

DURABILIDADE DE BETÃO COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO



Sofia Real

Investigadora
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

sofia.real@tecnico.ulisboa.pt



José A. Bogas

Professor Associado
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt



Ana Carriço

Doutoranda
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt

SUMÁRIO

A necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção conduziu ao desenvolvimento de novos ligantes mais ecológicos como alternativa aos ligantes intensivos em carbono correntes, nomeadamente os cimentos eco-eficientes de baixo carbono, como o cimento reciclado termoativado. Este estudo foca-se na caracterização da durabilidade de betão com incorporação de cimento reciclado termoativado obtido a partir de resíduos de pasta e resíduos de betão. Para tal, foram produzidos betões com uma relação água/ligante de 0,55 e diferentes percentagens destes novos ligantes de baixo carbono (5 - 40%), tendo sido caracterizados através de ensaios de absorção capilar, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação acelerada. O cimento reciclado termoativado apresentou uma capacidade de reidratação elevada, tendo, em geral, contribuído para a densificação da microestrutura e melhoria da durabilidade do betão. O betão produzido com incorporação de cimento reciclado termoativado atingiu uma durabilidade semelhante à de betão com cimento Portland.

Palavras-chave: Cimento reciclado termoativado, betão eco-eficiente, absorção capilar, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e à carbonatação.

1. INTRODUÇÃO

O contexto ambiental atual dita a necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis por parte da indústria da construção, na qual a produção de cimento é uma das mais intensivas em carbono a nível global. Neste sentido, tem-se procurado desenvolver ligantes alternativos mais sustentáveis. Na última década, a investigação focou-se no desenvolvimento de cimentos reciclados de baixo carbono, com potencial de redução de mais de 60% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) de clinker comum, contribuindo também para a redução do consumo de recursos naturais e aproveitamento de resíduos de construção e demolição.

No entanto, o domínio do cimento reciclado termoativado (CR) ainda se encontra pouco explorado. Os trabalhos de investigação mais relevantes centram-se na produção e capacidade de reidratação deste material [1–4], bem como no comportamento no estado fresco e mecânico de materiais de construção produzidos com este ligante [5–8]. A área da durabilidade de materiais de construção com incorporação de CR é a que apresenta a maior falta de conhecimento. Kalinowska-Wichrowska et al. [9] obtiveram uma absorção de água semelhante em argamassas com 25% de CR de pasta termoativado a 650 °C e argamassa com cimento Portland normal (CEM I). Qian et al. [10] verificaram que a penetração de cloretos em betão de alta resistência com incorporação de 12,5% e 25% de CR tratado a 650 °C foi inferior à do betão de referência, justificando que os resultados se deviam à microestrutura mais densa promovida pelo efeito de nucleação das partículas fina de CR. No entanto, para percentagens de incorporação superiores a 35,5% de CR, a penetração de cloretos apresentou um aumento progressivo, que foi explicado pela absorção e aglomeração das partículas de CR que terá conduzido a uma reduzida trabalhabilidade e maior volume de vazios. Relativamente à resistência à carbonatação, não foram encontrados trabalhos na literatura.

Assim, o presente estudo caracteriza a durabilidade de betões produzidos com diferentes percentagens de incorporação de CR, através de ensaios de absorção capilar, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Para a produção dos betões, foram selecionados dois tipos de agregado natural: brita calcária (frações granulométricas 2/8, 4/11,2 e 11,2/20 e massas volúmicas 2650, 2680 e 2670 kg/m^3) e areia siliciosa (frações granulométricas 0/1 e 0/2 e massa volúmica 2600 kg/m^3). Foram ainda produzidos cimentos reciclados termoativados provenientes de pasta (CRP) e de betão (CRB), e ainda utilizado CEM I 42,5R para produção do material de origem e do betão de referência.

