

Proposta de avaliação da expansão residual proveniente da reação álcali-agregado (RAA) e do ataque por sulfatos em testemunhos de concreto

DANIEL V. RIBEIRO – PROFESSOR, DR. – verasribeiro@hotmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3328-1489>;

NILSON S. DE AMORIM JÚNIOR – Ms., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0726-4645>;

BRUNA S. SANTOS – Ms., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1635-5979>;

SILAS DE A. PINTO – Ms., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0445-1872>;

HENRIQUE A. SANTANA – Ms., ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1425-9438>; UFBA – BA

RESUMO

Os ataques químicos ao concreto, com destaque para a reação álcali-agregado (RAA) e a ação de sulfatos externos, resultando na formação de etringita secundária (SEF), trazem riscos às estruturas correntes, principalmente às grandes estruturas de concreto armado como barragens, pontes ou blocos de fundação. Essas reações expansivas podem levar à fissuração do concreto e, conseqüentemente, à perda de desempenho. Os procedimentos e normas disponíveis para avaliação e prevenção dos riscos de ataque por sulfatos e RAA consideram a classificação das conseqüências dos danos, as condições ambientais de exposição das estruturas de concreto, a dimensão das peças ou elementos estruturais, os materiais, como agregados e ligantes, mas sempre no período pré-mistura, utilizando composições pré-determinadas e preparadas em laboratório. Uma vez detectada uma manifestação patológica, seu diagnóstico é feito por inspeção visual, seguido de confirmação desse

diagnóstico por ensaios de laboratório, com destaque para as técnicas petrográficas e estudos da microestrutura do concreto. Entretanto, não existem ensaios consolidados quanto à avaliação do estágio atual ou das possibilidades de evolução da manifestação patológica. Assim sendo, na presente pesquisa são feitas propostas metodológicas que abordam a avaliação da expansão residual em estruturas de concretos já existentes decorrentes da ação da RAA e da SEF residual em testemunhos extraídos de estruturas existentes, contribuindo para a previsão da evolução da manifestação patológica. Além da proposta de metodologia, é apresentado um estudo de caso, com ensaios em dois blocos de fundação. Os resultados obtidos demonstraram que a metodologia proposta apresentou elevada reprodutibilidade e coerência com as demais características dos testemunhos, sendo uma alternativa tecnicamente viável de avaliar a expansão residual proveniente da RAA e da ação de sulfatos, devido à formação de SEF.

PALAVRAS-CHAVE: PROPOSTA DE METODOLOGIA, AÇÃO DE SULFATOS, REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO, BLOCOS DE FUNDAÇÃO.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser afetada por ataques físicos e químicos. Dentre os ataques químicos, destacam-se os processos expansivos causados pela Reação Álcali-Agregado (RAA) e pela ação de sulfatos externos e internos, como a formação de etringita secundária (SEF – *Secondary Ettringite Formation*) e etringita tardia (DEF – *Delayed Ettringite Formation*) [1, 2]. Este trabalho se atém à RAA e à formação de etringita secundária.

É fundamental que a análise de risco do potencial de ocorrência dessas reações expansivas seja feita preliminarmente às construções. No caso da RAA, como prescreve a ABNT NBR 15577-1 [3], as medidas adequadas para preveni-las estão ligadas,

principalmente, às especificações dos materiais. No caso da prevenção do ataque externo por sulfatos, a diminuição da permeabilidade do concreto é um parâmetro chave para se alcançar concretos resistentes aos sulfatos. Essa redução na permeabilidade pode ser obtida por: i) Redução da relação a/c; ii) Compactação adequada do concreto e/ou; iii) Cura adequada [4]. Além disso, o uso de cimento resistente a sulfatos também tem um papel importante no controle desta reação expansiva, pelo fato destes cimentos conterem teor reduzido de aluminatos.

