

Caracterização mecânica de argamassas produzidas com cimento reciclado de baixo carbono termicamente reativado



Alexandre Bogas¹



Ana Carriço²



Manuel Pereira³

RESUMO

O presente trabalho procurou caracterizar o comportamento de argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição de cimento Portland normal (CPN) por cimento reciclado proveniente de betão e pasta produzidos em laboratório, que foram sujeitos a um processo de moagem e subsequente queima a elevadas temperaturas. As temperaturas de calcinação foram definidas com base em análises termogravimétricas e de difração de raios X. As argamassas foram caracterizadas em termos das suas principais propriedades no estado fresco e endurecido (resistência à compressão e à flexão, velocidade de ultra-sons e módulo de elasticidade dinâmico). A influência da taxa de substituição por cimento Portland normal, CPN, por CR (20%, 50%, 75% e 100%), a temperatura do tratamento e a finura das partículas de CR, foram analisadas. Em todas as propriedades testadas, o CR dos resíduos de betão mostrou uma eficiência significativamente inferior à dos resíduos de pasta de cimento. A capacidade de reidratação do CR foi melhorada aumentando a sua finura e temperatura de pré-aquecimento. Argamassas produzidas com 100% de CR pré-aquecido a 650°C atingiram 8,3 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, correspondendo a cerca de 20% do obtido para argamassas de referência sem CR. Além disso, as propriedades mecânicas foram pouco afetadas por taxas de substituição com CR até 20%. Este estudo mostra a capacidade de reidratação eficiente do CR ativado termicamente e evidencia o seu elevado potencial para a indústria da construção.

Palavras-chave: cimento reciclado; betão reciclado; reidratação do cimento; argamassas com cimento reciclado; caracterização mecânica.

1. INTRODUÇÃO

Devido à sua versatilidade, baixo custo e propriedades mecânicas, o betão ainda é o material mais utilizado no mundo e o segundo material mais consumido no planeta, depois da água [1]. A tendência futura é aumentar ainda mais este consumo, prevendo-se que em 2050 se atinjam quatro vezes os valores

¹Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil, Lisboa, Portugal. abogas@tecnico.ulisboa.pt

²Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil, Lisboa, Portugal. ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt

³Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil, Lisboa, Portugal. mfc@tecnico.ulisboa.pt

de 1990 [2]. Deste modo, a produção de betão torna-se uma fonte de preocupações ambientais, pois envolve a extensa extração de matérias-primas, o esgotamento de recursos não renováveis, a emissão excessiva de gases de efeito estufa e a grande produção de resíduos de construção e demolição [3]. Indicativamente, mais de 750-800 kg de CO₂ são libertados por tonelada de cimento [4,5]. Cerca de 85% dessas emissões são devidas ao processo de sinterização, em que cerca de 60% é atribuído à descarbonatação do calcário [6,7]. Portanto, é mundialmente reconhecido que a produção de cimento no futuro próximo tem uma pegada de carbono a combinar.

Recentemente, uma abordagem ambiciosa que lida diretamente com a redução da maior quantidade de emissões de CO₂ na produção de cimento, envolve a reutilização de resíduos de cimento desidratado como ligante reciclado. O potencial de reidratação de cimento endurecido, previamente submetido a elevadas temperaturas, tem sido sugerido já há muito tempo com base na recuperação parcial da resistência de estruturas de betão curadas após a ação do fogo. Foi demonstrado que após a desidratação do betão a altas temperaturas e o subsequente arrefecimento, a matriz de cimento é capaz de recuperar parte da sua resistência inicial ao longo do tempo [8]. Ademais, Chromá et al. [8] identificou a presença de etringite e portlandite em amostras arrefecidas, produtos que tinham sido previamente eliminados no tratamento térmico. Esta ideia tem sido explorada por alguns autores para recuperar a hidraulicidade de resíduos de cimento antigo.

