

Betões com cimento reciclado: caracterização mecânica e durabilidade

Concrete with recycled cement: mechanical characterisation and durability

Ana Carriço

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

Sofia Real

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

José Bogas

Assistant Professor
CERIS, Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal
jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

O cimento reciclado (CR) é um novo ligante de baixo carbono que explora a reidratação dos compostos do cimento, através da termoativação de resíduos cimentícios. Neste estudo, caracteriza-se o comportamento no estado fresco e endurecido (resistência à compressão, carbonatação, penetração de cloretos e retração) de betões estruturais mais eco-eficientes produzidos com até 30% de substituição de cimento por CR. O CR foi obtido de resíduos de pasta (CRP) ou betão (CRB), seguindo um novo método de separação recentemente patenteado. O desempenho do CR foi confrontado com o de adições correntes (cinzas, fíler calcário). Verificou-se que até 15% CR, a resistência mecânica e a durabilidade não foram afetadas. Para percentagens superiores, o desempenho foi semelhante a ligeiramente inferior. Até 15% de incorporação, os betões com CRP e CRB apresentaram idêntico desempenho. O CR foi mais eficiente do que as restantes adições analisadas, posicionando-se como um material de substituição de grande potencial.

Palavras-chave: cimento reciclado termoativado, betão, separação de betão, caracterização mecânica, durabilidade, ecoeficiência

Abstract

Recycled cement (RC) is a new low-carbon binder that exploits the rehydration of cement compounds, through the thermoactivation of cement waste. In this study, the behaviour in the fresh and hardened state (compressive strength, carbonation, chloride penetration and shrinkage) of more eco-efficient structural concretes produced with up to 30% replacement of cement by RC is characterised. RC was obtained from cement paste waste (RCP) or concrete (RCC) following a newly patented separation method. The performance of CR was compared with that of current additions (fly ash, limestone filler). For up to 15% RC, mechanical strength and durability were not affected. For higher percentages, the performance was similar to slightly lower. Up to 15%

incorporation, concretes with RCP and RCC showed identical performance. RC was more efficient than the other analysed additions, positioning itself as a replacement material with great potential.

Keywords: Thermoactivated recycled cement, concrete, concrete separation, durability, eco-efficiency

1 Introdução

A indústria da construção está fortemente dependente do betão e como consequência do cimento utilizado na sua produção. A produção de cimento é responsável por aproximadamente 80-90% das emissões de CO₂ da cadeia de produção do betão [1], com 60% destas emissões a ocorrer na etapa de sinterização, resultante da descarbonatação da calcite contida nas matérias-primas [2].

O cimento reciclado termoativado (CR) constitui numa nova geração de ligantes que pretende dar resposta às crescentes preocupações ambientais, atuando simultaneamente na reutilização de resíduos e na redução da pegada de carbono. Trata-se de um ligante hidráulico obtido da reativação térmica de resíduos cimentícios, com capacidade de reidratar ao entrar novamente em contacto com a água. Se, por um lado, este processo permite reutilizar materiais previamente utilizados na indústria, por outro, a sua ativação é realizada com um tratamento térmico a baixa temperatura, que evita a etapa de descarbonatação (<700°C), reduzindo assim grande parte das emissões associadas à produção de cimento [3]. Num estudo recente, Sousa e Bogas [4] avaliaram as emissões de CO₂ e o consumo de energia do CR obtido a partir de resíduos de betão, tendo em consideração as várias etapas necessárias para sua produção, nomeadamente a libertação e separação dos constituintes do betão e a consequente reativação térmica da fração de pasta para a obtenção do CR. Desse estudo concluiu-se que a produção de CR, face ao clínquer normal, conduz a uma redução de pelo menos cerca de 30% nas emissões de CO₂ [4]. A investigação neste domínio tem sido essencialmente limitada a estudos que utilizavam pastas de cimento como material precursor do CR. Isso resulta da inexistência de um método de separação para betão compatível com a individualização e recuperação da fração cimentícia. A capacidade de reidratação do CR é atribuída à formação de um polimorfo de C₂S mais reativo, o α'_H -C₂S, formado a temperaturas de até 800°C [5]. Segundo um estudo recente, focado na evolução da hidratação [6], observou-se que este polimorfo reage principalmente entre as 24 horas e os 3 dias. Verificou-se também que, apesar da porosidade global ser semelhante, a estrutura porosa dos materiais cimentícios com CR tende a ser mais refinada do que a dos com cimento normal (CN), de igual razão água/ligante (a/l) [7].

A incorporação de CR em materiais de base cimentícia tem-se restringido essencialmente a estudos de caracterização de pastas de cimento. Dependendo de vários fatores, como o tipo de betão de origem, temperatura de termoativação, finura, estado de aglomeração e teor de CR, a resistência de pastas com CR pode corresponder a 0.2-0.8 da de pastas com CN [8]. Até ao momento, no âmbito do projeto *EcoHydb*, foi possível produzir misturas cimentícias com CN e 20, 50 e 100% CR, enquadradas nas classes de resistência 52,5, 42,5 e 32,5 da NP EN 197-1 [9]. A incorporação de CR em betão encontra-se ainda pouco explorada. Uma das principais barreiras à sua aplicação tem sido a redução acentuada de trabalhabilidade para elevados teores de CR [10, 11], devido à sua elevada exigência de água. Num dos poucos estudos realizados em betão, Qian et al. [11] reportaram um aumento progressivo da penetração de cloretos, para percentagens de incorporação superiores a 35%.

Neste estudo foram analisados betões com diferentes percentagens de substituição de cimento por CR, obtido de resíduos de pasta de cimento (5, 15, 30%), e CR resultante da fração cimentícia separada do betão, através de um novo método desenvolvido

pelos autores [12]. Foram ainda produzidos betões com igual incorporação de cinzas volantes (CV) e de fíler calcário (FC) para comparar o desempenho deste novo ligante com o de adições correntes. Os betões foram caracterizados no estado fresco (espalhamento e massa volúmica) e endurecido (resistência à compressão, resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, e retração por secagem).

