

# Incorporação de agregados reciclados com diferentes origens em betão - Desempenho em termos de durabilidade

Diogo Pedro <sup>1</sup>, J. de Brito<sup>2</sup>, L. Evangelista <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup> Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1950-062 Lisboa, Portugal

## RESUMO

Este artigo pretende avaliar a durabilidade de betões com desempenhos pré-estabelecidos (em termos de resistência mecânica) incorporando agregados reciclados (AR) de diferentes origens. Para isso, foram utilizados produtos rejeitados da indústria da pré-fabricação e betões produzidos em condições laboratoriais. A verificação da capacidade de auto-reprodução foi realizada para três gamas de resistência: 15-25; 35-45 e 65-75 MPa. Os betões produzidos procuraram replicar 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, em termos de durabilidade, para níveis elevados de resistência-alvo, não existem diferenças significativas entre agregados de origem controlada e resultantes da pré-fabricação. As perdas de desempenho resultantes da incorporação de AR são substancialmente reduzidas quando são utilizados BO de média ou elevada resistência.

**Palavras-chave:** *agregados reciclados; betões de origem; durabilidade*

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as propriedades dos agregados reciclados de betão (ARB) e os efeitos da sua incorporação em betão têm merecido a atenção de vários investigadores [1-3]. Este material, apesar das óbvias vantagens ambientais, apresenta propriedades distintas dos agregados naturais (AN) que têm impedido a sua utilização de forma regular.

A grande diferença entre ARB e AN, em termos físicos, é a argamassa que adere à sua superfície, que é uma das principais razões para que ocorram perdas de qualidade, comparativamente aos AN [4].

Além disso, os agregados reciclados possuem uma enorme variabilidade entre si, o que condiciona fortemente o desempenho dos futuros betões. Por exemplo, para a taxa de substituição de 100% de AGN por AGRB, constata-se, através da bibliografia existente, uma elevada amplitude nos valores de resistência à carbonatação, desde aumentos de 3% [5] até diminuições de 67% [6]; na resistência à penetração de cloretos, ocorrem diminuições entre 10 e 32% [6, 7, 8]. Em termos mecânicos, na propriedade de resistência à compressão, ocorrem reduções entre 6 e 25% [9; 10].

Procurando estudar esta situação, Gonzalez et al. [11] produziram betões de elevado desempenho, utilizando AR obtidos de diferentes origens. Na absorção de água, obtiveram valores de 5,91, 4,90 e 3,74% para agregados extraídos de BO de 40, 60 e 100 MPa, respectivamente. Verifica-se, assim, uma variação máxima de 58% entre AR. No que respeita à massa volúmica, a variação entre AR foi de apenas 7%. Os resultados de durabilidade mostram que a absorção de água por capilaridade dos betões com agregados reciclados (BAR) nem sempre é superior à do BR. Nesse estudo, devido à baixa relação água / cimento dos betões produzidos, o aumento da quantidade de água (em peso) nos primeiros 30 minutos, em relação ao peso seco das amostras, foi menor do que 0,05%. Após 48 h, o peso de todas as amostras aumentou aproximadamente 0,11% em relação ao peso inicial. Por conseguinte, o comportamento de todos os betões foi considerado adequado.

Na resistividade eléctrica, comparando os valores obtidos com as faixas limites de Langford et al. [12], conclui-se que os diferentes tipos de betão apresentavam, em geral, um risco baixo ou moderado à corrosão. O melhor desempenho foi verificado para o BAR utilizando 20% de AR do BO 100MPa (33000 Ohm\*cm) e o pior registou-se para o betão com 100% de AR provenientes do BO 40 MPa (10000 Ohm\*cm). Constata-se que os piores resultados coincidem com as taxas de substituição mais elevadas e os AR obtidos de BO de qualidade inferior.

Relativamente à penetração de iões cloreto, o estudo mostra que a resistência diminui com a incorporação de AR, com tendências idênticas às da resistividade eléctrica.

Neste contexto, o presente artigo procura também encontrar explicações para a dispersão de valores registada na literatura. Acredita-se que esta situação se deva à influência e variabilidade dos BO a partir dos quais são obtidos os AR. Assim, foi efectuada uma extensa campanha experimental, sendo realizados, entre outros, ensaios de absorção de água por imersão, resistência à carbonatação e retracção, propriedades que ainda não tinham sido analisadas [11;13].

