

Reatividade potencial aos álcalis em agregados graníticos portugueses - Caracterização petrográfica *versus* Ensaios de expansibilidade

Violeta Ramos¹

António Santos
Silva²

Isabel
Fernandes³

Dora Soares²

Fernando
Noronha³

RESUMO

Esta comunicação visa apresentar resultados obtidos no âmbito do projeto IMPROVE (Melhoria do desempenho de agregados para a inibição das reações álcalis-agregado no betão) que tem por objetivo, entre outros, estabelecer a metodologia mais adequada para avaliação da reatividade potencial dos agregados portugueses. Procedeu-se à avaliação da reatividade potencial aos álcalis de três agregados graníticos nacionais de diferentes origens através da análise petrográfica (RILEM AAR-1 e LNEC E 461), de ensaios de expansibilidade (ASTM C 1260, RILEM AAR-3 e RILEM AAR-4.1) e do ensaio químico (ASTM C 289). Os resultados obtidos comprovam que os ensaios ASTM C 1260 e ASTM C 289 não deverão ser utilizados na avaliação da reatividade aos álcalis de agregados graníticos. Relativamente aos ensaios RILEM AAR-3 e RILEM AAR-4.1 verificou-se que traduzem mais corretamente os resultados obtidos pela análise petrográfica. Para este tipo de agregados é proposta a necessidade do prolongamento da duração dos ensaios de expansibilidade de betão, até que seja atingida a estabilização da expansão.

Palavras-chave: RAS, granitos, petrografia, ensaios de expansibilidade, durabilidade do betão

1. INTRODUÇÃO

A definição dos ensaios laboratoriais que melhor refletem o comportamento em obra dos agregados para betão é de extrema importância, nomeadamente em termos da avaliação da sua potencialidade à reação álcalis-sílica (RAS). Em todo o mundo têm vindo a ser desenvolvidos vários estudos visando atingir esse objetivo, em diferentes tipos de agregados. No entanto, no que respeita às rochas de reação lenta, onde se incluem os agregados graníticos, os resultados não se têm mostrado totalmente esclarecedores.

Batic e Sota [1] demonstraram a eficácia do ensaio do prisma de betão ASTM C 1293 [2], semelhante ao ensaio RILEM AAR-3 [3], e a consistência dos seus resultados com o desempenho em obra de agregados graníticos da Argentina. O ensaio acelerado da barra de argamassa ASTM C 1260 [4] foi apontado como incapaz de detetar agregados de reação retardada de granitos gnáissicos da Austrália e de Portugal [5, 6]. Foi, igualmente, confirmado, em agregados australianos de reação lenta (ex. granito deformado contendo quartzo microcristalino), que o ensaio do prisma de betão a 60°C RILEM AAR-4.1 [7] supera as deficiências apresentadas pelo ensaio do prisma de betão a 38°C [3] na identificação deste tipo de agregados [8]. Esta observação foi corroborada pelo Projeto Europeu PARTNER [9], apesar de, neste caso, os agregados avaliados não serem de natureza granítica. Também de acordo com

¹ Centro de Geologia da Universidade do Porto, Portugal. violetaramos@fc.up.pt

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. ssilva@lnec.pt; dsoares@lnec.pt

³ Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Porto e Centro de Geologia da Universidade do Porto, Portugal. ifernand@fc.up.pt; fmnoronh@fc.up.pt

Shayan *et al.* [8], o ensaio RILEM AAR-4.1 [7] elimina um período de dormência de cerca de 3 a 4 meses, que é normalmente observado no ensaio RILEM AAR-3 [3], i.e., a expansão no RILEM AAR-4.1 [7] ocorre muito mais rapidamente do que no RILEM AAR-3 [3]. No entanto, e de acordo, com Lindgård *et al.* [9], o ensaio RILEM AAR-4.1 [7], apesar de identificar eficazmente a reatividade potencial de agregados de reação lenta, não mostra, necessariamente, que a reação se processa de forma lenta. O ensaio RILEM AAR-3 [3] reflete de forma mais eficaz a lentidão da expansão e, por vezes, 1 ano de ensaio não é suficiente

Nos últimos 60 anos foram construídas em Portugal um grande número de importantes obras de engenharia. Em algumas dessas estruturas, nomeadamente pontes e grandes barragens, foi identificada a ocorrência de deterioração devido à RAS [6, 16-21]. Acresce que o número de estruturas em Portugal com sinais de deterioração devido à RAS tem aumentado nos últimos anos, facto que alertou a comunidade técnica e científica para a análise desta problemática [22-26]. No decorrer desses estudos, constatou-se que nem sempre o desempenho em obra dos agregados corresponde aos resultados obtidos quando os mesmos são testados de acordo com o especificado nas normas de ensaio [6, 19]. Neste contexto, encontra-se a ser coordenado pelo LNEC, em colaboração com a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e a Universidade de Évora, um projeto, com cofinanciamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia, designado de IMPROVE (Melhoria do desempenho de agregados para a inibição das reações álcalis-agregado no betão), com o objetivo de estabelecer a metodologia mais adequada para avaliação da reatividade potencial aos álcalis dos agregados portugueses, procurando contribuir para a durabilidade e sustentabilidade das futuras estruturas em betão. Esta avaliação, baseada na Especificação LNEC E 461 [27], inclui essencialmente a análise petrográfica e diferentes tipos de ensaios de expansibilidade (argamassa e de betão), e complementarmente a correlação com o desempenho em obra.

