

Susceptibilidade dos agregados reciclados no desenvolvimento da reacção álcalis-sílica: o que pode mudar?

M. Barreto Santos^a, J. de Brito^{b†}

^a Departamento de Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Campus 2 - Morro do Lena - Alto do Vieiro, 2411-901, Leiria, Portugal

^b CERIS-ICIST, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

[†] Autor para correspondência: jb@civil.ist.utl.pt

RESUMO

Uma das principais condicionantes da durabilidade do betão com agregados naturais é o desenvolvimento da reacção álcalis-sílica. A possibilidade de incorporar agregados reciclados em betões conduz novamente à temática da reacção expansiva.

O presente artigo tem como objectivo apresentar a questão da susceptibilidade dos agregados reciclados no desenvolvimento da reacção álcalis-sílica em betões com incorporação desses agregados. São mencionadas as características e propriedades dos agregados reciclados, indicando as principais alterações que poderão ocorrer nos betões quando se substitui agregados naturais por reciclados. São também apresentadas ainda algumas considerações sobre o que pode mudar no desenvolvimento das reacções álcalis-sílica com a utilização de agregados reciclados.

Cronologia do artigo:

Recebido a 29 dezembro 2016
Corrigido a 22 novembro 2017
Aceite a 20 fevereiro 2018
Publicado a 03 julho 2018

Palavras-chave:

Reacção álcalis-sílica
Agregados reciclados
Propriedades
Betão
Reciclagem

1. Introdução

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) podem ser considerados, segundo Angulo (2005), todo e qualquer resíduo proveniente de actividades de construção, quer sejam de novas construções ou demolições, que envolvam actividades de obras de arte e limpezas de terrenos com presença de solos ou vegetação.

A fracção predominante no RCD é, de um modo geral, de origem mineral e composta por resíduos de betão, argamassa, cerâmicos, gesso, entre outros. Os RCD têm características para serem reciclados e reutilizados em diversas aplicações, desde a reutilização na construção, novos produtos e materiais até ao aterro controlado.

A utilização de agregados reciclados (AR) como material de construção surge como um contributo para o reaproveitamento de RCD e a sustentabilidade da construção. A incorporação de AR em betão obriga a que se conheça as suas limitações através da apreciação do seu efeito nas propriedades dos betões. Neste artigo, apenas será focada a reciclagem de RCD para produção de AR de betão para uma reutilização em betões com agregados reciclados (BAR).

Os AR de betão são constituídos por agregados grossos e finos naturais, por uma zona de transição (ITZ) e por uma parcela de argamassa aderida a esta. Esta estrutura provoca inevitáveis alterações no comportamento dos betões onde estes agregados são introduzidos, em substituição total ou parcial dos agregados naturais (AN).

A quantidade de agregados existentes num volume de betão aproxima-se de 75%, podendo influenciar a resistência do betão e comprometer o seu desempenho e durabilidade.

As reacções álcalis-sílica (RAS) são uma das principais condicionantes da durabilidade do betão com agregados naturais (BAN). As RAS ocorrem na presença de teores suficientes de humidade, álcalis e agregados reativos e originam um gel expansivo sílico-alcalino.

Uma das primeiras comunicações relacionadas com a RAS foi elaborada por Stanton (1940). O autor refere que a expansão e fissuração com perda de consistência, elasticidade e durabilidade da estrutura de betão descreve o quadro patológico das RAS. Desde 1970 que o problema tem sido estudado

com mais atenção devido a graves danos ocorridos em estruturas.

Condicionante da durabilidade do betão, a RAS é uma manifestação patológica que se desenvolve normalmente a longo prazo, com um constituinte necessário à reacção que é o potencial agregado reactivo. A possibilidade de incorporar AR em betões conduz novamente à questão da problemática das RAS e à susceptibilidade dos AR no desenvolvimento da reacção. Ao longo do artigo, pretende-se descrever algumas características dos AR que poderão ter alguma influência no desenvolvimento da RAS em betões com incorporação destes agregados.

2. Características dos AR

2.1. Produção de AR

O processo de reciclagem de RCD engloba a diferenciação do material reciclável como agregado. A divisão da parcela inorgânica não-metálica efectua-se retirando da composição materiais indesejados como materiais ferrosos, plásticos e madeiras. O processamento dos RCD é feito em centrais fixas ou móveis, a partir de operações (LNEC E471):

- triagem - eliminação dos componentes indesejáveis, que prejudicam as características técnicas e ambientais do produto reciclado;
- redução primária - redução das dimensões dos escombros e remoção dos materiais metálicos ainda existentes;
- britagem - redução progressiva das dimensões dos resíduos (em duas fases);
- peneiração - obtenção de diferentes granulometrias, dependente da aplicação prevista.

A separação dos contaminantes do material reciclado e a reciclar para reutilização em betão é essencial para a obtenção de agregados de melhor qualidade. Os resíduos devem ser distribuídos segundo a qualidade e a facilidade de tratamento, após serem submetidos a uma selecção rigorosa. Após este processo, são fracturados até atingirem dimensões coerentes com as admissíveis nos britadores (Angulo, 2000).

Várias técnicas de demolição, selecção e separação têm vindo a ser apresentadas e melhoradas: separação por filtros, separação por mesa vibratória, sedimentação, separação magnética, flutuação, separação por meio denso, utilização de jigs entre outras. Estas técnicas possibilitam produtos mais uniformes e limpos, aumentando a sua qualidade (Vázquez e Gonçalves, 2005).

