

# Inspeção de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas com o uso de drone

**EDUARDO ISSAMU FUNAHASHI JÚNIOR** - MEST. - <https://orcid.org/0000-0002-7516-4195> ([eduardo.funahashi@desek.com.br](mailto:eduardo.funahashi@desek.com.br));

**PATRICIA GAMBALE** - MEST. - <https://orcid.org/0000-0001-8219-3616>;

**PIERRE-YVES GUY** - DIR. | **SENTINEL BRASIL**

**SELMO CHAPIRA KUPERMAN** - DOUT. - <https://orcid.org/0000-0003-4186-2216> | **DESEK**

**EDNA POSSAN** - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-3022-742> | **UNILA**

**NICOLE PAGAN HASPARYK** - DOUTORA, PESQ. - <https://orcid.org/0000-0001-7576-2681> | **ELETROBRAS**

## RESUMO

**A** INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS COM OCORRÊNCIAS DE FISSURAÇÃO E DETERIORAÇÃO DE CONCRETOS AFETADOS PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) E ETRINGITA TARDIA (DEF- DELAYED ETTRINGITE FORMATION) PODE SER CONDUZIDA COM O USO DE DRONE. NESTE ESTUDO, APRESENTA-SE O POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DESTA FERRAMENTA, EM IDADES PRÉ-ESTABELECIDAS, ASSOCIADA À INSTRUMENTAÇÃO E INSPEÇÕES VISUAIS, NA AVALIAÇÃO DE PROTÓTIPOS DE CONCRETO QUE FORAM INDUZIDOS À DEF E À RAA. ESSE TIPO DE INVESTIGAÇÃO, SEGUIDO POR UM PROCESSAMENTO DETALHADO DAS IMAGENS, POSSUI ELEVADO POTENCIAL EM MENSURAR AS FISSURAS ATIVAS. ESSA TÉCNICA JÁ TEM SIDO EMPREGADA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO DE BARRAGEM AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS, ESPECIALMENTE PARA INSPEÇÕES EM LOCAIS DE DIFÍCIL ACESSO. OS PROCEDIMENTOS ADOTADOS INDICAM RESULTADOS SATISFATÓRIOS E POTENCIAL DO USO DE DRONES PARA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS.

**PALAVRAS-CHAVE:** REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA), ETRINGITA TARDIA (DEF), MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS, INSPEÇÃO POR DRONE, ÍNDICE DE FISSURAÇÃO.

## 1. INTRODUÇÃO

A deterioração de estruturas por reações expansivas devido à reação álcali-agregado (RAA), etringita tardia (DEF-Delayed Ettringite Formation) e ataque conjugado (DEF&RAA) é um problema para a durabilidade do concreto e vida útil de projeto, que afeta um número crescente de estruturas de concreto no Brasil e no mundo. A RAA já é um fenômeno conheci-

do de longa data e que tem como fatores condicionantes alguns minerais considerados potencialmente reativos presentes no agregado, álcalis e umidade (1). Já, a DEF representa um tipo de ataque interno por sulfatos e que envolve altas temperaturas decorrentes de excessivo calor de hidratação gerado a partir do contato do cimento com a água, ou mediante cura térmica, ambos acima de 60-65 °C (2).

Em (3), pode ser observada uma extensa avaliação diagnóstica que foi elaborada para avaliar um pilar e um muro de vededouro de usina hidrelétrica brasileira com pouco mais de 80 anos de idade, que apresentavam fissuras decorrentes das reações expansivas mencionadas. Entre as diversas medidas definidas a partir deste diagnóstico, destaca-se a necessidade do monitoramento periódico da evolução das expansões e do quadro fissuratório existentes. A partir deste monitoramento, é possível programar as manutenções e eventuais intervenções a serem realizadas nestas estruturas de concreto ao longo dos anos. A prática recomendada publicada via comitê do IBRACON CT-201 (4) abrange vários dos passos principais a serem adotados no âmbito do diagnóstico, tanto em campo como em laboratório.

Porém, a avaliação precisa de fissuras (distribuição e quantificação) é um processo complexo, mas fundamental no monitoramento e manutenção de estruturas de concreto, principalmente naquelas com fissuras ativas, como é o caso da RAA, DEF ou ataque conjugado por DEF&RAA. Por meio de inspeção visual e com o uso de

instrumentos manuais, como o fissurômetro, por exemplo, são feitas medidas periódicas com o objetivo de avaliar a sua atividade no tempo. Em alguns casos, este tipo de monitoramento pode ser subjetivo dependendo da experiência do leitorista, muitas vezes sendo um processo demorado e com maior custo, dependendo das áreas e das condições de acesso das estruturas a serem avaliadas.

