

Influência da utilização de agregados reciclados com diferentes origens em betão estrutural

Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete

Diogo Pedro
Jorge de Brito
Luís Evangelista

Resumo

Este artigo pretende avaliar a capacidade de produzir betões com um desempenho preestabelecido (em termos de resistência mecânica) incorporando agregados reciclados (AR) de diferentes origens. Para isso, foram utilizados produtos rejeitados da indústria da prefabricação e betões produzidos em condições laboratoriais. Foi verificada a capacidade de replicação de betões para três gamas de resistência: 15-25; 35-45 e 65-75 MPa. Os betões produzidos com AR procuraram atingir a resistência do betão de origem (BO) dos AR. Apenas foi considerada uma taxa de substituição de 100% de agregados grossos naturais (AGN) por agregados grossos reciclados de betão (AGRB). Os resultados mostram que, quer em termos mecânicos quer de durabilidade, para níveis elevados de resistência-alvo, não existem diferenças significativas entre agregados de origem controlada e resultantes da prefabricação. As perdas de desempenho resultantes da incorporação de AR são substancialmente reduzidas quando utilizados BO de média ou elevada resistência.

Abstract

This paper intends to evaluate the capacity of producing concrete with a pre-established performance (in terms of mechanical strength) incorporating recycled concrete aggregates (RCA) from different sources. To this purpose, rejected products from the precasting industry and concrete produced in laboratory were used. The appraisal of the self-replication capacity was made for three strength ranges: 15-25 MPa, 35-45 MPa and 65-75 MPa. The mixes produced tried to replicate the strength of the source concrete (SC) of the RA. Only total (100%) replacement of coarse natural aggregates (CNA) by coarse recycled concrete aggregates (CRCA) was tested. The results show that, both in mechanical and durability terms, there were no significant differences between aggregates from controlled sources and those from precast rejects for the highest levels of the target strength. Furthermore, the performance losses resulting from the RA's incorporation are substantially reduced when used medium or high strength SC's.

Palavras-chave: Betões de origem / Agregados reciclados / Desempenho mecânico / Durabilidade

Keywords: Source concrete / Recycled aggregates / Mechanical performance / Durability

Diogo Pedro

Engenheiro Civil
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Jorge de Brito

Professor Catedrático
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Luís Evangelista

Professor Associado
Universidade de Stavanger
Stavanger, Noruega

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

DE BRITO, J. [et al.] – Influência da utilização de agregados reciclados com diferentes origens em betão estrutural. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 1. ISSN 2183-8488 (julho 2016) 67-79.

1 Introdução

A indústria da construção é um dos sectores mais importantes da economia de vários países, envolvendo um grande fluxo de recursos materiais e humanos. No caso da indústria da União Europeia (UE), o sector era responsável, já em 2004, por 28% do emprego e cerca de 7% da produção económica (Mália *et al.*, 2004). No entanto, em termos ambientais, é o terceiro maior emissor de CO₂ do sector industrial, com cerca de 10% das emissões totais (Habert *et al.*, 2009). Além disso, é responsável por uma utilização muito significativa de recursos naturais.

De forma a conciliar o crescimento económico com a preservação do património natural, o presente trabalho procurou estabelecer uma base científica sólida e inovadora que permita à indústria da prefabricação a utilização sem restrições dos resíduos por si gerados.

Na literatura consultada, foram observados vários resultados contraditórios. Por exemplo, para a taxa de substituição de 100% de agregados grossos naturais (AGN) por agregados grossos reciclados de betão (AGRB) registaram-se diminuições entre 6 e 25% na resistência à compressão (Bairagi *et al.*, 1993; Etxeberria *et al.*, 2007). Na resistência à tração por compressão diametral, além de diminuições significativas (Rao *et al.*, 2011), ocorreram também aumentos de aproximadamente 9% (Etxeberria *et al.*, 2007).

No módulo de elasticidade, foram observadas as maiores variações, entre 11% (Etxeberria *et al.*, 2007) e 80% (Topçu, 1995). Em aspetos referentes a durabilidade, foram registados aumentos semelhantes de absorção de água por imersão, entre 33 e 38% (Levy e Helene, 2004; Rao *et al.*, 2011), e de absorção de água por capilaridade, entre 75 e 85% (Gonçalves *et al.*, 2004; Kou e Poon, 2012). Na resistência à carbonatação, verificou-se uma elevada amplitude de variações, desde aumentos de 3% (Levy e Helene, 2004) até diminuições de 67% (Kou e Poon, 2012). Por fim, na resistência à penetração de cloretos, registaram-se diminuições entre 10 e 32% (Rao *et al.*, 2011; Kou e Poon, 2012; Limbachiya *et al.*, 2012).

Acredita-se que esta dispersão de resultados seja devida à influência e variabilidade dos betões de origem (BO) a partir dos quais são obtidos os agregados reciclados (AR).

Procurando estudar esta situação, Andreu e Miren (2014) produziram betões de elevado desempenho, utilizando AR obtidos de betões de origem de 40, 60 e 100 MPa. No ensaio de resistência à compressão, observa-se que todos os betões com AR provenientes dos BO de 60 e 100 MPa atingiram, para a máxima taxa de substituição, valores idênticos aos do betão de referência (BR), cerca de 100 MPa. Contudo, para os AR com origem no betão de 40 MPa, esta situação ocorreu apenas para as taxas de 20 e 50%. Tabsh e Abdelfatah (2009) utilizaram também AR provenientes de BO com resistências conhecidas (50 e 30 MPa) e desconhecidas. As composições produzidas pretendiam atingir resistências de 30 (mistura 1) e de 50 MPa (mistura 2). Os resultados mostram que, tanto para a mistura 1 como para a mistura 2, a resistência do betão produzido com agregados reciclados com origem em betão de 50 MPa foi idêntica à do BR. No entanto, os betões com AR de resistência fraca e desconhecida tiveram piores desempenhos.

No que respeita à durabilidade, o estudo de Andreu e Miren (2014) mostra que a absorção de água por capilaridade dos betões com

agregados reciclados (BAR) nem sempre é superior à do BR. Na resistividade elétrica, comparando os valores obtidos com as faixas limites de Langford e Broomfield, conclui-se que os diferentes tipos de betão apresentavam, em geral, um risco baixo ou moderado à corrosão. Relativamente à penetração de iões cloreto, o estudo mostra que a resistência diminui com a incorporação de AR, com tendências idênticas às da resistividade elétrica.

Através destas investigações, constata-se que a qualidade dos AR varia significativamente consoante o betão que lhes deu origem, influenciando o desempenho dos futuros betões. Neste âmbito, Silva *et al.* (2014a) propuseram um sistema de classificação de AR a partir das suas propriedades físicas, nomeadamente a absorção de água e a massa volúmica seca. Com base neste sistema, mas noutro trabalho desenvolvido pelos mesmos autores (Silva *et al.*, 2014b), foi efetuada uma análise estatística de mais de 700 misturas de betão, tendo sido verificado que os agregados de pior qualidade (classe D) conduzem a maiores diminuições de resistência à compressão. Assim, para a taxa de substituição de 100%, os AR das classes A, B, C e D são responsáveis, nesta propriedade, por perdas de 21, 38, 54 e 65%, respetivamente.

A bibliografia mostra ainda que, mesmo para BO de boa qualidade, a incorporação de AR conduz necessariamente a uma maior quantidade de água de amassadura, ou seja, um aumento da relação a/c para manter a trabalhabilidade (Evangelista e De Brito, 2007). Deste modo, alguns investigadores recorrem à utilização de superplastificantes com o objetivo de manter o teor de água em valores aceitáveis (Katz, 2003; Kwan *et al.*, 2012).

