

Absorção e retração de argamassas com cimento reciclado termoativado

ANA CARRIÇO¹

JOSÉ A. BOGAS¹

SOFIA REAL¹

¹ CERIS - Instituto Superior Técnico | Lisboa | Portugal
Autor correspondente: ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave

Cimento reciclado termoativado, Absorção capilar, Retração, Argamassas recicladas

Resumo

O cimento reciclado (CR) é um novo ligante de baixo carbono obtido a partir da ativação térmica a baixas temperaturas de resíduos de materiais cimentícios hidratados. Este trabalho teve como foco a absorção e a retração de argamassas produzidas com CR proveniente de resíduos de pastas de cimento e betão de composição conhecida. Foram também analisadas diferentes percentagens de incorporação e a influência da finura e composição do material precursor. Adicionalmente, o efeito da combinação de cinzas volantes com CR em argamassas também foi analisado. Para tal, foram avaliadas as principais propriedades no estado fresco, a resistência à compressão, a absorção capilar e a retração por secagem. Devido à elevada exigência de água destes novos ligantes, foram produzidas argamassas de igual espalhamento e de igual a/c, para possibilitar a comparação em misturas de igual trabalhabilidade e de igual composição, respetivamente. Em argamassas de igual trabalhabilidade, os CR analisados neste estudo apresentaram uma exigência de água superior para atingir a fluidez pretendida, tendo-se verificado um crescimento linear com o aumento da percentagem de incorporação de CR. A mesma tendência foi observada em argamassas de igual a/c onde o espalhamento reduziu cerca de 100 mm nas argamassas com 50% CR face às argamassas de referência. A resistência à compressão de argamassas com 30% de CR de igual trabalhabilidade e igual a/c foi 70% e 90% da das argamassas de referência, respetivamente. Para 100% de CR verificou-se um decréscimo de 20% na resistência à compressão de argamassas de igual a/c. Para argamassas de igual composição, o coeficiente de absorção capilar das argamassas com 100% CR foi inferior ao das argamassas de referência. Para tal terá contribuído a natureza porosa das partículas de CR que, para um mesmo a/c, ao absorver parte da água de mistura permite que haja uma maior proximidade entre partículas adjacentes, contribuindo para a densificação da microestrutura. A retração por secagem das argamassas com CR foi superior à das argamassas de referência e principalmente influenciada pela menor dureza das partículas de CR e pelas ligações entre produtos de hidratação mais fracas do que as desenvolvidas numa matriz de cimento Portland Tipo I.

1| INTRODUÇÃO

Globalmente tem-se observado diversas iniciativas que visam a redução das emissões de CO₂ na indústria da construção e consequentemente na mitigação da pegada de carbono de uma das suas principais matérias primas: o cimento. Os cimentos alternativos de baixo carbono atuam na substituição total ou parcial do cimento ambicionando a redução do seu prejuízo ambiental sem redução significativa no desempenho [1]. Uma destas alternativas é o cimento reciclado termoativado (CR), obtido através de materiais cimentícios previamente hidratados reativados termicamente a baixas temperaturas [2]. O tratamento térmico é normalmente realizado a temperaturas entre os 600-700 °C, evitando assim parte substancial da descarbonatação que ocorre na produção de clínquer a partir de matérias primas tradicionais. Estudos preliminares têm-se focado na potencialidade desta técnica, sendo normalmente utilizado como material precursor pastas de cimento. Estas pastas de cimento termoativadas (CRP) desenvolvem capacidade ligante e propriedades hidráulicas quando em contacto com a água, reidratando e formando novos compostos que conferem resistência ao produto final.

A maior limitação que surge com a aplicação destes novos ligantes prende-se com a exigência de água, cerca de 2 vezes superior ao cimento Portland (OPC) para uma mesma consistência [3]. Tal deve-se principalmente às características físicas destes ligantes após o tratamento térmico conduzindo a partículas com elevada área superficial e porosidade que, juntamente com um maior teor de CaO livre, consomem parte da água de mistura.

A temperatura máxima do tratamento é um dos principais parâmetros operacionais que influenciam as características do CRP [4,5]. No entanto, as propriedades do material de origem também influenciam a recuperação de resistência alcançada em materiais cimentícios com CRP. Em pastas de cimento com CRP tratadas a 700 °C, provenientes de pastas de cimento de laboratório com baixa (0,30) e alta (0,50) relação água/cimento (*a/c*), Xuan e Shui [6] obtiveram uma resistência à compressão aos 28 dias 93% superior com a primeira, atribuindo esta diferença à maior quantidade de grãos de clínquer não reagidos em materiais de origem com baixa *a/c*. Por outro lado, Serpell e Lopez [7] ao aumentar a *a/c* de 0,35 para 0,50 e, portanto, o grau de hidratação do material de origem, verificaram um aumento na resistência média da pasta produzida devido a uma maior quantidade de fases desidratadas disponíveis para reidratação. No mesmo estudo, os autores também analisaram a influência da finura do CRP, medida pelo tempo de moagem, na resistência à compressão de argamassas com CRP. Verificou-se que o aumento do tempo de moagem de 10 para 30 min num moinho vibratório de 600 W não influenciou significativamente a resistência à compressão [7]. A influência das características dos materiais de origem em outras propriedades, como durabilidade e variação de volume dos materiais de construção com CR, ainda não foi estudada.

Este artigo apresenta um estudo abrangente sobre a influência das características do material de origem e da percentagem de incorporação de CR na absorção capilar e na retração por secagem de argamassas. Os diferentes tipos de CR abrangeram: material de origem com *a/c*=0,55 e *a/c*=0,35; diferentes finuras de CR ($d < 250 \mu\text{m}$ e $d < 125 \mu\text{m}$); e CR obtidos de resíduos de pasta de cimento (CRP) ou recuperados de resíduos de betão (CRB), de acordo com um novo método de separação de betão patenteado pelos autores [8]. As argamassas estudadas foram produzidas com consistência semelhante ou igual *a/l* para considerar as alterações composicionais causadas pela maior exigência de água do CR. Além disso, também foram produzidas argamassas com incorporação parcial de cinzas volantes (CZ) para explorar a cal livre disponível no CR [2].

2| CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1. Produção de cimentos reciclados

No presente estudo analisou-se o desempenho de argamassas com três ligantes reciclados provenientes de três tipos de resíduos cimentícios submetidos a ativação térmica. As principais propriedades de cada ligante apresentam-se na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos ligantes

Ligante	Massa volúmica (g/cm ³)	Superfície específica (BET) (cm ² /g)	Exigência de água (a/c)	Início/fim de presa (min)
			EN196-3[9]	EN196-3[9]
CEM I 42.5R (CEM I)	3.07 ^a	18134	0.31	170/280
CRP	3.01 ^b	156853	0.74	290/385
CRp	3.04 ^b	120574	0.64	570/635
CRB	2.96 ^b	78673	0.50	375/415

^a - LNEC E 64 / ^b - picnometria de hélio

O cimento reciclado de pasta (CRP) foi obtido a partir de pastas (CRPNT) com CEM I 42,5 R (CEM I) e um a/c de 0,55, que foram moídas ($d = 250 \mu\text{m}$) após três meses de cura a 95% de humidade relativa (HR). Esta pasta de origem apresentou um elevado grau de hidratação (78%), sendo representativa de uma pasta de cimento bem hidratada. O tratamento térmico foi realizado a uma taxa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, com temperatura de tratamento de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ por 3 horas. O arrefecimento ocorreu dentro do dispositivo de aquecimento, um forno horizontal rotativo. Para comparar a influência do grau de hidratação da pasta de origem, o CRp foi obtido a partir de uma pasta de cimento com um a/c de 0,35 (CRpNT) seguindo o mesmo procedimento do CRP. Aos 3 meses, CRpNT apresentava um grau de hidratação de 68%. O cimento reciclado proveniente de resíduos de betão (CRB) ($a/c = 0,55$; $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ de cimento) foi obtido através de um método de separação para betão desenvolvido pelos autores [10]. Resumidamente, o método compreende duas etapas principais, a cominuição do betão e separação magnética dos seus constituintes, que obtém uma fração cimentícia com 74% de pasta de cimento e 26% de agregados, em massa (valores após tratamento térmico). O diâmetro das partículas de CRB também foi inferior a $250 \mu\text{m}$. O CRPF foi uma variante do CRP, passado no peneiro de $125 \mu\text{m}$, ou seja, com um tamanho máximo de partícula inferior ao CRP ($d < 250 \mu\text{m}$), o que se traduziu num aumento de 10% na quantidade de partículas mais finas ($d < 125 \mu\text{m}$).

Para efeitos de comparação, foram produzidas argamassas de referência com CEM I. Adicionalmente foram utilizadas cinzas volantes (CV) do tipo F para avaliar uma possível sinergia com o CRP e ainda comparar a eficiência desta adição pozolânica com o CRP em argamassas de CEM I. As CZ apresentavam um massa volúmica de $2.17 \text{ g}/\text{cm}^3$ e um índice de atividade aos 28 dias de 85%. Quando necessário, um superplastificante de base policarboxílica (SP) também foi utilizado.

2.2. Composição das argamassas e ensaios

Na Tabela 2 encontram-se as composições das argamassas em estudo, bem como as suas propriedades no estado fresco (ρ_{fresca}), volume de vazios (V_{vazios}) e resistência à compressão aos 28 dias ($f_{\text{cm},28\text{d}}$). A designação de cada argamassa tem no prefixo a percentagem de incorporação do ligante seguido do tipo de ligante, e no sufixo a a/l da argamassa. Exeptom-se as argamassas compostas por apenas um ligante que possuem a sigla do mesmo e o sufixo com a a/l.

A maior exigência de água dos ligantes reciclados face ao CEM I, conduz a que seja necessário um a/c mais elevado nas respetivas argamassas para atingir um mesmo valor de espalhamento. Por esse motivo, as argamassas foram divididas em dois grupos, A1 e A2. Com o grupo A1 pretendeu-se comparar as argamassas para condições idênticas de consistência, definidas por um espalhamento comum de $140 \pm 5 \text{ mm}$. Numa primeira etapa, foram produzidas argamassas com os diferentes ligantes (CEM I, CRP, CRp, CRB, CRPF) de acordo com este critério. Posteriormente, dentro do mesmo grupo, foram produzidas argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP (5, 15, 30 e 50%) e argamassas com 15 e 30 % de CZ em argamassas com base de CEM I e CRP. Com o grupo A2, compararam-se argamassas com a mesma a/l. Neste caso, a argamassa com CRP foi produzida com 2% (peso de cimento) de SP, tendo sido possível obter uma mistura trabalhável com um a/l de 0.72. Para comparação, foi produzida uma argamassa com CEM I de igual a/l. Selecionou-se o ligante CRp para produzir uma argamassa de igual a/l à da argamassa de CRP do grupo A1. Numa fase posterior, para uma a/c de 0.60, foram produzidas argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP (15, 30 e 50%), uma argamassa de CEM I com 30% de CZ e uma argamassa ternária com 30% CZ, 30% CRP e 40% CEM I.

Todas as argamassas foram produzidas com um traço ponderal de 1:3 com 65% de areia fina e 35% de areia grossa. Para a sua produção utilizou-se uma misturadora planetária. Primeiro colocou-se a água e o ligante, sendo misturados no modo lento (140 ± 5 rpm) por 30 seg, posteriormente adicionou-se a areia grossa e a areia fina, misturando-se por mais 30 seg em modo rápido (285 ± 5 rpm). Deixou-se a mistura repousar por 1 minuto, após o qual se voltou a misturar, por mais 1 minuto, em modo rápido. Nas misturas com adição de CZ, estas foram adicionadas imediatamente após o ligante.