2 Campanha experimental

2.1 Materiais

Os cimentos reciclados termoativados provenientes de pasta (CRP) e de betão (CRB), foram obtidos do tratamento de pastas e betões de origem produzidos em laboratório. O betão de referência e os materiais de origem foram produzidos com a/c de 0.55 e CEM I 42.5 R. A resistência à compressão, aos 28 dias, das pastas e betões de origem foi de 41 MPa e 52 MPa, respetivamente. Adotou-se uma cura de pelo menos 3 meses de forma a obter materiais suficientemente hidratados, que fossem representativos de estruturas existentes. Para atingir granulometrias semelhantes às do CEM I, a pasta de origem foi submetida a processos de britagem e moagem e peneirada no peneiro #250 μm . Posteriormente, o material foi termoactivado em forno rotativo, de acordo com o seguinte procedimento: aquecimento a $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até 150°C , temperatura à qual permaneceu durante 1 hora; aquecimento até 650°C durante 3 horas; arrefecimento dentro do forno até à temperatura ambiente. Este tratamento foi selecionado tendo por base estudos anteriores [13, 14]. O betão de origem foi submetido a um processo semelhante. Porém, antes da termoativação, e após os processos de britagem, para individualizar a fração cimentícia, as partículas de betão de dimensão inferior a 1 mm foram submetidas a um processo de separação recentemente desenvolvido e patenteado no nosso departamento. Este método é apresentado em detalhe em [15], permitindo obter uma fração cimentícia com cerca de 74% de pasta de cimento, 16% areia siliciosa e 10% brita calcária.

Foram realizadas as análises de termogravimetria (TG) e difração de raios-X (DRX), apresentadas na **Figura 1** e **Figura 2**, respetivamente, de modo a caracterizar os ligantes reciclados. A análise termogravimétrica, apresentada na **Figura 1** permitiu confirmar que ocorreu a desidratação efetiva dos materiais de origem na produção de CRP e CRB. Observou-se ainda que a descarbonatação não foi relevante e que o tratamento térmico selecionado (650°C) evitou a libertação significativa de CO_2 . Foi ainda observada a presença de uma quantidade não desprezável de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Isso sugere a possível pré-hidratação do CaO formado no tratamento térmico, durante o arrefecimento e/ou armazenamento do ligante.

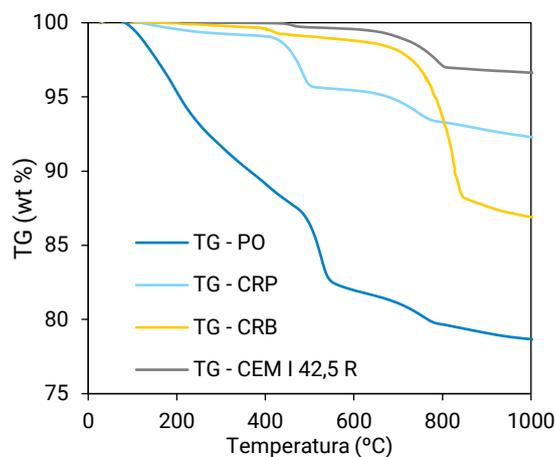


Figura 1. Análise de termogravimetria (TG) do cimento Portland (CEM I 42,5 R), da pasta de origem (PO), do cimento reciclado proveniente de pasta (CRP) e do cimento reciclado proveniente de betão (CRB)

Na análise TG do CRB observa-se uma perda de massa acentuada para temperaturas acima de 650°C devido à pequena fração de agregados de natureza calcária que compõe este ligante (**Figura 1**). Além disso, a análise TG permitiu também confirmar que a pasta de origem se encontrava bem hidratada. De facto, esta apresentou um coeficiente de hidratação, α_H , superior a 75%, sendo assim representativa de um resíduo cimentício antigo. Este coeficiente foi determinado através do quociente entre a água combinada na pasta de origem (estimado pela perda de massa entre 105°C e até cerca de 600°C) e a máxima quantidade de água de hidratação (admitindo que isso ocorre para uma relação a/c de 0,23).

A análise DRX permitiu identificar as principais fases cristalinas formadas nos ligantes obtidos da termoativação de resíduos cimentícios de pasta e da fração cimentícia do betão (**Figura 2**). Tanto no difractograma do CRP como do CRB, verificaram-se picos correspondentes a α'_H -C₂S, um polimorfo de C₂S, já identificado em investigações anteriores como o principal responsável pelo desenvolvimento de resistência nestes ligantes [5]. Foram também identificados CaO, CaCO₃ e aluminatos. O difractograma do CRB apresentou também picos correspondentes a quartzo, o que está de acordo com existência de uma quantidade reduzida (~16%) de areia siliciosa na composição deste ligante, assim como picos mais intensos relativos à calcite, devido à contaminação com agregado de natureza calcária (~10%).

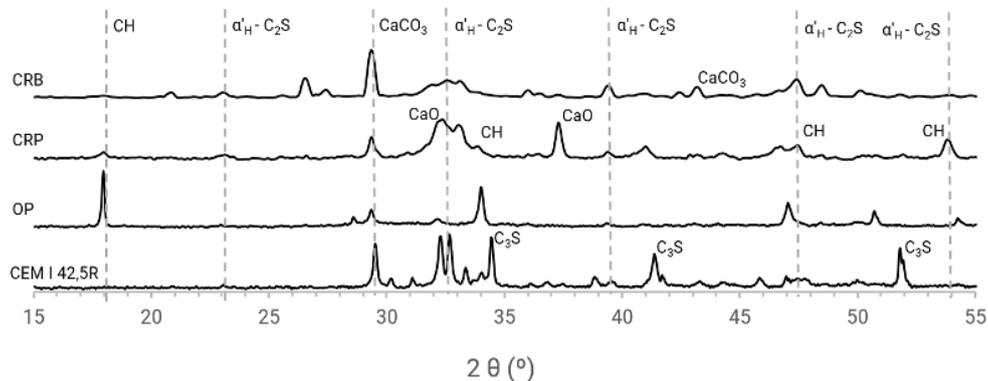


Figura 2. Análise de difração de raios-X (DRX) do cimento Portland (CEM I 42,5 R), da pasta de origem (PO), do cimento reciclado proveniente de pasta (CRP) e do cimento reciclado proveniente de betão (CRB)