Assim, com base na informação disponível, foi efetuada uma extensa campanha experimental, sendo realizados, entre outros, ensaios de absorção de água por imersão, resistência à carbonatação e retração, propriedades que ainda não tinham sido analisadas neste contexto (Tabsh e Abdelfatah, 2009; Andreu e Miren, 2014). Além disto, esta investigação pretende completar a matriz de avaliações de Andreu e Miren (2014), ou seja, avaliar em termos mecânicos e de durabilidade betões com a mesma classe de resistência dos BO dos AR a utilizar.

2 Campanha experimental

Na composição dos betões (Quadro 1), foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados grossos reciclados de betão, cimento e água.

Os AR tiveram origem em rejeitados da prefabricação (PF), sendo escolhidos produtos com resistências-alvo de 20, 45 e 65 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC), com resistências-alvo idênticas.

A determinação da resistência dos produtos PF foi realizada através de extração de carotes. No processo de extração, foi seguida a norma NP EN 12504-1 (2009), sendo as questões relativas à forma, dimensão e outros requisitos especificados para os provetes de ensaio consultadas na norma NP EN 12390-1 (2012). A resistência em cubos *in situ* foi estimada através de um relatório técnico da Concrete Society (1976) e das *British Standards* BS 1881 (1983) e BS

6089 (1981), aplicáveis a carotes sem armadura. No que respeita ao betão produzido em laboratório, foram usados cubos que foram ensaiados aos 28 dias. No Quadro 2, são apresentados os resultados destes ensaios.

Os agregados grossos (naturais e reciclados) foram sujeitos a dois métodos de trituração: trituração primária (T1), recorrendo a um britador de maxilas; trituração primária e secundária (T2), através do uso de um britador de impacto seguido pelo de um moinho de martelos.

O processo de britagem T1 ocorreu no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, enquanto o processo T2 foi realizado numa pedreira portuguesa, reproduzindo o método industrial que é utilizado na obtenção dos AN. No Quadro 3, são apresentadas as propriedades dos agregados. Tanto os AN como os AR foram separados em função da sua dimensão, através de peneiração mecânica, sendo apenas utilizadas as frações compreendidas entre 0 e 22,4 mm. Após a separação, os agregados foram armazenados em recipientes hermeticamente fechados, para evitar trocas de humidade com o ambiente. Embora este tipo de procedimento seja difícil a uma escala industrial, permite a comparação entre composições com exatamente a mesma distribuição granulométrica, eliminando esse fator de dispersão nos resultados posteriores.

Relativamente ao cimento foi utilizado o CEM I 42,5R com quantidades de 210, 280 e 350 kg/m³ para os betões em que se pretendia atingir resistências-alvo de 20, 45 e 65 MPa, respetivamente.

Nos betões com uma resistência alvo de 65 MPa, foi adicionado ainda superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 1% da massa de cimento, diluído na água de amassadura, obtida da rede pública de abastecimento.

Nos betões com incorporação de AGRB (BAR), foi considerada apenas uma taxa de substituição de 100% de AGN por AGRB.

Os diversos betões foram produzidos de acordo com a metodologia proposta por Faury (1958), sendo aceites apenas as amassaduras que apresentaram valores de abaixamento no intervalo de 125 ± 15 mm. As composições das misturas foram definidas para os BR. Posteriormente, estas foram adaptadas para as restantes composições, tendo em conta as relações água / cimento, que tendem a ser maiores com a incorporação de AR (Ferreira *et al.*, 2011). Considerando os BR, foi avaliado o desempenho de 18 tipos de betão.

Para avaliação das propriedades mecânicas, para cada composição foram realizados ensaios de resistência à compressão, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). Utilizou-se um total de onze cubos de 150 milímetros, submetidos a cura húmida: três para ensaios aos 7 dias, cinco para ensaios aos 28 dias e três para ensaios aos 56 dias. Aos 28 dias, foram ainda ensaiados, para cada composição, três cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Utilizou-se o método descrito na especificação LNEC E397 (1993) para determinar o módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados em dois cilindros de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro por composição de betão, após cura húmida.

Relativamente às características relacionadas com a durabilidade, para cada composição foram efetuados ensaios de absorção de

Quadro 1 Composição dos betões analisados (/m³)

Mistura	Agregados finos naturais (kg)	Agregados grossos naturais (kg)	Agregados grossos reciclados (kg)		Cimento CEM I 42,5R (kg)	Água (l)	Relação a/c	Relação a/c _{ef}	Superplastificante (kg)
BR-20-T1	938	958			210	180,6	0,86	0,86	0
BR-45-T1	870	956	0		280	182,0	0,65	0,65	0
BR-65-T1	863	1002			350	143,5	0,41	0,41	3,5
BAR-LC20-T1	929	0	LC20P	966	210	214,2	1,02	0,87	0
BAR-LC45-T1	866	0	LC45P	940	280	196,0	0,70	0,66	0
BAR-LC65-T1	858	0	LC65P	974	350	161,0	0,46	0,42	3,5
BAR-PF20-T1	932	0	PF20P	970	210	212,1	1,01	0,86	0
BAR-PF45-T1	870	0	PF45P	970	280	193,2	0,69	0,65	0
BAR-PF65-T1	858	0	PF65P	1029	350	157,5	0,45	0,42	3,5
BR-20-T2	946	1019			210	170,1	0,81	0,81	0
BR-45-T2	877	1011	0		280	176,4	0,63	0,63	0
BR-65-T2	868	1057			350	140,0	0,40	0,40	3,5
BAR-LC20-T2	938	0	LC20PS	953	210	207,9	0,99	0,84	0
BAR-LC45-T2	877	0	LC45PS	988	280	187,6	0,67	0,63	0
BAR-LC65-T2	868	0	LC65PS	982	350	150,5	0,43	0,40	3,5
BAR-PF20-T2	943	0	PF20PS	977	210	205,8	0,98	0,82	0
BAR-PF45-T2	873	0	PF45PS	962	280	190,4	0,68	0,64	0
BAR-PF65-T2	858	0	PF65PS	1016	350	157,5	0,45	0,42	3,5

Quadro 2 Propriedades dos betões de origem

Tipo	Abaixamento (mm)	Massa volúmica (estado fresco) (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Absorção imersão (%)
LC20	95	2388,4	21,6	12,7
LC45	150	2370,3	37,2	13,6
LC65	200	2370,6	73,2	10,3
PF20	–	–	21,4	–
PF45	–	–	41,0	–
PF65	–	–	74,5	–

Quadro 3 Propriedades dos agregados

Agregados	Tipo de trituração	Designação	Massa volúmica (kg/m ³)			Absorção de água (%)
			Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Grossos	T1	AGN-T1	2590,5	2503,7	2537,2	1,3
		LC20-T1	2760,6	2275,0	2451,2	7,8
		LC45-T1	2640,8	2231,8	2386,6	6,9
		LC65-T1	2504,7	2266,3	2361,5	4,2
		PF20-T1	2754,9	2283,9	2455,9	7,5
		PF45-T1	2708,8	2306,4	2454,9	6,4
		PF65-T1	2664,3	2395,1	2496,1	4,2
	T2	AGN-T2	2708,8	2639,1	2664,8	1,0
		LC20-T2	2686,3	2231,4	2400,8	7,6
		LC45-T2	2701,7	2356,1	2484,0	5,4
		LC65-T2	2484,9	2280,4	2362,7	3,6
		PF20-T2	2719,8	2288,1	2446,8	6,9
		PF45-T2	2686,6	2322,4	2458,0	5,8
		PF65-T2	2614,1	2371,6	2464,3	3,9
Finos	–	AFN	2637,8	2625,0	2630,0	0,1

