

BETÃO ESTRUTURAL INCORPORANDO SIMULTÂNEAMENTE AGREGADOS FINOS E GROSSOS RECICLADOS



Diogo Pedro
Mestre em Eng.^a Civil
IST
Lisboa; Portugal
diogo.pedro@ist.utl.pt



Jorge de Brito
Professor Catedrático
IST
Lisboa; Portugal
jb@civil.ist.utl.pt



Luís Evangelista
Professor Adjunto
ISEL
Lisboa; Portugal
evangelista@dec.isel.ipl.pt

RESUMO

O presente artigo pretende avaliar os efeitos da incorporação simultânea em betão de agregados finos e grossos reciclados (AFRB e AGRB). Neste sentido, foi realizada uma campanha experimental, sendo avaliadas as propriedades de resistência à compressão, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, resistência à carbonatação e penetração de cloretos. Adicionalmente, procedeu-se à análise de duas propriedades de longo prazo: retracção e fluência. As percentagens de substituição de agregados naturais (AN) por agregados reciclados de betão (AR) foram as seguintes (AFRB/AGRB%): 25/25; 50/50 e 100/100 %. Os resultados mostram diminuições de desempenho com o aumento da quantidade de AFRB e AGRB.

1. INTRODUÇÃO

Devido aos enormes consumos de betão, a indústria da construção tem vindo a enfrentar uma série de problemas: esgotamento de agregados naturais; elevadas emissões de dióxido de carbono (associadas ao consumo de cimento Portland); elevadas quantidades de resíduos gerados e reduzido espaço para aterro [1]. Refira-se que, em 2002, foram produzidos no mundo inteiro cerca de 2,7 biliões de m³ de betão, o que representa mais do que 0,4 m³ de betão/pessoa/ano [2]. Segundo Mehta e Monteiro [3], a procura continuará a crescer, atingindo um valor de cerca de 7,5 biliões de m³/ano até 2050. A sustentabilidade da indústria terá de passar pela adopção de várias medidas [4]: aumento do uso de materiais cimentícios alternativos; aumento da utilização de materiais reciclados; melhoria da durabilidade; melhoria das propriedades mecânicas e reutilização da água de lavagem.

No presente trabalho, será abordada a utilização de agregados reciclados, vector que permite não só a poupança de recursos naturais como também a libertação de espaço nos aterros. Os estudos existentes mostram que é possível produzir betão com AGRB com resistências semelhantes às dos betões convencionais [5;6;7]. Contudo, em termos de durabilidade, os betões com agregados reciclados (BAR) parecem ser mais sensíveis à incorporação de AGRB. Relativamente à utilização de agregados finos de betão, constata-se não existir um número significativo de estudos. Esta realidade pode ser justificada pela crença de que a incorporação de AFRB compromete o desempenho dos BAR. No que respeita à utilização conjunta de AFRB e de AGRB, a informação é ainda mais reduzida. Um dos poucos estudos existentes foi realizado por Ravindrarajah et al. [8] e pretendeu analisar os efeitos da utilização de AR sobre a resistência, deformação e retracção do betão. Os resultados mostraram que, para um betão com agregados reciclados, a resistência e o módulo de elasticidade, em relação ao betão de referência (BR), foram reduzidos em cerca de 10 e 35%,

respectivamente. No que respeita à retracção, os valores desta propriedade quase que duplicaram quando agregados reciclados substituíram agregados naturais.