A pasta de origem foi produzida com uma relação água/cimento (a/c) de 0,55, tendo apresentado uma resistência de compressão aos 28 dias de 41 MPa. O betão de origem foi produzido com a mesma relação a/c , com a mesma composição do betão de referência (CEM

l), com uma resistência de compressão aos 28 dias de 52 MPa. Após mais de 3 meses em ambiente de laboratório, a pasta de origem foi submetida a processos de britagem e moagem, para redução da dimensão das suas partículas, e peneirada de forma a obter partículas de dimensão inferior a 250 μm . De seguida, com base em estudos anteriores [8,11], este material foi sujeito a tratamento térmico num forno rotativo da *Thermolab Scientific Equipments*, que correspondeu a aquecimento a 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até 150 $^{\circ}\text{C}$, tendo permanecido a essa temperatura durante 1 hora, seguido de aquecimento até 650 $^{\circ}\text{C}$, onde permaneceu durante 3 horas, tendo finalmente sido arrefecido dentro do forno até temperatura ambiente. O betão de origem passou por um processo semelhante ao da pasta de origem. No entanto, após os processos de britagem e moagem e antes da termoativação, as partículas de betão de dimensão inferior a 1 mm foram submetidas a um processo de separação magnética de forma a individualizar a fração cimentícia, de acordo com o método descrito em Carriço et al. [12]. Esta fração cimentícia era composta por cerca de 74% pasta, 16% areia siliciosa e 10% brita calcária.

As análises termogravimétrica e de difração de raios-X do CRP revelaram a sua desidratação sem descarbonatação relevante, e que este era essencialmente composto por um polimorfo de C_2S de reatividade elevada, α' - C_2S , bem como por CaO , CaCO_3 e aluminatos. O CRB apresentou essencialmente os mesmos compostos cristalinos do CRP, exceto o quartzo, indicativo a presença de areia residual do betão de origem.

O Quadro 1 apresenta as principais características dos ligantes utilizados. O CRP apresentou uma densidade absoluta semelhante à do CEM I. No entanto, a sua superfície específica foi cerca de 8,7 vezes superior à do CEM I, o que terá contribuído para a sua maior reatividade e maior necessidade de água. A sua relação água/ligante (a/l) de consistência normal mais elevada do que a do CEM I pode ainda ser explicada pela maior porosidade das partículas de CRP, maior teor de CaO e aglomeração das partículas [3,5,11,13]. Por outro lado, devido à presença de agregado natural não poroso e não reativo, o CRB exibiu uma superfície específica de cerca de metade da do CRP, bem como uma relação a/l de consistência normal mais reduzida do que a do CRP.

Quadro 1 – Principais características dos ligantes

Tipo de ligante	Densidade absoluta (g/cm^3)	Superfície específica BET (cm^2/g)	CaO livre (%)	Consistência normal (a/l)	Tempo de presa (mins)	
					Inicial	Final
CEM I	3,07 ^{a)}	18134	0,70	0,31	170	280
CRP	3,005 ^{b)}	156853	13,94	0,74	290	385
CRB	2,964 ^{b)}	78673	-	0,50	375	415

a) LNEC E 64 [14]; b) Picnometria de hélio

2.2 Composição

Neste estudo, foram produzidos 7 betões, cujas composições são apresentadas no Quadro 2. Os betões foram produzidos com um teor de ligante de 360 kg/m³ e uma relação a/l de 0,55, para diferentes percentagens de incorporação de CRP (5, 15, 30 e 40%) e CRB (15 e 30%). Procurou-se atingir uma classe de abaixamento S3 [15], pelo que foi necessário adicionar superplastificante de base policarboxilica (SP) nos betões com percentagens de incorporação de CR mais elevadas (≥30%).

Quadro 2 – Composição das misturas e propriedades no estado fresco, física e mecânica

Designação	V _{ag} grosso (L/m ³)	V _{ag} fino (L/m ³)	V _{água} (L/m ³)	SP (% M _{ligante})	Abaix (mm)	MV _{fresca} (kg/m ³)	V _{vazios} (L/m ³)	MV _{seca} (kg/m ³)	f _{cm} (MPa)	CV _{fcm} (%)
CEM I	400	266	198	-	150	2330	13	2220	52,2	1
5% CRP	399	266	198	-	130	2320	17	2220	53,2	3
15% CRP	399	266	198	-	90	2290	27	2190	52,4	1
30% CRP	398	266	198	0,4	110	2280	30	2170	47,8	2
40% CRP	394	263	198	1,5	190	2290	19	2160	52,5	2
15% CRB	398	265	198	-	120	2290	28	2190	52,0	1
30% CRB	397	265	198	0,2	130	2270	33	2160	45,0	0

2.3 Métodos de ensaio

As propriedades no estado fresco, física e mecânica dos betões foram determinadas através de ensaios de abaixamento (Abaix) (NP EN 12350-2 [16]), massa volúmica fresca (MV_{fresca}) (NP EN 12350-6 [17]) e seca (MV_{seca}) (NP EN 12390-7 [18]), bem como resistência à compressão (f_{cm}) (NP EN 12390-3 [19]) (Quadro 2).