água por imersão, em quatro amostras cúbicas de 0,10 m, segundo a especificação LNEC E394 (1993). O ensaio de resistência à carbonatação foi efetuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E391 (1993). O ensaio é acelerado, sendo doze provetes por composição colocados numa câmara de carbonatação com uma concentração de 5% de CO₂. Por cada idade de ensaio e tipo de betão, cada um de três provetes é dividido em quatro partes imediatamente pulverizadas com uma solução de fenolftaleína a 1%, a fim de medir a profundidade de carbonatação. Os ensaios de resistência à penetração de cloretos foram realizados em três provetes por cada composição e idade de ensaio, segundo a especificação LNEC E463 (2004), correspondendo este a um ensaio de migração acelerada em regime não estacionário, com procedimentos adaptados da NT Build 492 (1999). Os ensaios de retração foram realizados de acordo com a especificação LNEC E398 (1993), em dois provetes de 0,5 × 0,15 × 0,60 m³ para cada composição, sujeitos a condições controladas de temperatura e humidade (HR de 50% ± 5% e temperatura de 20 ± 2 °C), registando as variações de comprimento ao longo de 91 dias.

3 Resistência à compressão em cubos

Os resultados de resistência à compressão (aos 7, 28 e 56 dias), divididos por família de classe de resistência-alvo, são apresentados nas Figuras 1 a 3.

Aos 28 dias, os BR das classes 20, 45 e 65 MPa atingiram valores de 23,9-27,5 MPa, 38,7-42,4 MPa e 71,1-72,3 MPa, respetivamente. Na família de baixa resistência, os resultados dos betões com agregados reciclados de betão que utilizaram AR de laboratório variaram entre 19,7 e 21,0 MPa, enquanto os betões com AR da prefabricação apresentaram valores de 21,8 e 23,6 MPa. Na família de resistência intermédia, os BAR registaram variações entre 35,7 e 41,1 MPa e de 36,1 e 39,7 MPa para os betões que utilizaram agregados provenientes de LC e de PF, respetivamente. Por fim, na família de elevada resistência, os valores oscilaram entre 66,5 e 70,2 MPa para os dois tipos de agregados reciclados.

Analisando estes valores, a substituição de AGN por AGRB provoca diminuições de resistência em relação ao BR de 9,0-17,7, 3,2-7,6 e 3,0-8,1% nos betões com baixa, média e elevada resistência-alvo,

respetivamente. As diferenças de resistência são semelhantes aos 7, 28 e 56 dias e devem-se à argamassa aderida à superfície dos AR, responsável por aumentar a absorção e diminuir a densidade destes agregados (Hansen, 1983).

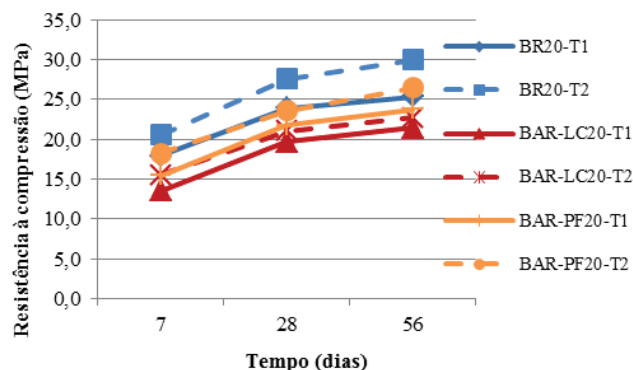


Figura 1 Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 56 dias da família 20 MPa

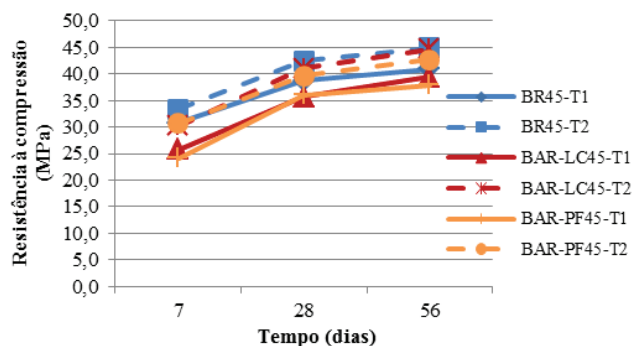


Figura 2 Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 56 dias da família 45 MPa

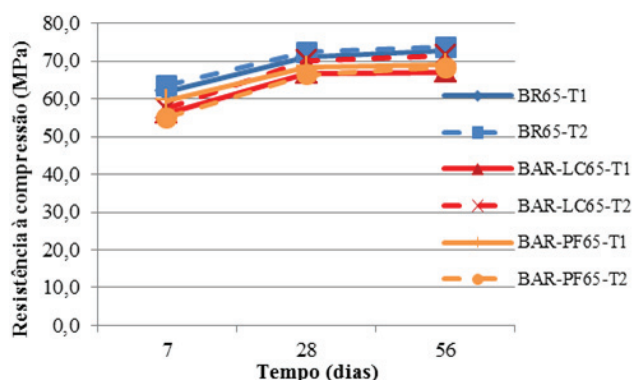


Figura 3 Resistência à compressão em cubos aos 7, 28 e 56 dias da família 65 MPa

A maior redução é evidenciada nos betões de 20 MPa. Esta situação pode ser justificada pela menor qualidade dos AR utilizados. Na investigação realizada, os betões procuraram reproduzir a classe de resistência dos BO. Assim, na família de 20 MPa, foram utilizados os AR de pior qualidade, contrastando com betões de 65 MPa

produzidos com os melhores AR. Apesar da intenção de replicar os betões, existem diferenças nos mecanismos de rotura das diferentes famílias. De facto, a estrutura dos BAR é mais complexa do que a dos betões convencionais. Desde logo, enquanto nos BR existe apenas um tipo de ITZ (*Interfacial Transition Zone*), entre agregados grossos e pasta de cimento, nos BAR existem duas: uma entre o AR e a nova pasta de cimento e outra entre o AR e a sua argamassa aderida do BO. Estas zonas de fronteira condicionam significativamente o comportamento dos betões (Guedes *et al.*, 2013).

Considerando as diferenças referidas na microestrutura dos betões, as maiores diminuições de resistências dos betões de 20 MPa parecem dever-se ao facto de a rotura nos BAR ocorrer na ITZ entre o AN original e a argamassa aderida ou através da própria argamassa, contrariamente ao que sucede nos betões em que são utilizados agregados de betões de origem de melhor qualidade, em que a interface entre o AR e a nova argamassa é a zona mais fraca.

Tabsh e Abdelfatah (2009) obtiveram resultados semelhantes. No estudo conduzido por esses autores, observa-se que, quando se pretende reproduzir uma resistência de 30 MPa do BO, o BAR exhibe uma perda de desempenho em relação ao BR, de aproximadamente 30%. No entanto, quando a resistência a reproduzir é de 50 MPa, o BAR evidencia um comportamento idêntico ao do BR, registando-se apenas uma diminuição de cerca de 2%. Andreu e Miren (2014) concluíram também que BAR provenientes de um BO de 100 MPa atingem, para a máxima taxa de substituição, valores idênticos aos do BR (cerca de 100 MPa).