No trabalho de Ajdukiewicz e Kliszczewicz [9] sobre betões de elevada resistência/elevado desempenho, além das propriedades mecânicas, foram analisadas as propriedades de retracção, fluência e resistência gelo/degelo. Os autores concluíram que a incorporação de 100% de AFRB e AGRB provocou diminuições de resistência à compressão de cerca de 10-20%, em relação ao BR. Relativamente à resistência à tracção por compressão diametral os betões com AR continuaram a apresentar resultados inferiores, mas as diferenças, aos 28 dias, não foram maiores do que 10%. Na retracção, foram verificados aumentos, em relação ao BR, entre 35 e 45%. No que respeita à fluência, foram obtidos resultados inesperados, registando-se diminuições, em relação ao BR, de cerca de 20%. Noutra investigação, Sim e Park [10] pretenderam avaliar a influência de AFRB e de AGRB, em betões estruturais. Foram consideradas várias taxas de substituição de agregados finos naturais por AFRB, enquanto os agregados grossos naturais foram completamente substituídos por AGRB. Foram também utilizados vários níveis de adição de cinzas volantes. Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminuiu com a taxa de incorporação de AR. Em termos de durabilidade, o BAR atingiu uma resistência suficiente à penetração de iões cloreto. Foram observados valores semelhantes entre o BR e BAR de 100% (sem cinzas volantes). Relativamente à profundidade de carbonatação, apesar de o BAR conseguir desempenhos adequados, parece não existir uma relação clara com a taxa de substituição de AFRB.

2. MATERIAIS

Na produção das misturas, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados finos e grossos reciclados de betão, cimento, superplastificante e água. O cimento (CEM I 42,5R) foi utilizado na quantidade de 350 kg/m³. Relativamente ao superplastificante (SikaPlast 898), foi adicionado na proporção de 1% da massa de cimento. As composições dos betões e as propriedades dos agregados são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição dos betões

Mistura	Agregados finos naturais (kg/m ³)	Agregados grossos naturais (kg/m ³)	Agregados finos reciclados (kg/m ³)	Agregados grossos reciclados (kg/m ³)	Cimento CEM I 42,5R (kg/m ³)	Água (l/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)
BR 0/0	800	1065	0	0	350	164,5	3,5
B 25/25	600	799	186	245	350	166,1	3,5
B 50/50	398	530	370	487	350	171,8	3,5
B 100/100	0	0	736	970	350	186,9	3,5

Tabela 2 - Propriedades dos agregados

Tipo de agregado	Massa volúmica (kg/m ³)			Absorção de água (%)
	Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Areia fina	2630	2620	2623	0,2
Areia grossa	2640	2610	2620	0,5
Brita 1	2700	2670	2680	0,6
Brita 2	2710	2670	2690	0,6
AFRB	2675	2297	2439	6,1
AGRB	2614	2371	2464	3,9

Os resultados da Tabela 2 mostram que, devido à quantidade residual de argamassa aderida, os valores de absorção de água dos AR são muito superiores aos dos agregados naturais. Esta realidade é ainda mais evidente para a fracção fina. Por conseguinte, é expectável que os BAR apresentem maiores relações a/c. No entanto, os AR utilizados conseguem cumprir os requisitos necessários para a sua aplicação em betão [11]. Estes limites para agregados grossos e finos reciclados foram fixados em 7 e 13%, respectivamente.

Relativamente aos valores de massa volúmica, verifica-se uma maior proximidade entre AR e AN. As diferenças não ultrapassam 12%. Além disso, utilizando o sistema de classificação proposto por Silva et al. [12], constata-se que todos os agregados reciclados desta campanha, em termos de valores de massa volúmica, poderiam pertencer à classe A (agregados de melhor qualidade).

3. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E EM TERMOS MECÂNICOS

Neste capítulo, pretende-se analisar os resultados obtidos nos ensaios ao betão no estado fresco (trabalhabilidade e massa volúmica). Estes ensaios pretendem avaliar a conformidade da classe de consistência definida para todos os betões (S3) e a massa volúmica dos betões produzidos. Serão também apresentados os valores de resistência à compressão, cuja propriedade adquire extrema importância na caracterização dos betões. Por facilidade de linguagem, as taxas de 25/25, 50/50 e 100/100% serão designadas, neste relatório, por 25, 50 e 100%, respectivamente.