No **Quadro 1** são apresentadas as principais características físicas dos ligantes utilizados neste estudo. A massa volúmica absoluta do CRP foi apenas ligeiramente inferior à do CEM I 42,5R. O mesmo não se verificou para a superfície específica que chega a ser 8,7 vezes superior à do CEM I 42,5R, sendo a principal responsável pela elevada reatividade inicial e exigência de água deste ligante. De facto, a relação água/ligante (a/l) necessária para obter consistência normal (NP EN 196-3 [16]) é de mais 0,43 do que a do CEM I. Esta exigência de água é também consequência da porosidade das partículas de CRP/CRB (cerca de 30% [7]), da quantidade de CaO formado durante o tratamento térmico e da aglomeração das partículas de elevada área superficial [17]. O CRB, por sua vez, devido à contaminação com partículas de agregado não poroso e não reativo, apresentou uma superfície específica de cerca de metade da do CRP, bem como uma relação a/l de consistência normal mais reduzida.

Quadro 1. Principais características dos ligantes utilizados

Ligante	Massa volúmica [g/cm ³]	Superfície específica BET [cm ² /g]	CaO livre [%]	Consistência normal [a/l]	Tempo de presa	
					Inicial [min]	Final [min]
CEM I	3,070 ^{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; ^{b)} Picnometria de hélio

Neste estudo foram também utilizadas cinzas volantes tipo F (CV) e fíler calcário (CV), para comparar o desempenho dos ligantes reciclados com o de adições tipicamente utilizadas na formulação de cimentos compostos. As propriedades destas adições encontram-se no **Quadro 2**.

Quadro 2. Principais propriedades das cinzas volantes (CV) e do fíler calcário (FC)

Adição	Massa volúmica ^{a)} [g/cm ³]	Índice de atividade [%]	Perda ao fogo (950°C) [%]	Resíduo insolúvel [%]	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	CaO+MgO [%]
CV	2,3	74,9	2,69	84,92	56,52+22,70+7,02	2,94+1,64
FC	2,6	-	42,96	<0,52	0,42+0,18+0,1	55,14+0,32

^{a)} LNEC E 64

Na produção do betão, foi utilizado brita calcária com frações granulométricas 2/8, 4/11,2 e 11,2/20 e massas volúmicas de 2650, 2680 e 2670 kg/m³, respetivamente. Como agregado fino, utilizou-se areia siliciosa com frações granulométricas 0/1 e 0/2 e 2600 kg/m³ de massa volúmica.

2.2 Composições

No presente estudo foram analisados 10 tipos de betão, cuja composição apresenta-se no **Quadro 3**. Os betões foram produzidos com uma relação a/l de 0,55 para um teor de ligante de 360 kg/m³. Foram estudadas diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP (5, 15, 30%), CRB (15 e 30%), CV (15 e 30%) e FC (15 e 30%). Os betões foram formulados com vista a atingir uma classe de abaixamento S3, tendo sido necessário recorrer a um SP de base policarboxílica para 30% de CRP e CRB.

Quadro 3. Composição das misturas de betão

Designação	V _{agrosso} [l/m ³]	V _{afino} [l/m ³]	V _{pasta} [l/m ³]	V _{água} [l/m ³]	SP [% Mligante]
CEM I	400	266	334	198	-
5% CRP	399	266	335	198	-
15% CRP	399	266	335	198	-
30% CRP	398	266	336	198	0,4
15% CRB	398	265	337	198	-
30% CRB	397	265	338	198	0,2
15% CV	396	264	340	198	-
30% CV	393	262	345	198	-
15 % FC	398	265	337	198	-
30% FC	396	264	340	198	-

2.3 Métodos de ensaio

No estado fresco foi determinado o abaixamento e a massa volúmica do betão, de acordo com a NP EN 12350-2 [18] e a NP EN 12350-6 [19], respetivamente. Após 24 horas da sua produção, os provetes foram retirados dos moldes e colocados, até à idade do respetivo ensaio, em câmara climática com HR > 95%. Os provetes destinados à medição da retração por secagem, após as 24 horas foram colocados na câmara de ambiente controlado (20±2 °C e HR=50 ± 5%) onde decorreu o ensaio.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com o disposto na norma NP EN 12390-3 [20], considerando-se três provetes (150x150x150 mm) por composição e idade de ensaio (3, 7, 28, 90 dias).

O ensaio de resistência à carbonatação acelerada foi realizado em provetes com ϕ 100x40 mm, de acordo com a LNEC E 391 [21]. Os provetes foram sujeitos a cura húmida até aos 7 dias, seguido de 21 dias em câmara a 20±2 °C e 5 HR=0±5%. De forma a garantir a penetração unidirecional do CO₂, o topo e a base de cada provete foram cobertos com tinta epóxi. Os provetes foram colocados em câmara de carbonatação a 23±3 °C, 65±5%HR e 2,5±0,1%CO₂, aos 28 dias. Após 28, 56 e 91 dias, foi medida a profundidade de carbonatação, através da pulverização das faces seccionadas do provete com uma solução de 0,2% de fenolftaleína. O coeficiente de carbonatação (K_{ca}) foi determinado através da inclinação da reta de regressão linear da profundidade de carbonatação em função da raiz do tempo [22].

A resistência à penetração de cloretos foi determinada através do ensaio de migração acelerada de cloretos (RCMT), em provetes com ϕ 100x50 mm, com base na NT build

492 [23]. A cura foi idêntica à dos provetes destinados ao ensaio de carbonatação acelerada, exceto que após 28 dias os provetes foram saturados em vácuo durante 24 horas com uma solução de hidróxido de cálcio, antes do ensaio. O objectivo é forçar a migração de iões cloreto através do provete, aplicando neste uma diferença de potencial por tempo determinado. 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_{ClRCMT}) foi determinado por Eq. (1), 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).

$$D_{ClRCMT} = \frac{0,0239 \times (273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times \left(x_d - 0,0238 \times \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times x_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

Seguindo o disposto na especificação LNEC E 398 [24], a retração por secagem foi determinada em dois prismas (350x100x100 mm) por composição. Antes do ensaio foram colocados dois pinos na face do provete distanciados de 200 mm. A retração foi medida com recurso a um comparador com precisão de 1 µm e curso de 5,0 mm.

