



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

LIBERTAÇÃO DE ÁLCALIS DE AGREGADOS EM MEIO ALCALINO. CONTRIBUIÇÃO PARA A PREVENÇÃO DA RAA NO BETÃO

Dora Soares¹, António Santos Silva², José Mirão³, Isabel Fernandes⁴

¹Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, dsoares@lnec.pt, ²Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ssilva@lnec.pt, ³Laboratório Hercules e Departamento de Geociências, Universidade de Évora, jmirao@uevora.pt, ⁴Departamento de Geologia, Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa e Instituto de Ciências da Terra (ICT), mifernandes@fc.ul.pt

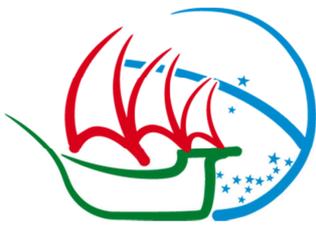
RESUMO

A degradação de estruturas de betão por reações álcalis-agregado (RAA) tem-se manifestado de forma crescente em todo o mundo, particularmente em pontes e barragens. Os estudos efetuados sobre as causas dessa degradação têm evidenciado que alguns agregados empregues no fabrico do betão têm um desempenho em obra diferente daquele que foi obtido em laboratório. A avaliação laboratorial é geralmente efetuada com recurso à análise petrográfica, e/ou por ensaios de expansão em argamassa ou betão, efetuados em condições aceleradoras da RAA, verificando-se que existem dificuldades no estabelecimento de limites críticos para a definição da reatividade aos álcalis de alguns tipos de agregados.

Em Portugal a situação mais problemática tem envolvido agregados de origem granítica, os quais foram classificados como não reativos, ainda que nos ensaios de expansão tenham evidenciado uma expansão lenta e retardada. Esta reatividade lenta poderá estar relacionada com o aumento da alcalinidade da solução dos poros do betão, devido à libertação de álcalis (sódio e potássio) de alguns minerais alcalinos presentes nesse tipo de agregados, tais como feldspatos e micas.

Neste sentido, o foco deste trabalho é apresentar os resultados duma vasta campanha laboratorial que visa determinar a capacidade que os agregados graníticos terão para libertar álcalis, e quais as condições mais propícias para essa libertação. Os parâmetros estudados incluíram a avaliação do efeito da granulometria do agregado e o tipo e concentração de solução alcalina extrativa. Os resultados obtidos demonstram que os agregados graníticos podem libertar quantidades significativas de álcalis ao longo do tempo, devendo este parâmetro ser tido em conta em futuras recomendações para a prevenção da RAA no betão.

Palavras-chave: Betão / RAA / Álcalis / Prevenção / Recomendações



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

1. INTRODUÇÃO

De acordo com vários autores (Grattan-Bellew e Beaudoin, 1980; Goguel, 1995; Bérubé *et al.*, 2000; Constantiner e Diamond, 2003; Lagerblad, 2012), alguns agregados ou fases minerais presentes nas partículas de agregado podem, com o tempo, libertar quantidades significativas de álcalis para a solução dos poros do betão, podendo resultar num agravamento do risco de ocorrência da reação álcalis-agregado (RAA). Estes minerais alcalinos, como por exemplo, os feldspatos e as micas, são minerais muito comuns em diversos tipos de rochas abundantes em Portugal, tais como granitos, gnaisses, grauvaques, etc. (Soares *et al.*, 2015; 2016), o que pode justificar o facto de diversas estruturas de betão afetadas por RAA evidenciarem sinais de degradação várias décadas após a sua construção, podendo o processo expansivo progredir ao longo do tempo, sem sinais de abrandamento. Segundo Bérubé *et al.* (1996), alguns agregados de origem ígnea podem fornecer mais de $3 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_e$, que é o teor limite normalmente considerado nas recomendações internacionais para prevenção da RAA, e que pode explicar o atraso na ocorrência da reação em algumas barragens do Canadá.

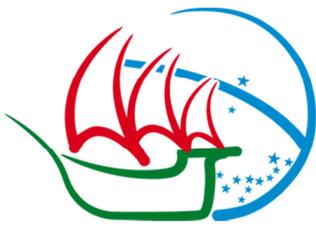
Esta problemática constitui um importante desenvolvimento na prevenção da RAA, mas atualmente não há ainda consenso sobre como avaliar os álcalis potencialmente libertados pelos agregados. Para dar resposta a essa limitação, o grupo de trabalho 3 (*Performance testing – Assessment of detailed alkali household in concrete, including internal aggregate release, recycling and external supply*) do comité técnico da RILEM TC 258-AAA (*Avoiding alkali aggregate reactions in concrete - Performance based concept*) lançou uma campanha internacional com o objetivo de estabelecer um método de referência para determinar a quantidade de álcalis que pode ser libertada para o betão por um determinado agregado.