As normas disponíveis tratam de procedimentos que visam a identificação dos riscos de ataque por sulfatos e RAA e sua prevenção, havendo poucas publicações que façam previsões da evolução das ma-

nifestações patológicas por meio de ensaios que abordem a avaliação da expansão residual em estruturas de concreto já existentes, proposta deste trabalho.

Assim, metodologias que avaliem a expansão residual, proveniente da RAA e da formação de etringita residual em testemunhos extraídos de estruturas existentes se tornam importantes para auxiliar no diagnóstico das manifestações patológicas dessas estruturas e na tomada de decisão quanto à forma mais eficaz de intervenção.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Extração dos testemunhos

Na presente pesquisa, utilizaram-se

testemunhos de concreto extraídos de dois diferentes blocos de fundação de grandes dimensões, com resistência à compressão igual a 32 MPa, quando projetado e executado.

Foram extraídos oito testemunhos com diâmetro de 100 mm e comprimento mínimo de 300 mm, sendo que o comprimento ideal é de cerca de 285 mm, conforme procedimento descrito na norma brasileira ABNT NBR 7680-1 [5]. Foram utilizados quatro deles para cada um dos ensaios de avaliação da RAA e do ataque por sulfatos residuais, além de quatro testemunhos que foram avaliados quanto à resistência mecânica, velocidade de propagação de onda ultrassônica e módulos de elasticidade estático e dinâmico. Os testemunhos utilizados apresentaram aspecto visual íntegro, não demonstrando fissuras ou formação de gel expansivo.

2.2 Avaliação da reatividade álcali-agregado (RAA) residual em testemunhos de concreto

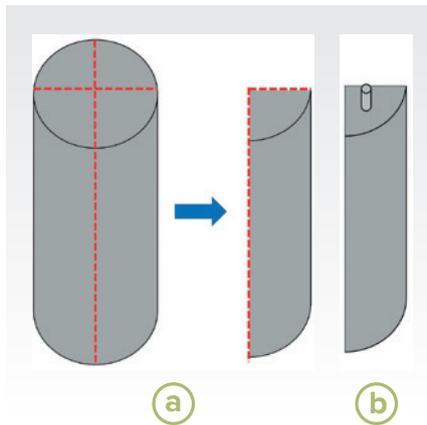
O método utilizado para a avaliação da reatividade álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto foi uma adaptação da norma ABNT NBR 15577-4 [6], utilizada para avaliação da expansão acelerada de barras de argamassa.

Cada um dos quatro testemunhos ($\phi = 100$ mm, $h = 285$ mm) foi cortado em 4 partes, a cada 90° , conforme Figura 1a, empregando-se uma máquina de corte com disco diamantado. Após o corte, foram inseridos pinos metálicos nas extremidades superior e inferior das amostras resultantes, com auxílio de furadeira e fixados com cola epóxi (Figura 1b).

Após 24 horas da inserção dos pinos, as amostras foram dispostas em recipiente com água destilada, o qual foi gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até atingir $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$, permanecendo nessas condições durante 24 h.

Após esse período de estabilização, as barras foram removidas do recipiente de cura, sendo medidos os seus comprimentos iniciais, por meio de relógio comparador (extensômetro) com precisão de 0,001 mm, em sala climatizada a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, de modo a registrar a leitura inicial (E_0).

