

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BETÕES COM CIMENTO RECICLADO TERMOATIVADO



Ana Carriço

Doutoranda
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt



José A. Bogas

Professor Associado
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

jose.bogas@tecnico.ulisboa.pt



Sofia Real

Investigadora
CERIS, IST, UL
Lisboa, Portugal

sofia.real@tecnico.ulisboa.pt

SUMÁRIO

Este estudo analisou a influência da incorporação de cimento reciclado (CR), resultante da ativação térmica de resíduos cimentícios, no comportamento mecânico de betões. O cimento reciclado foi obtido de pastas de cimento hidratadas e da fração cimentícia de betão recuperada através de um novo método de separação. Estes resíduos cimentícios foram posteriormente sujeitos a um tratamento térmico a temperaturas muito inferiores às necessárias na obtenção de clínquer a partir de matérias-primas tradicionais. Foram analisadas diferentes percentagens de incorporação de CR (0-40%) em substituição de cimento Portland. Os ensaios abrangeram a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a velocidade de propagação de ultrassons e a retração. De um modo geral, a resistência mecânica e a velocidade de propagação de ultrassons não foram significativamente influenciadas pela incorporação de CR. O módulo de elasticidade diminuiu e a retração teve tendência a aumentar para teores elevados de CR. Até 15% de incorporação o cimento reciclado obtido da fração cimentícia de betão apresentou um comportamento semelhante ao cimento reciclado obtido de pasta.

Palavras-chave: cimento reciclado, betão eco-eficiente, resistência mecânica, retração.

1. INTRODUÇÃO

O cimento reciclado termoativado (CR), tem vindo a emergir como um potencial material de substituição do cimento Portland, que apresenta uma redução significativa nas emissões de CO₂ na fase de produção [1]. Este novo ligante é obtido através da ativação térmica de resíduos cimentícios a temperaturas (650-700°C) muito inferiores às utilizadas na produção de clínquer (1450°C). Desta forma é recuperada a hidráulidade do cimento através da formação de polimorfos de C₂S mais reativos (a_H-C₂S). O CR é caracterizado por partículas com superfície específica bastante superior à do cimento, o que conduz a uma exigência de água elevada [2].

Neste domínio, a maioria dos estudos tende a focar-se na reidratação destes ligantes e na sua incorporação em materiais cimentícios, nomeadamente pastas e argamassas [2], sendo ainda escassos os estudos realizados em betão [3, 4]. Letelier et al. [3] investigaram o efeito combinado da incorporação de agregados reciclados e CR no betão. Para percentagens de incorporação entre 5–15% CR, os autores observaram que a percentagem de incorporação de CR não influenciou significativamente a resistência à compressão e flexão. Por outro lado, Qian et al. [4] investigaram a retração autógena de betão de alto desempenho, constatando que a retração autogénea aumentou com a percentagem de incorporação de CR.

Assim, o presente estudo focou-se na caracterização no estado fresco e no desempenho mecânico, bem como na retração total a longo prazo de betões produzidos com diferentes percentagens de substituição de CEM I por cimento reciclado termoativado obtido de resíduos de pasta e de betão.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os cimentos reciclados termoativados utilizados neste estudo foram obtidos de resíduos cimentícios de pasta (CRP) e de betão (CRB) produzidos em laboratório. A pasta de origem do CRP foi produzida com CEM I 42,5R e uma relação água/cimento (a/c) de 0,55, tendo-se obtido uma resistência à compressão de 41 MPa aos 28 dias. O betão de origem do CRB foi também produzido com uma relação a/c de 0,55, teor de ligante 360 kg/m³ e uma resistência à compressão aos 28 dias de 52 MPa. Os materiais de origem permaneceram em ambiente de laboratório por mais de 3 meses após a sua produção. Após este período, a pasta de origem foi moída e peneirada de forma a reduzir a dimensão máxima das partículas a 250 µm. O tratamento foi realizado num forno rotativo tendo sido seguido a seguinte curva de aquecimento: aquecimento a 10°C/min até 150°C, permanecendo neste patamar de temperatura durante 1 hora; aquecimento a 10°C/min até 650°C, temperatura máxima de tratamento à qual permanece durante 3 horas; e arrefecimento dentro do dispositivo de aquecimento até temperatura ambiente. No fim deste processo obteve-se o CRP. Por outro lado, o betão de origem foi submetido a um novo método de libertação e individualização da fração cimentícia patenteado e desenvolvido no Instituto Superior Técnico e descrito em [5]. Resumidamente, o método compreende duas etapas principais, a cominuição do betão e a separação magnética, que possibilitam a recuperação de uma fração cimentícia de elevada