Shui et al. [9] analisaram as características de pastas de cimento desidratadas com 30 dias de idade pré-aquecidas a diferentes temperaturas entre 300°C e 900 °C. As pastas de cimento desidratadas mostraram alta exigência de água e um período de cura reduzido em comparação com o cimento Portland comum (CPN). A maior resistência mecânica foi atingida para a temperatura de desidratação de 800 °C. A partir da análise SEM os autores concluíram que a microestrutura das pastas produzidas com CR se torna mais densa à medida que a temperatura de pré-tratamento aumenta. Xinwei et al. [10] verificaram que pastas com 60% de cimento reciclado proveniente da fração de argamassa de betão tratado termicamente a 750 °C, atingiram 60% da resistência à compressão aos 28 dias das pastas de referência com apenas CPN. Os autores concluíram ser necessário um melhor entendimento dos fatores envolvidos e do processos físicos e químicos que os afetam. Yu e Shui [11] estudaram a influência da aglomeração de CR, obtido a partir de pasta de cimento endurecida e tratada a 650 °C, no desenvolvimento da microestrutura de pastas de cimento produzidas com apenas 5-15% de CR. Os autores verificaram que a incorporação de 5-10% de CR, com tamanho de grão na ordem de 1-10 µm, pode aumentar a resistência à compressão das pastas de cimento quando comparadas às pastas de referência com 100% CPN. Letelier et al. [12] analisaram a resistência à compressão e à flexão de betões produzidos simultaneamente com agregados reciclados e baixa incorporação de CR (5-15%) desidratado a 400-900°C. O cimento reciclado foi produzido a partir da argamassa separada dos agregados reciclados obtidos da laje de um edifício residencial demolido. Misturas de referência com CR e sem agregados reciclados não foram testadas. A resistência à compressão foi pouco afetada pela quantidade de CR e temperatura de desidratação. A incorporação de 20% de agregado reciclado e 5% de cimento desidratado a 900°C, conduziu a uma redução de cerca de 10% nas propriedades mecânicas. Os autores concluíram que maiores quantidades de CR com temperaturas de pré-tratamento mais baixas deveriam ser tentadas.

Neste contexto, este artigo foca-se na caracterização de argamassas produzidas com incorporação parcial a total de cimento reciclado de baixo carbono obtido a partir de materiais à base de cimento endurecido bem hidratado e ativado termicamente. A influência da percentagem de substituição (25%, 50%, 75% e 100%), temperatura de pré-aquecimento (20, 350 e 650°C) e finura do grão de cimento reciclado é analisada para o CR produzido a partir de pasta de cimento e betão produzidos em laboratório. As argamassas foram caracterizadas em termos de suas principais propriedades no estado fresco e mecânicas (resistência à compressão e à flexão, velocidade de ultrassons e módulo de elasticidade dinâmico). As temperaturas de pré-aquecimento do CR foram definidas com base em análises termogravimétricas (TGA) e difração de raios X (DRX), evitando a descarbonatação excessiva do material de origem. Espera-se, portanto, que este estudo contribua para a obtenção de materiais cimentícios de nova geração que respeitem o meio ambiente, levando a indústria a procurar práticas de construção mais sustentáveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O cimento reciclado (CR) foi obtido a partir da moagem e aquecimento de betão e pasta de cimento produzidos em laboratório. Em seguida, as argamassas foram produzidas e caracterizadas para diferentes taxas de substituição de cimento Portland normal, CPN, com o cimento reciclado resultante.

2.1 Pasta de origem (PO) e betão de origem (BO)

O betão de origem (BO) foi produzido com uma resistência média à compressão de 54 MPa aos 28 dias, o que corresponde a uma classe de resistência C40/50. A composição da pasta de origem (PO) foi de 400 kg/m³ de cimento (CEM I 42,5 R), relação a/c de 0.45 e 0,2% de um superplastificante de base policarboxílica (SP).

2.2 Britagem e moagem dos provetes de pasta e betão

Após o período de cura, os materiais de origem foram reduzidos a partículas finas em 3 etapas principais. Na primeira etapa foi utilizada uma britadeira de mandíbulas, o que reduziu as partículas a um tamanho médio de 40 a 50 mm. Numa segunda etapa, recorreu-se a uma britadeira de rolos lisos e o material moído apresentava uma dimensão máxima de 30 mm. Seguidamente, numa terceira etapa, foi utilizado um moinho de bolas onde ambos os materiais de origem foram transformados em pó, peneirados e a sua granulometria analisada. Nos materiais de origem tratados a 650°C foi realizada uma moagem complementar com um moinho de esferas para avaliar a influência da finura do cimento reciclado na reatividade de argamassas de BO e PO. O Quadro 1 mostra a distribuição do tamanho das partículas resultantes da terceira e quarta etapas de moagem.

Quadro 1. Percentagem de material retido em cada peneiro para CRB (cimento reciclado obtido de betão), CRP (cimento reciclado obtido de pasta), CRBF (cimento reciclado obtido de betão com etapa de moagem extra) e CRPF (cimento reciclado obtido de pasta com etapa extra de moagem).

Cimento	Etapa de moagem	1mm	250 μ m	125 μ m	63 μ m	<63 μ m
CRB (%)	3 ^a	7,3	46,5	37,3	8,4	0,5
CRP (%)		2,2	42,8	42,8	9,3	2,9
CRBF (%)	4 ^a	-	1,1	3,4	49,8	45,8
CRPF (%)		-	14,2	23,3	18,8	43,7

2.3 Determinação das temperaturas de aquecimento

Após a terceira etapa de moagem, as amostras foram analisadas quanto à sua composição química, através de análises termogravimétricas (TGA) e difração de raios X (DRX). Esta análise foi utilizada para determinar as temperaturas de calcinação dos materiais triturados e para estabelecer as temperaturas de pré-aquecimento (TPA) que permitissem a produção de um ligante sustentável com um bom compromisso entre a capacidade de reidratação e a libertação de CO₂.