Nesta comunicação são apresentados resultados obtidos da caracterização da reatividade aos álcalis de três agregados graníticos, e retiram-se ilações acerca da correlação entre os resultados dos diferentes métodos utilizados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Península Ibérica apresenta uma história geológica e tectónica rica responsável pela grande variedade de litologias aflorantes no território português. Entre os vários tipos de rochas explorados em Portugal para serem utilizados como agregados para betão encontram-se: granitos, calcários, rochas aluvionares e rochas vulcânicas, estas últimas, essencialmente, nos arquipélagos da Madeira e dos Açores.

2.1 Materiais

As rochas graníticas apresentadas neste artigo, foram recolhidas em pedreiras situadas na região Norte de Portugal que se encontram atualmente a ser exploradas e cujos materiais contribuíram e/ou contribuem para a construção de grandes obras em betão. De forma a proteger a identidade dos produtores, os agregados são referidos como A, B e C. Os três agregados são granitos porfiróides (com cristais bem desenvolvidos no seio de uma matriz mais fina), de grão médio a grosseiro no caso da amostra A, de grão médio na amostra B, e de grão grosseiro deformado na C.

2.2 Métodos

De forma a se poder prever sem ambiguidades o desempenho dos agregados graníticos no betão, procedeu-se à caracterização da reatividade aos álcalis por aplicação de diferentes métodos, envolvendo, nomeadamente, a análise petrográfica, ensaios de expansibilidade de argamassa (ASTM C 1260 [4]) e de betão (RILEM AAR-3 [3] e RILEM AAR-4.1 [7]) e o ensaio químico (ASTM C 289 [11]). Estes métodos são seguidamente descritos.

2.1.1 Análise petrográfica

Tendo em conta o facto de que as rochas estudadas apresentam características homogêneas dentro das áreas das pedreiras em exploração, produziram-se lâminas delgadas representativas que foram estudadas ao microscópio polarizante Nikon Eclipse E 400 POL. Com o objetivo de complementar o exame petrográfico com dados quantitativos, foi acoplado ao microscópio um contador de pontos automático PELCON. A contagem de pontos foi realizada ao longo de duas direções formando uma malha ortogonal e com incrementos regulares de modo a abranger completamente a lâmina delgada em estudo e permitindo a identificação do mineral que se encontrava no cruzamento dos fios do retículo. A análise petrográfica foi feita de acordo com a norma RILEM AAR-1 [28] e com a Especificação LNEC E 461 [27]. Ambas definem classes de reatividade semelhantes: Classe I – agregado não reativo (sílica reativa <2%); Classe II – agregado que não pode ser inequivocamente classificado de classe I ou III; Classe III – agregado potencialmente reativo. A avaliação da reatividade aos álcalis baseou-se na experiência nacional em agregados graníticos, nomeadamente nas evidências de deformação dos cristais de quartzo e na presença de quartzo microcristalino (<100 µm [29]). Foram também incluídas as formas de sílica potencialmente reativas contidas noutros minerais, nomeadamente o quartzo goticular e mirmequítico (quartzo microcristalino que ocorre no seio da plagioclase). A ocorrência de extinção ondulante não foi tida em consideração para a avaliação da reatividade potencial dos agregados, seguindo a literatura mais recente sobre esta temática.

2.1.2 Ensaio de expansibilidade

Os agregados foram preparados de acordo com o requerido pelas normas dos ensaios da barra de argamassa ASTM C 1260 (80°C) [4] e de prismas de betão RILEM AAR-3 (38°C) [3] e RILEM AAR-4.1 (60°C) [6]. Para o ensaio de argamassa utilizou-se um cimento CEM I 42.5 R, com 0,86% de teor de álcalis, expresso em sódio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \text{K}_2\text{O}$), uma razão agregado/ligante de 2,25 e uma razão água/ligante de 0,47. Para os ensaios de betão utilizou-se um cimento do mesmo tipo, embora com um teor em álcalis ligeiramente superior ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv}} = 0,89\%$), uma razão agregado/ligante de 4,0 e uma razão água/ligante de 0,45.