pureza e uma fração de agregado com reduzido grau de contaminação. Esta fração foi submetida ao tratamento térmico acima descrito, obtendo-se um produto final, CRB, composto por pasta de cimento (74%), areia siliciosa (16%) e brita calcária (10%). Como ligante de referência utilizou-se CEM I 42,5R (CEM I). No Quadro 1 encontram-se as principais características dos ligantes cimentícios utilizados neste estudo.

Quadro 1. Principais características dos ligantes cimentícios

Ligante	Densidade absoluta	Superfície específica BET	CaO livre	Consistência normal	Tempo de presa	
	[g/cm ³]	[cm ² /g]	[%]	[a/l]	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

Os ligantes termoativados, CRP e CRB, apresentaram uma densidade absoluta semelhante à do CEM I. No entanto, a sua superfície específica chegou a ser quase 9 vezes superior. Esta característica é consequência da desidratação que ocorre durante o tratamento térmico e tem uma influência determinante na elevada reatividade e exigência de água dos ligantes termoativados. Outro fator que contribui para o aumento da exigência de água é a porosidade das partículas de CR, que chega a ser de 30%. A presença de partículas de agregado no CRB, não absorventes e não reativas, acaba por reduzir tanto a superfície específica como a exigência de água deste ligante comparativamente ao CRP.

Além dos ligantes acima descritos, para a produção de betão, foram também utilizados dois tipos de agregado: brita calcária (frações granulométricas 2/8, 4/11,2 e 11,2/20 e massas volúmicas 2650, 2680 e 2670 kg/m³) e areia siliciosa (frações granulométricas 0/1 e 0/2 e massa volúmica 2600 kg/m³). Quando necessário, foi ainda adicionado um superplastificante (SP) de base policarboxílica.

2.2 Composições de betão

As composições das 7 misturas de betão produzidas neste estudo são apresentadas no Quadro 2. 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 e 40%) e por CRB (15 e 30 %). Os betões foram formulados com vista a atingir uma classe de abaixamento S3, sendo necessário recorrer a um SP para incorporações de CRP e CRB iguais ou superiores a 30%.

Quadro 2. Composição das misturas de betão e propriedades no estado fresco

Designação	V _{ag} grosso [l/m ³]	V _{ag} fino [l/m ³]	V _{água} [l/m ³]	SP [% M _{ligante}]	Abaixamento [mm]	Massa volúmica fresca [kg/m ³]	Volume vazios [l/m ³]
CEM I	400	266	198	-	150	2330	13
5% CRP	399	266	198	-	130	2320	17
15% CRP	399	266	198	-	90	2290	27
30% CRP	398	266	198	0,4	105	2280	30
40% CRP	394	263	198	1,5	185	2290	19
15% CRB	398	265	198	-	120	2290	28
30% CRB	397	265	198	0,2	130	2270	33

2.3 Métodos de ensaio

O abaixamento e a massa volúmica no estado fresco do betão foram determinados de acordo com a EN 12350-2 [6] e a EN 12350-6 [7], respetivamente. Os provetes foram retirados dos moldes 24 horas após produção e colocados em câmara climática com HR > 95%, até à idade do respetivo ensaio. Apenas os provetes destinados ao ensaio de retração foram colocados diretamente na câmara de ambiente controlado (20 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ HR) onde permaneceram toda a duração do ensaio.

Os ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de ultrassons foram realizados em três provetes (150 x 150 x 150 mm) por composição e idade de ensaio, seguindo o disposto nas normas EN 12390-3 [8] e EN 12504-4 [7], respetivamente.

