

**DETERIORAÇÃO DO CONCRETO DE BARRAGENS E USINAS  
HIDRELÉTRICAS DEVIDO AO ATAQUE COMBINADO DE RAA/DEF –  
ESTUDOS DE CASOS**  
CONCRETE DETERIORATION OF DAMS AND HYDROELECTRIC POWER  
PLANTS DUE TO THE JOINT ATTACK OF AAR/DEF – CASE STUDIES

Eduardo FUNAHASHI <sup>(1)</sup> / Nicole HASPARYK <sup>(2)</sup> / Edna POSSAN <sup>(3)</sup> / Selmo  
KUPERMAN <sup>(4)</sup>

(1) Me. Engenheiro civil-Desek (2) Dra. Engenheira civil- Eletrobras Furnas (3)  
Prof. Dra. Engenheira civil - UNILA (4) Consultor-Desek

**RESUMO**

No Brasil existem muitas estruturas de concreto de barragens e usinas hidrelétricas afetadas por reações expansivas de origem interna. A deterioração do concreto por estes tipos de reação pode ocorrer individualmente devido à reação álcali-agregado (RAA) e ao ataque por sulfatos, como a DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Dependendo das condições construtivas e materiais utilizados no concreto há o risco do ataque combinado de RAA/DEF. Entre os problemas que podem ser causados por estes tipos de manifestações patológicas estão os travamentos de comportas de vertedouros e de grades de tomadas d'água, deslocamentos diferenciais em casas de força afetando a geração de energia, podendo afetar a segurança das estruturas. Devido a esses problemas é inevitável prever monitoramento, manutenções e recuperações periódicas e não inicialmente previstas, que resultam em elevados custos para os proprietários. Para avaliar as condições atuais de durabilidade dos concretos de dois casos reais com mais de 50 anos e que apresentavam estes tipos de anomalias, foram realizadas investigações laboratoriais. Os estudos comprovaram o ataque combinado devido a RAA/DEF e mostraram as suas consequências nas propriedades mecânicas do concreto.

**ABSTRACT**

In Brazil there are many concrete structures of dams and hydroelectric power plants affected by internal expansive reactions. The deterioration of concrete by these types of expansive reactions can occur individually due to alkali-aggregate reaction (ASR) and attack by sulfates, such as DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Depending on the constructive conditions and materials used in the concrete, there is a risk of combined attack by AAR/DEF. Among the problems that can be caused by these types of pathological manifestations are the locking of spillway gates and water intake trash racks, differential displacements in powerhouses affecting energy generation, which may affect the safety of structures. Due to these problems, it is inevitable to foresee monitoring, maintenance, and periodic and not initially foreseen repairs, which result in excessive costs for the owners. In order to evaluate the current conditions of durability of the concretes of two real cases with more than 50 years and that presented these types of anomalies, laboratory investigations were conducted. The studies confirmed the combined attack due to AAR/DEF showing its consequences on the mechanical properties of concrete.

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de obras de infraestrutura como usinas hidrelétricas, barragens, parques eólicos, usinas nucleares, pontes, entre outras, demandam o emprego de grandes quantidades de materiais para os concretos, principalmente agregados e cimento. Dependendo da qualidade destes materiais e das características do meio ambiente, os concretos podem estar sujeitos a condições propícias para o desenvolvimento de interações químicas que afetarão precocemente a durabilidade e vida útil. A escolha criteriosa dos materiais, em conjunto com a aplicação de técnicas construtivas e de controle tecnológico apropriados na fase inicial do projeto, contribuem para a prevenção da deterioração das estruturas de concreto.

Muitas barragens e usinas hidrelétricas foram construídas no início do século XX, quando não havia procedimentos de ensaios padrão, tão poucas limitações quanto a composição química e caracterização dos materiais constituintes de concreto. Devido a isso, algumas delas apresentaram algum tipo de problema devido a reações expansivas no interior do concreto. Entre os principais problemas, estão os operacionais, como travamentos de comportas de vertedouros e grades de tomadas d'água, deslocamentos diferenciais em casas de força, que podem impactar na geração de energia, afetando a segurança das estruturas. Estes tipos de reações deletérias resultam em elevados custos aos proprietários devido às manutenções frequentes, monitoramento e recuperações periódicas das estruturas, e que não extinguem o problema tornando-se uma solução paliativa, na sua maioria.

No Brasil, o fenômeno da RAA (reação álcali-agregado) está apoiado por meio de normas técnicas [1]. Em 2009 foi publicado um guia de prevenção da reação álcali-agregado [2] pelo IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) resultado das discussões ocorridas no âmbito do CT-201-Comitê Técnico de Reação Álcali-Agregado. Neste guia são abordados o fenômeno da RAA, a avaliação de risco de sua ocorrência, medidas preventivas, classificação da ação preventiva, ensaios laboratoriais medidas de mitigação e a tomada de decisão (conforme a [1], nas suas 6 partes). Devido aos vários casos de reações expansivas em estruturas devido à etringita tardia (DEF - *Delayed Ettringite Formation*) vivenciados por especialistas no Brasil, o CT-201 foi reativado abordando além da RAA, a DEF, isoladamente e de forma combinada.

Ao contrário da RAA, este cenário é totalmente oposto para a DEF no Brasil e também no mundo. Embora tenha sido descoberta em 1980 na Europa [3] *apud* [4], a DEF é um fenômeno de detecção mais recente, inclusive com poucos casos de obras divulgados no país, muitas vezes motivado por sigilo por parte dos proprietários. Não há normalização técnica nacional para a sua identificação. Existem publicações técnicas específicas nas quais cada pesquisador adota um tipo de procedimento em acordo com as suas experiências locais. Na maioria das vezes a identificação da DEF é de difícil diagnóstico visual, podendo ainda ser confundida com a RAA, sendo fundamental a realização de ensaios e análises específicas para a sua comprovação. Com o objetivo de avaliar o potencial de ocorrência da DEF, foi publicado procedimento laboratorial por Furnas [5]. Devido ao tempo de execução do ensaio (12 até 24 meses), falta de normalização de um método de ensaio e desconhecimento de parte de projetistas e de construtores, esse método ainda é pouco empregado. Em [6], foram apresentados vários casos de estruturas de blocos de fundações de

edificações atacados por RAA, DEF ou ambos associados, trazendo diretrizes para a minimização destes problemas em futuras obras. No caso de estruturas de barragens e usinas hidrelétricas, onde no passado havia diagnósticos apenas da RAA, com o avanço nas técnicas de diagnóstico e ensaios, tem sido verificada a associação de fenômenos expansivos devido à reação álcali-agregado (e, em especial, à RAS- reação álcali sílica) e à DEF, principalmente nos elementos de concreto massa.

A DEF/RAA podem ocorrer simultaneamente em estruturas de concreto caso estejam sujeitas às condições propícias. Além de barragens e usinas hidrelétricas, foram constatados casos em fundações de edificações, pontes e viadutos e dormentes curados à vapor [6-12]. A primeira reação a ser desencadeada depende da velocidade de desenvolvimento de cada uma no interior do concreto [4]. Quando uma das duas reações é iniciada, formam-se microfissuras na estrutura de concreto, o que acelera o desenvolvimento de ambas as reações devido à formação de caminhos preferenciais para a entrada de água e de íons para o seu interior [4]. Segundo [13], a maior presença do monossulfato do que da etringita, além de alta concentração de sulfatos tanto na solução dos poros como por adsorção na estrutura do C-S-H, é favorecida com o aumento do pH. Entretanto, quando o pH é reduzido, seja pela ocorrência da reação álcali-agregado, ou por lixiviação, a formação da etringita ocorre de forma favorável, propiciando condição para a ocorrência de ambas as reações. Mais recentemente, têm sido comuns os casos registrados de ocorrência concomitante de DEF e RAA [9, 14, 15]. O consumo de álcalis a partir da solução de poros devido à RAS pode levar à situação na qual a DEF é preferencial [13, 16]. No estudo realizado por [17], que considerou tanto o ataque individual quanto combinado de DEF/RAA, verificou-se que as expansões devido a RAS tiveram início após cerca de 1 ano, enquanto para a DEF ocorreu em 6 meses e, para o ataque conjugado em 3 meses, conforme análises por MEV/EDS. A DEF provoca uma redução mais significativa das propriedades mecânicas em comparação à RAS e, quando ocorre conjugada com a DEF, essa diminuição se torna ainda mais intensa.

