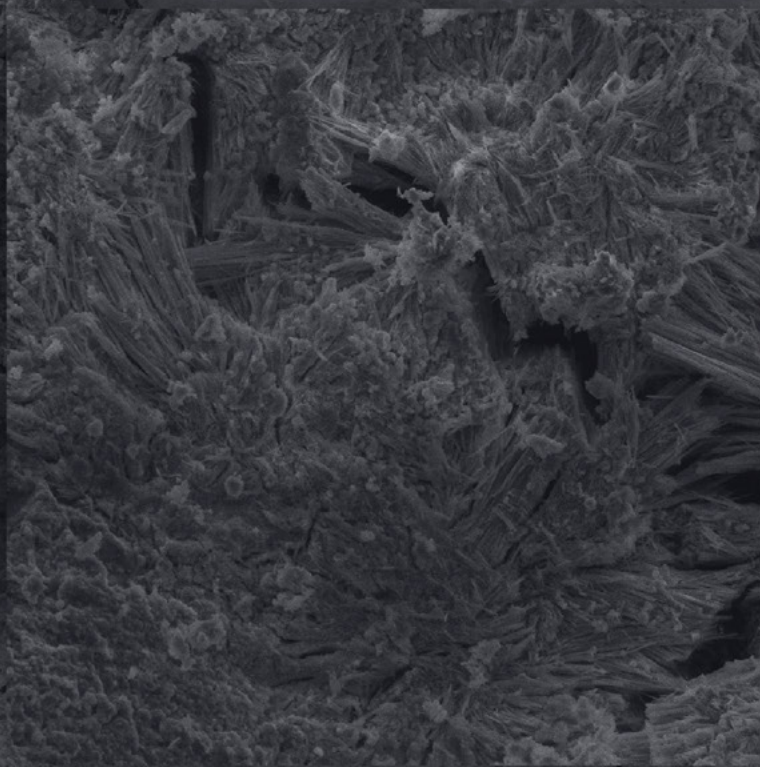


RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A PREVENÇÃO DA DEF E DA FISSURAÇÃO TÉRMICA NO CONCRETO



Editores

Selmo Chapira Kuperman
Nicole Pagan Hasparyk

Autores

Nicole Pagan Hasparyk
Selmo Chapira Kuperman
Eduardo Issamu Funahashi Jr.
Grazielle Ribeiro Vicente
Eduardo de Aquino Gambale

1ª Edição
2023

ISBN: 978-65-00-80553-6



9 786500 805536

RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A PREVENÇÃO DA DEF E DA FISSURAÇÃO TÉRMICA NO CONCRETO

Editores

Selmo Chapira Kuperman
Nicole Pagan Hasparyk

Autores

Nicole Pagan Hasparyk
Selmo Chapira Kuperman
Eduardo Issamu Funahashi Jr.
Grazielle Ribeiro Vicente
Eduardo de Aquino Gambale

1ª Edição

São Paulo – 2023

Autores: Nicole Pagan Hasparyk, Selmo Chapira Kuperman, Eduardo Issamu Funahashi Jr., Grazielle Ribeiro Vicente e Eduardo de Aquino Gambale.

RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A PREVENÇÃO DA DEF E DA FISSURAÇÃO TÉRMICA NO CONCRETO

Primeira Edição. São Paulo.

76 p. 21 cm x 29,7 cm.

ISBN 978-65-00-80553-6

1. Elementos e Estruturas de concreto.
2. Manifestações patológicas.
3. Deterioração do concreto.
4. Temperatura.
5. Formação de etringita tardia (DEF).
6. Fissuração de origem térmica.

Editores: Selmo Chapira Kuperman
Nicole Pagan Hasparyk

Todos os direitos reservados. Caso este livro ou suas partes sejam utilizados por meio de reprodução ou cópia, os editores e autores deverão ser citados.