Este artigo insere-se nessa campanha, e apresenta os resultados da avaliação efetuada ao longo de 2 anos dos álcalis libertados por diferentes agregados graníticos portugueses, abordando a influência da granulometria e mineralogia do agregado, assim como do tipo de solução de extração empregue.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Seleção dos agregados e preparação das amostras

Para este trabalho foram selecionados sete agregados graníticos, apresentando variações percentuais na composição mineralógica, e incluem dois granitos usados na construção de uma ponte e uma barragem, atualmente afetadas por RAA; um terceiro recentemente



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

utilizado na construção de uma nova barragem; e os restantes foram amplamente utilizados em diversas construções na zona norte de Portugal. Para manter a confidencialidade das pedreiras de origem, os agregados foram codificados como GR1, GR2, GR3, GR17, GR18, GR20 e GR26.

Os agregados foram previamente caracterizados química e petrograficamente. A análise química foi realizada sobre uma amostra representativa de agregado, britada e moída de forma a passar o peneiro de malha 106 μm . Para a análise petrográfica, foram selecionadas amostras de mão dos diferentes agregados graníticos e produzidas lâminas delgadas com uma espessura de 30 μm .

Para avaliação da libertação de álcalis pelos agregados, as amostras de granito foram britadas e peneiradas em diferentes granulometrias, semelhantes a algumas frações granulométricas utilizadas no fabrico de betões e argamassas: 0-2 mm (designada "F1"), 4,75-9,5 mm (designada "F3"), 12,5-20 mm (designada "F5") e <4,75 mm (designada "M"). Esta última composição "M", semelhante à que é empregue nos ensaios de expansão de barra de argamassa, foi obtida a partir da mistura de seis frações granulométricas de acordo com a seguinte composição: <0,15 mm – 10 %; 0,15-0,30 mm – 15 %; 0,30-0,60 mm – 25 %; 0,60-1,18 mm – 20 %; 1,18-2,36 mm – 20 %; 2,36-4,75 mm – 10 %.

2.2. Composição química

As análises químicas para determinação dos principais óxidos constituintes dos agregados foram realizadas pelo método de fusão $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ e analisadas por ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*).

2.3. Caracterização petrográfica

A caracterização petrográfica foi realizada através da observação de lâminas delgadas ao microscópio de polarização, acoplado a um contador de pontos automático. Este método permite quantificar o volume relativo de componentes potencialmente reativos aos álcalis, bem como o teor de minerais que podem fornecer álcalis ao sistema (por ex., plagioclase, feldspato-K, biotite e moscovite). Pode também fornecer informação qualitativa, como o grau de alteração dos feldspatos.

A avaliação da reatividade aos álcalis foi baseada na experiência local com agregados graníticos, nomeadamente sobre as dimensões dos cristais de quartzo (<100 μm = quartzo microcristalino) e de acordo com as classes estabelecidas nas especificações RILEM AAR-1.1 (2016) e LNEC E 461 (2007). O quartzo mirmequítico foi incluído no grupo do



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

quartzo microcristalino e considerado como uma forma de sílica potencialmente reativa (Ramos, 2013).

2.4. Libertação de álcalis pelos agregados

O método utilizado para avaliar o teor de álcalis libertado pelos agregados visa a extração dos iões Na^+ e K^+ em soluções alcalinas com composição semelhante à solução intersticial dos poros do betão (RILEM AAR-0, 2016). Para tal, uma determinada quantidade de amostra representativa de cada agregado é imersa num volume específico de uma solução alcalina (Tabela 1), na proporção agregado/solução de 1:4.

Tabela 1 – Condições de ensaio utilizadas para avaliação da libertação de álcalis pelos agregados (Soares, 2014; Soares *et al.*, 2015; 2016)

Solução extrativa alcalina	Granulometria	Fração "F1" (0–2 mm)	Fração "F3" (4,75–9,5 mm)	Fração "F5" (12,5–20 mm)	Fração "M" (0–4,75 mm)
(1) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturado (2 g/L); pH = 13,5		GR1	GR1	GR1	-
		GR2	GR2	GR2	-
		GR3	GR3	GR3	-
		-	GR17	-	-
		-	GR18	-	-
		-	GR20	-	-
(2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sat. (0,5 g/L) + NaOH 1M; pH = 13,6		GR1	GR1	GR1	-
		GR2	GR2	GR2	-
		GR3	GR3	GR3	-
		-	GR17	-	GR17
		-	GR18	-	GR18
		-	GR20	-	GR26
(3) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sat. (0,5 g/L) + KOH 1M; pH = 14,3		GR1	GR1	GR1	-
		GR2	GR2	GR2	-
		GR3	GR3	GR3	-
		-	GR17	-	GR17
		-	GR18	-	GR18
		-	GR20	-	GR26
(4) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sat. (0,3 g/L) + NaOH 0,7M; pH = 13,4	-	-	-	GR26	
(5) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sat. (0,3 g/L) + KOH 0,7M; pH = 13,7	-	-	-	GR26	
(6) NaOH 0,7M; pH = 13,1	-	-	-	GR26	
(7) KOH 0,7M; pH = 13,6	-	-	-	GR26	