A velocidade de propagação de ultrassons (VPUS) foi determinada por transmissão direta com recurso ao equipamento da marca *Pundit – Série Pundit Lab*. O tempo que o pulso ultrassónico demora a percorrer a espessura do provete é determinado com uma precisão de 0,1 µs utilizando dois transdutores posicionados no centro de duas faces opostas do provete de betão. A VPUS determina-se através do quociente entre a distância percorrida pelo pulso e o tempo decorrido.

O módulo de elasticidade foi realizado aos 28 dias em três provetes cilíndricos ($\varnothing 150 \times 300$ mm) por composição, de acordo com a especificação LNEC E 397 [9]. A deformação axial foi medida através de dois transdutores de deslocamento colocados numa estrutura fixa ao provete. O ensaio envolveu, no mínimo, 8 ciclos de carga, a uma taxa de cerca de $0,5 \pm 0,01$ MPa/s, e descarga, com uma tensão aplicada que variou entre 1 MPa e 1/3 da resistência à compressão estimada, até a diferença entre a tensão para ciclos consecutivos ser inferior a 10%.

A retração foi determinada em dois prismas (350 x 100 x 100 mm) por composição seguindo o disposto na especificação LNEC E 398 [10]. A retração foi medida com recurso a um equipamento de medição com precisão de 1 µm e curso de 5,0 mm, utilizando dois pinos colocados na face do provete distanciados de 200 mm.

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

De um modo geral foi atingida a classe de abaixamento (S3) pretendida para todos os betões estudados (Quadro 2). No entanto, devido à maior exigência de água dos ligantes termoativados, observa-se uma redução do abaixamento para uma mesma relação a/l. Para percentagens de incorporação iguais ou superiores a 30%, foi necessário adicionar um SP de modo a obter o abaixamento no intervalo desejado (100-150 mm). Nestes casos, a dosagem de SP necessária para obter uma dada percentagem de redução de água é superior nos betões com CRP. Este aumento do ponto de saturação do SP, deve-se à maior área superficial das partículas de CRP, que aumenta a adsorção superficial das moléculas. Como esperado, para a mesma percentagem de substituição, o abaixamento foi superior nos betões com CRB devido à contaminação deste ligante com agregado (24%), que aumentou a relação água/fração cimentícia (a/fc) para uma mesma relação a/l.

A massa volúmica no estado fresco reduziu apenas ligeiramente (até 2,6%) com a incorporação de CR, devendo-se ao ligeiro aumento do volume de pasta nestes betões e à redução de trabalhabilidade que tende a promover o aumento dos vazios no betão, reduzindo a sua compacidade (Quadro 2).

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos betões são apresentados no Quadro 3. Os coeficientes de variação foram geralmente inferiores a 5% independentemente do ligante utilizado.

Quadro 3. Resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos betões

Designação	Resistência à compressão				Velocidade de propagação de ultrassons	Tração por compressão diametral	Módulo de elasticidade
	3 d [MPa]	7 d [MPa]	28 d [MPa]	90 d [MPa]	28d [m/s]	28d [MPa]	28d [MPa]
CEM I	33,7	42,0	52,2	59,2	4716	3,6	40,0
5% CRP	35,8	44,5	53,2	-	4762	4,0	-
15% CRP	34,7	42,9	52,4	57,9	4771	4,1	38,8
30% CRP	33,7	40,1	47,8	50,7	4646	3,3	36,4
40% CRP	37,4	44,4	52,5	-	4663	3,6	-
15% CRB	30,0	42,2	52,0	-	4745	3,8	-
30% CRB	24,2	36,5	45,0	-	4626	3,3	-

3.1 Resistência à compressão

Na Figura 1 encontram-se representadas as resistências à compressão aos 28 dias dos betões em função da percentagem de substituição de CEM I por CRP e CRB. A resistência à compressão de betões com CRP foi ligeiramente superior à do betão de referência para a percentagem de substituição de 5% de CEM I por CRP. Para tal poderá ter contribuído a elevada superfície específica das partículas de CRP que promovem a nucleação de

produtos de hidratação melhorando o refinamento da microestrutura. No entanto, para percentagens de substituição superiores a 15% CRP, a resistência à compressão teve tendência a diminuir. Isto poderá ser atribuído a uma diluição do efeito da quantidade de CEM I, bem como à redução da trabalhabilidade e compacidade dos betões para percentagens de incorporação de CRP mais elevadas. Apenas para percentagens de substituição de 40% CRP, se observou uma tendência inversa, que pode ser atribuída à adição de elevadas quantidades de SP, que não só melhoraram a dispersão das partículas de CRP como as de CEM I, contribuindo para a densificação da microestrutura.

