

Influência do método de britagem dos agregados reciclados nas propriedades do betão

PEDRO Diogo^{1, a}, BRITO Jorge de^{1, b} e EVANGELISTA Luís^{2, c}

¹ Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

² Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007, Lisboa, Portugal

^adiogo.pedro@ist.utl.pt, ^bjb@civil.ist.utl.pt, ^cevangelista@dec.isel.ipl.pt

Palavras-chave: Agregados reciclados, desempenho, processo de britagem, pré-fabricação.

Resumo. Neste trabalho, pretende-se avaliar o desempenho (mecânico e de durabilidade) de betões executados com agregados grossos reciclados de betão (AGRB), obtidos através de dois processos de britagem: trituração primária (TP) e trituração primária mais secundária (TP+TS). Com esta análise, pretende-se seleccionar o método mais eficaz de produção de agregados reciclados (AR). Os agregados reciclados utilizados têm origem em produtos da pré-fabricação (PF), com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 65 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC), com classes de resistência à compressão idênticas. A avaliação das propriedades dos betões é feita através dos seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tracção por compressão diametral; módulo de elasticidade; resistência à carbonatação; resistência à penetração por cloretos; absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão. Deste modo, procura-se contribuir para uma base científica sólida e inovadora, que permita à indústria da pré-fabricação a utilização sem restrições dos resíduos por si gerados.

Introdução

A sociedade moderna, mais qualificada em todas as áreas do conhecimento, tem exigido à indústria da construção que adopte novas práticas e processos que minimizem os impactes negativos do sector sobre o meio ambiente. As preocupações relativas ao esgotamento de recursos naturais, ao elevado consumo de cimento (associado a elevados consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono) e aos denominados resíduos da construção e demolição (RCD) têm estado, nestes dias, na agenda dos países desenvolvidos.

Neste domínio, a reciclagem dos resíduos gerados foi identificada como a forma mais viável de minimizar os riscos associados às questões levantadas [1]. Neste contexto, a deposição em aterro de RCD é um dos maiores problemas ambientais da União Europeia (UE), estimando-se que cerca de 180 milhões de toneladas por ano ou 480 kg/pessoa/ano de RCD sejam gerados na UE [2].

Assim, a crescente preocupação para a preservação ambiental e desenvolvimento sustentável têm levado ao desenvolvimento de sistemas para a reciclagem dos resíduos da construção e demolição. Na actualidade, a produção e utilização de agregados reciclados (AR), materiais cujas propriedades começaram ser estudadas há 70 anos [3], são práticas comuns nas indústrias de construção de vários países. Por exemplo, a *Construction Materials Recycling Association* (CMRA) relata que são recicladas anualmente cerca de 140 milhões de toneladas de resíduos de betão nos Estados Unidos da América [4]. O relatório anual da Associação Europeia de Agregados (UEPG) [5] mostra que os agregados reciclados gerados representam cerca de 5% da produção na União Europeia. Ainda com base no mesmo relatório, a Alemanha é o maior produtor de agregados reciclados, com uma produção de aproximadamente 60 milhões de toneladas. O Reino Unido segue-se com cerca de 49 milhões de toneladas, a Holanda produz cerca de 20 milhões de toneladas e a França 17 milhões de toneladas. Na Austrália, mais de 50% do resíduo de betão total gerado pelas atividades de RCD é recuperado para reciclagem, enquanto o restante vai para aterros [6]. No Japão, chegou-se a uma taxa de aproximadamente 98% para o tratamento de resíduos de betão para agregados reciclados [7]. No entanto, existem outros países em que o nível de consciência para a reciclagem com vista à produção e aplicação de agregados reciclados é ainda baixa [8].

Deste modo, constata-se que vários governos mundiais encontram-se a promover políticas, destinadas a reduzir o uso de recursos primários e aumentar a reutilização e a reciclagem.

Relativamente aos agregados reciclados de betão (ARB) já são conhecidas diversas aplicações garantindo o cumprimento de todas as especificações, nomeadamente em fundações, pavimentação, betão armado e pré-esforçado, entre outros [9, 10].

Levantamento bibliográfico

Nos últimos anos, as propriedades de ARB e os efeitos resultantes da sua incorporação em betão têm merecido a atenção de vários investigadores [1,3,6-10]. Este material, apesar das óbvias vantagens ambientais, apresenta propriedades distintas dos agregados naturais que têm impedido a sua utilização de forma regular. Além disto, a qualidade dos agregados reciclados varia significativamente consoante o betão que lhes deu origem, o que tem enorme influência no desempenho dos futuros betões [11].

A grande diferença entre agregados reciclados de betão e agregados naturais (AN), em termos físicos, é a argamassa que adere à sua superfície. A presença de argamassas nos ARB é uma das principais razões para que ocorram perdas de qualidade, comparativamente com os AN.

Este fenómeno é explicado pela porosidade da argamassa aderida [12-15] que apresenta inúmeras microfissuras [14]. Desta forma, os agregados reciclados de betão são caracterizados como tendo menor massa volúmica, elevada absorção de água e resistência mecânica menor do que os agregados naturais [16]. Por conseguinte, estas características dos ARB podem ter, na produção de betão novo, um efeito adverso sobre a ligação interfacial entre eles e a pasta de cimento. Segundo Tam et al. [14], a presença de poros e fissuras na argamassa que se encontra anexada à zona de transição interfacial (ITZ) constitui um elo mais fraco na microestrutura do betão, afectando a sua resistência final.

Na investigação realizada por Topçu e Sengel [17], os autores procuraram analisar a influência da incorporação de ARB, produzindo betões com taxas de substituição até 100%. Os resultados mostram uma diminuição da massa volúmica com a incorporação destes resíduos, mas a diferença registada nesta propriedade não é tão significativa como a que foi evidenciada na absorção de água. Limbachiya et al. [18] obtiveram conclusões idênticas.