A durabilidade dos betões foi caracterizada através de ensaios de absorção capilar, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação. Com a exceção de ensaio de resistência à carbonatação, todos os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade.

Os ensaios de absorção capilar e de permeabilidade ao oxigénio foram realizados em provetes cilíndricos cortados com ϕ 150x50 mm, tendo sido sujeitos a cura húmida até aos 7 dias, seguida de 3 dias em estufa a 50 °C e outros 17 dias embrulhados em película para evitar trocas de humidade com o ambiente da estufa [20,21]. Após o pré-condicionamento, os provetes foram sujeitos a temperatura ambiente durante 1 dia, e ensaiados de acordo com a LNEC E 393 [22] e LNEC E 392 [23], respetivamente. Para o ensaio de absorção capilar, os provetes foram colocados sobre uma lâmina de água com 5±1mm, e a sua variação de massa

foi medida após 10, 20, 30 e 60 minutos e 3, 6, 24 e 72 horas em contacto com a água. O coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) foi determinado através da inclinação da reta de regressão linear da absorção entre $\sqrt{20}$ minutos e $\sqrt{6}$ horas. O ensaio de permeabilidade ao oxigénio foi realizado para pressões de 0,5, 1,5 e 2,5 bar, tendo o coeficiente de permeabilidade ao oxigénio (K_{O_2}) sido determinado de acordo com a Eq. (1), em que V corresponde ao volume do tubo de medição (m^3), t ao tempo medição (s), p_{ensaio} à pressão absoluta do fluido à entrada do provete (N/m^2), p_{atm} à pressão atmosférica (N/m^2), L à espessura do provete (m) e A à secção transversal do provete (m^2). No final de cada ensaio, foi ainda determinada a humidade relativa (HR) dos provetes com recurso a um medidor de humidade.

$$K_{O_2} = \frac{4,04 \times 10^{-5} \times \left(\frac{V}{t}\right) \times p_{atm} \times L}{A \times (p_{ensaio}^2 - p_{atm}^2)} \quad (1)$$

A resistência à penetração de cloretos foi determinada através do ensaio de migração acelerada de cloretos (RCMT), em provetes com $\phi 100 \times 50$ mm, com base na NT build 492 [24] e o ensaio de resistência à carbonatação acelerada foi realizado, em provetes com $\phi 100 \times 40$ mm, de acordo com a LNEC E 391 [25]. Os provetes foram sujeitos a cura húmida até aos 7 dias, seguida de 21 dias em câmara a 20 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ HR. Após este período, os provetes para ensaio de migração de cloretos foram saturados em vácuo durante 24 horas com uma solução de hidróxido de cálcio e ensaiados. Este ensaio consiste na aplicação de uma diferença de potencial por tempo determinado no provete, forçando a migração de iões cloreto através do mesmo. Após o ensaio, o provete é seccionado e pulverizado com solução de nitrato de prata, medindo-se a profundidade de penetração de cloretos a partir do precipitado branco visível de cloreto de prata. O coeficiente de migração de cloretos ($D_{Cl_{RCMT}}$) foi determinado de acordo com a Eq. (2), em que T corresponde ao valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica (°C), L à espessura do provete (mm), U à diferença de potencial (V), t à duração do ensaio (horas) e x_d ao valor médio da profundidade de penetração de cloretos (mm).

$$D_{Cl_{RCMT}} = \frac{0,0239 \times (273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \times \left(x_d - 0,0238 \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

Para ensaio de resistência à carbonatação, o topo e a base de cada provete foram selados com tinta epóxi, de forma a garantir penetração unidirecional do CO_2 . Aos 28 dias, os provetes foram colocados em câmara de carbonatação a 23 ± 3 °C, $65 \pm 5\%$ HR e $2,5 \pm 0,1\%$ CO_2 . A profundidade de carbonatação foi medida após 28, 56 e 91 dias, através da pulverização das faces quebradas do provete com solução de 0,2% de fenolftaleína. Considerando condições contantes ao longo do tempo [26], o coeficiente de carbonatação (K_{ca}) foi determinado através da inclinação da reta de regressão linear da profundidade de carbonatação até aos $\sqrt{91}$ dias.