2.2. Diversidade de AR

A diversidade de material existente nos RCD produz diversos tipos de AR. Os agregados resultantes da reciclagem de RCD podem dividir-se em vários grupos de acordo com a qualidade em relação à influência que têm na potencialidade dos materiais / elementos da construção onde são utilizados. De acordo com a origem e por ordem decrescente de qualidade, Brito (2005) apresenta a seguinte classificação para AR:

- agregados grossos recuperados por lavagem da argamassa de betão pronto no seu estado fresco que, por qualquer razão, não é utilizado;
- agregados finos e/ou grossos, resultantes da demolição de elementos de betão sem revestimento, situação mais favorável na utilização em substituição de areia ou brita natural;
- agregados finos e/ou grossos resultantes da demolição de peças de betão, ele próprio já com agregados reciclados (reciclagem cíclica repetitiva), em que os agregados reciclados poderão ser de vários tipos, ainda que a probabilidade de serem apenas pétreos e grossos seja elevada;
- agregados finos e/ou grossos resultantes de uma mistura de elementos de betão com elementos cerâmicos argamassados, semelhante às anteriores mas em que os agregados reciclados são simultaneamente pétreos, cimentícios e cerâmicos;
- agregados finos e/ou grossos resultantes de resíduos de demolição mais ou menos indiferenciados, em que aos reciclados pétreos e cerâmicos se poderão somar restos de outros materiais como madeira, plásticos, metais, vidro e outros, conduzindo a uma mistura de “piores” características ou, pelo menos, com menor controlo de qualidade;
- agregados finos e/ou grossos resultantes de refugo da indústria cerâmica ou da demolição de elementos de alvenaria cerâmica (tijolos e telhas) argamassados ou não, com agregados reciclados sobretudo cerâmicos, com piores características para o fabrico de betão estrutural.

Os AR obtidos a partir de elementos de betão, dividem-se em agregados grossos reciclados (AGR) e agregados finos reciclados (AFR). Os agregados cerâmicos apresentam menor potencial do que os AR de betão para a produção de novos betões, por terem maior absorção de água e uma massa volúmica bastante mais reduzida (Brito, 2003).

2.3. *Propriedades dos AR*

Os AR são normalmente compostos por materiais minerais inertes como argamassas, betões, pedaços de alvenaria e pedras britadas provenientes do betão e por alguns contaminantes indesejáveis como os cloretos, sulfatos, matéria orgânica, vidro, plástico, metais, entre outros, normalmente em pequenas fracções mas que reduzem a sua potencialidade. Como refere Levy (2001), os níveis de contaminação dos AR devem ser limitados para que o betão possa garantir a estabilidade e durabilidade nas estruturas.

O AR apresenta uma maior heterogeneidade, menor resistência da matriz e maior porosidade do que o AN, sendo estas uma das maiores diferenças entre eles (Altheman, 2002).

A classe do betão de origem (BO) pode influenciar o desempenho dos AR em relação ao teor de ligante e à razão água / cimento (a/c) desse betão. Gutiérrez e Juan (2004) referem que não se deverá utilizar BO, para reciclar, de resistência à compressão inferior a 25 MPa.

A avaliação das características dos AR comparativamente aos AN é muitas vezes facilitada com a análise do desempenho do próprio betão com estes agregados. Este critério é usualmente usado para definir a qualidade do AR em termos de adequação às funções solicitadas.

2.3.1. *Granulometria*

A granulometria dos agregados influencia a resistência mecânica, a trabalhabilidade e o consumo de cimento dos betões. A diferença no desempenho do AGN em relação ao AGR encontra-se na pasta endurecida constituída por finos naturais e cimento a que aderem os AN. A elevada absorção de água e a reduzida massa específica da pasta são propriedades transmitidas aos AGR e agravadas consoante a proporção de pasta aderida (Brito, 2003).

A percentagem em volume de argamassa aderida ao AN por fracção de AGR foi analisada por Hansen e Narud (1983) verificando-se que a influência da pasta aderida no desempenho dos BAR será tanto maior quanto menor for a sua granulometria média, aumentando consequentemente a diferença no desempenho entre AGR e AGN.

A variabilidade na composição dos agregados de RCD influencia as curvas granulométricas quando se utiliza o mesmo tipo de equipamento de britagem com igual calibração (Angulo, 2000). Por outro lado, Gonçalves (2001) verificou que a variação no processo de trituração dos elementos de betão com diferentes britadeiras (maxilas ou rotativa), diferentes aberturas nas maxilas e o número de triturações efectuadas, influenciam as características dos AR. Matias e Brito (2005) concluíram que a trituração afecta tanto as características dos AN como as dos AR de forma semelhante. Esta constatação pode ser um factor de diferenciação de elevada importância, visto que usualmente os AR são obtidos por trituração por maxilas e nos AN existe uma trituração secundária com moinhos de rolos ou equipamento semelhante.

2.3.2. *Baridade*

A conversão de massas de agregados em volumes de agregados e vice-versa é efectuada através do conceito de baridade que se define como a massa por unidade de volume aparente de um determinado conjunto de agregados. Para agregados, a relação entre a massa de um corpo e o seu volume, definida por massa volúmica, aplica-se apenas a uma partícula e não ao conjunto de agregados (Coutinho, 1988).