Tabela 2. Composição das argamassas estudadas, massa volúmica fresca, volume de vazios e resistência à compressão aos 20 dias.

Grupo	Designação	a/l	esp. (mm)	M _{OPC} (kg/m ³)	M _{CR} (kg/m ³)	M _{sand} (kg/m ³)	M _{FA} (kg/m ³)	ρ_{fresca} (kg/m ³)	V _{vazios} (%)	f _{cm,28d} (MPa)
A1	CEMI47	0.47	141	487	0	1462	0	2198	4.3	58.3
	CRP90	0.90	143	0	398	1194	0	2000	2.3	15.4
	CRp80	0.80	142	0	416	1248	0	1974	5.7	18.1
	CRPNT63	0.63	146	0	433	1300	0	2064	5.4	0.9
	CRPF92	0.92	144	0	395	1185	0	2009	1.5	17.8
	CRC73	0.73	140	0	428	1283	0	2070	2.7	12
	5CRP47	0.47	144	463	24	1462	0	2175	5.2	52.6
	15CRP55	0.55	140	398	70	1404	0	1997	10.9	38.9
	30CRP58	0.58	140	323	138	1382	0	2004	9.8	38.7
	50CRP64	0.64	141	224	224	1343	0	2145	1.8	36
	15FA85CEMI44	0.44	141	416	0	1469	73	2226	3.9	57.5
	30FA70CEMI42	0.42	142	343	0	1469	147	2225	4.5	50.5
	15FA85CRP85	0.85	141	0	343	1210	61	2049	1.1	13.4
	30FA70CRP75	0.75	144	0	292	1253	125	2009	5.3	14.2
A2	CRP+SP72	0.72	141	0	431	1292	0	2024	5.1	28.3
	CEMI72	0.72	-	432	0	1296	0	2152	-	36.9
	CRp90	0.90	164	0	399	1196	0	2015	1.6	13.7
	CEMI60	0.60	237	457	0	1370	0	2175	1.8	50.7
	15CRP60	0.60	217	388	68	1370	0	2171	1.9	47.1
	30CRP60	0.60	150	319	137	1369	0	2156	2.5	44.3
	50CRP60	0.60	131	228	228	1368	0	2150	2.5	39.7
	30FA70CEMI60	0.60	250	314	0	1344	134	2207	0.4	30.4
	30FA30CRP40CEMI60	0.60	158	179	134	1343	134	2136	3.3	25.8

O espalhamento e a massa volúmica fresca foram medidos de acordo com a EN 1015-3 [11] e a EN 1015-6 [12], respetivamente. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a EN 1015-11 [13] aos 3, 7, 28 e 90 dias nas metades de três provetes (40x40x160 mm) curados em câmara controlada com $95 \pm 5\%$ HR até à idade de ensaio. O ensaio de absorção capilar baseou-se na EN 1015-18 [14]. Os provetes para absorção capilar foram desmoldados após 24 horas e mantidos a $95\% \pm 5\%$ HR por 24 dias. A secagem até massa constante foi realizada em estufa ventilada a 60 ± 5 °C por 3 dias. Nas 24 horas antecedentes ao ensaio (aos 28 dias), todos os provetes foram mantidos em atmosfera de laboratório envoltos em película aderente. O ensaio foi realizado em provetes com as faces laterais cobertas com fita de alumínio colocados num tabuleiro com uma altura de água de 5 mm. A massa foi registada aos 10, 20, 30, 60 e 90 min e 3, 6, 24, 48 e 72 horas. O coeficiente de absorção (CAC) correspondeu à inclinação da recta no gráfico da absorção de água em função da raiz quadrada do tempo ($\text{kg} / (\text{m}^2 \text{min}^{0.5})$) entre os 10 min e os 90 min. O ensaio de retração baseou-se na EN 12617-4 [15]. A retração das argamassas foi medida em três provetes de 40x40x160 mm. Os pinos de medição foram colocados nas extremidades opostas do molde antes do seu enchimento. Após 24

horas, os provetes foram desmoldados e colocados em câmara controlada a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ HR. A medição da variação da extensão foi efetuada até 90 dias após a moldagem.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Espalhamento

Os resultados de ambos os grupos confirmaram a elevada necessidade de água das argamassas com CR. Nas argamassas A1, com espalhamento semelhante, enquanto as argamassas com CEM I atingiram o espalhamento pretendido com uma a/l de 0,47, as argamassas com 100% CRP requereram uma a/l de 0,90, quase o dobro da exigência de água. Como esperado, a a/l necessário para produzir uma mistura fluida aumentou com a percentagem de incorporação de CRP. No entanto, para baixas incorporações de CRP, até 30%, o aumento de água foi inferior a 25%. Inclusive, para 5% de substituição de CEM I com CRP, a fluidez não foi afetada.

Em argamassas produzidas com CR proveniente de uma pasta de cimento com baixo a/c (0,35), CRp, foi necessário menos água (0,80) do que para argamassas com CRP (0,90). Isto pode ser explicado pela menor porosidade das partículas de CRp, que refletiu a maior compactidade da pasta de origem. Consequentemente, estas partículas absorveram menos água que ficou disponível para contribuir para a fluidez da mistura. No entanto, a necessidade de água foi ainda assim cerca de 1.7 vezes superior à das argamassas com CEM I.

As argamassas com CRB também requereram 19% menos água do que as argamassas com CRP. Neste caso, os dois materiais de origem tiveram o mesmo a/c (0,55), mas o primeiro foi obtido da matriz cimentícia de um betão submetido a um processo de separação. Deste modo, o CRB tinha 26% de agregado fino na sua composição que não absorveu água de mistura e que pode até ter contribuído para melhorar a fluidez ao contribuir através da lubrificação das partículas de cimento reciclado.