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Em geral, a classe de abaixamento pretendida (S3) foi atingida para os betões estudados (Quadro 2). No entanto, conforme referido, para percentagens de incorporação de 30 e 40% CRP e de 30% CRB, foi necessário recorrer à utilização de SP, devido à maior necessidade de água associada a este tipo de ligante.

As massas volúmicas fresca e seca foram pouco afetadas pela incorporação de CRP e de CRB (Quadro 2). Todavia, devido à menor trabalhabilidade dos betões com CRP e CRB, o volume de vazios (V_{vazios}) destes betões foi ligeiramente superior ao do betão de referência (Quadro 2).

Do mesmo modo, a resistência à compressão aos 28 dias também foi pouco influenciada pela incorporação de até 40% CRP (Quadro 2), confirmando a capacidade de reidratação efetiva do CRP. O ligeiro aumento desta propriedade para 15% CRP deveu-se a um possível efeito de filler e nucleação. Por outro lado, o ligeiro decréscimo da resistência à compressão para 30% CRP pode ser justificado, não só pelo efeito diluído do teor de CEM I no tempo, mas também pela menor trabalhabilidade observada neste betão, que resultou numa menor dispersão e maior volume de vazios, que afetou a compactação do betão e hidratação adequada do ligante, e conseqüentemente, a resistência à compressão. A maior quantidade de SP utilizada no betão com 40% CRP terá sido mais efetiva na compensação da necessidade de água elevada e menor dispersão deste ligante do que para 30% CRP, o que resultou numa maior resistência à compressão. A resistência à compressão dos betões com CRB foi apenas ligeiramente inferior à dos betões com a mesma percentagem de incorporação de CRP. De facto, devido à contaminação deste ligante com 26% de agregado residual, a fração cimentícia (74%) deste ligante foi inferior à do CRP, o que resultou numa relação água/fração cimentícia (a/fc) de 0,57 e 0,60 para 15% e 30% CRB, e portanto, superior à dos restantes betões (0,55).

O Quadro 3 apresenta os resultados dos ensaios de durabilidade que serão analisados de seguida.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de durabilidade

Designação	C_{abs} ($\times 10^{-6}$ m/min ^{0,5})	CV_{Cabs} (%)	KO_2 ($\times 10^{-17}$ m ²)	CV_{KO_2} (%)	HR (%)	Dcl_{RCMT} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	CV_{Dcl} (%)	K_{ca} (mm/ano ^{0,5})
CEM I	89,6	3	2,4	5	81	17,6	6	15,5
5% CRP	113,2	1	2,9	5	69	16,5	2	14,6
15% CRP	119,2	4	3,6	10	67	19,6	1	15,1
30% CRP	98,5	5	2,8	10	73	19,8	3	17,3
40% CRP	66,7	0	1,4	2	77	18,9	6	10,1
15% CRB	96,1	2	3,6	21	76	-	-	15,8
30% CRB	113,5	4	3,9	12	73	-	-	21,2

3.1 Absorção capilar

A Figura 1 apresenta o coeficiente de absorção capilar e a humidade relativa de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP. O coeficiente de absorção capilar variou entre $66,7 \times 10^{-6}$ e $119,2 \times 10^{-6}$ m/min^{0,5}, dependendo da percentagem de incorporação de CRP (Quadro 3). Para até 15% CRP, o coeficiente de absorção capilar aumentou até 33%, tendo decrescido para percentagens de incorporação de CRP superiores a 30%.

De acordo com estudos anteriores [11,27], as pastas de CRP tendem a apresentar porosidades mais refinadas do que as de CEM I, devido à redução da relação a/l interpartícula decorrente da absorção de água por parte das partículas de CRP. No entanto, este efeito tende a ser mais importante em idades iniciais, uma vez que as pastas de CEM I desenvolvem maior quantidade de produtos de hidratação externos a longo-prazo [5,27]. Este fenómeno explica os coeficientes de absorção reduzidos obtidos para maiores percentagens de incorporação de CRP (30 e 40%).

Por outro lado, o ensaio de absorção capilar é fortemente influenciado pela humidade relativa do betão. Apesar de ter sido adotado um pré-condicionamento visando a minimização da variação deste parâmetro, foram obtidas humidades relativas entre 67% e 81%, tendo sido menores nos betões com menor percentagem de incorporação de CRP (até 15%), o que justifica os seus coeficientes de absorção capilar mais elevados (Figura 1).