2.1.3 Ensaio químico

O ensaio químico para a determinação da potencial reatividade dos agregados foi realizado de acordo com a norma ASTM C 289 [11], tendo os agregados sido preparados de acordo com os requisitos da mesma.

3. RESULTADOS

No Quadro 1 sintetizam-se os resultados da contagem de pontos na análise petrográfica, com particular destaque para as formas de sílica consideradas neste tipo de agregados reativas aos álcalis.

Quadro 1. Resultados do método de contagem de pontos na análise petrográfica (valores em %).

Mineral	Agregado A	Agregado B	Agregado C
Plagioclase	36.0	30.5	26.1
Quartzo	28.8	25.1	12.5
Feldspato Potássico	20.4	26.8	26.3
Moscovite	9.5	3.8	9.7
Biotite + Clorite	3.8	10.2	3.1
Quartzo microcristalino e/ou goticular e/ou mirmequítico	1.0	2.4	21.7
Minerais acessórios	0.5	1.2	0.66
Total	100.0	100.0	100.0

O agregado A possui uma textura inequigranular (com minerais de diferentes tamanhos) com megacristais de feldspato potássico. Os principais minerais são a plagioclase (150 µm – 3,1 µm), o quartzo (20 µm – 1,5 µm), o feldspato potássico (60 µm – 15 mm; embora em amostra de mão este

mineral alcance os 20 mm), a moscovite e a biotite. De referir, ainda a presença dos seguintes minerais acessórios: zircão, apatite, andaluzite e minerais opacos. Como fases secundárias (minerais resultantes de alteração) identificou-se a clorite, o rútilo, os minerais de argila, a moscovite e o epídoto. Tendo em conta as características dos cristais de quartzo, a análise petrográfica revelou que o agregado A possui cristais com evidências de deformação materializadas pela presença de extinção ondulante ($\sim 18^\circ$) (Fig. 1A1). Também é possível detetar quartzo, de menor dimensão, sob a forma de mirmequites em plagioclases e com forma goticular no seio de feldspato potássico. O feldspato potássico apresenta-se, de uma forma geral, alterado em minerais de argila. A plagioclase é o mineral mais abundante, e possui, por vezes, zonamento composicional. A alteração dos seus cristais para moscovite microcristalina é bastante frequente, em especial, no núcleo das plagioclases zonadas. O quartzo, juntamente com a plagioclase e o feldspato potássico, apresentam, frequentemente, microfraturas preenchidas por óxidos (Fig. 1A2).

O agregado B apresenta uma mineralogia análoga à do agregado A. Os minerais principais compreendem plagioclase ($200\ \mu\text{m} - 3\ \text{mm}$), feldspato potássico ($900\ \mu\text{m} - 15\ \text{mm}$; em amostra de mão atinge os 50 mm), quartzo ($50\ \mu\text{m} - 2\ \text{mm}$), biotite e moscovite. A apatite, o zircão, a fibrolite, os minerais opacos e a fluorite representam os minerais acessórios. Já a clorite, o rútilo, os minerais de argila, a moscovite microcristalina e o epídoto constituem as fases secundárias deste agregado granítico. A análise do agregado B mostrou a existência de cristais anédricos de quartzo com extinção ondulante ($\sim 16^\circ$). É frequente a presença de quartzo goticular e, principalmente, de mirmequites (Fig. 1B1 e 1B2). O feldspato potássico encontra-se alterado para minerais de argila. Tal como no agregado A, a plagioclase é o mineral mais abundante, sendo possível, por vezes, observar zonamento composicional. Este mineral encontra-se, frequentemente, alterado para moscovite microcristalina e para epídoto. Tal alteração é, frequentemente, mais evidente no seio dos cristais zonados.