3.1 Abaixamento (cone de Abrams)

O ensaio de abaixamento foi efectuado segundo a norma NP EN 12350-2 [13]. Foi definido um abaixamento alvo de 125 mm, com uma tolerância máxima de 15 mm relativamente a este valor. Na Tabela 3, são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de abaixamento

Tipo de betão	Relação a/c _{efectiva}	Abaixamento (mm)
BR 0/0	0,47	115
B 25/25	0,47	122
B 50/50	0,48	135
B 100/100	0,49	128

Através da observação da tabela, constata-se que todos os betões produzidos respeitam o intervalo 125±15 mm. De forma a garantir trabalhabilidades idênticas, foi necessário aumentar a relação água / cimento dos BAR. Esta situação foi mais evidente para as maiores taxas de substituição e pode ser explicada através da elevada absorção do material reciclado.

3.2 Massa volúmica

Este ensaio foi realizado com base na norma NP EN 12350-6 [14]. Na Figura 1, são apresentados os resultados.

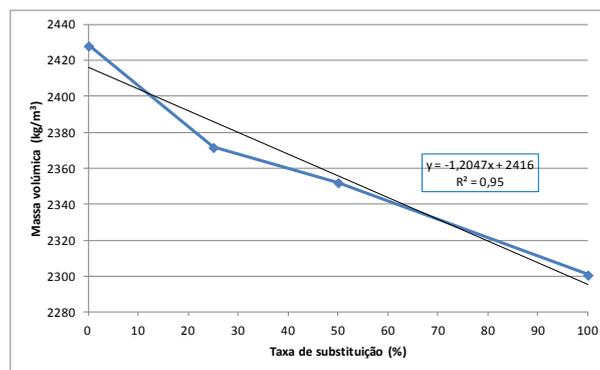


Figura 1: Resultados do ensaio de massa volúmica

Analisando a Figura 1, verifica-se que a massa volúmica do betão no estado fresco diminui com o aumento da percentagem de AR. Esta diminuição parece ocorrer de forma aproximadamente linear. Os resultados podem ser justificados com a menor massa volúmica dos agregados reciclados, comparativamente aos agregados naturais.

3.3 Resistência à compressão em cubos

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 28 dias segundo a norma NP EN 12390-3 [15]. Na Figura 2, são apresentados os resultados obtidos.

Aos 28 dias, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, observa-se uma diminuição de resistência, relativamente ao betão de referência, de cerca de 6, 9 e 15%, respectivamente. Os resultados mostram que existe uma tendência para a diminuição linear da resistência com o aumento da quantidade de AR. Esta situação pode ser explicada pela pior qualidade dos AR, que tem origem na sua argamassa aderida, responsável por diminuir a massa volúmica e aumentar a absorção destes agregados [16]. Além das consequências referidas, a presença de argamassa aderida poderá também

prejudicar a ligação entre o agregado e a matriz de cimento e, conseqüentemente, piorar as características de transferência de carga, provocando uma redução de resistência [17]. Por estes motivos, relativamente aos betões convencionais, os BAR tendem a apresentar menores massas volúmicas e relações a/c superiores, o que prejudica o seu desempenho. Ajdukiewicz e Kliszczewicz [9] obtiveram resultados semelhantes. Os BAR com 100% de agregados reciclados (finos e grossos) exibiram uma diminuição máxima, em relação ao BR, de cerca de 20%. Os resultados apresentados parecem indicar que, em termos de resistência à compressão, é possível a utilização de agregados reciclados na grande maioria dos elementos estruturais, cuja resistência se situa, geralmente, abaixo de 50 MPa.

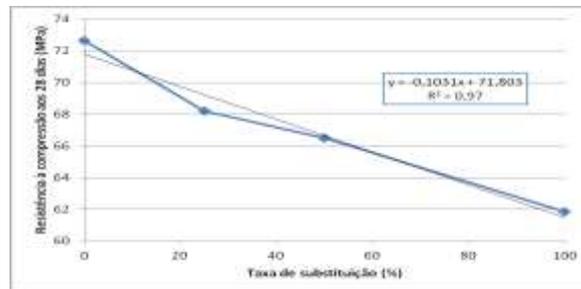


Figura 2: Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

4. PROPRIEDADES EM TERMOS DE DURABILIDADE

Neste subcapítulo, são avaliadas as características de durabilidade de betões com agregados reciclados, através da comparação com betões de referência.