No presente trabalho, verifica-se ainda que, para a mesma gama de resistência, as variações devidas à utilização de AR provenientes de laboratório ou de produtos de prefabricação são maiores nos betões mais fracos. São visíveis diferenças máximas entre AR de PF e LC de 11, 4 e 6%, para as famílias de baixa, média e elevada resistência, respetivamente. Assim, para resistências superiores dos BO, os betões exibem uma maior proximidade de resultados, não parecendo existir diferenças significativas causadas por AR de diferentes processos de trituração (PF e LC). Esta situação pode estar também relacionada com o facto de a rotura dos betões mais fracos ser diferente e poder ocorrer em duas zonas diferentes.

Finalmente, observando a evolução desta propriedade com o tempo, conclui-se que, para os betões de melhor desempenho, o desenvolvimento da resistência ocorre mais depressa. Todos os betões da família 65 MPa, aos sete dias, apresentam mais de 80% da resistência obtida aos 28 dias, variando essa percentagem entre 65 e 71% para a família de mais baixa resistência. Por outro lado, verifica-se também que o maior aumento da tensão de rotura ocorre nos primeiros 7 dias de idade, atingindo, em média, 67,4, 69,7 e 83,7% da tensão aos 56 dias para as famílias de 20, 45 e 65 MPa, respetivamente.

4 Resistência à compressão em cilindros

Os resultados de resistência à compressão em cilindros aos 28 dias são apresentados nas Figuras 4 e 5. Através da observação das figuras, verifica-se que os BR apresentam nas famílias de baixa, média e elevada resistência valores entre 19,6-22,8 MPa, 29,7-33,1 MPa e 58,0-59,4 MPa, respetivamente. Relativamente aos BAR, observa-se,

na família de baixa resistência, valores entre 14,7 e 16,9 MPa para os betões com agregados LC e entre 16,3 e 18,7 MPa para os que utilizaram agregados PF. Na família de média resistência, os valores foram entre 28,2 e 32,9 MPa para agregados LC e entre 28,5 e 31,5 MPa para agregados PF. Por fim, na família de elevada resistência, as variações ocorridas situaram-se entre 55,3 e 58,5 MPa (LC) e entre 56,1 e 55,0 MPa (PF).

De acordo com os resultados, obtêm-se, na família de 20 MPa, diminuições de cerca de 20% devidas à incorporação de AR, enquanto nos betões das famílias 45 e 65 MPa a variação é de aproximadamente 5%. Os resultados são justificados pelos mesmos motivos, ou seja, pela argamassa aderida à superfície dos AR e pelo facto de a rotura dos betões mais fracos ser diferente.

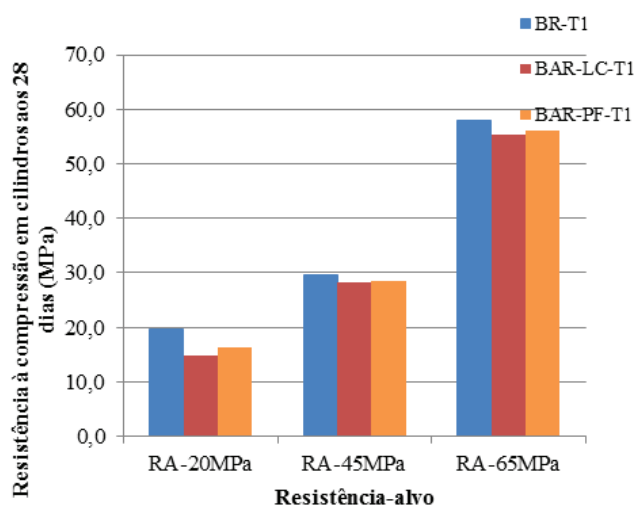


Figura 4 Resistência à compressão em cilindros para T1

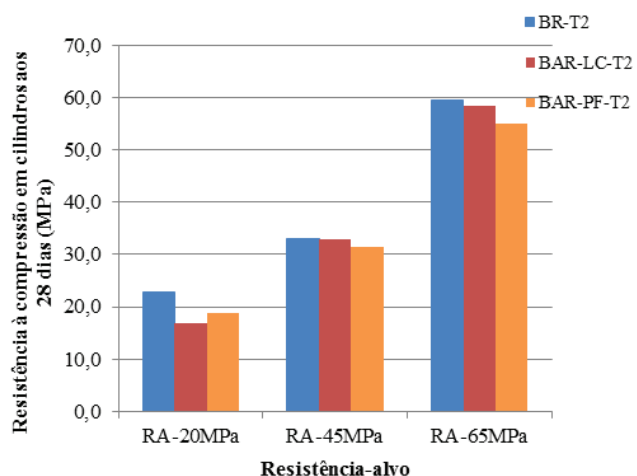


Figura 5 Resistência à compressão em cilindros para T2

Na literatura, são visíveis diminuições de resistência entre 3 e 20%, em betões com substituição de AGN por AGRB (Butler *et al.*, 2013; Kim e Yun, 2013; Guo *et al.*, 2014). Estas diferenças de valores enquadram-se com as obtidas no presente trabalho,

demonstrando que o desempenho dos BAR depende de vários fatores, nomeadamente da qualidade dos BO.

Relativamente às diferenças devidas à utilização de AR LC e PF, é possível observar variações de 10% para os betões mais fracos e de 5% para os betões de intermédia e elevada resistência-alvo, sendo estes valores justificados novamente pela existência de diferentes mecanismos de rotura.

Procurando estabelecer uma relação entre resistência cilindro / cubo, verifica-se que, aos 28 dias, a tensão de rotura nos cilindros é em média 79,0, 78,7 e 82,4% da tensão de rotura dos cubos, para os betões correspondentes às famílias de 20, 45 e 65 MPa, respetivamente.

5 Módulo de elasticidade

Os valores obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade são apresentados nas Figuras 6 e 7. Os BR registaram, para as famílias de baixa, intermédia e elevada resistência, valores de 33,3-34,7 GPa, 36,7-38,3 GPa e 46,9-47,6 GPa, respetivamente. Os BAR com AR de LC apresentaram valores de 25,2-25,9 GPa, 29,5-31,2 GPa e 40,3-40,4 GPa enquanto os betões com AR de PF obtiveram valores de 26,5-27,8 GPa, 30,0-31,5 GPa e 40,2-40,3 GPa.

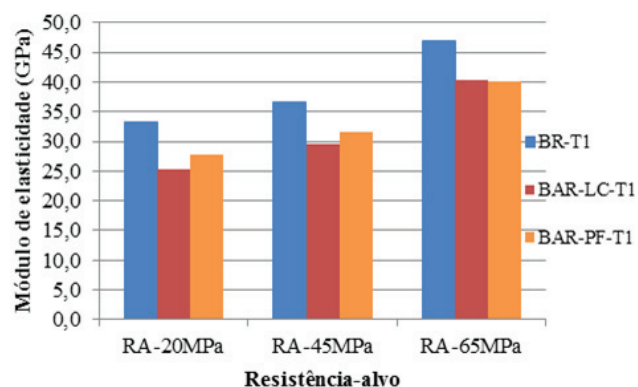


Figura 6 Módulo de elasticidade aos 28 dias para T1

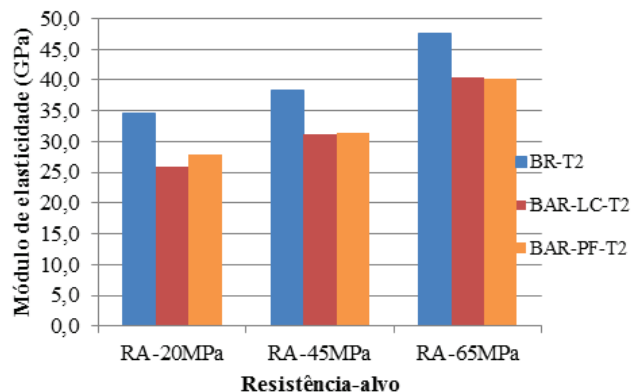


Figura 7 Módulo de elasticidade aos 28 dias para T2

Analisando os resultados, constata-se que, para a máxima taxa de substituição de AGN por AGR, ocorrem diminuições em relação ao BR

de 22, 18 e 15%, para as famílias de 20, 45 e 65 MPa, respetivamente. Esta situação pode ser explicada pela maior propensão para a deformação dos AR relativamente aos AN, fundamentada pelo menor módulo de elasticidade dos AR (Frondistou-Yannas, 1977) e pelo facto de o módulo de elasticidade do betão depender significativamente dos agregados (Neville, 1981).