3 Discussão de resultados

No **Quadro 4** são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios realizados no estado fresco (abaixamento e massa volúmica) e no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à carbonatação, resistência à penetração de cloretos e retração por secagem). Os coeficientes de variação dos ensaios de resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos foram geralmente inferiores a 5%.

Quadro 4. Principais resultados obtidos no estado fresco, resistência à compressão, resistência à carbonatação, resistência à penetração de cloretos e retração por secagem

Designação	a/l	Abaix. [mm]	Massa volúmica fresca [kg/m ³]	Massa volúmica seca [kg/m ³]	V _{vazios} [l/m ³]	fcm _{3d} [MPa]	CV [%]	fcm _{7d} [MPa]	CV [%]	fcm _{28d} [MPa]	CV [%]	fcm _{90d} [MPa]	CV [%]	Dcl _{RCMT} [x10 ⁻¹² m ² /s]	CV [%]	Kca [mm/ano ^{0,5}]	ε _{cst90d} [x10 ⁻⁶ m/m]
CEM I	0,55	150	2330	2220	13	33,7	1	42,0	3	52,2	1	59,2	0	17,6	6	15,5	595
5% CRP	0,55	130	2320	2220	17	35,8	1	44,5	1	53,2	3	-	-	16,5	5	14,6	-
15% CRP	0,55	90	2290	2190	27	34,7	1	42,9	3	52,4	1	56,9	2	19,6	2	15,1	567
30% CRP	0,55	110	2280	2170	30	33,7	2	40,1	0	47,8	2	50,7	5	19,8	2	17,3	682
15% CRB	0,55	120	2290	2190	28	30,0	1	42,2	2	52,0	1	-	-	14,7	1	15,8	578
30% CRB	0,55	130	2270	2160	33	24,2	1	36,5	1	45,0	0	-	-	16,7	3	21,2	668
15% CV	0,55	190	2280	2190	26	27,2	1	33,3	2	44,2	0	56,5	2	16,2	6	22,5	500
30% CV	0,55	180	2310	2170	11	20,8	2	24,9	1	38,4	1	50,1	1	15,3	5	31,4	590
15 % FC	0,55	170	2310	2190	17	27,5	1	35,2	1	42,9	1	47,3	1	20,8	6	24,2	374
30% FC	0,55	150	2300	2150	19	23,5	1	27,4	2	33,8	5	36,1	4	33,5	5	36,8	557

3.1 Estado fresco

Em geral, foi atingida a classe de abaixamento (S3) inicialmente pretendida (**Quadro 4**). No entanto, para a mesma relação a/l ocorreu uma redução do abaixamento com a incorporação de CR. Isso resulta da maior exigência de água do CR. Por esse motivo, no betão com 30% de substituição de CEM I por CRP e CRB foi necessário adicionar SP, de modo a obter o abaixamento desejado (100-150 mm). Verificou-se ainda que, nestas circunstâncias, a dosagem de SP necessária para obter uma dada percentagem de redução de água foi superior nos betões com CR. A maior área superficial das partículas de CR, que promove a maior adsorção superficial, faz aumentar o ponto de saturação do SP.

O abaixamento foi superior nos betões com CRB, devido à contaminação deste ligante com agregado (24%), o que fez aumentar a relação água/fração cimentícia (a/fc) para uma mesma relação a/l. De facto, nos dois betões produzidos com 15% e 30% de CRB, apesar da relação a/l ser de 0,55, a relação a/fc é de 0,57 e 0,60, respetivamente. Como esperado, as cinzas volantes promoveram a trabalhabilidade dos betões devido à esfericidade das suas partículas [14]. Por outro lado, a substituição de CEM I por fíler não provocou alterações relevantes na trabalhabilidade do betão.

Com a incorporação de CR, a massa volúmica no estado fresco diminuiu apenas ligeiramente (até 2,6%), justificado pelo ligeiro aumento do volume de pasta nestes betões e à redução de trabalhabilidade que tende a afetar negativamente a sua compacidade (**Quadro 4**).

3.2 Resistência à compressão

As resistências à compressão aos 3, 7, 28 e 90 dias dos betões em função da percentagem de substituição de CEM I por CRP apresentam-se na **Figura 3**. Para a percentagem de substituição de 5% de CEM I por CRP, a resistência à compressão do betão com CRP foi ligeiramente superior à do betão de referência. A elevada área superficial das partículas de CRP, que promove a nucleação de produtos de hidratação, melhorando o refinamento da microestrutura, poderá ter contribuído para esse resultado. Verificou-se, todavia, uma tendência para a redução da resistência à compressão, para percentagens de substituição superiores a 15% CRP. Para além da diluição ocorrida no teor de CEM I, existe uma redução da trabalhabilidade e compacidade dos betões. Ainda assim, para 30% de substituição de CEM I por CRP a redução de resistência foi de apenas 8% aos 28 dias. De facto, foi possível produzir betões com resistências à compressão aos 28 dias de 48 MPa, pelo menos enquadráveis na classe de resistência C30/37 de acordo com a NP EN 206 [25].

Independentemente da percentagem de incorporação, a resistência à compressão dos betões com CRP aumentou ao longo do tempo (**Figura 3**). Porém, observou-se uma ligeira estabilização da evolução da resistência entre os 28 e os 90 dias, para teores de CRP de 30%. Segundo Zhang et al. [26], para percentagens de substituição elevadas de CEM I por CRP, a resistência à compressão a longo prazo tende a atingir um valor máximo, devido à menor rigidez das partículas de CRP. Verificou-se igualmente que a resistência inicial dos betões com CRP foi consistentemente superior à obtida no betão de referência. De facto, como referido, a maior reatividade do $\alpha'_H\text{-C}_2\text{S}$ verifica-se nos primeiros 3 dias de hidratação [6]. Além disto, admite-se que, devido à sua natureza porosa, parte da água da mistura é absorvida nas partículas de CRP.