Após a leitura inicial, as barras foram inseridas em solução aquosa de



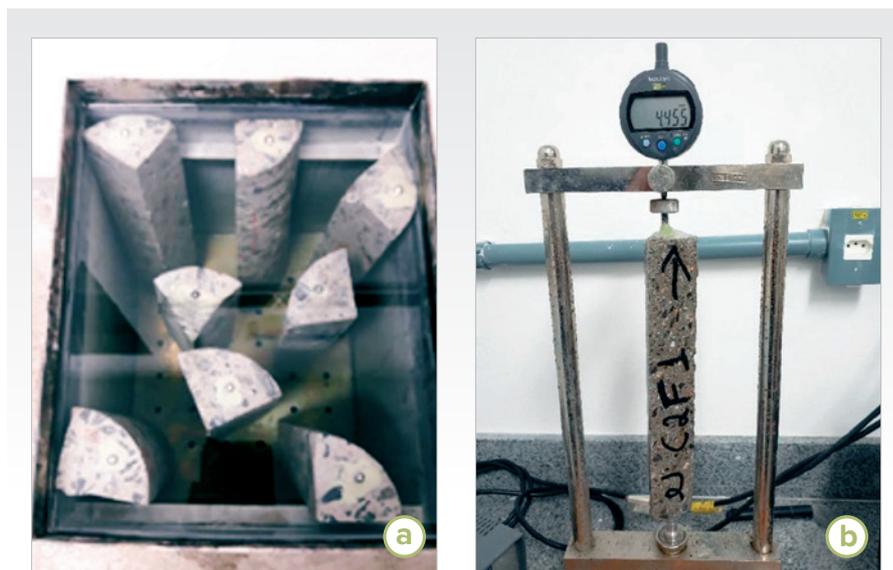
► **Figura 1**

(A) Corte dos testemunhos para obtenção das amostras utilizadas na determinação da expansão proveniente da reação álcali-agregado (RAA) residual e (B) colocação do pino metálico das extremidades

NaOH 1N a $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ (Figura 2a) e foram medidos os seus comprimentos diariamente, até os 30 dias, conforme observado na Figura 2b.

A expansão linear em cada idade (R_i) representa a diferença entre o seu comprimento na idade considerada (E_i) e o comprimento inicial (E_0), dividida pelo comprimento efetivo de medida (E_e), expressa em porcentagem, conforme Equação 1.

$$[1] \quad R_i = 100 \times \frac{E_i - E_0}{E_e}$$



► **Figura 2**

(A) Amostras provenientes dos testemunhos em banho térmico a 80°C e (B) medida do comprimento das amostras

Após os 30 dias de ensaios, é possível verificar o potencial de expansão residual que este concreto ainda poderá sofrer devido à RAA.

2.3 Avaliação da expansão residual (SEF) por ataque de sulfatos em testemunhos de concreto

O método utilizado para a avaliação da expansão residual devido ao ataque de sulfatos (SEF) em testemunhos de concreto foi uma adaptação da norma ABNT NBR 13583 [7], utilizada para avaliação da expansão acelerada de barras de argamassa, e a classificação do cimento em resistente ou não a sulfatos, de acordo com a norma ABNT NBR 16697 [8]. Como as barras são submetidas à cura em solução agressiva de sulfato de sódio, o tipo de ataque é considerado externo.

O método adaptado consistiu em comparar a expansão dimensional de amostras de testemunhos extraídos de concreto submetidos a uma solução aquosa saturada com cal (usada como referência) e a uma solução de sulfato de sódio. Os procedimentos de corte dos testemunhos (Figura 1a), colocação dos pinos nas extremidades (Figura 1b), colocação no tanque de cura durante 24 horas e medida dos comprimentos iniciais

(Lo) são exatamente os mesmos descritos no item 2.2 para os ensaios de RAA.

Após a leitura inicial, metade das amostras foram inseridas em tanque contendo solução aquosa de sulfato de sódio (Na₂SO₄), com concentração de 100 gramas por litro de solução, a (40 ± 2)°C, e a outra metade foi inserida em tanque contendo solução saturada com cal, também a (40 ± 2)°C. Foram medidos os comprimentos das amostras (L_i) nas idades de 7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias, contados a partir da inserção nos tanques de cura final.