Para percentagens de incorporação até 15%, os betões com CRB apresentaram uma resistência à compressão semelhante à dos betões com CRP, apesar da sua contaminação com partículas de agregado. De facto, considerando que a fração cimentícia é de 74% (em peso) de CRB (2.1), a relação a/f_c é de cerca de 0,57 e 0,60 para betão com 15% e 30% de CRB, respetivamente. Portanto, até 15% de substituição, o efeito de nucleação do CRB deve ter compensado o ligeiro aumento da relação a/f_c , mas para 30% de substituição, a maior relação a/f_c teve mais relevância na redução da resistência à compressão.

Na Figura 2 apresenta-se a evolução da resistência à compressão dos betões para diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP.

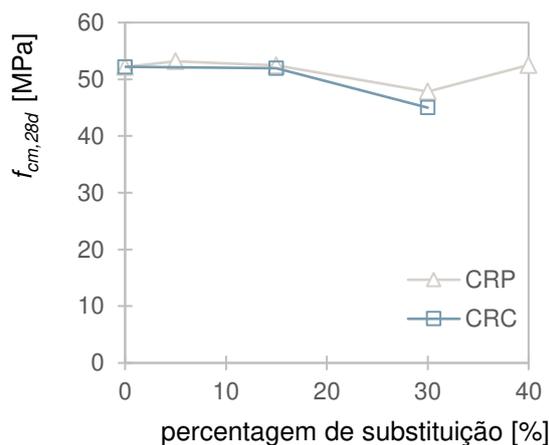


Figura 1. Resistência à compressão aos 28 dias, $f_{cm,28d}$ de betões com a/c de 0,55 para diferentes percentagens de incorporação de CRP e CRB

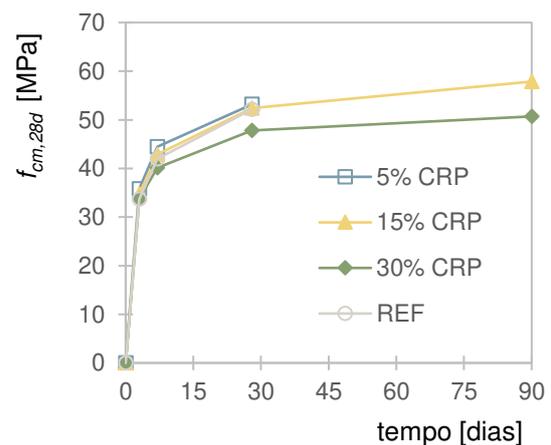


Figura 2. Resistência à compressão ao longo do tempo de betões com a/c de 0,55 para diferentes percentagens de incorporação de CRP

De um modo geral, a resistência à compressão aumentou ao longo do tempo, independentemente da percentagem de incorporação. Observou-se apenas uma ligeira estabilização da evolução da resistência entre os 28 e os 90 dias para percentagens de substituição de 30% com CRP. Alguns autores [11] reportam que para percentagens de substituição elevadas de CEM I por CRP, a resistência à compressão a longo prazo é afetada, atingindo um valor máximo devido à menor rigidez das partículas de CRP. Por outro lado, observou-se que a resistência inicial dos betões com CRP, foi consistentemente superior à obtida no betão de referência. Aqui postula-se que, devido à porosidade interna das partículas de CR, para uma mesma relação a/c , ocorre uma aproximação das partículas que facilita a interligação dos produtos de hidratação, principalmente em idades mais jovens.

3.2 Módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons

Na Figura 3 apresenta-se a variação do módulo de elasticidade aos 28 dias em função do aumento da percentagem de substituição de CEM I com CRP. O módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da incorporação de CRP. Neste caso, observa-se uma tendência distinta da observada na resistência à compressão, em que esta aumentou para percentagens até 15%. Conforme reportado por outros autores [11], as partículas porosas do CR têm menor rigidez do que as de CEM I. Isto pode explicar o facto de o módulo de elasticidade ser ligeiramente inferior nos betões com 15% CRP relativamente ao betão de referência de idêntica resistência à compressão (Figura 1).