Assim, para a mesma relação a/l, ocorre uma aproximação das partículas que facilita a interligação dos produtos de hidratação, sobretudo em idades mais jovens [7].

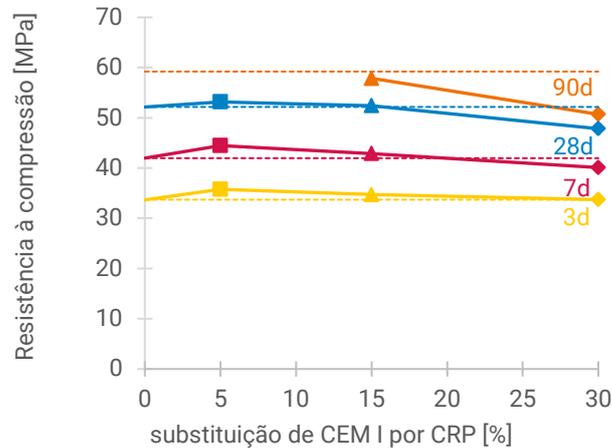


Figura 3. Resistência à compressão de betões com a/c de 0,55 para diferentes percentagens de incorporação de CRP aos 3, 7, 28 e 90 dias.

Na **Figura 4** comparam-se as resistências à compressão aos 28 dias das composições de betão com até 30% de CRP e CRB. Apesar do CRB estar contaminado com agregado, a resistência à compressão foi semelhante nos betões com 15% de substituição de CEM I por CRP ou CRB.

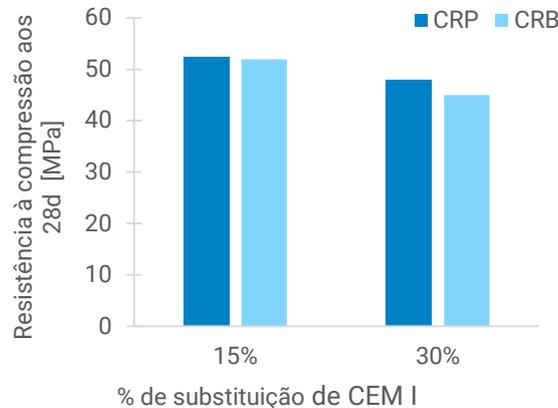


Figura 4. Resistência compressão aos 28 dias de betões com 15 e 30% de substituição de CEM I por CRP e CRB

Como referido, nos betões com CRB, a relação a/fc é de cerca de 0,57 e 0,60 para betão com 15% e 30%, respetivamente, considerando-se que a fração cimentícia corresponde a 74% (em peso) do CRB (2.1). Até 15% de substituição, o efeito de nucleação do CRB terá compensado o ligeiro aumento da relação a/fc. No entanto, para 30% de substituição, a maior relação a/fc teve mais relevância na redução da resistência à compressão. Ainda assim, mesmo para 30% CRB, esta redução foi inferior a 6%, demonstrando que o comportamento do ligante obtido pelo processo de separação acima referido permite um desempenho à compressão equiparável ao do ligante obtido de resíduos de pasta pura.

A resistência compressão aos 3 e 91 dias de betões com 30% de substituição de CEM I por CRP, CV e FC apresenta-se na **Figura 5**. Em idades jovens, os betões com CRP destacaram-se dos betões com CV e FC. Aos 3 dias, a resistência à compressão do betão com 30% CRP foi 62% e 43% superior à dos betões com CV e FC, respetivamente. Demonstra-se assim a maior reatividade inicial do CRP face a adições correntemente utilizadas na indústria da construção. A longo prazo, a resistência desenvolvida nos betões com 30% CRP também permitiu acompanhar o desenvolvimento das reações pozolânicas desenvolvidas nos betões com cinzas. Inclusivamente, a resistência à compressão aos 91 dias superou ligeiramente a dos betões com CV.

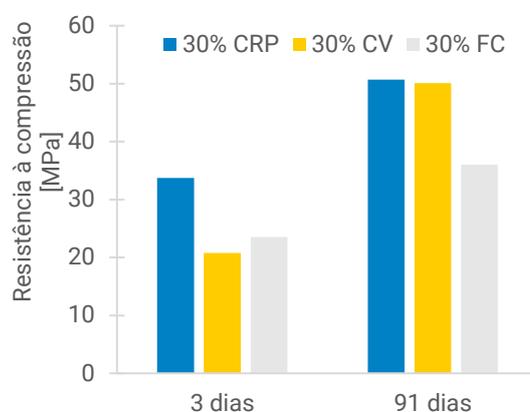


Figura 5. Resistência compressão aos 3 e 91 dias de betões com 30% de substituição de CEM I por CRP, CV e FC

3.3 Resistência à carbonatação

Na **Figura 6** apresenta-se o coeficiente de carbonatação, K_{ca} , de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP. Para o betão de referência com CEM I, o K_{ca} foi de $15,5 \text{ mm/ano}^{0,5}$. Como se pode observar na **Figura 6**, exceto para 30% de incorporação, o coeficiente de carbonatação dos betões com CRP foi ligeiramente inferior (~3%) ao do betão de referência. Para 30% de CRP, o K_{ca} foi cerca de 12% superior ao do betão de referência.

A progressão da carbonatação no betão é principalmente condicionada pela estrutura porosa da matriz de pasta e pela quantidade de produtos de hidratação carbonatáveis [27]. Por um lado, os materiais cimentícios com CR tendem a desenvolver matrizes com menor quantidade de produtos de hidratação a longo prazo [6]. Por outro lado, para uma mesma razão a/l, as matrizes de CRP tendem a apresentar uma estrutura porosa mais refinada que as de CEM I, ou seja, uma maior quantidade de poros de menor diâmetro para uma mesma porosidade global [7]. Nas condições de humidade relativa a que se realizou o ensaio ($HR=65\pm 5\%HR$), os poros mais finos tendem a estar saturados, não participando no mecanismo de carbonatação. Assim, a eventual redução de produtos carbonatáveis devido à incorporação de CRP terá sido compensada pelo refinamento da microestrutura, conduzindo a resistências à carbonatação semelhantes à do betão de referência.