Desta forma, verifica-se uma maior procura de água nos betões produzidos com incorporação de agregados reciclados de betão (BARB), causando um aumento significativo da relação a/c [19]. Assim, alguns investigadores recorrem à utilização de superplastificantes com objectivo de manter a quantidade de água em valores aceitáveis [19,20].

Como consequência da maior absorção destes agregados, também a trabalhabilidade, propriedade do betão no estado fresco, é afectada, verificando-se, para a mesma quantidade de água, piores desempenhos à medida que se incorpora ARB, especialmente para taxas de substituição superiores a 50% [17]. Na investigação realizada por Poon et al. [21], com vista a melhoria da trabalhabilidade do betão reciclado, sugere-se a necessidade de alterar as condições de humidade a que os agregados reciclados estão sujeitos.

Relativamente ao desempenho mecânico de betões com incorporação de ARB, segundo a literatura consultada, as conclusões são idênticas, ou seja, verifica-se a diminuição das propriedades do betão com a substituição de agregados naturais por ARB. Nas investigações realizadas por Rahal [22], Tabsh et al. [23] e Rao et al. [24], verifica-se uma diminuição na resistência à compressão na ordem de 10-25% e de 5-35% no módulo de elasticidade para uma taxa de substituição de grossos de 100%.

De modo a otimizar as propriedades do betão reciclado, alguns autores sugerem a introdução de adjuvantes (superplastificantes) e de adições (cinzas volantes, sílicas de fumo, entre outros).

No trabalho conduzido por Berndt [25], observa-se que o betão com agregados reciclados (100% de substituição nos grossos) em que 50% do cimento foi substituído por escória de alto-forno apresentava valores superiores de resistência à compressão e tracção e valores inferiores na propriedade de módulo de elasticidade, relativamente ao betão de AR com 100% de cimento Portland. Kou e Poon [26] obtiveram resultados semelhantes com 25% de substituição de cimento por cinzas volantes. No entanto, para 35% de substituição, a resistência à compressão de BARB foi

significativamente diminuída. Estes resultados sugerem que, para um volume elevado de cinzas volantes, existe uma diminuição de resistência dos BARB. Relativamente à adição de sílica de fumo e à introdução de superplastificante, existe também a sugestão de que as propriedades do betão reciclado podem ser significativamente aumentadas através destes elementos [27].

No que respeita à durabilidade de BARB, constata-se que esta também diminui, com o aumento da quantidade de agregados reciclados [20, 24]. Na investigação de Rao et al. [24], obteve-se, para o betão com 100% de substituição nos grossos, aumentos de 33 e 14% nas propriedades de absorção de água e profundidade de penetração de cloretos, respectivamente. Ravindrajah et al. [28] registaram, nos betões com incorporação de agregados grossos reciclados de betão, aumentos de fluência de cerca de 30-60% comparativamente ao betão de referência. Relativamente à retracção, no trabalho realizado por Katz [16], conclui-se que a utilização de ARB conduziu a valores de retracção que variaram entre 0.55 e 0.80 mm/m, aos 91 dias, enquanto o betão de referência apresentou valores de 0.30 mm/m.

Dado que a forma dos agregados reciclados influencia o desempenho dos futuros betões, Nagatakia et al. [29] avaliaram o seu desempenho através de vários processos de trituração. Concluíram que a resistência à compressão e à flexão de um betão com agregados reciclados era mais baixa, nas situações em que os agregados tinham sido sujeitos apenas a um ciclo de trituração em vez de dois.

Sequência dos ensaios

Com o conjunto de ensaios realizados, procurou-se avaliar a viabilidade da reintrodução de ARB na indústria da pré-fabricação. Foram utilizados agregados grossos reciclados (AGR) provenientes da trituração de elementos pré-fabricados e de betões produzidos em laboratório.

Todos os AR utilizados tiveram origem em produtos com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 65 MPa. Para garantir que possuíam qualidade adequada às exigências técnicas que a indústria da pré-fabricação requer, pretendeu-se neste trabalho otimizar o processo de trituração utilizado na obtenção dos AR.

Deste modo, foi avaliado o desempenho (mecânico e de durabilidade) de betões executados com AGR produzidos usando o processo corrente de trituração dos AR (correspondente a uma trituração primária apenas), comparando-o com o desempenho de betões com incorporação de AGR obtidos através de um processo de trituração constituído por duas fases (trituração primária e secundária), semelhante ao usado em agregados naturais pétreos.

Nesta campanha experimental, foram produzidos dezoito tipos de betões. Assim, foram realizados doze betões com AGR, considerando dois processos de britagem e procurando reproduzir a mesma resistência dos agregados a utilizar: de 20, 45 e 65 MPa para os agregados provenientes de laboratório e da pré-fabricação. Foram ainda produzidos mais seis betões de referência (BR), tendo em conta igualmente os processos de trituração e resistências alvo. Deste modo, analisou-se o efeito do processo de britagem e da substituição de agregados naturais por reciclados de betão.

Materiais

Os diversos betões (utilizando unicamente agregados naturais ou com incorporação de agregados reciclados) foram produzidos de acordo com a metodologia proposta por Faury [30], sendo aceites apenas as amassaduras que apresentaram valores de abaixamento na ordem de 125 ± 15 mm.

Nos BARB, os agregados reciclados precisaram de maiores quantidades de água para compensar a sua elevada capacidade de absorção. Desta forma, ao adicionar-se água às amassaduras com AR, garantiu-se um correcto processo de hidratação, não comprometendo o desempenho dos betões.

Assim, foram determinadas duas relações a/c diferentes: a relação a/c absoluta, isto é, a razão entre a quantidade total de água introduzida na mistura e a quantidade de ligante (que não apresenta interesse relevante para o estudo das amassaduras de betão) e a relação a/c efectiva que consiste na determinação do quociente entre quantidade de água livre e a quantidade de ligante (essencial para a compreensão do desempenho do betão e apresentada neste trabalho).

Na composição dos betões, foram utilizados os seguintes materiais: agregados finos naturais (areia de rio), agregados grossos naturais (pedra calcária triturada), agregados grossos reciclados

(provenientes de betão produzido em laboratório e de elementos de pré-fabricação com diferentes resistências) e cimento.