A expansão individual (S_i) dos corpos de prova foi determinada pela diferença entre o valor medido na idade correspondente (L_i) e a leitura inicial da mesma barra (L₀), em milímetros, dividida pelo seu comprimento efetivo (L_e), e multiplicado por 100, conforme Equação 2.

$$[2] S_i = 100 \times \frac{L_i - L_0}{L_e}$$

A expansão resultante (E_R) é expressa, em porcentagem, pelo aumento ou diminuição da expansão do corpo de prova, devido ao ataque da solução de sulfato de sódio (E_s) em relação à expansão do corpo de prova disposto em solução aquosa saturada com cal (E_g), sendo calculada conforme a Equação 3.

$$[3] E_R(\%) = E_s - E_g$$

Após o término do ensaio (42 dias), é possível verificar o potencial de expansão residual que este concreto ainda poderá sofrer devido ao ataque por sulfatos, decorrentes de DEF ou, principalmente, SEF.

2.4 Caracterização físico-mecânica dos testemunhos de concreto

Os ensaios foram realizados com os testemunhos antes da imersão em soluções de hidróxido de sódio e sulfato de sódio. Esses testemunhos foram extraídos em estruturas existentes que sofreram degradação ao longo dos anos.

2.4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (f_c)

O ensaio para determinação da resistência à compressão axial dos testemunhos foi realizado com auxílio

de uma prensa servo-hidráulica Contenco, modelo HD – 120 T, com capacidade de 120 tf e velocidade de carregamento igual a (0,45 ± 0,15) MPa/s, conforme recomendações da ABNT NBR 5739 [9].

Antes da execução do ensaio, os testemunhos tiveram seu comprimento medido, com posterior corte e retificação dos testemunhos, a fim de se garantir uma superfície plana de modo a não comprometer os resultados de compressão, além de garantir as dimensões tradicionalmente utilizadas neste tipo de ensaio (φ = 100 mm, h = 200 mm).

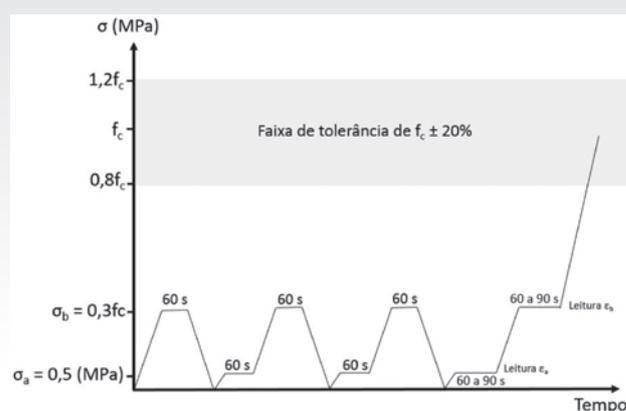
A resistência à compressão axial (f_c) é dada pela razão entre a carga máxima (P) suportada pelo corpo de prova e a área da sua seção original (A), de acordo com a Equação 4.

$$[4] f_c = \frac{P}{A}$$

2.4.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E_{ci})

O módulo de elasticidade do concreto relaciona a tensão aplicada à deformação instantânea obtida, sendo um importante parâmetro para cálculos estruturais. Antes de se realizar este ensaio, foi necessário determinar a resistência à compressão do concreto a ser estudado (f_c), conforme procedimentos descritos no item 2.4.1.

A seguir, os testemunhos cilíndricos de concreto experimentaram carregamento cíclico, variando entre 0,5 MPa e 30% de sua tensão de resistência à ruptura (0,3.f_c) e, ao atingir estas tensões, o carregamento foi mantido constante por cerca de 1 minuto, conforme recomendação da ABNT NBR 8522 [10]. Após o terceiro ciclo, o carregamento foi aplicado até a ruptura do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 3.