As amostras de agregado e respetivas soluções foram colocados em frascos de polietileno hermeticamente fechados, e condicionados numa câmara a 38° C e HR > 95 %, condições do ensaio de betão RILEM AAR-3 (RILEM AAR-3.1, 2016). Periodicamente, os recipientes foram agitados durante aproximadamente 10 segundos, e em intervalos de tempo predefinidos (ex.: 7, 14, 28 dias... 3, 6, 9 e 12 meses) foi retirada uma amostra da solução



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

de teste (25 mL), sendo este volume repostado com uma solução da mesma concentração (solução branco), a fim de manter a relação de 1:4 entre agregado e solução. Após um ano, não tendo sido atingido um patamar, foram levados a cabo medições subsequentes (ex.: 15 e 24 meses).

Foram ensaiadas diferentes soluções alcalinas: solução saturada de Ca(OH)_2 (medição dos teores de Na^+ e K^+ libertados), NaOH (teor de K^+ libertado) e KOH (teor de Na^+ libertado) em duas concentrações diferentes (1M e 0,7 M), com e sem adição de Ca(OH)_2 saturado. Na Tabela 1 apresentam-se as diferentes soluções extrativas e os agregados utilizados e, para cada um, as granulometrias usadas. Após filtração e acidificação das soluções extraídas, a determinação dos teores de álcalis libertados (Na^+ e K^+) das soluções foi efetuada por Espectroscopia de Absorção Atómica (EAA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição química

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os principais óxidos constituintes dos granitos. É possível verificar que todos os granitos têm um teor de SiO_2 superior a 65 %, e teor de Al_2O_3 semelhante, próximo de 14 %. Relativamente aos álcalis, verifica-se que o teor de Na_2O (entre 2,57 % e 3,47 %) é, em todos os granitos, inferior ao teor de K_2O (entre 4,43 % e 5,56 %). Adicionalmente, calculou-se ainda a % de Na_2O_e através da equação:

$$\text{Na}_2\text{O}_e (\%) = \text{Na}_2\text{O} (\%) + 0,658 \times \text{K}_2\text{O} (\%)$$

**Tabela 2 – Composição química dos agregados (% massa) (Soares, 2014;
Soares et al., 2015; 2016)**

Elementos maiores (%)	GR1	GR2	GR3	GR17	GR18	GR20	GR26
SiO_2	67,05	72,76	71,17	70,92	70,12	71,19	71,70
Al_2O_3	14,87	14,13	14,37	14,10	14,98	14,35	14,72
Fe_2O_3	3,74	1,58	1,81	2,92	2,61	2,20	2,40
MnO	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
MgO	1,18	0,48	0,56	0,51	0,69	0,77	0,56
CaO	1,90	0,57	0,90	1,04	0,89	0,56	0,76
Na_2O	2,71	2,81	2,88	2,57	3,05	2,65	3,47
K_2O	5,09	4,43	4,80	5,56	4,50	4,56	4,84
TiO_2	0,74	0,21	0,25	0,77	0,31	0,23	0,29
P_2O_5	0,36	0,33	0,29	0,64	0,24	0,38	0,32
PF	0,88	1,63	1,57	1,20	2,29	1,85	0,80
Na_2O_e calculado	6,06	5,72	6,04	6,23	6,01	5,65	6,65



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

3.2. Caracterização petrográfica

Nas Tabelas 3 e 4 apresenta-se a informação obtida na caracterização petrográfica dos agregados, nomeadamente, identificação de formas de sílica potencialmente reativa (Tabela 3), bem como os minerais que podem contribuir com álcalis para o sistema (Tabela 4).

Tabela 3 – Composição petrográfica dos agregados (Soares, 2014; Soares et al., 2015; 2016)

Composição petrográfica	Formas de sílica reativa (< 100 µm) [‡]	Ângulo de extinção ondulante (°) dos cristais de quartzo
GR1	2,4 % - Classe II Quartzo globular e micrográfico; mirmequites	16,0° Moderada
GR2	21,7 % - Classe II Quartzo tectonizado, globular e micrográfico; mirmequites	20,0° Moderada
GR3	1,0 % - Classe I Quartzo globular e micrográfico; mirmequites	18,0° Moderada
GR17	1,5 % - Classe I Quartzo globular e micrográfico; mirmequites	15,0° Moderada
GR18	4,8 % - Classe II Quartzo tectonizado, globular e micrográfico; mirmequites	23,0° Moderada
GR20	1,2 % - Classe I Quartzo globular e micrográfico; mirmequites	19,0° Moderada
GR26	2,0 % - Classe II Quartzo globular e micrográfico	11,0° Frac

Nota: [‡] Classe de reatividade: Classe I – Sílica potencialmente reativa < 2 %; Classe II - Sílica potencialmente reativa > 2 % (LNEC E 461, 2007); Extinção ondulante: Fraca – [0° - 14°]; Moderada – [15° - 24°]; Forte – [25° - 35°].