O cimento utilizado foi o CEM I 42.5R com quantidades de 210, 280 e 350 kg/m³ para os betões em que se pretendiam atingir resistências de 20, 45 e 65 MPa, respectivamente. Nos betões com uma resistência alvo de 65 MPa, foi adicionado ainda superplastificante (SikaPlast 898) na proporção de 1% da massa de cimento, valor que se encontra no intervalo aconselhado pelo fabricante dos produtos.

Nos betões com incorporação de agregados reciclados de betão, foi considerada apenas uma taxa de substituição de 100% agregados grossos naturais por agregados grossos reciclados.

Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo, são apresentados de forma comentada os resultados obtidos para o betão no estado endurecido (características mecânicas e durabilidade).

Resistência à compressão

O ensaio de resistência compressão foi efectuado aos 28 dias segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Na Figura 1, são apresentados os resultados obtidos.

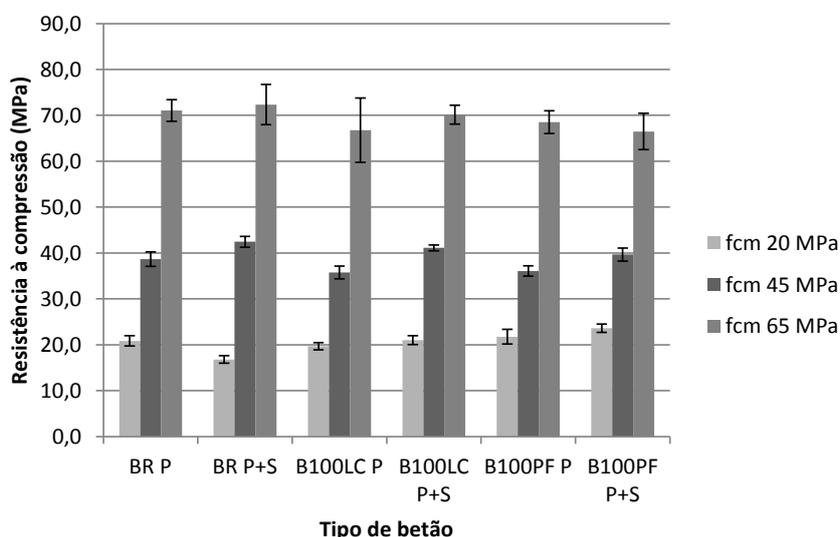


Figura 1: Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Analisando a Figura 1, observa-se, para os betões f_{cm} 20 MPa obtidos através de trituração primária, uma semelhança de valores, com variação inferior a 6%. Relativamente aos betões correspondentes à trituração primária mais secundária, verifica-se que o betão de referência apresentou resultados significativamente inferiores, atingindo-se variações de 40%. Este fenómeno é explicado pela elevada relação a/c registada no BR P+S, betão que terá de ser repetido. Como consequência, o betão BR P+S apresentou a maior relação a/c e o valor mais baixo de resistência à compressão. Comparando os processos de britagem, constata-se que os betões TP+TS (excluindo os BR) apresentaram valores superiores de resistência, com aumentos de aproximadamente 7 e 8%, para os betões provenientes de laboratório e de pré-fabricação, respectivamente. Conclui-se também que os melhores resultados foram obtidos nos betões da pré-fabricação.

No que respeita aos betões f_{cm} 45 MPa, verifica-se uma diminuição da resistência com a incorporação de AGRB, tendo sido obtidas variações máximas de 8 e 7%, para os betões de TP e TP+TS, respectivamente. Observando a influência do processo de trituração, verifica-se que os betões utilizando agregados com TP+TS obtiveram melhores resultados, com ganhos de resistência de 10, 15 e 10% no caso dos betões de referência, laboratório e pré-fabricação, respectivamente.

Finalmente, nos betões f_{cm} 65 MPa, observa-se também uma perda de resistência resultante da incorporação de agregados grossos reciclados, com diminuições máximas de 6 e 8% para os betões de

TP e TP+TS, respectivamente. Nesta família, contrariamente aos resultados obtidos anteriormente, verificam-se piores resultados nos betões com origem na pré-fabricação, sujeitos a TP+TS.

Os resultados obtidos nesta investigação concordam com os de Rahal [22], em que foram verificadas diminuições de resistência à compressão de aproximadamente 10%. Também Rao et al. [24] obtiveram diminuições semelhantes, cerca de 13%. No entanto, Tabsh et al. [23], contrariamente a este trabalho, obtiveram para a mistura 1 (betão 30 MPa) e mistura 2 (betão 50 MPa) perdas de resistência de 30 e 6%, respectivamente. Desta forma, os investigadores concluíram que a diminuição de resistência, devido ao uso de agregados reciclados é mais significativa num betão fraco do que num betão mais forte. Esta situação foi aí explicada pelo facto de a maior quantidade de cimento existente na mistura 2 ter atenuado o efeito da incorporação dos agregados grossos reciclados.

Resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio de resistência à tracção por compressão diametral foi efectuado aos 28 dias segundo a norma EN 12390-6 (2011). Na Figura 2, são apresentados os resultados obtidos.