Adicionalmente, devido à sua maior necessidade de água, os betões com CRP tendem a apresentar maior dificuldade de compactação e, conseqüentemente, maior volume de vazios (Quadro 2), o que contribui para o aumento da absorção capilar. Todavia, a utilização de SP nos betões com maior percentagem de incorporação de CRP terá contribuído para uma maior dispersão das partículas de ligante e uma compactação mais eficaz do betão, promovendo microestruturas mais densas [28].

O betão com 15% CRB apresentou um coeficiente de absorção capilar ligeiramente superior ao do betão de referência, tendo esta diferença sido inferior à observada para 15% CRP, essencialmente devido à sua maior humidade relativa (Figura 1). No entanto, o coeficiente de absorção capilar do betão com 30% CRB foi bastante superior ao do betão de referência (CEM I) e até do que o betão com 30% CRP e com a mesma humidade relativa (Figura 1). Conforme referido, a relação a/fc deste betão (0,60) foi ligeiramente superior do que a dos restantes betões (0,55), o que terá resultado numa microestrutura mais grosseira.

3.2 Permeabilidade ao oxigénio

A Figura 2 exhibe o coeficiente de permeabilidade ao oxigénio e a humidade relativa de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP. Para até 40% CRP, o coeficiente de permeabilidade ao oxigénio variou entre $1,4 \times 10^{-17}$ e $3,6 \times 10^{-17}$ m² (Quadro 3).

Em geral, o coeficiente de permeabilidade ao oxigénio seguiu uma tendência semelhante à do coeficiente de absorção capilar. À semelhança da absorção capilar, este mecanismo de transporte também é consideravelmente afetado pela humidade relativa. De facto, de acordo com a literatura [29], a permeabilidade ao oxigénio para 80% HR pode ser cerca de metade da observada para 75% HR.

O coeficiente de permeabilidade ao oxigênio aumentou com a incorporação de até 15% CRP, tendo decrescido progressivamente para percentagens de incorporação de CRP superiores a 15%. Assim, o coeficiente de permeabilidade ao oxigênio do betão com 40% CRP atingiu uma redução de cerca 42% em relação ao betão de referência (Figura 2). Apesar da variabilidade associada a este tipo de ensaio e da influência da humidade relativa, além de estarem associados a percentagens de SP elevada, conduzindo a menor volume de vazios e melhor dispersão das partículas de ligante, os betões com percentagens de incorporação de CR elevadas apresentam uma relação a/l interpartícula mais reduzida, desenvolvendo uma microestrutura mais refinada. Este efeito será mais relevante para a permeabilidade ao oxigênio do que para a absorção capilar, dado que a permeabilidade tende a ser mais afetada pelo diâmetro crítico dos poros [29].

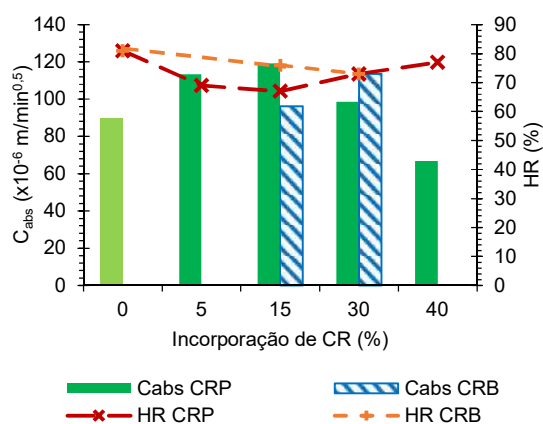


Figura 1 – Coeficiente de absorção capilar (C_{abs}) e humidade relativa (HR) de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP e CRB

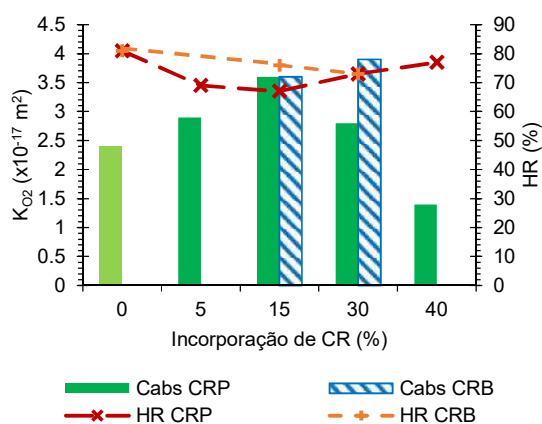


Figura 2 – Coeficiente de permeabilidade ao oxigênio (K_{O_2}) e humidade relativa (HR) de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP e CRB

A incorporação de 30% CRB resultou num incremento de 37% do coeficiente de permeabilidade ao oxigênio em comparação com a incorporação da mesma percentagem de CRP, o que pode ser atribuído ao aumento da relação a/fc (Figura 2). No entanto, os betões com 15% de CRP e CRB apresentaram coeficientes de permeabilidade ao oxigênio semelhantes. Como referido, além de exibir uma microestrutura menos refinada, o betão com 15% CRB tinha uma humidade relativa consideravelmente mais elevada do que o betão com 15% CRP.