Tabela 4 – Composição mineralógica modal dos agregados, obtida por contagem de pontos (% volume) (Soares, 2014; Soares et al., 2015; 2016)

Minerais	GR1	GR2	GR3	GR17	GR18	GR20	GR26
Quartzo	25,1	12,5	28,8	28,4	29,9	30,0	28,2
Quartzo microcristalino	2,4	21,7	1,0	1,5	4,8	1,2	2,0
Plagioclase	30,5	26,1	36,0	19,0	23,6	17,2	30,1
Feldspato-K	26,8	26,3	20,4	25,0	18,3	27,2	28,8
Moscovite	3,8	9,7	9,5	17,4	14,9	17,2	3,5
Biotite + clorite	10,2	3,1	3,8	6,6	7,6	5,2	6,8
Outros	1,2	0,6	0,5	2,1	0,9	1,3	0,6
Total	100	100	100	100	100	100	100

A petrografia permitiu classificar os agregados GR1, GR2, GR18 e GR26 como potencialmente reativos aos álcalis (Classe II), enquanto os GR3, GR17 e GR20 são não reativos (Classe I) (RILEM AAR-1.1, 2016; LNEC E 461, 2007).

No que diz respeito aos minerais constituintes, é possível verificar que o GR1, GR3 e GR26 têm um elevado teor de plagioclase (mineral fornecedor de Na), enquanto o GR1, GR2, GR20 e GR26 apresentam um elevado teor de feldspato-K (mineral fornecedor de K).



Outros minerais que podem contribuir com K (e eventualmente algum Na) são as micas, que se apresentam em maior quantidade nos agregados GR17 e GR20 (moscovite) e GR1 (biotite). No entanto, estes minerais são menos suscetíveis à alteração do que os feldspatos.

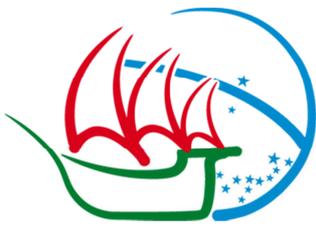
3.3. Libertação de álcalis dos agregados

Na Tabela 5 resumem-se os resultados obtidos de libertação de álcalis pelos agregados. Estes resultados confirmam investigações prévias, citadas anteriormente, sobre a capacidade de libertação de álcalis por agregados quando em contacto com um meio alcalino.

Tabela 5 – Álcalis libertados pelos agregados após 24 meses de imersão nas soluções de teste

Agregado		Álcalis libertados									
		Solução saturada de Ca(OH)_2					Soluções alcalinas de NaOH ou KOH 1M + Ca(OH)_2 sat.				
		Na_2O (%)	K_2O (%)	Na_2O_e (%)	(% total) ^b	(kg/m^3) ^c	Na_2O^a (%)	K_2O^a (%)	Na_2O_e (%)	(% total) ^b	(kg/m^3) ^c
GR1	0-2 mm	0,022	0,008	0,028	0,46	0,52	0,280	0,039	0,306	5,04	5,64
	4,75-9,5 mm	0,006	0,002	0,007	0,12	0,13	0,164	0,029	0,183	3,03	3,39
	12,5-20 mm	0,005	0,001	0,006	0,09	0,11	0,123	0,018	0,135	2,22	2,49
GR2	0-2 mm	0,028	0,005	0,031	0,54	0,53	0,243	0,047	0,274	4,80	5,08
	4,75-9,5 mm	0,006	0,002	0,007	0,14	0,18	0,177	0,038	0,202	3,53	3,74
	12,5-20 mm	0,006	0,002	0,007	0,12	0,12	0,161	0,030	0,181	3,15	3,34
GR3	0-2 mm	0,022	0,010	0,028	0,47	0,53	0,258	0,039	0,284	4,70	5,25
	4,75-9,5 mm	0,008	0,002	0,009	0,16	0,18	0,172	0,036	0,196	3,24	3,62
	12,5-20 mm	0,006	0,002	0,008	0,13	0,14	0,145	0,026	0,162	2,69	3,01
GR17	4,75-9,5 mm	>0,008	>0,004	>0,010	>0,16	>0,19	0,093	0,031	0,113	1,82	2,10
	0-4,75 mm	-	-	-	-	-	0,056	0,042	0,084	1,34	1,54
GR18	4,75-9,5 mm	>0,006	>0,003	>0,008	>0,13	>0,15	0,052	0,030	0,072	1,19	1,32
	0-4,75 mm	-	-	-	-	-	>0,153	0,026	>0,170	>2,83	>3,15
GR20	4,75-9,5 mm	>0,007	>0,004	>0,010	>0,18	>0,19	0,058	0,041	0,084	1,49	1,56
GR26	4,75-9,5 mm	>0,008	>0,003	>0,010	>0,15	>0,19	0,050	0,032	0,071	1,49	1,32
	0-4,75 mm	-	-	-	-	-	>0,059	0,038	>0,084	>1,27	>1,56
GR26	0-4,75 mm	-	-	-	-	-	Soluções alcalinas de NaOH ou KOH 0,7M + Ca(OH)_2 sat,				
							>0,115	0,025	>0,132	>1,98	>2,44
GR26	0-4,75 mm	-	-	-	-	-	Soluções alcalinas de NaOH ou KOH 0,7M				
							>0,090	0,023	>0,105	>1,58	>1,95
média	F1	0,024	0,008	0,029	0,49	0,54	0,260	0,042	0,288	4,85	5,32
	F3	0,007	0,003	0,009	0,14	0,16	0,118	0,033	0,139	2,31	2,58
	F5	0,006	0,002	0,007	0,11	0,12	0,143	0,025	0,159	2,69	2,95
	M	-	-	-	-	-	0,095	0,031	0,115	1,80	2,13

