

Influência do metacaulim na elevação da temperatura e na formação de etringita tardia em compósitos cimentícios

Influence of metakaolin on temperature rise and delay ettringite formation in cement composites

Eduardo Issamu Funahashi Júnior¹ , Patrícia Guedes Gambale² ,
Solanda Oliveira³ , Nicole Pagan Hasparyk³ 

¹DESEK Ltda. Av. Nove de Julho, 3229, cj. 1511, 01407-000, São Paulo, SP, Brasil.

²Concrecon Concreto e Construções Ltda. Av. Bela Vista, 1913, Jd. Santo Antônio, 74853-410, Goiânia, GO, Brasil.

³ELETRORBRAS Furnas, Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia. Rodovia BR-153, km 510, 74993-600 Aparecida de Goiânia, GO, Brasil.

e-mail: eduardo.funahashi@desek.com.br, patricia.gambale@concrecongoiania.com.br, solanda@furnas.com.br, nicole@furnas.com.br

RESUMO

No Brasil várias estruturas de concreto tem se mostrado deterioradas precocemente em decorrência da formação tardia da etringita (DEF). Ainda existem muitas lacunas e, em especial, no que diz respeito ao comportamento de materiais cimentícios suplementares e sua eficácia no combate das expansões por DEF. O acompanhamento e controle em obra muitas vezes trazem preocupação futura, pós lançamento dos concretos, haja vista as altas temperaturas atingidas pela geração de calor de hidratação. Diante do exposto, esta pesquisa traz dois estudos de caso brasileiros, nos quais as temperaturas ficaram próximas de 70°C, mesmo na presença de cimento pozolânico e incorporação de metacaulim. No sentido de avançar no entendimento deste processo na presença do metacaulim, e contribuir com o meio técnico, foi desenvolvido um estudo em laboratório em compósitos cimentícios sem e com a incorporação desta adição, em vários teores. Os dados dos concretos observados em campo mostraram que mesmo tendo sido feitos estudos térmicos prévios e alertas quanto à dosagem e geração de calor, quando do seu lançamento, um aumento no consumo de cimento e do metacaulim fez com que as temperaturas suplantassem as previsões térmicas colocando em riscos as estruturas de concreto no tempo no que diz respeito à DEF. Os estudos de expansão realizados até 365 dias em laboratório indicaram que os ensaios em argamassa demoram muito tempo para sinalizar o processo expansivo deletério da DEF. Caso sejam adotadas idades até um ano, riscos existem de considerar teores mitigadores de metacaulim, podendo estes se classificarem como falso negativos. Nas argamassas testadas, a DEF foi identificada pelas análises microestruturais. Assim, estudos complementares em concreto são necessários para um melhor entendimento e delineamento do comportamento expansivo na presença de adições frente ao processo da DEF durante a vida útil das estruturas, além da refrigeração dos materiais e do concreto.

Palavras-chave: Temperatura; DEF; Expansão; Metacaulim; Concreto.

ABSTRACT

Several concrete structures in Brazil are suffering prematurely from delayed ettringite formation (DEF). There are still many gaps and about the behavior of supplementary cementitious materials and their effectiveness in mitigating DEF expansions. Furthermore, monitoring and controlling on site often bring future concern after placing concrete in situ given the high temperatures reached by the hydration heat. Given the above, this research presents two case studies of concrete cast with pozzolanic cement and incorporation of metakaolin in which temperatures achieved 70°C. In order to progress the understanding of this deleterious process in the presence of metakaolin and to contribute with the technical community, an experimental research was performed in laboratory to evaluate DEF in cementitious composites with and without of metakaolin at various levels. The data observed in the field showed that temperatures surpassed the preliminary thermal previsions after casting

concretes, bringing risks of DEF over time, despite of the previous warnings regarding to the mixtures and generation of heat. Furthermore, laboratory studies carried out up to 365 days have indicated that the mortar tests take a long time to signal deleterious expansion process of DEF. Thus, if ages up to one year are adopted, there are risks of considering levels of metakaolin proper for use that, in fact, are classified as false negatives. Ettringite formations were identified by microstructural analyses in all tested mortars. In this regard, complimentary concrete studies are necessary to better understand and delineation of the expansive behavior in the presence of mineral admixtures against the DEF process during service life of structures, besides concrete and materials cooling.

Keywords: Temperature; DEF; Expansion; Metakaolin; Concrete.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem sido notado que as resistências características à compressão (f_{ck}), as dimensões e volumes das estruturas de concreto massa, como elementos de fundação, lajes, pilares e vigas em todo o país, aumentaram significativamente. Como algumas destas estruturas estão localizadas em ambientes agressivos ao concreto, muitas vezes é necessário o emprego de menor relação água-aglomerante para atender critérios de durabilidade e garantir a sua vida útil de projeto. Tem sido comum a especificação pelos projetistas de resistências com valores que variam de 30 MPa até 70 MPa. À medida que as resistências aumentam, ocorre aumento do consumo de cimento nas dosagens dos concretos. Ribeiro *et al.* [1] avaliaram a influência de diferentes adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa com elevada resistência à compressão e concluíram que os concretos contendo CP III-RS apresentaram as menores elevações de temperatura e liberação de calor por MPa, sendo uma alternativa eficiente na diminuição da elevação da temperatura dos concretos potencial na prevenção de patologias de origem térmica. Outros pesquisadores [2] concluíram que o emprego de cinza volante em grandes massas de concreto com elevados consumos de aglomerante torna-se uma alternativa pouco eficiente para a redução da liberação de calor. Contudo, o seu uso é recomendado devido aos benefícios relacionados à resistência à compressão e à prevenção da formação de etringita tardia.

Segundo Gambale *et al.* [3], o aumento do consumo de cimento em misturas de concreto testadas, aliado a uma baixa relação água/cimento, tendem a reduzir a permeabilidade, porém, ajudam na elevação da sua temperatura interna devido às reações exotérmicas decorrentes do aglomerante, podendo causar fissurações de origem térmica. Em geral, as fissuras devido ao gradiente térmico diferencial na estrutura quando da dissipação do seu calor para o ambiente, durante a hidratação do cimento, ocorrem uma vez e a sua abertura não aumenta com o decorrer do tempo. No entanto, além deste tipo de fissuração, em alguns casos pode vir a ocorrer a formação de etringita tardia (DEF). Os mecanismos de DEF envolvem a dissolução do hidróxido de cálcio e, em um estágio mais avançado, a descalcificação do C-S-H [4]. Esse tipo de reação expansiva deletéria ao concreto pode ser causado por temperaturas geralmente superiores a 60–65°C, 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. No decorrer do tempo as fissuras tendem a aumentar em abertura, comprimento e profundidade e pode vir a causar danos irrecuperáveis nas estruturas e, no limite, levá-las a uma situação de risco à sua segurança. Estudos comprovam que a DEF afeta negativamente as propriedades mecânicas reduzindo em mais de 50% a resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade [5–8]. Bragança *et al.* [9] propuseram uma metodologia não destrutiva de espectroscopia eletroquímica de impedância (EIS) e potencial de circuito aberto (OCP) combinado com a velocidade de pulso ultrassônico e análises microestruturais para monitorar a formação incipiente de produtos de reações expansivas e deletérias como a ASR (alkali-silica reaction) e DEF e sua evolução ao longo do tempo.

A falta de conhecimento dos problemas que podem advir de concretagens de estruturas em concreto massa onde não é levado em consideração nos orçamentos medidas mitigadoras deste tipo de fenômeno é notável, considerando os casos que têm sido vivenciados pelos especialistas no assunto. O conhecimento dos variados tipos de fenômenos deletérios que podem deteriorar o concreto se faz necessário para que medidas preventivas possam ser adotadas na fase de concepção do projeto. Um controle tecnológico adequado no que diz respeito à caracterização e ao controle dos materiais a serem empregados é de suma importância na fase que antecede a execução da obra, bem como durante a obra, de forma a acompanhar o avanço da construção [10].

Vicente *et al.* [11] mostraram por meio de cálculos térmicos a possibilidade de atingir temperaturas próximas a 60°C e 65°C adotando concretos de f_{ck} igual a 30 MPa e 40 MPa aos 28 dias, respectivamente, considerando diferentes geometrias de base e altura igual a 1 metro, associado à temperatura de lançamento do concreto sem procedimentos de refrigeração. Neste mesmo estudo são mostrados que para alturas superiores a 2 m as temperaturas são superiores a 80°C. Gambale *et al.* [12], usaram um modelo preditivo para a avaliação de temperatura máxima e da tensão em concretos com características massivas. Essas modelagens matemáticas

por elementos finitos para a definição da metodologia executiva mais apropriada, definição das alturas de camadas de concretagem e intervalo de lançamento, além dos níveis de refrigeração do concreto, caso necessário, são metodologias extremamente importantes para minorar as máximas temperaturas no interior do concreto, e evitar riscos de fissuração de origem térmica. Funahashi *et al.* [13] mostraram que as práticas construtivas adotadas para diferentes estruturas de uma usina hidrelétrica no norte do Brasil, como a subdivisão das camadas de concretagem, definição do intervalo de lançamento e pré-refrigeração do concreto foram definidas a partir de estudos térmicos prévios na fase inicial de projeto, reforçando a importância desse trabalho.

O uso de adições minerais pozolânicas em substituição parcial ao cimento pode ter efeitos positivos na minimização do ataque interno por sulfatos, do tipo DEF, segundo alguns pesquisadores [14–16]. Nguyen *et al.* [15], em seus estudos com argamassas, verificaram além das proporções de 10%, 20% e 30% de material pozolânico natural proveniente de tufo vulcânico na substituição do cimento, a influência da finura destas adições, e quanto maior foi a área específica, maior foi a mitigação observada. Os pesquisadores apresentam como justificativa para a redução das reações expansivas por DEF a diminuição do teor de sulfato nas misturas, provenientes do cimento, devido à sua substituição parcial, às reações pozolânicas, reduzindo o teor de hidróxido de cálcio disponível, e devido ao elevado teor de Al_2O_3 dos materiais pozolânicos. Leklou *et al.* [17] estudaram a influência da presença de adições variadas em substituição ao cimento através da avaliação da expansão ao longo de 365 dias, em argamassas com substituição de 10%, 20% e 30% da massa de cimento por cinzas volantes. Os pesquisadores concluíram que a substituição de 10% da massa de cimento por cinzas volantes não foi capaz de interferir nos efeitos da DEF, mas, substituições a partir 20% permitiram a atenuação ou até mesmo a eliminação da expansão até a idade avaliada. Silva *et al.* [16] monitoraram concretos com diferentes adições por um período de 8 anos e concluíram que algumas adições minerais, como o filer calcário e cinza de biomassa, não são eficientes na inibição de expansão frente ao processo de DEF; já algumas adições como a sílica ativa, metacaulim e a cinza volante podem ser eficientes, dependendo do percentual empregado. Segundo atestado por Silva *et al.* [16], o metacaulim apresentou-se efetivo em um percentual de 15%; já a sílica e cinzas volantes mostraram um comportamento semelhante nos teores de 10% de incorporação e 30%, respectivamente. Porém, para o metacaulim, em uma análise de longa duração, observa-se a partir dos dados apresentados pelos pesquisadores que mesmo o teor de 15%, após quatro anos, ultrapassa o limite apresentado. Esse mesmo comportamento ocorre para outras adições, como a sílica e a escória, porém em tempos distintos. Com base no exposto, entende-se que os estudos mostraram que os efeitos benéficos das adições podem ser temporários, com atenuação do processo expansivo no tempo, apenas retardando a DEF.