Editoração Eletrônica e Diagramação: Arte Interativa
www.arteinterativa.com.br

Arte da Capa: Breno Hasparyk Andrade

As informações contidas neste livro foram obtidas pelos autores, de fontes consideradas idôneas. No entanto, nem os autores, nem os editores devem ser responsabilizados por quaisquer erros, omissões ou danos decorrentes do uso indevido destas informações. Este livro é publicado com o objetivo de fornecer informação técnico-científica, mas não de prestar serviços de engenharia ou outros serviços profissionais. Se tais serviços forem necessários, um profissional competente deve ser contratado.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Recomendações técnicas para a prevenção da DEF e da fissuração térmica no concreto [livro eletrônico] / Nicole Pagan Hasparyk...[et al.]. -- 1. ed. -- Goiânia, GO : Ed. dos Autores, 2023.
PDF

Outros autores: Selmo Chapira Kuperman, Eduardo Issamu Funahashi Jr., Grazielle Ribeiro Vicente, Eduardo de Aquino Gambale.

Bibliografia.
ISBN 978-65-00-80553-6

1. Concreto 2. Concreto - Deterioração 3. Engenharia civil (Estruturas) 4. Estruturas de concreto I. Hasparyk, Nicole Pagan. II. Kuperman, Selmo Chapira. III. Funahashi Jr., Eduardo Issamu. IV. Vicente, Grazielle Ribeiro. V. Gambale, Eduardo de Aquino.

23-172329

CDD-624

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia civil 624

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

A engenharia brasileira para barragens de concreto massa tem uma longa tradição de excelência e de treinar projetistas, construtores, tecnólogos de altíssimo nível internacional. A construção de grandes barragens no Brasil só foi possível graças à contribuição desses engenheiros sempre dispostos a encontrar soluções pioneiras, originais e econômicas. Dentre as grandes contribuições, destaco a computação de tensões térmicas e de como elas poderiam ser minimizadas pela tecnologia avançada do concreto massa; os experimentos laboratoriais de elevação térmica, fluência do concreto, propriedades térmicas e mecânicas do concreto; a instrumentação detalhada para monitorar a barragem durante a construção e a sua vida útil e, finalmente, o desenvolvimento de concreto compactado com rolo.

Desafios à durabilidade dessas barragens foram encontrados desde o início do período de suas construções, nos anos 60. A solução de usar argila calcinada para mitigar ou eliminar a reação álcali-agregado na barragem de Jupuí antecedeu por várias décadas o recente interesse em se utilizar argila calcinada para reduzir o “carbono footprint” do concreto. Desde essa época, o Brasil se converteu em um expoente nas pesquisas sobre esse tipo de reação expansiva deletéria.

A reação deletéria causada pela Formação de Etringita Tardia (DEF) foi descoberta bem mais tarde, principalmente por um grande processo litigioso envolvendo o cliente, concreteiras e cimenteiras. O processo americano foi longo e envolveu vários especialistas de renome. As reuniões do *American Concrete Institute* tinham um grande número de advogados contrastando no meio de engenheiros surpresos pelo interesse deles em discussões técnicas. Muitos relatórios técnicos foram lacrados após o término do litigioso, o que foi bastante frustrante. Felizmente, os autores desse livro preenchem toda essa lacuna com uma brilhante descrição da DEF. É importante frisar que o leitor vai encontrar uma perspectiva baseada em anos de trabalhos experimentais e reparos em obras brasileiras.

Os autores são autoridades reconhecidas pela qualidade de pesquisas em concreto para barragens e variadas estruturas diversas, e DEF, assim como, em reparos de estruturas danificadas pela DEF.

A intensidade dos danos causados pela DEF em estruturas brasileiras é impressionante. A leitura desse livro deveria ser obrigatória para engenheiros interessados em construir estruturas em concreto armado com longa vida útil. O livro apresenta de uma maneira didática exemplos de danos observados na prática, uma discussão precisa de como o tipo de cimento pode afetar a reação assim como uma análise crítica dos testes laboratoriais para determinar o risco de a reação ocorrer na sua obra. É sabido que a temperatura controla a cinética da reação e por isso um capítulo do livro é dedicado à análise da computação térmica existente na estrutura. O livro inclui com uma apresentação de estudo de casos e recomendações de como evitar os danos dessa reação.