Nota: ^a Contribuição de Na_2O nas soluções de KOH e contribuição de K_2O nas soluções de NaOH. O sinal > significa que os valores obtidos após 15 meses não são apresentados, uma vez que foram obtidos valores inferiores, o que pode estar relacionado com a formação de gel sílico-alcalino, e consequente aprisionamento de parte dos álcalis; ^b Percentagem relativamente ao total de álcalis (Na_2O_e) no agregado; ^c Com base num teor total de agregados no betão de 1850 kg/m^3



Em termos da influência da granulometria do agregado, em particular com os granitos GR1, GR2 e GR3 (Fig. 1), verifica-se que a redução do tamanho das partículas favorece uma maior libertação de álcalis, o que está de acordo com o observado por outros autores. Este comportamento é explicado pelo aumento da superfície específica das partículas produzidas no processo de britagem do agregado, levando a que as reações de dissolução ocorram mais rapidamente pelo aumento da área disponível para reação (Bérubé e Fournier, 2004; Lu *et al.*, 2006a; 2006b).

Todavia, apesar da maior extração ocorrer na fração 0-2 mm ("F1"), pode ser mais realista testar os agregados com uma distribuição de tamanho mais próximo da utilizada em misturas de argamassa e betão.

Outra observação importante é o facto de todos os agregados testados apresentarem sempre maior extração de Na do que K, independentemente do tipo de solução alcalina empregue, embora esta diferença seja menos significativa na solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

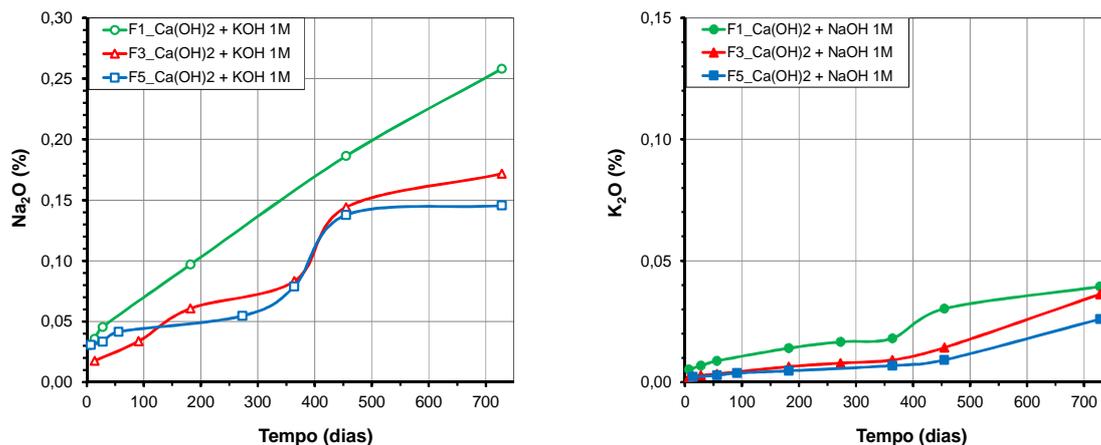


Fig. 1 – Influência da granulometria do agregado (GR3) no teor de álcalis libertados (% Na₂O e % K₂O) ao longo do tempo

Para avaliar a influência da solução alcalina empregue utilizou-se apenas a fração "F3" (Tabela 1). Os resultados obtidos mostram (Fig. 2) que as soluções alcalinas KOH+Ca(OH)₂ sat. e NaOH+Ca(OH)₂ sat. são as que promovem maior extração de álcalis (0,158 % Na₂O_e, em média). Este comportamento pode estar relacionado o pH das soluções alcalinas empregues, com o processo de troca iónica K-Na e também com a possível formação de precipitados de silicatos (CSH), aluminatos (CAH) e sílico-aluminatos (CASH) de cálcio hidratados, que podem aprisionar alguns álcalis. Estes resultados foram confirmados em todos os agregados (Tabela 5), e vão de encontro a resultados obtidos noutros estudos semelhantes (Bérubé *et al.*, 2002).

