

A utilização de agregados finos reciclados de Resíduos de Construção e Demolição no fabrico de betão: Levantamento do estado da arte

Luís Evangelista¹, Jorge de Brito²

¹Assistente, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa
luis.evangelista@ist.utl.pt

²Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa
jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO: À medida que a utilização de agregados grossos reciclados (AGR) de Resíduos de Construção e demolição (RCD) se torna uma prática corrente, a investigação incide agora noutras direcções. Uma das mais importantes linhas de investigação actualmente em desenvolvimento está relacionada com a possibilidade de utilizar agregados finos reciclados (AFR) de RCD em substituição (parcial ou total) de areias naturais em betão. Este objectivo serve um propósito ambiental maior, uma vez que combate a depleção de recursos abióticos, nomeadamente ao reduzir a extracção de areia em margens de rio e na costa marítima. As investigações sobre esta matéria foram descontinuadas principalmente porque algumas tentativas iniciais de utilização destes materiais demonstraram ser demasiado lesivas do desempenho do betão. Neste artigo, faz-se um levantamento exaustivo do actual estado do conhecimento sobre esta matéria, tendo em conta a informação e resultados mais recentes publicados em todo o mundo no que concerne ao comportamento do betão fabricado com agregados finos reciclados, assim como a investigação mais recente efectuada pelos autores do artigo.

Pode ser referido com um significativo grau de confiança que o betão feito com agregados finos reciclados é viável para fins estruturais, desde que se considere o efeito das propriedades intrínsecas destes materiais na sua concepção, produção e aplicação.

1. INTRODUÇÃO

À medida que a população mundial cresce para níveis nunca antes atingidos, as preocupações ambientais inerentes a esse crescimento também crescem. Aliado ao facto de as populações estarem a crescer, existe também o êxodo em massa das populações rurais para os centros urbanos, em particular nos países emergentes, com elevadas taxas demográficas e altas concentrações de habitantes por km² (Yusuf e Wu, 1997). Para poder acomodar o crescimento das cidades que acolhem estas populações, dá-se um aumento desenfreado da indústria da construção, tornando-se um motor das economias locais. Contudo, um desenvolvimento urbanístico desregrado e mal orientado cria problemas ambientais superiores às soluções que fornece (Ng, 2002) (Grimm et al., 2008).

Sabendo-se que a indústria da construção é uma actividade que muito contribui para os desequilíbrios ambientais actuais, é de senso comum

estabelecer que é necessário alterar profundamente o paradigma vigente, de forma a, por um lado, reduzir drasticamente o consumo de recursos naturais não renováveis e, por outro, limitar o depósito de resíduos provenientes da construção e demolição (RCD), que ocupam espaço cada vez mais limitado. Uma das formas de melhorar a eficiência ambiental da indústria da construção é promover a reciclagem dos RCD. O uso destes materiais como substitutos de agregados naturais é uma alternativa que se mostra apelativa, considerando o benefício que traz nos dois vectores atrás anunciados. A utilização de agregados reciclados (AR) como substitutos dos agregados naturais para produção de betões tem sido alvo de estudo desde meados do século XX (Hansen, 1986) (Nixon, 1978), tendo sofrido uma intensificação das investigações nas duas últimas décadas desse mesmo século. O desenvolvimento de casos de estudo (Koulouris et al., 2004) (Poon e Chan, 2007) e o crescente interesse comercial por

estes materiais (Sagoe-Crentsil et al., 2001) (Tempest et al., 2010) levaram ao crescimento do conhecimento científico sobre a matéria no que diz respeito ao uso de agregados grossos reciclados no betão (AGR) (Katz, 2003) (Poon et al., 2004) (Limbachya et al., 2007) (Etxeberria et al., 2007) (Gomes e Brito, 2009) (Xiao et al., 2012).

Apesar dos avanços atingidos no estudo de betões com agregados grossos reciclados serem suficientes para se poder dizer com fiabilidade que é possível produzir betões com AGR que possuem características perfeitamente aceitáveis para uma utilização corrente, a utilização da fracção fina destes mesmos AR continua limitada ou banida. Nos relatórios iniciais, os agregados finos reciclados apresentavam características de tal modo prejudiciais que a sua utilização acarretava perdas de desempenho não aceitáveis. Tomaram-se como principais causas para o fraco desempenho dos AFR a baixa densidade das partículas, associada a uma elevada taxa de absorção de água, o elevado teor de contaminantes presentes, bem como a forma mais irregular das partículas, o que dificulta a amassadura. Na recomendação RILEM de 1994, indica-se claramente que o uso de AFR é limitado devido aos conhecimentos insuficientes sobre o desempenho dos betões com eles produzidos. Em consequência disso, a maioria das normas e recomendações vigentes sobre a utilização de AR em betões limita ou mesmo restringe o uso de AFR. No trabalho compilado por Gonçalves (2007), das normas ou especificações nacionais conhecidas, apenas as normas Suíça (2006), Japonesa (2005) e Russa (Roos, 2002) prevêm a utilização até 100% de AFR, se usado para betão não armado (aceitando até 20% de AFR para classes até C30/37), no da Suíça e para classes de resistência até 18 e 15 MPa, no caso do Japão e Rússia, respectivamente. No Brasil (2005), é possível incluir até 100% de AFR, desde que o betão seja não estrutural, enquanto que na Dinamarca (1995) se permite a inclusão até 20% de AFR, com a limitação da resistência máxima em 20 MPa e 40 MPa, casos os AFR sejam provenientes de RCD ou de betão, respectivamente. Na Holanda (1984, 1986, 1994), é possível usar até 100% de AFR caso os agregados grossos sejam naturais (limitando o uso para ambientes não agressivos, como máximas classes de resistência de C20/25 e C40/50, para AFR de RCD ou betão, respectivamente). Nas restantes normas analisadas (Alemanha (2002), Hong-