Os editores e, também, autores desta publicação, Dr Selmo Kuperman e Dra Nicole Pagan Hasparyk, foram muito felizes na elaboração do livro e na seleção dos coautores. Além de serem excelente especialistas, eles tem o dom de explicar tópicos complexos de uma maneira precisa e didática. Os dois editores têm uma vasta experiência prática e teórica na área da tecnologia do concreto. Tive o prazer de conhecer bem o engenheiro Selmo Kuperman quando ele fez uma pós-graduação na Universidade da Califórnia em Berkeley, onde estudou com os professores Milos Polivka e David Pirtz, bem como o renomado Dr. Roy W. Carlson, o gênio do concreto massa no mundo. Ao concluir seus estudos em Berkeley, o Dr. Carlson mencionou que o Selmo Kuperman era um dos engenheiros mais talentosos e dedicados que ele havia conhecido. Fiquei extremamente orgulhoso de acompanhar a carreira da Dra. Nicole Pagan Hasparyk, que se tornou uma especialista de renome na área de durabilidade. Foi também editora das 2 versões brasileiras do livro escrito por mim e pelo Prof. P. Kumar Mehta (*in memoriam*), publicadas nos anos de 2008 e 2014, intitulado “Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais”. Ainda, um de nossos artigos até recebeu a medalha Wason Materials Research do American Concrete Institute e essa pesquisa relatava novas técnicas de análise para a identificação de agregados reativos.

Eu não conheço nenhum livro similar, tanto no Brasil quanto no exterior, e gostaria de parabenizar os editores e autores por essa importante e significativa contribuição técnica. Sem dúvida, essa obra será um marco na tecnologia do concreto, trazendo avanços e conhecimentos valiosos para a engenharia.

Prof. Dr. Paulo J. M. Monteiro
University of California, Berkeley

APRESENTAÇÃO

O presente livro procurou consolidar o avanço no conhecimento disponível até a data desta edição no que tange a prevenção da DEF e da fissuração de origem térmica.

Com o principal propósito de disseminar o conhecimento adequado e as boas práticas da tecnologia do concreto na construção civil, os autores sempre defendem as ações mais favoráveis de forma a garantir o bom desempenho e a durabilidade dos elementos e estruturas de concreto.

A prevenção da ocorrência de manifestações patológicas, bem como a economia em reparos, reforços e recuperações ao longo da vida útil do concreto, é consequência da adoção das recomendações técnicas apresentadas neste documento.

O livro está dividido em 8 capítulos que contemplam desde uma contextualização sobre os temas, seguido por uma apresentação de casos de DEF e de fissuração de origem térmica. Causas e consequências são abordadas além de estudos em laboratório para avaliar o potencial para a DEF e recomendações para a prevenção da DEF. Estudos térmicos, bem como a sua aplicação, são apresentados além de formas de refrigeração do concreto para a redução da temperatura, quando necessário.

Esse documento traz orientações aos profissionais que trabalham com concreto num linguajar técnico, simples, com foco no atingimento da melhor qualidade das construções.

O tema DEF – *Delayed Ettringite Formation* (Formação da Etringita Tardia) no concreto pode parecer complexo para alguns ou, às vezes, simples para outros, porém, a preocupação com a durabilidade, sustentabilidade e segurança fazem com que a devida atenção deva ser dada a esse fenômeno, que pode surgir por meio de cura térmica inadequada em elementos pré-moldados ou pela temperatura excessiva gerada pelo próprio calor de hidratação do cimento após o contato com a água.

Um inicial e apropriado estudo térmico, adequado controle tecnológico, emprego de materiais constituintes do concreto criteriosamente selecionados para cada situação e monitoramento são necessários para a garantia do desempenho esperado do elemento e/ou estrutura de concreto.

Com satisfação, apresentamos ao leitor esta publicação e agradecemos aos autores por compartilharem os seus conhecimentos nesta obra.