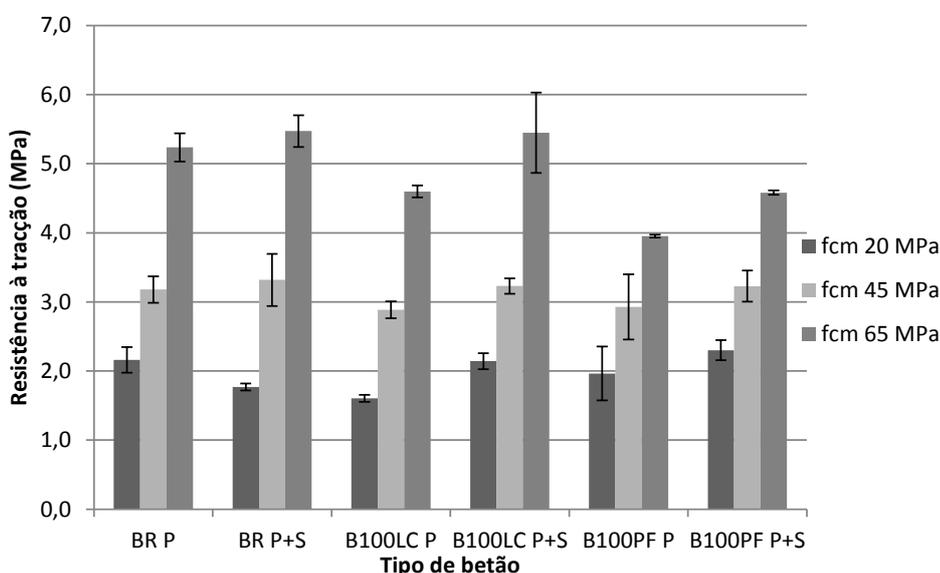


Figura 2: Resultados do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias

Na família f_{cm} 20 MPa, os betões sujeitos a TP com incorporação de agregados reciclados, nomeadamente o B100LC P e B100PF P, evidenciaram perdas de desempenho com diminuições de 26 e 9%, respectivamente. Analisando a influência do processo de britagem, constata-se que betões TP+TS (excluindo os BR) apresentaram valores superiores de resistência, com aumentos de aproximadamente 33 e 17%, para os betões provenientes de laboratório e de pré-fabricação, respectivamente. Os resultados mostram que os betões com AR com origem na pré-fabricação atingiram os valores mais elevados.

Relativamente aos betões f_{cm} 45 MPa, registou-se uma diminuição da resistência com a incorporação de AGRB, tendo sido obtidas variações máximas de 9 e 3%, para os betões de TP e TP+TS, respectivamente. Relativamente ao processo de britagem, constata-se que foram os betões sujeitos a TP+TS que obtiveram melhores resultados.

Nos betões f_{cm} 65 MPa, verifica-se novamente uma baixa de resistência devida à incorporação de agregados grossos reciclados, com diminuições máximas de 24 e 0,4 % para os betões de TP e TP+TS, respectivamente. No que se refere a influência do processo de trituração, verifica-se que os betões utilizando agregados com TP+TS obtiveram melhores resultados, com ganhos de resistência de 5, 19 e 16% para os betões de referência, laboratório e pré-fabricação, respectivamente. Conclui-se que os AR provenientes de elementos pré-fabricados atingiram resultados inferiores relativamente aos de laboratório.

Em suma, nesta propriedade, a diminuição máxima registada devida à substituição de agregados naturais por agregados reciclados foi de 24%. Os resultados obtidos estão de acordo com Rao et al.

[24], que verificaram diminuições de resistência à tracção de aproximadamente 24%. Na investigação conduzida por Tabsh et al. [23], ocorreram perdas de resistência idênticas, cerca de 25%, para a mistura 1 (betão 30 MPa). Contudo, na mistura 2 (betão 50 MPa), verificou-se quase a mesma resistência para betões de referência e com incorporação de agregados reciclados (de forma idêntica ao sucedido no betão B100LC65P+S).

Módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado com base na especificação LNEC E-397 (1993) aos 28 dias. Na Figura 3, são apresentados os resultados obtidos.

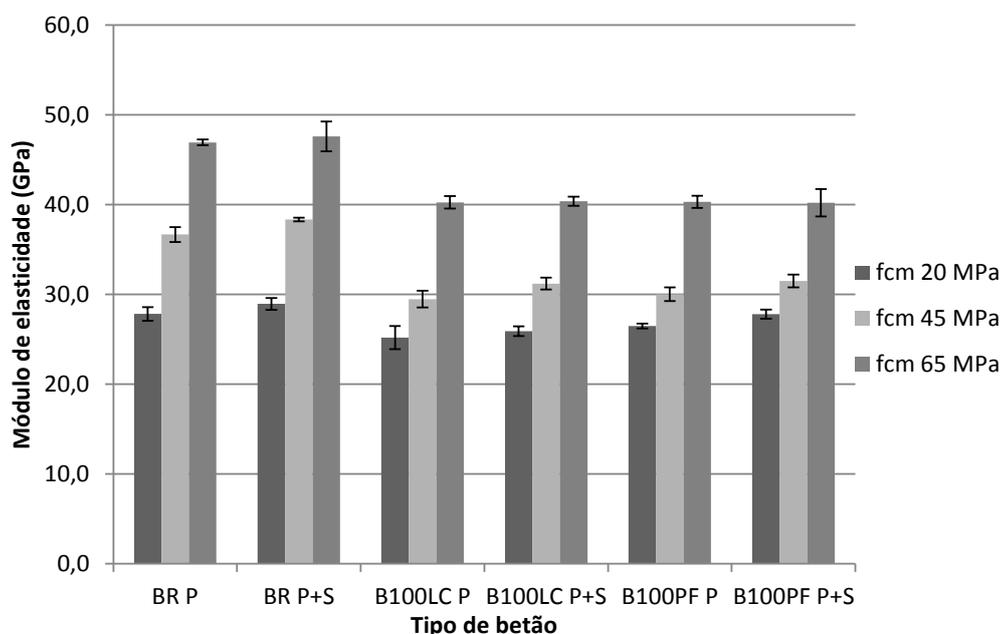


Figura 3: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias

Através da Figura 3, verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão, registando-se variações máximas de aproximadamente 10, 20 e 15% nas famílias f_{cm} 20, 45 e 65 MPa, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com o Eurocódigo 2, verificando-se que as deformações elásticas do betão dependem em grande parte da sua composição.

Relativamente ao processo de britagem, conclui-se que os betões que utilizaram agregados provenientes de TP+TS obtiveram melhores desempenhos. No entanto, nas diferentes famílias estudadas, a maior variação registada foi de apenas 5%.

Deste modo, os valores obtidos mostram que esta propriedade é influenciada pela pasta de cimento, tipo de agregado, ligações e distribuição dos constituintes do betão, factores que afectam a rigidez e a deformabilidade do conjunto.