Citando Brito (2003), quanto maior a baridade dos agregados, melhor o desempenho do betão em cuja composição entrarem, pelo que é uma medida indirecta da sua “qualidade”. A forma, curva granulométrica e grau de compactação dos agregados condicionam os valores da baridade. O processo de trituração, por sua vez, segundo a análise de Matias e Brito (2005), não alterou os valores da baridade dos agregados grossos que utilizou na sua campanha experimental.

Em AGR de betão, quanto maior for o teor da pasta endurecida aderida maior será a diferença entre a baridade dos AGR e a dos AGN pois a pasta endurecida aderida dos AGR tem uma massa volúmica menor do que a dos AGN.

2.3.3. *Porosidade e absorção de água*

Os AN apresentam pouca ou nenhuma porosidade, pelo que a sua taxa de absorção de água não é muito relevante, ao contrário do que acontece com os AR, bastante porosos e, consequentemente, com elevadas taxas de absorção de água.

Os poros do AR no fabrico do betão podem encontrar-se desde secos a saturados, como se verifica na Figura 1, demonstrando os diferentes estágios de absorção de água do agregado.

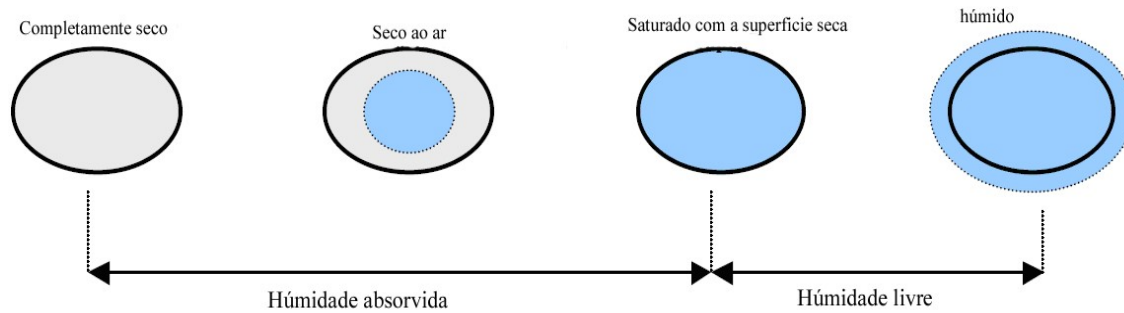


Figura 1 - Diferentes estágios de absorção de água dos agregados (adaptado por Carrijo (2005) de Neville (1995)).

Esta característica, dependente da quantidade de poros e das condições de armazenamento do agregado, influencia a amassadura do betão. A absorção de água dos agregados tem ainda mais relevância para as propriedades do betão quando os agregados são heterogêneos (Carrijo, 2005).

A percentagem de absorção de água dos AR é variável em função da distribuição granulométrica e da natureza do agregado. Segundo Angulo (2000), a influência da densidade do material na absorção é explicada pela porosidade do material, **ou seja**, quanto maior a densidade menor a absorção. Carrijo (2005) afirma que a porosidade do agregado é uma propriedade mais relevante do que a natureza mineral do RCD que lhe deu origem.

A permeabilidade dos BAR é influenciada pela elevada taxa de absorção de água devido à elevada porosidade dos agregados. Estudos realizados por Leite (2001) demonstram que a absorção média dos AGR é de cerca de 4,95% e dos AFR de 8,60%.

A elevada porosidade influencia também a aderência entre o agregado e pasta, a resistência à compressão, a estabilidade química, a resistência à abrasão e a resistência ao ataque gelo-degelo (Neville, 1995). A resistência ao desgaste do betão está directamente relacionada com a resistência do agregado à abrasão afectada pela porosidade (Altheman, 2002).

Dependendo da quantidade de argamassa aderida às partículas de AR de betão, a absorção de água vai variar numa relação directamente proporcional, como se pode observar na Figura 2. A razão a/c do BO e as dimensões do grão do AR fazem com que seja variável a percentagem de argamassa aderida e também a absorção de água (Angulo, 2000).

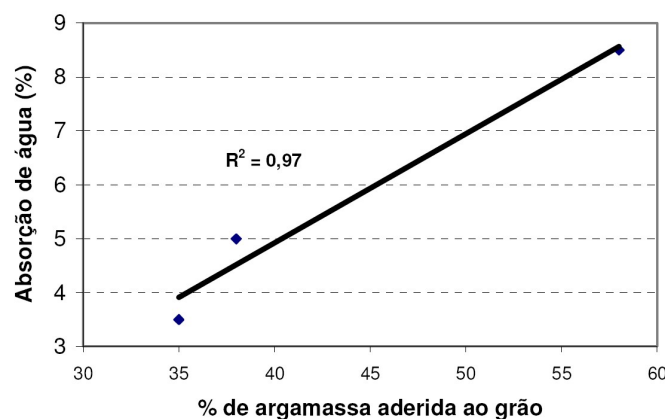


Figura 2 - Relação entre a absorção de água e a quantidade de argamassa aderida ao grão de betão (Hansen, 1992).

A absorção de água aumenta com a superfície específica das partículas e esta com a diminuição da sua granulometria. A absorção de água dos AFR, independentemente da sua origem, é superior à dos AGR com a mesma origem (Brito, 2003). Evangelista (2007) obteve valores de absorção de água nos AFR de betão superiores aos obtidos por Pereira (2002) em AGR cerâmicos.