Diminuições semelhantes, cerca de 20%, foram observadas no estudo de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002). Os resultados foram explicados pelas menores características de resistência dos AR face aos AN.

As menores diminuições verificadas para os melhores AR (cerca de 15%) podem ser justificadas pelo facto de os AR de elevado desempenho tenderem a ter uma rigidez muito mais próxima da dos AN, pelo que a sua influência no módulo de elasticidade do betão (que depende da rigidez da pasta e dos agregados) é atenuada. Por outro lado, os AR de pior qualidade apresentam maior porosidade e maior capacidade de absorção de água, conduzindo a uma menor rigidificação dos betões. Andreu e Miren (2014) observaram igualmente menores reduções de módulo de elasticidade para AR de elevada resistência. Nesse trabalho, foram registadas diminuições de cerca de 11%, quando se pretendeu reproduzir a resistência de betões de origem com 100 MPa.

No módulo de elasticidade, não se registaram diferenças significativas entre a utilização de AR provenientes de laboratório e de produtos de prefabricação, para as famílias de média e elevada resistência. Contudo, para os betões mais fracos, já é visível uma variação máxima de cerca de 6%. Esta situação poderá decorrer da utilização de AR de má qualidade, aos quais está associada maior variabilidade na rigidez.

6 Absorção de água por imersão

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão constam do Quadro 4, sendo apresentados os valores médios (μ) e as variações relativas devidas à incorporação de AR de diferentes origens (Δ). Através da sua observação, verifica-se que os BR registaram, para as famílias de baixa, intermédia e elevada resistência, valores de 13,5-15,6%, 13,8-14,7% e 9,4-9,7%, respetivamente.

Quadro 4 Absorção de água por imersão

Tipo de betão	Resistência alvo 20 MPa		Resistência alvo 45 MPa		Resistência alvo 65 MPa	
	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)
BR-T1	15,6	0,0	14,7	0,0	9,7	0,0
BR-T2	13,5	0,0	13,8	0,0	9,4	0,0
BAR-LC-T1	19,1	22,8	18,3	24,8	14,6	50,4
BAR-LC-T2	17,7	31,4	17,1	24,0	13,5	44,9
BAR-PF-T1	20,0	28,4	18,7	27,0	14,5	49,4
BAR-PF-T2	18,3	35,4	16,0	16,3	14,1	51,0

Os BAR com AR de laboratório apresentaram valores de 17,7-19,1%, 17,1-18,3% e 13,5-14,6% enquanto os betões com AR de produtos de prefabricação obtiveram valores de 18,3-20,0%, 16,0-18,7% e 14,1-14,5%. Constata-se que a incorporação de AR é responsável por piores desempenhos em relação ao BR, verificando-se aumentos de absorção entre 23 e 50% para as diferentes resistências-alvo. Os resultados poderão ser justificados pela argamassa aderida dos AR. A presença desta argamassa é responsável pela maior porosidade e absorção dos AR que condiciona significativamente a porosidade aberta dos BAR. Neste estudo, a absorção dos AR chegou a ser cerca de sete vezes maior do que a dos AN. Analisando o Quadro 3, verifica-se que, consoante o BO, os AR apresentaram valores de absorção de água entre cerca de 3,9 e 7,6%. Comparando os valores obtidos com os de Thomas *et al.* (2013), verifica-se alguma proximidade entre eles.

Segundo Poon *et al.* (2004), para um BO de média resistência, a dimensão dos poros existentes na argamassa aderida aos AR encontra-se essencialmente entre 0,01 e 1 μm . No entanto, para AR provenientes de betões de elevado desempenho, verifica-se que a maioria dos poros é inferior a 0,1 μm . Assim, o melhor desempenho da ITZ para AR de elevada qualidade é conseguido através de uma distribuição de poros mais fina.

Em relação às variações de desempenho causadas pela incorporação de AR de diferentes processos de trituração (LC e PF), verifica-se que, para as diversas famílias, as diferenças não ultrapassaram 6%.

7 Resistência à penetração de cloretos

Os resultados do ensaio de difusão de cloretos para cada tipo de betão são apresentados nos Quadros 5 (28 dias) e 6 (91 dias). Analisando o Quadro 5, observa-se que os valores dos coeficientes dos BR, aos 28 dias, foram de 23,0-26,0 $\times 10^{-12}$ m^2/s , 21,8-22,4 $\times 10^{-12}$ m^2/s e 8,8-9,5 $\times 10^{-12}$ m^2/s , para as famílias de baixa, média e elevada resistência, respetivamente. No que respeita aos BAR, observam-se valores de 31,2-31,9 $\times 10^{-12}$ m^2/s , 22,2-23,3 $\times 10^{-12}$ m^2/s e 9,5-11,3 $\times 10^{-12}$ m^2/s , para AR LC e de 33,8-36,9 $\times 10^{-12}$ m^2/s , 22,1-23,5 $\times 10^{-12}$ m^2/s e 10,8-11,1 $\times 10^{-12}$ m^2/s , para AR PF.

Quadro 5 Resultados do ensaio de cloretos 28 dias

Tipo de betão	Resistência alvo 20 MPa		Resistência alvo 45 MPa		Resistência alvo 65 MPa	
	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)
BR-T1	26,0	0,0	22,4	0,0	9,5	0,0
BR-T2	23,0	0,0	21,8	0,0	8,8	0,0
BAR-LC-T1	31,9	23,0	23,3	4,1	11,3	17,9
BAR-LC-T2	31,2	35,5	22,2	1,6	9,5	7,8
BAR-PF-T1	36,9	41,9	23,5	4,8	10,8	13,4
BAR-PF-T2	33,8	47,0	22,1	1,1	11,1	25,7

Quadro 6 Resultados do ensaio de cloretos 91 dias

Tipo de betão	Resistência alvo 20 MPa		Resistência alvo 45 MPa		Resistência alvo 65 MPa	
	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)	μ (%)	Δ (%)
BR-T1	23,4	0,0	19,5	0,0	7,6	0,0
BR-T2	21,3	0,0	18,3	0,0	7,0	0,0
BAR-LC-T1	28,9	23,2	21,0	7,8	9,0	19,5
BAR-LC-T2	28,0	31,3	19,2	5,3	7,6	8,8
BAR-PF-T1	32,0	36,4	20,5	5,2	8,6	13,4
BAR-PF-T2	28,5	33,5	19,1	4,4	8,6	23,1

Os valores mais baixos corresponderam sempre aos BR. A família de 20 MPa registou uma elevada amplitude de valores, verificando-se, em relação ao BR, variações de $11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, para a taxa de incorporação de 100%. Nos betões de 45 e 65 MPa, as variações não ultrapassaram $2,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. As perdas de resistência com a substituição de AGN por AGRB são justificadas pela natureza mais permeável dos BAR, causada pela argamassa aderida nos AR. Como referido, esta particularidade dos AR faz com que os BAR apresentem uma estrutura mais complexa do que a do BR. Assim, melhorar a microestrutura das zonas de transição pode melhorar o desempenho do betão, uma vez que estas são compostas por um elevado número de poros e fissuras (Kong *et al.*, 2010).