Na Figura 4 são apresentados os valores da velocidade de propagação de ultrassons para betão com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP e CRB. A variação na VPUS foi inferior a 2% independentemente da incorporação de CRP. De facto, a VPUS no betão é essencialmente afetada pela sua densidade e rigidez, que estão ambas relacionadas com a porosidade da sua microestrutura. Deste modo, a VPUS em função da incorporação de CRP apresentou uma evolução semelhante à observada na resistência à compressão. No entanto, exceto para reduzidas percentagens de substituição, nas quais a microestrutura pode ser melhorada, a VPUS apresentou uma tendência decrescente com a incorporação de CRP, devido ao aumento do volume de vazios e diminuição da rigidez da matriz cimentícia.

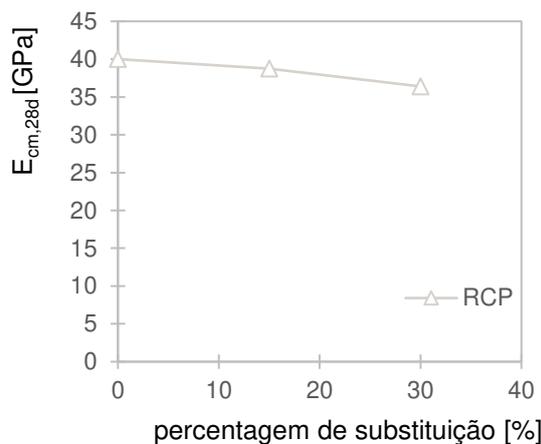


Figura 3. Módulo de elasticidade aos 28 dias, de betão com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP

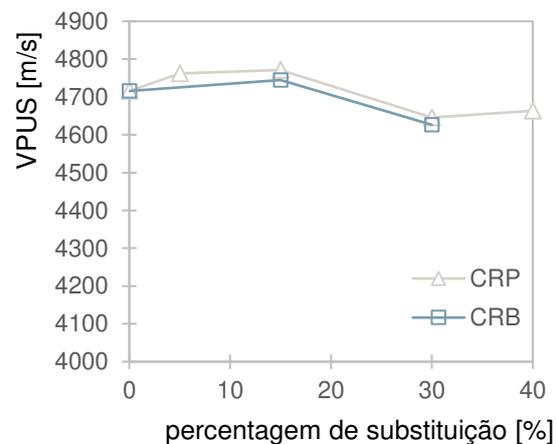


Figura 4. Velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias, de betão com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP e CRB

3.3 Retração

Na Figura 5 apresenta-se a evolução da retração até aos 90 dias nos betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I por CRP.

De um modo geral, a retração por seguiu uma tendência semelhante à resistência à compressão. Para percentagens de incorporação de CRP até 15 % observou-se uma redução da retração. No entanto, para incorporações superiores a retração aumenta com a

percentagem de incorporação, à exceção do betão com 40% CRP, que foi produzido com quantidades elevadas de SP.

Dado que os betões foram produzidos com a mesma relação a/l, a retração dependeu essencialmente da porosidade da microestrutura e da rigidez da matriz cimentícia. Conforme discutido anteriormente, os betões com até 15% de CRP apresentaram microestruturas mais densas e com menor porosidade. No entanto, devido à maior porosidade e menor rigidez das partículas de CRP, o módulo de elasticidade foi menor nesses betões. Portanto, para até 15% de incorporação de CRP, a retração foi semelhante a um pouco menor que a do betão de referência.