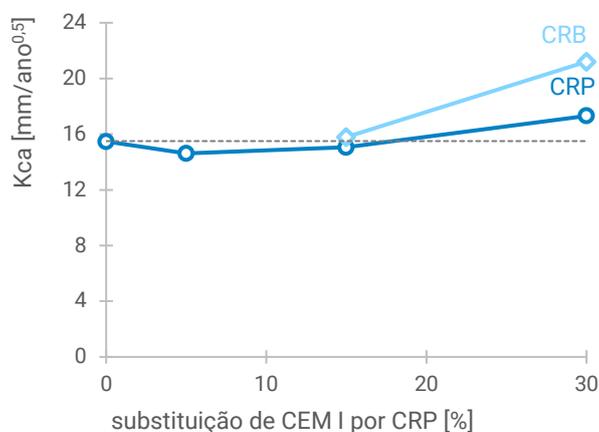


Figura 6. Coeficiente de carbonatação (K_{ca}) de betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP

O coeficiente de carbonatação foi semelhante nos betões com 15% CRP e 15 % CRB. Estes resultados corroboram com a tendência observada na resistência à compressão (3.2). Todavia, o K_{ca} do betão com 30% CRB foi cerca de 23% superior ao do betão com a mesma percentagem de incorporação de CRP (**Figura 6**). Neste caso, a contaminação do CRB com agregado, aumentando a razão a/fc , terá resultado numa estrutura mais aberta e na redução da quantidade de produtos carbonatáveis.

Na **Figura 7** resumem-se os coeficientes de carbonatação dos betões com CRP, CV e FC para 15 e 30% de substituição de CEM I por estas adições. Os betões com CRP revelaram um desempenho à carbonatação superior ao das restantes adições consideradas neste estudo, apresentando coeficientes de carbonatação 33-45% e 38-53% inferiores aos dos betões com CV e FC, respetivamente. Como já referido, o CRB é uma adição ativa com capacidade de desenvolver produtos de hidratação e promover o refinamento da microestrutura. Se, por um lado, o FC é uma adição que pode ser considerada quimicamente inerte e sem atividade pozolânica que provoca um aumento da razão a/c para um dado a/l , por outro lado, as cinzas volantes quando utilizadas em substituição do cimento, acabam por provocar uma redução da capacidade de fixação de CO_2 , devido ao consumo de $Ca(OH)_2$ nas reações pozolânicas.

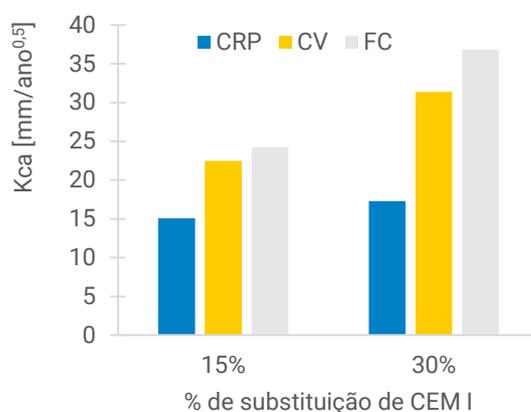


Figura 7. Coeficiente de carbonatação (K_{ca}) de betões com 15 e 30% de substituição de CEM I por CRP, CV e FC

3.4 Resistência à penetração de cloretos

O coeficiente de migração de cloretos de betões com diferentes percentagens de incorporação de CRP é apresentado na **Figura 8**. Para o betão de referência o coeficiente de migração de cloretos foi de $17,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

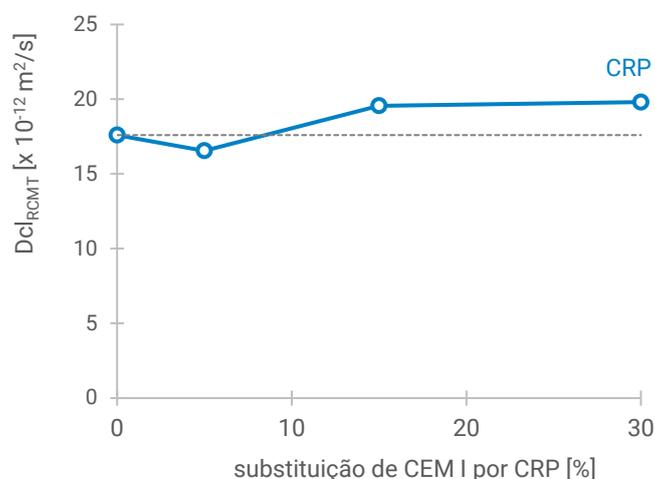


Figura 8. Coeficiente de migração de cloretos ($D_{cl_{RCMT}}$) de betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP

O coeficiente de migração de cloretos não foi significativamente afetado pelo tipo de ligante. Porém, verificou-se um ligeiro aumento ($\cong 12\%$) deste parâmetro para 15% e 30% CRP em substituição de CEM I. Por um lado, visto que os provetes são ensaiados em condições saturadas, o coeficiente de migração de cloretos não depende da humidade relativa ambiente. Por outro lado, o diâmetro crítico dos poros é menos relevante na difusão do que na permeabilidade [28]. Consequentemente, as diferenças de refinamento da microestrutura dos betões com CRP e o betão de referência assumem menor influência no coeficiente de migração de cloretos, sendo esta propriedade essencialmente afetada pela porosidade aberta. Como já referido, o CRP tende a desenvolver menor quantidade de produtos de hidratação a longo prazo. Assim, a porosidade aberta deverá aumentar com o aumento da percentagem de CRP [7].