As perdas registadas devido à incorporação de agregados reciclados foram na ordem de 20%. Estes resultados são baixos quando comparados com os de Rao et al. [24], em foram obtidas diminuições de 35%. Esta situação poderá ser explicada pela diferença dos valores do módulo de elasticidade dos agregados reciclados utilizados. No estudo de Kheder et Al-Windawi [32], verificaram-se diminuições mais próximas das do presente trabalho, entre 20 e 25%.

Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi efectuado aos 28 dias segundo a especificação LNEC E394-1993. Na Figura 4, são apresentados os resultados obtidos.

Os resultados mostram que os betões que apresentaram um melhor desempenho mecânico obtiveram nesta propriedade os valores mais satisfatórios. Deste modo, a família f_{cm} 65 MPa registou os melhores resultados, seguida da f_{cm} 45 MPa e da f_{cm} 20 MPa.

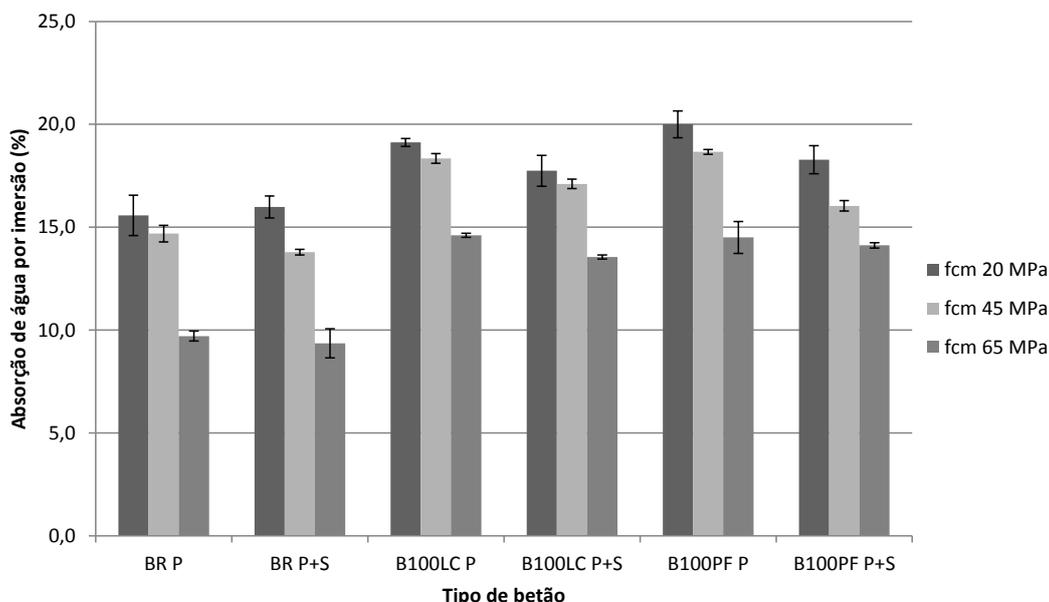


Figura 4: Resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão

Através da Figura 4, constata-se que, nas diversas famílias, os betões com incorporação de agregados reciclados apresentam uma maior absorção por imersão, relativamente ao betão de referência.

De igual modo, é possível concluir que a trituração primária conduz a piores resultados comparativamente ao outro processo de britagem: trituração primária mais secundária.

Conclui-se ainda que, os efeitos da substituição de agregados naturais por agregados reciclados de betão são mais significativos nas famílias com as maiores classes de resistência, verificando-se variações máximas de aproximadamente 50, 27 e 15% para os betões correspondentes a f_{cm} 65 MPa, f_{cm} 45 MPa e f_{cm} 20 MPa, respectivamente.

Assim, à excepção da família f_{cm} 65 MPa, os resultados encontram-se de acordo com a literatura consultada, ou seja, com aumentos entre 15 e 30% de absorção de água [24,33]. No estudo de Rao et al. [24], os valores obtidos foram justificados pela elevada absorção de água dos agregados grossos reciclados (cerca de 3,5 vezes mais do que a dos agregados naturais).

Absorção de água capilaridade

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E393-1993, 42 dias após a amassadura dos betões. Na Figura 5, são apresentados os resultados obtidos. Estes mostram que os valores registados nesta propriedade aumentam com a substituição de agregados naturais por agregados de betão. É ainda possível observar que os betões que utilizaram agregados obtidos por trituração primária e secundária apresentaram melhores resultados. Estas conclusões são semelhantes às verificadas para a absorção de água por imersão.

No estudo conduzido por Kou et Poon [26], como seria de esperar, a absorção de água do betão reciclado foi significativamente maior do que a do betão com agregados grossos naturais, registando-se aumentos de cerca de 65%. Os valores do estudo [26] enquadram-se nos obtidos neste trabalho. Os resultados das diferentes investigações, como sucedido na absorção por imersão, são justificados pela maior absorção do agregado reciclado relativamente ao agregado natural.

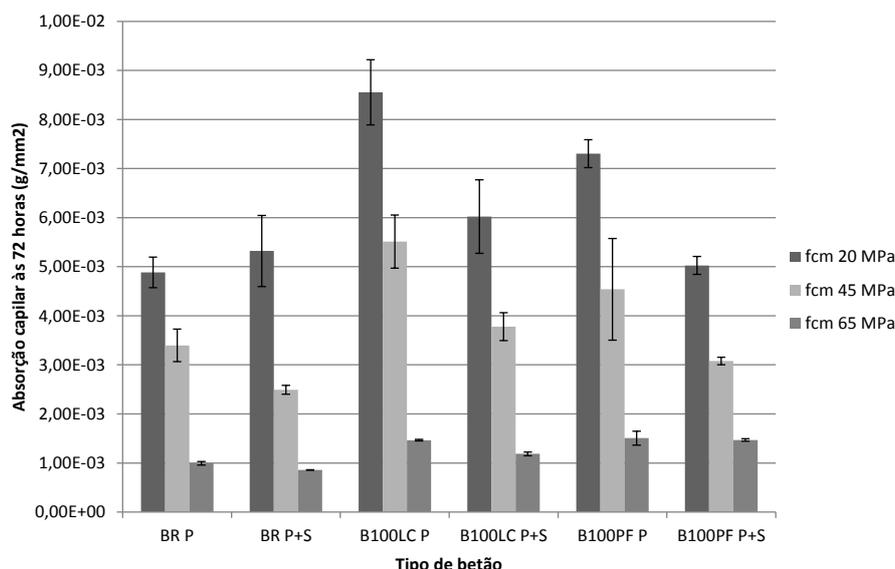


Figura 5: Representação gráfica dos resultados obtidos no ensaio de absorção por capilaridade