Os efeitos da razão a/c e do tamanho da partícula na percentagem de argamassa aderida ao grão

de agregados de betão são demonstrados na Figura 3. Nota-se que, com a diminuição da dimensão das partículas, aumenta a quantidade de argamassa aderida ao grão. O efeito da razão a/c é maior quanto menor a dimensão das partículas. Em agregados grossos, esse efeito não é considerável (Angulo, 2000).

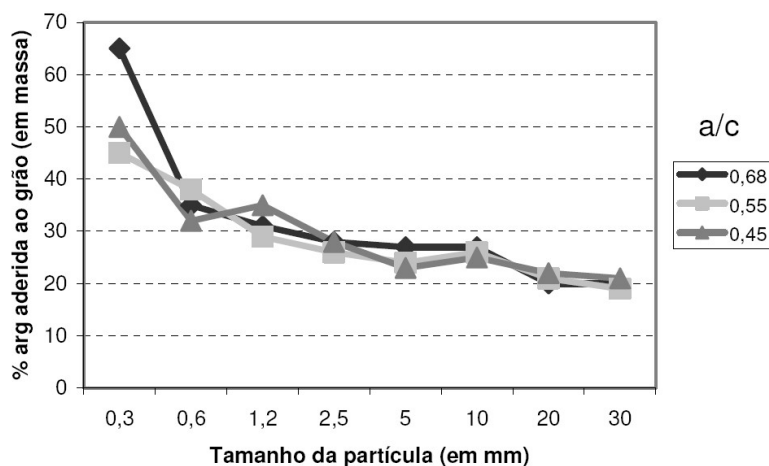


Figura 3 - Efeito da razão a/c e da dimensão da partícula na percentagem de argamassa aderida ao grão (Hansen, 1992).

Entre as partículas de argamassa e betão existentes nos agregados grossos de RCD reciclados, existe uma diferença física entre a absorção de água e a massa específica aparente determinada pela porosidade, como se demonstra na Figura 4. A massa específica do BAR no estado fresco tende a ser inferior à do BAN devido à menor massa específica do AR.

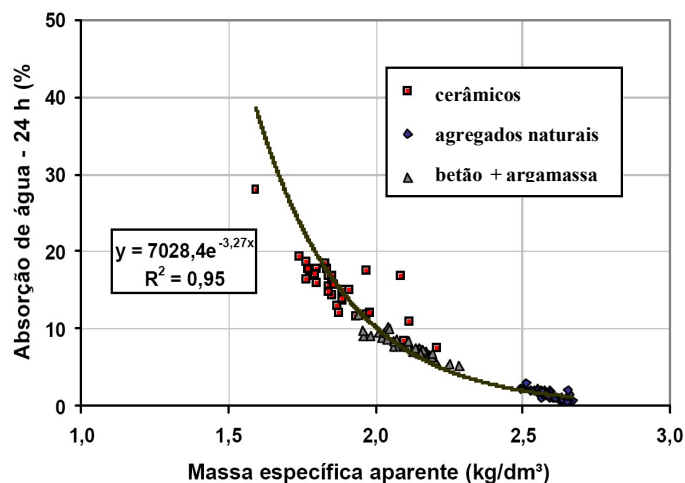


Figura 4 - Correlação entre a massa específica aparente e a absorção de água para os diversos minerais presentes nos agregados grossos de RCD reciclados (adaptado de Angulo, 2000).

Quanto maior for a absorção dos AR, maior será a diferença entre a razão a/c aparente (introduzida na mistura) e a efetiva (contribui para a hidratação do cimento e para a trabalhabilidade da mistura). O aumento significativo da absorção de água pelo agregado implica que haja um aumento da razão a/c aparente. A dependência deste facto acarreta diversas consequências negativas para as características mecânicas e de durabilidade do betão endurecido (Brito, 2003).

Estudos demonstram que o AR seco absorve uma parte considerável de água de amassadura prejudicando a trabalhabilidade do betão (Leite, 2001). Por outro lado, também é possível que o AGR seco, fique coberto de pasta de cimento e impeça deste modo a entrada de água nos poros do agregado (Neville, 1995). A água nos poros dos AR pode contribuir para a hidratação do cimento, desenvolvendo assim a chamada “cura húmida interna”, que pode ser condicionada pelo volume dos poros (Machado *et al.* (1998) e Zhutovsky *et al.* (2002) citados por Carrijo (2005); Bremner (1998); Larrard (1999)).

A diversidade nas propriedades e absorção de água dos AR cria alguns problemas no controlo de

produção de BAR influenciando a sua consistência no estado fresco e as suas características no estado endurecido. Torna-se difícil estipular razões a/c coerentes devido à variabilidade da absorção dos agregados. Alguns conselhos para evitar estes problemas são apresentados por Alaejos *et al.* (2004), através de medidas como a quantificação da quantidade adicional de água a colocar no betão no momento de produção, a pré-saturação de agregados e a adição de adjuvantes.

Existem características dos AR que poderão dificultar esta determinação na dosagem de água. Segundo Barra (1998), a quantidade de água que pode ser absorvida pelos AR pode depender do tempo de contacto do agregado com a água, se este tem um contacto inicial somente com água ou com a pasta de cimento e também da condição inicial do agregado relativamente à quantidade de água existente.