Na análise termogravimétrica foram identificados 3 picos principais na DTG. O primeiro pico, abaixo de 200 °C (113°C para BO e 144°C PO) é essencialmente devido à perda de água livre, decomposição de gesso e etringite, e perda da água adsorvida dos produtos de hidratação (C-S-H). Um segundo pico no intervalo de 470 e 550°C (498°C para BO e 539°C para PO) é principalmente atribuído à desidratação do hidróxido de cálcio (CH), bem como à perda de água quimicamente ligada do C-S-H. Para PO, um terceiro pico a 813°C indica o fim da desidratação de C-S-H. Para BO este pico a 930 °C deve-se também à calcinação de calcite (CaCO₃) a partir dos agregados de calcário, o que é normalmente reportado para a faixa de temperaturas de 700-900°C [8]. Com base neste estudo, concluiu-se que as temperaturas de aquecimento deveriam ser inferiores a 650-750 °C de forma a obter cimentos reciclados com

quantidades razoáveis de C-S-H desidratado e sem liberação significativa de CO₂ e consumo excessivo de energia. O limite mais baixo dessa faixa foi selecionado de forma a garantir que não ocorra descarbonatação significativa durante a sinterização.

A difração de raios X (DRX) foi utilizada para identificar as fases cristalinas do cimento reciclado, antes e após o tratamento térmico. Para a análise DRX foi utilizado o equipamento PANalytical X'Pert Pro. As amostras foram pulverizadas e submetidas a um varrimento de 5 a 60° de 2 θ com condições experimentais de 40 kv e 35 mA e ampola de Cu. Em relação ao CRB, quartzo, feldspato e calcite foram identificados em todas as amostras analisadas para todas as temperaturas. Para TPA de 350°C, os picos de difração de etringite estão ausentes, enquanto a portlandite (CH) ainda está presente. A 650°C, os picos de portlandite desaparecem e são substituídos por CaO. Foram observados picos de difração relativos às fases de silicato de cálcio que indicam que a desidratação C-S-H foi eficaz. No CRP com TPA de 650°C foram encontrados silicatos bicálcicos (C₂S) o que demonstra a desidratação de C-S-H e a possível capacidade de reidratação destes materiais reciclados. No entanto, a composição do CRP foi claramente diferente da do CPN anidro original. A 650°C, o C₃S não pode ser formado, o que afeta a taxa de hidratação e o desenvolvimento de resistência dos novos cimentos reciclados. Como era esperado, o cimento reciclado obtido a partir da pasta apresentou uma quantidade superior de produtos desidratados, o que aumenta o seu potencial de reidratação comparado ao do CRB.

A densidade média das partículas de cimento reciclado, ρ_p , determinada de acordo com NP EN 196-6 [13], foi de 2402 kg/m³ (20°C), 2505 kg/m³ (350°C) e 2595 kg/m³ (650°C) para CRB e 1975 kg/m³ (20°C), 2233 kg/m³ (350°C) e 2307 kg/m³ (650°C) para CRP. Como esperado, devido à natureza porosa da pasta de cimento, o CR apresentou maior porosidade que o CPN anidro. Como esperado, o CRB, que contém agregados de densidade superior à pasta circundante, apresentou partículas de maior densidade quando moído que o CRP. A densidade de partículas aumentou com a TPA, uma vez que a água quimicamente ligada foi eliminada.

2.4 Composição e produção de argamassas

As argamassas foram produzidas com diferentes taxas de substituição (20, 50, 75, 100%) de CPN com CRB ou CRP (A%CRB/P). Para argamassas produzidas com cimentos reciclados submetidos a uma quarta etapa de moagem, adotaram-se níveis de substituição de 20, 60% e 100% (A%CRB/PF). Argamassas de referência (AR) com apenas CPN foram produzidas com a/c de 0,6 e uma relação cimento/areia de 1:3, para uma consistência alvo de 60-80%, de acordo com a norma EN1015-3 [14] (2.5). A mesma areia utilizada na produção do betão de origem foi também escolhida para as argamassas. Os agregados finos consistiram de 65% de areia grossa e 35% de areia fina. Cada argamassa foi produzida com cimento reciclado submetido a três temperaturas de pré-aquecimento (20°C, 350°C, 650°C). O cimento reciclado à temperatura ambiente (20°C) consiste em pasta e betão de origem, triturada e moída no procedimento de três etapas descrito na secção 2.2, sem passar pelo processo de aquecimento. Devido à maior necessidade de água de CRP de maior TPA, foi necessário aumentar a relação a/c dessas argamassas (ver secção 3.1). Inevitavelmente, as argamassas com CRB têm uma quantidade muito menor de cimento do que aquelas com CPN, o que reduzirá a quantidade de material hidratado, afetando a sua resistência mecânica.