Kong (2002), UK (2002), Portugal (2006) e Espanha (2011)), o uso de AFR é estritamente proibido, seja qual for a sua natureza ou o destino a dar ao betão.

Estudos mais recentes, como os desenvolvidos por Leite (2001), Khatib (2005), Evangelista e Brito (2007, 2010) e Kou e Poon (2009), mostram que é possível produzir betão com agregados finos reciclados sem que com isso se tenha de abdicar de modo significativo do desempenho. Assim, de forma a inverter a tendência de restrição do uso de AFR, é necessário continuar a desenvolver os trabalhos de análise e caracterização dos AFR e dos betões com eles produzidos.

Neste artigo, pretende-se apresentar um levantamento do estado da arte acerca do processamento e caracterização dos AFR, bem como da produção e desempenho dos betões com eles produzidos.

2. PRODUÇÃO, TRATAMENTO E PROPRIEDADES DOS AFR

2.1. Produção e tratamento

Normalmente, os AFR são um produto que surge na trituração dos RCD como um subproduto não desejado, contendo elevadas taxas de contaminantes (Angulo, 2000) (Rodrigues, 2011). Bianchini et al. (2005) referem que os AFR podem ser utilizados se esses mesmos contaminantes forem separados na origem dos RCD. Angulo (2005) e Rodrigues et al. (2011) referem que a origem dos RCD e o seu processo de cominuição alteram significativamente a composição dos AFR. Sabendo-se que a qualidade dos AR é dependente do seu processo de fabrico e de tratamento (Nagataki et al., 2000) (Shima et al., 2005), alguns autores têm desenvolvido metodologias para melhorar o desempenho para que mais facilmente se possam utilizar em betões. Alguns estudos para o melhoramento de AGR foram desenvolvidos com sucesso, nomeadamente por aplicação de ultra-sons e imersão em soluções de sílica de fumo (Katz, 2004), por aplicação de agentes de superfície (Tsujino et al., 2007) e por aplicação de nanosílica (Descarrega, 2011), não se conhecendo trabalhos semelhantes aplicados aos AFR. Ulsen (2011) produziu AFR recorrendo a técnicas utilizadas em separação e cominuição de minérios, de modo a os poder melhorar e obteve características mais próximas das dos AFN. Para tal, procedeu a uma trituração terciária

ria, constituída por trituração inicial na central de reciclagem, seguida por trituração por mandíbulas e, finalmente, por trituração efectuada por britador de impacto vertical. Os produtos resultantes dessa trituração foram beneficiados com recurso a técnicas de atrito, para remoção da pasta de cimento, e foram efectuados estudos de separabilidade, quer por densidade, quer por magnetismo, dos AFR. Os resultados obtidos por análises químicas, por MEV, de DRX e FRX mostram que os AFR assim obtidos apresentavam formas mais arredondadas, com menores teores de argamassa aderida.

2.2. Propriedades dos AFR

As propriedades dos AFR têm sido alvo de alguns estudos, apesar de poucas vezes serem tratados separadamente da fracção grossa. Esta escolha não permite, muitas vezes, que se possa estabelecer as respectivas diferenças e a influência distinta que os AFR e AGR introduzem nos betões. Reconhecidamente, uma das características que mais se distingue entre AFN e AFR é a sua densidade. As diferenças advêm da existência de material poroso aderido às partículas de material pétreo (argamassa, cerâmico, estuque, entre outros) que, para além de reduzir a densidade, aumenta também a capacidade de retenção de água. Os resultados obtidos pelos diversos autores variam significativamente, apontando para uma grande dispersão desta grandeza, estando directamente ligada à natureza dos produtos reciclados. Os valores obtidos para as densidades apresentam variações entre 1,89 g/cm³ (Levy e Helene, 2007) e 2,7 g/cm³ (Müeller e Winkler, 1998). A absorção de água apresenta valores

entre 4,3% (Müeller e Winkler, 1998) e 13,1% (Evangelista e Brito, 2007), dependendo da natureza dos AFR (de betão (AFRB), de alvenaria (AFRA), ou indiferenciados (AFRI)). No Quadro 1, são apresentados os valores obtidos no levantamento bibliográfico para as densidades das partículas (secas [Δ_s], saturadas com a superfície seca [Δ_{sss}], e material impermeável [Δ_a]), bem como as absorções de água obtidas (W). Fumoto e Yamada (2002) obtiveram características para AFR de estruturas de betão com idades distintas (0, 45 e 70 anos) muito semelhantes, parecendo indicar que esse factor não é relevante.