## PARTE EXPERIMENTAL

Na composição dos betões, 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 pré-fabricação (PF), sendo escolhidos produtos com resistências-alvo de 20, 45 e 65 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC), com resistências-alvo idênticas.

Os agregados grossos (naturais e reciclados) foram sujeitos a trituração primária e secundária através do uso de um britador de impacto seguido pelo de um moinho de martelos. O processo foi realizado numa pedreira portuguesa, reproduzindo o método industrial que é utilizado na obtenção dos AN. Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades dos agregados.

Para avaliação da resistência à compressão foi tida em consideração a norma NP EN 12390-3. Relativamente ao desempenho de durabilidade, foram realizados ensaios de absorção de água por imersão, resistência à carbonatação, resistência à penetração de cloretos e retracção através das especificações, LNEC E394, LNEC E391, LNEC E463 e LNEC E398, respectivamente.

Tabela 1: Propriedades dos agregados

Agregados	Designação	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )			Absorção de água (%)
		Material impermeável	Material seco	Material saturado com superfície seca	
Grossos	AN	2708,8	2639,1	2664,8	1,0%
	LC20	2686,3	2231,4	2400,8	7,6%
	LC45	2701,7	2356,1	2484,0	5,4%
	LC65	2484,9	2280,4	2362,7	3,6%
	PF20	2719,8	2288,1	2446,8	6,9%
	PF45	2686,6	2322,4	2458	5,8%
	PF65	2614,1	2371,6	2464,3	3,9%
Finos	AFN	2637,8	2625,0	2630,0	0,1

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos para o betão no estado endurecido.

### Resistência à compressão em cubos

Os resultados de resistência à compressão, divididos por família de classe de resistência alvo, são apresentados na Figura 1.

Analisando estes valores, a substituição de AGN por AGRB provoca diminuições de resistência em relação ao BR de 14,3-23,8, 3,2-6,6 e 3,0-8,1% nos betões com baixa, média e elevada resistência alvo, respectivamente.

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 os betões de 65 MPa produzidos com os melhores AR. Apesar da intenção de auto-reprodução, 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 argamassa 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 [3].

Considerando as diferenças referidas na microestrutura dos betões, as maiores diminuições de resistência dos betões de 20 MPa parecem dever-se ao facto de a rotura nos BAR ocorrer na

ITZ entre o NA original e a argamassa aderida ou através da própria argamassa, ao contrário do 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 et al. [13] obtiveram resultados semelhantes. No seu estudo, observa-se que, quando se pretende reproduzir uma resistência de 30 MPa do BO, o BARB exibe uma perda de desempenho em relação ao BR, de aproximadamente 30%. No entanto, quando a resistência a reproduzir é de 50 MPa, o BARB evidencia um comportamento idêntico ao do BR, registando-se apenas uma diminuição de cerca 2%. Gonzalez et al. [11] concluíram também que os 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 pré-fabricação 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, respectivamente.

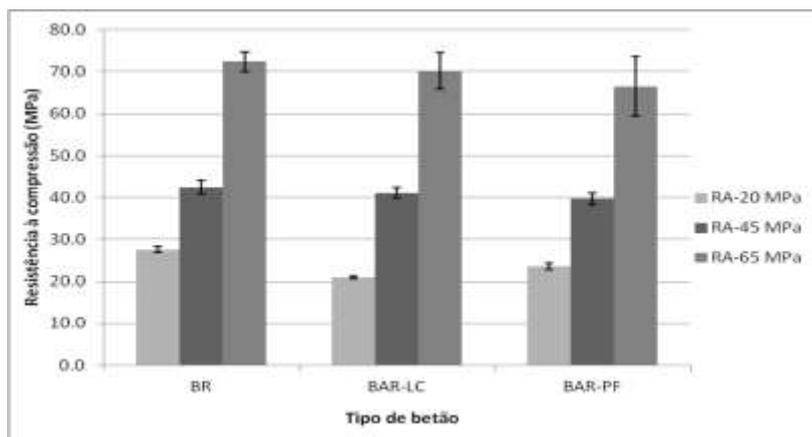


Figura 1: Resistência à compressão das diversas famílias

### Absorção de água por imersão

Os resultados do ensaio de absorção de água por imersão constam da Tabela 2, sendo apresentados os valores médios ( $\mu$ ), o desvio-padrão ( $\sigma$ ) e as variações relativas devidas à incorporação de AR de diferentes origens ( $\Delta$ ).