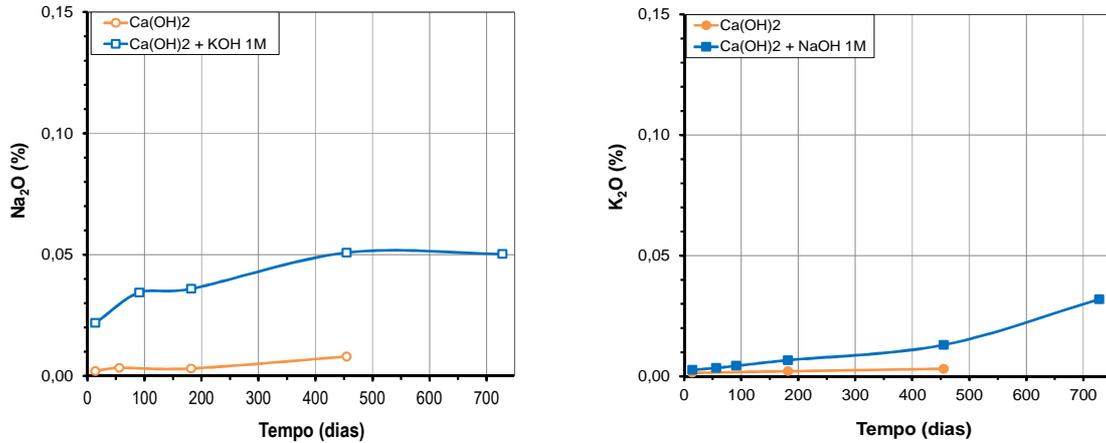


Fig. 2 – Influência da solução de extração no agregado GR26 (fração “F3”) no teor de álcalis libertados (% Na₂O e % K₂O) ao longo do tempo

A adição de Ca(OH)₂ às soluções de KOH ou NaOH (Fig. 3) parece favorecer a extração de álcalis. No que diz respeito ao efeito da concentração das soluções alcalinas, os resultados obtidos não são unânimes (Fig. 3), isto é, a extração de Na nas soluções de KOH é maior quando a concentração é mais baixa (0,7M), enquanto a extração do K ocorre em maior e extensão nas soluções de NaOH de maior concentração (1M). Será, no entanto, necessário aguardar pela estabilização da libertação de álcalis (Menéndez *et al.*, 2012a; 2012b) para avaliar melhor este efeito. De qualquer forma, existe sempre uma maior extração de Na do que K em todas as soluções analisadas.

De forma a verificar se a composição mineralógica dos granitos tem grande influência na libertação de álcalis, utilizou-se a fração “F3” nas soluções de KOH+Ca(OH)₂ sat. e NaOH+Ca(OH)₂ sat. (Fig. 4).

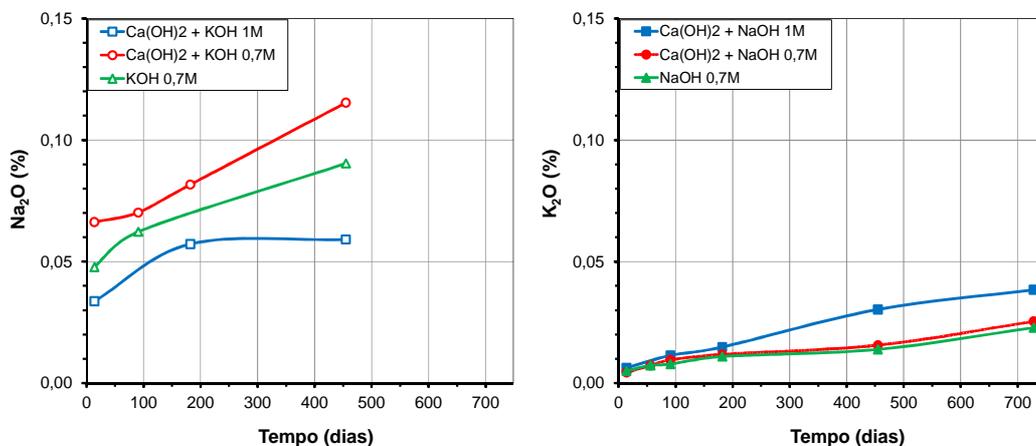


Fig. 3 – Influência da concentração das soluções e da presença de Ca(OH)₂ no agregado GR26 (fração “M”) no teor de álcalis libertados (% Na₂O e % K₂O)