3.3 Resistência à penetração de cloretos

A Figura 3 mostra o coeficiente de migração de cloretos de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP. O coeficiente de migração de cloretos variou entre $16,5 \times 10^{-12}$ e $19,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, dependendo da percentagem de incorporação de CRP (Quadro 3).

O coeficiente de migração de cloretos foi pouco influenciado pelo tipo de ligante. No entanto, este parâmetro teve tendência para ser ligeiramente superior nos betões com CRP do que no

betão de referência, em especial, para percentagens de incorporação para 15% e 30% CRP (Figura 3). Contrariamente ao mencionado para as propriedades de transporte anteriormente referidas (absorção capilar e permeabilidade ao oxigénio), o coeficiente de migração de cloretos não depende da humidade relativa, uma vez que os provetes são ensaiados em condições saturadas. Além disso, o diâmetro crítico dos poros é menos relevante na difusão do que na permeabilidade [29]. Desta forma, o coeficiente de migração de cloretos deverá ser menos influenciado pelas diferenças no refinamento da microestrutura entre os betões com CRP e o betão de referência. Assim, esta propriedade de transporte é essencialmente afetada pela porosidade aberta, que deverá ser superior nos betões com CRP, dado que estes desenvolvem menor quantidade de produtos de hidratação externos com o tempo [27].

O coeficiente de migração de cloretos dos betões com CRP foi apenas até 12,5% superior (30% CRP) ao do betão de referência, tendo sido até 6% inferior no betão com 5% CRP (Figura 3). Neste caso, devido ao facto de a percentagem de incorporação ser reduzida (5% CRP), a necessidade de água e a trabalhabilidade não foram afetadas de forma relevante, tendo levado a uma densificação da microestrutura, e conseqüentemente, a uma melhoria, não só da resistência mecânica (Quadro 2), mas também da resistência à penetração de cloretos. Por outro lado, nos betões com maior percentagem de incorporação de CRP (40% CRP), a adição de uma quantidade elevada de SP promoveu uma melhoria da trabalhabilidade e da dispersão das partículas de ligante, que aliado à redução da relação a/l interpartícula, conduziu a uma redução do coeficiente de migração de cloretos.

3.4 Resistência à carbonatação

A Figura 4 apresenta o coeficiente de carbonatação de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP. Para até 40% CRP, o coeficiente de carbonatação variou entre 10,1 e 17,3 mm/ano^{0,5} (Quadro 3).

Em geral, exceto para 30% CRP, o coeficiente de carbonatação dos betões com CRP foi inferior ao do betão de referência (Figura 4). Por um lado, as matrizes de CR tendem a desenvolver menor quantidade de produtos de hidratação no tempo do que as matrizes de CEM I [11,27]. Além disso, devido à sua origem, o CR tende a apresentar maior quantidade de produtos carbonatados na sua composição do que o CEM I [2,11,27,30]. Assim, a quantidade de produtos carbonatáveis, e conseqüentemente, a resistência à carbonatação dos betões com CRP deveriam ser inferiores às do betão de referência. Por outro lado, conforme referido, a estrutura porosa das pastas de CRP tende a ser mais refinada do que a das de CEM I [11,27]. Assim, uma vez que, o ensaio acelerado de carbonatação foi realizado em condições intermédias de humidade de relativa (65±5%HR), em que apenas os poros de menor dimensão tendem a ficar preenchidos por água, parte dos poros mais finos dos betões com CRP não terá participado no mecanismo de carbonatação. Além disso, conforme mencionado, a introdução de um teor relevante de SP no betão com 40% CRP favoreceu a dispersão das partículas de ligante e a compactação do betão, que terá conduzido a um maior refinamento da microestrutura. Desta forma, a redução de produtos carbonatáveis devido à incorporação de CRP foi geralmente compensada pelo refinamento da microestrutura, tendo conduzido a resistências à carbonatação idênticas a superiores à do betão de referência.