A análise microscópica dos AFR mostra que as partículas possuem formas mais angulosas do que os AFN (Figuras 1 e 2) (Kikushi et al. 1998). Esta característica será uma das principais razões para a perda de trabalhabilidade, para uma mesma relação a/c efectiva (Evangelista e Brito, 2007). Essa maior angulosidade, associada à existência de poros abertos na superfície dos AFR, aumenta a superfície específica dos AFR, como comprovaram Fumoto e Yamada (2002). Os autores obtiveram superfícies específicas determinadas por BET (Brunauer, Emmett e Teller) até 400% superiores às dos AFN. O aumento de superfície específica será também a causa da perda de eficácia do uso de superplastificantes. Pereira et al. (2012a) notaram uma perda de rendimento nos plastificantes que utilizaram em betões com agregados finos reciclados (BAFR), dando a entender que as cadeias poliméricas possuem maiores áreas de contacto com os AFR, comparativamente aos AFN. Kou (2006) analisou a microestrutura dos AFR por MEV e determinou que esta apresenta fissuras associadas ao processo de fabrico (Figura 3).

Quadro 1 - Massa volúmica e absorção de água dos AFR de várias investigações

Autores (s)	Tipo de AFR	Δ_s (g/cm ³)	Δ_{sss} (g/cm ³)	Δ_a (g/cm ³)	W (%)
Hansen e Narud (1993)	AFRB	2,28	2,31	-	9,8
Müeller e Winkler* (1998)	AFRI	-	-	2,66	5,5
Kikushi et al. (1998)	AFRB	2,06-2,23	-	-	7,3-10,0
Fumoto e Yamada (2002)	AFRB	1,99-2,18	-	-	8,1-11,4
Katz (2003)	AFRB	2,23	-	-	12,7
Khatib (2005)	AFRB	2,34	-	-	6,2
Lyn et al. (2004)	AFRB	2,25	-	-	11,3
Solyman (2005)	AFRB	2,36	2,48	2,56	8,0
Evangelista e Brito (2007)	AFRB	1,91	2,17	2,56	13,1
Levy (2007)	AFRB	-	2,32	-	10,3
Levy (2007)	AFRA	-	1,89	-	13,0
Kou e Poon (2009)	AFRB	2,34	-	-	11,9
Pereira et al. (2012a)	AFRB	2,01	2,23	2,57	10,9

* Valor médio para 13 amostras de RCD; valor para AFR+AGR

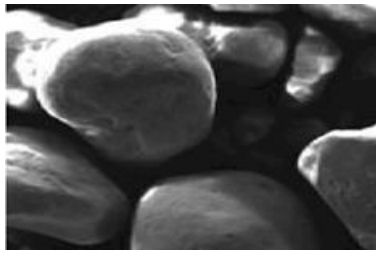


Figura 1 - MEV de AFN (Solyman, 2005)

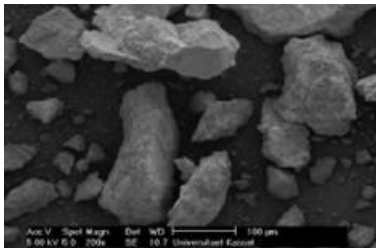


Figura 2 - MEV de AFR (Solyman, 2005)

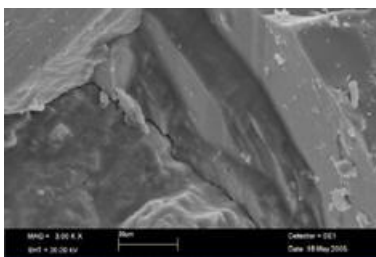


Figura 3 - Fissura presente nos AFR (Kou, 2006)

A análise mineralógica dos AFR, quer por DRX, quer por FRX, apresenta uma dispersão inerente à natureza dos materiais reciclados. Solyman (2005) obteve teores de SiO_2 entre 60,1 e 81,1%, estando os valores mais altos associados a AFRB que sofreram duas fases de britagem. As amostras apresentam teores de CaO entre 4,3 e 12,4%, sendo os restantes óxidos com valores residuais. Dada a natureza dos AFR, os teores de SO_3 são insignificantes (entre 0,01 e 0,37%), o que demonstra a não existência de sulfatos. No caso de AFRI, os valores de minerais presentes varia significativamente. Rodrigues et al. (2011) obtiveram teores de gesso de AFRI produzidos em centrais de reciclagem Portuguesas entre 0 e 1,2%, enquanto que as restantes fases (quartzo, calcite, muscovite, feldspatos de potássio e de sódio) apresentam dispersões elevadas. Ulsen et al. (2012) determinaram os teores dos principais óxidos presentes nos FRAI sujeitos a melhoramento e obtiveram teores de SiO_2 entre 65 e 75%, CaO entre 7 e 11% de Al_2O_3 e cerca de 2,5% de Fe_2O_3 , mostrando a eficácia do processamento dos AFR.

2.3. Novas metodologias para determinação da absorção de água dos AFR

Um dos principais problemas que existem na caracterização de agregados finos, em particular dos AFR, é o da determinação da absorção de água e, conseqüentemente, das densidades das partículas. As técnicas correntes de ensaio pensadas para os AFN apresentam dificuldades de execução, particularmente devido à presença de fases altamente porosas nas partículas, por vezes com capacidade coesiva. Tam et al. (2008) reportam as principais dificuldades dos ensaios correntes como sendo: a secagem a 105 ± 5 °C decompõe os produtos, por remoção de água de constituição; o tempo de saturação é muito elevado e variável com o tipo e natureza dos AR. Evangelista e Brito (2008) notaram que os AFRB ensaiados formaram uma argamassa fraca aquando da saturação, dificultando a realização do ensaio.