Em estudo realizado por Funahashi [18], é apontado que há uma redução do calor de hidratação do cimento quanto maior for o teor de substituição do cimento por escória de alto forno. Já no caso de substituição parcial por metacaulim, embora tenha sido observado um melhor desempenho mecânico, um incremento de calor pode ocorrer. O cimento com a adição de metacaulim apresentou resistência à compressão da ordem de 10% superior em relação ao cimento de referência aos 28 dias. Já por meio de ensaios realizados com calorímetro isotérmico, segundo a ASTM C 1702 [19] (temperatura de ensaio igual a 23°C), verificou-se que o calor de hidratação do cimento de referência (Blaine = 5.420 cm^2/g) é igual a 365 J/g, enquanto as amostras com substituição parcial de metacaulim nos teores de 8% (Blaine = 5.950 cm^2/g) e 15% (Blaine = 6.990 g/cm^2), na idade de 168 horas, apresentaram resultados iguais a 367 J/g e 371 J/g. Segundo ensaio de determinação do calor de hidratação realizado pela NBR 12006 [20], o cimento de referência apresentou calor de hidratação igual a 317 J/g e 319 J/g nas idades de 41 e 168 horas, respectivamente. O cimento de referência com substituição parcial de 15% de metacaulim apresentou resultado pouco superior e igual a 320 J/g e 323 J/g na idade de 41 e 168 horas, respectivamente, por este mesmo método calorimétrico. A norma de cimento NBR 16697 [21] considera cimentos de baixo calor de hidratação com resultados de até 270 J/g na idade de 41 horas, segundo o método da garrafa de Langavant (NBR 12006 [20]). Neste mesmo estudo foram avaliados os cimentos elaborados com substituição parcial de escória de alto forno nos teores de 6%, 34% e 70%, e com área específica de 5030 g/cm^2 , 4630 g/cm^2 , 4230 g/cm^2 , respectivamente. A partir dos ensaios de calor de hidratação pelo calorímetro isotérmico, na idade de 168 horas, verificou-se redução do calor de hidratação (J/g) em relação ao cimento de referência quanto maior foi o teor de substituição de escória e menor for a área específica: 362 J/g (6%), 316 J/g (34%) e 230 J/g (70%). Quando do desenvolvimento de concretos com a incorporação de metacaulim, há necessidade de realizar estudos focando na redução do consumo de cimento, considerando seu desempenho mecânico superior aos concretos sem adição. A partir dos ensaios realizados pelo autor quanto maior é o teor de escória de alto forno, menor é o calor de hidratação e, por conseguinte, menor será o aumento da temperatura no interior da estrutura de concreto massa, trazendo benefícios ao seu desempenho e durabilidade.

Quando são avaliados métodos de ensaio em laboratório, por não existir normalização para verificar o potencial para DEF dada a complexidade do fenômeno, alguns pesquisadores desenvolveram metodologias

próprias para o estudo em concretos e argamassas. Em concretos, o trabalho de Kchakech *et al.* [22] pode ser citado, no qual foram estudados prismas de concreto ($110 \times 110 \times 220$ mm) considerando inicialmente um método de aquecimento, seguido por resfriamento e armazenamento em câmara climática a 38°C por 12 horas, seguidos de imersão em tanque com água a 38°C . Nesse estudo foram testadas várias temperaturas, de 61°C e 66°C , 71°C e 81°C , contemplando previamente uma pré-cura a 20°C por 2 horas. Nas temperaturas de 61°C e 66°C , o tempo de permanência foi de 14 dias, já para 71°C e 81°C , a permanência foi de 1 a 28 dias, com taxas de aquecimento e resfriamento iguais, de $5^\circ\text{C}/\text{h}$. Giannini *et al.* [23] utilizaram amostras cilíndricas (100×200 mm), sendo aquecidas e resfriadas em forno (taxas de $17^\circ\text{C}/\text{h}$), seguido de armazenado em água saturada com cal a 23°C . A temperatura de pico empregada foi bastante elevada (90°C), e as amostras ficaram nessa condição por um período de 12 horas. Schovanz [24] manteve o concreto em temperatura ambiente por 6 h, em período de pré-cura e, posteriormente os corpos de prova (cilíndricos – 10×20 cm e prismáticos – $75 \times 75 \times 285$ mm) foram imersos em água a 25°C , sendo aquecida a taxa de $10^\circ\text{C}/\text{h}$ e mantida no patamar de 85°C por 12 h; em seguida, foi realizado o resfriamento da água na mesma taxa de aquecimento, e as amostras permaneceram na água a 38°C até idades de ensaio. Bronholo [25] realizou estudos semelhantes, porém, no período inicial de aquecimento, manutenção de pico, e resfriamento, os corpos e prova se encontravam em câmara climática com umidade acima de 95%, sem imersão em água. No Brasil, foi criada uma Instrução Técnica por FURNAS [26] que considera o mesmo protocolo de cura e ambiente de exposição empregado em Schovanz [24], porém, para dosagens contendo a incorporação de adições é recomendado pelos autores o monitoramento das expansões até a idade de 2 anos.

Em argamassas podem ser citados Dayarthne *et al.* [27], que utilizaram barras de argamassas prismáticas ($25 \times 25 \times 285$ mm) com método de pré-cura a 30°C por 1 hora, seguido por aquecimento até 95°C a uma taxa de $65^\circ\text{C}/\text{h}$, com permanência no pico por 12 horas. O resfriamento ocorreu com taxa de $16^\circ\text{C}/\text{h}$, permanência a 30°C por 6 horas, seguido de secagem em estufa (85°C) por 24 horas e imersão em água com cal, a 30°C , até o final do ensaio. Leklou *et al.* [17] também utilizaram barras de argamassa (nas dimensões de $40 \times 40 \times 160$ mm) com aquecimento e resfriamento em forno e armazenamento em tanques fechados com água deionizada a 20°C , fazendo a pré-cura a 20°C por 2 horas. A taxa de aquecimento empregada foi de $30^\circ\text{C}/\text{h}$ e a de resfriamento de $5,5^\circ\text{C}/\text{h}$, considerando a permanência das barras em 80°C por 10 horas antes do resfriamento. Rashidi *et al.* [28], também estudando barras de argamassa, realizaram uma pré-cura a 23°C por 4 horas, aquecimento com taxa de $20^\circ\text{C}/\text{h}$ e permanência a 95°C por 12 horas, seguido de resfriamento com a mesma taxa. O ambiente de exposição foi de imersão em água saturada com cal, a 23°C . Em argamassas, Bronholo [25] também realizou estudos semelhantes àqueles mencionados e realizados concretos, na presença de cimento de alta resistência inicial e cimento pozolânico.

Diante do exposto, e com a preocupação de disseminar o conhecimento quantos aos riscos de elevadas temperaturas no concreto e avançar nos estudos envolvendo o metacaulim, este trabalho foi desenvolvido. São apresentados dois estudos de caso de estruturas de concreto no Nordeste, nos quais foi empregado cimento pozolânico (CP IV) e adição de metacaulim, com atingimento de temperaturas elevadas, acima de 60°C , com picos entre 70°C e 90°C . Ainda, é apresentada parte de um estudo experimental em laboratório realizado em compósitos cimentícios sem e com a incorporação do metacaulim, em vários teores em substituição parcial ao cimento, buscando analisar o seu desempenho além do comportamento expansivo na presença de metacaulim frente ao processo da DEF após um ano de ensaios.

2. INVESTIGAÇÕES EM CAMPO E LABORATÓRIO

A investigações em campo foram realizadas a partir do estudo de dois casos reais de estruturas em concreto massa onde as temperaturas internas monitoradas foram superiores aos limites especificados em projeto. As duas obras estão localizadas próximas ao mar. O caso 1 é sobre a execução de pilares de grandes dimensões em obra de infraestrutura e com volume total de 114 m^3 e 12 m de altura. O caso 2 refere-se a um bloco de fundação de torre de parque eólico com volume total de 300 m^3 . Nos dois casos, em princípio, foi empregado cimento pozolânico CP IV com adição de metacaulim e substituição parcial da água de amassamento por gelo. A partir do monitoramento térmico do concreto realizado por meio de termopares instalados no seu interior verificou-se elevação da sua temperatura a níveis superiores a $60\text{--}65^\circ\text{C}$, aumentando os riscos de fissuras de origem térmica além da DEF. Com os dados de monitoramento térmico das diferentes estruturas foram realizadas retroanálises por meio de modelagem matemática para avaliar o seu comportamento em campo e avaliar as possíveis causas das elevadas temperaturas desenvolvidas nestas estruturas.

O estudo experimental realizado em laboratório teve o objetivo de avaliar, no tempo, riscos de ocorrência da DEF na presença do metacaulim, após alta temperatura nas primeiras idades de hidratação do cimento. Os estudos foram executados em compósitos cimentícios com e sem a incorporação de metacaulim.

2.1. Estudo de Caso 1 – Pilares de grandes dimensões de obra de infraestrutura próxima ao mar

Para a execução de pilares de grandes dimensões de obra de infraestrutura localizada a pouco mais de 2 km de distância do mar, no Nordeste brasileiro, foi realizado um estudo térmico prévio para a definição da metodologia executiva e avaliação da necessidade de pré-refrigeração do concreto de modo a minimizar eventuais fissuras de origem térmica devido aos gradientes térmicos diferenciais na estrutura de concreto. As estruturas de base retangular de 3,4 m por 2,8 m, altura de 12 m e $f_{ck} = 30$ MPa foram executadas em duas etapas de concretagem com camadas de altura igual a 6 m, cada, e intervalo de lançamento de 2 dias. Para minimizar o aumento da temperatura no seu interior foi elaborada dosagem de concreto com a utilização de um cimento pozolânico CP IV 32, de baixo calor de hidratação (254 J/g e 281 J/g nas idades de 41 e 168 horas, respectivamente), contemplando ainda a incorporação do metacaulim. A dosagem foi previamente estudada com o objetivo de reduzir o consumo de cimento do concreto a ser fornecido por concreteira da região. O traço utilizado para a realização dos cálculos térmicos através de modelagem matemática pelo método dos elementos finitos considerou um consumo de cimento igual a 320 kg/m³, com adição de 10% de metacaulim, aditivo superplastificante (0,09%) e relação água-aglomerante (cimento+metacaulim) de 0,48 (Tabela 1).

Tabela 1: Dosagem do concreto – Caso 1.

MATERIAL	CIMENTO CP IV 32	METACAULIM	AREIA NATURAL	BRITA 0	BRITA 1	ÁGUA
Consumo (kg/m ³)	320	32	728	321	750	168

Nota: Foram empregados aditivos plastificante e superplastificante na dosagem.

2.2. Estudo de Caso 2 – Bloco de fundação de torre eólica

Durante a construção de outra obra, que representa um parque eólico na região Nordeste do Brasil nos últimos anos, foram executados blocos de fundação de torres eólicas com circunferência aproximada de 14 m de diâmetro e altura de 3 m, e com um volume próximo de 300 m³. O concreto foi especificado com um $f_{ck} = 30$ MPa aos 28 dias, sendo recomendado um cimento do tipo CP IV 32, além da adição de metacaulim (Tabela 2).