Segundo [10], atualmente é viável evitar o aparecimento das reações expansivas (RAA, DEF, ISA- *Internal Sulfate Attack*, ESA-*External Sulfate Attack*) por meio de estudos adequados dos materiais e dos procedimentos construtivos a serem empregados em cada obra. Os autores afirmam, ainda, que não é mais possível aceitar passivamente o aparecimento de estruturas de concreto com deteriorações causadas por reações expansivas.

## 2. REAÇÕES EXPANSIVAS

Entre os tipos de ataques deletérios e que causam expansão interna do concreto e respectiva fissuração severa pode-se citar os ataques devido à reação álcali-agregado (RAA), com maior ocorrência da reação álcali-sílica (RAS) e os ataques devido aos íons sulfatos de diferentes fontes interna e externa. Além destes, podem ocorrer reações expansivas devido ao processo de corrosão e respectiva expansão das armaduras de aço no interior do concreto. Estes tipos de reações deletérias ao concreto e de origem endógena são consequência das interações químicas no seu interior e, em alguns casos, podem ocorrer de forma conjugada quando há interação de mais de um tipo na mesma estrutura.

O ataque por sulfatos pode ocorrer a partir de origens tanto interna (ISA) quanto externa (ESA). Entre as fontes externas, o sulfato pode estar presente na água, solo

e ar. No caso das fontes internas, estas podem estar presentes em algum dos materiais utilizados no concreto como cimento, adições minerais, agregados, água de amassamento e aditivos químicos [18]. A DEF é um dos tipos de ataque interno de sulfatos (ISA). Segundo [19] a DEF representa uma reação deletéria aos concretos submetidos à elevadas temperaturas, geralmente superiores a 60-65°C. Além da temperatura, a formação da DEF dependendo de diversos fatores, entre eles o tipo de cimento e suas características físico-químicas, a dosagem do concreto além das condições ambientais que o elemento de concreto estará submetido durante a sua vida útil [20]. Para evitar o eventual surgimento da DEF e de fissuras de origem térmica, é fundamental a realização de estudos térmicos para definição dos planos executivos com menor risco de fissuração como realizado para usinas hidrelétricas no Brasil [21,22].

No início da formação da DEF ocorre a dissolução do hidróxido de cálcio e, em um estágio mais avançado, a descalcificação do C-S-H [23]. Estudos recentes comprovam que a DEF prejudica as propriedades mecânicas do concreto reduzindo as resistências à compressão e à tração e o módulo de elasticidade [24-26].

De origem e mecanismo distinto da DEF, a RAS resulta em quadro fissuratório similar e em forma de mapa. Dependendo das restrições externas e internas (armaduras, protensão, rocha, por exemplo) impostas às estruturas, podem apresentar fissuras paralelas e longitudinais às armaduras, distinguindo-se das fissuras em forma de mapa.

O ataque combinado devido aos sulfatos no interior do concreto e RAA pode ocorrer quando são empregados agregados reativos aos álcalis em estruturas submetidas a elevadas temperaturas. Investigações realizadas por [7] em uma barragem de concreto construída na década de 70 com 102 m de comprimento de crista e 29 m de altura, e monitorada há mais de 25 anos mostraram fissuras e deslocamentos significativos não recuperáveis. Em alguns blocos foram observados deslocamentos de 200 mm e as expansões foram atribuídas à contaminação dos agregados por sulfeto de ferro (ISA) e reação álcali-sílica (RAS) combinados. Segundo os pesquisadores [7], de acordo com análises realizadas por MEV em amostras de concreto referentes a estudos realizados em 1993 e 2011 foi verificado que o gel cobria as agulhas de etringita, sugerindo que a etringita foi formada primeiro, antes do produto da RAS. Sendo assim, a RAS parece ter se desenvolvido em um ritmo mais lento. Nesse estudo realizado por [7], no vertedouro de uma barragem tipo gravidade de 100 m de comprimento e 14 m de altura construída em 1955, existiam fissuras horizontais ao longo das juntas de construção a jusante e na área visível das faces de montante, além de fissuras em forma de “mapa” na face montante da parede dos diques. A partir das análises microestruturais por DRX e MEV foi confirmada a presença de gel de RAS. A partir de modelagens matemáticas foi confirmada a maior probabilidade de a temperatura interna do concreto ter atingido níveis superiores a 70°C quando da hidratação do cimento, o que justificaria o ataque combinado.

Uma outra barragem, de arco-gravidade construída na década de 70, contendo 72,6 m de altura e crista com 195 m de comprimento apresentou regiões localizadas nas estruturas afetadas por reações expansivas devido ao ataque por sulfato interno (ISA). No concreto foi utilizado um determinado tipo de agregado na fase inicial da construção [8]. Segundo diagnóstico realizado pelos autores é possível que os agregados utilizados na primeira etapa da construção tenham sido potencialmente reativos e resultaram em reações expansivas no concreto, apresentando sulfetos de ferro na forma de pirita, além de quantidade significativa de etringita secundária e gel da reação álcali-sílica preenchendo fissuras e poros do concreto.

Os estudos de caso são importantes para compreender os efeitos dos diferentes tipos de reações expansivas que podem acometer as estruturas de concreto, e as suas implicações na operação, segurança e manutenção de usinas hidrelétricas. Informações sobre projetos, dados da construção, históricos de manutenções civis e de monitoramento por instrumentação, quando existentes, contribuem para as investigações. A inspeção de campo fornece evidências complementares aos ensaios laboratoriais, permitindo um diagnóstico preciso, como demonstrado nas estruturas analisadas neste trabalho.

### 3. ESTUDOS DE CASOS

Serão apresentados 2 casos nos quais foi diagnosticado o ataque combinado da RAS com a DEF. O caso 1 (Figura 1-a), refere-se a dois pilares de vertedouro com início da sua construção na década de 50 no Brasil, enquanto o caso 2 (Figura 1-b), refere-se a um muro de vertedouro de uma barragem com pouco mais de 80 anos. As estruturas de vertedouro estão sujeitas ao contato permanente ou sazonal com água e/ou umidade favorecendo a evolução das reações expansivas investigadas neste estudo. Com base no histórico das estruturas de concreto, documentos técnicos disponíveis e inspeção visual, foram indicados os locais para serem realizadas as extrações dos testemunhos de concreto nestes elementos. Para a escolha dos locais, foi levada em consideração as condições logísticas e de exequibilidade dessas extrações. Durante a inspeção foram observadas nas estruturas de concreto fissuras em forma de “mapa” com deposição de material esbranquiçado no seu interior, além do descolamento e/ou separação de parte do concreto em alguns locais.



FIGURA 1 – a - Caso 1 - Pilares de vertedouro; b - Caso 2 - Muro de vertedouro de barragens no Brasil

Consta da Figura 2 testemunhos de concreto extraídos dos pilares do caso 1 com presença de material esbranquiçado na borda dos agregados e coloração mais escura da argamassa.



FIGURA 2 - Detalhe de testemunhos de concreto extraídos dos pilares do caso 1

## 4. INVESTIGAÇÕES E EXPERIMENTOS

O diagnóstico de manifestações patológicas nas estruturas de concreto de usinas hidrelétricas e em barragens engloba algumas etapas de investigações e experimentos. Inicialmente e quando disponíveis, é fundamental dispor dos projetos e especificações técnicas da época da construção, além informações relacionadas aos eventuais danos pré-existentes nas suas diferentes partes, bem como ter conhecimento do histórico de intervenções e/ou recuperações. O histórico de operação de equipamentos como comportas, *stop-logs*, pórticos, pontes rolantes e turbinas, por exemplo, são relevantes para o melhor diagnóstico. Informações relacionadas à construção, aos materiais constituintes do concreto, monitoramento das eventuais movimentações das estruturas, caso existente, complementam as investigações iniciais que subsidiaram a escolha dos locais e tipos de ensaios. De posse destas informações são feitas as inspeções em campo para avaliar visualmente as condições dos concretos e escolher os locais dos ensaios.

Os testemunhos de concreto foram extraídos com 10 cm de diâmetro, em atendimento à norma [27]. As amostras foram identificadas como P1-c1 e P2-c1 para os pilares do caso 1 e VT-c2 para o muro do vertedouro do caso 2. Foram realizados ensaios mecânicos, físicos, químicos, além de análises microestruturais, conforme detalhado, a seguir:

Ensaio físico - Para as amostras de concreto P1-c1, P2-c1 e VT-c2 foram realizadas as determinações da absorção de água, índice de vazios e densidade do concreto segundo a norma [28].