Amostras de pasta de cimento foram produzidas com CRB e CRP para determinar a exigência de água, assim como o tempo inicial e final de presa de cada ligante, de acordo com a EN 196-3 [14]. Como esperado, verifica-se um rápido desenvolvimento de presa dos cimentos reciclados, abaixo de 30 min, especialmente para cimentos com TPA de 650°C. É provável que os aluminatos de cálcio desidratados tenham reagido prontamente com a água disponível acelerando o tempo de presa. Na ausência de sulfatos disponíveis, não há retardador para estas reações. Portanto, 0,5% e 1,5% de gesso, em peso de ligante, foram adicionados a CRB e CRP com TPA de 650°C, respetivamente. Para estes conteúdos de gesso, o tempo inicial e final de presa foi de 150-240 min para CRB e 120-250 min para CRP, respetivamente. Estes valores estão na faixa dos obtidos para CPN (130-210 min). Para CR com TPA de 350°C, a quantidade de compostos desidratados não foi relevante (secção 2.3) e a adição de gesso não foi necessária.

2.5 Ensaios, amostras e pré-condicionamento

As argamassas foram produzidas numa misturadora de argamassa planetária tradicional de várias velocidades. Após a mistura, cada argamassa foi testada quanto à consistência e densidade fresca de acordo com a EN 1015-3 [15] e a EN 1015-6 [16], respetivamente. Todas as misturas foram produzidas visando um espalhamento de 160-180 mm. Os espécimes foram curados em câmara húmida com HR acima de 95%, exceto aqueles com 100% de substituição de CPN com CR sem tratamento térmico, que foram curados em câmara seca com HR de $50 \pm 5\%$, devido às suas fracas propriedades hidráulicas. Para cada composição, 9 amostras de argamassa prismática 40x40x160mm foram produzidas, sendo compactadas numa mesa comum de compactação de moldes de argamassa. Os ensaios de resistência à compressão e à flexão, foram realizados aos 7, 28 e 90 dias de acordo com a norma EN 1015-11 [17]. O ensaio de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico foram determinados nas mesmas idades, de acordo com a NP EN 12504-4 [18] e a ASTM E1876 [19], respetivamente. O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado utilizando o equipamento do sistema GrindoSonic.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 2 encontram-se os resultados obtidos nos ensaios realizados; espalhamento, densidade fresca, ρ_f , resistência à flexão, f_{ctd28d} , resistência à compressão, f_{cd28d} , velocidade de ultrassons, VUS_{28d} e módulo de elasticidade dinâmico, MED_{28d} .

Quadro 2. Resultados obtidos nos ensaios realizados para as composições com 3 etapas de moagem.

Composição	Taxa de substituição [%]	TPA [°C]	Espalhamento [mm]	ρ_f [kg/m ³]	f_{ctd28d} [MPa]	f_{cd28d} [MPa]	VUS_{28d} [m/s]	MED_{28d} [GPa]
AR	0	-	176	2232	6.7	41.9	4266	35.5
		20	186	2204	5.8	28.9	4030	30.7
A20CRB	20	350	178	2222	5.8	30.6	4123	31.4
		650	174	2208	6.0	32.8	4050	33.1
A50CRB	50	20	174	2142	2.3	7.2	3686	19.9
		350	157	2157	3.0	12.5	3603	21.4
A75CRB	75	650	154	2185	3.5	13.8	3463	27.1
		20	160	2058	0.8	2.6	2623	9.0
A100CRB	100	350	130	2100	0.7	2.5	2711	11.3
		650	156	2168	1.2	4.1	3100	16.1
A20CRP	20	20	-	2098	0.2	0.3	1386	2.5
		350	142	2059	0.1	0.4	1841	3.0
A50CRP	50	650	141	2108	0.3	0.7	2259	7.0
		20	186	2204	5.0	26.5	4123	32.2
A75CRP	75	350	137	2215	5.6	31.2	4210	34.8
		650	151	2213	6.2	32.9	4155	34.9
A100CRP	100	20	174	2111	2.6	10.5	3411	21.4
		350	141	2114	2.7	10.3	3653	24.5
A20CRB	20	650	152	2148	4.2	17.9	3712	25.3
		20	160	2031	0.8	2.2	2768	10.9
A50CRB	50	350	130	2030	0.9	2.8	2698	10.8
		650	148	2088	1.6	5.1	3065	14.0
A75CRB	75	20	152	1939	0.2	0.4	1254	2.1
		350	144	1962	0.3	0.7	1333	1.2
A100CRB	100	650	152	2014	0.6	1.9	1927	4.0

Quadro 3. Resultados obtidos nos ensaios realizados para as composições com etapa complementar de moagem.