Tabela 2: Absorção de água por imersão

Família	RA-20 MPa			RA-45 MPa			RA-65 MPa		
	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)
BR	13,5	0,4	0,0	13,8	0,1	0,0	9,4	0,7	0,0
BAR-LC	17,7	0,8	31,4	17,1	0,2	24,0	13,5	0,1	44,9
BAR-PF	18,3	0,7	35,4	16,0	0,3	16,3	14,1	0,1	51,0

Os valores mostram 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 BARB. Neste estudo, a absorção dos AR chegou a ser cerca de sete vezes maior do que a dos AN. Analisando a Tabela 1, 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. [14], verifica-se alguma proximidade entre eles.

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

### Resistência à penetração de cloretos

Os resultados do ensaio de difusão de cloretos para cada tipo de betão são apresentados na Tabela 3. Analisando a tabela, verifica-se que 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 BARB, causada pela argamassa aderida nos AR.

Tabela 3: Resultados do ensaio de difusão de cloretos aos 28 e 91 dias

Tipo de betão	Família	RA-20 MPa			RA-45 MPa			RA-65 MPa		
	Idade	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\sigma$ (%)	$\Delta$ (%)
BR	28 dias	23,0	0,4	0,0	21,8	1,0	0,0	8,8	0,7	0,0
	91 dias	21,3	0,5	0,0	18,3	0,7	0,0	7,0	0,5	0,0
BAR-LC	28 dias	31,2	1,9	35,5	22,2	1,1	1,6	9,5	0,9	7,8
	91 dias	28,0	1,5	31,3	19,2	1,1	5,3	7,6	0,9	8,8
BAR-PF	28 dias	33,8	1,9	47,0	22,1	1,7	1,1	11,1	0,3	25,7
	91 dias	28,5	0,5	33,5	19,1	0,6	4,4	8,6	0,5	23,1

Como referido, esta particularidade dos AR faz com que os BARB 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 contêm um elevado número de poros e fissuras [15]. 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 [16]. Um outro factor que poderá explicar esta situação é a dimensão das fissuras dos AR mais fracos.

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 BARB evidenciar um comportamento comparável ao do BR. Na investigação de Gonzalez et al. [11], 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.

No que respeita à utilização de AR provenientes de BO de laboratório e de produtos da pré-fabricação, constatou-se não existir diferenças significativas, em termos absolutos, entre as diversas famílias.

Relativamente aos ensaios aos 91 dias, são visíveis diminuições dos coeficientes de cerca de 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.

### Resistência à carbonatação

Os resultados dos coeficientes de carbonatação são apresentados na Tabela 4. 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 (45,6-88,9%), a diferença em termos absolutos é reduzida ( $0,23-0,43 \text{ mm}/\text{dia}^{1/2}$ ).

As perdas de desempenho dos BARB devem-se à maior porosidade destes betões. Segundo Kou et al. [17], 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. [18]. 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 AR.

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, observou-se, em termos relativos, variações mais significativas, mas que não correspondem a tendências comprovadas.

Tabela 4: Coeficientes de carbonatação

Família	RA-20 MPa		RA-45 MPa		RA-65 MPa	
	$\mu$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\Delta$ (%)	$\mu$ (%)	$\Delta$ (%)
BR	4,30	0,0	1,61	0,0	0,23	0,0
BAR-LC	5,10	18,5	1,84	14,7	0,33	45,6
BAR-PF	4,90	14,0	1,74	8,2	0,43	88,9

## Retracção

Os resultados do ensaio de retracção são apresentados na Figura 2. 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 BARB 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 retracção foram de 47, 43 e 68%, respectivamente.

Os valores obtidos mostram que a retracção é das propriedades mais afectadas pela incorporação de AGRB. Os piores resultados dos BARB 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, o que permite maiores deformações por retracção. Assim, o maior teor de vazios causado pela argamassa aderida nos AR parece levar a um aumento de deformabilidade e de retracção 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 [18].