Para tentar resolver estes problemas, têm sido desenvolvidas algumas investigações. Gagnon (2000) desenvolveu um método que permite a determinação rápida em estaleiro das densidades e absorção de água dos AR, utilizando para o efeito um núcleo-densímetro e forno micro-ondas, obtendo resultados fiáveis, com excepção dos AR que possuíssem betume. Leite (2001) desenvolveu um método no qual a absorção de água é obtida pela média dos resultados das absorções do material seco e do material submerso, recorrendo a uma balança hidrostática com leituras contínuas no tempo. A metodologia proposta dá apenas uma absorção aproximada da real, uma vez que não é possível saber a massa hidrostática do material seco. Pi (2009) apresentou um método automático de determinação da densidade e absorção de água de AFR e AGR utilizando um equipamento, denominado SSDetect, que detecta o ponto em que as partículas atingem a condição de saturadas com a superfície seca, por reflexão de raios infravermelhos. Os resultados obtidos pelo autor mostram que a variabilidade das grandezas lidas é substancialmente reduzida e a repetibilidade do ensaio é significativamente melhorada. Rodrigues et al. (2012) propõem um método de determinação da absorção de água em que os ensaios aos agregados são realizados numa solução de hexametáfosfato de sódio ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$), de modo a evitar a aglomeração de partículas. Os resultados mostram que a

utilização deste composto evita a formação de aglomerados, melhorando a fiabilidade do ensaio.

Kasemchairisi e Tangtermsirikul (2007) propõem que não seja a absorção de água o parâmetro considerado nas amassaduras, mas sim a água retida, que consiste na soma da água absorvida com a adsorvida nas superfícies dos AFR. De modo a determinar essa grandeza, desenvolveram um método em que os AFR são sujeitos a forças centrífugas que irão libertar a água em excesso, presente entre partículas. Os resultados obtidos aparentem ter boa fiabilidade, com desvios padrão baixos, o que parece indicar que o método é válido.

3. TÉCNICAS DE AMASSADURA DOS BETÕES COM AFR

Um problema fundamental no dimensionamento e produção dos BAFR é a necessidade de ter em atenção a sua elevada porosidade, prevenindo, para tal, a adição de uma quantidade suplementar de água às amassaduras. A não consideração deste acréscimo de água afectará negativamente o desempenho dos betões (Fumoto e Yamada, 2002, 2006), uma vez que parte da água de amassadura, necessária para hidratação do cimento e para garantir fluidez da pasta, será absorvida pelos AFR. Na hipótese de os AFR estarem saturados, os processos dinâmicos da amassadura poderão provocar a libertação de água para a pasta, aumentando indirectamente a relação a/c. Ferreira et al. (2011) concluíram que os betões produzidos com AGR submetidos a uma pré-molhagem, de modo a ficarem apenas parcialmente saturados, continham interfaces entre pasta e agregado mais homogéneas do que as obtidas para os AGR saturados.

Leite (2001) e Evangelista e Brito (2007, 2010) produziram betões efectuando uma pré-molhagem dos AFR, com parte da água de amassadura, antes introduzirem os restantes materiais na misturadora. Leite analisou a interface entre os AFR e a pasta de cimento e constatou que esta é mais coesa do que nos AFN (Figuras 4 e 5).

Kimura et al. (2004) propõem que se melhore a zona de interface entre a pasta e os AR aproveitando o facto de estes serem porosos e introduzindo uma descompressão a vácuo no momento da amassadura, seguida de uma rápida libertação. Os autores conseguiram obter ligações substancialmente melhores entre os AR e a pasta.

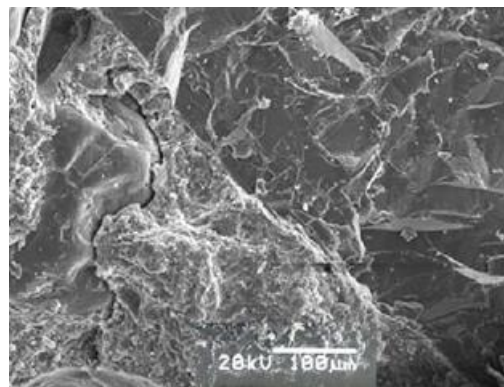


Figura 4 - Interface entre AFN e a pasta (Leite, 2001)

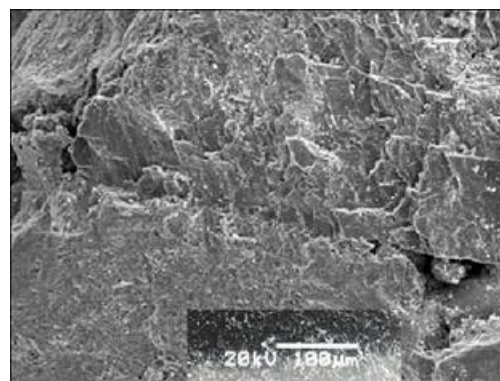


Figura 5 - Interface entre AFRB e a pasta (Leite, 2001)

Tam et al. (2006) propõe um método de produção de betões com AR denominado “Two stage mixing approach”. O método é semelhante ao utilizado por outros autores (Leite, 2001) (Evangelista e Brito, 2007) (Fumoto e Yamada, 2006) diferindo apenas no facto de os AR serem molhados com parte da água e com o cimento, introduzindo-se posteriormente os restantes constituintes. Os resultados apresentados pelos autores mostram bons desempenhos do método (Tam et al., 2006, 2007) (Tam e Tam, 2007).