Os coeficientes de migração de cloretos dos betões com 15 e 30% de CRP, CV e FC apresentam-se na **Figura 9**. O desempenho dos betões com CRP foi intermédio do obtido nos betões com CV e FC, tendo sido mais pronunciada a diferença para teores de 30% de incorporação. O menor coeficiente de migração nos betões com cinzas resulta da sua maior capacidade de fixação de cloretos, e da alteração da composição da solução dos poros [29]. Por outro lado, nos betões com 30% FC observaram-se coeficientes de migração 70% superiores ao do betão com igual teor de CRP. Neste caso, o efeito de diluição do teor de clínquer afetou, não só a microestrutura destes betões, como também a capacidade de fixação de cloretos.

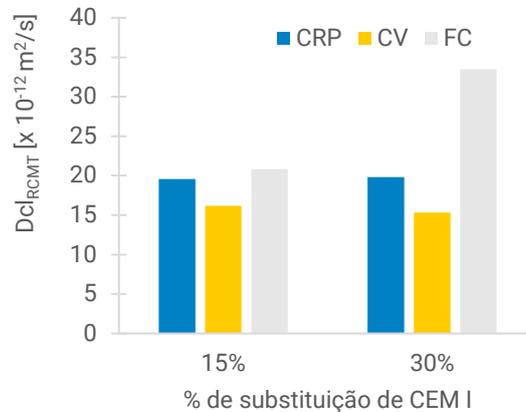


Figura 9. Coeficiente de migração de cloretos (D_{clRCMT}) de betões com 15 e 30% de substituição de CEM I por CRP, CV e FC

3.5 Retração por secagem

Na **Figura 10** apresenta-se a evolução da retração por secagem até 90 dias de idade dos betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP. Em geral, manteve-se a tendência observada na resistência à compressão no que se refere à influência do tipo de ligante. Face ao betão de referência, verificou-se a redução da retração por secagem para 15% de CRP, mas um aumento para 30% CRP. Visto que os betões foram produzidos com a mesma relação a/l, a retração por secagem dependeu essencialmente do refinamento da microestrutura e da rigidez da matriz cimentícia. Como referido, os betões com até 15% CRP apresentaram microestruturas mais densas. Porém, as partículas de CRP apresentam maior porosidade e menor rigidez do que as partículas de CEM I [6, 26]. Assim, até 15% de incorporação de CRP, a retração por secagem foi semelhante a ligeiramente inferior à do betão de referência. Porém, a retração aos 90 dias foi cerca de 15% superior nos betões com 30% CRP. Neste caso, a microestrutura foi menos densa (3.2), e o volume de pasta foi ligeiramente superior ao do betão de referência (**Quadro 3**).

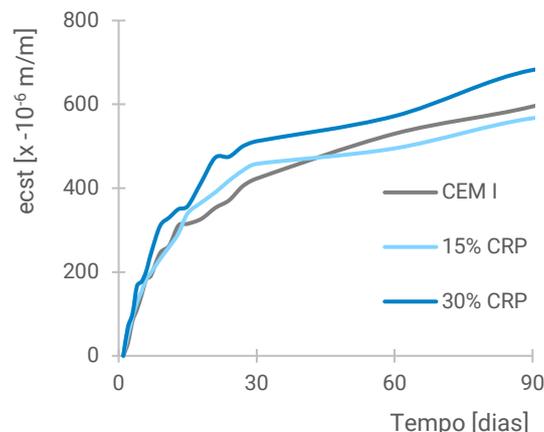


Figura 10. Retração por secagem ($ecst$) ao longo do tempo para betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I com CRP

Na **Figura 11** Apresenta-se a retração por secagem em betões com 30% de substituição de CEM I por CRP ou CRB. Verifica-se que a retração ao longo do tempo foi semelhante nos dois tipos de betão. Por um lado, o betão com CRB apresentaram maior relação a/fc e, portanto, menor rigidez e maior volume de água evaporável do que o betão com CRP. Por outro lado, o volume de pasta foi também mais reduzido nos betões com CRB, dado que este ligante acaba por conter cerca de 26% de agregado na sua composição.

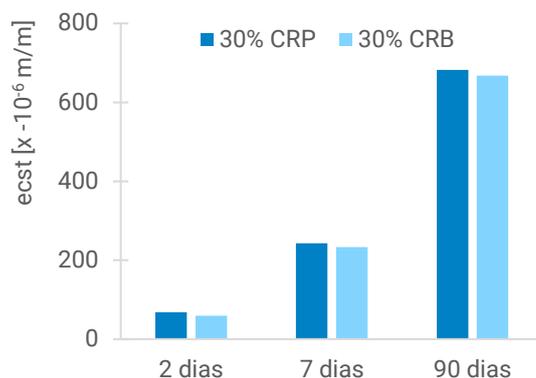


Figura 11. Retração por secagem (ecst) ao longo do tempo para betões com substituição de 30% de CEM I por CRP ou CRB.

Na **Figura 12** apresenta-se a retração por secagem de betões com CRP, CV e FC, para 30% de substituição de CEM I. A incorporação de CV ou FC conduziu a menores retrações após 90 dias do que as observadas em betões com igual teor de CRP, em 13% e 18%, respetivamente. De facto, apesar de CV e FC estarem associadas a microestruturas menos densas, a menor rigidez dos betões é compensada pela menor atividade destas adições, promovendo a formação de uma porosidade mais grosseira, em que a ação capilar é menos importante.

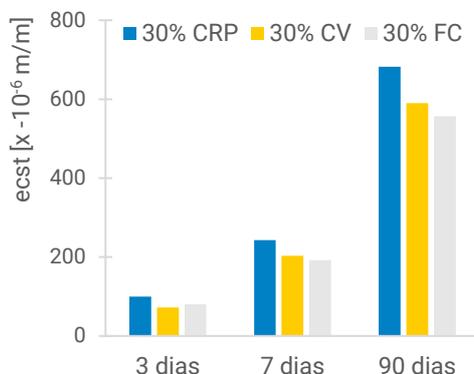


Figura 12. Retração por secagem (ecst) ao longo do tempo para betões com 30% de CRP, CV e FC em substituição de CEM I

4 Conclusões

No presente estudo foi analisado o desempenho mecânico e de propriedades relacionadas com a durabilidade de betões com até 30% de substituição de cimento por um novo ligante reciclado de maior ecoeficiência.