Os AR estudados por Lima (1999) apresentam pelo menos 95% de absorção após 5 minutos de imersão. Carrijo (2005) verificou que após 10 minutos de imersão os agregados absorveram uma quantidade superior a 70% da absorção total. Outros autores (Juan e Gutiérrez (2004); Mendes *et al.* (2004)) sugerem que somente a quantidade de água que o agregado absorve nos primeiros 10 minutos deve ser adicionada à água de amassadura, sendo os agregados humedecidos durante esses 10 minutos até à introdução dos restantes componentes para o fabrico do betão. Este valor estabelece o tempo a partir do qual a absorção se torna mais lenta ou é por vezes até interrompida pelo revestimento das partículas com a pasta de cimento.

Os valores para a absorção ao fim de 10 minutos, por serem aproximadamente proporcionais à que se obtém ao fim de 24 horas (Figura 5), é também sugerida no guia Alemão (1998).

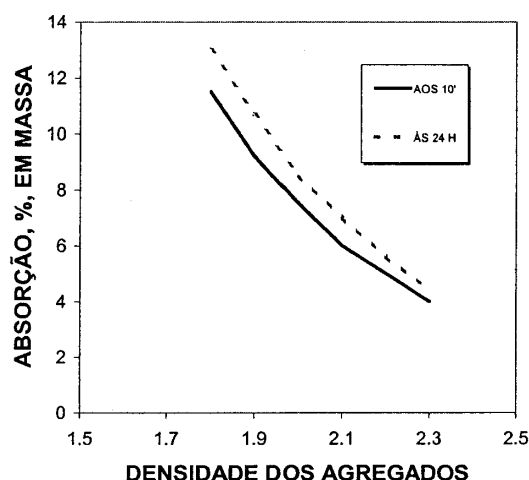


Figura 5 - Relação da absorção de água aos 10 minutos e após 24 horas (adaptado por Gonçalves e Neves, 2003).

A variabilidade das propriedades nos AR sugere que seja efectuado um estudo numa amostra de AR a utilizar, a partir da qual após imersão em água se determine a quantidade de água absorvida em função do tempo. Na determinação, poder-se-á verificar a percentagem de desagregação dos agregados e a perda de massa da mistura no processo de humedecimento.

2.3.4. Forma e textura superficial das partículas

A trabalhabilidade, o ângulo de atrito interno, a compacidade e todas as restantes propriedades que dependem da quantidade de água de amassadura são afectadas pela forma dos agregados (Coutinho, 1988).

Matias e Brito (2005) obtiveram tendências consistentes na forma dos agregados para processos de britagem de maxilas e maxilas mais impacto. Com a britagem por maxilas mais impacto obtiveram valores superiores do índice volumétrico para todas as granulometrias com diferenças mínimas entre os AGR e AGN, sempre superior nos reciclados. Este facto deve-se à argamassa aderida dos AR que se desintegra, tornando as partículas mais boleadas.

A forma angular das partículas de AR influi nas propriedades de argamassas e betões no estado fresco (Angulo, 2000). No estado fresco e nas idades jovens, a textura mais áspera do AR pode ser favorável na aderência entre a pasta e o agregado, afectando com isto as resistências do betão, em particular a flexão. Tal pode também diminuir a trabalhabilidade conduzindo a um aumento da absorção de água em relação ao uso de AN (Mehta e Monteiro, 1994; Brito, 2003).

2.3.5. Resistência mecânica

A resistência do betão está essencialmente dependente da resistência da pasta de cimento, com a excepção da utilização de rochas com tensões de rotura muito inferiores é que a resistência do betão fica condicionada pela resistência do agregado (Brito, 2003).

Os AGR de betão, apresentam valores inferiores de resistência ao esmagamento e ao desgaste dos AGN correspondentes. As características da pasta endurecida aderida são a principal causa da diminuição desta propriedade nos AR.

Foram encontrados por Hansen e Narud (1983) valores de perda por abrasão de Los Angeles para AR 20 a 50% superiores aos dos AN, verificando-se ainda que a resistência à abrasão diminui com a granulometria dos agregados, inferiorizando mais uma vez os AFR em relação aos grossos. Comparativamente, a resistência diminui também entre os AGN e os AGR devido, como anteriormente mencionado, à menor resistência à abrasão da pasta aderida quando comparada com AN. Assim, quanto maior a razão a/c do BO, menor a resistência ao desgaste dos AGR.

3. Susceptibilidade do AR no desenvolvimento da RAS

3.1. Breves considerações sobre as RAS

A RAS traduz-se pela reacção entre a sílica reactiva que se encontra presente nos agregados e os álcalis (sódio e potássio) da pasta de cimento. Os vários tipos de sílica presentes nos poros dos agregados reagem com os iões hidróxido que estão nos poros do betão. A sílica dissolvida reage com os álcalis de sódio e potássio formando o gel de álcalis-sílica, denominado por gel sílico-alcálico (Sousa Coutinho, 1998). O fenómeno é atribuído à maior solubilidade das formas de sílica amorfa, desordenada ou fracamente cristalina em soluções de pH elevado.

A absorção de água pelo gel sílico-alcálico faz com que este se expanda, ocupando um volume maior do que os materiais originários da reacção, podendo gerar tensões suficientemente elevadas para originar a fissuração das partículas de agregado ou de betão e causar danos na estrutura (West, 1996; Fernandes, 2005). A água que é absorvida pode ter várias origens, desde a água de hidratação do cimento, a água existente no local, a água da chuva ou mesmo a água proveniente da humidade do ar.