No ligante reciclado onde o tamanho máximo de partícula diminuiu para $125\text{ }\mu\text{m}$ (CRPF), houve um ligeiro aumento da exigência de água (0,92) em comparação com as argamassas de CRP (0,90), que tinham um tamanho máximo de partícula de $250\text{ }\mu\text{m}$. Embora o aumento de água tenha sido reduzido, à menor dimensão das partículas correspondeu uma área de superfície maior, o que exigiu mais água para atingir o espalhamento pré-estabelecido.

A incorporação de SP nas argamassas com CRP (CRP+SP72) reduziu a necessidade de água em 20% em relação às argamassas CRP sem este adjuvante. De forma análoga, as CZ foram combinadas com CRP para explorar as melhorias de fluidez referidas na literatura [16,17]. Em ambas as composições, CEM I e CRP, esta adição permitiu a redução da a/l devido à sua forma e superfície lisa, atuando como microesferas que ajudam na lubrificação dos constituintes da pasta. Neste caso, as CZ foram ligeiramente mais eficazes em argamassas de CRP do que em argamassas de CEM I, o que também resultou da redução do número de partículas porosas de CRP no sistema. Para 30% de substituição de CRP por CZ (30CZ70CRP75), a capacidade de redução de água (17%) foi equivalente à utilização de SP (20%).

A massa volúmica fresca das argamassas foi essencialmente controlada pela densidade aparente dos seus constituintes, a relação água/sólidos e o volume vazios. Como esperado, as argamassas de CEM I apresentaram uma massa volúmica fresca superior à das argamassas com CRP, principalmente devido à maior exigência de água do CRP. Outro fator que pode ter contribuído para uma maior densidade aparente foi o maior nível de compactação alcançado nas argamassas de CEM I (menor volume de vazios) durante a produção (Tabela 2). As argamassas com CRP tendem a perder fluidez mais rapidamente após a mistura, introduzindo mais ar quando compactadas, reduzindo assim a densidade aparente.

3.2. Resistência à compressão

Na Tabela 2 apresentam-se as resistências à compressão aos 28 dias ($f_{cm,28d}$) das argamassas estudadas. No geral, a recuperação média da resistência à compressão dos ligantes reciclados foi de 25% nas argamassas com espalhamento semelhante (A1) e 75% nas argamassas com a mesma a/l (A2). No grupo A1, as argamassas com CRP atingiram uma resistência média à compressão de 15 MPa aos 28 dias. O facto da a/l destas argamassas ser praticamente o dobro das argamassas de referência, levou a uma redução da resistência de 74%. Apesar da menor a/l na argamassa CRB (0,73) em comparação com a de CRP (0,90), a resistência à compressão ainda assim foi 79% inferior à das argamassas de referência com CEM I aos 28 dias. No entanto, o CRB contém cerca de 26% em peso de agregado, tendo uma a/l equivalente de 0,96, que é, de facto, maior que a a/l do CRP. A incorporação de SP nas argamassas de CRP conduziu a uma resistência à compressão de 28 MPa aos 28 dias, quase 49% das argamassas de referência com fluidez semelhante (CEMI47) e 77% das argamassas de referência com igual a/l (CEMI72). As argamassas com CRp apresentaram uma resistência à compressão aos 28 dias ligeiramente superior às argamassas de CRP, cerca de 18%. Isto poderá ter sido causado por partículas residuais de cimento que não reagiram no material de origem. No entanto, dado que a a/l destas argamassas foi 11% inferior ao das argamassas com CRP, e que em argamassas com a mesma a/l (A2) a resistência à compressão foi menor nas argamassas com CRp (Tabela 2), a a/l de produção parece ser mais relevante do que potenciais grãos de cimento por reagir. Para as argamassas com CRPF, apesar do aumento da a/l, a resistência à compressão aos 28 dias foi 16% superior ao das argamassas com CRP (Tabela 2), sugerindo que a redução do tamanho máximo das partículas do RC tem um efeito positivo na resistência à compressão.

Nas argamassas A1, para 15, 30 e 50% de incorporação de CRP o desempenho na resistência à compressão foi semelhante. Apesar da sua elevada a/l (0,63), as argamassas com 50% CRP atingiram uma resistência à compressão de 36 MPa aos 28 dias, o que poderá potencialmente cumprir os requisitos de um ligante com classe de resistência 32,5 (EN 197-1 [18]). Para as argamassas A2, a resistência à compressão das argamassas com CRP foi muito mais próxima das argamassas CEM I; inclusive, para uma percentagem de substituição de até 15%, ambos os ligantes exibiram desempenho semelhante.

Comparando o desempenho do CRP e das CZ em argamassas de CEM I, para a mesma a/l e uma percentagem de incorporação de 30%, o CRP foi mais eficaz. Além disso, aos 28 dias as argamassas de CEM I com 30% de substituição de CRP obtiveram a uma resistência à compressão 46% maior do que com 30% de CZ, tornando o CRP um material de substituição mais ativo do que as CZ, especialmente em idades precoces.

3.3. Absorção capilar

Na Figura 1 apresenta-se a absorção de água ao longo do tempo das argamassas produzidas com os ligantes analisados neste estudo. O CAC das respetivas misturas é apresentado na Figura 2.

Para igual espalhamento, a argamassa com CRP conduziu a uma absorção total cerca de 8 vezes superior à da argamassa de referência (Figura 1). Sendo a absorção capilar uma propriedade fortemente influenciada pela a/l da mistura, é natural que a argamassa com CRP, com uma a/l duas vezes superior ao da argamassa de referência, apresentasse uma absorção e coeficiente de absorção bastante superiores. De facto, quando a a/l foi igual nestas misturas (CRP+SP72 e CEMI72), tanto a absorção total como o coeficiente de absorção foram inferiores na argamassa com CRP. Para tal terá contribuído a natureza porosa das partículas de CRP, que ao absorver parte da água de mistura, possibilitou a aproximação das partículas de CRP, reduzindo a porosidade capilar para uma mesma a/l [19]. Na resistência à compressão não foi possível observar esta tendência na argamassa com CRP porque, apesar da porosidade interpartícula ser menor, a porosidade global mantém-se inalterada como observado por Bogas et al. [19]. De facto, a resistência à compressão é mais afetada pelo volume total de poros e pela força da ligação entre produtos de hidratação.