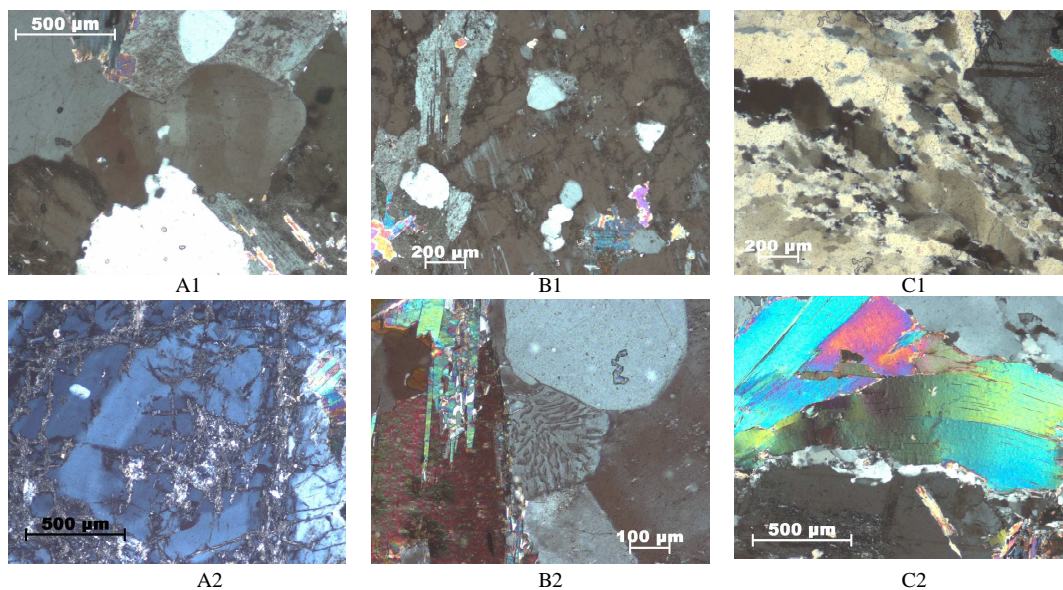


Figura 1. Agregado A: cristais de quartzo deformados (A1); presença de microfraturas num cristal zonado de plagioclase (A2); Agregado B: quartzo goticular (B1); mirmequites (B2); Agregado C: orientação preferencial de quartzo deformado e microcristalino (C1); cristais deformados de moscovite. Todas as imagens foram obtidas em luz polarizante com nicóis cruzados.

O agregado C, para além de uma textura inequigranular materializada pela presença de megacristais de feldspato potássico no seio de uma matriz mais fina, exibe orientação preferencial dos minerais. Entre os minerais principais encontra-se o feldspato potássico ($450\ \mu\text{m} - 22\ \text{mm}$; em amostra de mão atinge os 55 mm), a plagioclase ($200\ \mu\text{m} - 4\ \text{mm}$) o quartzo ($5\ \mu\text{m} - 1,1\ \text{mm}$), a moscovite e a biotite. Os minerais acessórios estão representados pela turmalina, apatite, zircão e minerais opacos. A clorite, o rútilo, os minerais de argila e a moscovite constituem as fases secundárias. O agregado C, para além de possuir grãos de quartzo com limites irregulares juntamente com uma maior evidência de extinção

ondulante ($\sim 20^\circ$) e de lamelas de deformação, exibe uma grande quantidade de quartzo alongado e microcristalino (Fig. 1C1). É frequente a presença de mirmequites. A alteração do feldspato potássico é mais evidente ao longo dos planos de clivagem. A plagioclase encontra-se extremamente alterada em moscovite microcristalina, sendo esta mais frequente no núcleo dos cristais que apresentam zonamento composicional. A deformação deste granito é, igualmente, evidente nos filossilicatos (Fig. 1C2), nas maclas das plagioclases e pela orientação preferencial do quartzo, moscovite e biotite.

Os três agregados apresentaram nos ensaios de barra de argamassa (norma ASTM C 1260 [4]) valores de expansão aos 14 dias abaixo do limite de reatividade de 0,10% (Fig. 2). Dado que este tipo de agregados são conhecidos por poderem apresentar uma reatividade lenta e retardada aos álcalis, decidiu-se prolongar por mais 14 dias os ensaios, tendo-se verificado, porém, uma estabilização da expansão aos 0,03% para todos os agregados.

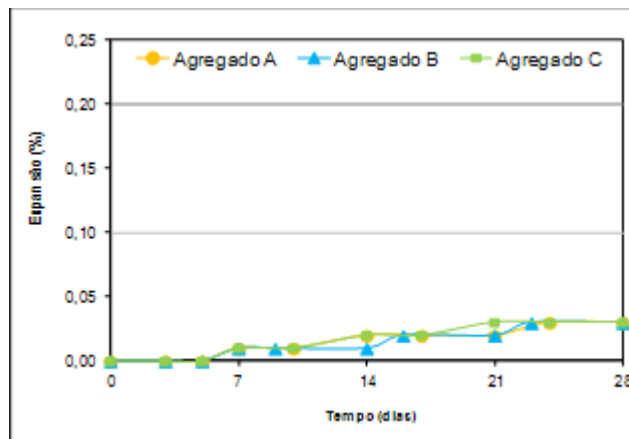


Figura 2. Comportamento dos agregados A, B e C no ensaio acelerado da barra de argamassa ASTM C 1260 [4].

Nos ensaios de prisma de betão a 38°C (RILEM AAR-3 [3]), expansões abaixo de 0,050%, após 1 ano, classificam o agregado de não reativo [9]. Para os agregados A e B foram obtidos valores de expansão a 1 ano que rondam os 0,020%, enquanto para o agregado C foi obtido o valor de 0,466% (Fig. 3). Tendo em conta as formas das curvas de expansão, tanto o agregado A como o agregado B mostram valores de expansão bastante constantes e sem incrementos significativos durante todo o período de ensaio. Já o agregado C, apesar de inicialmente mostrar um comportamento semelhante ao dos anteriores, mostra a partir dos 168 dias um incremento substancial da expansão, que continuou a aumentar a uma taxa constante até 1 ano de ensaio.