Tabela 2: Dosagem do concreto – Caso 2.

MATERIAL	CIMENTO CP IV 32	METACAULIM	AREIA NATURAL	BRITA 0	BRITA 1	ÁGUA
Consumo (kg/m ³)	342	48	701	359	718	184

Nota: Foram empregados aditivos plastificante e superplastificante na dosagem.

Para a definição do plano executivo dos blocos de fundação com menor risco de fissuração foi realizado um estudo térmico considerando diversas hipóteses de execução. A partir dos estudos verificou-se a necessidade de pré-refrigeração do concreto através da substituição parcial da água de amassamento por gelo. Para garantir menores níveis de refrigeração foi considerado o início da concretagem no período noturno.

2.3. Estudos em laboratório

O traço da argamassa utilizado foi de 1: 2,75: 0,485 (cimento:areia:a/c), tendo sido empregado um cimento Portland de alta resistência (CP V-ARI) e uma areia artificial proveniente da britagem de rocha granítica, não reativa para a RAA, com o intuito de isolar apenas a patologia DEF para o estudo em pauta. Baseado na literatura [16, 29], foram adotados os teores de 0%, 4%, 8%, 12% e 14% de metacaulim utilizados em substituição parcial ao cimento, em volume, denominados neste trabalho de REF, 4MTC, 8MTC, 12MTC e 14MTC, respectivamente. Após a moldagem, as argamassas foram submetidas a uma cura convencional por 6 horas para garantia da pega inicial do cimento (período denominado pré-cura). Após esse período, um ciclo térmico foi adotado para induzir a DEF conforme apresentado na Tabela 3, no qual os CPs moldados foram imersos em um tanque cuja água foi aquecida, respeitando-se uma taxa de aquecimento de 10°C/h até atingir 80°C, permanecendo nessa temperatura por 12 horas. Após esse período, foi realizado o resfriamento da água do tanque até 38°C, na mesma taxa (10°C/h). Os CPs permaneceram nesta condição (imersos em água, a 38°C) até as idades de ensaio estabelecidas. O procedimento adotado foi baseado em Hasparyk *et al.* [26], porém, reduzindo-se a temperatura de 85°C para 80°C. Na Tabela 3 é apresentado o procedimento de cura térmica e o ambiente de exposição adotados nos estudos em laboratório.

Foram moldadas três barras de argamassa para cada traço (25 × 25 × 285 mm), conforme prescrições contidas na ASTM C 1012M [30], com o objetivo de monitorar as variações de comprimento por meio de aparelho medidor contendo relógio comparador, e determinar expansões potenciais ao longo do tempo das amostras que ficaram submersas em uma caixa com temperatura controlada, ao longo do tempo (365 dias).

Tabela 3: Cura térmica e ambiente de exposição.

DESCRIÇÃO	TEMPERATURA	TEMPO/TAXA
Pré-cura	23 ± 2°C	6 horas
Aquecimento	23 a 80°C	10°C/h
Cura térmica	80°C	12 horas
Resfriamento	80 a 38°C	10°C/h
Ambiente de exposição	38°C	365 dias

Fonte: Hasparyk *et al.* [26].

Além da caracterização mecânica das argamassas aos 28 dias de idade (CPs cilíndricos: 10 × 20 cm), segundo a NBR 7215 [31], e após o período de exposição (Tabela 3), foram realizados ensaios por ultrassom das barras para a avaliação da velocidade de propagação de ondas, pelo método de transmissão direta, conforme a NBR 8802 [32], adotando uma frequência de 54 KHz. O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado a partir da velocidade de propagação de ondas determinada no ensaio.

Análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS) foram executadas por um equipamento marca Tescan, modelo VEGA3, de vácuo variável, acoplado a um sistema duplo de EDS da Oxford Instruments. As amostras foram analisadas após a sua fragmentação, em superfícies de fratura, sendo metalizadas a partir da deposição de uma fina camada de material condutor (no presente caso, a base de ouro – Au), e fazendo-se uso de um detector de elétrons secundários (SE). O WD (work distance – distância de trabalho) adotado foi fixado em 15 mm. Já as análises por difração de raios X (DRX) foram realizadas pelo método do pó não orientado, com material passante em peneira de malha 75 mm, fazendo-se uso de um difratômetro marca Bruker, modelo D8 Advance em sistema θ/θ , 40 kV/40 mA. Para as aquisições de dados, utilizou-se software DiffracPlus e na interpretação, o software Diffrac.EVA, versão 2018. As análises microestruturais foram realizadas com amostras na idade 2 anos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Estudo de Caso 1 – Pilares de grandes dimensões de obra de infraestrutura próxima ao mar

A partir das simulações térmicas, considerando diferentes temperaturas de lançamento do concreto, foi especificado o seu lançamento com temperaturas de 20°C, no máximo, para as distintas etapas de concretagem, fazendo-se uso de pré-refrigeração do concreto com adição de 110 kg/m³ de gelo, no mínimo, em substituição à água de amassamento. A quantidade de gelo pode variar dependendo da temperatura dos materiais constituintes do concreto. Esses dados foram baseados na estimativa realizada pelo balanço térmico, considerando as temperaturas dos diferentes constituintes do concreto, e o tempo de transporte entre a central de concreto e a obra. Na Figura 1 (a) e (b) podem ser observadas a malha de elementos finitos e isoterms resultantes dos estudos térmicos realizados previamente a execução da segunda etapa de concretagem. As isoterms na seção em planta mostram maior acúmulo de calor na região central da estrutura, 48 horas após o início do seu lançamento, considerando temperatura do concreto igual à 25°C.

Foram instalados termopares nas diferentes alturas dos pilares para o monitoramento das temperaturas no interior do concreto para diferentes etapas com 6 m de altura, cada. Após o lançamento dos concretos, quando os dados do monitoramento foram recebidos, foi verificado que as máximas temperaturas medidas variaram muito, de 56°C até 92°C, indicando pontos com elevadas temperaturas internas. Na Figura 2 são apresentadas as temperaturas de lançamento dos concretos, a elevação de temperatura bem como as máximas alcançadas nos pilares, nas duas etapas de concretagem (A e B) de cada um deles.

Baseados nos dados de controle da temperatura de lançamento do concreto fresco (Figura 2) verificou-se que a maior parte dos concretos foi lançado com temperatura superior à especificada e variou de 22°C até 28°C, aproximadamente. Considerando a elevação adiabática teórica do concreto de 45°C calculada adotando o consumo de cimento do traço bem como o dado de calor de hidratação obtido no ensaio, conforme estudo térmico realizado, foi verificado comportamento distinto ao esperado a partir das previsões térmicas. Ou seja, a exceção dos pilares 1 e 3, na primeira etapa de concretagem, todos os demais pilares, nas duas etapas, apresentaram temperaturas elevadas e acima de 60°C–65°C. Em mais de 53% dos pilares, as temperaturas foram tão elevadas que suplantaram a casa dos 70°C, o que poderá levar a formação de DEF que afeta negativamente as propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo [5–8]. Os maiores valores foram de 87,1°C e 92,3°C. A Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram o monitoramento das temperaturas internas dos concretos através de termopares

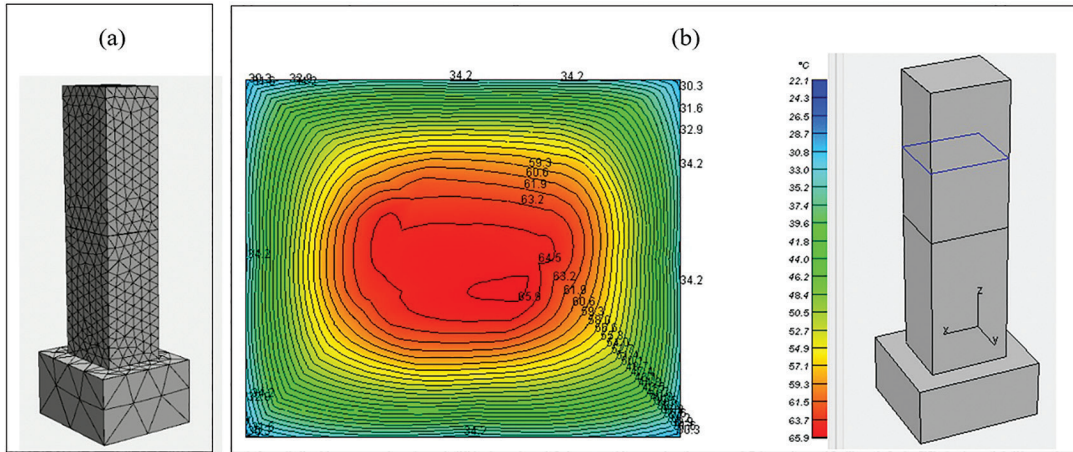


Figura 1: (a) Malha de elementos finitos e (b) isotermas fornecidas pelo software b4cast para o pilar em concreto massa: segunda etapa de concretagem.

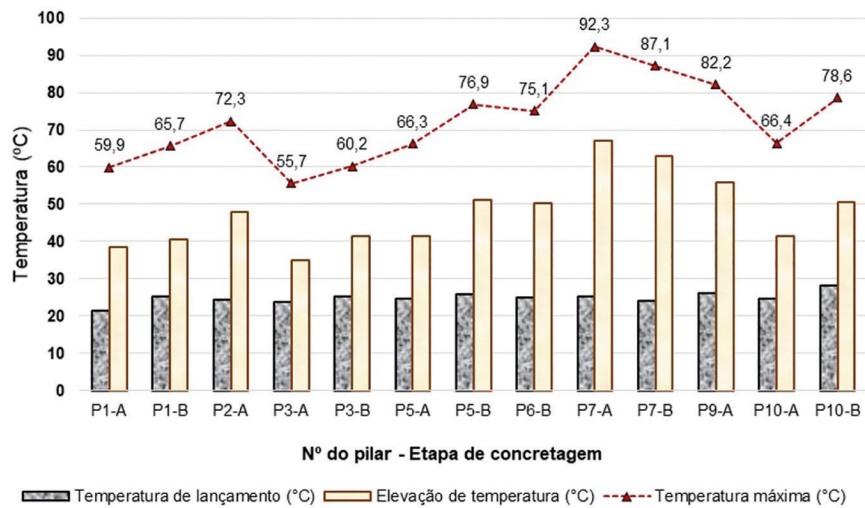


Figura 2: Comportamento térmico do concreto dos pilares verificado por meio de sensores de temperatura.