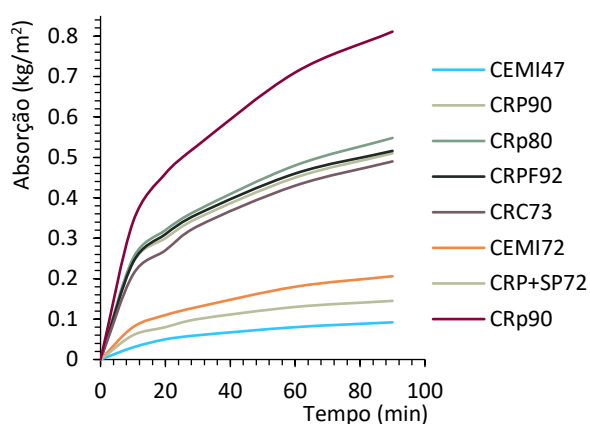


Figura 1. Absorção de água em função do tempo para argamassas produzidas com os diferentes ligantes.

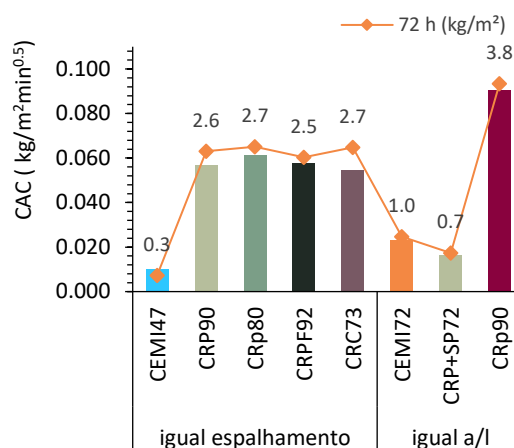


Figura 2. CAC para argamassas produzidas com os diferentes ligantes.

Relativamente à argamassa com CRp, para igual trabalhabilidade, apesar da a/l ser ligeiramente inferior ao da argamassa com CRP, a absorção total e o respetivo coeficiente foram semelhantes. Considerando o anteriormente exposto, a argamassa com CRp deverá ter desenvolvido uma microestrutura menos refinada que a argamassa com CRP. Tal deve-se ao facto de a porosidade das partículas de CRp ser inferior à das partículas de CRP, consequência da maior compacidade do seu material de origem. Assim, para uma mesma a/l, menos água será absorvida pelas partículas de CRp, conduzindo a uma a/l interpartícula superior. De facto, nas misturas com igual a/l (CRP90 e CRp90), tanto a absorção total como o CAC foram ligeiramente superiores com CRp. Na argamassa com CR proveniente da fração cimentícia de betão, CRB, tanto a absorção total como o CAC foram semelhantes aos da argamassa com CRP. Apesar da a/l de CRB73 ter sido inferior à da mistura CRP90, a sua a/l efetiva foi superior, cerca de 0.96, devido à percentagem de agregado neste ligante (24%). Ao contrário da resistência à compressão, na absorção capilar a utilização de uma granulometria mais fina, CRPF, não revelou melhorias significativas.

Na Figura 3 apresentam-se os CAC das argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP para igual espalhamento e igual a/l. Na Figura 4, apresentam-se os CAC das misturas com CZ para igual espalhamento e igual a/l.

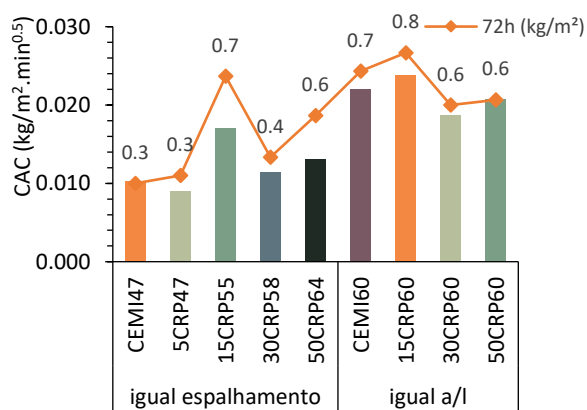


Figura 3. CAC de argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP para igual espalhamento e igual a/l.

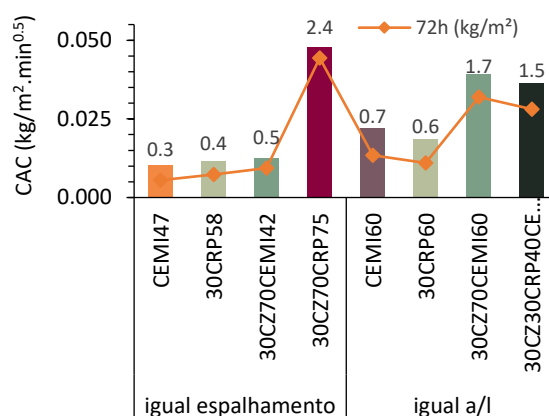


Figura 4. CAC de argamassas com diferentes percentagens de incorporação de CRP e CZ para igual espalhamento e igual a/l.

No geral, a absorção de água e o CAC aumentaram com o aumento da percentagem de substituição de CRP (Figura 3). Em argamassas com fluidez semelhante, para incorporações de 30 e 50%, o CAC acompanhou o aumento da a/l. No entanto, esse aumento foi menor do que seria esperado com base no aumento da a/l (de 0,58 para 0,64). Mais uma vez, a a/l interpartícula da mistura foi influenciada pela absorção das partículas de CRP, o que reduziu o efeito de incrementar a a/l. Isto explica o CAC na argamassa com 5% CRP, que tendo a mesma a/l (0,47) das argamassas CEMI47, apresentou um CAC ligeiramente inferior. O grupo A2, com uma a/l de 0,60 confirma esta tendência (Figura 3). Com o aumento da incorporação de CRP, o CAC foi inferior ao das argamassas CEM I de igual a/l, confirmando que a absorção capilar foi essencialmente governada pela a/l interpartícula.