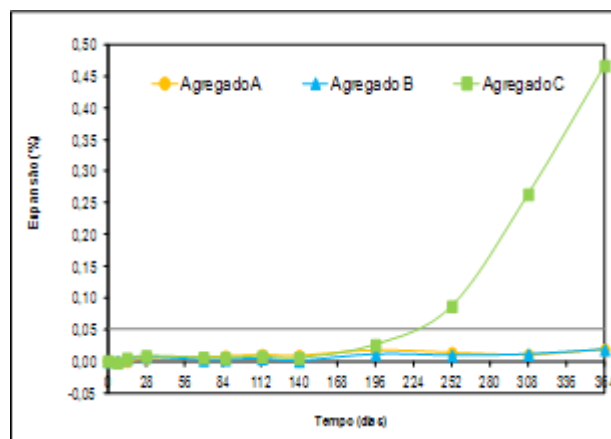


Figura 3. Comportamento dos agregados A, B e C no ensaio do prisma de betão RILEM AAR-3 [3].

Nos ensaios de prisma de betão a 60°C (RILEM AAR-4.1 [7]), a Especificação LNEC E 461 considera o limite de 0,020% [27]. Porém, para este ensaio os limites de reatividade não têm sido consensuais, tendo Lindgård et al. [9] proposto, com base nos resultados dum projeto internacional, o limite de

0,030% às 20 semanas. Os resultados obtidos para os agregados A, B e C dão expansões às 20 semanas de 0,035%, 0,027% e de 0,070%, respetivamente (Fig. 4). Os comportamentos das curvas dos agregados A e B mostraram-se muito semelhantes durante as 20 semanas de ensaio, tendo a expansão ocorrido de forma crescente e uniforme a partir das 10 semanas. Verifica-se que para o agregado A o valor limite de 0,030% é ligeiramente ultrapassado, enquanto para o agregado B este valor é quase atingido. No caso do agregado C, a partir da semana 6, o limite de 0,030% é ultrapassado e a expansão aumenta continuamente até à conclusão do ensaio.

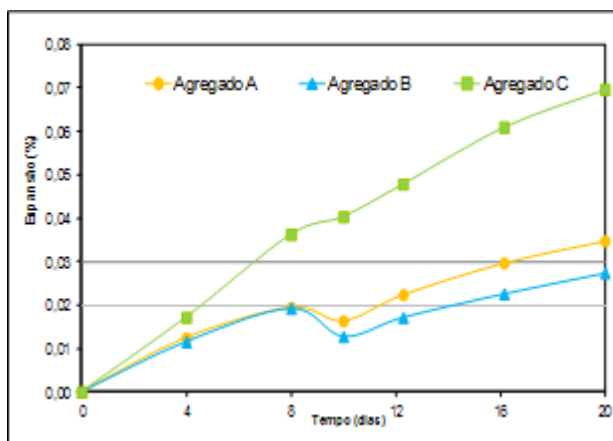


Figura 4. Comportamento dos agregados A, B e C no ensaio do prisma de betão RILEM AAR-4.1 [7].

Na Fig. 5 estão projetados os valores de redução da alcalinidade e de sílica dissolvida determinados no ensaio químico ASTM C 289 [11]. Os valores de redução de alcalinidade variam entre 514 e 525 mmol/l e os valores de sílica dissolvida variam entre 88,6 e 94,8 mmol/l. De acordo com os critérios deste ensaio, todos os agregados são classificados como inócuos.