Quando o gel fica confinado com a matriz de cimento, o seu aumento de volume cria tensões internas, que podem causar graves fissuras do betão, como se observa na Figura 6.

As expansões devem-se principalmente à reatividade dos agregados, a qual está relacionada com a presença de sílica amorfa, mal cristalizada ou em variedades criptocristalinas, à quantidade de agregado reativo e sua granulometria, à concentração na solução intersticial em álcalis e cálcio (quantidade interna de substâncias agressivas), ao tipo de cimento, às condições ambientais (quantidade externa de substâncias agressivas - por exemplo, provenientes de sais descongelantes) e à quantidade de água disponível (Sousa Coutinho, 1998).

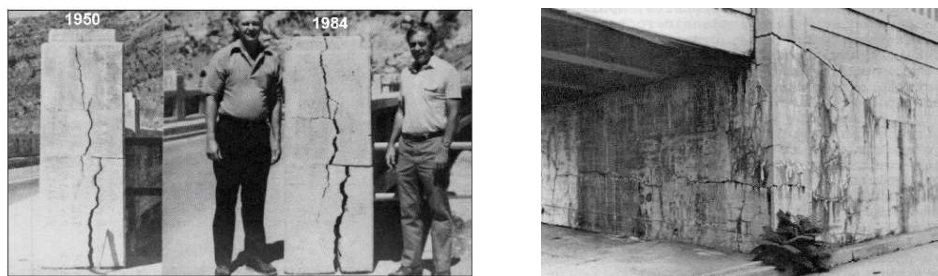


Figura 6 - Deterioração do betão por reacções álcalis-sílica (Sousa Coutinho, 1998).

Os álcalis que são geralmente fornecidos pelo cimento podem também ser fornecidos pelos agregados, pelo que é importante também identificar os agregados potencialmente fornecedores de álcalis. A RAS pode levar muito tempo a manifestar-se em termos de deterioração do betão.

A expansão do betão por RAS é uma consequência da quantidade desequilibrada entre os reagentes e os produtos da reacção. Enquanto existir espaço vazio a ser preenchido pelo gel sílico-alcálico, o volume de betão mantém-se inalterado (Lopes, 2004). Se não existir espaço para o gel expandir, as estruturas de betão danificam-se. A resistência à compressão do betão pode ser alterada devido à RAS, embora se considere que os principais efeitos nas propriedades do betão estão na redução da capacidade de flexão, tracção e módulo de elasticidade (Freitag *et al.*, 2003).

3.2. O que pode mudar com a utilização de AR

As condições de exposição do betão influenciam o desenvolvimento da RAS. Verificou-se na bibliografia que a reacção e o gel sílico-alcálico apenas se desenvolvem quando se está perante a condição de existência de álcalis, sílica e humidade em quantidade suficiente. Observou-se também que a melhor forma de diminuir o risco da ocorrência da reacção expansiva se encontra na limitação dos produtos de reacção a valores fronteira.

O relatório TR 3 (Freitag *et al.*, 2003) considera que betões de baixa qualidade, devido à maior porosidade e menor densidade, têm menos apetência para desenvolver a RAS pois secam mais rapidamente. O comentário suscita alguma curiosidade em conhecer o comportamento dos BAR perante o desenvolvimento de RAS, face às suas características.

Da análise da investigação existente, verifica-se que existe uma tentativa de relacionar a expansibilidade do gel sílico-alcálico com a sua composição e idade. Com o objectivo de produzir betão onde seja possível existir um controlo microscópico dos seus componentes, evitando reacções expansivas que se dão ao longo do tempo. A degradação do betão inicia-se com a fissuração interna entre agregados e pasta de cimento do betão, podendo depois provocar graves anomalias ao longo do tempo, como fissuras com dimensões favoráveis à degradação estrutural.

Rivard *et al.* (2000) citado por Fernandes (2005), afirmam não se encontrar nenhuma relação entre a quantidade de gel identificada petrograficamente e a expansão verificada, embora os autores reconheçam que o gel pode ter sido lixiviado durante o armazenamento das amostras. Contrariamente a citações de outros autores, os investigadores afirmam que são a porosidade do betão e o grau de fissuração os factores que influenciam o nível de expansão. O gel que se forma em poros e fissuras exerce pequena pressão, excepto numa fase inicial, em que contribui para a progressão das fissuras já formadas.

Buttler (2003) refere que, nos resíduos de betão que tenham sido reciclados após terem sido produzidos com elevadas quantidades de cimento não hidratado na superfície, a resistência do conjunto será determinada pelas características da pasta aderida do AR. Existirá deste modo um maior número de partículas de cimento para se hidratarem na nova zona de transição dispondo-se densamente junto das partículas de agregado. Assim, a zona de transição possuirá um menor índice de vazios, influenciando de forma menos significativa a resistência.

Alaejos e Bermúdez (2003) citados por Foradaba (2005) descrevem que, quando um agregado fino reactivo se combina com um agregado grosso inócuo, a porosidade do agregado grosso afecta a reactividade global. Os poros actuam como uma câmara de expansão que os produtos de expansão, ao aumentar de volume, vão ocupar em primeiro lugar, não provocando tensões adicionais no betão. Assim, quanto maior for a porosidade do agregado grosso, menor o dano que a expansão provoca.