4.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi feito aos 28 dias segundo a especificação LNEC E394 [18]. Na Figura 3, são apresentados os resultados obtidos. Verifica-se que o BR registou o valor mais baixo de absorção, cerca de 11,9%. Os BAR apresentaram valores de 13,3-19,0%, registando-se, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, aumentos de absorção, em relação ao BR, de aproximadamente 11, 21 e 59%, respectivamente.

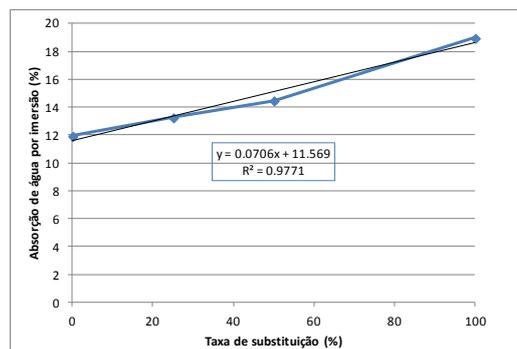


Figura 3: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias

Estes resultados eram expectáveis, uma vez que os agregados reciclados, ao possuírem uma estrutura mais porosa, fazem aumentar o número de poros abertos na matriz de betão [19]. Um outro aspecto a ter em consideração é a maior absorção dos AR que condiciona decisivamente a porosidade aberta dos BAR.

4.2 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E393 [20], 42 dias após a amassadura dos betões. Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os resultados obtidos. Os valores dos coeficientes às 72 horas dos BAR situaram-se entre 2,47 e $4,27 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$, enquanto o BR registou um valor de $1,84 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$ (Figura 4). Assim, verificam-se, para taxas de substituição de 25, 50 e 100%, aumentos de absorção, relativamente ao BR, de cerca de 34, 55 e 132%, respectivamente. Através da observação da Figuras 5, constata-se ainda que a absorção de água por capilaridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas.

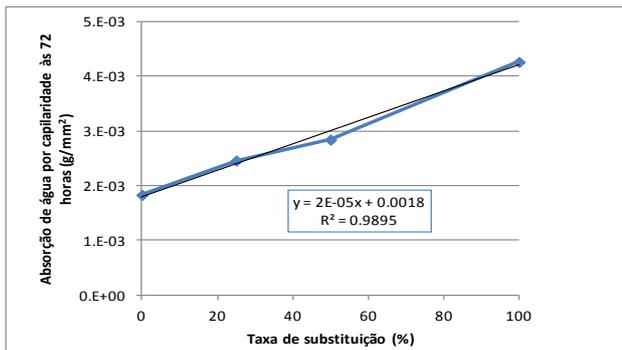


Figura 4: Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade às 72 horas

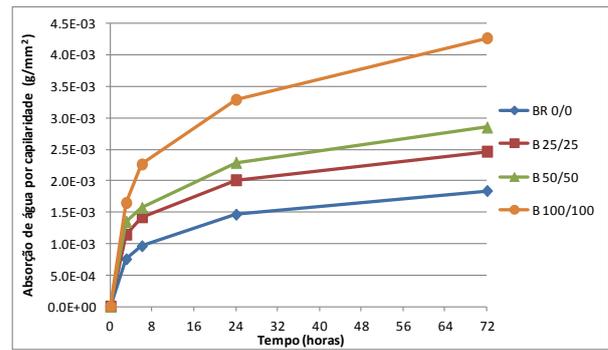


Figura 5: Evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo

4.3 Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi efectuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E391 [21]. As médias dos resultados obtidos para a resistência à carbonatação são apresentadas na Figura 6. Analisando as Figuras 6 e 7, observa-se que, tanto para idades jovens como para idades mais avançadas, a carbonatação tende a aumentar com o aumento da taxa de substituição. Esta situação era expectável, uma vez que a absorção de água por capilaridade apresentou uma tendência idêntica.