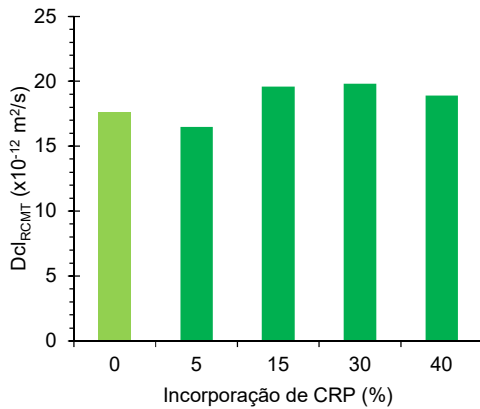


Figura 3 – Coeficiente de migração de cloretos (Dcl_{RCMT}) de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP

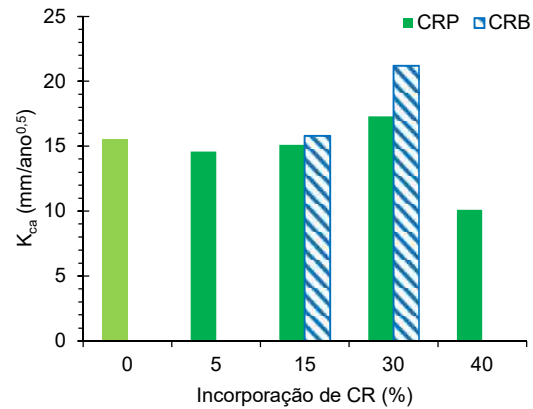


Figura 4 – Coeficiente de carbonatação (K_{ca}) de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP e CRB

O coeficiente de carbonatação dos betões com 15% CRP e CRB foi semelhante, enquanto o do betão com 30% CRB foi cerca de 23% superior ao betão com a mesma percentagem de incorporação de CRP, respetivamente (Figura 4). Conforme referido anteriormente, a contaminação do CRB com agregado residual, e conseqüente, maior relação a/fc associada aos betões com CRB, terá resultado numa menor quantidade de produtos de hidratação e de produtos carbonatáveis.

4. CONCLUSÕES

Este estudo caracterizou a durabilidade de betões com diferentes percentagens de incorporação de cimento reciclado de resíduos de pasta (CRP) e de betão (CRB), através de ensaios de absorção capilar, permeabilidade ao oxigénio, resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação.

Tanto o CRP como o CRB apresentaram capacidade de reidratação, tendo contribuído para o refinamento da microestrutura, e conseqüentemente para a durabilidade dos betões. No entanto, devido à sua necessidade água elevada, para atingir uma trabalhabilidade nos betões com maiores percentagens de incorporação de CRP ($\geq 30\%$) foi necessário recorrer à utilização de superplastificante (SP). Todavia, a resistência à compressão aos 28 dias foi pouco afetada pela incorporação de CRP e CRB.

A absorção capilar e a permeabilidade ao oxigénio foram muito influenciadas pela humidade relativa. Este aspeto, bem como a menor trabalhabilidade e o maior volume de vazios, resultou no aumento destas propriedades de transporte com a percentagem de incorporação de CRP até 15%. No entanto, para o betão com 30% CRP, a tendência foi oposta, devido ao refinamento da microestrutura, possivelmente associado à menor relação a/l interpartícula e a adição de SP.

A resistência à penetração de cloretos foi pouco afetada pela incorporação de CRP. No entanto, este parâmetro teve tendência para ser ligeiramente superior (até 12,5%) nos betões com CRP do que no betão de referência, associado à maior porosidade aberta destes betões.

A resistência à carbonatação dos betões com CRP foi geralmente inferior à do betão de referência, sugerindo que a redução da quantidade de produtos de hidratação e de substâncias carbonatáveis terá sido compensada pelo refinamento da microestrutura.

A durabilidade dos betões com CRB foi pouco afetada para percentagens de incorporação de até 15%. No entanto, para 30% CRB, verificou-se uma redução do seu desempenho, devido ao aumento da relação a/fc associada à contaminação deste ligante com agregado residual. Assim, a termoativação de cimento reciclado de resíduos de pasta e de betão demonstrou ser eficiente, promovendo uma melhoria relevante da durabilidade de betões com incorporação destes ligantes. Desta forma, o cimento reciclado apresenta-se como um ligante eco-eficiente, potencialmente alternativo aos atuais ligantes intensivos em carbono.