Recentes avanços tecnológicos (hardware e software) têm possibilitado o uso de drone para inspeção e monitoramento de estruturas, sendo de especial interesse para trabalhos em altura e em locais de difícil acesso. As imagens obtidas podem ser utilizadas para o desenvolvimento de modelos estruturais tridimensionais, quantificar os avanços durante a construção de empreendimentos residenciais e de infraestrutura, inspeções de fachadas de edifícios para identificar patologias, entre outros. O uso de drone, em conjunto com o processamento digital das imagens, tem um grande potencial para o monitoramento de fissuras no concreto, independentemente das dimensões da estrutura. Com o processamento das imagens, podem ser verificados detalhes sobre as fissuras superficiais existentes nas estruturas. Com isso, é possível obter resultados satisfatórios para a identificação e quantificação das dimensões das fissuras em relação a inspeção visual.

Este artigo apresenta o monitoramento do quadro fissuratório de estruturas de concreto afetadas por DEF e RAA. Inicialmente, nos protótipos cúbicos de concreto

expostos em campo de envelhecimento desenvolvido por Furnas (5), foram realizadas inspeções visual e por drone, seguida por processamento das imagens. A inspeção por drone foi também aplicada para estruturas de concreto de uma barragem que se encontra afetada por reações expansivas. Os procedimentos adotados para as duas situações indicaram resultados satisfatórios e mostram o grande potencial do uso de drones e análise de imagens para a inspeção periódica de estruturas de concreto afetadas por reações expansivas.

## 2. DRONE E SUAS POTENCIALIDADES

Os drones, ou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), têm se mostrado ferramentas bastante vantajosas em substituição aos procedimentos tradicionalmente adotados em inspeções de variados empreendimentos, graças às suas características únicas. Em meados de 2017, com a regulamentação do seu uso no Brasil, a busca pela utilização desses equipamentos tem se intensificado e sido frequente, haja vista a potencialidade de obtenção de resultados mais rápidos, precisos e direcionados. As inspeções convencionais envolvem avaliações visuais, bem como EPIs e equipamentos de suporte, trazendo uma maior complexidade aos serviços.

Uma inspeção por meio de drones pode reduzir o tempo de serviço ao ser comparada àquela convencional. Claro que, na sequência, haverá a necessidade de processamento das imagens, entretanto, os aplicativos disponíveis para tal fim e a experiência comprovada do operador permitem uma análise bastante eficaz, o que



### FIGURA 1

IMAGEM ILUSTRATIVA DE UM ORTOMOSAICO DE UMA BARRAGEM OBTIDA POR DRONE

traz resultados satisfatórios como mostra o por (6).

Porém, deve-se destacar a importância do envolvimento de uma equipe devidamente treinada e conhecedora do objeto a ser inspecionado, do contrário, resultados impertinentes poderão ser obtidos e prejudicar a conclusão dos trabalhos.

Os serviços realizados com essa ferramenta são variados:

- ▶ detecção, medição, classificação e monitoramento de anomalias superficiais;
- ▶ monitoramento topográfico (verificação da estabilidade de uma estrutura, seu deslocamento espacial e sua inclinação);
- ▶ escaneamento 3D a laser, criação de *Digital Twin* ("gêmeo digital") e *As Is* ("como está") para projeto BIM.

A correção de sinal com antena RTK dá ao drone uma alta precisão de geolocalização de 2-3 cm, o que permite a automatização do plano de voo. Assim, a totalidade da estrutura é sobrevoada garantindo a exaustividade das informações recolhidas de forma a auxiliar na avaliação da segurança das estruturas.

As aplicações são diversas e dentro delas cita-se o monitoramento de

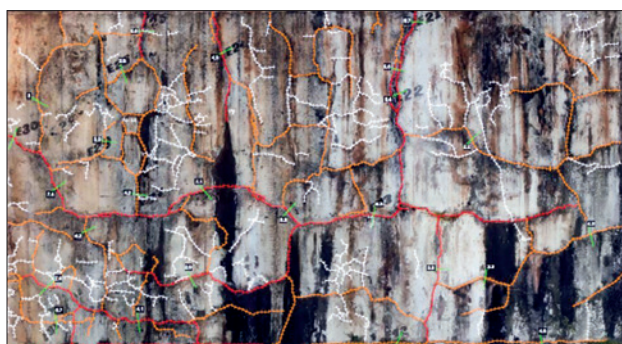
anomalias em barragem de concreto (Figura 1). Voando a uma distância segura de 5 m da estrutura, o drone é capaz de detectar fissuras de até 0,5 mm.

As Figuras 2 e 3 mostram a evolução das anomalias entre os anos de 2022 e 2023 e a Figura 4 mostra o mapa de densidade de fissuras do paramento jusante de uma barragem.