Nicole Pagan Hasparyk
Selmo Chapira Kuperman
Editores

CONTEÚDO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	APRESENTAÇÃO	1
1.2.	A DEF	1
1.3.	CASOS DE ESTRUTURAS AFETADAS POR DEF	4
1.4.	CASOS DE FISSURAÇÃO DE ORIGEM TÉRMICA	6
1.4.1.	Fissuração de origem térmica em vertedouro de PCH	6
1.4.2.	Fissuração de origem térmica em bloco de fundação de edificação	8
1.4.3.	Fissuração de origem térmica em bloco de vertedouro	9
2	O PAPEL DO CIMENTO	11
3	INFLUÊNCIA DA DEF NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO	15
4	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A DEF	23
5	MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA A DEF	27
6	ESTUDOS TÉRMICOS	29
6.1.	INTRODUÇÃO	29
6.2.	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO	30
6.3.	CÁLCULO DO DESENVOLVIMENTO DAS TEMPERATURAS NO CONCRETO MASSA	30
6.3.1.	Propriedades térmicas do concreto para avaliação das temperaturas	31
6.3.2.	Condições ambientais e cálculos de temperaturas	37
6.3.3.	Propriedades para análise do comportamento térmico-tensional do concreto	38
6.3.4.	Cálculo das tensões de origem térmica	39
7	EXEMPLOS DE ESTUDOS TÉRMICOS	43
7.1.	INTRODUÇÃO	43
7.2.	BASE DE AEROGERADOR DE TORRE EÓLICA	43
7.3.	LAJES E PAREDES DE MOINHOS	47
7.4.	BLOCO DE FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO EM SÃO PAULO	51
7.5.	RADIER DE EDIFÍCIO EM SÃO PAULO	52
8	REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO	55
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Essa publicação foi preparada com o objetivo de orientar o meio técnico com relação aos riscos de ocorrência do fenômeno patológico conhecido internacionalmente por DEF (*Delayed Ettringite Formation* – Formação de Etringita Tardia) e apresentar recomendações técnicas de modo a atuar preventivamente quando da confecção e aplicação do concreto em estruturas variadas.

Nesse documento encontra-se grande parte do conhecimento adquirido ao longo dos anos em diagnóstico de patologias a nível nacional e internacional, prestações de serviços, bem como também o conhecimento adquirido a partir de projetos de P&D relacionados à reações expansivas, como a DEF. Diante disso, o pressuposto desse documento visa divulgar informações tecnológicas relevantes sobre o tema de modo a suprir, em parte, lacunas existentes em termos de publicações específicas e normalização.

1.2. A DEF

A Formação de Etringita Tardia (DEF) representa um tipo de manifestação patológica que pode ocorrer nas estruturas de concreto e afetar a sua qualidade, desempenho e durabilidade. A deterioração do concreto é resultado de fenômenos patológicos que podem levar à redução da vida útil de estruturas.

A DEF pode ser definida como um processo químico de deterioração do concreto causador de reações expansivas que gera severos prejuízos às estruturas, dependendo dos materiais empregados, do tipo de concreto, da forma de aplicação e do ambiente de exposição. Não existem soluções práticas quando um concreto se encontra afetado pela DEF, por esse motivo o assunto passa a ter uma maior dimensão e preocupação, devendo-se atuar preventivamente, sempre.

A DEF se enquadra em **ataque por sulfatos**, porém, de **origem interna**. Sabe-se que o ataque por sulfatos ao concreto pode ocorrer em função do tipo da fonte dos íons sulfatos (fontes externas e/ou fontes internas).

Quando as fontes de íons sulfato são externas ao concreto (ex.: águas residuais industriais; águas do subsolo; esgoto; água do mar; água proveniente de chuva ácida; efluentes a base de enxofre que saem de fornos com combustível; fertilizantes presentes nos solos e águas agrícolas), a melhor prática é adotar um compósito de cimento Portland com baixa permeabilidade. Recomenda-se também o emprego de cimentos resistentes aos sulfatos, e com adições, de modo a impedir a penetração dos íons e, por conseguinte, o ataque externo por sulfatos (denominado ESA – *External Sulfate Attack*). Ou seja, é factível criar uma barreira física para a entrada de agentes agressivos, trabalhando apenas os tipos de materiais a serem empregados, a dosagem do concreto e realizando um controle tecnológico apropriado (SANTANA *et al.*, 2018). Normalmente, com o emprego de cimentos pozolânicos ou com a incorporação de adições minerais pozolânicas ao cimento, é possível atingir o desejado, limitando-se a

relação água/cimento. O emprego de aditivos também pode contribuir para essa densificação da matriz e também para a melhoria do desempenho das adições.

No **ataque interno por sulfatos**, também conhecido internacionalmente por **ISA** (*Internal Sulfate Attack*), são várias as possibilidades de ocorrência, a depender dos materiais constituintes do concreto como fonte. Os agregados e os cimentos são exemplos clássicos.