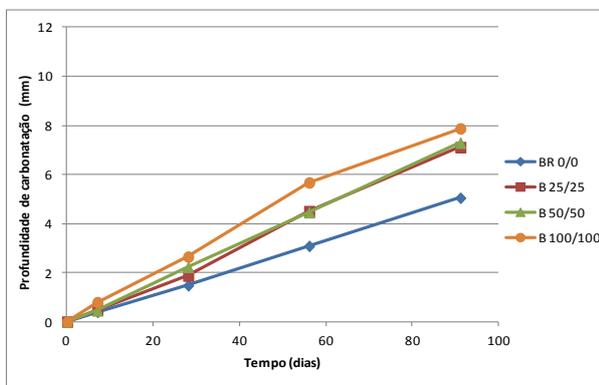


Figura 6: Evolução da resistência à carbonatação ao longo do tempo

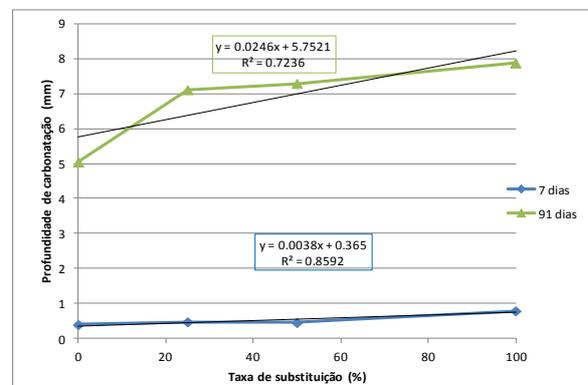


Figura 7: Influência da incorporação de AFRB e AGRB na resistência à carbonatação

No trabalho de Sim e Park [10], não existiu nenhuma relação com o nível de substituição. Verificou-se que as profundidades de carbonatação globais, para as incorporações de 60 e 100% de AFRB (e 100 AGRB%), foram inferiores às de 0 e 30%. Os autores afirmaram que os resultados podem dever-se a erros na realização dos ensaios ou à natureza do agregado reciclado. Contudo, aos 28 dias, todos os betões (sem cinzas volantes) evidenciaram profundidades de carbonatação inferiores a 4 mm, concordando com os valores obtidos na presente investigação.

4.4 Resistência à penetração de cloretos

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E463 [22], aos 28 e 91 dias. Na Figura 8, são apresentados os resultados obtidos. Aos 28 dias, o BR registou um valor de coeficiente de difusão de cloretos de $9,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Para a mesma idade, os BAR apresentaram valores de $9,8-11,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Na Figura 8, é possível observar o aumento linear dos coeficientes com o aumento da incorporação de AR. Assim aos 28 dias, nos betões da pré-fabricação (PF), são visíveis para as taxas de substituição de 25, 50 e 100 %, aumentos dos coeficientes de difusão de cloretos de cerca de 7, 13 e 22%. Os resultados são justificados pela natureza mais permeável dos BAR.