► **Figura 3**

Rotina de carregamento cíclico das amostras, variando entre 0,5 MPa e 30% de sua tensão de resistência à ruptura (0,3.f_c), com patamar de carregamento por cerca de 1 minuto, conforme recomendação da ABNT NBR 8522 [10]

A resistência à compressão obtida no ensaio cíclico (σ_b) não deve diferir em 20% para mais ou para menos da resistência à compressão f_c. O módulo de elasticidade estático, E_{ci}, foi calculado conforme Equação 5.

$$[5] E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} \cdot 10^{-3}$$

Em que σ_b é a tensão maior, em MPa, (σ_b = 0,3.f_c); 0,5 é a tensão básica, expressa em MPa; ε_b é a deformação específica média, (ε = ΔL/L), dos corpos de prova sob a tensão maior; ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

2.4.3 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA E DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Para a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e do módulo de elasticidade dinâmico, foi utilizado um equipamento emissor de ondas ultrassônicas (Pundit Lab, da marca Proceq, com transdutores de 54 kHz), efetuando-se o ensaio em todos os testemunhos disponíveis.

Após medida do comprimento dos testemunhos, aplicou-se uma camada de gel condutor nas extremidades das amostras e na superfície dos transdutores, posicionando-os centralizados nas faces opostas e efetuando a medida. A velocidade de propagação de onda ultrassônica (V), em m/s, é determinada segundo a Equação 6.

$$[6] \quad V = \frac{L}{t}$$

Em que L é o comprimento das amostras, isto é, a distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores, em metros; t é o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, em microssegundos (μs).

A partir dos valores da velocidade de propagação de ondas, é possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos artefatos conforme Equação 7.

$$[7] \quad E_d = \rho \cdot V^2 \cdot K$$

Em que ρ é a densidade de massa no estado endurecido, em kg/m^3 ; V é a velocidade que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova no sentido longitudinal, em km/s ; K é um coeficiente, determinado por meio do coeficiente de Poisson (ν), de acordo com a Equação 8.

$$[8] \quad K = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação da reatividade álcali-agregado (RAA) residual em testemunhos de concreto

Após obtenção, conforme metodologia apresentada, as amostras tiveram sua expansão monitorada durante 31 dias. De acordo com os resultados apresentados na Figura 4, resultantes da média de leitura das quatro amostras, observa-se uma expansão final igual a $(0,28 \pm 0,07)\%$ e $(0,11 \pm 0,06)\%$ para os blocos de fundação 01 e 02, respectivamente.

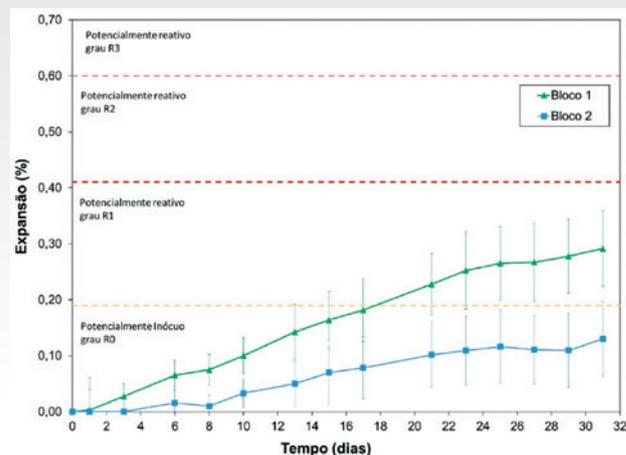
Com base nas faixas de valores de expansão estabelecidos pela ABNT NBR 15577-1 [3], para ensaios executados de acordo com a ABNT NBR 15577-4 [6], foi possível classificar o grau de reatividade potencial dos agregados nessas estruturas, apesar de as dimensões e a composição dos testemunhos não serem exatamente as mesmas preconizadas pela ABNT NBR 15577-1 [3]. O que se pode concluir com segurança é que os resultados evidenciam que os agregados presentes em ambas as estruturas ainda possuem potencial reativo. A situação pode ser mais grave no bloco de fundação 01, que

apresentou uma expansão igual a $(0,28 \pm 0,07)\%$, classificando seus agregados como potencialmente reativos (grau R1). Todavia, essa classificação quanto à gravidade só é válida caso haja presença de álcalis e água suficientes para garantir a continuidade da reação. O bloco de fundação 02 apresentou uma expansão igual a $(0,13 \pm 0,06)\%$, classificando seus agregados como potencialmente inócuos (R0).