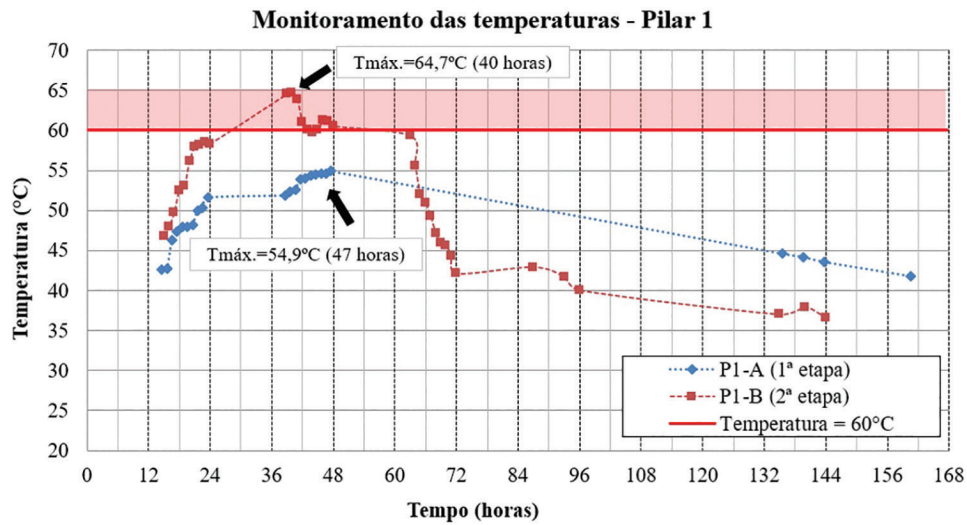


Figura 3: Comportamento das temperaturas no tempo medidas pelos sensores de temperatura instalados em três pilares do estudo de caso 1: pilar 1.

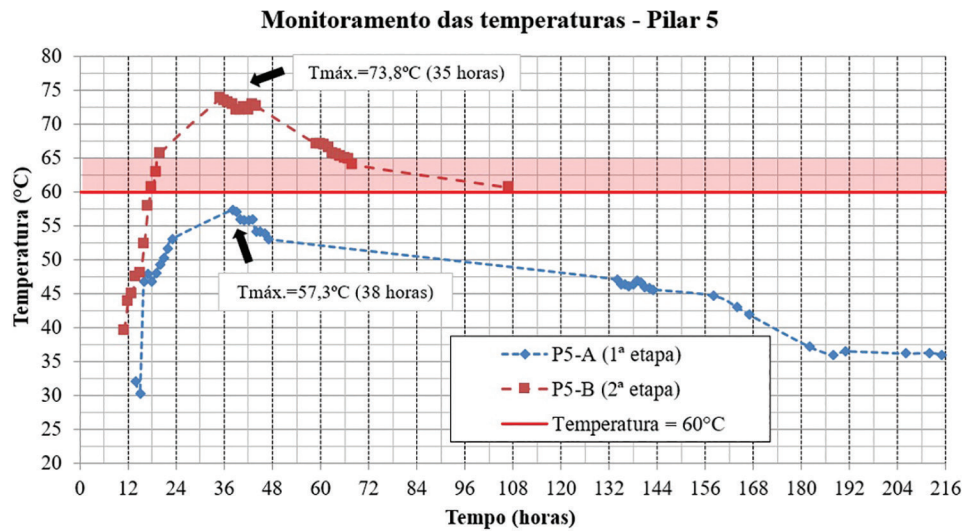


Figura 4: Comportamento das temperaturas no tempo medidas pelos sensores de temperatura instalados em três pilares do estudo de caso 1: pilar 5.

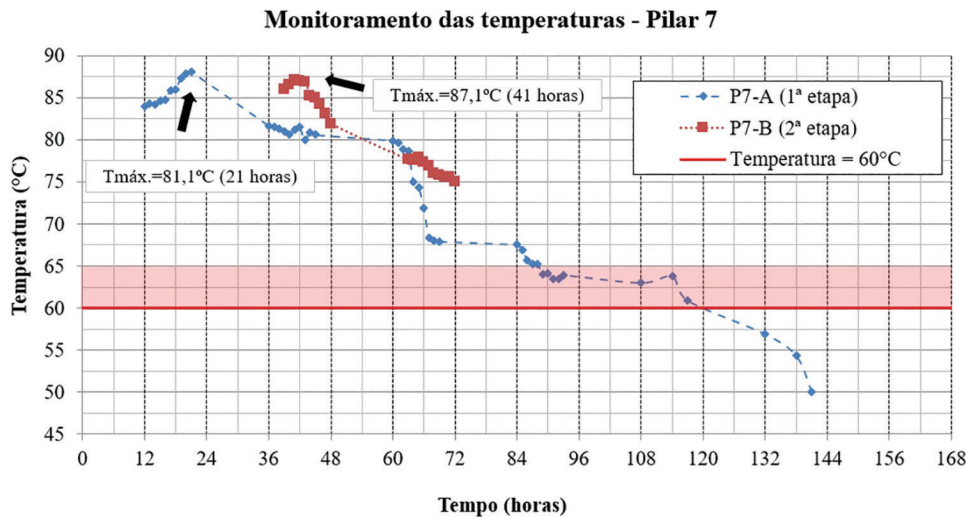


Figura 5: Comportamento das temperaturas no tempo medidas pelos sensores de temperatura instalados em três pilares do estudo de caso 1: pilar 7.

instalados no centro geométrico da camada de 1,5 m de altura dos pilares 1, 5 e 7, respectivamente. As leituras manuais foram iniciadas após 12 horas do lançamento da camada de concretagem. De acordo com os gráficos as máximas temperaturas ocorreram entre 21 e 47 horas. Para alguns pilares a temperatura máxima do concreto superou o limite de 60–65°C. A temperatura máxima atingida no P1-A e P1-B foi de 55°C e 65°C, após 47 e 44 horas. O intervalo de lançamento entre as etapas foi de 10 dias. No pilar 5 as máximas temperaturas para a primeira e segunda etapas ocorreram entre 38 e 35 horas, respectivamente. O pico de temperatura do concreto da segunda etapa foi de 73,8°C. As máximas temperaturas das etapas distintas do pilar 7 foram de 81°C e 87°C, para a primeira e segunda etapas, respectivamente.

Tendo em vista os elevados níveis de temperatura alcançados, e com base na literatura [3], chegou-se à conclusão de que houve provavelmente a aplicação de concretos na obra com consumos de cimento mais elevados, ou mesmo o emprego de um tipo de cimento distinto daquele adotado nos cálculos térmicos, haja vista que a elevação de temperatura foi superior à elevação adiabática, o que mostrou que medidas preventivas não foram adotadas na fase de concepção do projeto, conforme recomendam HASPARYK e KUPERMAN [33]. Segundo informações posteriores, tomou-se conhecimento que em algumas etapas construtivas foi utilizado um concreto com f_{ck} superior ao especificado pelo projetista, e igual a 40 MPa. Essa alteração fez com que o concreto aplicado tivesse um consumo de cimento superior, e igual a 380 kg/m³ e, conseqüentemente, um consumo de 38 kg/m³ de metacaulim. Essa adição se mostrou eficiente na redução de expansão frente ao processo de

DEF em substituição parcial ao cimento em maiores teores, acima de 15% [16]. A alteração foi justificada pela construtora porque alguns concretos fornecidos pela concreteira estavam apresentando resultados de resistência à compressão inferiores ao f_{ck} . Desta forma, a elevação adiabática de temperatura seria de 54°C e não 45°C, como previsto, trazendo aumento expressivo nas temperaturas máximas atingidas pelos concretos. O aumento do consumo de cimento CP IV justifica as temperaturas dos concretos da 1ª etapa de concretagem do Pilar 2, da 2ª etapa de concretagem do Pilar 5, da 2ª etapa de concretagem do Pilar 6 e da 2ª etapa de concretagem do Pilar 10, pois as elevações de temperaturas nestes casos foram superiores a 45°C e inferiores a 54°C. Nas duas etapas de concretagem do Pilar 7 e na 1ª etapa de concretagem do Pilar 9 as elevações de temperaturas dos concretos foram superiores a 54°C. Este fato leva à consideração de que além do aumento do consumo de cimento pode, eventualmente, o cimento ter sido substituído por outro tipo de maior calor de hidratação como o CP V-ARI, disponível na central de concreto quando da execução dos pilares. Com base nas análises posteriores efetuadas, verificou-se que as elevadas temperaturas ocorreram entre um período no qual os resultados de resistência à compressão disponibilizados apresentavam valores superiores ao especificado em projeto já na idade de 7 dias ($f_{ck} = 30$ MPa aos 28 dias), e em média de 37,5 MPa (Desvio padrão de 4,6 MPa), sugerindo o emprego de um cimento do tipo CP V-ARI. O maior calor de hidratação deste tipo de cimento em relação ao cimento CP IV, além do aumento do consumo de aglomerante devido a utilização de f_{ck} superior ao especificado e maiores temperaturas de lançamento do concreto ocasionou o elevado aumento da temperatura. Não foi possível confirmar a eventual troca do tipo de cimento.

3.2. Estudo de Caso 2 – Bloco de fundação de torre eólica

Para a definição da metodologia executiva e zoneamento das temperaturas de lançamento do concreto foram realizados estudos térmicos prévios através de evolução tridimensional de temperaturas e tensões pelo método dos elementos finitos. A Figura 6 mostra uma das hipóteses de cálculo considerada para temperatura de lançamento do concreto igual a 25°C, cinco dias após o lançamento da segunda etapa de concretagem com altura de 0,90 m.

Considerando a divisão da concretagem em duas etapas distintas, com intervalo máximo de lançamento de 3 dias, entre elas, os estudos efetuados indicaram os seguintes alertas:

- a) A concretagem da base em duas camadas de concretagem sem refrigeração do concreto poderia apresentar fissuração de origem térmica, sendo necessário a pós ou pré-refrigeração do concreto;
- b) A temperatura de lançamento do concreto refrigerado da primeira camada de concretagem não poderia ultrapassar o valor de 23°C;
- c) A temperatura de lançamento do concreto refrigerado da segunda camada, de menor altura, não poderia ultrapassar 30°C.

Para a execução do concreto refrigerado foi recomendado o emprego de água pré-refrigerada e a utilização de gelo em escamas, sendo esse adicionado à betoneira pela sua maior facilidade de derretimento considerando que o concreto seria fornecido por central de concreto instalada no próprio canteiro da obra.

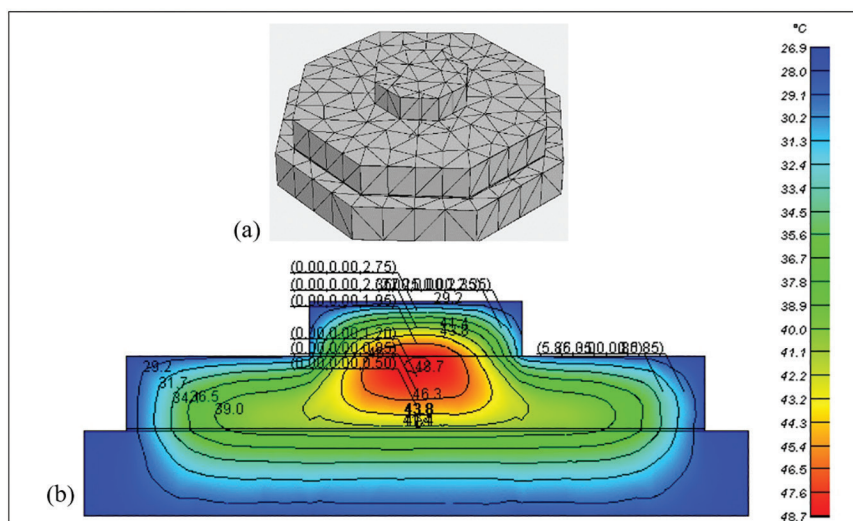


Figura 6: Malha de elementos finitos (a) e isotermas da seção transversal (b) e em planta fornecidas pelo software b4cast de hipótese de cálculo considerando temperatura de lançamento igual a 25°C.