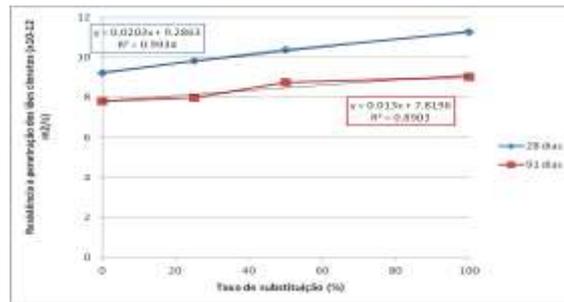


Figura 8: Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias

Na investigação de Sim e Park [10], são também analisados os efeitos da incorporação de agregados finos e grossos reciclados. Contudo, nesse estudo, não é visível uma tendência clara da penetração dos íons cloretos com o aumento dos níveis de substituição. Por exemplo, aos 21 dias, para a taxa de 60% de AFRB (e 100% de AGRB), verifica-se um aumento de carga total passada de cerca de 15% (betões sem cinzas volantes), em relação ao BR. Contudo, para a taxa de 100% de AFRB (e 100% de AGRB), já é visível uma diminuição de cerca de 10%. Deste modo, serão necessários mais estudos para averiguar o efeito da substituição simultânea de agregados finos e grossos reciclados. Relativamente aos ensaios aos 91 dias, são visíveis diminuições dos coeficientes de aproximadamente 20%. 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 E465 [23], 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.

5. PROPRIEDADES DE LONGO PRAZO

Neste subcapítulo, são avaliadas as propriedades de retração e fluência, através da comparação com betões de referência.

5.1 Retração

O ensaio de determinação da deformação por retração foi realizado através da especificação LNEC E398 [24], durante 91 dias. Na Figura 9, são apresentados os resultados obtidos. Através da análise da figura, verifica-se para todos os betões que a deformação aumenta ao longo do tempo, de forma não-linear. Observa-se um rápido crescimento durante os primeiros dias, que posteriormente tende a estabilizar. De salientar os piores resultados obtidos pelos BAR. Esta situação, que é comum à maioria das investigações [9; 25; 26], poderá ser explicada por uma menor rigidez global destes betões. Para idades jovens (7 dias), os betões com agregados reciclados apresentaram, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, aumentos de deformação, em relação ao BR, de cerca de 5, 4 e 42%, respectivamente, enquanto para idades mais avançadas (91 dias), esses aumentos foram de 16, 49 e 102%. As maiores variações aos 91 dias são justificadas pelo fenómeno de cura interna desencadeado pelos AR que permite para idades jovens a compensação da água de evaporação através da água existente nos mesmos. Deste modo, enquanto houver disponibilidade de água no agregado reciclado, as variações dimensionais são relativamente reduzidas.

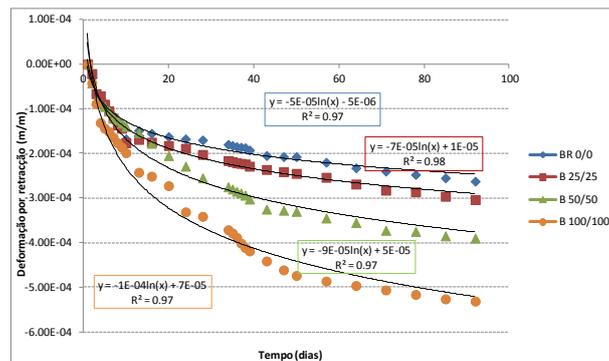


Figura 9: Deformações devido à retração ao longo do tempo nos betões

5.2 Fluência

O ensaio de determinação da fluência foi realizado segundo a especificação LNEC E399 [27]. Os provetes de betão foram

colocados em carga aos 28 dias de idade, durante 91 dias. Na Figura 10, são apresentados os resultados obtidos. De forma idêntica à retracção, a fluência aumenta ao longo do tempo de forma não linear. A utilização de regressões logarítmicas conduziu novamente a coeficientes de correlação (R^2) elevados (entre 0,84 e 0,95). Os resultados parecem indicar um aumento, aproximadamente linear, da fluência com a taxa de substituição. Aos 91 dias, os BAR, para as taxas de substituição de 25, 50 e 100%, apresentam aumentos de fluência, em relação ao BR, de cerca de 40, 56 e 111%, respectivamente. Os valores parecem estar de acordo com os obtidos por Sato et al. [28]. Neste estudo, os betões apenas com agregados reciclados registaram, em relação ao BR, aumentos de fluência de aproximadamente 150%. Contudo, na investigação conduzida por Ajdukiewicz e Kliszczewicz [9], foram obtidos resultados inesperados. Foram observadas diminuições de cerca de 20%, em relação ao BR, quando os AR substituíram na íntegra os agregados naturais.