Resistência à compressão e à tração ( $f_c$  e  $f_t$ ) - Foram extraídos três (03) testemunhos de concreto para os ensaios de resistência à compressão ( $f_c$ ), segundo a norma [29]. Em seguida, os concretos foram mantidos nas condições ambientais do laboratório pelo período de 72 horas, no mínimo, conforme a norma [30]. A massa específica do concreto foi calculada dividindo o valor da sua massa pelo volume da amostra. Não foram realizados ensaios de resistência à tração ( $f_t$ ) para as amostras P1-c1 e P2-c1 do caso 1. Este ensaio foi realizado para a amostra VT-c2, do caso 2, segundo a norma [31].

Módulo de elasticidade estático ( $E_{c,i}$ ) - Os valores de  $E_{c,i}$  dos concretos das amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2 foram determinados a partir do SDT [32] em três (03) amostras de concreto, considerando a carga de 40% da resistência à compressão obtida dos concretos extraídos das estruturas.

Para avaliar a redução do módulo de elasticidade dos concretos analisados em relação ao SDT, o módulo de elasticidade estático do concreto,  $E'_{c,i}$ , foi estimado pela [33], considerando os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova extraídos das estruturas e agregado de origem gnáissica. Além disto, também foi calculado o módulo de elasticidade segundo [34] para o mesmo propósito.

Para as amostras P1-c1 e P2-c1, também foi estimado o módulo de elasticidade estático, denominado neste trabalho como  $E''_{c,i}$ , a partir dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) realizados nos concretos segundo a norma [35]. Segundo esta norma, o  $E_{c,d}$  representa o módulo de elasticidade tangente inicial medido em regime oscilatório induzido pela ação de forças alternadas externas ou por uma

excitação por impacto. Os ensaios de  $E_{c,d}$  foram realizados em três (03) testemunhos de concreto. Devido à situação dos concretos com fissuras e onde nitidamente ocorre uma reação expansiva na estrutura, para a determinação do módulo de elasticidade estático ( $E''_{c,i}$ ) foi determinado o  $E_{c,d}$  antes da realização do SDT. Em seguida, o  $E''_{c,i}$  foi estimado com o emprego da Equação 1.

$$E''_{c,i} = \frac{0,4275}{\rho} E_{c,d}^{1,4} \quad \text{Equação 1}$$

Nesta equação o módulo de elasticidade estático  $E''_{c,i}$  foi estimado a partir do  $E_{c,d}$  e da massa específica aparente ( $\rho$ ) do concreto.

- Teste de dano de rigidez (*Stiffness Damage Test*, SDT) - O método SDT é um ensaio relativamente novo, no Brasil, e que visa quantificar os danos ao concreto derivados de reações expansivas como a RAA e a DEF. Os dados de tensão x deformação obtidos quando da aplicação de cargas cíclicas em amostras de testemunhos de concreto são analisados e índices de dano de rigidez e de deformação plástica são determinados, podendo ser correlacionados com as expansões do concreto afetado por reações expansivas. Os parâmetros SDI (*Stiffness Damage Index*) e o PDI (*Plastic Deformation Index*) têm uma relação quase linear com expansões abaixo de 0,40%. Não existe norma técnica em âmbito mundial para esse tipo de ensaio e a interpretação dos resultados se baseia nas propostas de alguns autores, entre eles, [32] e [36-38].

- Reconstituição do traço de concreto - Foi adotado o procedimento [39] da ABCP, onde as amostras de concretos são submetidas ao tratamento térmico e químico. Por não se ter o conhecimento do tipo de cimento empregado na época da construção da obra, para os cálculos foi adotado valor de porcentagem de óxido de cálcio estimado de 60%, que representa a média obtida a partir de vários ensaios realizados com cimentos Portland. Baseado no traço em partes da massa e na massa específica, calcularam-se os consumos de cimentos estimados empregados nos preparos dos concretos referentes às amostras analisadas. Considerou-se um teor de água de hidratação correspondente a 0,30 em relação ao cimento anidro (relação água-cimento). Para o cálculo do consumo de cimento empregou-se a seguinte equação:

$$\text{Consumo de cimento} = \frac{M}{1 + A + \frac{a}{c}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$M$  = massa de cimento

$A$  = agregado total (areia + brita)

$\frac{a}{c}$  = fração de água retida pela hidratação em relação ao cimento anidro ( $\frac{a}{c} = 0,30$ )

Durabilidade do concreto com ênfase em reações expansivas - Para a avaliação da durabilidade dos concretos com ênfase em reações expansivas foram analisadas amostras de concreto [40-43] com o objetivo de contribuir com subsídios técnicos para investigação de possíveis ocorrências de reações expansivas. Além disso foram identificadas as principais características estruturais e texturais do concreto identificadas macroscopicamente e a olho nu.



Índice de deterioração do concreto (ID) ou DRI (*Damage Rating Index*) - Conforme instrução técnica [42], este índice tem por finalidade quantificar o dano causado ao concreto devido à presença da reação álcali-sílica e pode ser utilizado para quantificar danos causados também pela formação de etringita tardia ou ataque externo por sulfato [44,46]. A determinação do ID foi feita para testemunhos extraídos das estruturas de concreto. Em seguida, foram serrados e polidos e observados ao microscópio estereoscópico com ampliação de 16 x. Foi realizado este ensaio para a amostra VT-c2.

Determinação do teor de álcalis e sulfatos solúveis - Para a determinação dos teores de álcalis totais solúveis em ácido e água (Na e K) presentes nos concretos das amostras foi adotado o consumo de cimento estimado para os concretos conforme determinação da reconstituição do traço. O equivalente alcalino em  $\text{Na}_2\text{O}$  em  $\text{kg/m}^3$  no concreto foi calculado a partir de cálculo estequiométrico ( $0,658 \times \text{K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$ ) e o teor de álcalis no concreto ( $\text{kg/m}^3$ ) foi calculado considerando o consumo de cimento e a massa específica das amostras de concreto. Para a determinação do teor de sulfatos solúveis, os concretos analisados foram totalmente moídos com a argamassa e agregados, passando-se na peneira 200#.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados os principais resultados e discussões sobre os ensaios realizados para os casos 1 e 2.

### 5.1 Propriedades Mecânicas

Os resultados de resistência à compressão das amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2 foram iguais a 32 MPa, 31 MPa e 33 MPa, respectivamente. As estruturas de concreto referentes às amostras P1-c1 e P2-c1 são do início da década de 1950 e a VT-c2 da década de 1940. Os concretos foram especificados com 21 MPa aos 28 dias. Ensaio de corpos de prova moldados e estocados em laboratório com cimentos da época apresentam valores de até 75% de aumento da resistência após 50 anos e de até 100% com 86 anos [47]. O aumento da resistência à compressão dos concretos do caso 1 em relação ao  $f_{ck}$  de projeto foi de 52% (P1-c1) e 48% (P2-c1) e do caso 2 foi de 57%. No entanto, os valores obtidos nos ensaios são inferiores ao que seria de se esperar, embora estejam adequados se comparados com a resistência especificada no projeto. A variação da resistência à compressão entre os concretos estudados foi de 2 MPa, no máximo. A partir dos dados de ensaios notou-se que a fissuração não exerce tanta influência em valores de resistência à compressão, principalmente em casos que envolvem RAA quando há possibilidade de o gel da reação ocupar espaços vazios tais como poros e fissuras e inclusive aumentá-la, dependendo do estágio em que se encontra a reação [48]. Já a amostra VT-c2 apresentou resultado de resistência à tração por compressão diametral igual a 3,7 MPa, ou seja, 11% em relação ao seu resultado de resistência à compressão.

Ao contrário, o módulo de elasticidade foi menor quanto maior foi a deformação determinada pelo SDT. Os resultados do módulo de elasticidade estático,  $E_{c,i}$ , determinados em laboratório por meio do SDT para as amostras P1-c1 e P2-c1 foram



iguais a 28 GPa e 25 GPa, respectivamente, enquanto para a amostra VT-c2 foi igual à 18 GPa.