No caso do **agregado**, esse pode conter **sulfatos** em sua composição, como os sulfatos de cálcio, sódio ou ferro, ou **sulfetos**, dependendo da origem do material. Por esse motivo uma minuciosa caracterização dos agregados faz-se necessária, não somente para identificar minerais potencialmente reativos, como prescreve a norma da ABNT NBR 15577, Parte 3 (2018) por meio de análises petrográficas e mineralógicas. Os sulfatos, quando presentes, provocam um ataque imediato com a pasta de cimento hidratada, gerando produtos expansivos e deletérios, como a etringita, taumasita e gipsita. No caso dos **sulfetos**, o processo envolve inicialmente a alteração desses minerais na presença de água e oxigênio (processo conhecido por reação de oxi-hidratação) promovendo a liberação do enxofre e, também, do ferro para o meio. A alcalinidade em pH acima de 10 também acelera a instabilidade dos sulfetos. Assim, além de produzirem uma fonte de **íons sulfatos** e conseqüente formação de produtos deletérios e expansivos a partir da interação química com a pasta de cimento do concreto, como a etringita e a gipsita, levam também à ocorrência de outros produtos secundários neoformados oriundos do seu próprio processo de oxidação, como os hidróxidos e óxidos de ferro, bem como sulfatos ferrosos (RODRIGUES *et al.*, 2012), sendo alguns expansivos e deletérios. Nesse processo, o enxofre liberado pode se converter em ácido sulfúrico, trazendo mais prejuízos ainda ao concreto por meio de um ataque ácido. (HASPARYK, KUPERMAN, 2019).

A respeito dos sulfetos, já se tem relatado que mesmos valores baixos (0,15%) no agregado, podem levar o concreto à deterioração ao longo do tempo a partir do processo de oxidação. Não existe ainda normalização nem limite a nível nacional, e o único método laboratorial disponível ao meio técnico para avaliar a presença do elemento enxofre e quantificá-lo na forma de sulfetos e sulfatos foi publicado por FURNAS (2020), compondo uma instrução técnica – IT.GSTE005. Já a NBR 7211 (2009) aborda no agregado apenas os sulfatos solúveis em água, sendo este limitado a 0,1%.

Já no caso do **ataque interno por DEF**, o **cimento** representa a fonte de íons sulfato dentro do concreto, e dependendo de vários fatores como as características do cimento, a dosagem do concreto, a sua maneira de aplicação bem como o ambiente de exposição, o fenômeno pode se comportar de variadas maneiras.

A **DEF** apresentada nessa publicação está relacionada àquela **etringita secundária** que é formada dentro do concreto como conseqüência de **elevadas temperaturas**, seja por cura térmica, ou pelo próprio calor de hidratação gerado a partir das reações exotérmicas durante as reações de hidratação do cimento. Entende-se, neste documento, por riscos da ocorrência de DEF a temperaturas superiores a 60 °C (SAHU; THAULOW, 2004; BAUER *et al.*, 2006) atingidas no concreto.

O processo químico envolvido na **DEF** se justifica pelo fato de que a **etringita primária**, formada nas primeiras idades a partir da hidratação dos cimentos, é uma fase instável acima de 65 °C (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Com isso, na presença de umidade, os íons sulfatos responsáveis por sua formação ficam disponíveis para reagirem na pasta de cimento futuramente, quando do concreto no estado endurecido. Esse composto etringita pode gerar tensões de tração, que são responsáveis por expansão e fissuração, trazendo graves

consequências ao concreto, por meio da interferência nas propriedades, levando as estruturas à deterioração (GIANINNI et al., 2018; SHO VANZ, 2019; PICHELIN et al., 2020).

Os fatores condicionantes (Figura 1.1) para a ocorrência da DEF são:

- Elevadas temperaturas;
- Íons sulfatos do cimento;
- Presença de umidade.

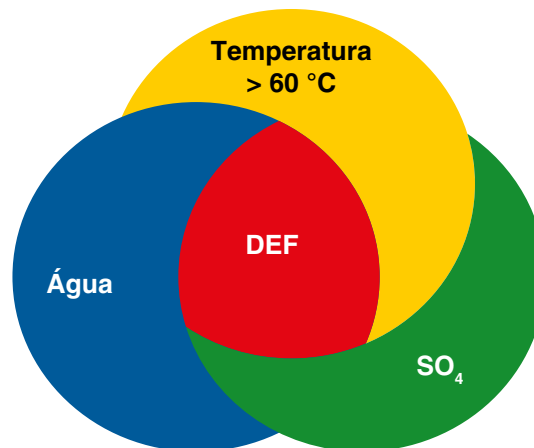


Figura 1.1 – Fatores condicionantes para a ocorrência da DEF. Fonte: Bronholo (2020).