A análise detalhada dessas imagens permite a identificação precoce de anomalias estruturais, possibilitando intervenções corretivas antes que os problemas se agravem. Além disso, a fotointerpretação desempenha um papel fundamental no monitoramento contínuo, permitindo a avaliação da evolução dos danos ao longo do tempo e facilitando a implementação de medidas preventivas e/ou corretivas.

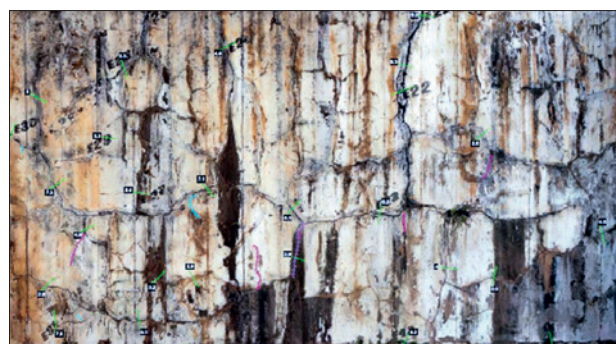
## 3. AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Para a avaliação da deterioração dos concretos dos protótipos afetados por reações expansivas foi determinado o índice de fissuração por inspeção visual e as fissuras foram classificadas a partir das imagens feitas por inspeção com drone.



### FIGURA 2

ANOMALIAS OBSERVADAS NO ANO DE 2022



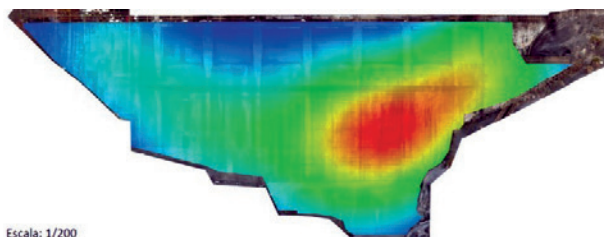
### FIGURA 3

ANOMALIAS OBSERVADAS NO ANO DE 2023. NOTAR A EVOLUÇÃO DAS ANOMALIAS ENTRE 2022 (FIGURA 2) E 2023 (EM 2023 SOMENTE O AUMENTO DO COMPRIMENTO FOI DESTACADO)

### 3.1 Índice de deterioração por inspeção visual

Para a determinação do grau de fissuração (ou índice de fissuração-IF) dos protótipos analisados (Figura 5), foi utilizado o método baseado no procedimento N° 47 do LCPC<sup>1</sup> (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), atual IFS-TAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux*). Este método permite quantificar e monitorar a evolução do estado de fissuração superficial de uma região da estrutura de concreto que apresenta fissuração por reações expansivas.

Segundo o método N° 47 do LCPC, é feita uma marcação sobre a superfície de concreto (Figura 6), composta por quatro eixos graduados a cada 10 cm, sendo um eixo vertical (OA) e um eixo horizontal (OB) do



**FIGURA 4**

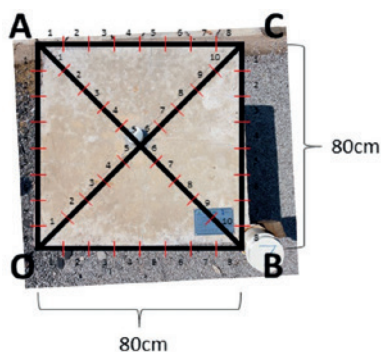
EXEMPLO DE MAPA DE DENSIDADE DE FISSURAS NO PARAMENTO JUSANTE DA BARRAGEM. NOTAR MAIOR CONCENTRAÇÃO PRÓXIMA À ROCHA DE APOIO DA OMBREIRA ESQUERDA



**FIGURA 5**

VISTA GERAL DOS PROTÓTIPOS NO CAMPO DE ENVELHECIMENTO DA ELETROBRAS (ESTADO: GOIÁS)

mesmo comprimento e dois eixos inclinados (AB e OC) de 45° em relação aos eixos horizontal e vertical em uma área de 1 m<sup>2</sup>.



**FIGURA 6**

MODELO DE QUADRANTES DESENHADOS NO CONCRETO DA FACE SUPERIOR DOS PROTÓTIPOS

Com quadrantes marcados e identificados pelos eixos na superfície do concreto, a leitura da abertura da fissura é feita nas proximidades do eixo perpendicular à sua direção principal. O índice de fissuração (IF) é o resultado obtido pela média global de determinações das aberturas de fissuras em elementos de concreto, por meio de medições em quadrantes pré-determinados, sendo o resultado apresentado em (mm/m).