Durante a execução de uma das bases, foram verificadas temperaturas internas do concreto de 70°C para o termopar T-2 instalado na altura 75 cm da sua base. As máximas temperaturas monitoradas para os termopares T-1 e T-3 instalado à 25 cm e à 125 cm da base, respectivamente, foi de 65°C. As máximas temperaturas ocorreram por volta do segundo e terceiro dia após o lançamento do concreto dependendo do local de instalação do sensor de temperatura. Os termopares instalados para o monitoramento da temperatura do concreto após o seu lançamento indicaram os elevados valores (Figura 7). A Figura 8 mostra os sensores instalados à distância de 25 cm (T-4) e 50 cm (T-5) da face lateral do bloco na altura (h) de 75 cm. A temperatura máxima monitorada através dos sensores T-4 foi de 61°C apesar de estar a 50 cm da face lateral da estrutura e o equilíbrio com a temperatura ambiente ocorre no terceiro dia. O termopar T-5 apresenta comportamento térmico similar a temperatura ambiente. O gradiente térmico máximo verificado através do monitoramento variou de 32°C até 35°C.

Em casos de alto risco de temperatura elevadas, é indicado o uso de procedimentos de refrigeração, como, por exemplo, uso de serpentinas, resfriamento dos materiais, emprego de gelo substituindo a água de amassamento, uso de água resfriada, entre outros. Dessa forma, é possível se evitar tensões térmicas e fissuração que podem ser ocasionadas pelo resfriamento do concreto, bem como a ocorrência da DEF [33]. Devido à localização da obra e dificuldades logísticas para a refrigeração do concreto, não foi empregado gelo adicionado diretamente na betoneira, pois este foi fornecido em barras de 20 kg, cada, para uma das bases. Devido à dificuldade de trituração do gelo, pesagem e operação de colocação na betoneira, este foi empregado somente na água do reservatório que alimenta a água de amassamento do concreto, e que resultou em temperatura da água

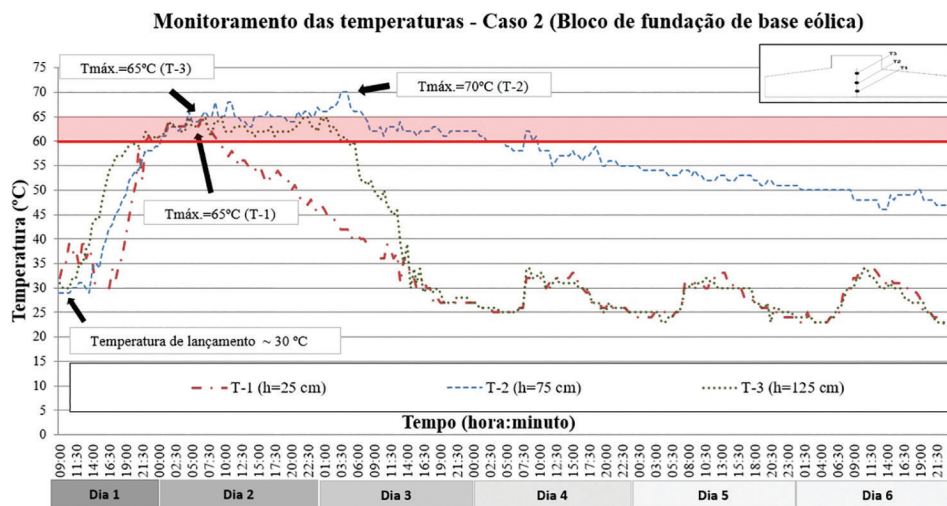


Figura 7: Monitoramento das temperaturas realizado para a primeira camada de concretagem da base da torre eólica para diferentes alturas do bloco e no eixo central (T-1, T-2 e T-3).

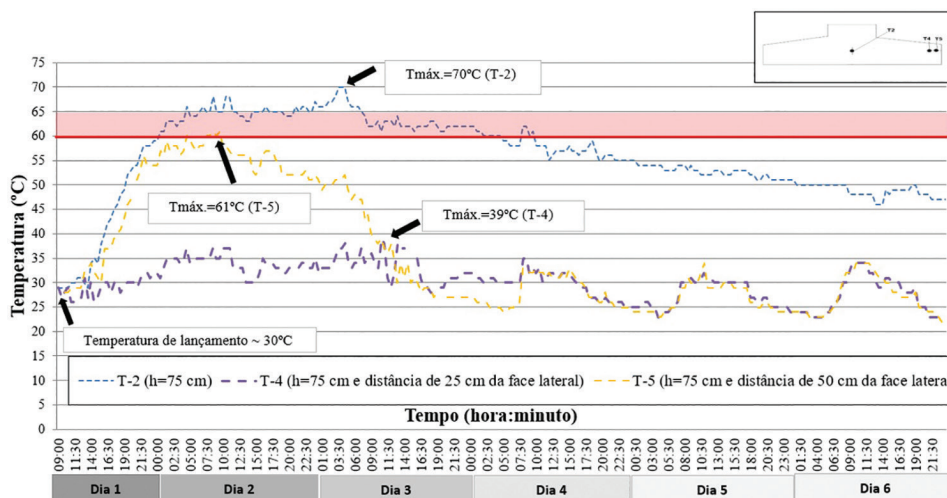


Figura 8: Monitoramento das temperaturas realizado para a primeira camada de concretagem da base da torre eólica para diferentes alturas do bloco e no eixo central (T-2, T-4 e T-5).

próxima de 5°C. Devido aos problemas no carregamento dos materiais não foi possível iniciar a concretagem durante o período noturno. Esta foi iniciada apenas na manhã do dia seguinte, no período de verão, no qual as temperaturas de lançamento do concreto ficaram próximas de 30°C, mesmo considerando a utilização de água refrigerada, sendo assim superiores às temperaturas especificadas ($\leq 23^\circ\text{C}$) baseadas nos estudos térmicos. Para a execução dos blocos de fundação foi empregado cimento CP IV com adição de 12% metacaulim em relação ao consumo de aglomerante total com o intuito de reduzir o consumo de cimento e minimizar os efeitos de aumento de temperaturas nestas estruturas de concreto. Neste caso, apesar do desenvolvimento do traço de concreto com emprego de cimento de baixo calor de hidratação e com adição de metacaulim, devido às operações logísticas e dificuldades de pré-refrigeração do concreto, as temperaturas de lançamento do concreto foram superiores àquelas especificadas a partir do estudo térmico. Assim, o elemento de concreto trouxe preocupação tanto quanto aos riscos de fissuração de origem térmica como aos riscos de ocorrência da DEF no tempo, durante a sua vida útil.

3.3. Estudos laboratoriais

Na Figura 9 são apresentados os comportamentos expansivos da referência e dos compósitos contendo a incorporação do metacaulim, respectivamente. Observa-se um crescimento intenso das expansões por DEF para a condição de referência, em especial a partir dos 6 meses de estudo, com taxas bastante elevadas, chegando a valores próximos de 0,9% aos 12 meses. Já na presença do metacaulim, os valores de expansão foram bem menores. Nas idades iniciais não foram identificadas expansões e sim retrações, porém, ao longo do tempo, é notado um crescimento lento e gradativo das expansões para todas as condições estudadas, principalmente, para as argamassas contendo 4 e 8% desta pozolana. Até a última idade avaliada (12 meses) foram notadas alterações dimensionais positivas para os dois menores teores de metacaulim empregados (4 e 8%); já para os maiores teores (12 e 14%), entre 6 e 12 meses já se notam reduções das retrações, o que remete às variações dimensionais positivas, ou seja, um início de processo de alteração pela DEF. Os estudos de DEF, quando envolvem avaliação de adições pozolânicas, mostram a necessidade de análises em idades mais avançadas, como é o caso do método desenvolvido para concreto [26]; nos ensaios em argamassas o mesmo comportamento tem sido notado [34]. O mesmo ocorre para os estudos de mitigação da reação álcali-agregado, quando a norma NBR 15577 [35] registra a necessidade de estudos até 2 anos em prismas. Portanto, para a garantia de que os teores testados podem realmente combater o processo expansivo e deletério da DEF, a continuidade dos ensaios de expansão por um tempo maior faz-se necessário, além de análises microestruturais. Isso é mostrado nos estudos que foram realizados por Silva *et al.* [16]. Os pesquisadores avaliaram várias adições minerais e pozolânicas e apenas em análises do seu comportamento em idades mais avançadas que foram obtidas conclusões a respeito do processo de mitigação ou não, em função do material testado.

Os dados das velocidades de ondas ultrassônicas bem como dos módulos dinâmicos calculados a partir desses referentes às argamassas testadas, após um ano de estudo, podem ser observados na Figura 10.

Considerando o elevado nível das expansões observadas para a amostra de referência, sem metacaulim (REF), e como esperado, a sua velocidade apresentou valores mais baixos em função das neoformações geradas e fissuração por DEF, conforme estudos comprobatórios por MEV que serão discutidos a seguir, quando comparada às determinadas nas argamassas na presença do metacaulim. Entre as amostras de metacaulim (4MTC a 14MTC), os valores foram praticamente os mesmos, com uma pequena redução média notada na argamassa

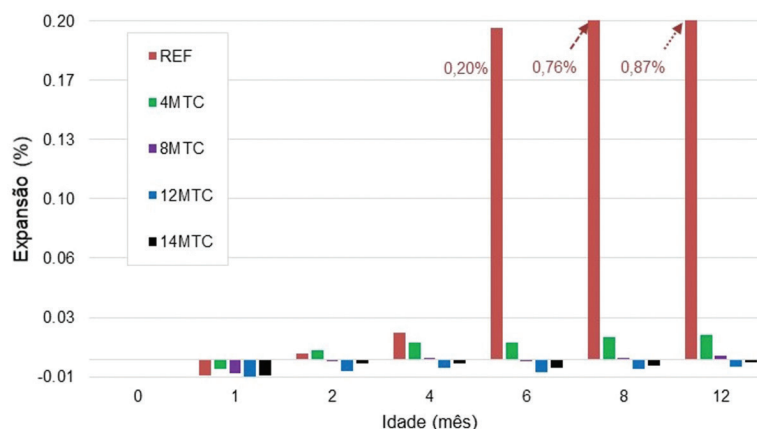


Figura 9: Dados de expansão por DEF ao longo do tempo.

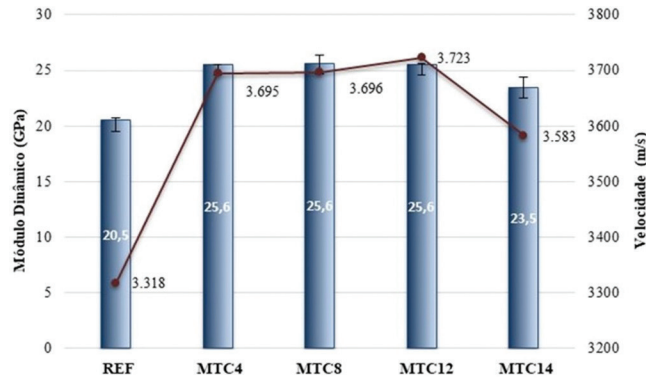


Figura 10: Velocidades de ondas ultrassônicas e respectivos módulos de elasticidade dinâmico médios.