Resistência à carbonatação

O ensaio de resistência à carbonatação foi efectuado aos 7, 28, 56 e 91 dias, segundo a especificação LNEC E-391-1993. Nas Figuras 6 a 8, são apresentados os resultados obtidos. Existem betões que, para as idades mais avançadas, ainda não dispõem de valores.

Os resultados mostram que a profundidade da frente de carbonatação aumenta com o tempo em todos os betões. Através da observação dos gráficos, é ainda notória a diferença de escala da frente de carbonatação nas diversas famílias, apresentando esta propriedade valores maiores nas famílias com menores classes de resistência-alvo.

Aos 56 dias, idade mais avançada com valores disponíveis para se efectuar uma análise, devido à situação já exposta, o betão BR P+S da família f_{cm} 20 MPa apresenta, mais uma vez, um desempenho aquém do esperado. Deste modo, como consequência da elevada relação a/c registada por este betão, verificou-se um aumento da porosidade, causado pelo aumento do volume de vazios. Assim, nas restantes famílias, além de se concluir que os betões produzidos com agregados obtidos pelo processo TP+TS apresentam melhores resultados, verifica-se ainda que a incorporação de reciclados de betão influencia negativamente esta propriedade.

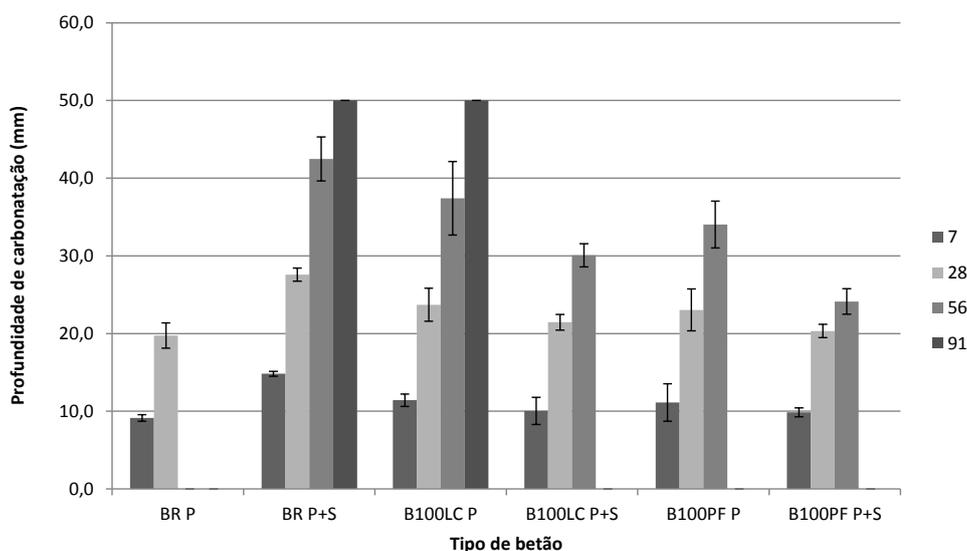


Figura 6: Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 20 MPa

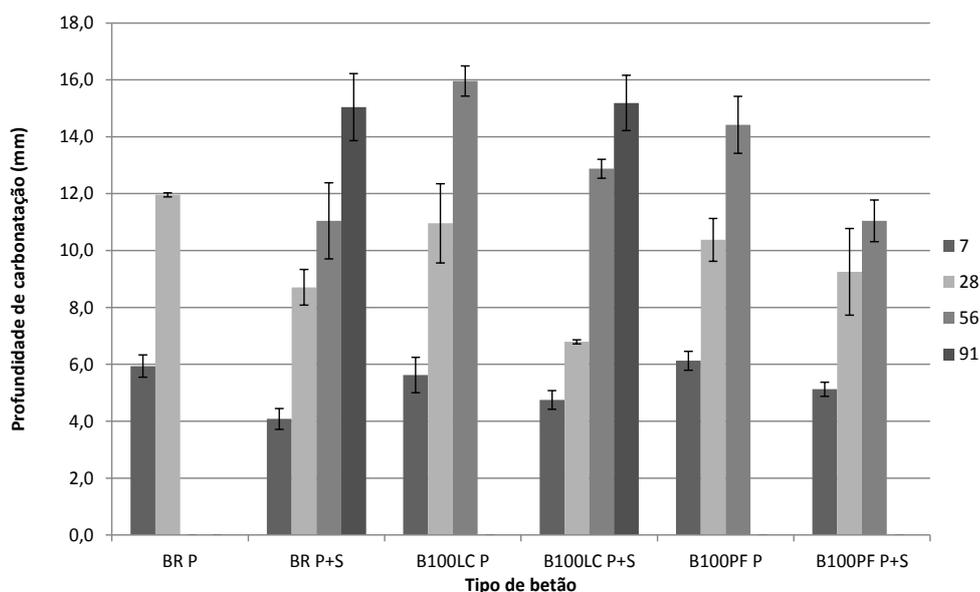


Figura 7: Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 45 MPa

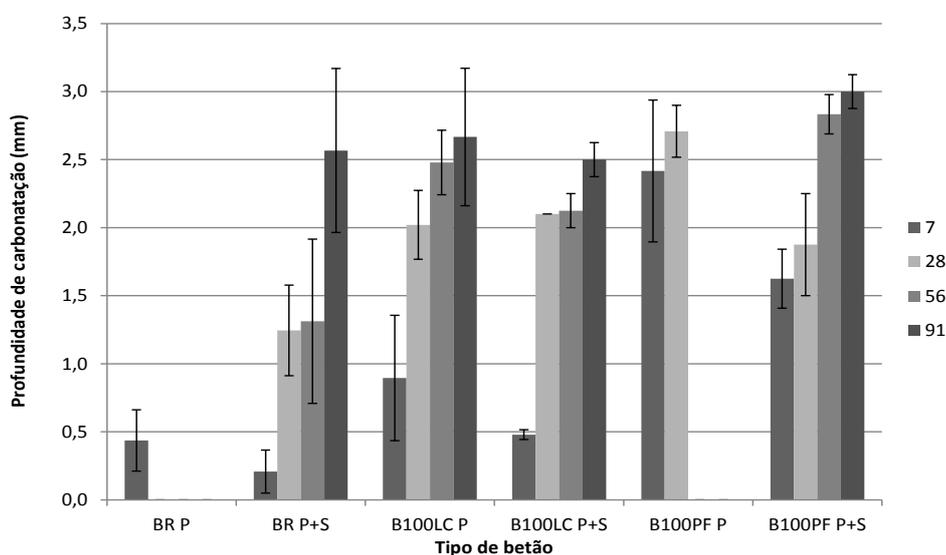


Figura 8: Profundidade de carbonatação ao longo do tempo dos betões f_{cm} 65 MPa