A teoria apresentada por Rivard *et al.* (2000), e a descrição de Alaejos e Bermúdez (2003) relativa a agregados mais porosos, sugerem a investigação do comportamento do betão face à RAS e ao gel sílico-alcálico formado, se forem utilizados AR na mistura do betão. Os BAR apresentam algumas propriedades, nomeadamente uma maior porosidade, que poderão influenciar o seu comportamento quando estiverem perante reacções expansivas.

Os AR de betão são sujeitos a ensaios de reactividade potencial álcalis-agregado. No caso de o resultado indicar que os AR são potencialmente reactivos, isso poderá ser interpretado como os agregados originais dos reciclados serem eles próprios reactivos, pelo que esta reacção terá probabilidade de ainda ocorrer no novo betão (Larrañaga, 2004). Este facto não impossibilita a existência de agregados reactivos quando o BAR não é reactivo, facto que se atribui a não terem ainda ocorrido as RAS e que está relacionado com a cinética lenta destas reacções.

A investigação em BAR tem crescido e a apresentação de resultados no âmbito das alterações das propriedades dos betões relativamente à incorporação total ou parcial de AR de betão e também argamassas e alvenaria tem mostrado resultados satisfatórios. Existe porém algum desconhecimento em relação ao desenvolvimento da RAS em BAR. A análise da reacção, extremamente danosa para as estruturas de betão, suscitou um acompanhamento intensivo do seu desenvolvimento nos BAN, verificando-se um conhecimento aprofundado da reacção nestes betões. Não existe ainda, porém, uma solução para evitar o seu desenvolvimento, mas apenas algumas medidas de mitigação e prevenção.

Nos BAR, a investigação é ainda muito preliminar e, devido às características dos AR, surgem diversas dúvidas em relação à influência que a sua utilização pode ter no desenvolvimento das RAS e o que pode, ou não, mudar com a utilização de AR. Por exemplo:

- é possível que betões fabricados com cimentos com baixos teores de álcalis e com AN potencialmente reactivos possam agora vir a ser reactivos devido ao aumento dos teores em álcalis da nova mistura;

- devido à estrutura mais porosa do BAR, o volume de vazios disponível para o gel sílico-alcalino se expandir é maior do que no betão convencional; esta característica suscita a dúvida de qual será o comportamento da estrutura de betão devido à expansão do gel sílico-alcalino;
- pelo tempo de exposição aos álcalis dos agregados reciclados, agregados potencialmente reativos poderão ter diminuído ou extinguido a sua reactividade quando sujeitos ao aumento de álcalis do novo cimento da mistura, ou, pelo contrário, poderá ter acabado o seu período de dormência e a reacção estar iminente;
- existem diferenças nas propriedades do gel sílico-alcalino formado na mistura de BAR;
- as diferentes propriedades e características dos AR fomentam a dúvida sobre se existirá alguma semelhança no desenvolvimento e na dimensão de danos causados pela RAS nos netões com AN;
- a utilização de AR no betão provoque alterações nas condições consideradas ótimas para o desenvolvimento da RAS e no volume do gel produzido.

Algumas das dúvidas comprometem o desenvolvimento das especificações para a utilização de betões com agregados reciclados, promovendo um futuro sustentável na construção civil.

4. Conclusões

As maiores diferenças nas propriedades dos AR relativamente aos AN resumem-se sobretudo à sua maior heterogeneidade, à menor resistência da matriz e à sua maior porosidade. Diversas características devem ser consideradas pois têm influência nas propriedades dos AR.

O conhecimento prévio da origem do material reciclado verificou-se ser de extrema importância, influenciando o desempenho do betão elaborado com AR. A granulometria e o processo de trituração do agregado incutindo formas e texturas às partículas, além de influenciarem a resistência mecânica, a trabalhabilidade e o consumo de cimento nos BAR, têm também a sua interferência no desenvolvimento da RAS nos BAN.

A porosidade apresenta-se nos AR como uma das propriedades de maior diferenciação para os AN. A maior porosidade destes agregados influencia algumas propriedades interrelacionadas dos agregados, tais como a resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade.

A porosidade e absorção de água dos AR suscitam alguma curiosidade nas condições disponíveis para o desenvolvimento da RAS nos BAR pois, com a absorção de água pelos agregados, a secagem total do betão irá prolongar-se por mais tempo, ficando os reagentes mais tempo em contacto com a água. A estrutura mais porosa associada aos AR produz betões com porosidade igualmente mais elevada, incutindo a dúvida de quais as consequências para as estruturas pelo aumento de volume do gel sílico-alcalino, pois existe um aumento no espaço disponível para o seu desenvolvimento.

A existência de impurezas nos AR pode originar, entre outros problemas, o desenvolvimento da RAS, com a introdução por fontes externas de álcalis ou sílica.

Algumas características dos BAR, como a maior porosidade e menor densidade, foram as apresentadas por alguns BAN onde se verificou uma diminuição da apetência para o desenvolvimento da RAS. Algumas destas situações suscitam a curiosidade sobre a potencialidade dos BAR relativamente à reacção expansiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Centro de Investigação CERIS, do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, e da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

Referências

- Alaejos, M. P.; Bermúdez, M. A., “Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas”, *Monografías CEDEX*, 2003.
- Alaejos, P.; Sánchez, M.; Dapena, E.; Vázquez, E.; Barra, M.; Etxeberria, M.; Marí, A.; Agullo, L.; Martínez, F.; Fonteboa, B.; Polanco, A.; Francisco, G.; Aleza, F.; Parra, J.; Buron, M., “Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete”, *International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Espanha, pp. 511-525, 2004.