A maior taxa de penetração de cloretos evidenciada na família de 20 MPa pode ser explicada pelos efeitos interfaciais pasta / agregado e pela existência de mais fissuras internas nesses AR (Hobbs, 1995). Um outro fator que poderá explicar esta situação é a dimensão das fissuras dos AR mais fracos. No estudo de Xiao *et al.* (2012), concluiu-se que a largura de fissuras existentes na antiga argamassa aderida está correlacionada com o coeficiente de difusão de cloretos, verificando-se maior difusividade para maiores larguras de fissuras.

Face aos resultados, conclui-se que, quando se pretende produzir betões com baixas relações a/c e com AR de média / elevada qualidade, é possível aos BAR evidenciar um comportamento comparável ao do BR. Na investigação de Andreu e Miren (2014), onde se pretendeu produzir betões com resistências à compressão de 100 MPa, chegou-se a conclusões semelhantes. Observou-se que os betões produzidos com 20, 50 e até mesmo 100% de AGRB provenientes de um BO de 100 MPa se encontravam muito perto do limite de muito baixa e baixa corrosão, de acordo com a norma ASTM C1202. Por outro lado, quando foi utilizado um BO de 40 MPa, verificou-se uma variação de resistência entre betões utilizando AR de 40 e 100 MPa de aproximadamente 20%, para a máxima taxa de substituição. Conclusões idênticas foram também registadas em Limbachiya *et al.* (2000), tendo os investigadores observado que, para a gama de resistências em estudo (50, 60 e 70 MPa), uma utilização até 100% de AGRB não apresenta nenhuma influência negativa sobre a difusão de cloretos.

No que respeita à utilização de AR provenientes de BO de laboratório e de produtos da prefabricação, constatou-se não existir diferenças

significativas, em termos absolutos, para as diversas famílias.

Relativamente aos ensaios aos 91 dias, são visíveis diminuições dos coeficientes de aproximadamente 12% para as famílias de 20 e 45 MPa e de 20% para a família 65 MPa. Esta situação poderá ser explicada pelo maior tempo de cura dos provetes, responsável por hidratar maiores teores de cimento e assim diminuir o volume de vazios. No entanto, segundo a especificação LNEC E-465, eram expectáveis descidas mais significativas, devendo o valor do coeficiente de difusão de cloretos aos 91 dias ser da ordem de 60% do valor registado aos 28 dias.

8 Resistência à carbonatação

As médias dos resultados obtidos para a resistência à carbonatação são apresentadas nas Figuras 8 a 10. Foram ainda calculados os coeficientes de carbonatação através da seguinte expressão:

$$x = k \sqrt{t} \quad (1)$$

em que x é a profundidade de carbonatação (mm), k é o coeficiente de carbonatação e t é o tempo (dias).

A profundidade de carbonatação aumentou com a substituição de AN por AR e com a diminuição das resistências-alvo dos betões. Isto deve-se à menor relação a/c das famílias com maiores resistências alvo, mas também ao facto de terem maiores teores em cimento, conduzindo a um aumento da reserva alcalina disponível na matriz da pasta de cimento hidratada.

Aos 56 dias, são visíveis valores de carbonatação entre 37,0 e 46,9 mm, para a família de baixa resistência, entre 11,0 e 14,4 mm, para a família de média resistência e entre 1,7 e 3,2 mm para a família de elevada resistência. Aos 91 dias, na família de baixa resistência-alvo, os valores de carbonatação já tinham excedido a máxima altura do provete (50 mm).

Em relação aos coeficientes de carbonatação, os BR das classes 20, 45 e 65 MPa atingiram valores de 4,30-4,79 mm/dia^{1/2}, 1,61-1,78 mm/dia^{1/2} e 0,23-0,28 mm/dia^{1/2}, respetivamente. Na família de baixa resistência, os coeficientes dos BAR que utilizaram AR de laboratório variaram entre 5,10 e 5,57 mm/dia^{1/2}, enquanto os betões com AR da prefabricação apresentaram valores de 4,90 e 5,49 mm/dia^{1/2}. Na família de resistência intermédia, os BAR registaram variações entre 1,84 e 2,14 mm/dia^{1/2} e de 1,74 e 1,96 mm/dia^{1/2} para os betões que utilizaram agregados provenientes de LC e de PF, respetivamente. Finalmente, na família de elevada resistência, os valores foram 0,33-0,37 mm/dia^{1/2}, para os AR LC e de 0,43-0,48 mm/dia^{1/2} para os AR PF. Os resultados mostram nos betões com resistências-alvo de 20 e 45 MPa, aumentos de carbonatação devidos à incorporação de AR de aproximadamente 15%, para a taxa de substituição de 100%. Embora se verifique uma variação percentual mais elevada nos betões de 65 MPa (34,2-88,9%), a diferença em termos absolutos é reduzida (0,23-0,43 mm/dia^{1/2}).

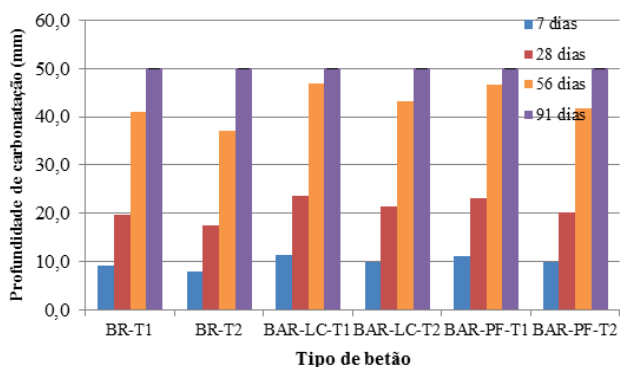


Figura 8 Resistência à carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias da família 20 MPa

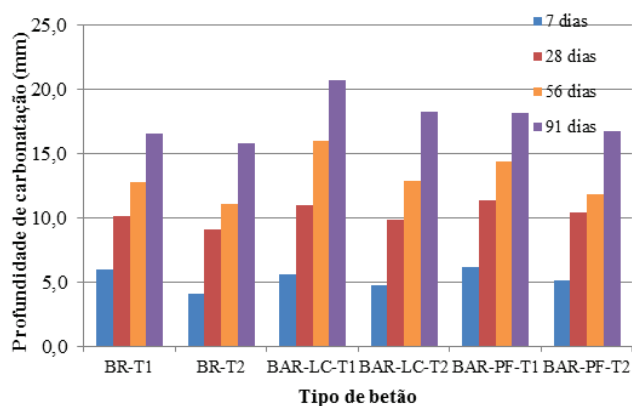


Figura 9 Resistência à carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias da família 45 MPa

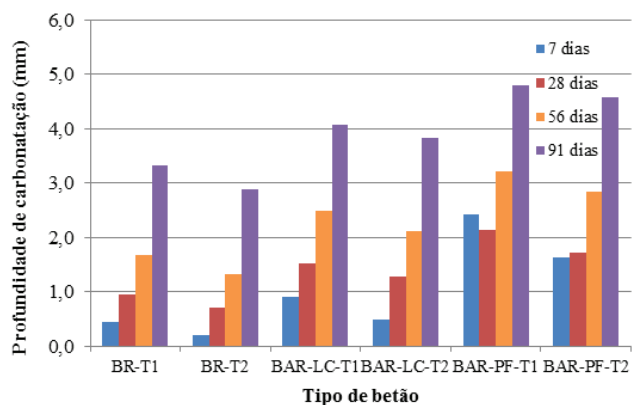


Figura 10 Resistência à carbonatação aos 7, 28, 56 e 91 dias da família 65 MPa

As perdas de desempenho dos BAR devem-se à maior porosidade destes betões. Segundo Kou e Poon (2006), o volume total e o diâmetro médio dos poros aumentam com a incorporação de AR. Deste modo e como era expectável, a resistência à carbonatação segue uma tendência idêntica à absorção de água e à penetração de cloretos.