O aumento da profundidade de carbonatação com incorporação de agregados reciclados era expectável, uma vez que a absorção capilar e a penetração de cloretos apresentaram a mesma tendência. No trabalho desenvolvido por Kou et Poon [26], registaram-se, aos 90 dias, aumentos entre 20 e 35%, valores que estão dentro dos obtidos no presente trabalho.

Resistência à penetração de cloretos

Este ensaio foi efectuado segundo a especificação LNEC E463-2004, aos 28 e 91 dias. Nas Figuras 9 e 10, são apresentados os resultados obtidos.

Através da análise das figuras, verifica-se que os betões tendem a melhorar os seus desempenhos dos 28 para os 91 dias, observando-se uma diminuição dos coeficientes de difusão de cloretos. Esta situação é explicada pelo maior tempo de cura dos provetes, responsável por hidratar maiores quantidades 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.

É ainda possível observar que, nas diversas famílias, os betões produzidos com agregados obtidos pelo processo TP+TS apresentam melhores resultados, sendo que o efeito da incorporação de reciclados de betão é mais significativo para os betões f_{cm} 20 MPa.

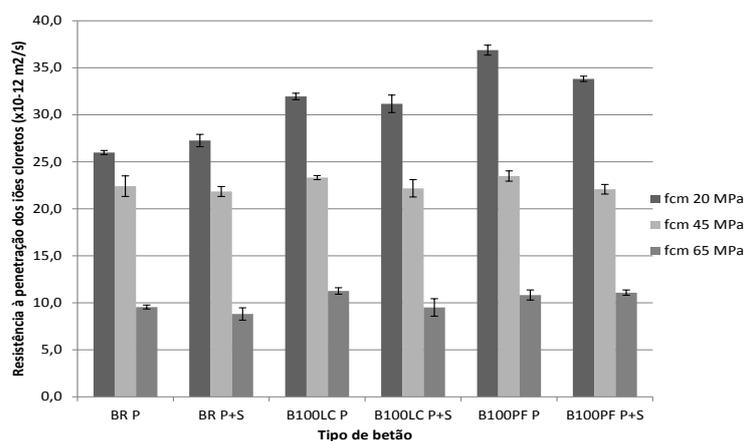


Figura 9: Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos aos 28 dias

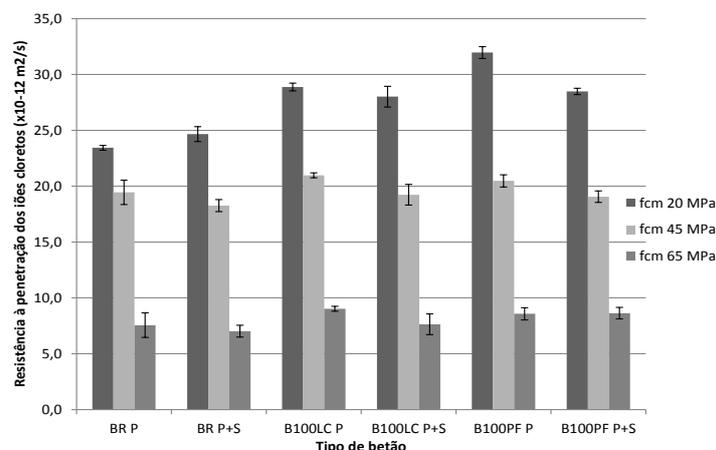


Figura 10: Resultados obtidos no ensaio de resistência à penetração de cloretos aos 91 dias

A variação registada nos diferentes coeficientes de difusão era expectável, uma vez que o processo de penetração dos iões cloreto está directamente relacionado com a porosidade do betão [31].