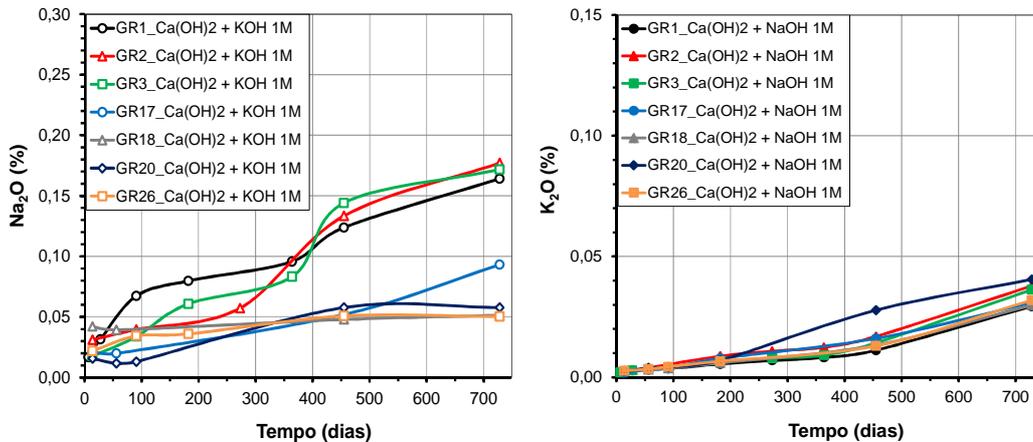
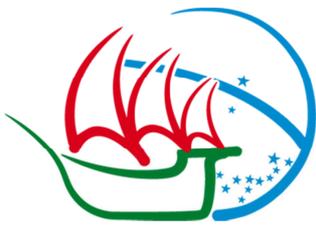
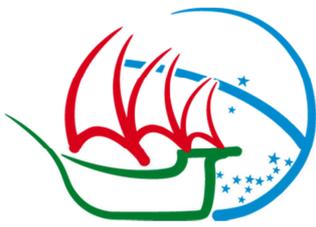


Fig. 4 – Influência da mineralogia dos agregados – teor de álcalis libertados (% Na₂O e % K₂O) ao longo do tempo em soluções alcalinas

Os resultados obtidos mostram a mesma tendência, ou seja, uma maior extração de Na do que K. Contudo, em termos de libertação de Na (Fig. 4a) após 24 meses de ensaio, dois grupos distintos são observados: um onde o teor de libertação é de cerca de 0,06 % (GR17, GR18, GR20 e GR26) e outro com cerca de 0,17 % (GR1, GR2 e GR3). Relativamente ao teor de K libertado (Fig. 4b), os resultados obtidos são muito similares entre todos os granitos testados (aproximadamente 0,03 %).

Como já foi referido, para os sete granitos foi observada uma maior extração de Na, o que pode ser atribuído à maior instabilidade dos minerais de sódio constituintes (ex.: plagioclase), em comparação com os feldspatos-K ou micas, em condições de elevada alcalinidade. Além disso, é de salientar que os feldspatos promovem a libertação dos iões, facto associado à instabilidade das estruturas cristalinas. Este comportamento pode estar relacionado com o menor raio iónico do sódio (0,95 Å), comparativamente ao raio iónico do potássio que é muito maior (1,33 Å), facilitando a substituição pelos iões cálcio (com raio iónico de 0,99 Å) (Menéndez *et al.*, 2012a). Este facto, associado a outros possíveis fatores de risco para a RAA, pode indicar que agregados contendo minerais de sódio são mais suscetíveis de libertar álcalis para o sistema.

Constatou-se que a quantidade de álcalis que pode ser libertada pelos diferentes granitos para a solução dos poros do betão é muito significativa. Por exemplo, para a granulometria entre 4,75-9,5 mm verifica-se que, em média, os teores de álcalis libertados pelos granitos nas duas soluções alcalinas são de 0,14 % de Na₂O_e, o que corresponde a 2,58 kg/m³ de betão (Tabela 5), e a cerca de 2,31 % dos álcalis presentes na composição desses agregados. É ainda de salientar que a quantidade de álcalis passível de ser libertada pelos



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

agregados excede o teor de álcalis solúveis em água geralmente libertado durante a hidratação do cimento ($1,0 \text{ kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}_e$) (Bérubé *et al.*, 2002).

4. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu confirmar que quantidades significativas de álcalis podem ser libertadas ao longo do tempo pelos agregados quando sujeitos a um ambiente alcalino. Este facto tem particular importância em agregados que contenham minerais alcalinos na sua constituição, tais como feldspatos, que são um constituinte maior das rochas ígneas, e em particular dos agregados graníticos tão largamente usados em estruturas de betão.

A maior ou menor libertação de álcalis pelos agregados depende da mineralogia e granulometria do agregado, e também do tipo de solução alcalina empregue. Comprovou-se que a redução do tamanho das partículas dos agregados favorece a libertação de iões alcalinos para a solução, sendo mais significativa nas soluções de KOH e NaOH, ambas com adição de Ca(OH)_2 .