De acordo com a norma ABNT NBR 15577-1 [3], agregados com reatividade R1 apresentam risco moderado a alto quando presentes em blocos de fundação (Tabela 1). Agregados classificados como inócuos (R0) apresentam risco desprezível e nenhuma medida de prevenção é necessária. Observa-se que o bloco de fundação 01 apresenta maior risco à estrutura, a depender da presença de álcalis no meio, pois ainda tem potencial para uma elevada expansão residual, estando longe de uma estabilização. A depender de levantamentos complementares quanto à agressividade do solo e da água em contato com a estrutura, esta poderá necessitar de uma intervenção mais acentuada, como uma amarração externa, sob pressão. O bloco 02 está próximo de uma estabilização e não deverá sofrer graves expansões nos próximos anos, mesmo com a presença de álcalis no sistema e, assim, uma intervenção mais simples, tais como uma injeção de nata de cimento, preenchendo as fissuras já existentes deve ser suficiente. Vale ressaltar que devido à metodologia proposta possuir um caráter de ineditismo, foi utilizado o procedimento padrão, utilizando a temperatura de $80^\circ C$.

3.2 Avaliação da expansão residual (SEF) por ataque de sulfatos em testemunhos de concreto

Após obtenção, conforme metodologia apresentada, as amostras tiveram sua



► **Figura 4**
Expansão residual devida à RAA em amostras de testemunhos extraídos dos blocos de fundação 1 e 2, em função do tempo de ensaio acelerado

expansão monitorada durante 42 dias. Os resultados apresentados na Figura 5, resultantes da média de leitura das quatro amostras, apresenta a evolução da expansão média das barras provenientes dos testemunhos dos blocos de fundação 01 e 02, dispostas em solução de sulfato de sódio e em solução saturada com cal, além da consequente expansão resultante, em valores resumidos na Tabela 2.

Verificou-se, após 42 dias de ensaio, uma expansão resultante igual a cerca de $(0,29\% \pm 0,02)\%$ e $(0,14\% \pm 0,04)\%$ para os blocos de fundação 01 e 02, respectivamente. A ABNT NBR 16697 [11] e Marciano [12] estipulam um valor máximo aceitável de expansão igual a $0,03\%$. Observa-se que os resultados obtidos para os testemunhos dos dois blocos se encontram muito acima do valor máximo prescrito para se considerar um cimento resistente a sulfatos, principalmente para o bloco de fundação 01, cuja expansão resultante é quase 10 vezes superior a este valor.

3.3 Caracterização mecânica dos testemunhos de concreto

De forma adicional, foram determinados a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade estático em seis testemunhos (três para cada ensaio) extraídos em cada um dos blocos de fundação, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Conforme destacado no procedimento experimental, os dois blocos foram produzidos com concretos com

► Tabela 1

Grau de risco da reatividade álcali-agregado (RAA) em função das dimensões e condições de exposição da estrutura, com base em resultados de ensaios acelerados, de acordo com ABNT NBR 15577-1 [3]

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco (UR < 60%)	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Elemento maciço (menor dimensão > 1m) em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço (água do mar, solos contaminados, lençol freático contendo álcalis, etc.)	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito alto

► Tabela 2

Expansão média das amostras provenientes dos testemunhos dos blocos de fundação O1 e O2, imersas em solução de sulfato de sódio e em solução saturada com cal, além da consequente expansão resultante

Solução de imersão	Bloco de fundação	
	O1	O2
Solução de sulfato de sódio (i)	0,33%	0,19%
Solução saturada com cal (ii)	0,04%	0,05%
Expansão resultante (i - ii)	0,29%	0,14%

resistência de projeto (f_{ck}) igual a 32 MPa. Observa-se que o concreto utilizado no bloco O2 apresentou redução pouco significativa na resistência à compressão e, de acordo com o desvio padrão, está ainda em condições aceitáveis, ao contrário do concreto presente no bloco O1, que teve uma queda de cerca de 25% em sua resistência à compressão axial.