No grupo A1, a substituição de 30% de CEM I por CZ conduziu a um ligeiro aumento do CAC (Figura 4). Mesmo com a ligeira redução de a/l causada pela substituição com CZ, isso não compensou a reação inicial mais lenta das CZ. Nas argamassas CRP, a substituição com 30% CZ foi mais eficaz, conduzindo a um CAC mais próximo do da argamassa com apenas CRP de espalhamento semelhante (Figura 4). Nas argamassas A2, a incorporação de CZ provocou um aumento significativo do CAC das argamassas CEM I. Comparando os dois materiais de substituição, para uma percentagem de substituição de 30%, o CRP mostrou-se mais ativo e eficaz, proporcionando um CAC três vezes menor que as CZ. A argamassa ternária (30CZ30CRP40CEMI60) obteve um CAC inferior ao da argamassa de CEM I com uma substituição com 30% de CZ, confirmando assim o bom desempenho do CRP nesta propriedade de transporte.

3.4. Retração

Na Figura 5 e 6 apresentam-se os valores da retração para argamassas produzidas com os diferentes ligantes para igual espalhamento e igual a/l, respectivamente.

As argamassas com CEM I (CEMI47) apresentaram a menor retração, principalmente devido à reduzida a/l (Figura 5). Conforme esperado, a argamassa com CRB apresentou menor retração que a argamassa com CRP. A presença de agregado neste ligante conduziu, simultaneamente, a um menor volume de pasta e a ao aumento da rigidez da matriz cimentícia.

A adição de SP (CRP + SP) conduziu a uma redução da retração aos 90 dias de 32% em relação às argamassas sem este adjuvante (CRP90). Apesar da redução da a/l (de 0,90 para 0,72), a retração foi, ainda assim, 54% superior à das argamassas com CEM I e igual a/l (CEMI72) (Figura 6). Este comportamento confirma que a retração nas argamassas CRP foi afetada pela maior exigência de água deste ligante e pela maior porosidade e menor dureza das suas partículas. Consequentemente, no grupo A1, as argamassas CRp obtiveram uma retração aos 90 dias 30% menor que as argamassas com CRP (Figura 5). Neste caso, além da menor a/l das argamassas com CRp (0,80 para 0,90 das argamassas com CRP), as partículas de CRP35 são também mais rígidas, consequência da menor a/c da sua pasta de origem. No grupo A2, para a mesma a/l, a retração de CRp90 foi, ainda assim, 24% menor do que CRP90, o que sustenta que a rigidez das partículas foi mais relevante para a retração por secagem do que a a/l (Figura 6).

As argamassas com cimento reciclado de menor granulometria máxima (CRPF) conduziram a um ligeiro aumento (7,5%) da retração por secagem aos 90 dias (Figura 5). Dado que a a/l foi semelhante (0,92 para CRPF e 0,90 para CRP), a maior retração das argamassas de CRPF pode se ter devido à maior reatividade das suas partículas e maior refinamento dos poros, aumentando as forças capilares causando retração.

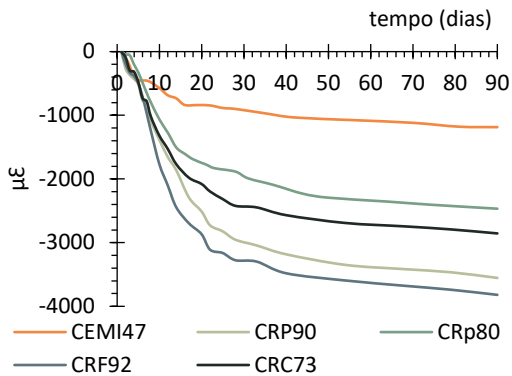


Figura 5. Retracção por secagem para as argamassas com diferentes ligantes do grupo A1.

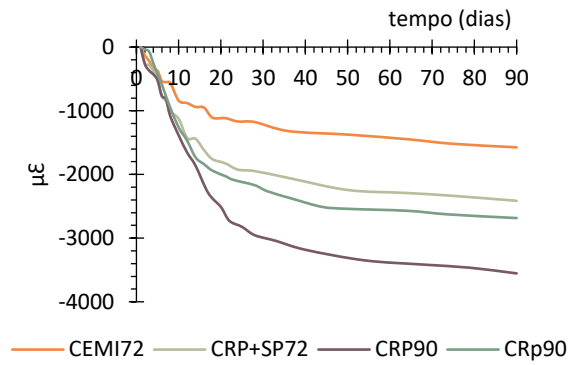


Figura 6. Retracção por secagem para as argamassas com diferentes ligantes do grupo A2.

Como esperado, a retracção por secagem aumentou com o aumento da taxa de substituição de CEM I por CRP (Figuras 7 e 8). Para argamassas com igual fluidez, o aumento só foi significativo para taxas de substituição com CRP acima de 15%, em linha com o aumento da a/l (Figura 7). Destaca-se o facto de que durante os primeiros 3 dias a retracção foi menor nas argamassas com até 50% de CRP. Isto pode estar relacionado com o desenvolvimento mais rápido da resistência à compressão em argamassas com CRP (3.2). No entanto, para igual a/l , a diferença de retracção entre argamassas de até 50% CRP foi menos significativa (Figura 8). Neste caso, a retracção aos 90 dias da argamassa com 50% CRP foi apenas 17% superior à das argamassas com CEM I (CEMI60). Por um lado, para a mesma a/l , ao aumentar a quantidade de CRP, mais água foi retida na porosidade interna das partículas, diminuindo a a/l interpartícula, o que por sua vez reduziu a retracção inicial causada pela evaporação da água. Isso ajuda a explicar a menor retracção de secagem das argamassas CRP durante os primeiros 3 dias e também a menor retracção de 90 dias das argamassas com 5% de CRP (5CRP47) em comparação com a argamassa de referência com CEM I de igual a/l (CEMI47). Por outro lado, com base em MIP e análise de adsorção de nitrogénio, Bogas et al. [19] verificaram que o volume de pequenos poros, abaixo de 40-50 nm, que desempenham o papel mais importante na retracção por secagem, foi maior em pastas de CRP do que de CEM I de igual a/l e porosidade total semelhante. Portanto, apesar da menor a/l interpartícula, a retracção tendeu a ser ligeiramente superior nas pastas de CRP do que nas pastas CEM I, devido à porosidade mais refinada e menor rigidez das partículas de CRP.