Estudos prévios realizados pelo LCPC (1997) possibilitam classificar a importância das fissuras presentes nas estruturas de concreto após a inspeção visual, conforme Tabela 1. Todas as fissuras com abertura superior a 0,05 mm foram medidas com o auxílio do fissurômetro de 0,05 até 2 mm de abertura e de lupa micrométrica (Figura 7). Para avaliar o IF do concreto, as medidas das fissuras na face superior do protótipo foram feitas em quatro idades distintas: 1,5 anos, 2 anos, 2,5 anos e 3,5 anos.

Nas Figuras 8, 9 e 10, é possível observar o IF obtido ao longo do tempo dos protótipos analisados em comparação com o concreto de referência, sem deterioração. Os protótipos foram confeccionados com concreto do tipo bombeável, e uma dosagem contendo alto consumo



**FIGURA 7**

FISSURÔMETRO E LUPA MICROMÉTRICA UTILIZADOS PARA LEITURA DE ABERTURA DAS FISSURAS (EM MM)

**TABELA 1**

ESCALA DE CARACTERIZAÇÃO DE FISSURAÇÃO PELO ÍNDICE DE FISSURAÇÃO

Valor IF	Importância da fissura
0 a 0,5	Insignificante
0,5 a 1	Baixo
1 a 2	Moderado
2 a 5	Forte
5 a 10	Muito Forte
>10	Considerável

FONTE: LCPC (1997)

<sup>1</sup> MÉTHODE D'ESSAI N° 47 - DÉTERMINATION DE L'INDICE DE FISSURATION D'UN PAREMENT DE BÉTON. LCPC (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT. ISSN 1167-489X, FRANÇA, 1997.

de cimento tipo CP V ARI (470 kg/m<sup>3</sup>) e relação água-cimento (a/c) igual a 0,46. A classe de resistência desse concreto é de 40 MPa.

Com base nos índices de fissuração determinados por meio de inspeção visual, verificou-se que o concreto do protótipo de referência se manteve abaixo de 0,5 até a idade de 2,5 anos e, após 3,5 anos, apresentou resultado igual a 0,60 podendo ser classificado com importância “insignificante” e “baixo”, respectivamente. Como esperado, essas fissuras não apresentam importância significativa considerando a sua confecção com agregados comprovadamente inócuos e com temperatura máxima atingida pelas reações de hidratação do cimento igual a 53,4°C, o que impediu o risco do surgimento da RAA e DEF, respectivamente, até a idade avaliada.

O índice de fissuração do concreto do protótipo com DEF apresentou evolução ao longo do período de análise. Com 1,5 anos de idade, pode ser classificado como “moderado” devido ao índice de fissuração igual a 1,4. Após 2 anos, apresentou IF igual a 7,4 podendo ser classificado como “muito forte”. Após 3,5 anos apresentou índice igual a 11,8 com importância das fissuras “considerável”. Entre 1,5 e 2,5 anos, notou-se uma evolução significativa do IF, onde o índice na idade de 2,5 anos é 5 vezes maior em relação ao determinado na idade de 1,5 anos. Isto provavelmente ocorreu devido ao maior ingresso de umidade ao interior do concreto quando do aparecimento das fissuras, mostrando assim a sua maior cinética de reação devido à formação dos produtos expansivos. A temperatura máxima monitorada no interior do concreto quando da sua confecção foi bastante elevada e igual a 94,4 °C (> 60-65 °C), o que indica maior probabilidade de danos futuros por DEF, apenas, uma vez que o agregado empregado no concreto foi classificado como potencialmente inócuo pela NBR 15577/3 (2018)<sup>2</sup>.

Para o protótipo com RAA, verificou-se uma importância de fissuração “insignificante” até os primeiros 2,5 anos de análise. Após 3,5 anos, notou-se que o IF foi igual a 1,1 sendo as fissuras classificadas com importância “moderada”. Nesta idade,

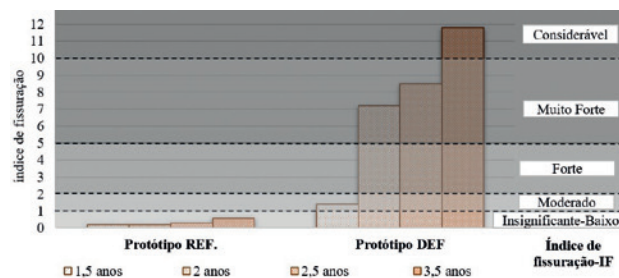
o índice de fissuração se mostrou 56% superior ao IF do concreto de referência. As observações realizadas e quantificação do quadro fissuratório mostrou que, apesar da menor cinética de reação da RAA em relação à DEF nos primeiros anos, a expansão provavelmente ainda irá continuar, haja vista a presença de minerais reativos presentes na rocha empregada como agregado (tipo granito potencialmente reativo). Ainda, com a evolução observada da abertura das fissuras, ocorrerá maior aporte de água e/ou umidade para o interior do concreto a partir do meio no qual o bloco está exposto, além das demais variações das intempéries. A temperatura máxima monitorada no interior deste concreto após a sua moldagem foi igual a 57,3°C, o que indica o potencial de desenvolvimento apenas da RAA pela presença de agregado reativo do tipo granito, comprovado em campo.

