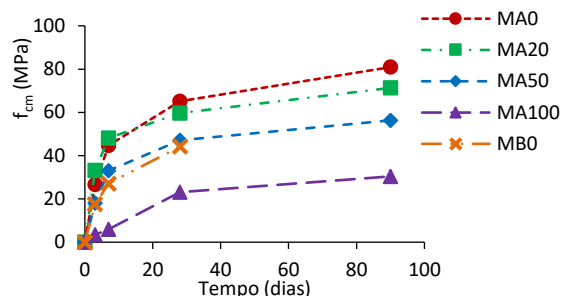


Figura 7. Resistência à compressão, f_{cm} , de argamassas MA e MB0 no tempo

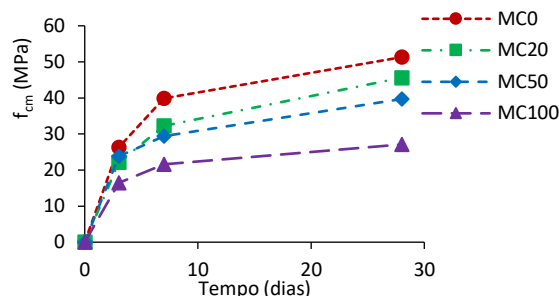


Figura 8. Resistência à compressão, f_{cm} , de argamassas MC no tempo

Bogas et al. [7] também documentou um desenvolvimento de resistência inicial mais lento em argamassas com CR, tendo atribuído os resultados à dimensão mais grosseira das partículas de CR. No entanto, as calorimetrias indicaram uma rápida evolução da hidratação do CR. Por outro lado, em argamassas com percentagens de incorporação de CR reduzidas, a evolução da resistência foi mais rápida do que a da argamassa de referência com a mesma relação a/l (MA0 e MA20). Desta forma, outros aspetos, como a relação a/l e a efetividade da dispersão do CR, podem ter um papel importante no seu comportamento. De facto, as argamassas MC apresentaram um desenvolvimento de resistência mais próximo do das argamassas com CPN do que as argamassas MA (Fig. 8). A f_{cm} da MC100 aos 3 e 28 dias foi cerca de 62 e 53% da MC0, respetivamente. Tal pode ser justificado pela adição de SP à MC100 para que fosse possível a obtenção de uma argamassa trabalhável com a mesma relação a/l do que a MC0, o que terá contribuído para uma melhor dispersão do CR. Yu e Shui [20] também

demonstraram que a melhoria da dispersão do CR com o auxílio de aditivos promovia um desenvolvimento de resistência mais rápido. Além disso, mesmo após 28 dias, o incremento de resistência da MA100 não foi inferior ao da MA0. Neste caso, não se confirmou o patamar de resistência reportado por Zhang et al. [6], devido à menor rigidez das partículas de CR.

4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o estudo das propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas produzidas com diferentes percentagens de incorporação de CR e relações a/l. A capacidade de reidratação do CR foi demonstrada através de análise DRX, calorimetria, MEV, bem como de ensaios mecânicos. O CR apresentou-se como um material promissor para substituição de CPN. A trabalhabilidade e a resistência mecânica das argamassas de CR não foram significativamente influenciadas, para percentagens de incorporação de 20% CR. Para substituição de 50% CR, a resistência mecânica foi pouco afetada, tendo decrescido apenas cerca de 12-23% em argamassas de igual relação a/l. A eficiência do CR foi superior em argamassas com menor relação a/l. Por outro lado, as argamassas de CR apenas atingiram resistências mecânicas 48% inferiores às das argamassas de CPN de relação a/l idêntica. No entanto, mesmo para relações a/l elevadas, as argamassas com 100%CR atingiram até cerca de 27 MPa aos 28 dias. Adicionalmente, os cimentos compostos com CEM I 42.5R e 20, 50 e 100 CR têm potencial para atingir as classes de resistência 52.5, 42.5 e 32.5, respetivamente, de acordo com a NP EN 197-1 [21]. Em resumo, é possível produzir cimentos com redução significativa das emissões de CO₂, enquadrados nas classes da NP EN 197-1 [21]. No entanto, os seus principais problemas continuam a ser a sua trabalhabilidade e tempos de presa reduzidos, que podem ser ultrapassados através da sua utilização como material de substituição até 50% CR.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-COM-28308/2017. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS/IST no financiamento do presente trabalho e a colaboração da SECIL pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental. O segundo autor gostaria de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/146033/2019.

REFERÊNCIAS

- [1] WBCSD, IEA (2009) Cement technology roadmap 2009. Carbon emissions reductions up to 2050. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) and International Energy Agency (IEA).
- [2] Gartner, E. (2004) Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cem. Concr. Res.* 34, 1489–1498.
- [3] Kwon, E., Ahn, J., Cho, B. *et al.* (2015) A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Constr. Build. Mater.* 83, 174–180.
- [4] 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.

- [5] Vyšvaril, M., Bayer, P., Chromá, M. *et al.* (2014) Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 54, 413–420.
- [6] 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.
- [7] Bogas, J.A., Carriço, A., Pereira, M.F.C. (2019) Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars. *J. Clean. Prod.* 218, 377–389.
- [8] Serpell, R., Zunino, F. (2017) Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α'_H -C₂S. *Cem. Concr. Res.* 100, 398–412.
- [9] Wang, J., Mu, M., Liu, Y. (2018) Recycled cement. *Constr. Build. Mater.* 190, 1124–1132.
- [10] Baldusco, R., Nobre, T., Angulo, S. *et al.* (2019) Dehydration and rehydration of blast furnace slag cement. *J. Mater. Civ. Eng.* 31, 04019132.
- [11] Xinwei, M., Zhaoxiang, H., Xueying, L. (2010) Reactivity of dehydrated cement paste from waste concrete subjected to heat treatment. Second international conference on sustainable construction materials and technologies, Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- [12] Shui, Z., Lu, J., Tian, S. *et al.* (2014) Preparation of new cementitious system using fly ash and dehydrated autoclaved aerated concrete. *J. Wuhan Univ. Technol. Sci Ed.* 29, 726–732.
- [13] NP EN 196-3 (2017) Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [14] EN 1015-2 (1998) Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. European Committee for standardization (CEN).
- [15] NP EN 196-11 (2018) Métodos de ensaio de cimentos. Parte 11: Calor de hidratação: Método da condução isotérmica. Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2018.
- [16] EN 1015-3 (1999) Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). European Committee for standardization (CEN).
- [17] EN 1015-6 (1998) Methods of test for mortar for masonry. Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. European Committee for standardization (CEN).
- [18] Florea, M., Ning, Z., Brouwers, H. (2014) Activation of liberated concrete fines and their application in mortars. *Constr. Build. Mater.* 50, 1–12.
- [19] Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E. *et al.* (2005) The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cem. Concr. Res.* 35, 609–613.
- [20] 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.
- [21] NP EN 197-1 (2012). Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. Instituto Português da Qualidade (IPQ).