No caso dos concretos analisados e com agregados de origem gnáissica, a estimativa do módulo de elasticidade estático calculado empregando os dados de resistência à compressão dos testemunhos extraídos,  $E'_{ci}$ , das amostras P1-c1 e VT-c2 é igual a 32 GPa [33]. O  $E'_{ci}$  estimado para a amostra P2-c1 é igual a 31 GPa. Quando estes valores são comparados com os módulos determinados pelo SDT, as reduções são iguais a 12%, 20% e 44% para as amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2, respectivamente. Quando comparados com o módulo de elasticidade calculado segundo o [34], ( $E_{c,i} = 4730\sqrt{f_c}$ ) os valores são semelhantes para as amostras P1-c1 e P2-c1; apenas para amostra VT-c2 verificou-se redução da ordem 34%.

No caso das amostras P1-c1 e P2-c1, o módulo de elasticidade estático estimado,  $E''_{c,i}$ , calculado a partir do módulo dinâmico ( $E_{c,d}$ ), foi igual a 16 GPa e 13 GPa, respectivamente. As diferenças verificadas entre o  $E_{c,i}$ , determinado pelo SDT, e o  $E'_{c,i}$ , estimado por meio do  $E_{c,d}$  foram de 41% e 47% para as amostras P1-c1 e P2-c1, respectivamente. Possivelmente os menores valores de módulo de elasticidade estimados com base no  $E_{c,d}$ , ocorreram devido a existência de fissuras nos corpos de prova analisados.

A ocorrência de reações expansivas fica evidente ao se avaliar a redução do módulo de elasticidade das amostras analisadas em relação ao  $E'_{c,i}$  estimado segundo [33, 34]. Esta redução é esperada em concretos acometidos por reações expansivas, como a RAA e a DEF.

A partir dos resultados do SDT foram determinados os parâmetros SDI e PDI. A partir dos valores de SDI e baseados nos limites sugeridos por [38] para concretos afetados por DEF+RAS (a partir de dados da literatura internacional) e [26] para concretos afetados apenas por DEF (a partir de ensaios com materiais nacionais), foram estimadas as expansões e o nível de dano dos concretos.

Segundo [38] para concretos afetados pela DEF e RAA/DEF combinados, com o uso de diferentes tipos de agregados, os valores de SDI variam entre 0,11-0,43 para expansões variando entre 0,0% e 1,01%, e para valores superiores a 1,01% os valores do SDI variaram de 0,30 até 0,54. Já para [26] os valores do SDI variam de 0,10 a 0,50 para níveis de expansão variando entre 0,02% e 1,10%, enquanto os valores de PDI variaram de 0,01 até 0,27. [14], [26] e [38], por meio de seus estudos demonstraram a classificação do dano no concreto baseados nos valores de SDI e PDI correlacionando ao valor de expansão da amostra. Enquanto [38] classificaram o dano para concretos afetados por DEF e DEF+RAS desde “negligenciável” (SDI=0,11 para expansão de até 0,03%) até “ultra alto” ( $0,27 \leq \text{SDI} \leq 0,53$  para expansões variando de 0,49 até 1,01%), [26] classificaram o dano para concretos afetados por DEF desde “moderado” (SDI=0,10 e PDI=0,01; expansão variando de 0,02% até 0,03%) até “ultra alto” (SDI=0,53 e PDI=0,24; expansão variando de 0,53% até 1,10%). Com base em [38] e [26] foram previstas as expansões e o nível de dano para as amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2 conforma consta da Tabela 1.

Amostra	SDI	PDI	[38]		[26]	
			Expansão prevista	Nível do dano	Expansão prevista	Nível do dano
P1-c1	0,21	0,20	0,29% até 0,51%	Muito alto	-	-
P2-c1	0,24	0,25	0,29% até 0,51%	Muito alto	0,30% até 0,52%	Muito alto
VT-c2	0,33	0,27	0,49% até 1,01%	Ultra alto	0,53% até 1,10%	Ultra alto

TABELA 1 – Classificação do dano no concreto das amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2 com base na literatura - [38] e [26].

Com base nos ensaios realizados por [38], as amostras de concreto P1-c1 e P2-c1 podem ser classificadas com nível de dano “muito alto”, enquanto a amostra VT-c2 com nível de dano “ultra alto”. Segundo estes autores, para concretos afetados por DEF e DEF+RAS com nível de dano “muito alto” são previstas expansões variando de 0,29% até 0,51%, com reduções da resistência à compressão e módulo de elasticidade de 29-43% e 55-62%, respectivamente. Para concretos classificados com dano “ultra alto” é prevista expansão variando de 0,49% até 1,01% com redução da resistência à compressão de 40-47% e redução do módulo de elasticidade de 56-77%. Já com base nos estudos apresentados por [26] não foi possível realizar estas estimativas para as amostras ensaiadas considerando os valores de SDI referentes aos ensaios realizados nas amostras de concreto, onde variaram de 0,21 até 0,33. Segundo [26], os valores do SDI foram de 0,10 (nível de dano “moderado”) e superiores a 0,50 para nível de dano “alto”, “muito alto” e “ultra alto”. Já levando em consideração os dados obtidos para o PDI, foi possível classificar as amostras P2-c1 e VT-c2 com nível de dano “muito alto” e “ultra alto”, o que corrobora mesmos níveis de danos classificados por [38], porém, em [38], os dados de PDI não foram discutidos e confrontados com as expansões. Ainda, como para o concreto da amostra P1-c1 os valores de SDI e PDI são inferiores aos calculados por estes autores, não foi possível classificá-lo. Segundo [26] para nível de dano “muito alto” as expansões medidas foram de 0,30-0,52%, com reduções da resistência à compressão de 28%, da resistência à tração de 37% e do módulo de elasticidade de 68%. Para nível de dano “ultra alto” foram enquadradas as expansões determinadas em laboratório de 0,53-1,10%, com reduções da resistência à compressão igual a 64%, da resistência à tração igual a 59% e do módulo de elasticidade igual a 82%. É importante destacar que a variação dos tipos de cimentos e agregados empregados e suas características, em cada caso, por gerar oscilações nos índices SDI e PDI, portanto, cuidados devem ser tomados quando se deseja obter uma classificação de dano.

No presente trabalho o menor módulo de elasticidade foi verificado para o concreto com maiores valores de SDI e PDI, como esperado, e a expansão prevista foi elevada, variando de 0,49% até 1,01% com base em [38] e de 0,53% até 1,10% segundo [26], conforme mostra a Figura 3.

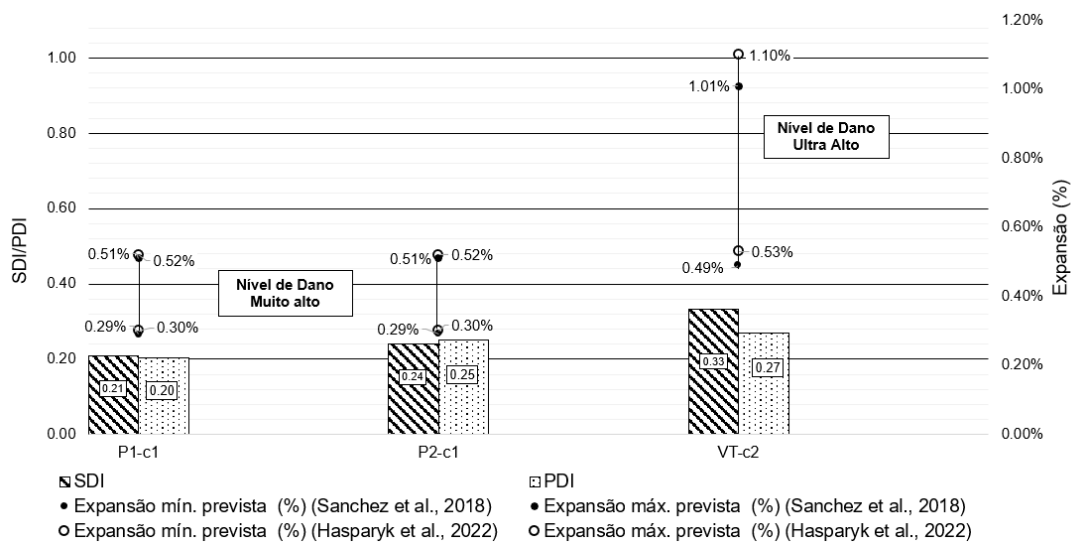


FIGURA 3 – Índices SDI e PDI obtidos pelo SDT, estimativa das expansões e nível de dano [36] e [26].