<i>Composição</i>	<i>Taxa de substituição</i> [%]	<i>TPA</i> [°C]	<i>Espalhamento</i> [mm]	ρ_f [kg/m ³]	f_{ctd28d} [MPa]	f_{cd28d} [MPa]	VUS_{28d} [m/s]	MED_{28d} [GPa]
A20CRBF	20	650	165	2230	6.4	32.4	4232	35
A60CRBF	60	650	154	2220	3.1	11.6	3782	24.2
A100CRBF	100	650	166	2173	0.3	0.9	2077	4.1
A20CRPF	20	650	180	2232	6.8	36.7	4312	35.7
A60CRPF	60	650	181	2211	4.6	21.4	3874	27.8
A100CRPF	100	650	153	2131	2.6	8.3	3238	17.3

3.1 Propriedades no estado fresco

Para as argamassas produzidas com CRB, o espalhamento diminuiu com o aumento da percentagem de substituição de CPN com CRB e com o aumento de TPA. Uma razão pode ser atribuída ao tamanho mais grosseiro e à maior porosidade das partículas de cimento reciclado (secção 2.3). De facto, a maior absorção das partículas de CR reduz a água disponível para a trabalhabilidade. No entanto, as diferenças não foram significativas entre 350°C e 650°C. Devido à menor quantidade de cimento no CRB, estes fatores são mais relevantes no CRP. Conforme mencionado em 2.4, as argamassas com CRP foram produzidas com uma quantidade extra de água e um a/c maior para compensar a maior retenção de água destes cimentos reciclados, compostos por maiores quantidades de partículas de cimento desidratadas. No entanto, como grande parte da água extra é retida nas partículas de CRP, a relação a/c efetiva deve ser pouco afetada, assim como a microestrutura e resistência mecânica das argamassas.

Em geral, as misturas com incorporação de CR mais fino (CRBF e CRPF) apresentaram maior espalhamento. Isto pode ser atribuído à redução da porosidade do cimento reciclado em partículas mais finas. De facto, a porosidade de partículas recicladas mais grossas tende a estar mais próxima da do betão de origem. Deste modo, para as argamassas com CR mais fino, mais água ficou disponível para a trabalhabilidade permitindo espalhamentos mais elevados para um a/c inferior do que os CR mais grossos sem a etapa de moagem extra. Além disso, grãos de menores dimensões contribuem duplamente ao melhorar a coesão da mistura e ao reduzir o contacto entre as partículas de agregado (efeito de lubrificação).

A densidade fresca diminuiu com o aumento da taxa de substituição de CPN por CR com partículas de menor densidade (secção 2.3). Confirma-se também que a densidade tende a aumentar com o aumento da TPA, o que também está de acordo com a maior densidade de CR de maior TPA. Como esperado, a densidade foi menos afetada em argamassas com CR com moagem extra. No geral, a variação da densidade fresca foi inferior a 10%, mesmo para 100% de substituição de CPN com CRP. Até 20% de substituição de CPN, a trabalhabilidade e a densidade fresca foram pouco afetadas.

3.2 Resistência mecânica à compressão e à flexão

Os resultados da resistência à flexão e à compressão de argamassas produzidas com cimento reciclado são apresentados no Quadro 2. Os coeficientes de variação para a resistência à compressão aos 28 dias (CV_{fcm28d}) foram geralmente inferiores a 5%.

3.2.1 Cimento reciclado a partir de betão de origem (CRB)

Com o aumento do grau de substituição de CPN por CR observa-se uma redução acentuada em ambas as propriedades mecânicas. O melhor desempenho foi encontrado em argamassas previamente submetidas a 650°C, mostrando que a maior TPA potencializa a capacidade de reidratação do CR.

Misturas com cimento reciclado que não sofreram tratamento térmico (20°C) devem atuar principalmente como filler e não como ligante.

Quando o CPN foi totalmente substituído por CRB (A100CRB) a resistência à flexão atingiu apenas 0,3 MPa aos 90 dias, o que é significativamente inferior aos valores obtidos para as argamassas de referência com apenas CPN (6,7 MPa). Tendências semelhantes foram encontradas para a resistência à compressão, com um máximo de 0,7 MPa em argamassas com TPA de 650°C quando comparadas a 42 MPa em argamassas de referência (Quadro 2). Misturas com CRB a 350° TPA foram menos efetivas, especialmente para taxas de substituição superiores a 75%, em que a resistência mecânica foi semelhante à das argamassas sem CR tratado termicamente. Verifica-se que uma quantidade mínima de CPN é necessária para que o CRB seja efetivo. O baixo desempenho das argamassas com CRB encontra-se fortemente relacionado com a quantidade efetiva de cimento presente em cada argamassa (2.4). Neste caso, o teor de cimento não é suficiente para envolver completamente o material inerte e para produzir argamassas coesas com resistência mecânica razoável.