As várias propriedades analisadas, nomeadamente a trabalhabilidade, a resistência mecânica, a retração e a resistência à carbonatação e à penetração de cloretos do betão, não foram significativamente afetadas para teores de incorporação de até 15% CRP. No entanto, para 30% CRP, a redução da trabalhabilidade diminuiu a compacidade do betão, com influência no desempenho mecânico e na durabilidade. Existe ainda um menor desenvolvimento de produtos de hidratação a longo prazo do CR, que se reflete nestas propriedades, principalmente quando se consideram maiores percentagens deste ligante em substituição de CEM I. Ainda assim, para 30% CRP foi possível produzir betões correntes, pelo menos enquadrados na classe de resistência C30/37. Por sua vez, a resistência inicial dos betões com CRP foi consistentemente superior à do betão de referência.

Até 15% de substituição, o cimento reciclado obtido a partir de betão teve um desempenho similar ao resultante da termoativação de pasta pura. Desse modo, pode-se concluir que o método de separação de resíduos de betão desenvolvido pelos autores foi eficiente na obtenção de frações cimentícias pouco contaminadas. No entanto, para 30% de substituição, o aumento da relação a/f_c , devido à contaminação do ligante por agregado, afetou o seu desempenho.

O CR demonstrou elevada capacidade de reidratação, apresentando uma reatividade inicial significativamente superior à de adições minerais correntes (CV e FC). Acrescente-se que a resistência do betão a longo prazo (90 dias) foi comparável à do betão com CV. Conforme esperado, os betões com cinzas apresentaram os menores coeficientes de difusão de cloretos, com o CR associado a um desempenho equivalente ao CEM I e superior ao FC. Em geral, pode-se concluir que o CRP provou ser tão ou mais eficiente do que qualquer uma das adições minerais analisadas neste estudo, mostrando assim o seu grande potencial como material de substituição do cimento na produção de betão.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento desta investigação através do projeto PTDC/ECI-COM-28308/2017 e da unidade de projeto UIDB/ECI/04625/2020 (CERIS), assim como à SECIL por providenciar os materiais para a campanha experimental. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer à FCT o apoio financeiro prestado pela bolsa SFRH/BD/146033/2019.

6 Referências

- [1] Flower D.J.M., Sanjayan J.G., Green house gas emissions due to concrete manufacture, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2007, 12, 282–288
- [2] WBCS, IEA, Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050, 2009
- [3] Carriço A., Bogas J.A., Guedes M., Thermoactivated cementitious materials - a review,

- Constr. Build. Mater., 2020, 250, 118873
- [4] Sousa V., Bogas J.A., Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production, *J. Clean. Prod.*, 2021, 306, 127277
- [5] Serpell R., Zunino F., Recycling of hydrated cement pastes by synthesis of α' H-C2S, *Cem. Concr. Res.*, 2017, 100, 398–412
- [6] Bogas J.A., Real S., Carriço A., Abrantes J.C.C., Guedes M., Hydration and phase development of recycled cement, *Cem. Concr. Compos.*, 2022, 127, 104405
- [7] Bogas J.A., Carriço A., Tenza-Abril A.J., Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes, *Cem. Concr. Res.*, 2020, 138, 106226
- [8] Alexandre Bogas J., Carriço A., Real S., Thermoactivated Recycled Cement, *IntechOpen*, 2022
- [9] Carriço A., Real S., Bogas J.A., Pereira M.F.C., Mortars with thermo activated recycled cement: fresh and mechanical characterisation, *Constr. Build. Mater.*, 2020, 256, 119502
- [10] Letelier V., Tarela E., Muñoz P., Moriconi G., Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete, *Constr. Build. Mater.*, 2017, 132, 365–375
- [11] Qian D., Yu R., Shui Z., Sun Y., Jiang C., Zhou F., *et al.*, A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material, *J. Clean. Prod.*, 2020, 261, 121231
- [12] Bogas J.A., Pereira M., Guedes M., Carriço A., Hu S., Sousa R., Process for separating the components of hardened concrete waste for producing recycled cement, *PCT/PT021/050005*, 2021
- [13] Real S., Carriço A., Bogas J.A., Guedes M., Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement, *Materials (Basel)*, 2020, 13, 3937
- [14] Carriço A., Real S., Bogas J., Pereira M., Mortars with thermoactivated recycled cement: fresh and mechanical characterisation, *Constr. Build. Mater.*, 2020, 256, 119502
- [15] Carriço A., Bogas J.A., Hu S., Real S., Costa Pereira M.F., Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete, *J. Clean. Prod.*, 2021, 309
- [16] EN 196-3, Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness., European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2016
- [17] Zhang L., Ji Y., Huang G., Gao F., Dong Z., Effect of retarders on the early hydration and mechanical properties of reactivated cementitious material, *Constr. Build. Mater.*, 2019, 212, 192–201
- [18] NP EN 12350-2, Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002
- [19] NP EN 12350-6, Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002
- [20] NP EN 12390-3, Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003
- [21] E 391, Betões. Determinação da resistência à carbonatação, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993
- [22] Kropp J., Hildisdorf H., Grube H., Andrade C., Nilsson L.-O., Transport mechanisms and definitions, In *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*. Edited by 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
- [23] NT Build 492, Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady State Migration Experiments, Published by NORDTEST, 1999
- [24] LNEC E 398. Concrete. Determination of Shrinkage and Expansion; Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC): Lisbon, Portugal, 1993., n.d.
- [25] NP EN 206, Betão. Especificação, desempenho, produção e conformidade, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2013
- [26] 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., 2018, 164, 525–534
- [27] Bertolini L., Elsener B., Polder R., Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd ed., WILEY-VCH, 2013
- [28] Ollivier J., Massat M., Parrott L., Parameters influencing transport characteristics, In Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability. Edited by 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
- [29] Pontes J., Bogas A., Real S., Silva A., The Rapid Chloride Migration Test in Assessing the Chloride Penetration Resistance of Normal and Lightweight Concrete, Appl. Sci., 2021, 11, 7251