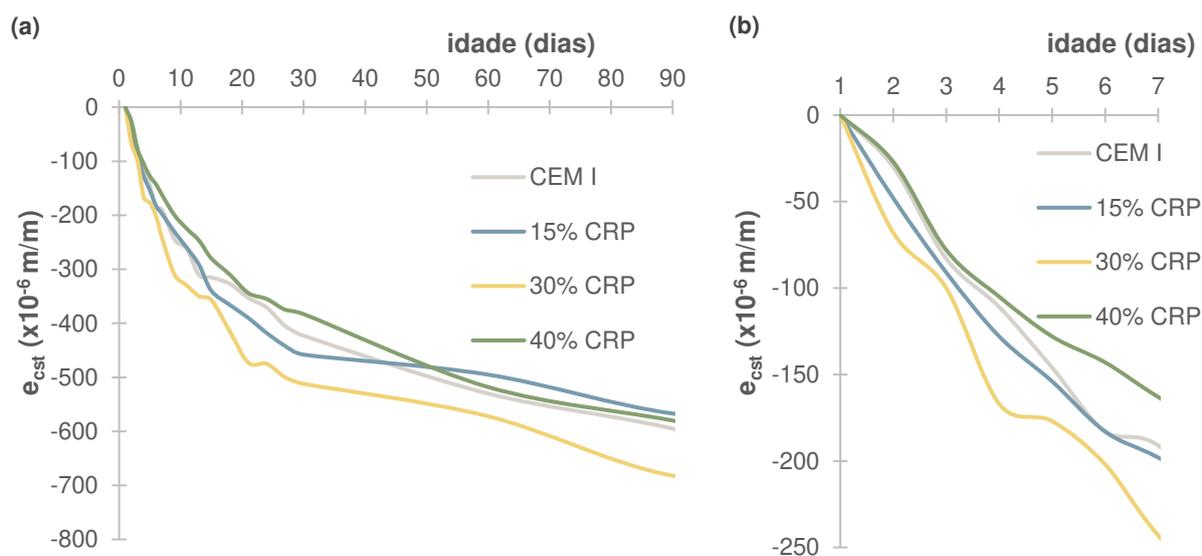


Figura 5. Retração, e_{cst} , ao longo do tempo para betões com diferentes percentagens de substituição de CEM I com CRP: (a) 90 dias, (b) pormenor até aos 7 dias.

Para o betão com 30% de incorporação com CRP, a retração aumentou cerca de 15% aos 90 dias. Além de este betão ter desenvolvido uma microestrutura menos densa (Quadro 2), foi também produzido com um volume de pasta ligeiramente superior ao do betão de referência. No betão com 40% CRP, observou-se uma tendência inversa porque, como já foi referido, a adição de elevadas doses de superplastificante poderá ter melhorado a dispersão e a hidratação, tanto do CRP como do CEM I, conduzindo a microestruturas mais densas com maior rigidez.

Num estudo realizado por Bogas et al. [12], observou-se que para uma dada relação a/l, as pastas com CRP desenvolviam uma microestrutura mais refinada para uma mesma porosidade total. Isto era explicado pela absorção de água das partículas de CRP, que reduziam a relação a/l da pasta de cimento e promoviam o desenvolvimento de uma porosidade mais refinada. Portanto, o volume total de água evaporável pode ser semelhante, mas as forças capilares destes poros mais estreitos são maiores, o que também pode aumentar a retração, pelo menos, em idades mais jovens. Isto pode explicar a retração ser ligeiramente superior no betão com CRP durante os primeiros 7 dias (Figura 5(b)).

Na Figura 6 apresenta-se a retração para 15 e 30% de substituição de CEM I por CRP e CRB. O betão com 30% de CRB apresentou uma retração semelhante à do betão com 30% CRP. Por um lado, os betões com CRB apresentaram maior relação a/fc e, portanto, menor rigidez e maior volume de água evaporável do que os betões com CRP. Por outro lado, como o CRB continha cerca de 26% de agregado na sua composição, o volume de pasta no betão é também mais reduzido.