Os valores obtidos são idênticos aos de Amorim *et al.* (2012). Nesse estudo, observou-se um aumento de carbonatação de aproximadamente 20%, para a máxima taxa de substituição. As perdas de desempenho foram justificadas pela porosidade dos agregados reciclados de betão.

Relativamente à utilização de AR de diferentes origens (LC e PF), verifica-se que, para as famílias de baixa e média resistência, a diferença máxima registada rondou 6%. Para os betões de elevada resistência, como os valores absolutos são muito baixos, observaram-se, em termos relativos, variações mais significativas, mas que não correspondem a tendências comprovadas.

9 Retração

Os resultados do ensaio de retração são apresentados nas Figuras 11 a 13. Verifica-se que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Esta propriedade tem um rápido crescimento nos primeiros dias, apresentando posteriormente uma tendência para estabilizar.

Para idades jovens (7 dias), os BAR apresentaram aumentos de deformação máximos em relação ao BR de cerca de 12, 31 e 21% para baixas, médias e elevadas resistências-alvo, enquanto, para idades mais avançadas (91 dias), os aumentos máximos de retração foram de 47, 43 e 68%, respetivamente.

Os valores obtidos mostram que a retração é das propriedades mais afetadas pela incorporação de AGRB.

Os piores resultados dos BAR estão de acordo com as expectativas pois este tipo de betões, ao ter uma menor restrição interna devido ao facto de os AR possuírem um menor módulo de elasticidade, permite maiores deformações por retração. Assim, o maior teor de vazios causado pela argamassa aderida nos AR parece levar a um aumento de deformabilidade e de retração dos betões.

As variações mais elevadas aos 91 dias são justificadas pelo fenómeno de cura interna desencadeado pelos AGRB que permite a compensação da água de evaporação através da água existente nos mesmos. Deste modo, enquanto houver disponibilidade de água nos AR, as variações dimensionais são relativamente reduzidas (Amorim *et al.*, 2012).

Outra conclusão importante a retirar deste ensaio é que, contrariamente às restantes propriedades, quando se substitui AN por AR, em termos absolutos, não são visíveis diferenças significativas entre os BAR das diversas resistências-alvo. Isto significa que a retração parece ser condicionada quase exclusivamente pela incorporação de AR, independentemente da qualidade do BO e deixando para segundo plano a composição do betão.

No estudo de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002), constata-se também uma influência significativa da incorporação de AR, com aumentos de 40% relativamente ao BR. No estudo de Sago-Crentsil *et al.* (2001), são visíveis aumentos de cerca de 30%, sendo os resultados justificados pela menor capacidade de restrição dos agregados reciclados.

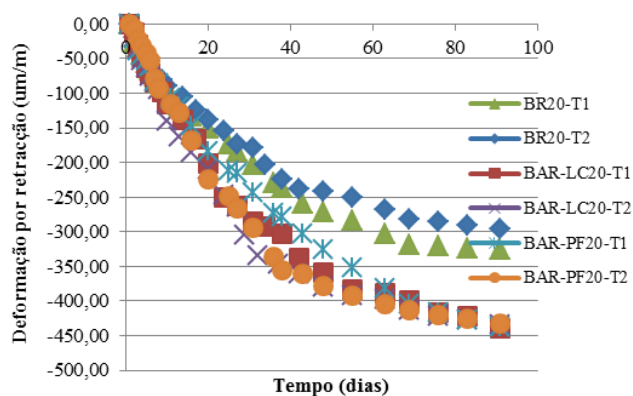


Figura 11 Deformações de retração ao longo do tempo da família 20 MPa

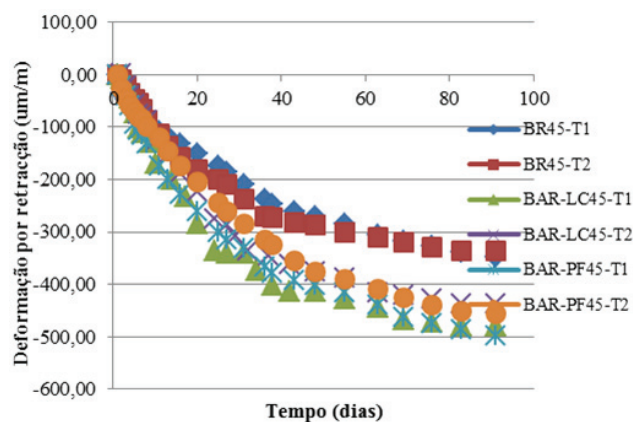


Figura 12 Deformações de retração ao longo do tempo da família 45 MPa

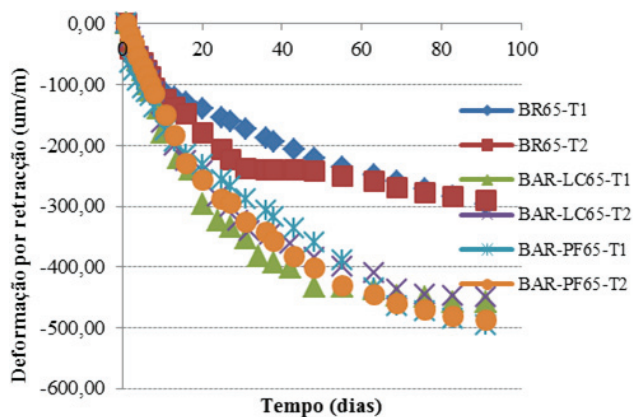


Figura 13 Deformações de retração ao longo do tempo da família 65 MPa

10 Conclusões

Através dos resultados obtidos nos betões com resistências-alvo de 20, 45 e 65 MPa, onde composições de referência foram comparadas com outras com AGRB de diferentes origens e o objetivo era replicar nos novos betões a resistência dos de origem, é possível concluir o seguinte:

- a resistência à compressão em cubos diminui cerca de 8%, para as resistências-alvo de 45 e 65 MPa, devido à incorporação de AR; para a resistência-alvo de 20 MPa, a diminuição é de 20%; verifica-se que, para betões de origem de média e elevada resistência, a diferença entre betões de laboratório e de prefabricação é pouco significativa;
- relativamente à resistência em cilindros, ocorrem tendências semelhantes, registando os betões de 45 e 65 MPa perdas de cerca de 3%, enquanto nos betões de 20 MPa a variação foi de 14%; a tensão de rotura nos cilindros é em média 79,0, 78,7 e 82,4% da tensão de rotura dos cubos, para os betões correspondentes às resistências-alvo 20, 45 e 65 MPa, respetivamente;
- no módulo de elasticidade, os BAR apresentam diminuições de aproximadamente 22, 18 e 15% para as RA de 20, 45 e 65 MPa, respetivamente; a utilização de AR provenientes de BO com baixas propriedades mecânicas acentua os efeitos negativos dos AR;
- a introdução de AGRB é responsável por aumentos de absorção de água por imersão nos betões entre 23 e 49%; os resultados devem-se à elevada absorção de água dos AR; a qualidade do BO apresenta assim um papel determinante, verificando-se que os AR podem apresentar valores entre cerca de 3,9 e 7,6% dependendo da sua origem;
- a variação da difusão de cloretos para cada mistura de betão é maior na resistência-alvo de 20 MPa; também é nesta família que se regista a maior perda de desempenho, cerca de 30%, aos 91 dias; contudo, para os betões de 65 MPa, onde foram utilizados AR provenientes de BO de elevada qualidade, verifica-se um comportamento comparável ao do BR; esta tendência está de acordo com o verificado nas propriedades mecânicas;
- situação idêntica acontece na resistência à carbonatação; aos 28 dias, a incorporação de AR representa um acréscimo de carbonatação de aproximadamente 18 e 10%, para as famílias de baixa e média resistência-alvo; na resistência-alvo de 65 MPa, ocorrem aumentos relativos maiores, justificados pelo facto de os valores absolutos serem muito pequenos;
- a retração é das propriedades mais prejudicadas pela incorporação de AGRB; são visíveis, aos 91 dias, aumentos relativos ao BR de 47, 43 e 68%; relativamente à influência dos BO, não são verificadas diferenças significativas entre os tipos de agregados utilizados, ao contrário do que aconteceu nas restantes propriedades;
- excluindo a retração, os resultados mostram que os betões de 65 MPa que utilizaram RA obtidos de BO de elevada resistência apresentam um comportamento comparável aos respetivos BR, sendo de salientar que se trata neste caso de betões de elevado desempenho.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do centro de investigação ICIST, do IST, Universidade de Lisboa, e da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Referências

- [1] Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A. (2002) – *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*. Cement and Concrete Composites, vol. 24, pp. 269-79.
- [2] Amorim, P.; de Brito, J.; Evangelista, L. (2012) – *Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability*. ACI Materials Journal, vol. 109, n.º 2, pp. 195-204.
- [3] Andreu, G.; Miren, E. (2014) – *Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, vol. 52, pp. 227-235.
- [4] Bairagi, K.; Ravande, K.; Pareek, K. (1993) – *Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 9, pp. 109-126.
- [5] Butler, L.; West, J.; Tighe, S. (2013) – *Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength*. Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 1292-1301.
- [6] Concrete Society (1976) – *Concrete core testing for strength*. Technical Report No.11, The Concrete Society, London.
- [7] Etxeberria, M.; Vazquez, E.; Mari, A.; Barra, M. (2007) – *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 37, n.º 5, pp. 735-742.
- [8] Evangelista, L.; de Brito, J. (2007) – *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Composites, vol. 29, n.º 5, pp. 397-401.
- [9] Faury, J. (1958) – *Le béton*, 3rd ed. Paris: Dunod.
- [10] Ferreira, L.; de Brito, J.; Barra, M. (2011) – *Influence of the presaturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete*. Magazine of Concrete Research, vol. 63, n.º 8, pp. 617-27.
- [11] Frondistou-Yannas, S. (1977) – *Waste concrete as aggregate for new concrete*. American Concrete Institute Journal, vol. 74, n.º 8, pp. 373-376.
- [12] Gonçalves, A.; Esteves, A.; Vieira, M. (2004) – *Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability*. RILEM Proceedings PRO 40: use of recycled materials in buildings and structures. 2004.
- [13] Guedes, M.; Evangelista, L.; de Brito, J.; Ferro, A. (2013) – *Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates*. Microscopy and Microanalysis, vol. 19, n.º 5, pp. 1222-30.
- [14] Guo, Y.; Zhang, J.; Chen, G.; Xie, Z. (2014) – *Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures*. Journal of Cleaner Production, vol. X, pp. 1-11.
- [15] Habert, G.; Billard, C.; Rossi, P.; Chen, C.; Roussel, N. (2009) – *Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives*. Journal of Cement and Concrete Research, vol. 40, n.º 5, pp. 820-826.
- [16] Hansen, T.; Narud, H. (1983) – *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*. Concrete International: Design and Construction, vol. 5, n.º 1, pp. 79-83.
- [17] Hobbs, D. (1999) – *Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 29, n.º 12, pp. 1995-8.
- [18] Katz, A. (2003) – *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 33, n.º 5, pp. 703-11.
- [19] Kim, S.; Yun, H. (2013) – *Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed bars in concrete*. Engineering Structures, vol. 48, pp. 133-143.
- [20] Kong, D.; Lei, T.; Zheng, J.; Ma, C.; Jiang, J.; Jiang, J. (2010) – *Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, vol. 24, n.º 5, pp. 701-708.
- [21] Kou, C.; Poon, S. (2006) – *Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash*. Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Editions, vol. 21, n.º 4, pp. 130-6.
- [22] Kou, C.; Poon, S. (2012) – *Enhancing the durability properties on concrete prepared with coarse recycled aggregate*. Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 69-76.
- [23] Kwan, H.; Ramli, M.; Kam, J.; Sulieman, Z. (2012) – *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*. Construction and Building Materials, vol. 26, n.º 1, pp. 565-573.
- [24] Langford, P.; Broomfield, J. (1987) – *Monitoring the corrosion of reinforcing steel*. Construction Repair, vol. 1, n.º 2, pp. 32-6.
- [25] Levy, M.; Helene, P. (2004) – *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*. Cement and Concrete Research, vol. 34, n.º 11, pp. 1975-1980.
- [26] Limbachiya, C.; Leelawat, T.; Dhir, K. (2000) – *Use of recycled concrete aggregate in high strength concrete*. Materials and Structures, vol. 33, pp. 574-80.
- [27] Limbachiya, C.; Meddah, S.; Ouchagour, Y. (2012) – *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Construction and Building Materials, vol. 27, n.º 1, pp. 439-449.
- [28] Mália, M.; de Brito, J.; Duarte Pinheiro, M.; Bravo, M. (2013) – *Construction and demolition waste indicators*. Waste Management and Research, vol. 31, n.º 3, pp. 241-255.
- [29] Neville, M. (1981) – *0*. Pitman, London.
- [30] Nt Build 492 (1999) – *Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*. Espoo, Finland: Nordtest, 8 p.
- [31] Poon, S.; Shui, H.; Lam, L. (2004) – *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*. Construction and Building Materials, vol. 18, n.º 6, pp. 461-8.

- [32] Rao, C.; Bhattacharyya, K.; Barai, V. (2011) – *Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete*. Materials and Structures, vol. 44, pp. 205-20.
- [33] Sagoe-Crentsil, K.; Brown, T.; Taylor, A. (2001) – *Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate*. Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 707–712.
- [34] Silva, V.; de Brito, J.; Dhir, K. (2014a) – *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials, vol. 65, pp. 201-217.
- [35] Silva, V.; de Brito, J.; Dhir, K. (2014b) – *The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 19, n.º 7, pp. 825-849.
- [36] Tabsh, W.; Abdelfatah, S. (2009) – *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 1163-7.
- [37] Thomas, C.; Setián, J.; Polanco, A.; Alaejos, P.; Sánchez, M. (2013) – *Durability of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, vol. 40, pp. 1054-1065.
- [38] Topçu, B. (1995) – *Using waste concrete as aggregate*. Cement and Concrete Research, vol. 25, n.º 7, pp. 1385-1390.
- [39] Xiao, J.; Ying, J.; Shen, L. (2012) – *FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, vol. 29, pp. 12-23.