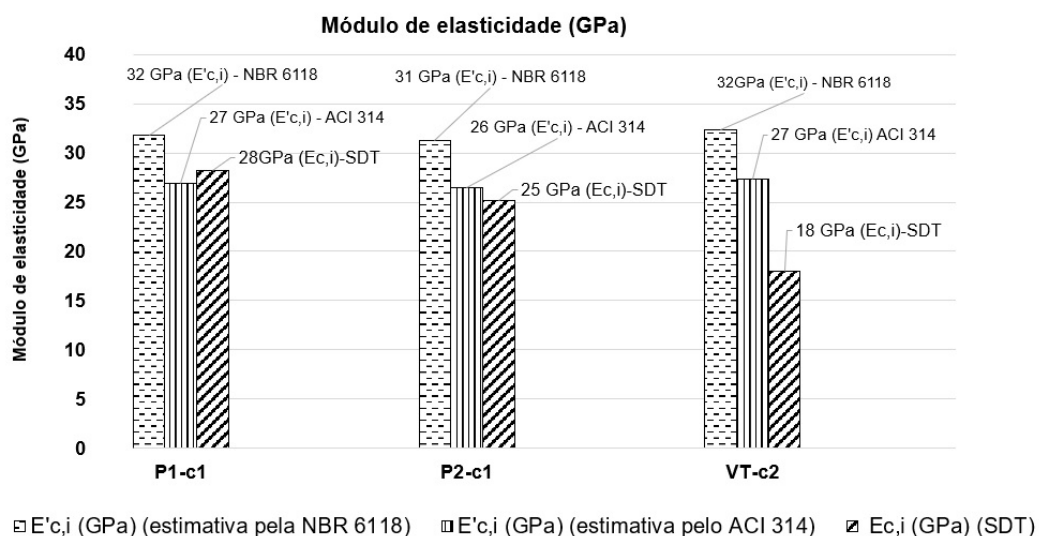


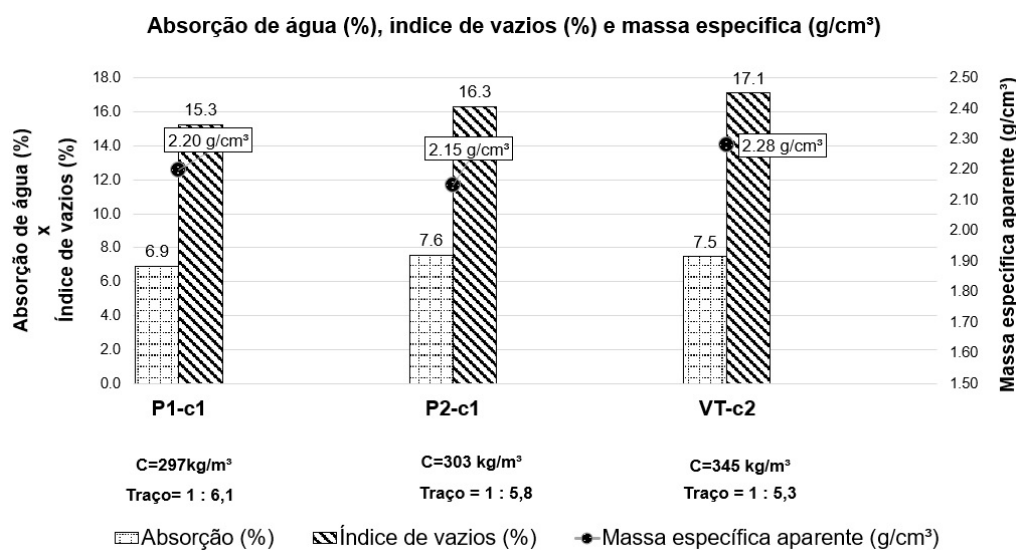
FIGURA 4 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estimado (NBR 6118 [33] e ACI 314 [34]), módulo de elasticidade estático determinado em laboratório via SDT e expansão classificada a partir da literatura (em função do SDT).

As reduções do módulo de elasticidade verificadas para as amostras P1-c1 e P2-c1 em relação ao módulo estimado pela [33], classificadas com nível de dano “muito alto”, foram de 12% e 20%, respectivamente, enquanto para a amostra VT-c2 classificada com nível de dano “ultra alto” foi igual a 44%. Estas reduções são inferiores àquelas verificadas por [38] para concretos afetados por DEF e DEF+RAS e por [26] considerando concreto afetado apenas por DEF. Quando os módulos de elasticidade determinados pelo SDT são comparados com os valores estimados pelo [34] é verificada redução de 34% para a amostra VT-c2, apenas. Os módulos determinados pelo SDT para as amostras P1-c1 e P2-c1 pouco variaram em relação ao estimado pelo [34].

## 5.2 Ensaio físicos

Foram realizados ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica para as amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2. A absorção de água dos concretos variou de 6,9% a 7,5%, o índice de vazios de 15,3% até 17,1% e a massa específica girou entre 2,15 g/cm<sup>3</sup> e 2,28 g/cm<sup>3</sup>.

A reconstituição de traço possibilitou avaliar, nas amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2, o consumo de cimento e a proporção do traço de concreto (cimento: agregado total (miúdo+grauído)). Os consumos de cimento variaram de 297 kg/m<sup>3</sup> até 345 kg/m<sup>3</sup>, que são considerados elevados para concreto massa e indicam maior probabilidade de elevação da temperatura do concreto. Considerando o coeficiente de elevação adiabática médio de concretos produzidos com diferentes teores de material pozolânico igual a 0,150°C/kg/m<sup>3</sup> segundo [49], a elevação adiabática estimada para os concretos ensaiados poderia atingir cerca de 45°C até 52°C, indicando maior risco fissuras de origem térmica e de etringita tardia (DEF). A depender da temperatura ambiente no momento de lançamento dos concretos, as temperaturas no interior dessas estruturas podem ter atingido níveis superiores à 70°C. A Figura 5 mostra os resultados dos ensaios de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos, além do consumo de cimento e respectiva proporção do traço.



**FIGURA 5 – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto**

O [50] limita em 8% o valor de absorção de água e em 17% o valor máximo do índice de vazios para obtenção de um concreto durável e impermeável, desde que as outras características especificadas para o material sejam atendidas. A absorção de água das amostras P1-c1, P2-c1 e VT-c2 variou de 6,9% até 7,5%, enquanto o índice de vazios variou de 15,3% até 17,1%. O maior índice de vazios (17,1%) foi verificado para a amostra VT-c2 com expansão prevista bastante elevada. A massa específica variou de 2,15 g/cm<sup>3</sup> até 2,28 g/cm<sup>3</sup> para as amostras analisadas.

### 5.3 Análises visuais e microscópicas

As análises visuais e realizadas com uso de um microscópio estereoscópico indicaram em todas as amostras poros contendo material branco neoformados (PN) bem como bordas no entorno dos agregados (Ag.), conforme pode ser visto na Figura 6.