### 3.2 Inspeção por drone e processamento de imagens

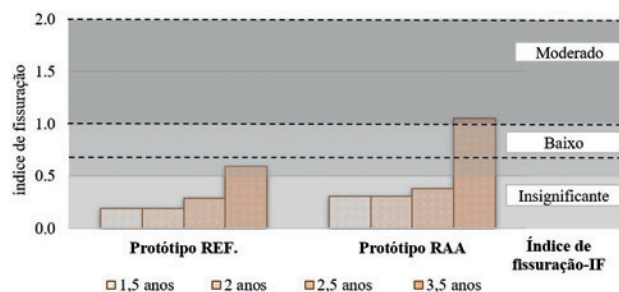
Nesta etapa da avaliação, foi realizada a aquisição de imagens georreferenciadas, por meio de RPAS/DRONE, para a elabora-

ção de um modelo tridimensional de cada protótipo de concreto e mapeamento/monitoramento das anomalias existentes nas suas 5 faces expostas ao ambiente. O protocolo de trabalho foi dividido em três etapas:

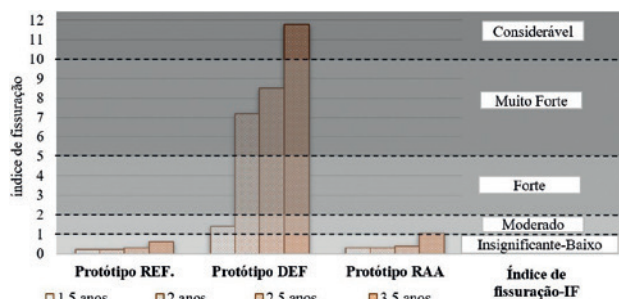
1. Parâmetros de voo e de aquisição;
2. Pós-processamento e detecção das anomalias;
3. Comparação com os dados anteriores.



**FIGURA 8**  
IF DOS PROTÓTIPOS REFERÊNCIA E COM DEF



**FIGURA 9**  
IF DOS PROTÓTIPOS REFERÊNCIA E COM RAA



**FIGURA 10**  
IF DOS PROTÓTIPOS REFERÊNCIA, COM DEF E COM RAA

<sup>2</sup> ABNT NBR 15577-3 – AGREGADOS – REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO PARTE 3: ANÁLISE PETROGRÁFICA PARA VERIFICAÇÃO DA POTENCIALIDADE REATIVA DE AGREGADOS E, PRESENÇA DE ÁLCALIS DO CONCRETO, 2018.

### 3.2.1 PARÂMETROS DE VOO E DE AQUISIÇÃO

Para realizar a medição de fissuras com uma abertura de até 0,5 mm, é preciso atingir um GSD (*Ground Sample Distance*) inferior ou igual a esse valor. A câmera utilizada no drone, de modelo P1 da marca DJI, possui uma lente de 24 mm de distância focal. A Equação 1 apresenta o cálculo do GSD e a Figura 11 os parâmetros.

$$[1] \quad GSD = \frac{(H \cdot S_w)}{(F \cdot imH)}$$

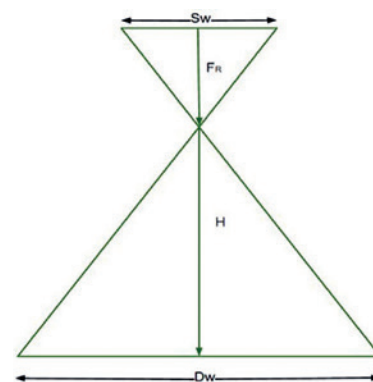
Nesse caso, a distância de voo foi pequena (1 m) e o GSD atingido foi de 0,18 mm/pix, uma vez que os estudos foram executados em protótipos na estação de envelhecimento da Eletrobras (Goiânia/GO).

Em seguida, com o software *Agisoft Metashape*, foi criado um plano de voo automático, com 80% de recobrimento entre cada foto, para realizar a aquisição das imagens. Assim, com uma média de 60 fotos por face dos cubos de concreto, conseguiu-se uma reconstrução precisa dos protótipos e das suas anomalias.