4. PROPRIEDADES DOS BETÕES COM AFR

4.1. Propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas dos BAFR é fundamental para se poder caracterizar e categorizar estes materiais, para fins estruturais. Devido à presença de partículas mais porosas e frágeis, é de esperar que os BAFR possuam desempenhos inferiores aos betões convencionais. Trabalhos iniciais desenvolvidos por Merlet e Pimienta (1993) apresentaram perdas de resis-

tência à compressão entre 19 e 38% para betões com incorporação total de AFN e AGR. Leite (2001) ensaiou diversas famílias de betões, com diferentes taxas de substituição de AFN por AFRI e diferentes relações a/c. A autora obteve, inesperadamente, ganhos de resistência à compressão de cerca de 10% quando substituiu integralmente os AFN por AFRI. Comportamentos semelhantes foram sentidos na resistência à tracção e módulo de elasticidade (em ambos os casos apenas para relações a/c acima de 0,47), com ganhos até 32% para a resistência à tracção e de cerca de 15% para o módulo de elasticidade. A autora justifica a melhoria de desempenho com a melhor ligação entre os AFR e a nova pasta. Para as relações a/c menores, cujos resultados foram contrários, a autora julga que as amassaduras apresentaram dificuldades de hidratação, em virtude de os AFR consumirem água de amassadura.

Khatib (2005) ensaiou betões com substituição de AFN por AFRB e por AFR de tijolo (AFRT) até 100%. O autor obteve perdas máximas de resistência à compressão de cerca de 30% para os betões com AFRB e obteve resistências à compressão constantes para os betões com AFRT. O autor justifica os segundos resultados com a presença de sílica e alumina reactivas libertadas aquando da trituração dos tijolos. Para o módulo de elasticidade dinâmico, o autor obteve uma perda semelhante para os dois tipos de betão, como reduções até 20%, para as composições com substituição integral.

Solyman (2005) estudou diversas famílias de BAFR com AFRB e AFRI obtidos de centrais de reciclagem alemãs. Os resultados obtidos pelo autor mostram que os betões com AFRB possuem resistência à compressão similar à dos betões com AFN, com perdas máxima de 6,5%, para uma substituição integral dos AFN. Para as famílias constituídas por AFRI, o autor obteve perdas até 29%, muito devido à presença de materiais não minerais, como sejam asfaltos. Na análise às composições com diferentes taxas de cimento e relações a/c, o autor não notou tendências distintas, podendo-se afirmar que as variações são semelhantes, indiferentemente do patamar de resistência analisado. A resistência à tracção apresentou perdas até cerca de 20%, indiferentemente do tipo de AFR usado. O módulo de elasticidade baixou, para as taxas de substituição máxima, entre 17 e 25%, dependendo do tipo de AFR usado.

Evangelista e Brito (2007) estudaram betões com AFRB e obtiveram resultados análogos aos de Solyman (2005). A resistência à compressão manteve-se praticamente constante (reduções máximas de 8%), com valores próximos de 55 MPa, sendo os resultados justificados pela melhor ligação entre a nova pasta e os AFR e a eventual presença de cimento não hidratado. A resistência à tracção e o módulo de elasticidade apresentaram reduções de 30,5 e 18,5%, respectivamente.

Kou e Poon (2009) avaliaram o desempenho de betões auto-compactáveis (BAC) com incorporação de AFRB e constataram que o desempenho não era afectado pela presença de entre 25 a 50% de AFR. De qualquer modo, obtiveram BAC com resistência à compressão da ordem de 64 MPa em betões com substituição integral de AFN por AFR.

Pereira et al. (2012a, 2012b) analisaram o efeito da introdução de superplastificantes em betões com AFR, tendo para isso utilizado um plastificante de desempenho regular e um de alto desempenho. Os resultados obtidos mostram que existe uma perda insignificante de resistência à compressão com a inclusão de AFR no caso dos betões correntes e com superplastificante (interior a 5%), existindo picos de perda de resistência de cerca de 15%, para o plastificante de pior desempenho. Os autores justificam essa diferença com a menor robustez deste último, perdendo eficácia com o aumento da superfície específica dos AFR. Para a resistência à tracção por compressão diametral e para o módulo de elasticidade, os autores obtiveram perdas de desempenho entre 15,6 e 24,3% para a resistência à tracção e entre 20,7 e 33%, para o módulo de elasticidade. Em todas as situações, os autores previram que, com a utilização de pequenas dosagens de plastificante, seria o suficiente para colmatar a perda de desempenho devida à presença dos AFR.