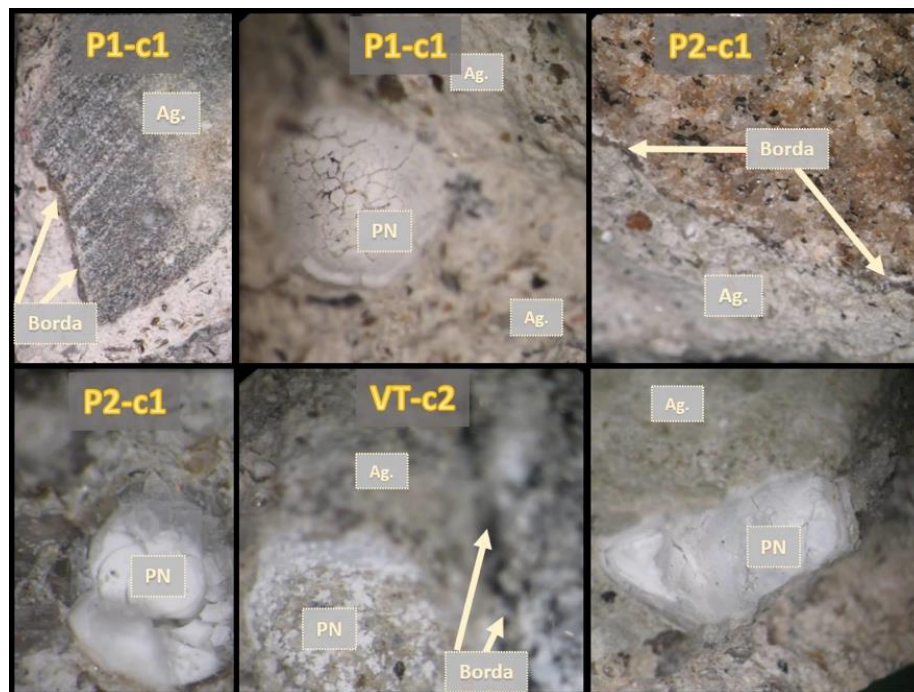


FIGURA 6 – Feições observadas nas amostras selecionadas para análise visual

As análises petrográficas e executadas por meio de microscopia ótica caracterizaram os agregados como biotita gnaisse em ambos os casos, porém, no caso 2, o granito se encontrava cataclásado). Os agregados foram indicados como potencialmente reativos. Grãos de quartzo, quartzo com extinção ondulante, além de quartzo microcristalino (ambos > 5%) foram identificados, o que remetem ao potencial dos agregados para a RAS. A Figura 7 apresenta as principais características mineralógicas dos agregados constituintes dos concretos.

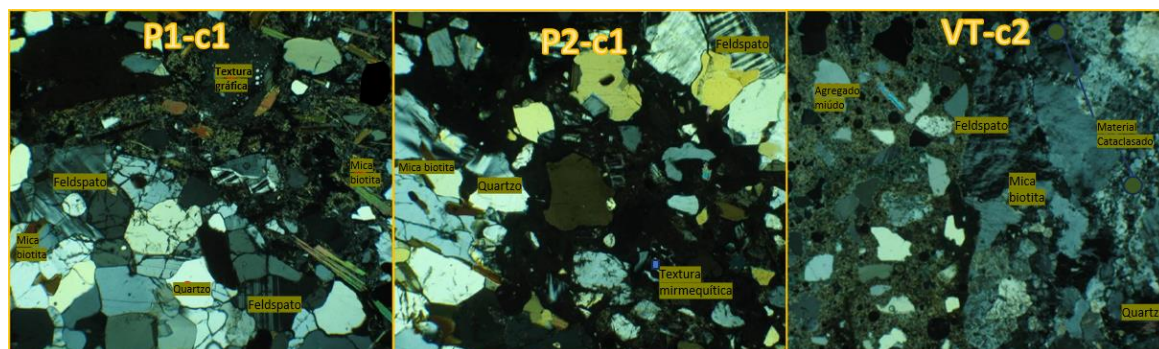


FIGURA 7 – Minerais constituintes dos agregados nos concretos avaliados

Já por meio das análises por microscopia eletrônica de varredura, foram observados para as 3 amostras de concreto formações características da presença tanto da



reação álcali-silica (RAS) quanto de um ataque por sulfatos (fonte a ser esclarecida). Os produtos identificados foram:

- Gel maciço gretado da RAS;
- Fases cristalizadas da RAS;
- Cristais da etringita, em especial, com formações massivas, o que indica essa etringita neoformada se tratar de uma fase secundária, ou etringita tardia.

Nas Figuras 8, 9 e 10 são comprovadas as fases mencionadas por meio das micrografias obtidas por MEV.

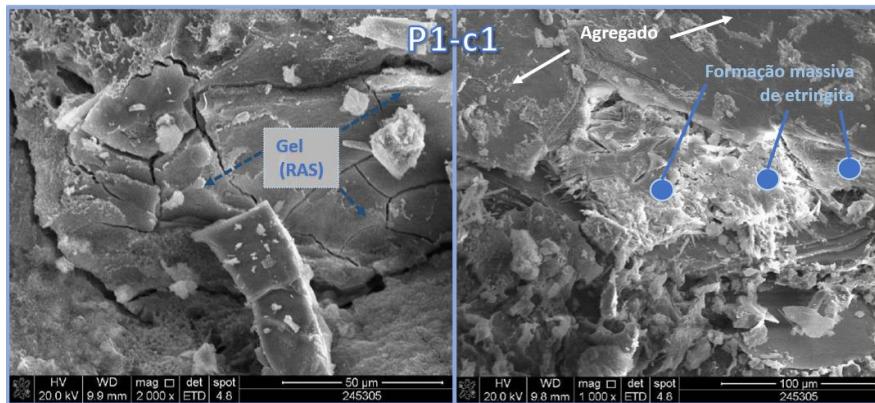


FIGURA 8 – Produtos identificados por MEV – Pilar 1 – Caso 1.

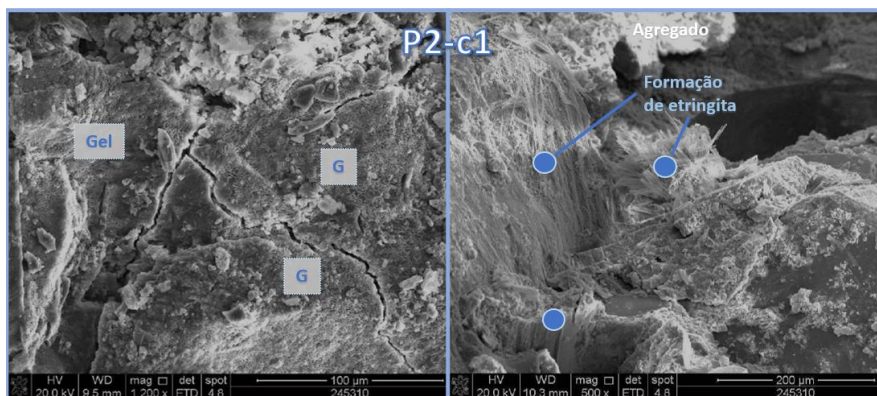


FIGURA 9 – Produtos identificados por MEV – Pilar 2 – Caso 1.

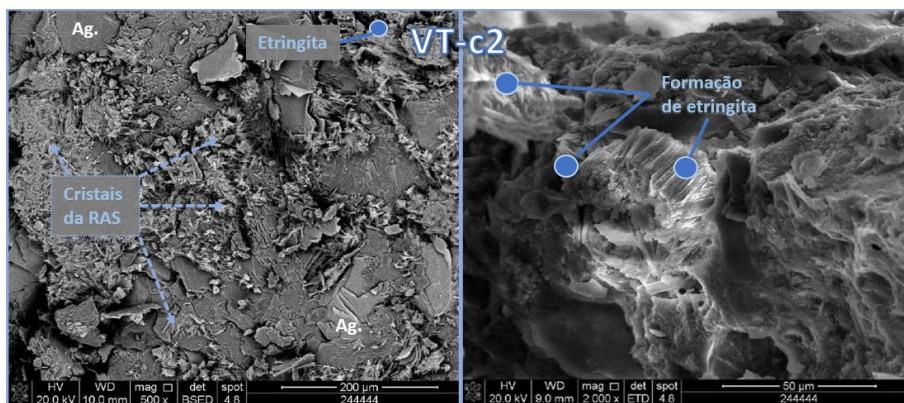


FIGURA 10 – Produtos identificados por MEV – Vertedouro – Caso 2.

## 5.4 Outras análises

O Índice de Deterioração do Concreto (ID) ou DRI tem por finalidade quantificar o dano causado ao concreto devido, principalmente, às reações expansivas. De acordo [45-46], que desenvolveu este índice, os efeitos deletérios do gel da RAS já foram observados em concretos com ID de 35 e, outras vezes, quando superior a 50.

A determinação deste índice foi feita apenas para a amostra VT-c2. Esta amostra apresentou ID igual a 48. Foram observados agregados com fissuras (AGF), agregado graúdo com fissuras e gel (AGFG), anéis de reação ao redor do agregado (BR), pasta de cimento com fissuras (PF) e vazios de ar revestidos com gel (PG). Durante esta avaliação não foram observados deslocamento do agregado graúdo-perda de aderência (DAG) e pasta de cimento com fissuras e gel (PFG), conforme Figura 11.