### 3.2.2 PÓS-PROCESSAMENTO E DETECÇÃO DAS ANOMALIAS

As fotos tomadas para cada face (total de 300 fotos por bloco de concreto, aproximadamente) foram compiladas no software *Agisoft Metashape* e foi elaborado um ortomosaico de cada face do protótipo.

Essa técnica permite desenvolver uma imagem 2D da face, sem nenhuma distorção ótica, além de manter as dimensões



$S_w$ : largura do sensor da câmera em mm  
 $S_h$ : comprimento do sensor da câmera em mm  
 $F$ : o comprimento focal da lente da câmera  
 $H$ : a altura de voo  
 $imW$ : largura da imagem  
 $imH$ : altura da imagem  
 $D_w$ : largura da sombra da imagem no solo  
 $D_h$ : altura da sombra da imagem no solo

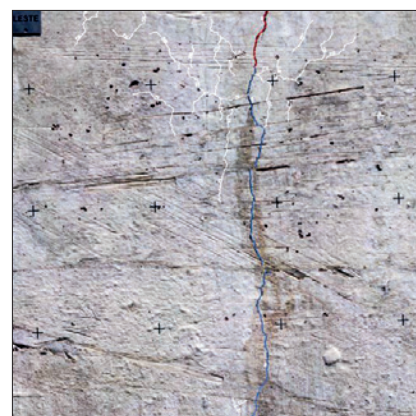
**FIGURA 11**  
PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO GSD



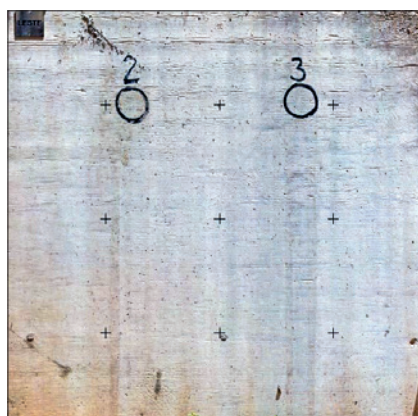
**A** Protótipo REF. (2022)



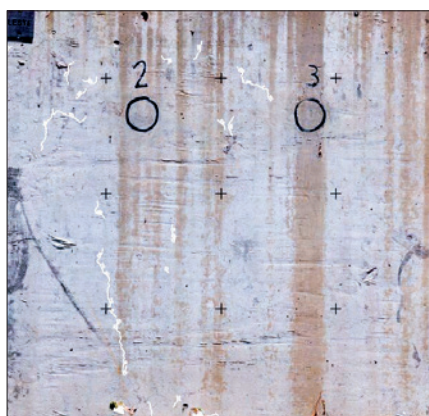
**B** Protótipo RAA (2022)



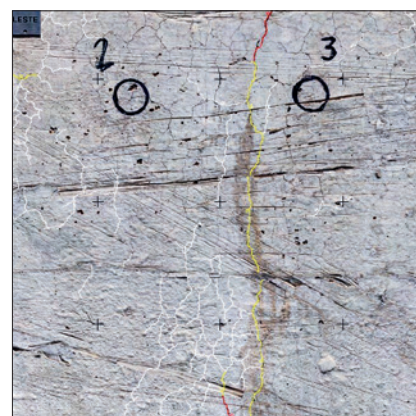
**C** Protótipo DEF (2022)



**D** Protótipo REF. (2023)



**E** Protótipo RAA (2023)



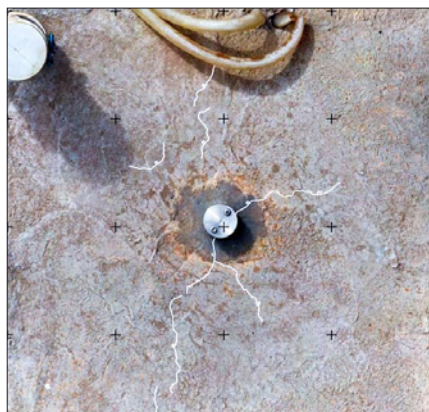
**F** Protótipo DEF (2023)

### FIGURA 12

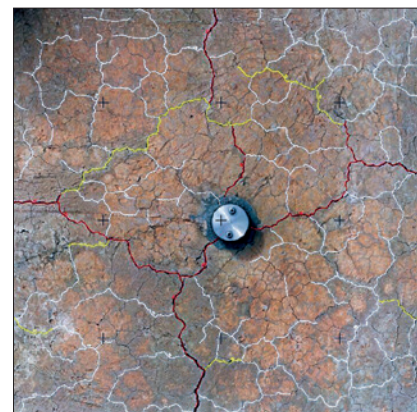
ORTOMOSAICOS DA FACE LESTE DOS PROTÓTIPOS (INSPEÇÕES EM 2022 E 2023)



**A** Protótipo REF.



**B** Protótipo RAA



**C** Protótipo DEF

### FIGURA 13

ORTOMOSAICOS – TOPO DOS PROTÓTIPOS – INSPEÇÕES EM 2023

fidedignas das anomalias existentes. O estudo em pauta foi realizado para 14 protótipos de concreto em duas idades de análise.