Os resultados de propriedades mecânicas apresentam grande coerência com os resultados de RAA e ataque por sulfatos apresentados anteriormente. Observa-se que os concretos que apresentam maior reatividade potencial são aqueles que apresentaram maior perda de desempenho ao longo do tempo.

De forma complementar, foram realizados ensaios de avaliação da velocidade de propagação de pulso de onda ultrassônica nos testemunhos testados, conforme resultados apresentados na Tabela 4.

De acordo com os resultados do ensaio de ultrassom, todas as amostras

de testemunhos podem ser classificadas como concretos de qualidade “muito boa” quanto à compacidade, segundo a norma BS EN12504-4 [13], já que as velocidades ficaram entre 4,0 km/s e 4,5 km/s. No entanto, observa-se uma

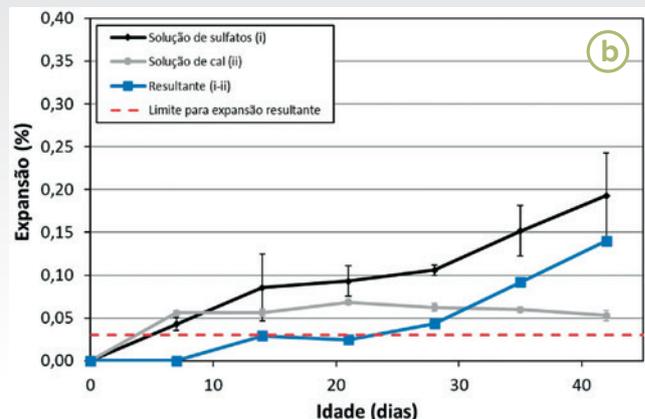
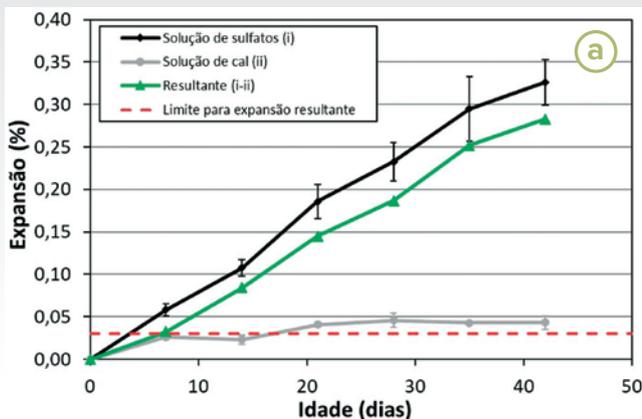
redução de cerca de 6% na velocidade de propagação das ondas, resultando em uma redução de cerca de 21% no módulo de elasticidade dinâmico.

Segundo Li *et al.* [14], o módulo de elasticidade dinâmico obtido por meio

► Tabela 3

Resistência à compressão axial (f_c) e Módulo de elasticidade estático (E_{ci}) dos testemunhos de concreto extraídos dos blocos de fundação O1 e O2

Bloco de fundação	Amostra	Resistência à compressão, f_c		Módulo de elasticidade estático, E_{ci}	
		Valor individual (MPa)	Média (MPa)	Valor individual (MPa)	Média (MPa)
Bloco 1	1a	21,0		12,18	
	1b	27,6	23,90 ± 3,37	15,72	13,80 ± 1,79
	1c	23,1		13,50	
Bloco 2	2a	32,3		14,50	
	2b	28,5	30,57 ± 1,92	17,65	17,38 ± 2,75
	2c	30,9		19,98	



► Figura 5

Expansão residual média em amostras de testemunhos extraídos dos blocos de fundação (A) O1 e (B) O2, dispostas em soluções de sulfato de sódio e saturada com cal e as consequentes expansões resultantes, ao longo do tempo, em função do tempo de ensaio acelerado