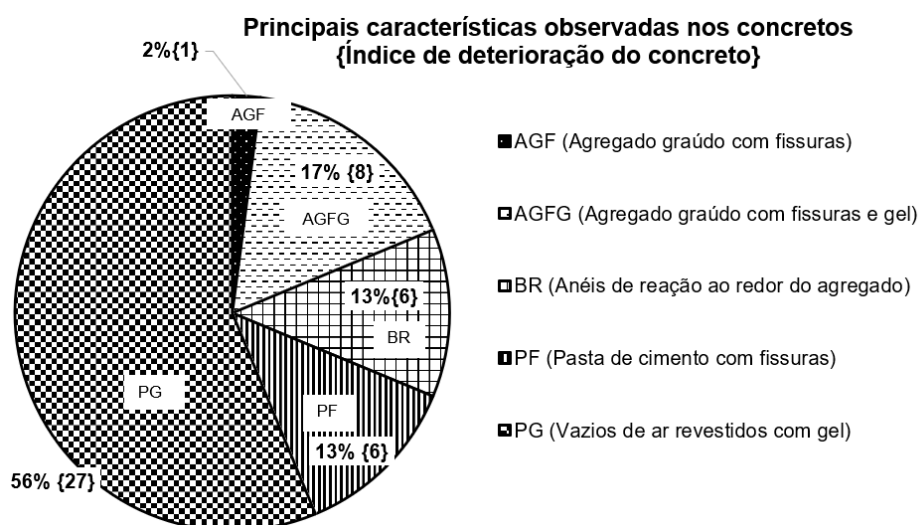


FIGURA 11 - Gráfico de barras com a distribuição quantitativa das feições de deterioração do concreto – Amostra VT-c2 com ID ou DRI = 48

A Tabela 2 apresenta os teores de sulfatos e álcalis solúveis, além do teor de álcalis em  $\text{kg/m}^3$  no concreto para as amostras P1-c1 e P2-c1. Não foram realizadas estas determinações para a amostra VT-c2.

Caso	Sulfatos solúveis		Álcalis solúveis em ácido			Álcalis solúveis em água			Álcalis no concreto ( $\text{kg/m}^3$ )
	$\text{SO}_3^{(1)}$ (%)	$\text{SO}_3^{(2)}$ (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{Na}_2\text{Oeq.}$ (%) <sup>(3)</sup>	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{Na}_2\text{Oeq.}$ (%) <sup>(3)</sup>	
P1-c1	0.17	1.26	0.2	0.26	0.37	0.07	0.03	0.09	8.2
P2-c1	0.24	1.7	0.1	0.11	0.17	0.06	0.03	0.08	3.7

Nota: (1)  $\text{SO}_3$  solúvel no concreto. (2)  $\text{SO}_3$  solúvel expresso em relação à massa de cimento. (3)  $\text{Na}_2\text{Oeq.} = 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ .

TABELA 2 – Determinação dos sulfatos e álcalis nas amostras do caso 1

Os elevados teores de álcalis estimados para os concretos e o tipo de agregado graúdo, que foi classificado como potencialmente reativo, contribuem para a progressão da RAS. Ressalte-se que esta reação depende da presença de sílica reativa (presente nos concretos), álcalis (que mesmo sendo consumidos na reação, continuam a ser supridos provavelmente através de dissoluções nos feldspatos



alcalinos presentes) e água (que está abundantemente presente, nos casos estudados).

Com relação às determinações dos teores de sulfatos solúveis realizados nas amostras P1-c1 e P2-c1, não foi possível concluir que esses fatores contribuíram para a ocorrência das manifestações patológicas no concreto.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados para os concretos de pilares e de muro de vertedouro, tem-se as seguintes considerações:

- Com base nos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, teste de dano de rigidez (SDT), índice de deterioração do concreto (ID) ou DRI e análise petrográfica e microestrutural foi comprovada a ocorrência de reações expansivas nas estruturas devido ao ataque combinado da etringita tardia (DEF) e reação álcali-sílica (RAS);
- Ficou evidente a redução do módulo de elasticidade dos concretos, e quanto maior foi a expansão estimada maior foi o grau de dano, nos concretos afetados por reações expansivas devido ao ataque combinado da DEF/RAS;
- A inspeção de campo é uma etapa essencial para detectar possíveis manifestações patológicas em estruturas de concreto. Embora as verificações experimentais sejam obrigatórias para o diagnóstico preciso de estruturas afetadas por reações expansivas, diversas evidências associadas a essas patologias podem ser sinalizadas e/ou identificadas na inspeção;
- Com base nos resultados dos ensaios feitos em concretos é possível fornecer parâmetros para realizar a modelagem numérica, validações de hipóteses e previsão do comportamento destas estruturas no futuro, bem como prever planos de manutenção periódica e desenvolvimento de projetos de recuperação para garantir maior vida útil e segurança estrutural;
- O monitoramento periódico da evolução das expansões nas estruturas de concreto é necessário para avaliar quais as medidas deverão ser adotadas para amenizar este fenômeno, no entanto, não as impedir dependendo da idade da estrutura e produtos disponíveis para continuidade da sua evolução. Por este motivo é recomendável um monitoramento contínuo de estruturas com o emprego de instrumentação, além de inspeções periódicas para verificar quando haverá necessidade de intervenções devido às reações expansivas existentes no concreto. A verificação periódica do funcionamento dos equipamentos mecânicos, principalmente das comportas, se faz necessária entre outras ações que dependerão do tipo de estrutura e avanço do problema.

## 7. PALAVRAS-CHAVE

Concreto, reações expansivas, ataque combinado, reação álcali-sílica (RAS), etringita tardia (DEF).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2018) – “NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali- agregado”, Rio de Janeiro, 2018;
- [2] SBRIGHI, C. N.; QUITETE, E., B.; BATTAGIN, A. F. (2018) – “Guia da prevenção da reação álcali-agregado”, Prática recomendada Ibracon. Comitê 201 Ibracon, 32p. São Paulo, SP;
- [3] HEINZ D; LUDWIG U. (1987) – “Mechanism of secondary ettringite formation in concrete subject to heat treatment”, Concrete Durability SP 100, ACI vol.2 pp. 2059 -2072;
- [4] GODART, B.; WOOD, J. (2022) – “Interaction of DEF and ARR, a review”, In proceeding of 16º International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 16th ICAAR, Ed. LNEC, v. 1, p. 97-106. Lisboa, Portugal;
- [5] HASPARYK, N.P., SCHOVANZ, D., KUPERMAN, S.C. (2020) – “Instrução Técnica nº. GSTE004R0 - Método de ensaio para a avaliação do potencial de ocorrência da etringita tardia (DEF) em concreto”, Furnas, Goiânia, GO;
- [6] JR CARVALHO. (2020) – “Cuidados na execução de fundações em concreto-massa: Edificações verticais”, Tecomat Engenharia, 1ª Ed. 55p., Recife, PE;
- [7] BLANCO, A.; P-BOSH, F.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. (2019) – “Lessons learned about the diagnosis of pathologies in concrete dams: 30 years of research and practice”, Construction and Building Materials, v.197, p. 356-368;
- [8] BLANCO, A.; CAVALARO, S. H. P.; S-CASTILHO, L.; AGUADO, A. (2018) – “Expansions with different origins in a concrete dam with bridge over spillway”, Construction and Building Materials, v. 163, pp. 861-874;
- [9] HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. (2016) – “Combined attack from ASR and DEF in the foundation”, In: Proceeding of 15º International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR, Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N.P. São Paulo, SP;
- [10] HASPARYK, N. P., KUPERMAN, S. C. (2021) – “Reações expansivas deletérias no concreto”, Revista Concreto & Construções, vol. 102, pp. 60-66, São Paulo, SP;
- [11] MA, K.; LONG, GUANGCHENG.; XIE, YOUJUN (2017) – “A real case of steam-cured concrete track slab premature deterioration due to ASR to DEF. Case Studies”,. Construction Materials, p. 63-71;
- [12] JENSEN, V.; SUJJAVANICH, S. (2016) – “ASR and DEF in concrete foundations in Thailand”, In: Proceeding of 15º International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete” – 15th ICAAR, Ed. Bernardes, H.; Hasparyk, N.P. São Paulo, SP;
- [13] TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. (2001) – “Delayed ettringite formation”, Cement and Concrete Research, v. 31, p. 683-693;
- [14] MARTIN, R-P.; SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; TOUTLEMOND, F. (2017) – “Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete”, Construction and Building Materials, v. 156, p. 956-964;
- [15] ZHANG, Z.; QIANG, W.; CHEN, H.; ZHOU, Y. (2017) – “Influence of the initial moist curing time on the sulfate attack resistance of concretes with different binders”, Construction and Building Materials, v. 144, p. 541-551;