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos envolvendo três protótipos eleitos (Referência, sem ataque; atacado por RAA; atacado por DEF) e a face Leste e o topo. Na Figura 12 constam os ortomosaicos das faces (Leste) dos protótipos processadas a partir das inspeções realizadas em setembro de 2022 e de 2023.

Foi possível verificar visualmente a evolução do quadro fissuratório também no topo dos protótipos, região de maior incidência de sol e de chuvas.

Na Figura 13, constam os ortomosaicos com as imagens do topo dos 3 protótipos avaliados. É possível visualizar o avanço da DEF, e de forma mais acentuada em termos de fissuração ativa ao ser comparado com a RAA.

As fissuras foram classificadas segundo as dimensões da sua abertura média conforme mostra a Tabela 2.

### TABELA 2

CLASSIFICAÇÃO DAS FISSURAS EM FUNÇÃO DA SUA ABERTURA MÉDIA

Tipo de anomalia (Fissuras)	Largura da abertura	Cor
F1	0,2 até 1 mm	Branco
F2	1 até 2 mm	Amarelo
F3	> 2 mm	Vermelho

### 3.3.3 COMPARAÇÃO COM OS DADOS ANTERIORES

Após as medições de comprimento das fissuras existentes nos protótipos, os dados foram agrupados e todas as 5 faces expostas dos protótipos foram consideradas no cálculo final para cada faixa de abertura da fissura. Em seguida, foi feita uma análise comparativa entre os valores encontrados em 2022 e 2023.

Na Tabela 3, mostra-se a quantificação das fissuras existentes nas 5 faces. Com base nesta primeira análise notou-se maiores comprimentos de fissuras F1, F2 e F3 no protótipo com DEF. Verificou-se um aumento no comprimento total de fissuras nos três protótipos analisados no período de 1 ano. Este aumento foi igual a 214%,

146% e 60% para aqueles com DEF, RAA e REF, respectivamente. O protótipo com DEF apresentou número de fissuras 3,25 vezes superior em relação ao protótipo com RAA no ano de 2022 e 4,15 vezes superior no ano seguinte.

Não foram quantificadas fissuras F2 e F3 no protótipo com RAA e na REF. No ano de 2022. No protótipo de REF, foram observadas poucas fissuras F2, não sendo observadas fissuras F3. Já, para o protótipo com DEF, foram observadas fissuras F1 e F3 nas inspeções realizadas em 2022 e 2023, com um aumento de fissuras F2 de 53% entre o período analisado. A porcentagem negativa de fissuras F2 do protótipo com DEF no período analisado se explica pelo fato que algumas fissuras F2 se tornaram F3 e, por outro lado, não houve um

### TABELA 3

CLASSIFICAÇÃO DAS FISSURAS EM FUNÇÃO DA SUA ABERTURA MÉDIA E COMPRIMENTO – INSPEÇÃO POR DRONE

Fissuras identificadas nos protótipos	Ano	REF	RAA	DEF
F1 (cm)	2022	65.7	297.0	968.2
	2023	105.1	731.2	3039.6
Aumento	%	60%	146%	214%
F2 (cm)	2022	0.0	0.0	256.3
	2023	26.7	0.0	142.7
Aumento	%	∞	0%	-44%
F3 (cm)	2022	0.0	0.0	118.9
	2023	0.0	0.0	182.3
Aumento	%	0%	0%	53%

aumento suficiente de fissuras que poderiam ser classificadas como do tipo F2.

Com base nos resultados das inspeções visuais e com o uso do drone com processamento das imagens, foi possível avaliar uma boa correlação entre elas para o período de analisado. O protótipo de REF foi classificado com IF “insignificante” até “baixo” com base na inspeção visual, enquanto pela inspeção por drone foram observadas apenas fissuras do tipo F1, com abertura variando de 0,20 mm até 1 mm.

Com base na inspeção por drone, o protótipo com RAA apresentou maior densidade de fissuras F1 em relação ao da REF, além de um aumento da sua quantidade no período avaliado. Não foram observadas fissuras com abertura superior a 1 mm para o período estudado. Este comportamento também foi verificado por meio da inspeção visual, onde o IF variou de “insignificante” até “moderado” entre 2022 e 2023.