Segundo Pichelin et al. (2020), o nível de dano pode ser correlacionado às expansões geradas no processo da DEF. Na Figura 1.2, essa correlação é mostrada.

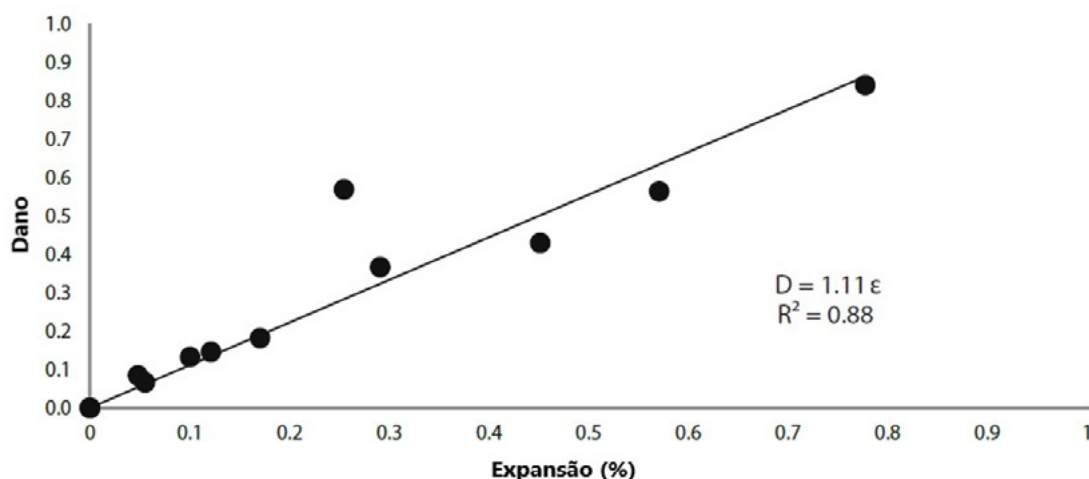


Figura 1.2 – Correlação entre o índice de dano e as expansões. Fonte: PICHELIN et al. (2020).

De acordo com Collepardi (2003), a formação da etringita tardia não acontece de forma homogênea na matriz cimentícia, ou seja, podem ocorrer núcleos de formação, que ficam isolados uns dos outros, em um primeiro estágio. Com a evolução e o crescimento dos cristais, há uma tendência de que a DEF se espalhe de maneira generalizada, deteriorando o concreto por completo.

Conforme vários relatos na literatura, a curva de expansão por DEF é descrita como sigmoide e contém três fases, de acordo com o contido em Pichelin et al. (2020) e na [Figura 1.3](#). A primeira fase é atribuída à alteração microestrutural referente ao processo inicial da formação da DEF, e que provoca baixas expansões. A partir do momento em que as tensões internas aumentam, ao longo do tempo, em decorrência da continuidade das neoformações de etringita, a sua precipitação promove um aumento e propagação das fissuras acelerando ainda mais o processo deletério, e intensificando as expansões. A terceira fase está relacionada à desaceleração das expansões, que pode ocorrer tanto pelo esgotamento de um dos agentes envolvidos no processo químico, ou mesmo pelo nível elevado de fissuração, que passa permitir a acomodação dos produtos, sem que novas expansões sejam geradas (Pichelin et al., 2020).