3.2.2 Cimento reciclado a partir de pasta de origem (CRP)

Relativamente ao CRP verifica-se que para uma TPA de 350°C, as argamassas foram ineficazes para percentagens de substituição superiores a 50%, apresentando resistência mecânica semelhante à das argamassas com CR moído sem tratamento térmico. Confirma-se que esta faixa de temperatura (350°C) foi ineficaz no desenvolvimento de reatividade e capacidade de reidratação do cimento reciclado.

Como esperado, o aumento de resistência de argamassas recicladas com CRP foi superior ao encontrado em argamassas com CRB. Devido à maior quantidade de cimento presente nestas misturas, para 100% de substituição, obteve-se um máximo de 0,9 MPa e 2,6 MPa na resistência à flexão e à compressão, respetivamente. Estes valores foram 3 vezes superiores aos obtidos nas argamassas com CRB. Os resultados obtidos para CRB e CRP reforçam a necessidade de separar o agregado da pasta de cimento. No entanto, a resistência mecânica nas argamassas com CRP é ainda bastante inferior à resistência à flexão e à compressão das argamassas com apenas CPN (85-90% menor). Apesar disso, as propriedades hidráulicas do CRP foram suficientemente altas para produzir argamassas com resistência mecânica muito superior a argamassas de cal comuns. Isso mostra que as argamassas com CRP podem ser interessantes para a reabilitação de edifícios.

3.2.3 Influência do aumento do grau de finura

O aumento do grau de finura do CR melhorou ligeiramente o desempenho das argamassas com CRB (Quadro 3). No entanto, o teor de cimento nas misturas com CRB é ainda muito baixo (2.4), especialmente quando se aumenta a percentagem de substituição de CPN por CRB. Deste modo, o aumento da reatividade das partículas com o grau extra de moagem não compensou a quantidade reduzida de ligante. Por outro lado, as argamassas com CRP mostraram melhorias significativas quando o tamanho das partículas de CR foi reduzido. Comparando com o CRP sem etapa de moagem extra, a resistência mecânica das argamassas com 60% de substituição pelo CRP mais fino (A60CRPF) foi cerca de 10% superior à das misturas com apenas 50% de substituição do CRP mais grosseiro (A50CRP).

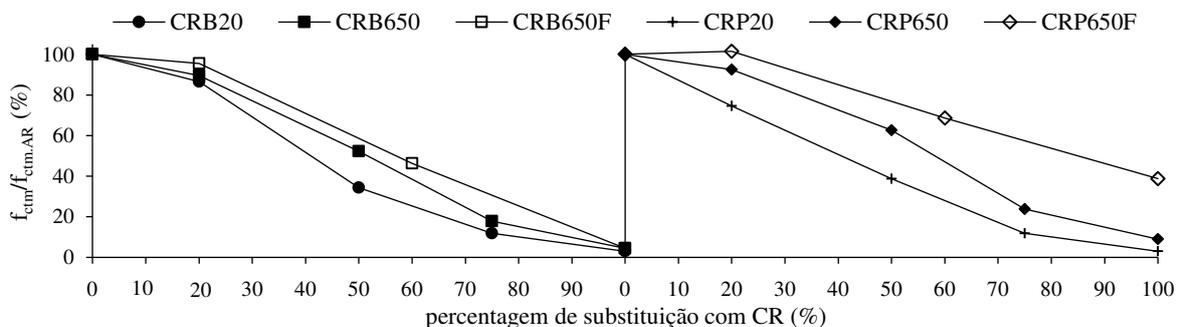


Figura 1. Resistência à flexão de argamassas produzidas com cimento reciclado mais grosseiro (CRB20, CRB650, CRP20 e CRP650) e cimento reciclado mais fino (CRB650F e CRP650F) relativamente à resistência à flexão de argamassas de referência (AR).

A Fig. 1 mostra a resistência à flexão de argamassas produzidas com diferentes níveis de substituição de CR, mais grosso e mais fino, com CPN em relação às argamassas de referência com apenas CPN. Quando comparadas às argamassas de referência (AR), as argamassas com 20% de substituição de CPN com CRPF (A20CRPF) atingiram uma resistência à flexão ligeiramente superior (2,2%). Para 100% de substituição, estas argamassas foram capazes de atingir 2,5 MPa o que representa 39% da resistência à flexão e 8,5 MPa e 20% da resistência à compressão das argamassas de referência. Isto representa uma resistência mecânica 3 vezes superior que a das argamassas com CRP mais grosseiro. É então possível concluir que a capacidade reativa do CR foi significativamente aumentada com a redução do tamanho médio das partículas. A resistência mecânica do CRPF pode ser comparada à de argamassas hidráulicas comuns de cal de igual proporção água/ligante, produzidas com HL5, de acordo com NP EN 459-1 [20].