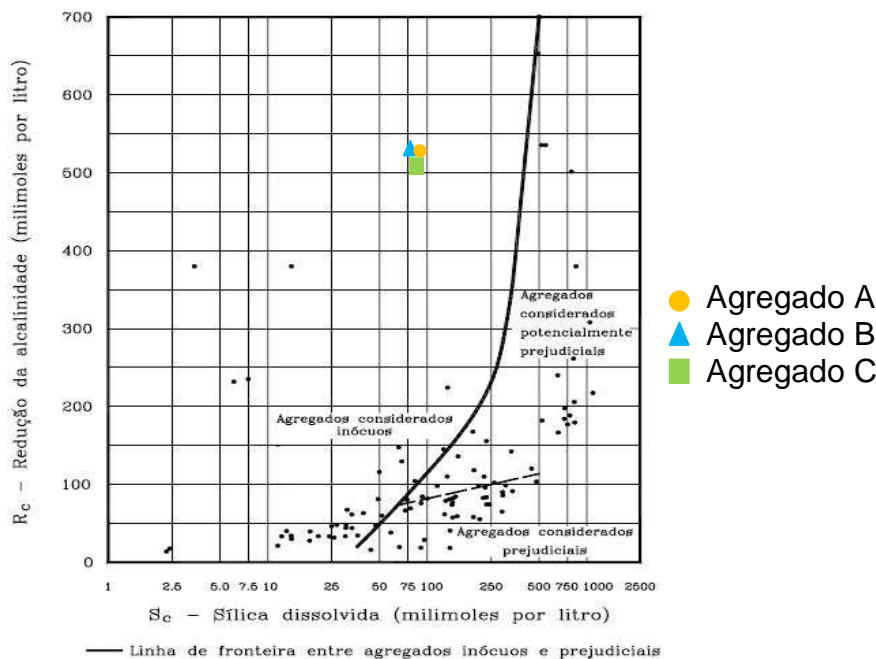


Figura 4. Projeção dos resultados do ensaio químico ASTM C 289 [11] para os agregados A, B e C.

4. DISCUSSÃO

De acordo, estritamente, com a percentagem de constituintes de sílica reativos, apenas o agregado A (1,0%) poderá se classificado pela análise petrográfica como inócuo aos álcalis (classe I). Por sua vez,

o agregado B (2,4%) e, em particular, o agregado C (21,7%) apresentam teores de sílica potencialmente reativa superiores a 2,0%. De acordo com estes teores, o agregado C pode ser classificado de classe III, enquanto o agregado B será classe II. A existência de reatividade potencial do agregado C era esperada, uma vez que vários autores [ex. 30-32] mencionam a presença de quartzo microcristalino, com bordos irregulares, e de micas e feldspatos deformados como responsáveis pela existência de reações álcalis-sílica. O valor de 2,4% obtido no agregado B para os componentes reativos é bastante próximo do valor limite de 2,0%. Deverá ter-se em conta que o rigor e a precisão do método de contagem de pontos dependem, entre outros parâmetros, do número de pontos contados e da proporção dos constituintes de interesse presentes na amostra [28].

Como esperado, os resultados do ensaio ASTM C 1260 [4] classificaram os três agregados como não reativos aos álcalis. De facto, e apesar do ensaio acelerado da barra de argamassa ser universalmente utilizado na avaliação de agregados para betão, não é consensual que os limites do mesmo traduzam a reatividade de alguns agregados de reação lenta, classificando-os erradamente como não reativos ou de reatividade duvidosa [5]. Este método, aliás, não se tem mostrado adequado para a caracterização da reatividade aos álcalis de agregados graníticos portugueses [26] e como tal foi considerado inapropriado para essa avaliação na Especificação LNEC E461 [27]. Segundo Lu et al. [33] para este facto poderá contribuir o processo de moagem dos agregados que destrói a microestrutura original, provocando uma subestimação da reatividade aos álcalis. De facto, a influência do tamanho das partículas de agregados testados em laboratório, nomeadamente em ensaios de barra de argamassa, tem sido bastante discutida e vários resultados têm sido publicados [ex. 33, 34].

No ensaio RILEM AAR-3 (38°C) [3], os agregados A e B foram classificados como não reativos. Já o agregado C foi classificado como sendo potencialmente reativo, apresentando um valor final de expansão elevado (0,47%). Segundo vários autores [5,8,9] o ensaio RILEM AAR-3 [3] não permite classificar corretamente a reatividade de agregados reativos de reação lenta, na medida em que não é capaz de detetar agregados de origem gnáissica que contêm quartzo microcristalino como componente reativo. Para além deste facto, foi, igualmente, apontado como sendo inconclusivo ao fim de 1 ano de ensaio e um período mais longo poderá ser requerido para que alguns agregados reativos de reação retardada produzam expansões acima do limite crítico [5,8]. Tal suposição foi retirada da contínua expansão das curvas no final deste ensaio. Não obstante, no presente estudo, este fenómeno apenas ocorre para o agregado C, mas não existe dúvida de que este seja potencialmente reativo. Também, as curvas de expansão dos agregados A e B não deixam margem para incertezas em relação aos seus comportamentos como não reativos.

O desempenho dos prismas de betão ao longo das 20 semanas no ensaio RILEM AAR-4.1 (60°C) [7] classificou os agregados A e C como potencialmente reativos e o agregado B como não reativo. No entanto, os valores às 20 semanas de 0,035% e de 0,027% obtidos para os agregados A e B, respetivamente, incluem-se na banda de incerteza ($\pm 0,010\%$) do valor limite do ensaio (0,030%). A reatividade potencial do agregado A neste ensaio poderá justificar-se pelo facto deste agregado possuir um elevado número de microfaturas, que são o principal mecanismo de formação e de armazenamento de gel em detrimento dos limites de subgrãos [35].