4.2. Durabilidade

Merlet e Pimienta (1993) determinaram a retracção de betões com AFRB e constataram que a utilização de superplastificantes, bem como a aplicação de pré-molhagem, melhoram a performance dos betões. Os BAFR atingiram retracções entre 20 e 50% mais altas do que os betões com AFN.

Solyman (2005) avaliou a retracção de BAFR e constatou que a retracção medida após 1 ano era

15% superior nos betões com AFRB do que nos betões com AFN. Esse valor subiu para 40% para betões com AFRI. A carbonatação dos BAFR mostrou ser até 17% superior, após 1 ano de ensaio. Uma vez mais, os AFRB mostram resultados mais interessantes, com aumentos de cerca de metade dos anteriormente referidos. Os ensaios de gelo-degelo demonstraram perdas de desempenho entre 60 e 143%, para uma taxa máxima de 70% de substituição de AFN por AFR. Para este ensaio, o autor sugere que não se ultrapasse 30% de substituição.

Khatib (2005) determinou a retracção de betões com AFR de betão e de tijolo e constatou que a presença de finos reciclados prejudica o desempenho dos betões, uma vez que todas as amassaduras apresentaram retracções superiores à do betão de controlo. Para os betões com AFRB, a retracção aumentou cerca de 52% face ao betão de referência, aos 90 dias, para 100% de substituição. Os betões com AFRT apresentaram resultados erráticos, não sendo possível tirar conclusões.

Evangelista e Brito (2010) testaram a absorção de água por imersão e por capilaridade de betões com AFRB. Os autores obtiveram excelentes correlações entre a taxa de substituição e as absorções analisadas, tendo atingido ganhos de absorção de água de 46 e 70.3%, para a absorção de água por imersão e absorvidade, respectivamente, para os betões com substituição integral de AFN por AFR. No ensaio de penetração de iões cloreto, obteve-se um aumento de cerca de 33% para os betões produzidos apenas com AFR, enquanto que a carbonatação após 21 dias aumentou cerca de 110% para os betões com AFR.

Levy e Helene (2007) estudaram o efeito de incorporação de AFRB e AFRA em betões com diferentes patamares de resistência. Para cada patamar, várias taxas de substituição foram analisadas em termos de absorção de água, volume de poros, carbonatação e resistividade eléctrica. Os diversos resultados mostram que, para um mesmo patamar de resistência, as propriedades analisadas foram similares, sendo, em alguns casos, ligeiramente melhores nos BAFR do que nos BAFN. Os autores justificam tal fenómeno com o facto de ser necessário introduzir maiores quantidades de cimento nos BAFR de modo a atingir a mesma resistência. Esse aumento da dosagem de cimento melhora a matriz, provocando os resultados atingidos.

Zega e Di Maio (2011) analisaram betões com AFRB em termos de absorção de água sobre pressão, sob imersão e por capilaridade. Complementarmente, determinaram a retracção dos mesmos betões. Os autores constataram que a retracção dos diversos betões (com 0, 20 e 30% de substituição de AFN por AFR) foi semelhante, associando isso ao facto de os AFR terem absorvido água de amassadura e, conseqüentemente, a relação a/c ter ficado menor. As diferentes absorções de água medidas deram valores semelhantes entre as diferentes famílias, levando os autores a concluir que é possível produzir betões com exigências de durabilidade com taxas de substituição até 30%.

5. CONCLUSÕES

Não obstante o uso de agregados grossos reciclados para produção de betões ser uma prática cada vez mais vulgar, patrocinada ou imposta pelos governos nacionais, a utilização de AFR, seja qual for a sua natureza, continua muito restringida, ou mesmo proibida, em virtude da falta de conhecimentos consolidados nesta matéria. Apesar disso, a crescente procura de recursos naturais, nomeadamente pétreos, está a criar uma pressão ambiental insustentável, pelo que urge alterar o paradigma presente de não permitir o uso de AFR na produção de betões.

Os conhecimentos actuais sobre a matéria permitem estabelecer que, se forem consideradas as especificidades deste material, é possível produzir betões com qualidade aceitável, utilizando taxas apreciáveis de substituição.

Ao nível do processamento dos AR (recolha e produção), podem ser realizadas operações de tratamento e beneficiamento que melhoram a qualidade dos AFR. As características típicas deste material mostram que são mais leves e porosos do que os AFN. A sua natureza mineralógica está directamente ligada com o material original, sendo possível ter AFR que cumprem os requisitos normativos. A caracterização dos AFR tem de ter em atenção a sua maior porosidade e, ao nível da determinação da absorção de água, impõe-se que se atinja uma teoria unificada, dada a dispersão de trabalhos existente.

A produção dos betões com AFR não pode ser considerada da mesma forma do que um betão convencional. A presença de agregados mais porosos do que os tradicionais impõe que a

absorção de água dos AFR seja considerada para acertos das relações a/c.

6. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

ANGULO S, Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos, Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, Brasil, 2005, 236 p.

ANGULO S, Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, São Paulo, Brasil, 2000, 172 p.

BIANCHINI G, MARROCCHINO E, TASSINARI R, VACCARO C, Recycling of construction and demolition waste: a chemical-mineralogical appraisal, Waste Management, 2005, Vol. 25, No. 2, pp. 149-159.