3.2.4 Evolução no tempo da resistência mecânica

A Fig. 2 apresenta a resistência à flexão e à compressão relativa em diferentes idades das argamassas produzidas com 100% de cimento reciclado mais fino (CRB650F e CRP650F) quando comparadas com argamassas de referência. Confirma-se um desenvolvimento de resistência mais lento das argamassas de cimento recicladas, que melhoraram progressivamente o desempenho relativo face às argamassas de referência ao longo do tempo. Isto é especialmente evidente para as argamassas CRPF, que tinham mais material reidratável. Por um lado, como verificado na secção 2.3, o novo cimento reciclado não contém C₃S significativo, que é o principal componente de cimento responsável pelo desenvolvimento inicial de resistência mecânica. Por outro lado, embora o CRPF tenha um tamanho de grão menor que o cimento reciclado com apenas três etapas de moagem, o tamanho médio das partículas continua a ser cerca de 6 vezes maior do que o CPN, o que também explica o desenvolvimento mais lento da resistência de argamassas CR.

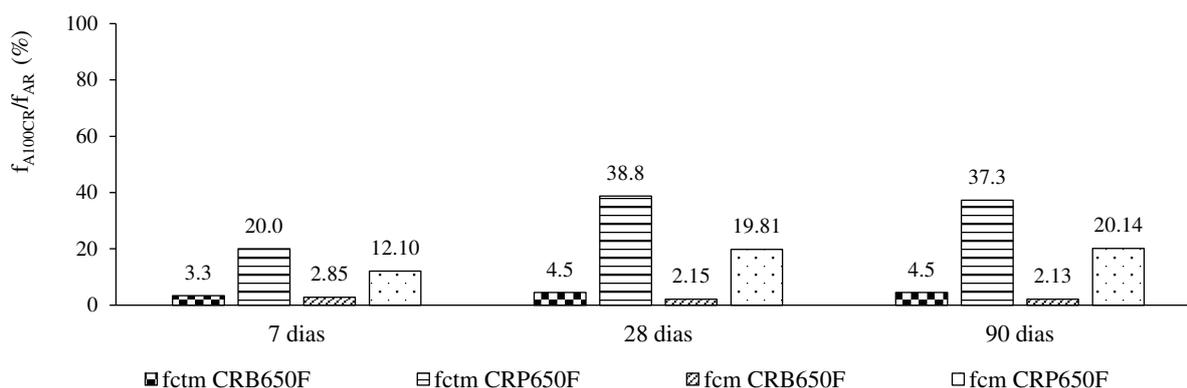


Figura 2. Resistência à flexão (f_{ctm}) e resistência à compressão (f_{cm}) de argamassas recicladas com 100% de cimento reciclado mais fino (A100CRBF e A100CRPF), f_{A100CR} , em relação à resistência à flexão e à compressão de argamassas de referência (AR), f_{AR} , aos 7, 28 e 90 dias.

3.3 Velocidade de propagação de ultrassons

A velocidade de propagação de ultrassons (VUS) diminuiu de forma constante à medida que a percentagem de substituição de CPN com CR aumentou. Isto está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos. Assim como para a resistência mecânica, confirma-se que a VUS aumenta com a incorporação de CR com maior TPA. Para níveis de substituição acima de 75%, este aspeto torna-se mais relevante, mostrando a maior capacidade de reidratação do cimento reciclado com TPA de 650°C.

A substituição de 100% do CPN por CR mais fino (CRBF e CRPF) levou a reduções mais baixas do VUS, porque a microestrutura da pasta de cimento torna-se mais densa que a do CR mais grosseiro (3.2). Mais uma vez, a melhoria foi mais relevante em argamassas com CRPF. Para 100% de substituição, o VUS aumentou até 43% quando comparado a argamassas com CRP mais grosseiro. Destaca-se a maior VUS aos 28 dias encontrada em argamassas com 20% de substituição de CPN com CRPF, quando comparada às argamassas de referência.

3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Como esperado, os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (MED) estão de acordo com as tendências encontradas nos ensaios de VUS, uma vez que ambos são essencialmente afetados pela rigidez da argamassa. Confirma-se que o CR com maior TPA proporciona uma microestrutura mais densa e, portanto, maiores valores de VUS e MED. Por exemplo, argamassas com 50% CRB e CRP apresentaram 18% e 36% maior rigidez do que aquelas sem CR tratado termicamente. Para níveis de substituição superiores a 50%, as argamassas com 350°C TPA de CR mostraram-se ineficazes para os dois tipos de cimento reciclado, confirmando a tendência verificada nos restantes ensaios.