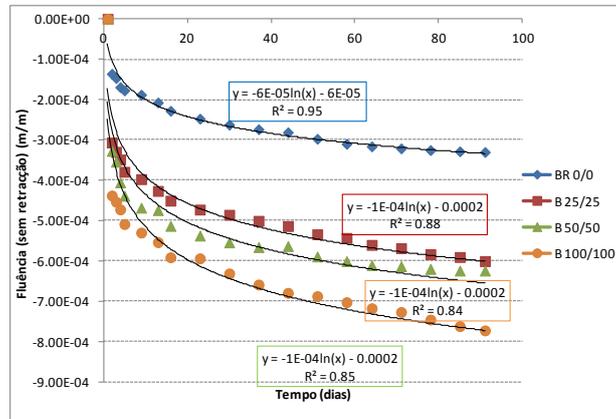


Figura 10: Deformações devido à fluência ao longo do tempo nos betões

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nas propriedades do estado fresco, nomeadamente no abaixamento, mostram que foi necessário aumentar a relação a/c dos BAR, para se atingir trabalhabilidades idênticas. Esta situação deveu-se à maior absorção dos agregados reciclados, afectada pela presença de argamassa aderida. Os finos reciclados foram os mais prejudicados com valores 13 vezes superiores aos AFN. Relativamente aos AGRB, registou-se valores de absorção de água cerca de 6 vezes superiores aos dos AGN. No que respeita à massa volúmica, verificou-se uma diminuição desta propriedade com a incorporação de AR. Foram obtidas variações máximas ente 5 e 9%, para os betões com 100% de agregados reciclados. Os resultados estão de acordo com os valores de massa volúmica dos agregados reciclados, cerca de 12% inferiores aos dos AN. Na propriedade de resistência à compressão, os BAR apresentaram uma diminuição máxima de desempenho, relativamente ao betão de referência, de aproximadamente 15%. No entanto, todos os betões conseguiram atingir valores suficientes (cerca de 60 MPa), para poderem ser utilizados na maioria dos elementos estruturais.

Em termos de durabilidade, conclui-se novamente que a incorporação de agregados reciclados é responsável por piores resultados. Observou-se aumentos significativos nas propriedades de absorção de água por imersão e capilaridade, tendo os valores oscilado entre 11,9 e 19,0% e entre $1,84$ e $4,27 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2\text{h}^{1/2}$, respectivamente. Esta situação poderá ser atribuída à elevada absorção dos AR e ao crescimento da porosidade com o aumento da quantidade de reciclados. No que respeita à resistência à carbonatação, observaram-se tendências idênticas às registadas para a absorção de água. De facto, a maior porosidade da matriz dos BAR, composta por agregados mais porosos e com planos de fraqueza mais acentuados na interface agregado / pasta de cimento, contribuiu para acelerar o processo de penetração de CO_2 . De salientar que, em termos absolutos, se registou diferenças reduzidas. Por exemplo, para a idade de 91 dias, o BR apresentou uma profundidade de carbonatação de 5 mm enquanto o BAR produzido inteiramente com AR obteve um valor de 8 mm. Finalmente, verificou-se também que a variação da difusão de cloretos foi pouco significativa, apesar de aumentar com a taxa de substituição. Aos 91 dias, para os betões de referência e com 100% de AR, observou-se valores de cerca de 8 e $9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente.