BS 8500-2: 2002, Concrete - complementary British Standard to BS EN 206-1, Part 2: Specification for constituent materials and concrete, British Standards Institution, UK, 2002.

CUR, Recycled concrete aggregates and recycled masonry for concrete use (in Dutch), Rapport 125, CUR, Netherlands, 1986.

CUR, Recycled concrete aggregates for concrete use (in Dutch), Aanbeveling 4, CUR-VB, Netherlands, 1984.

CUR, Recycled masonry aggregates as additive for concrete (in Dutch), Aanbeveling 5, CUR-VB, Netherlands, 1994.

Danish Recommendation for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class, Danish Concrete Association, Publication no. 34, Denmark, 1995.

DESCARREGA A, Quality improvement of the recycled aggregates through surface treatment, MSc Dissertation, UPC, Barcelona, Spain, 2011, 96 p.

DIN 4226-100: 2002-2, Aggregates for Mortar and Concrete, Part 100: Recycled Aggregates, Germany, 2002.

ETXEBERRIA M, VÁZQUEZ E., MARÍ A, BARRA M, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research, 2007, Vol. 37, No. 5, pp. 735-742.

EVANGELISTA L, DE BRITO J, Comporta-

mento de betões com Agregados Finos Reciclados, Congresso “Inovação na Construção Sustentável (Cincos 08)”, 2008, Curia, Portugal, pp. 239-245

EVANGELISTA L, DE BRITO J, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 2010, Vol. 32, No. 1, pp. 9-14.

EVANGELISTA L, DE BRITO J, Mechanical properties of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 2007, Vol. 29, No. 5, pp. 397-401.

FERREIRA L; DE BRITO J, BARRA M, Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete, Magazine of Concrete Research, 2011, Vol. 63, No. 8, pp. 617-627.

FUMOTO T, YAMADA M, Durability of concrete with recycled fine aggregate, American Concrete Institute, SP234, 7th Int. Conf. on Durability of concrete, Montreal, Canada, 2006, pp. 457-472.

FUMOTO T, YAMADA M, Influence of the quality of recycled fine aggregate on properties of concrete, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, 2002, Vol. 43, pp. 97-103.

GAGNON G, Study of methods of measuring density and water content of recycled materials (in French), MSc Dissertation, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, 2000, 200p.

GOMES M., DE BRITO J., Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance, Materials and Structures, 2009, Vol. 42, No. 5, pp. 663-675.

GONÇALVES P, Betão com agregados reciclados. Análise comentada da legislação existente, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2007, 132p.

GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, REDMAN C L, WU J, BAI X, BRIGGS J M, Global Change and the Ecology of Cities, Science, 2008, Vol. 319, No. 5864, pp. 756-760.

HANSEN T, Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985, Materials and Structures, 1986, Vol. 9, No. 3, pp. 201-246.

HANSEN T; NARUD H, Strength of recycled concrete made from crushed concrete, Concrete International - Design and Construction, 1983, Vol. 5, No. 1, pp. 79-83.

- IHOBE, Recommendations for the use of mixed recycled aggregates from Construction and Demolition Waste - pre-Standard investigation (in Spanish), Spain, 2011.
- JIS A 5021:2005, Recycled aggregate for concrete - class H, Japan, 2005, 25p.
- KASEMCHASIRI R, TANGTERMSIRIKUL S, A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete, *Construction and Building Materials*, 2007, Vol. 21, No. 6, pp. 1322-1334.
- KATZ A, Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, Vol. 16, No. 6, pp. 597-603.
- KATZ, A., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, 2003, Vol. 33, No. 5, pp. 703-711.
- KHATIB J M, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates, *Cement & Concrete Research*, 2005, Vol. 35, No. 4, pp. 763-769.
- KIKUSHI M, DOSHO Y, NARIKAWA M, MIURA T, Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part 1 - experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete, in *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, University of Dundee, November 1998, pp. 55-68.
- KIMURA Y, IMAMOTO K, NAGAYAMA M, TAMURA H, High quality recycled aggregate concrete (HIRAC) processed by decompression and rapid release, *RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development*, 2004, Koriyama, Japan, pp. 163-170.
- KOU S C, POON C S, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 2009, Vol. 31, No. 9, pp. 622-627.
- KOU S, Reusing recycled aggregates in structural concrete, PhD Thesis, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2006, 312p.
- KOULOURIS A, LIMBACHIYA M C, FRIED A N, ROBERTS J J, Use of recycled aggregate in concrete application: case studies, *International Conference on sustainable waste management and recycling: construction demolition waste*, Kingston University, London, 2004, pp. 245-257.
- LEITE M B, Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2001, 390p.
- LEVY S, HELENE P, Durability of concrete mixed with fine recycled aggregates, *Exacta*, 2007, Vol. 5, No. 1, pp. 25-34.
- LIMBACHIYA M C, MARROCCHINO E, KOULOURIS A, Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate, *Waste Management*, 2007, Vol. 27, No. 2, pp. 201-208.
- LIN, Y H, TYAN Y, CHANG T, CHANG C, An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, No. 8, pp. 1373-1380.
- LNEC E 471, Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, LNEC, Portugal, 2006.
- MERLET J D , PIMIENTA P, Mechanical and physical-chemical properties of concrete produced with coarse and fine recycled aggregates, in *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, 1993, Odense, Denmark, pp. 343-353.
- MÜELLER A, WINKLER A, Characteristics of processed concrete rubble, in *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, University of Dundee, November 1998, pp. 109-119.
- NAGATAKI S, GOTICE A AND SAEKI T, Effect of recycled aggregate characteristics on performance parameters of recycled aggregate concrete, 5th Int. conf. on durability of concrete, CANMET/ACI Barcelona, Spain, 2000, Vol. I, pp. 51-71.
- NBR 15.116, Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos, Brasil, 2005, 12 p.
- NG, M K, Sustainable Urban Development Issues in Chinese Transitional Cities: Hong Kong and Shenzhen, *International Planning Studies*, 2002, Vol. 7, No. 1, pp. 7-36.
- NIXON P J, Recycled concrete as an aggregate for concrete - a review, *Materials and Structures*, 1978, Vol. 11, No. 5, pp. 371-378.
- OT 70085, Instruction technique. Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris, Switzerland, 2006, 16 p.
- PEREIRA P, EVANGELISTA L, DE BRITO J,