Tabela 4: Dados da resistência à compressão aos 28 dias (MPa).

AMOSTRA	REF	4MTC	8MTC	12MTC	14MTC
Média	44,20	43,80	39,10	38,10	38,60

contendo 14MTC, apesar da maior variabilidade dos dados individuais. Entretanto, as diferenças não ultrapassaram 140 m/s, indicando diferenças pouco expressivas, e dentro da variabilidade do método.

Em relação ao módulo dinâmico, da mesma forma que para as velocidades, a amostra de referência apresentou menor valor ao ser comparada às amostras contendo o metacaulim. As amostras 4MTC, 8MTC e 12MTC ficaram com valores do módulo de elasticidade dinâmico de aproximadamente 25 GPa e velocidade de propagação de ondas com cerca de 3700 m/s. Uma análise de variância foi realizada para avaliar se as diferenças eram estatisticamente significativas tanto entre velocidades como entre os módulos, sendo observadas diferenças significativas entre as amostras testadas, para um nível de confiança de 95%. Ainda, de acordo com o teste de homogeneidade (Tukey), para as duas propriedades as amostras contendo metacaulim foram semelhantes.

Tendo como base as resistências à compressão determinadas nas amostras de controle (28 dias), observou-se que as amostras REF e 4MTC ficaram com valores muito próximos, porém, as amostras 8MTC, 12MTC e 14MTC apresentaram valores médios cerca de 12% inferiores. A partir de análise de variância foram constatadas diferenças significativas entre as amostras testadas. Segundo o teste de homogeneidade por Tukey, as amostras 8MTC, 12MTC e 14MTC são semelhantes e, em outro grupo, a REF e o 4MTC. Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos.

De forma a estimar o módulo de elasticidade dos compósitos, fez-se uma análise a partir dos dados de resistência, chegando-se a 31 GPa e 29 GPa, respectivamente para os dois grupos distintos, REF e 4MTC e 8–14MTC. As quedas estimadas para o módulo dinâmico dos compósitos aos 365 dias são, no mínimo as apresentadas na Figura 11, girando entre 25 e 31% para aqueles contendo metacaulim, e cerca de 44% para a amostra mais deteriorada, a de referência. Ou seja, reduções dessa ordem trariam elevados riscos de danos e colapso por DEF, caso ocorresse no concreto.

Os resultados apresentados são convergentes com os estudos anteriores comprovando que DEF afeta negativamente as propriedades mecânicas reduzindo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade [5–8].

Na Figura 12, a seguir, são apresentadas algumas micrografias registradas para a amostra de referência, sem a incorporação do metacaulim, a partir de análises por MEV, aproximadamente um ano após o término dos ensaios de expansão. Observam-se várias neoformações de etringita - E - ao longo de toda a amostra, com preenchimento dos poros - V (a), na forma massiva dispersa na matriz cimentícia (b) bem como na zona de transição (ZT) entre a pasta e as partículas dos agregados (c). Todas as neoformações foram confirmadas por EDS, sendo detectados os elementos S, Al e Ca, em proporções típicas da etringita.

Nas amostras contendo a adição de metacaulim, nos vários teores empregados em substituição parcial ao cimento, foram também realizadas análises por MEV e nas figuras a seguir são registradas as principais características (Figuras 13–16). Poros contendo a etringita comprimida foram observados em todas as amostras contendo o metacaulim, bem como formações de cristais na matriz cimentícia. Já no que diz respeito à ZT, foram observadas características um pouco distintas entre as amostras com metacaulim. Naquelas contendo teores de 4 e 8% de metacaulim, foram observadas regiões próximas aos agregados com neoformações e, em especial,

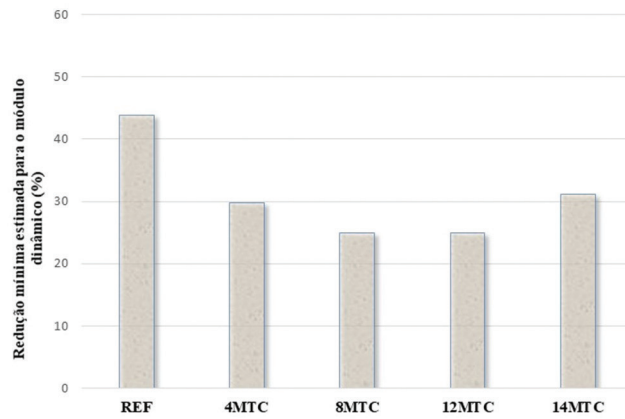


Figura 11: Queda por DEF estimada para o módulo de elasticidade em um ano.

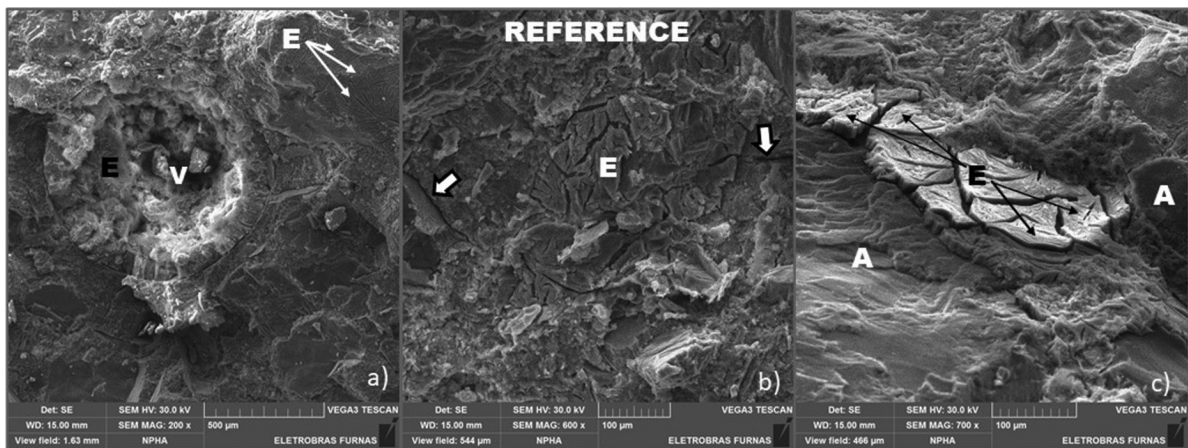


Figura 12: Micrografias obtidas por MEV—Amostra de referência.

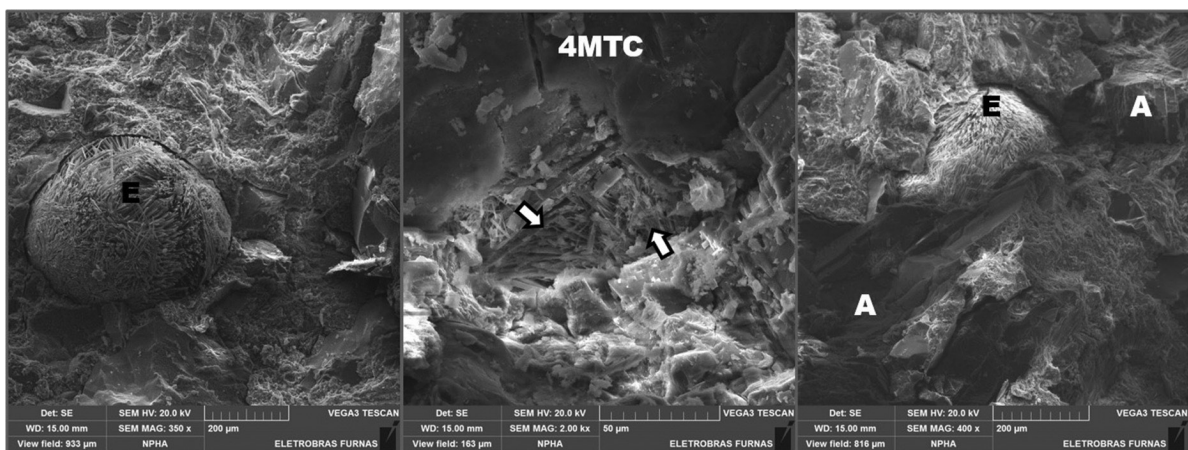


Figura 13: Micrografias obtidas por MEV—Amostra contendo 4% de metacaulim.

nos poros, porém, sem deposições visíveis na própria zona de transição, considerando as amostras que foram analisadas. Já nas amostras contendo 12 e 14% de metacaulim, a incidência da etringita tardia entre grãos de agregados bem como na zona de transição já passou a ser notada. Com 12% desta adição, os agregados se apresentaram bastante fraturados, além de importante pulverulência na pasta de cimento. Com 14%, as formações se apresentavam mais nítidas, e na forma massiva, tanto nos poros, pasta como na ZT. Do ponto de vista das análises pelo MEV, as amostras contendo 12 e 14% de metacaulim se apresentaram mais danificadas, com maior fragilização na microestrutura. De qualquer forma, as manifestações microestruturais que surgiram a partir da

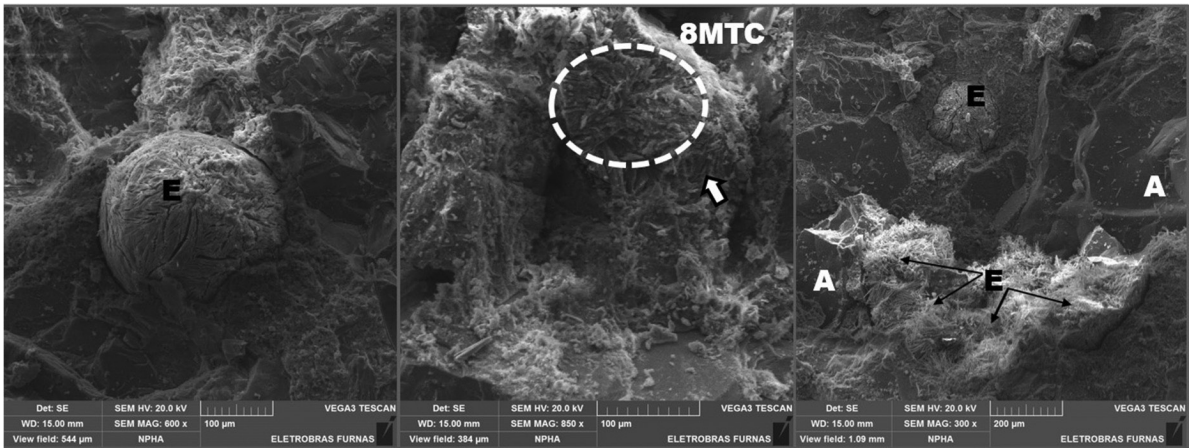


Figura 14: Micrografias obtidas por MEV—Amostra contendo 8% de metacaulim.