- [16] COLLEPARDI, M. (2003) – “A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 25, p. 401-407;
- [17] BRONHOLO, J.L. (2020) – “Estudo do ataque individual e misto de DEF e RAA e de seus efeitos deletérios nas propriedades físico-químicas e mecânicas de concretos e argamassas de cimento Portland pozolânico e de alta resistência. Dissertação (Mestrado). Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, PR;
- [18] HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. (2019) – “Deterioração do concreto por reações expansivas”, *Anais do XXXII – Seminário Nacional de Grandes Barragens – SNGB. – Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB*. Salvador, BA;
- [19] BAUER, S.; CORNELL, B.; FIGURSKI, D.; LEY, T.; MIRALLES, J.; FOLLIARD, K. (2006) – “Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in concrete: A Literature Review”. CTR Technical Report, Report n. FHWA/TX-06/0-4085-1. Center for Transportation Research, Texas;
- [20] FUNAHASHI JR, E.I.; GAMBALE, P. G.; OLIVEIRA, S.; HASPARYK, N. P. (2021) – “Influência do metacaulim na elevação da temperatura e na formação de etringita tardia em compósitos cimentícios”, *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, RJ;
- [21] FUNAHASHI JR, KUPERMAN, S.C. (2010) – “Estudos de tensões térmicas em vertedouro de pequena central hidrelétrica”, *VII Simpósio de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas*, São Paulo, SP;
- [22] FUNAHASHI JR, E., GRAÇA, N.G., KUPERMAN, S.C. (2018) – “Belo Monte hydropower plant – Temperatures and thermal stresses analysis of the intake”, In: *Third International Dam World Conference*, pp. 17–21, Foz do Iguaçu, PR;
- [23] GU, Y.; MARTIN, R-P; METALSSI, O., FEN-CHONG, T.; DANGLA, P. (2019) – “Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation”, *Cement and Concrete Research*, vol. 123, pp. 105766;
- [24] SCHOVANZ, D., TIECHER, F., HASPARYK, N.P. (2021) “Evaluation of delayed ettringite formation through physical, mechanical, and microstructural assays”, *ACI Materials Journal*, v.118, n. 1, pp. 101–109;
- [25] PORTELLA, K.F.; HASPARYK, N.P.; BRAGANÇA, M.D.G.P.; BRONHOLO, J. L.; DIAS, B. G.; LAGOEIRO, L. E. (2021) “Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: Case of study with high early strength Portland cement composites”, *Construction and Building Materials*, v. 311, 125341;
- [26] HASPARYK, N. P.; SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; KUPERMAN, S.C. (2022) – “Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash”, *Revista Ibracon de Estruturas e Materials*, São Paulo, SP;
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2015) – “NBR 7680-1: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial”, Rio de Janeiro, RJ;
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2005) – “NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica”. Rio de Janeiro, RJ;
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2018) “NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, RJ;

- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2015) – “NBR 7680-2: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de concreto Parte 2: Resistência à tração na flexão”, Rio de Janeiro, RJ;
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2011) – “NBR 7222: Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, RJ;
- [32] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A (2021) – “Instrução Técnica ITDSBE001 – SDT - Método de Ensaio para a Determinação do Índice de Dano de Rigidez (SDI) e Índice de Deformação Plástica (PDI) em Concretos”, 1ª Edição, Goiânia, GO;
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2014) “NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto – Procedimento”, Rio de Janeiro, RJ;
- [34] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI (2014) “Building Code Requirements for Structural Concrete”, ACI 318-14;
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2021) – “NBR 8522-2: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração”, Rio de Janeiro, RJ;
- [36] GIANNINI, E., R.; SANCHEZ, L., F., M.; TUINUKUAFE, A.; FOLLIARD, K., J. (2018) – “Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test”, Construction and Building Materials, vol. 162, pp. 253-264;
- [37] SANCHEZ, L.F.M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. (2017) – “Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures”, Cement and Concrete Research. 93, p. 17–31;
- [38] SANCHEZ, L.F.M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. (2018) – “Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms”, Cement and Concrete Research, 107, p. 284–303;
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. “PO-GT-3016 rev.2 - Reconstituição do traço de concreto”, São Paulo, SP;
- [40] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (2018) “ASTM 856-18ª. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened concrete;
- [41] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2009) “ NBR 7389-1: Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 1: agregado miúdo, São Paulo, SP;
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP (2009) – . “Procedimento de ensaio PO-GT-5040/0 - Apreciação da durabilidade do concreto com ênfase na diagnose da reação álcali-agregado”, São Paulo, SP;
- [43] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2018) “NBR 15577-3: Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis no concreto”, São Paulo, SP”;
- [44] HASPARYK, N.P. (2022) – “Instrução Técnica no. DSBE002 - Método de Análise para a Determinação do Índice de Deterioração (ID) do Concreto por Reações”, Expansivas, 1ª edição, Ed. FURNAS, Goiânia. GO;

- [45] GRATTAN-BELLEW, P.E.; DANAY, A. (1992) – “Comparison of Laboratory and Field Evaluation of Alkali –Silica Reaction in Large Dams”, Proceedings of the International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions in Hydraulic Plants and Dams. Fredericton, Canada;
- [46] GRATTAN-BELLEW, P.E.; MITCHELL, L. D. (2006) – “Quantitative Petrographic Analysis of Concrete – The Damage Rating Index (DRI) Method, A Review”, M.A. Bérubé Symposium on Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete -8th CANMET/ACI Int. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology, Montréal, Canada;
- [47] GONÇALVES, K. M.; LEAL, P. R.; CHOTOLI, F. F.; QUARCIONI, V. A. (2020) – “Estudo IPT de concreto com idades avançadas: histórico e aspectos gerais”, Revista Concreto & Construções, vol. 97, pp. 52-60;
- [48] HASPARYK, N. P. (2005) – “Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado”, 326 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre;
- [49] ANDRIOLO, F.R.; SKWARCZYNSKI, T.M. (1988) – “Concreto pré-refrigerado no Brasil: Uma evolução com mais de 20 anos”, Impressão e Acabamento Grapho, 104 p.;
- [50] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI (2013) – “SPEC-506.2-13 Specification for Shotcrete”, 12p.

	<p>Eduardo Funahashi Engenheiro civil pela UNESP, mestre pelo IPT e doutorando na UNILA. Sócio do IBRACON, CBDB e da ALCONPAT. É membro do CT-201 do IBRACON sobre reações expansivas. Trabalha na DESEK, atua na área de tecnologia do concreto, sistemas construtivos, recuperação de estruturas, instrumentação e segurança de barragens.</p>
	<p>Nicole Pagan Hasparyk. Engenheira civil pela UFMG, mestre pela UFG e doutora pela UFRGS. Trabalha na ELETROBRAS Furnas, atua na área de tecnologia do concreto, pesquisadora na área de durabilidade, microestrutura e sustentabilidade e coordenadora de projetos de P&amp;D. Representante brasileira no comitê internacional de RAA; Membro da RILEM (Cluster D: 300-ARM Committee - Alkali-aggregate reaction mitigation &amp; 299-TES Committee: Thermal energy storage in cementitious composites) e do CT-201 do IBRACON sobre reações expansivas.</p>
	<p>Edna Possan Engenheira civil pela UNIOESTE e doutora em Engenharia Civil pela UFRGS. Professora na Universidade Federal da Integração Latino Americana (UNILA), Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECI) e do LADEMA (Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais). Atua na área de patologia das construções, materiais de construção e meio ambiente, com ênfase em durabilidade, previsão de vida útil, emissões e captura de CO<sub>2</sub>, aproveitamento de resíduos sólidos, sustentabilidade da construção economia circular e ecoeficiência (ODS 11 e 12).</p>
	<p>Selmo Kuperman Engenheiro civil, mestre e doutor pela USP. Consultor na DESEK, atua na área de tecnologia do concreto, sistemas construtivos e segurança de barragens. É membro honorário do ACI e do IBRACON e membro de comitês técnicos da ASTM, ACI, RILEM, ASDSO e do CT-201 do IBRACON sobre reações expansivas.</p>