- The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 2012a, Vol. 28, No. 1, pp. 722-729.
- PEREIRA P, EVANGELISTA L, DE BRITO J, The effect of superplasticisers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 2012b, Vol. 34, No. 9, pp. 1044-1052.
- PI Z Y, Development of new test procedures for measuring fine and coarse aggregate specific gravities, Report submitted to the Michigan Department of Transportation, USA, 2009, 91p.
- POON C S, SHUI Z H, LAM L, FOK H, KOU S C, Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, No. 1, pp. 31-36.
- POON C, CHAN D, The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong, *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, Vol. 50, No. 3, pp. 293-305.
- RILEM TC 121-DRG, Specifications for concrete with recycled aggregates, *Materials and Structures*, 1994, No. 27, pp. 557-559.
- RODRIGUES F, Caracterização dos agregados finos reciclados provenientes de centrais de reciclagem Portuguesas, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011, 146 p.
- RODRIGUES F, CARVALHO M T, PEREIRA M, EVANGELISTA L, DE BRITO J, Physical and chemical-mineralogical characterization of fine recycled aggregates from construction and demolition waste, *Fray International Symposium*, 2011, Cancun, Mexico, Vol. 4, pp. 301-318.
- RODRIGUES F, EVANGELISTA L, DE BRITO J, A new method to determine the density and water absorption of fine recycled aggregates, *Materials Research Journal*, 2012, in press.
- ROOS F, A contribution to the design of concrete with aggregate made from recycled aggregate according to DIN 1045-1 (in German), PhD Thesis Technische Universität München, Munich, Germany, 2002, 186p.
- SAGOE-CRENTSIL K, BROWN T, TAYLOR A H, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregates, *Cement & Concrete Research*, 2001, Vol. 31, No. 5, pp. 707-712.
- SHIMA H, TATEYASHIKI H, MATSUHASHI R, YOSHIDA Y, An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment by the input-output analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2005, Vol. 3, No. 1, pp. 53-67.
- SOLYMAN M, Classification of recycled sands and their applications as fine aggregates for concrete and bituminous mixtures, PhD Thesis, Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel, Kassel, Germany, 2005, 196p.
- TAM V, GAO X F, TAM C M, CHAN C H, New approach in measuring water absorption of recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 2008, Vol. 22, No. 3, pp. 364-369.
- TAM V, GAO X F, TAM C M, Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, *Cement & Concrete Research*, 2006, Vol. 35, No. 6, pp. 1195-203.
- TAM V, TAM C M, Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, *Journal Materials Science*, 2007, Vol. 42, No. 10, pp. 3592-3602.
- TAM V, TAM C M, WANG Y, Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, *Construction and Building Materials*, 2007, Vol. 21, No. 10, pp. 1928-1939.
- TEMPEST B, CAVALLINE, T, GERGELY J, WEGGEL D, Construction and demolition waste used as recycled aggregates in concrete: Solutions for increasing the marketability of recycled aggregates concrete, *Concrete Sustainability Conference sponsored by the National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)*, Tempe, USA, 2010, pp. 1-15.
- TSUJINO M, NOGUSHI T, TAMURA M, KANEMATSU M, MARUYAMA I, Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete by surface modification treatment, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, Vol. 5, No. 1, pp. 13-25.
- ULSEN C, Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição, *Tese de Doutorado em Engenharia Mineral*, Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo, Brasil, 2011, 184 p.
- ULSEN C, KAHN G, HAWLITSCHKE G, MASINI E A, ANGULO S, JOHN V M, Production of recycled sand from construction and demolition waste, *Construction and Building Materials*, 2012, in press.

WBTC No.12/2002, Specifications facilitating the use of recycled aggregates, Works Bureau Technical Circular, Hong-Kong, 2002.

XIAO J Z, LI W G, POON C S, Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China - A review, China Technical Science, 2012, No. 55, pp. 1463-1480.

YUSUF S; WU W P, The dynamics of urban growth in three Chinese cities, Oxford Univ. Press, London, 1997, 242 p.

ZEGA C, DI MAIO A, Use of recycled fine aggregate in concrete with durable requirements, Waste Management, 2011, Vol. 31, No. 11, pp. 2336-2340.