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 BARB das diversas resistências-alvo. Isto significa que a retracção 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 et al. [19], constata-se também uma influência significativa da incorporação de AR, com aumentos de 40% relativamente ao BR.

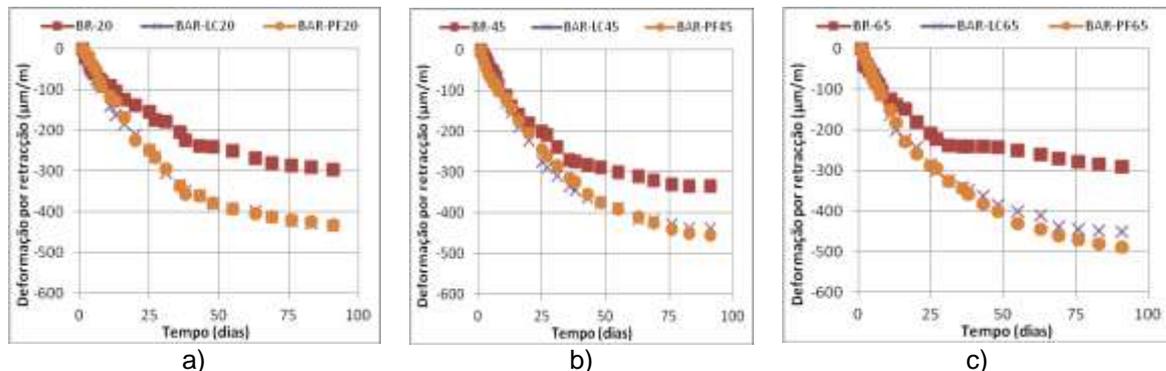


Figura 2: Deformação por retracção ao longo do tempo: a) RA-20 MPa; b) RA-45 MPa; c) RA-65 MPa.

## 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 objectivo era replicar nos novos betões a resistência dos de origem, é possível concluir que:

- 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 pré-fabricação é pouco significativa;
- 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 retracção é das propriedades mais prejudicada 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.

## Bibliografia

1. Poon, C. et al., *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*. Construction and Building Materials, Volume n.º 18, 461-8, (2004).
2. Kwan, W. et al., *Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties*. Construction and Building Materials, Volume n.º 26, 565-573, (2012).
3. Guedes, M. et al., *Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates*. Microscopy and Microanalysis, Volume n.º 19, 1222-30, (2013).
4. Tam, V. et al., *Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach*. Cement and Concrete Research, Volume n.º 35, 1195-203, (2005).
5. Levy, S. et al., *Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development*. Cement and Concrete Research, Volume n.º 34, 1975-1980, (2004).
6. Kou, S. et al., *Enhancing the durability properties on concrete prepared with coarse recycled aggregate*. Construction and Building Materials, Volume n.º 35, 69-76, (2012).
7. Rao, M. et al., *Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete*. Materials and Structures, Volume n.º 44, 205-20, (2011).
8. Limbachiya, M. et al., *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Construction and Building Materials, Volume n.º 27, 439-449, (2012).
9. Bairagi, N. et al., *Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates*. Resources, Conservation and Recycling, Volume n.º 9, 109-126, (1993).
10. Etxeberria, M. et al., *Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Research, Volume n.º 37, 735-742, (2007).
11. Gonzalez, A. et al., *Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, Volume n.º 52, 227-235, (2014).
12. Langford, P. et al., *Monitoring the corrosion of reinforcing steel*. Construction Repair, Volume n.º 1, 32-6, (1987).
13. Tabsh, S. et al., *Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete*. Construction and Building Materials, Volume n.º 23, 1163-7, (2009).
14. Thomas, C. et al., *Durability of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, Volume n.º 40, 1054-1065, (2013).
15. Kong, D. et al., *Effect and mechanism of surface-coating pozzolanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete*. Construction and Building Materials, Volume n.º 24, 701-708, (2010).
16. Hobbs, D., *Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete*. Cement and Concrete Research, Volume n.º 29, 1995-8, (1999).
17. Kou, S. et al., *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, Volume n.º 21, 130-6, (2006).
18. Amorim, P. et al., *Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability*. ACI Material Journal, Volume n.º 109, 195-204, (2012).
19. Ajdukiewicz, A. et al., *Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC*. Cement and Concrete Composites, Volume n.º 24, 269-79, (2002).