Em suma, quando se avalia a reatividade aos álcalis de um agregado deve ter-se em linha de conta não só, os constituintes fornecedores de sílica reativa, mas também o teor de álcalis que ele pode libertar. Este facto pode ser muito importante para os agregados considerados de reatividade lenta e que não apresentam na sua constituição quantidades significativas de minerais com sílica reativa. Deste modo pode-se justificar a reatividade lenta apresentada por este tipo de agregados em diversas estruturas de betão. De futuro, será importante verificar até se estes resultados são representativos do comportamento real desses materiais nas estruturas de betão, em particular naquelas mais sujeitas à ação da água, de forma a se poder melhorar as recomendações para a prevenção da RAA.

5. REFERÊNCIAS

- Bérubé, M.A., Duchesne, J. and Rivest, M., 1996. Alkali contribution by aggregates to concrete. Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Melbourne, Australia: 899-906.
- Bérubé, M-A, Dorion, J-F & Rivest, M., 2000. Distribution of alkalis in concrete structures affected by alkali-silica reactivity and contribution by Aggregates. Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Quebec, Canada.
- Bérubé, M.A., Duchesne, J., Dorion, J.F., Rivest, M., 2002. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. Cement and Concrete Research (32): 1215-1227.
- Bérubé, M.A., Fournier, B., 2004. Alkalis releasable by aggregates in concrete: significance and test methods. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Beijing, China: 17-30.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Constantiner, D., Diamond, S., 2003. Alkali release from feldspars into pore solutions Cement and Concrete Research (33): 549-554.
- Goguel, R., 1995. Alkali release by volcanic aggregates in concrete. Cement and Concrete Research (25): 841-852.
- Grattan-Bellew, P. E., Beaudoin, J.J., 1980. Effect of phlogopite mica on alkali-aggregate expansion in concrete. Cement and Concrete Research (10): 789-797.
- Lagerblad, B., 2012. Alkali release from silicate minerals and alkali-silica reaction in concrete. Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Texas, USA, 6p.
- LNEC E 461. 2007. Betão. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas. Especificação LNEC, Lisboa, Portugal, 6p.
- Lu, D., Zhou, X., Xu, Z., Lan, X., Tang, M., Fournier, B., 2006a. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete. Cement and Concrete Research (36): 1157-1165.
- Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P., 2006b. Effect of aggregate particles size on determining alkali-silica reactivity by accelerated tests. Journal of ASTM International (3), 11p.
- Menéndez, E., Préndez, N., Márquez, C., Aldea, B., 2012a. Evaluation of granitic aggregates behavior in relation with the alkaline extraction and compositional change in their phases. Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Austin, USA, 10p.
- Menéndez, E., Préndez, N., Márquez, C., 2012b. Extracción de álcalis desde áridos graníticos. Análisis de la influencia en el desarrollo de la reacción árido-álcali. III Congresso Nacional de Áridos, Cáceres, Espanha, 15p.
- Ramos, V., 2013. Characterization of the potential reactivity to alkalis of Portuguese aggregates for concrete. PhD Thesis, University of Porto, Porto, Portugal, 417p.
- RILEM Recommended Test Method AAR-0. 2016. Outline Guide to the Use of RILEM Methods in the Assessment of the Alkali-Reactivity Potential of Aggregates. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. ISBN: 978-94-017-7251-8. In: Philip J. Nixon and I. Sims (Eds). Springer: 5-34.
- RILEM Recommended Test Method AAR-1.1. 2016. Detection of Potential Alkali-Reactivity - Part 1: Petrographic Examination Method. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. ISBN: 978-94-017-7251-8. In: Philip J. Nixon and I. Sims (Eds). Springer: 35-60.
- RILEM Recommended Test Method AAR-3. 2016. Detection of Potential Alkali-Reactivity – 38°C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. ISBN: 978-94-017-7251-8. In: Philip J. Nixon and I. Sims (Eds). Springer: 79-97.
- Soares, D., 2014. Estudo e caracterização de agregados para betão. Avaliação da sua contribuição para o aumento da alcalinidade e no desenvolvimento da reação álcalis-silica no betão, MSc Dissertation, University of Evora, Evora, Portugal (in Portuguese), 180p.
- Soares, D., Santos Silva, A., Mirão, J., Ramos, V., Fernandes, I., Menéndez, E., 2015. Assessment of alkalis released by aggregates. Contribution to the alkalinity increase and AAR development in concrete. In: Pina, C., Portela, E., Caldeira, L., Batista, A., Dias, I., Santos, R. (Eds): Proceedings of the 2nd International Dam World Conference, April 21-24, Lisbon, Portugal: 249-258.
- Soares, D., Santos Silva, A., Mirão, J., Fernandes, I., Menéndez, E., 2016. Study on the factors affecting alkalis release from aggregates into ASR. Proceedings of the 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, São Paulo, Brazil, 9p.