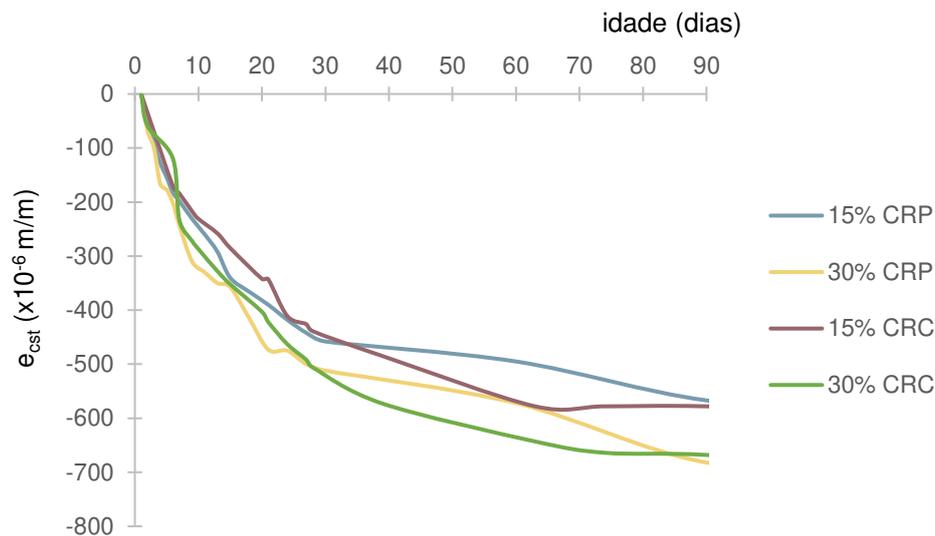


Figura 6. Retração, e_{cst} , ao longo do tempo para betões com 15 e 30% de CRP e CRB

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, caracterizou-se o desempenho fresco e mecânico, bem como a retração a longo prazo de betões produzidos com diferentes percentagens de substituição de CEM I por cimento reciclado termoativado obtido a partir de pastas de cimento, CRP e betões, CRB.

Para a mesma trabalhabilidade, o betão com CRP exigiu mais água de mistura ou SP do que o betão com apenas CEM I. No entanto, até 15% de incorporação de CRP, a trabalhabilidade não foi significativamente afetada e o betão com cimento reciclado pode ser produzido sem corrigir a composição da mistura. No entanto, para mais de 15% de incorporação de CRP, a redução da trabalhabilidade para a mesma relação a/l tendeu a aumentar o volume de vazios do betão.

A resistência à compressão aos 3 dias dos betões com CRP foi consistentemente superior à do betão de referência, o que pode ser atribuído à maior superfície específica e porosidade das partículas de CRP, que promovem o efeito de nucleação e reduzem o afastamento entre partículas em idades jovens.

O módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da percentagem de incorporação de CRP, cujas partículas apresentavam menor rigidez que o CEM I. Para percentagens de substituição com CRP superiores a 15% foi observada uma redução, não proporcional, mais significativa.

Tanto a resistência mecânica como a retração não foram significativamente afetadas quando o CRB foi usado em vez do CRP, especialmente até 15% de substituição. Assim, o cimento reciclado obtido de resíduos de betão, de acordo com o método patenteado desenvolvido pelos autores, pode ser tão eficaz quanto o obtido diretamente do resíduo de pasta de cimento de igual composição.

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.

REFERÊNCIAS

- [1] Sousa, V.; Bogas J.A. – “Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production”, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 306, 127277
- [2] Carriço A., et al. – “Thermoactivated cementitious materials - a review”, *Construction and Building Materials*, 2020, 250, 118873
- [3] Letelier, V. et al. – “Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, 2017, 132, 365–375
- [4] Qian, D. et al. – “A novel development of green ultra-high performance concrete (UHPC) based on appropriate application of recycled cementitious material”, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261, 121231
- [5] Carriço, A. et al. – “Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete”, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 309, 127375
- [6] EN 12350-2. – “Testing Fresh Concrete: Slump Test”, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2019.
- [7] EN 12350-6. – “Testing Fresh Concrete. Density”, European Committee for Standardization Brussels, Belgium, 2019.
- [8] EN 12390-3. – “Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens”, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009
- [9] LNEC E 397. – “Concrete. Determination of Modulus of Elasticity”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): Lisbon, Portugal, 1993.
- [10] LNEC E 398. – “Concrete. Determination of Shrinkage and Expansion”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): Lisbon, Portugal, 1993.
- [11] Zhang, L. et al. – “Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag”, *Construction and Building Materials*, 2018, 164, 525–534
- [12] Bogas, J.A. et al. – “Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, 2020, 138, 106226