Deve ter-se em especial atenção a “taxa de expansão” medida nos ensaios RILEM AAR-3 [3] e RILEM AAR-4.1 [7], e que é bastante distinta ao longo dos respetivos períodos de ensaio. A expansão foi ligeiramente superior para condições de exposição a 60°C do que a 38°C para os agregados A e B, e bastante mais baixa para o caso do agregado C nas mesmas condições. Este comportamento sugere a necessidade do prolongamento da duração dos ensaios, pelo menos até que seja atingida a estabilização da expansão.

O ensaio químico ASTM C 289 [11] mostrou-se incapaz de classificar o agregado C como potencialmente reativo. Tal resultado vem de encontro a investigações anteriores realizadas em Portugal e que demonstram a ineficiência deste ensaio na avaliação de agregados graníticos [6, 14, 15].

CONCLUSÕES

Os ensaios de avaliação da reatividade aos álcalis de três agregados graníticos permitiram retirar as seguintes conclusões:

- O ensaio químico ASTM C 289 não é adequado à avaliação de agregados graníticos portugueses.
- O ensaio ASTM C 1260 mostra uma fraca correlação com a análise petrográfica e o comportamento no betão de agregados de rochas graníticas portuguesas, e como tal, não deverá ser utilizado na avaliação da reatividade potencial deste tipo de agregados. Este desempenho pode estar associado ao processo de moagem, que altera a microestrutura da rocha.
- Para a caracterização laboratorial aos álcalis de agregados graníticos deverão ser privilegiados os ensaios de prismas de betão, já que são aqueles que melhor reproduzem as condições de obra.
- Constatou-se que os ensaios dos prismas de betão RILEM AAR-3 (38°C) e RILEM AAR-4.1 (60°C) refletem em geral a reatividade expectável determinada pela análise petrográfica.
- Para agregados graníticos é proposta a necessidade do prolongamento da duração dos ensaios de expansibilidade de betão, pelo menos até que seja atingida a estabilização da expansão.
- Em termos da avaliação da reatividade dos três agregados estudados, o agregado C é aquele que de acordo com a análise petrográfica e os ensaios de prismas de betão deve ser classificado de potencialmente reativo aos álcalis. Já para os agregados A e B, deveriam ser realizados mais ensaios de modo a confirmar a validade dos resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento do Projeto IMPROVE (Ref: PTDC/ECM/115486/2009). A autora V. Ramos agradece à FCT pelo financiamento da sua bolsa de doutoramento (Ref: SFRH/BD/47893/2008). Os autores agradecem ainda o apoio no âmbito do projecto DURATINET (Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Área Network) do Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013, co-financiado pelo FEDER.

REFERÊNCIAS

- [1] Batic, O.R.; Sota, J.D. (2004). Identification of alkali-silica reative granite aggregates. *Proc. of 12th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, pp. 243-250.
- [2] ASTM C 1293 (2004). Standard test method for determination of length change due to alkali-silica reaction. The American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [3] RILEM AAR-3 (2000). Detection of potential alkali-reactivity of aggregates: B – method for aggregate combinations using concrete prisms. *Materials & Structures*, Vol. 33, N. 229, pp. 290-293.
- [4] ASTM C 1260 (2007). Standard test method for potential alkali-aggregates (Mortar Bar Method). The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 4 p.
- [5] Shayan, A. (2007). Field evidence for inability of ASTM C 1260 limits to detect slowly reative Australian aggregates. *Australian Civil Engineering Journal*, Vol. 3, N. 1, pp. 13-26.