Quanto às propriedades de longo prazo, constata-se que a retracção e a fluência são das propriedades mais prejudicadas pela incorporação de agregados reciclados; aos 91 dias, ocorrem aumentos relativos ao BR de cerca de 100 e 110%, respectivamente. Assim, constata-se que a substituição total de AR por AN poderá enfrentar algumas dificuldades, essencialmente devido aos valores elevados de retracção e fluência. No entanto, para taxas de substituição mais pequenas, o uso de agregados reciclados poderá ser viável na produção de betão estrutural, contrariamente à noção generalizada existente.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Radonjanin, V.; Malešev, M.; Marinkovic, S.; Maly, A., “Green recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, n.º 47, 2013, pp. 1503-1511.
- [2] Naik, T., “Sustainability of concrete construction”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, V. 13, 2008, pp. 98-103.
- [3] Mehta, P.; Monteiro, P., “Concrete: microstructure, properties, and materials”, 3rd ed. McGraw-Hill, 2006.
- [4] Meyer, C., “Concrete as a green building material”, Third International Conference on Construction Materials, Vancouver, 2005.
- [5] Tabsh, S.; Abdelfatah, A., “Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, V. 23, 2009, pp. 1163-7.
- [6] Pedro, D.; de Brito, J.; Evangelista, L., “Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete” *Construction and Building Materials*, V. 71, 2014, pp. 141-151.
- [7] Gonzalez, A.; Etxeberria, M., “Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, V. 52, 2014, pp. 227-235.
- [8] Ravindrarajah, R.; Loo, Y.; Tam, C., “Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete”, *Magazine of Concrete Research*, V. 39, 1987, pp. 214-220.
- [9] Ajdukiewicz, A.; Kliszczewicz, A., “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC”, *Cement and Concrete Composites*, V. 24, 2002, pp. 269-79.
- [10] Sim, J.; Park, C., “Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate”, *Waste Management*, V. 31, 2011, pp. 2352-60.
- [11] Building Contractors Society of Japan, “Committee on disposal and reuse of construction waste”, 1981.
- [12] Silva, R.; de Brito, J.; Dhir, R., “Properties and composition of recycled aggregates”, *Construction and Building Materials*, V. 65, 2014, pp. 201-217.
- [13] NP EN 12350-2, “Ensaio do betão fresco: Ensaio de abaixamento”, *IPQ*, Lisboa, 2009.
- [14] NP EN 12350-6, “Ensaio do betão fresco: Massa volúmica”, *IPQ*, Lisboa, 2009.
- [15] NP EN 12390-3, “Ensaio do betão endurecido: Resistência à compressão dos provetes de ensaio”, *IPQ*, Lisboa, 2011.
- [16] Debieb, F. *et al*, “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, V. 32, 2010, pp. 421-426.
- [17] Sagoe-Crentsil, K.; Taylor, A.; Brown, T., “Properties of concrete incorporating fly ash and recycled demolition waste”, *Construction and Engineering*, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Melbourne, 1998.
- [18] LNEC E-394, “Betões: Determinação da absorção da água por imersão. Ensaio pressão atmosférica”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [19] Gómez-Soberón, J., “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study”, *Cement and Concrete Research*, V. 32, 2002, pp. 1301-11.
- [20] LNEC E-393, “Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [21] LNEC E-391, “Betões: Determinação da resistência à carbonatação”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [22] LNEC E-463, “Betões: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário”, LNEC, Lisboa, 2004.
- [23] LNEC E-465, “Betões: Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS”, LNEC, Lisboa, 2007.
- [24] LNEC E-398, “Betões: Determinação da retracção e da expansão”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [25] Amorim, P.; de Brito, J.; Evangelista, L., “Concrete made with coarse concrete aggregate: Influence of curing on durability”, *ACI Materials Journal*, V. 109, 2012, pp. 195-204.
- [26] Tam, V.; Tam, C., “Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach” *Journal of Materials Science*, V. 42, 2007, pp. 3592-602.
- [27] LNEC E-399, “Betões: Determinação da fluência em compressão”, LNEC, Lisboa, 1993.
- [28] Sato, R.; Maruyama, I.; Sogabe, T.; Sogo, M., “Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, V. 5, 2007, pp. 43-61.