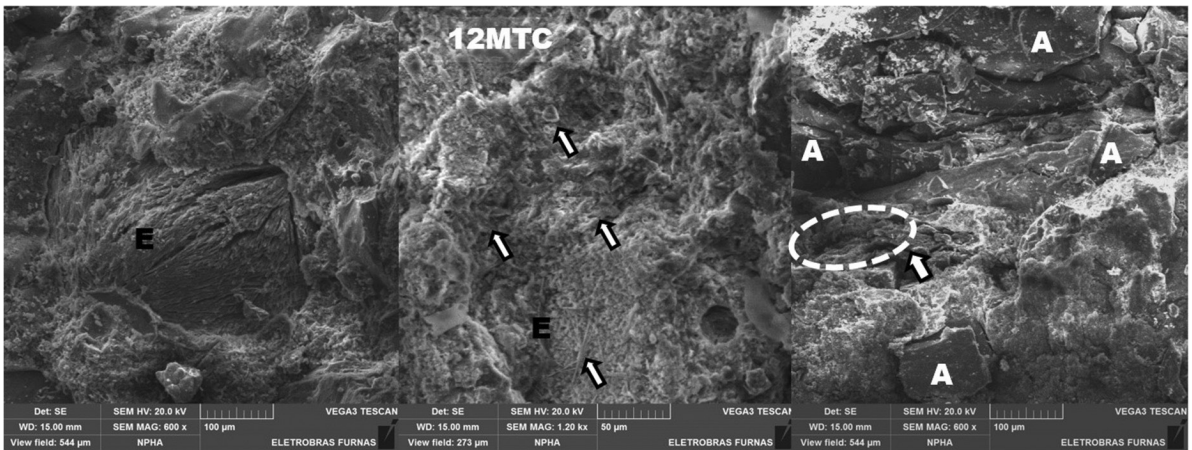


Figura 15: Micrografias obtidas por MEV—Amostra contendo 12% de metacaulim.

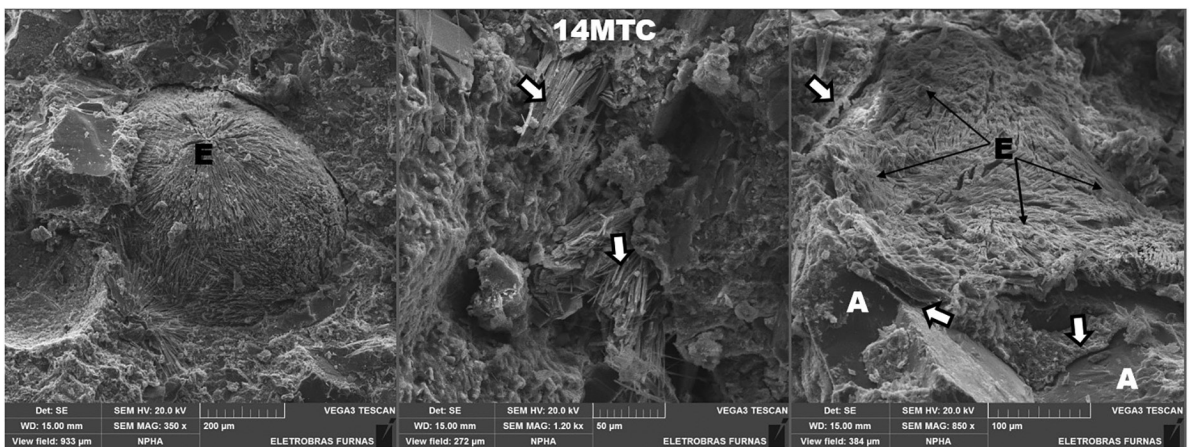


Figura 16: Micrografias obtidas por MEV—Amostra contendo 14% de metacaulim.

indução da DEF, em laboratório, para todas as amostras analisadas indicam um avançado estágio de deterioração, independente do traço empregado. Nos estudos com sílica ativa e cinza de casca de arroz, além daqueles com cimentos pozolânicos (CP IV com cinza volante), foram também observados produtos característicos da DEF por microscopia eletrônica de varredura [5, 6, 24, 25, 34, 36, 37], mesmo em taxas reduzidas de expansão quando comparadas às obtidas para um CP V-ARI.

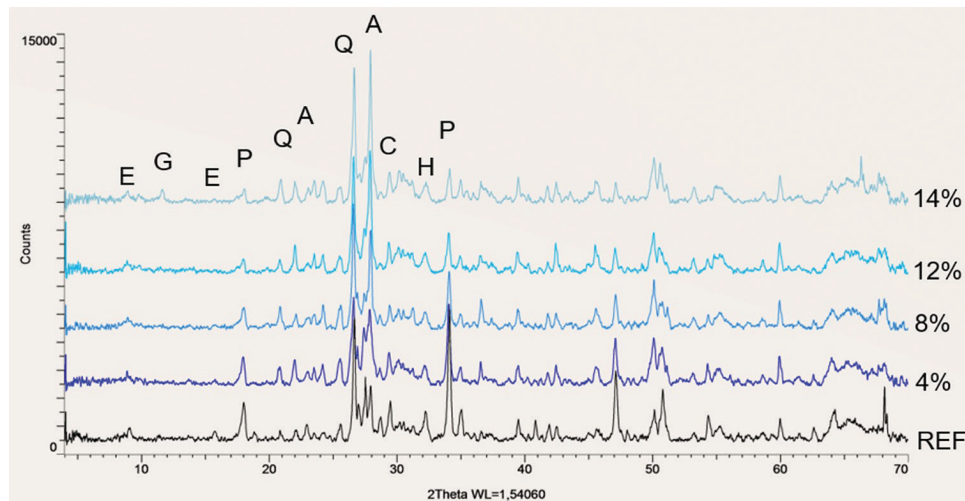


Figura 17: Análise comparativa dos vários picos identificados nos difratogramas nas amostras de referência e com 4, 8, 12 e 14% de metacaulim: etringita (E); gipsita (G); portlandita (P); quartzo (Q); albita (A); calcita (C) e hidrossilicato de cálcio e alumínio—hydrogarnet (H).

Na Figura 17 são apresentadas as curvas referentes aos difratogramas registrados por difração de Raios X, na mesma idade na qual foi executada a análise por MEV, representando análises qualitativas.

As análises por difração de Raios X confirmaram a presença da etringita em todas as amostras avaliadas, independente do teor de metacaulim empregado, corroborando os estudos prévios feitos por MEV no que diz respeito à sua identificação. Os picos referentes à portlandita são reduzidos à medida que o teor de metacaulim aumenta, como esperado, em decorrência da reação pozolânica. O pico de gipsita verificado na amostra contendo 14% de metacaulim foi inesperado, porém, esse pode indicar um avanço do ataque pelos sulfatos em decorrência do elevado teor da adição e, conseqüentemente, eventualmente por questões de dispersão do material, bem como em função da maior redução de alcalinidade da solução dos poros. Conforme já mencionado anteriormente foi observado durante as análises no MEV que as amostras contendo 12 e 14% de metacaulim se apresentaram mais danificadas, com maior fragilização na microestrutura, justificando um estágio avançado de deterioração aos 2 anos de idade desses compósitos. A presença da etringita bem como da gipsita já é conhecida em função de variados tipos de ataques por sulfatos [10, 38, 39].

A situação apresentada nesse trabalho envolvendo elevadas temperaturas e a adição de metacaulim é bastante preocupante e indica que compósitos de cimento que contenham esta adição podem sofrer de danos por DEF no futuro, caso uma avaliação cuidadosa da combinação dos materiais, além de estudos térmicos para definição de metodologia adequada não sejam realizados antes da obra ser executada.

Os casos reais demonstrados neste trabalho confirmam a susceptibilidade dessa adição em geração maior de calor quando não são tomados os devidos cuidados durante a fase de execução. As elevadas temperaturas (~70°C) experimentadas pelos concretos nos dois estudos de caso apresentados, mesmo na presença de cimentos pozolânicos (de baixo calor de hidratação), porém com a incorporação do metacaulim, foram comprovadas pela instrumentação instalada internamente nos elementos de concreto em campo. Sendo assim, as estruturas correm risco futuro da ocorrência da DEF e reflexos negativos nas propriedades, dependendo das condições ambientais experimentadas por seus elementos de concreto. O estudo de Gambale [40]; Gambale *et al.* [3] também mostram que para consumos de cimento da ordem de 350 kg/m³ a DEF pode ser formada. Em Hasparyk *et al.* [41], é apresentado um estudo de caso real no Brasil no qual os blocos de fundação da edificação tiveram que ser reforçados em decorrência da elevada temperatura atingida pelo concreto, causando a DEF, associada à reação álcali-agregado (RAA).

Em relação aos estudos em laboratório, esses conseguiram simular uma situação de campo e induzir a DEF. Foram testados vários teores de metacaulim, em substituição parcial ao cimento, em volume (4, 8, 12 e 12%), considerando uma temperatura de pico de 80°C, que tem sido observada de forma corriqueira nas obras atuais haja vista que o metacaulim, bem como outras adições minerais como a sílica ativa, vem sendo empregados em substituição ao cimento do tipo CP V-ARI. Após um ano de ensaio em laboratório, as argamassas testadas indicaram apenas expansão expressiva para a amostra de referência, sem a adição. Nas amostras contendo metacaulim, e até a idade avaliada de um ano, as expansões foram bem menores, justificando o motivo de ter sido feita a paralização dos ensaios de expansão em laboratório neste período do estudo.

Posteriormente, resultados semelhantes foram mostrados nos estudos de Nguyen *et al.* [29], que utilizaram o metacaulim em substituição parcial ao cimento (em massa) nos teores de 10%, 20% e 30%, sendo que as expansões até a idade de 650 dias para os maiores teores foram muito baixas. Entretanto, no presente trabalho, após a retirada das amostras do ambiente de exposição e as barras protegidas de perda de umidade (envoltas por filme plástico), e o seu armazenamento em laboratório em sala controlada (21°C e 50% de umidade) por um período de cerca de mais ano, decidiu-se por realizar análises de microestrutura (REF e 4MTC a 14MTC). A partir dessas análises, com cerca de dois anos de idade, as amostras demonstraram intensa deterioração do ponto de vista microestrutural e o avanço da DEF nesse tempo em que ficaram guardadas (aproximadamente um ano), indicando apenas um retardo do processo expansivo pela adição do metacaulim nos ensaios, mas com deterioração interna já em curso. Deste modo, os estudos de DEF, quando envolverem uma avaliação de adições minerais, necessitam de idades mais avançadas, conforme inclusive prescrito no método apresentado por Hasparyk *et al.* [26].

Em relação às propriedades mecânicas, observou-se que as resistências à compressão aos 28 dias foram menores nas amostras preparadas com metacaulim em relação à argamassa de referência. Nas estimativas do comportamento do módulo de elasticidade (Figura 10), foram observadas quedas em um ano entre 25% e 44%, dependendo do traço empregado, mesmo na presença do metacaulim. Nguyen *et al.* [29] também notaram que a resistência à compressão sofreu uma diminuição à medida em que a quantidade de substituição de metacaulim empregada aumentava, em idade semelhante. Já os estudos de Schovanz *et al.* [5], mostraram graves consequências da DEF nas propriedades do concreto com um cimento de alta resistência já na idade de seis meses, com reduções da ordem de 55% tanto para a resistência à compressão quanto à tração, e de 72% para o módulo de elasticidade.