Como verificado noutros ensaios deste estudo, o CR com moagem extra e TPA de 650°C teve pouco efeito sobre argamassas com CRB. Por outro lado, o CRPF mostrou melhorias significativas. Argamassas com 100% de CRPF apresentaram MED cerca de 150% superiores ao de misturas com a mesma quantidade de CRP mais grosseiro, aumentando de 7 para 17,3 GPa. Estes valores correspondem a 48,5% do da argamassa de referência. Confirma-se que os compostos reidratáveis no CRP são mais fáceis de ativar quando é aumentada a sua superfície específica.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, argamassas com diferentes percentagens de substituição de CPN com cimento reciclado ativado termicamente (CR) foram produzidas e caracterizadas em termos das suas principais propriedades no estado fresco e resistência mecânica. As seguintes conclusões foram retiradas:

- CR com tratamento térmico possui diferentes fases comuns ao CPN, caracterizadas por compostos de cimento anidro com menor relação cálcio/sílica, o que reduz a sua taxa de hidratação.
- Houve uma redução significativa da resistência mecânica das argamassas com incorporação de cimento reciclado grosso, sendo de até 96% e 87% nas argamassas com 100% de CRB e CRP, respetivamente. No entanto, estas reduções tendem a diminuir com o tempo.
- Em todas as propriedades testadas, o CRP mostrou maior eficiência que o CRB. Isso é atribuído ao menor teor de cimento no CRB. É assim mostrada a relevância de separar o agregado da pasta de cimento em resíduos de betão.
- O aumento da finura da pasta de cimento reciclado teve uma influência significativa na capacidade de reidratação e reação, melhorando todas as propriedades testadas. Além disso, a resistência mecânica não foi significativamente afetada para níveis de substituição de até 20% de CRPF por CPN. O mesmo foi encontrado nos ensaios de VUS e MED.
- Para o cimento 100% reciclado, foi possível produzir argamassas com resistência à compressão de até 8,3 MPa, aos 28 dias, comparável à de argamassas de cal hidráulica comuns com igual relação água/ligante.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer à CERis – ICIST / IST e CERENA / IST pelo financiamento da pesquisa, bem como ao engenheiro José Rocha pela sua contribuição durante o trabalho experimental.

REFERÊNCIAS

- [1] Scrivener, K. L.; Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128-136.

- [2] Crow, J. M. (2008). The concrete conundrum. *Chemistry World*, 5(3), 62-66.
- [3] Stafford, F. N., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J. A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1293-1299.
- [4] Kajaste, R.; Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions–management options and abatement cost. *Journal of cleaner production*, 112, 4041-4052.
- [5] WBC, Cement Technology Roadmap 2009 – Carbon emissions reduction up to 2050., International Energy Agency, 2009.
- [6] Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements. *Cement and Concrete research*, 34(9), 1489-1498.
- [7] Imbabi, M. S.; Carrigan, C.; McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194-216.
- [8] Chromá, M.; Rovnaník, P.; Vořechovská, D.; Bayer, P.; Rovnaníková, P. (2011). Concrete Rehydration after Heating to Temperatures of up to 1200 °C. *Proc. Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components*, Porto, Portugal (pp. 1633-1639).
- [9] Shui, Z.; Xuan, D.; Chen, W.; Yu, R.; Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and building materials*, 23(1), 531-537.
- [10] Xinwei, M.; Zhaoxiang, H.; Xueming, L. (2010). Reactivity of Dehydrated Cement Paste from Waste Concrete Subjected to Heat Treatment. *Proc. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*
- [11] Yu, R.; Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 49, 841-851.
- [12] Letelier, V.; Tarela, E.; Muñoz, P.; Moriconi, G. (2017). Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 132, 365-375.
- [13] NP EN 196-6. 2010, Métodos de ensaio de cimentos Parte 6: Determinação da finura. Lisboa:IPQ. 21 p.
- [14] NP EN 196-3. 1995, Determinação do tempo de presa e da expansibilidade do cimento. Lisboa: IPQ.
- [15] EN 1015-3. 1999, Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- [16] EN 1015-6. 1998, Methods of test for mortar for masonry. Determination of bulk density of fresh mortar.
- [17] EN 1015-11. 1999, Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [18] NP EN 12504-4. 2004, Ensaios de betão nas estruturas. Parte 4. determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons. Lisboa: IPQ.
- [19] ASTM E1876. 2006, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [20] NP EN 459-1. 2010, Cal de construção. Parte 1 Definições, especificações e critérios de conformidade. Lisboa: IPQ