Nos trabalhos de Rao et al. [24] e Kou et Poon [26], observou-se também um aumento da profundidade de penetração (cerca de 14 e 12%, respectivamente) com a incorporação de agregados reciclados. Estes resultados são coerentes com os obtidos na presente investigação, onde nos diversos betões se registaram variações entre aproximadamente 5 e 25%. No estudo de Kou et Poon [26], constatou-se ainda que a resistência aumentou com o aumento da idade de cura, dos 28 para os 90 dias. Esta situação foi explicada pelo aumento do volume dos produtos de hidratação. As diminuições observadas foram de cerca de 20%, novamente aquém do previsto pela especificação LNEC E-465.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que:

1. A resistência à compressão diminuiu ligeiramente (cerca de 8%) quando se substituem os agregados grossos naturais por AGRB. Os betões produzidos com agregados resultantes de TP+TS registaram melhores resultados;
2. A resistência à tracção diametral apresentou, igualmente, perdas de desempenho (a variação máxima foi de 25%) com a introdução de AGRB. Os betões de TP+TS apresentaram os valores mais elevados nesta propriedade, observando-se diferenças de 30, 12 e 19% nas diferentes famílias, comparativamente aos betões da trituração primária;
3. O módulo de elasticidade seguiu a tendência das propriedades anteriores (diminuições na ordem de 20%). No entanto, não foram detectadas diferenças significativas entre os betões que utilizaram agregados proveniente da trituração primária e da trituração primária mais secundária;
4. Na absorção de água por imersão e por capilaridade, registaram-se perdas de desempenho nos betões com reciclados, sendo estes resultados atribuídos à maior absorção dos AR. Os betões

- com agregados sujeitos a TP+TS obtiveram menores perdas, sendo esta situação mais evidente no caso da absorção por capilaridade;
5. A incorporação de agregados reciclados diminui a resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, verificando-se, contudo, melhores resultados nos betões que continham agregados oriundos da trituração primária mais secundária;
 6. Em suma, a substituição de AN por AGRB, é responsável por diminuições de desempenho nos betões, sendo essas perdas maiores quando são utilizados agregados britados apenas primariamente. De salientar, dada a natureza das diminuições ocorridas, que estas poderão ser compensadas através da introdução de adições e/ou adjuvantes.

Referências

- [1] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam: Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Constr Build Mater*, Vol. 18, No. 6, pp. 461–8 (2004).
- [2] Informação obtida em <http://scp.eionet.europa.eu.int>, em 14/12/13.
- [3] P.J. Gluzhge: The work of scientific research institute, *Gidrotekhnicheskoye Stroitel'stvo* (1946).
- [4] Construction Materials Recycling Association, *Concrete Recycling.org* (2013).
- [5] European Aggregates Association, *Annual review 2011–2012*, Belgium (2012).
- [6] V.W.Y. Tam: Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries, *J Cleaner Prod*, Vol. 17, No.7, pp.688–702 (2009).
- [7] Y. Dosho: Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method, *J Adv Concr Technol*, Vol. 5, No. 1, pp.27–42 (2007).
- [8] I. Abdul Rahman, H. Hamdam, A.M. Ahmad Zaidi: Assessment of recycled aggregate concrete, *Mod Appl Sci* Vol. 3, No. 10, pp. 47–54 (2009).
- [9] R. K. Dhir, M. C. Limbachiya and T. Leelawat: Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 Designated mixes, *Proceedings of ICE: Structures & Buildings*, Vol. 134, No. 3, pp. 257-274 (1999).
- [10] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, R. K. Dhir: RCA Concrete: A study of properties in the fresh state, strength development and durability, *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, *Proceedings of an International Symposium*, London, pp. 227-238 (1998).
- [11] T. Hansen: *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, E&FN Spon, Rilem report 6, London, p. 305 (1992).
- [12] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews: Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Constr Build Mater*, Vol. 23, No. 2, pp. 829–36 (2009).
- [13] S.C. Kou, C.S. Poon: Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates, *Cem Concr Compos*, Vol. 32, No. 8, pp. 649–54 (2010).
- [14] V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cem Concr Res*, Vol. 35, No. 6, pp. 1195–203 (2005).
- [15] V.W.Y. Tam, K.N. Le: Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. *Resour Conserv Recycl*, Vol. 52, No. 1, pp. 39–57 (2007).
- [16] A. Katz: Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cem Concr Res*, Vol. 33, No. 5, pp. 703–11 (2003).
- [17] B. Topçu, S. Sengel: Properties of concrete produced with concrete aggregate, *Cem Concr Res*, Vol. 34, pp. 1307–12 (2004).

- [18] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, R. K. Dhir: Use of recycled concrete aggregate in high strength concrete, *Mater Struct*, pp. 574–80 (2000).
- [19] L. Evangelista, J. de Brito: Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 5, pp. 397-401 (2007).
- [20] W.H. Kwan, M. Ramli, K.J. Kam, M.Z. Sulieman: Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, *Constr Build Mater*, Vol. 26, No. 1, pp. 565-573 (2012).
- [21] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cem Concr Res*, Vol. 34, No. 1, pp. 31–6 (2004).
- [22] K. Rahal: Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, *Build Environ*, Vol. 42, pp. 407–15 (2007).
- [23] S.W. Tabsh, A.S. Abdelfatah: Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr Build Mater*, Vol. 23, pp. 1163–7 (2009).
- [24] M.C. Rao, S.K. Bhattacharyya, S.V. Barai: Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Mater Struct*, Vol. 44, pp. 205–20 (2011).
- [25] M.L Berndt: Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate, *Constr Build Mater*, Vol. 23, pp. 2606–13 (2009).
- [26] S.C. Kou, C.S. Poon: Enhancing the durability properties on concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Constr Build Mater*, Vol. 35, pp. 69–76 (2012).
- [27] A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz: Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, *Cement Concrete Compos*, Vol. 24, pp. 269–79 (2002).
- [28] R.S. Ravindrajah, Y.H. Loo, C.T. Tam: Strength evaluation of recycled aggregate concrete by in-situ tests, *Mater Struct*, Vol. 21, No. 4, pp. 289–95 (2006).
- [29] Nagatakia, S., Gokceb, A., Saekic, T., Hisada, M., "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 6, Elsevier, pp. 965-971 (2004).
- [30] Faury J. Le Béton. 3rd ed. Paris: Dunod (1958).
- [31] M. Gomes, J. de Brito: Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance, *Mater Struct*, Vol. 42, No. 5, pp. 663–75 (2009).
- [32] G.F. Kheder, S.A. Al-Windawi: Variation in mechanical properties of natural and recycled aggregate concrete as related to the strength of their binding mortar, *Mater Struct*, Vol. 38, No. 7, pp. 701–709 (2005).
- [33] S.M. Levy, P. Helene: Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cem Concr Res* Vol. 34, No. 11, pp. 1975–1980 (2004).