- Altheman, D., “Avaliação da durabilidade de concretos confeccionados com entulho de construção civil”, *Relatório Final (Iniciação Científica), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas*, Campinas, 2002.
- Angulo, S. C., “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, Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2005.
- Angulo, S. C., “Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados”, *Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2000.
- Barra, A. M.; Vasquez, E., “Properties of concrete with recycled aggregates: Influence of properties of the aggregates and their interpretation”, *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, London, 1998.
- Biocycle, “Canada targets C&D debris”, v.32, Nº1, pp. 35-36, Janeiro, 1991.
- Bremner, T. W., “Lightweight aggregate concrete”, *40º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon*, 1998.
- Brito, J. de, “Agregados Reciclados e sua Influência nas Propriedades dos Betões”, *Lição de Síntese de Agregação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, Lisboa, Março, 2005.
- Brito, J. de, “Agregados Reciclados e sua Influência nas Propriedades dos Betões”, In: *Seminário Novos Desenvolvimentos do Betão*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Setembro, 2003.
- Buttler, Alexandre M., “Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo*, São Carlos, 2003.
- Carrijo, P. M., “Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2005.
- Coutinho, A. S., “Fabrico e propriedades do betão.”, Vol. I, II e III, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988.
- Evangelista, L., “Desempenho de betões executados com agregados finos reciclados de betão”, *Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, Lisboa, 2007.
- Fernandes, M. I. G., “Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra”, *Tese de Doutorado em Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, Porto, 2005.
- Foradaba, J. S., “Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón”, *Tesina, Departamento de Construção, Escola Superior Técnica de Caminhos, Canais e Portos de Barcelona, Universidade Politécnica da Catalunha*, Barcelona, 124 p., Julho, 2005.
- Freitag, S. A.; Goguel, R.; Milestone, N. B. (2003), “TR3 Alkali Silica Reaction: Minimizing the risk of damage to concrete. Guidance notes and recommended practice”, Technical Report, *Cement and Concrete Association of New Zealand*, Wellington, 19 p.
- Gonçalves, A. P., “Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos da construção”, *Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, Lisboa, 2001.
- Gonçalves, A.; Neves, R., “Agregados Reciclados”, *Seminário sobre agregados*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2003.
- Guia Alemão, “Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - DafStb-Richtlinie. Beton mit rezykliertem zuschlag”, Ausgabe, 1998.
- Gutiérrez, P. A.; Juan, M. S., “Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete”, in: *Conference on the use of recycled materials in building and structures*, Barcelona, 2004.
- Hansen, T. C., “Recycling of demolished concrete and masonry”, RILEM Report 6, London & FN SPON imprint of Chapman & Hall, 1992.
- Hansen, T.; Narud, H., “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate”, in: *Concrete International*, V. 5, n.º 1, ACI, Detroit, 1983.
- Juan, M. S.; Gutiérrez, P. A., “Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate”, *International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Espanha, pp. 536-544, 2004.
- Larrañaga, M. Etxeberria, “Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete”, *Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Politécnica da Catalunha*, Barcelona, Março 2004.

- Leite, M. B., “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”, *Tese de Doutorado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2001.
- Levy, S. M., “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria”, *Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo*, Dezembro 2001.
- Lima, J. A. R., “Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em concretos e argamassas”, *Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, São Carlos, 1999.
- LNEC E 471, “Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos”, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 2006.
- Lopes, L. E., “Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragens de concreto”, *Tese de Doutorado em Engenharia Civil na Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Brasil, 157 p, 2004.
- Machado, E. F.; Latterza, L. M.; Mendes, C. L., “Influência do agregado graúdo, proveniente da reciclagem de rejeitos de construção e demolição(entulho), na perda do abatimento do concreto fresco e nas propriedades mecânicas do concreto endurecido”, *40º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon*, Rio de Janeiro, 1998.
- Matias, D.; Brito, J. DE, “Influência dos adjuvantes no desempenho de betões com agregados grossos reciclados de betão”, Relatório ICIST DTC n.º 3/05, *Instituto Superior Técnico*, Lisboa, 2005.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M., “Concreto: estrutura, propriedades e materiais”, Editora Pini, São Paulo, 1994.
- Mendes, T. M.; Morales, G.; Carbonari, G., “Study on ARC’s aggregate utilization recycled of concrete”, *International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Espanha, pp. 629-635, 2004.
- Neville, A. M., “Properties of concrete”, Longman, England, 1995.
- Pereira, A. S., “Utilização de agregados grossos cerâmicos reciclados na produção de betão”, *Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, Lisboa, 2002.
- Rivard, P.; Fournier, B.; Ballivy, G., “Quantitative assessment of concrete damage due to alkali-silica reaction (ASR) by petrographic analysis”, *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate reaction*, Québec, pp. 889-898, 2000.
- Sousa Coutinho, Joana, “Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem”, *Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Julho, 1998.
- Stanton, T. E., “Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate”, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, 1940.
- Vásquez, E.; Gonçalves, A., “Recycled aggregate in concrete”, *Use of Recycled Materials, RILEM TC 198-URM: Final Report*, Setembro, 2005.
- West, G., “Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges”, Thomas Telford Publications, 167 p., London, 1996.
- Zhutovsky, S.; Kivler, K.; Bentur, A., “Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage”, *Materials and Structures*, V. 32, n.º 246, pp. 97-101, 2002.
- Zordan, S. E., “A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto”, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas*, Campinas, 1997.