- [6] Santos Silva, A. (2006). Degradação do betão por reações álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção. Tese de Doutoramento, LNEC/Universidade do Minho, 2005, 340 p.
- [7] RILEM AAR-4.1 (2006). Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – 60°C accelerated method for aggregate combinations using concrete prisms. Committee Document RILEM/TC/ACS/11/06.
- [8] Shayan, A.; Xu, A.; Morris, H. (2008). Comparative study of the concrete prism test (CPT 60°C, 100% RH) and other accelerated tests. *Proc. of 13th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 10 p.
- [9] Lindgård, J.; Nixon, P.J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B.J.; Haugen, M.; Åkesson, U. (2010). The EU PARTNER Project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 117-128.
- [10] Nixon, P.J.; Lane, S. (2006). PARTNER Report 3.3, Experience from testing of the alkali reactivity of European aggregates according to several concrete prism test methods. SINTEF Report SBF52 A06021, 35 p. ISBN 82-14-04081-7/978-82-14-04081-7.
- [11] ASTM C 289 (2007). Standard Test Method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method). The American Society for Testing Materials, Philadelphia, 7 p.
- [12] Wigum, B.J.; French, W.J.; Howarth, R.J., Hills, C. (1997). Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 451-476.
- [13] Rolim, P., Gleize, P., Hasparyk, N., Monteiro, P. (2012). Chemical method and variations in the test for siliceous rocks. *Proc. of 14th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 10 p.
- [14] Santos Silva, A.; Gonçalves, A. (2006). Appendix A – Portugal. In: Wigum, B.J.; Pedersen, L.T.; Grelk, B.; Lindgård, J., PARTNER Report 2.1, State-of-the-art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction,. SINTEF Report SBF52 A06018, pp. 59-63 ISBN 82-14-04078-7/978-82-14-04078-7.
- [15] Castro, N.; Fernandes, I.; Santos Silva, A. (2009). Alkali reactivity of granitic rocks in Portugal: a case study. *Proc. of 12th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, pp. 62-72.
- [16] Silva, H.S. (1992). Estudo do envelhecimento de barragens de betão e de alvenaria. Alteração física e química dos materiais, Relatório de Tese, LNEC, p. 385.
- [17] Braga Reis, M.O.; Silva, H.S.; Santos Silva, A. (1996) Alkali-Aggregate Reactions in Portuguese Structures. Some Case Histories, Proceedings of 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, pp. 93-100.
- [18] Santos Silva, A.; Braga Reis, M.O. (2000). Metodologia de diagnóstico da ocorrência de reações expansivas de origem interna em estruturas de betão. Atas do Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Lisboa, pp. 335-344.
- [19] Catarino, J.M.; Santos Silva, A. (2001). A recent large bridge affected by AAR and internal sulphate attack. Seminário Degradação de Estruturas por Reações Expansivas de Origem Interna, LNEC, Lisboa, 7 p.
- [20] Santos Silva, A., Gonçalves, A.F., Pipa, M. (2008). Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 1240-1249.
- [21] Fernandes, I.; Santos Silva, A.; Piteira Gomes, J.; Tavares de Castro, A.; Noronha, F. (2008). Characterization of AAR in Fagilde dam. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 80-81.

- [22] Braga Reis, M.O.; Silva, H.S.; Santos Silva, A. (1996). Ocorrência de reações álcalis-inerte em Portugal. Estudos de Casos, Atas do Encontro Nacional Betão Estrutural 1996, LNEC, Lisboa, pp. 2.37-2.48.
- [23] Santos Silva, A.; Braga Reis, M.O. (2000), Metodologia de diagnóstico da ocorrência de reações expansivas de origem interna em estruturas de betão. Atas do REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Lisboa, pp. 335-343.
- [24] Fernandes, I.; Noronha, F.; Teles, M. (2004). Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in a 50-year-old concrete. *Materials & Characterization*, Vol. 53, pp. 295-306.
- [25] Fernandes, I.; Noronha, F.; Teles, M. (2007). Examination of the concrete from an old Portuguese dam. Texture and composition of alkali-silica gel. *Materials & Characterization*, Vol. 58, 12 p.
- [26] Santos Silva, A.; Fernandes, I.; Castro, N. (2008). A problemática da avaliação da reatividade aos álcalis de agregados graníticos para betão. Encontro Nacional de Betão Estrutural.
- [27] Especificação LNEC E 461 (2007). Betões. Metodologias para prevenir reações expansivas internas. Laboratório nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 6 p.
- [28] RILEM AAR-1 (2003). Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – petrographic method. TC 191-ARP, Alkali-reactivity and prevention – assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, prepared by Sims, I. and Nixon, P.J. *Materials and Construction*, Vol. 36, pp. 472-479.
- [29] Grattan-Bellew, P.E. (1992). Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali sílica reaction. *Proc. of 9th Int. Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, pp. 383-394.
- [30] Kerrick, D.; Hooton, R. (1992). ASR of concrete aggregate quarried from a fault zone: results and petrographic interpretation of accelerated mortar bar tests. *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, pp. 949-960.
- [31] Shayan, A. (1993). Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study. *Cement and Concrete Research*, Vol. 23: pp. 1229-1236.
- [32] Wenk, H.R.; Monteiro, P.; Shomglin, K. (2008). Relationship between aggregate microstructure and mortar expansion. A case study of deformed granitic rocks from Santa Rosa mylonite zone. *Journal of Materials and Science*, Vol. 43, pp. 1278-1285.
- [33] Lu, D.; Fournier, B.; Grattan-Bellew, P. (2006). Effect of aggregate particles size on determining alkali-silica reactivity by accelerated tests. *Journal of ASTM International*, Vol. 3, 11 p.
- [34] Multon, S.; Cyr, M.; Sellier, A.; Diederich, P.; Petit, L. (2010). Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 508-516.
- [35] Velasco-Torres, A.; Aejos, P.; Soriano, J. (2010). Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction. *Estudios Geológicos*, Vol. 116, pp. 117-128.