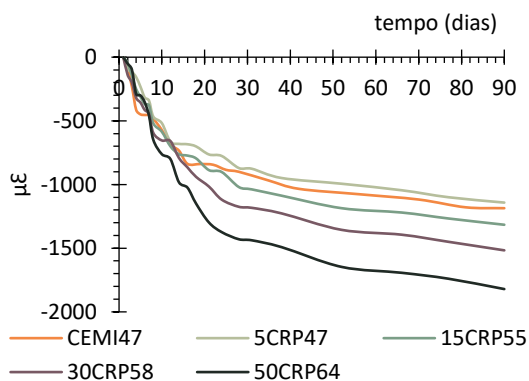


Figura 7. Retracção por secagem para diferentes percentagens de incorporação de CRP de argamassas do grupo A1.

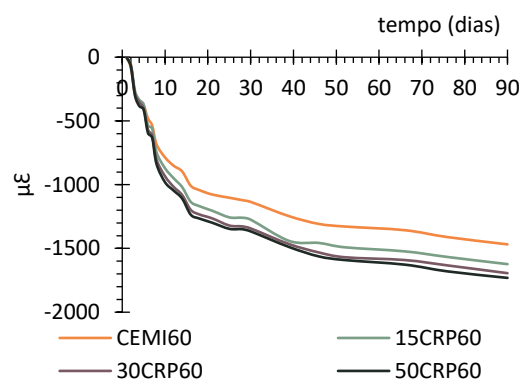


Figura 8. Retracção por secagem para diferentes percentagens de incorporação de CRP de argamassas do grupo A2.

A incorporação de CZ reduziu a retração por secagem das argamassas CEM I e CRP, em parte devido à redução da a/l e da quantidade de água evaporável (Figura 7 e Figura 8). Além disso, as CZ atuaram essencialmente como um microagregado restringindo a retração, particularmente em idades precoces, quando a sua actividade era ainda baixa. Ou seja, as argamassas comportaram-se como se apresentassem um menor volume de pasta, o que levou a uma menor retração. De acordo com as outras propriedades estudadas, a substituição com CZ foi mais efetiva nas argamassas CRP do que nas argamassas CEM I, proporcionando reduções de retração por secagem entre 10% e 25%, para argamassas com 15 e 30% de CZ, respectivamente (Figure 8).

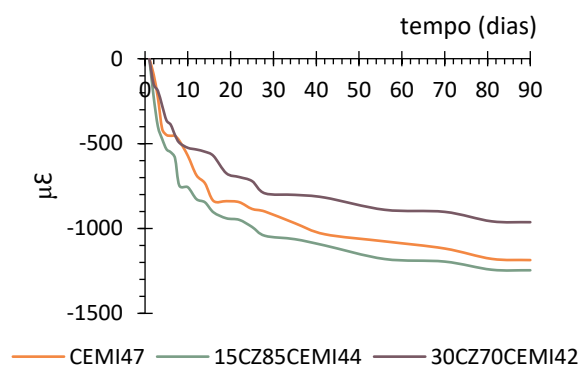


Figura 7. Retração por secagem para diferentes percentagens de incorporação de CZ em argamassas de CEM I de argamassas do grupo A1.

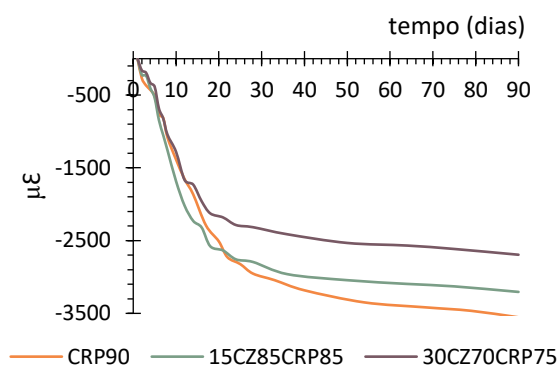


Figura 8. Retração por secagem para diferentes percentagens de incorporação de CZ em argamassas de CRP argamassas do grupo A1.

4 | CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a absorção capilar e retração por secagem de argamassas com CR recuperado de resíduos de cimento de diferentes origens, analisando também a interação do CR com cimento Portland e CZ. As argamassas foram analisadas considerando uma mesma consistência plástica ou igual a/l . As argamassas com cimento reciclado caracterizaram-se por uma necessidade de água até quase o dobro das argamassas com CEM I, para um determinado espalhamento. Esta grande desvantagem na produção de CR é atribuída à sua maior área superficial e porosidade das partículas. No entanto, para taxas de substituição de até 30% com CRP, o aumento da exigência de água foi inferior a 25%. Além disso, a adição de SP ou a incorporação de 30% de CZ permitiu reduzir a necessidade de água em 20% e 17%, respectivamente. A resistência à compressão diminuiu com o aumento do teor de CRP. Para 100% CRP a resistência à compressão foi cerca de 26% ou 75% das argamassas CEM I de fluidez semelhante ou igual a/l , respectivamente. A adição de SP permitiu a produção de argamassas com CR com 28 MPa aos 28 dias para uma a/l de 0,72, o que é pelo menos comparável ao desempenho obtido pelo cimento Portland de classe de resistência 32,5. Para a mesma a/l , a resistência à compressão foi pouco afetada pela incorporação de até 15% de CRP e diminuiu menos de 22% para até 50% de CRP. Além disso, o desenvolvimento precoce de resistência do CRP foi semelhante ao do CEM I, até aos 3 dias. A absorção capilar pode ser significativamente aumentada com a substituição de CEM I por CRP, devido ao aumento da a/l . No entanto, para a mesma a/l , as argamassas com CR apresentaram absorção inferior às argamassas de referência com CEM I, devido ao desenvolvimento de uma microestrutura interpartícula mais densa. Isto corrobora a redução observada da absorção capilar com o aumento da substituição de CEM I por CRP, para a mesma a/l . Conclui-se que a absorção capilar foi governada pela a/l interpartícula. A retração aumentou significativamente com a a/l , que foi maior nas argamassas com CR. No entanto, mesmo para igual a/l , a retração aos 90 dias foi mais de 50% superior na argamassa com CRP do que na argamassa com CEM I. A maior porosidade e menor rigidez das partículas de CRP, bem como a porosidade interpartícula mais refinada das argamassas de CRP, induzindo maiores forças capilares, também podem ter