Já, no caso do protótipo com DEF, por meio da inspeção visual foi classificado com IF “muito forte” em 2022 e “considerável” em 2023, indicando um aumento importante deste índice em apenas 1 ano, indicando um processo deletério mais acelerado quando comparado à RAA. O mesmo comportamento foi observado com base na inspeção realizada por drone, onde foram observadas as três faixas de fissuras (F1, F2 e F3). Além disso, por meio das imagens geradas a partir da inspeção por drone, foi verificado aumento da quantidade de fissuras F1, F2 e F3 no bloco inspecionado.

A partir das inspeções visuais e por drone, o comportamento verificado foi coerente entre essas técnicas: maior o comprimento e abertura das fissuras, maior é o índice de fissuração do concreto. As análises serão continuadas com outros protótipos, tipos de cimento e ataques, de forma a verificar novas correlações.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa publicação teve como o objetivo mostrar a associação de técnicas investigativas no monitoramento de estruturas de concreto acometidas por reações expansivas. O emprego do drone durante as inspeções em campo se mostra uma prática atrativa, pois, além de permitir a agilidade na obtenção das imagens e sintomas característicos, permite o acesso a regiões não possíveis de serem inspecionadas visualmente por um especialista.

Ainda, os estudos realizados com os protótipos de concreto expostos ao ambiente e induzidos aos dois tipos de reações expansivas (RAA e DEF) indicaram também a importância da determinação do índice de fissuração ao longo do tempo, por meio das inspeções visuais, além das investigações mais detalhadas por meio do processamento das imagens obtidas por drone.

Foram observadas ainda diferenças de comportamento entre a RAA e a DEF por meio das duas técnicas avaliadas, representando a DEF um processo deletério mais intenso nas idades avaliadas, tendo como base o desenvolvimento do quadro fissuratório. A RAA, com base no

tempo de avaliação realizado, se mostrou mais lenta do que a DEF até a idade de 3,5 anos, como esperado. Já, a partir de 2,5 anos, esta reação apresentou um salto, atingindo o índice de fissuração de “1,1”, o que indica uma potencialização e aceleração das expansões internas, haja vista o atingimento de fissuras acima do grau 1, representando uma importância de fissuração “moderada”. Por outro lado, para a DEF o salto ocorreu antes, entre 1,5 e 2 anos. Após essa última idade, o crescimento do índice de fissuração foi gradativo, ao longo do tempo, chegando com 3,5 anos a um patamar bastante elevado de “12”, o que representa um nível “considerável” de fissuração. A amostra de referência, sem reações instaladas e fissuração, se manteve com índice abaixo de “1” (igual a 0,6).

Em campo, a aplicação da inspeção via drone confirmou a eficácia da técnica e a coerência com os resultados obtidos a partir da inspeção visual, o que indica o seu potencial de uso para a continuidade do monitoramento de estruturas de concreto ao longo do tempo. Essas práticas, associadas aos dados de instrumentação, podem auxiliar na avaliação da evolução das reações expansivas e, por conseguinte, na tomada de ações, medidas corretivas e eventuais intervenções que se fizerem necessárias.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro e de infraestrutura de Eletrobras/ANEEL, por meio de projeto de P&D FURNAS ANEEL nº PD 0394-1504-2015.

#### ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. Capítulo 26. Concreto: Ciência e Tecnologia. Volume 2. 3ª Edição. Ed. IBRACON, 2022, 1134 p.
- [2] HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; FUNAHASHI JR, E. I.; VICENTE, G. R. GAMBALE, E. A. Recomendações técnicas para a prevenção da DEF e da fissuração térmica do concreto. 1ª Edição. Goiânia, GO: Arte Interativa, 2023, 76 p.
- [3] FUNAHASHI JR., E. I., HASPARYK, N. P., POSSAN, E. KUPERMAN, S. C.. Deterioração do concreto de barragens e usinas hidrelétricas devido ao ataque combinado de RAA/DEF. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens-CBDB. Foz do Iguaçu, PR, 2023, 20 p.
- [4] HASPARYK, N. P. et al. Prática recomendada — inspeção de estruturas de concreto visando avaliar manifestações da reação álcali-agregado (RAA) e etringita tardia(DEF). 1ª Edição. Ed. Ibracon — CT 201 — Comitê Técnico de Reações Expansivas, 2023, 50 p.
- [5] HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. ; BRONHOLO, J. L.; OLIVEIRA S.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; MEDEIROS, B. L. ; PORTELLA, K. F. Concrete block sites in Brazil for assessing ASR, ISA and coupled attack over time. Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete — 16th ICAAR, Ed. LNEC, v. 1, p. 1329-1340 Lisboa, Portugal, 2022.
- [6] DING, W.; YANG, H.; YU, K.; SHU; J.. . Crack detection and quantification for concrete structures using UAV and transformer. Automation in Construction. ScienceDirect, 19p., 2023.