Com base no exposto, o emprego de adições no concreto massa, sujeito a elevadas temperaturas a partir do calor de hidratação deve ser cuidadosamente avaliado. Ainda, os estudos em argamassas com adição pozolânica, até a idade de um ano, não foram suficientes para prever o comportamento real expansivo por DEF, sendo necessários estudos de maior duração, além de testes em laboratório complementares com concretos e análises de microestrutura, de forma a se aproximar mais da situação de campo. No caso da ausência de ensaios para avaliar a DEF e o potencial mitigador de adições em concretos e a longo prazo, estudos térmicos devem ser executados de forma a prever as condições de lançamento e resfriamento do concreto [12, 33].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento de dados apresentado nesse trabalho a respeito dos dois casos de obras permitiu observar o potencial térmico dos cimentos e adições na geração de calor interno no concreto, chegando a elevadas temperaturas na presença do metacaulim em conjunto com um cimento pozolânico. Os estudos em laboratório complementaram as informações, trazendo subsídios para as conclusões a respeito dos danos que a DEF pode trazer às propriedades mecânicas e o grave nível de deterioração dos compósitos a base de cimento, com fragilização da sua matriz cimentícia e da zona de transição pasta-agregado.

O desenvolvimento dos estudos laboratoriais e a análise dos casos permitiram as seguintes conclusões:

- Os estudos térmicos servem como balizadores e base para as definições de metodologias executivas adequadas na fase de projeto, sendo os modelos matemáticos empregados bem aderidos aos dados reais.
- O aumento do consumo de cimento em relação ao inicialmente previsto por meio de estudos de dosagens e lançamento do concreto em temperaturas superiores às especificadas podem resultar em temperaturas internas superiores a (60–65°C), acima das quais riscos da DEF podem ocorrer.
- O emprego de um cimento pozolânico e/ou do metacaulim não garantem a mitigação da DEF, considerando as condições avaliadas e testadas apresentadas neste trabalho.
- Os estudos em laboratório demandam um tempo longo de ensaio para comprovar a mitigação ou não de aglomerantes e adições frente à expansão por DEF.
- Análises preliminares ou em idades menores do que dois anos não são recomendadas para avaliar a mitigação da DEF, caso isso ocorra, elevados riscos de deterioração existem. Do ponto de vista microestrutural, a incidência de neoformações da DEF e um grande nível de deterioração interno foram comprovados, indicando apenas um retardo do desenvolvimento das expansões no tempo na presença do metacaulim.
- A DEF pode provocar reflexos negativos expressivos às propriedades dos concretos, tanto ao módulo de elasticidade quanto às resistências, portanto, essa ocorrência deve ser evitada.

Como consideração final, a realização de estudos térmicos na fase de projeto é necessária para a definição de plano executivo adequado em acordo com as condições logísticas e cronograma da obra com menor risco de fissuração. As diretrizes apontadas pelos especialistas dos estudos devem ser rigorosamente seguidas quando da

execução das estruturas de concreto. Estudos prévios para a escolha dos materiais constituintes do concreto, a definição da dosagem adequada do concreto e as práticas de pré-refrigeração e/ou pós-refrigeração devem ser consideradas, bem como a redução da altura das camadas de concretagem de forma a garantir a maior dissipação do calor interno das estruturas. Estas medidas garantem a integridade das estruturas de concreto do ponto de vista dos cuidados tanto em relação à fissuração de origem térmica quanto à DEF.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro e de infraestrutura de Furnas Centrais Elétricas SA/ANEEL, por meio do projeto de P&D FURNAS ANEEL n. 0394-1504-2015. Os autores agradecem o apoio da empresa Eletrobras Furnas no financiamento da pesquisa, aos técnicos que contribuíram com este estudo bem como à empresa DESEK pelas informações disponibilizadas e contribuições no presente trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] RIBEIRO, A.V.S., PRUDÊNCIO JR., L.R., DE MATOS, P.R., *et al.*, “Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão”, *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, e-12915, 2021.
- [2] MATOS, P.R., JUNCKES, R., PRUDÊNCIO JR., L.R. “Influência do uso de cinza volante na elevação adiabática de temperatura e resistência à compressão de concretos”, *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, e-12359, 2019.
- [3] GAMBALE, P.G.; GAMBALE, E.A.; HASPARYK, N.P., *et al.*, “Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF”, In: *Anais do 61º Congresso Brasileiro de Concreto*, Fortaleza, 2019.
- [4] GU, Y., MARTIN, R.P., METALSSI, O.O., FEN-CHONG, T., *et al.*, “Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation”, *Cement and Concrete Research*, v. 123, 105766, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.011>
- [5] SCHOVANZ, D., TIECHER, F., HASPARYK, N.P., *et al.*, “Evaluation of delayed ettringite formation through physical, mechanical, and microstructural assays”, *ACI Materials Journal*, v.118, n. 1, pp. 101–109, 2021.
- [6] TIECHER, F., LANGOSKI, M., HASPARYK, N., “Behavior of mortars with different types of cement when induced to Delayed Ettringite Formation (DEF)”, *Revista ALCONPAT*, v. 11, n. 3, pp. 1–16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.537>
- [7] HASPARYK, N.P., SCHOVANZ, D., TIECHER, F., *et al.*, “Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash”, *Ibracon Structures and Materials Journal*, v.15, n. 3, e-15305, 2022.
- [8] PORTELLA, K.F., HASPARYK, N.P., BRAGANÇA, M.D.G.P., *et al.*, “Multiple techniques of microstructural characterization of DEF: Case of study with high early strength Portland cement composites”, *Construction and Building Materials*, v. 305, 125341, 2021.
- [9] BRAGANÇA, M.O.G.P., HASPARYK, N.P., BRONHOLO, J., *et al.*, “Electrochemical impedance spectroscopy and ultrasound for monitoring expansive reactions and their interactions on cement composites”, *Construction and Building Materials*, v. 305, 124726, 2021.
- [10] HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C., “Deterioração do concreto por reações expansivas”, In: *XXXII—Seminário Nacional de Grandes Barragens—Comitê Brasileiro de Barragens*, Salvador, 2019.
- [11] VICENTE, G.R., KUPERMAN, S.C., FUNAHASHI JR., E.I., “Fissuração de origem térmica em blocos de fundação: quando refrigerar o concreto?”, In: *Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto*, Natal, 2014.
- [12] GAMBALE, P.G., GAMBALE, E.A., HASPARYK, N.P., *et al.*, “Modelagem e retroanálise do comportamento térmico do concreto em protótipo e fundação *in loco*”, *Concreto & Construções*, v. 103, pp. 55–60, 2021.
- [13] FUNAHASHI JR., E., GRAÇA, N.G., KUPERMAN, S.C., *et al.*, “Belo monte hydropower plant—temperatures and thermal stresses analysis of the intake”, In: *Third International Dam World Conference*, pp. 17–21, Foz do Iguaçu, 2018.
- [14] THOMAS, M., “The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, pp. 1224–1231, 2011.
- [15] NGUYEN, V.H., LEKLOU, N., AUBERT, J.E., *et al.*, “The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars”, *Construction and Building Materials*, v. 48, pp. 479–484, 2013.

- [16] SILVA, A.S., RIBEIRO, A.B., LOIC, D., “Prevention of internal sulfate reaction in concrete. Long-term results of the effect of mineral additions”, In: “*Proceeding of 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete*, Lisboa, 2021.
- [17] LEKLOU, N., NGUYEN, V.H., MOUNANGA, P., “The effect of the partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 21, n. 4, pp. 1359–1366, 2016.
- [18] FUNAHASHI JR., E.I., *Influência do tipo de cimento Portland no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo de desempenho do concreto*. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2018.
- [19] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *C 1702: Standard Test Method For Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementations Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry*. Albany: ASTM, 2017.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento—Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant. NBR 12006*. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento Portland—Requisitos. NBR 16697*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [22] KCHAKECH, B., MARTIN, R.P., OMIKRINE-METALSSI, O., *et al.*, “Effect of temperature and curing duration of early heat treatments on the risk of expansion associated with delayed ettringite formation”, In: Bernardes, H.M., Hasparyk, N.P. (eds), *Proceeding of 15° International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete—15th ICAAR*, São Paulo, 2016.
- [23] GIANNINI, E.R., SANCHEZ, L.F.M., TUINUKUAFE, A., *et al.*, “Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test”, *Construction and Building Materials*, v. 162, pp. 253–264, 2018.
- [24] SCHOVANZ, D., *Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade Meridional, Passo Fundo, 2019.
- [25] BRONHOLO, J.L., *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 em Desenvolvimento de Tecnologia), Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento; Instituto de Engenharia do Paraná. Curitiba, 2020.
- [26] HASPARYK, N.P., SCHOVANZ, D., KUPERMAN, S.C., Instrução Técnica nº. GSTE004R0—Método de Ensaio para a Avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em concreto, 2020. <https://www.furnas.com.br/subsecao/90/publicacoes-tecnologicas?culture=pt>
- [27] DAYARATHNE, W.H.R.S., GALAPPATHTHI, G.S., PERERA, K.E.S., *et al.*, “Evaluation of the potential for delayed ettringite formation in concrete”, In: *National Engineering Conference*, pp. 59–66, Sri Lanka, 2013.
- [28] RASHIDI, M., PAUL, A., KIM, J.Y., *et al.*, “Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity”, *Cement and Concrete Research*, v. 95, pp. 1–8, 2017.
- [29] NGUYEN, V., LEKLOU, N. AND MOUNANGA, P., “The effect of metakaolin on internal sulphate attack of the heat-cured mortars”. *Romanian Journal of Materials*. v. 49, n. 1, pp. 51–57, 2019.
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *C1012/C1012M: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. Albany: ASTM, 2018.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Cimento Portland—Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 7215*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto endurecido—Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. NBR 8802*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [33] HASPARYK, N.P., KUPERMAN, S.C., “Reações expansivas deletérias no concreto”, *Concreto & Construções*, v. 102, pp. 60–66, 2021
- [34] OLIVEIRA, S., OLIVEIRA, A.M., HASPARYK, N.P., “DEF induction in the laboratory and effect of silica fume on the expansions of mortars”, In: *XVI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIII Congreso de Control de Calidad em la Construcción*, Brasil, 2021.

- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Agregados—Reatividade álcali-agregado—Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. NBR 15577–15574*, Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [36] LANGOSKI, M., *Estudo da formação da etringita tardia (DEF), por meio de argamassas, com diferentes tipos de cimento Portland*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade IMED, Passo Fundo, 2021.
- [37] OLIVEIRA, S., AMANTINO, G., HASPARYK, N.P., *et al.*, “Avaliação do potencial da cinza de casca de arroz na mitigação da DEF”, In: *Anais do 62º Congresso Brasileiro de Concreto*, Florianópolis, 2020.
- [38] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. “Durabilidade”. In: HASPARYK, N.P., editora. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- [39] BATISTA, D.G., *Investigação da deterioração de concretos de UHes por reações com os agregados*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- [40] GAMBALE, P.G., *Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- [41] HASPARYK, N.P., KUPERMAN, S., TORRES, J.R. “Combined attack from AAR and DEF in the foundation blocks of a building.” In: Bernardes, H.M., Hasparyk, N.P. (eds), *Proceeding of 15º International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete – 15th ICAAR*. IBRACON: São Paulo, 2016.