contribuído para o aumento da retração. No entanto, para substituição de até 50% com CRP, o aumento da retração aos 90 dias foi inferior a 17%. Os CR obtidos de resíduos de pastas de cimento de menor a/l (0,35), com menor porosidade e grau de hidratação, apresentaram menor exigência de água. Apesar da influência da a/l, a reatividade, o desenvolvimento de resistência e a absorção capilar não foram significativamente afetadas pela a/c da pasta de cimento de origem. A retração reduziu em 24% devido à maior rigidez das partículas CRp. A redução do tamanho máximo de partícula do CR (CRPF) aumentou ligeiramente a exigência de água. Apesar do ligeiro aumento da a/l, o aumento da finura do CRP influenciou positivamente a capacidade de reidratação, resistência à compressão e redução da absorção capilar. A retração aumentou devido à maior reatividade do CRPF. A contaminação com agregados no CR recuperado de resíduos de betão (CRB) diminuiu a necessidade de água, reduzindo a quantidade de partículas porosas, reduziu a resistência à compressão em 22% e aumentou apenas ligeiramente (5%) o coeficiente de absorção. Além disso, a retração foi reduzida devido ao menor volume de pasta nestas argamassas. Pode-se concluir que o novo método de separação dos constituintes do betão considerado neste estudo foi eficaz na produção de CR com elevada capacidade de reidratação. Em geral, a substituição parcial do ligante por até 30% de CZ foi mais efetiva nas argamassas com CRP do que nas argamassas com CEM I. No entanto, para a resistência à compressão não foi confirmada uma reatividade mais rápida das CZ nas argamassas com CRP do que nas argamassas com CEM I. As CZ contribuíram essencialmente na melhoria da fluidez e na redução da a/l. Além disso, para 30% de substituição, o CRP mostrou-se uma adição muito mais eficaz nas argamassas com CEM I do que as CZ. Isto foi válido para as propriedades e período analisado neste estudo. Comparado às CZ, o CRP também teve a vantagem de contribuir para o aprimoramento das propriedades testadas desde as idades mais jovens. No geral, é demonstrado o alto potencial do cimento reciclado como substituto cimentício de até 50% de cimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento desta investigação no âmbito do projeto PTDC/ECI-COM-28308/2017 e da unidade projeto UIDB/ECI/04625/2020 (CERIS) bem como à SECIL pelo fornecimento dos materiais para a campanha experimental. A primeira autora agradece ainda à FCT o apoio financeiro através da bolsa SFRH/BD/146033/2019. Os autores agradecem ainda a colaboração do professor Manuel Francisco Costa Pereira (IST) e do Eng. José Bandeira na realização do trabalho experimental.



Referências

- [1] Gartner E., 2004 “Industrially interesting approaches to ‘low-CO₂’ cements.” *Cem Concr Res* 34: 1489–1498.
- [2] Carricho A.; Bogas J.; Guedes M., 2020. “Thermoactivated cementitious materials - a review.” *Constr Build Mater* 250: 118873.
- [3] Carricho A.; Real S.; Bogas J.; Pereira M., 2020. “Mortars with thermo activated recycled cement: fresh and mechanical characterisation.” *Constr Build Mater*, 256: 119502.
- [4] Shui Z.; Xuan D.; Chen W.; Yu R.; Zhang R., 2009. “Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures.” *Constr Build Mater* 23: 531–537.
- [5] Real S.; Carricho A.; Bogas J.; Guedes M., 2020. “Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement.” *Materials (Basel)* 13: 3937.

- [6] Xuan D.; Shui Z., 2010. "Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature." *Fire Mater* 35: 481–490.
- [7] Serpell R.; Lopez M., 2013. "Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes." *Cem Concr Compos* 39: 104–114.
- [8] Bogas J.; Pereira M.; Guedes M.; Carriço A.; Hu S.; Sousa R., 2020 "Separation process of waste hardened concrete for obtaining recycled cement from waste concrete."
- [9] CEN. EN 196-3 Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN), 2016.
- [10] Carriço A.; Bogas J.; Hu S.; Real S.; Pereira M., 2021. "Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete." *J Clean Prod* 309: 127375
- [11] CEN. EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). 1999.
- [12] CEN. EN 1015-6: Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar. 1998.
- [13] CEN. EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. 2019.
- [14] CEN. EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. 2002.
- [15] CEN. EN 12617-4: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Part 4: Determination of shrinkage and expansion. 2002.
- [16] Serpell R.; Lopez M., 2015. "Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials." *Cem Concr Compos* 64: 16–26.
- [17] Yu R.; Shui Z., 2014 "Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials." *J Clean Prod* 78: 202–207.
- [18] CEN. EN 197-1: Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. 2011 56.
- [19] Bogas J.; Carriço A.; Tenza-Abril A. 2020 "Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes." *Cem Concr Res* 138: 106226