► Tabela 4

Velocidade de propagação de pulso de onda ultrassônico e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos testemunhos de concreto extraídos dos blocos de fundação 01 e 02

Bloco	Amostra	Velocidade (km/s)	E_d (GPa)	Velocidade média (km/s)	E_d médio (GPa)
Bloco 1	1a	4,067	38,22	4,12 ± 0,08	31,97 ± 6,94
	1b	4,277	40,53		
	1c	4,092	37,04		
	1d	4,060	41,39		
	1e	4,114	37,70		
Bloco 2	2a	4,395	44,24	4,37 ± 0,09	40,45 ± 3,77
	2b	4,438	44,36		
	2c	4,227	35,87		
	2d	4,454	39,72		
	2e	4,339	38,06		

do ensaio de determinação da propagação de ondas ultrassônicas analisa o grau de compacidade do material, a fim de se verificar a porosidade do concreto e presença de fissuras, podendo apenas ser correlacionado com o módulo de elasticidade estático.

Apesar da diferença absoluta entre os valores dos módulos de elasticidade estático e dinâmico, constata-se que a redução dos valores (21%) é semelhante, indicando que o bloco 02 possui maior rigidez

e, possivelmente, menos fissuras em relação ao bloco 01, sendo um indício de que o bloco 01 foi mais afetado pelas fissuras ocasionadas por problemas com RAA e/ou ataque por sulfatos (DEF ou SEF) [15].

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que:

- Os testemunhos de concreto do bloco de fundação 01 apresentaram-se mais

suscetíveis à reação álcalis-agregado e à expansão por sulfatos residuais, em relação aos testemunhos do bloco de fundação 2, indicando que o bloco 01 apresenta agregados mais reativos e características do concreto mais vulneráveis ao ataque de sulfatos externos, provenientes do solo ou água;

- O bloco de fundação 02 apresentou maior resistência mecânica, rigidez estática e dinâmica em relação ao bloco 01, indicando perda de desempenho predominante decorrente do ataque por sulfatos externos, com formação de etringita secundária;

- A metodologia proposta permitiu comparar e analisar de forma satisfatória estruturas que possam estar sendo acometidas por RAA e ataque por sulfatos, indicando seu potencial de expansão residual. Aliadas a outros levantamentos como características de projeto do concreto e grau de agressividade do solo e água em contato com essas estruturas, ela pode contribuir para identificar a melhor forma de intervenção. 

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TORRES, I.F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife – PE – Brasil. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 9, n. 3, p. 376-394, 2016.
- [2] ZHAO, G.; SHI, M.; FAN, H.; CUI, J.; XIE, F. The influence of multiple combined chemical attack on cast-in-situ concrete: Deformation, mechanical development and mechanisms. Construction and Building Materials, v. 251, s/n, paper 118988, 12 p., 2020.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7680-1: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 27 p., 2015.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15577-4: Agregados Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 17 p., 2018.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13583: Cimento Portland — Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 14 p., 2014.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 14 p., 2018b.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 12 p., 2018c.
- [12] MARCIANO, Z.A.N. Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da resistência de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. 202 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [13] EUROPEAN STANDARD – BRITISH STANDARD. BS EN 12504-4: Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity. Bruxelas, 18 p., 2004.
- [14] LI, M.; ANDERSON, N. L.; SNEED, L. H.; KANG, X. An Assessment of Concrete Over Asphalt Pavement Using Both the Ultrasonic Surface Wave and Impact Echo Techniques. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 21, i. 4, p. 137-149, 2016.
- [15] WANG, Y.; JIRADILOK, P.; NAGAI, K.; ASAMOTO, S. A mesoscale discrete model for mechanical performance of concrete damaged by coupled ASR and DEF. Engineering Fracture Mechanics, v. 232, s/n, paper 107055, 16 p., 2020.