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 através do projeto FCT UIDB/ 04625/2020 e a colaboração da SECIL pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental. O terceiro autor gostaria de agradecer o financiamento da FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/146033/2019.

REFERÊNCIAS

- [1] Vyšvaril, M.; Bayer, P.; Chromá, M.; Rovnaníková, P. "Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 54, 2014, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>.
- [2] Wang, J.; Mu, M.; Liu, Y. "Recycled cement", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 190, 2018, 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>.
- [3] Zhang, L.; Ji, Y.; Huang, G.; Li, J.; Hu, Y. "Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 164, 2018, 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.232>.
- [4] Shui, Z.; Xuan, D.; Wan, H.; Cao, B. "Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 22, 2008, 1723–1729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012>.
- [5] Shui, Z.; Xuan, D.; Chen, W.; Yu, R.; Zhang, R. "Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 23, 2009, 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>.
- [6] Serpell, R.; Lopez, M. "Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials", *Cem. Concr. Compos.*, Vol. 64, 2015, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.003>.
- [7] Zhang, L.; Ji, Y.; Li, J.; Gao, F.; Huang, G. "Effect of retarders on the early hydration and mechanical properties of reactivated cementitious material", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 212, 2019, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.323>
- [8] Carriço, A.; Real, S.; Bogas, J.; Pereira, M. "Mortars with thermoactivated recycled cement: fresh and mechanical characterisation", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 256, 2020, 119502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119502>

- [9] Kalinowska-Wichrowska, K.; Kosior-Kazberuk, M.; Pawluczuk, E. "The properties of composites with recycled cement mortar used as a supplementary cementitious material", *Materials (Basel)*, Vol. 13, 2020, 64. <https://doi.org/10.3390/ma13010064>
- [10] Qian, D.; Yu, R.; Shui, Z.; Sun, Y.; Jiang, C. "A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material", *J. Clean. Prod.*, Vol. 261, 2020, 121231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121231>.
- [11] Real, S.; Carriço, A.; Bogas, J.; Guedes, M. "Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement", *Materials (Basel)*, Vol. 13, 2020, 3937. <https://doi.org/10.3390/ma13183937>.
- [12] Carriço, A.; Bogas, J.; Hu, S.; Real, S.; Pereira, M. "Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete", *J. Clean. Prod.*, Vol. 309, 2021, 127375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>.
- [13] Baldusco, R.; Nobre, T.; Angulo, S.; Quarcioni, V.; Cincotto, M. "Dehydration and rehydration of blast furnace slag cement", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 31, 2019, 04019132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002725)
- [14] E 64, Cement. Determination of density, LNEC specification. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1979.
- [15] NP EN 206, Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2013.
- [16] NP EN 12350-2, Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [17] NP EN 12350-6, Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [18] NP EN 12390-7, Ensaio do betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003.
- [19] NP EN 12390-3, Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003.
- [20] E 464, Betões. Metodologia prescritiva para vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), Lisboa, 2007.
- [21] Rilem TC 116-PCD. "Rilem TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. Recommendations. Tests for gas permeability of concrete, determination of the capillary absorption of water of hardened concrete", *Mater. Struct.*, Vol. 32, 1999, 174–179.
- [22] E 393, Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993.
- [23] E 392, Betões. Determinação da permeabilidade ao oxigénio, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993.
- [24] NT Build 492, Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiments, Published by NORDTEST, 1999.
- [25] E 391, Betões. Determinação da resistência à carbonatação, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993.
- [26] Kropp, J.; Hildisdorf, H.; Grube, H.; Andrade, C.; Nilsson, L.-O. "Transport mechanisms and definitions", em *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*. Editado por Kropp and Hildisdorf. State of the art report by Rilem technical committee TC 116- PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon, 1995.
- [27] Bogas, J.; Carriço, A.; Tenza-Abril, A. "Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 138, 2020, 106226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>.

- [28] Yu, R.; Shui, Z. "Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 49, 2013, 841–851. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.004>.
- [29] Ollivier, J.; Massat, M.; Parrott, L. "Parameters influencing transport characteristics", em *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*. Editado por Kropp and Hilsdorf. State of the art report by Rilem technical committee TC 116- PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon, 1995.
- [30] Carriço, A.; Bogas, J.; Guedes, M. "Thermoactivated cementitious materials – A review", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 250, 2020, 118873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>