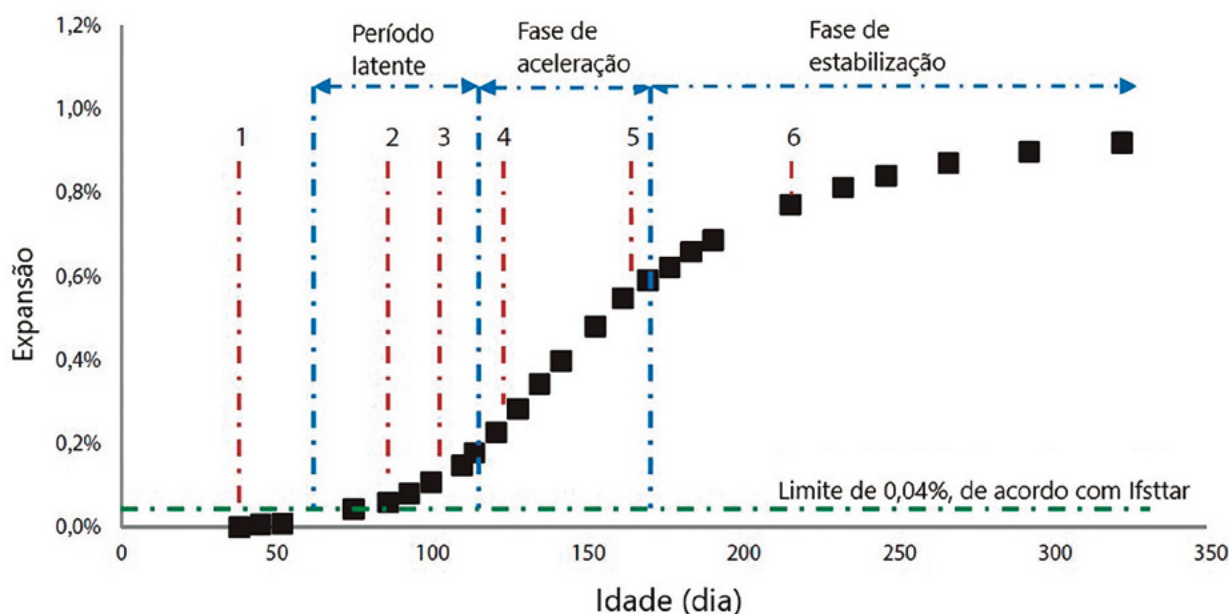


Figura 1.3 – Fases envolvidas no desenvolvimento das expansões por DEF ao longo do tempo.
Fonte: PICHELIN et al., 2020.

1.3. Casos de estruturas afetadas por DEF

São vários os casos que vêm sendo diagnosticados com DEF, e esse número tem aumentado a cada inspeção e diagnóstico positivo. Entre os casos mais comuns de deterioração por DEF relatados na literatura, encontram-se os elementos de concretos pré-moldados, haja vista que se tem conhecimento do emprego de temperaturas bastante elevadas para a sua fabricação, e acima de 65 °C.

Porém, alguns casos envolvendo elevada temperatura em decorrência do calor de hidratação do cimento já têm sido publicados (MELO, 2010; ICAAR, 2016; SILVA, GONÇALVES, 2008; HASPARYK *et al.*, 2016; SCHOVANZ, 2019; HASPARYK & KUPERMAN, 2019, CARVALHO, ANDRADE, 2020). Em geral, tanto o início do fenômeno bem como a deterioração decorrente da DEF é precoce, ocorrendo mais rapidamente do que as reações expansivas envolvendo uma reação álcali-sílica (RAS). Nas [Figuras 1.4 a 1.7](#) são apresentados alguns casos nos quais a DEF foi diagnosticada.



Figura 1.4 – Vertedouro apresentando quadro fissuratório por DEF. Fonte: Blanco *et al.*, 2019.



Figura 1.5 – Detalhe de fissuração mapeada em bloco de fundação de prédio devido apenas à DEF, no Brasil. Fonte: Selmo C. Kuperman.



Figura 1.6 – Dormente fissurado devido à DEF – Portugal. Fonte: Silva; Gonçalves, 2008.



Figura 1.7 – Dormentes fissurados – Brasil. Fonte: Selmo C. Kuperman.

Além da DEF, ataques combinados podem ocorrer (RAS & DEF), como pode ser observado nas [Figuras 1.8 e 1.9](#).



Figura 1.8 – Fissuração em lateral de bloco de concreto. Fonte: Hasparyk *et al.*, 2016.



Figura 1.9 – Fissuras por DEF e RAS em estrutura de concreto de UHE. Fonte: Selmo C. Kuperman.

Diante do exposto, e da falta de normalização disponível, esse documento foi preparado e contempla uma abordagem específica sobre os materiais e sobre as principais características que promovem e afetam o desenvolvimento da DEF no concreto. Ainda, são abordados métodos de avaliação do potencial de desenvolvimento da DEF no concreto e, por fim, as principais medidas preventivas que devem ser adotadas bem como os cuidados na aplicação do concreto.

1.4. Casos de fissuração de origem térmica

1.4.1. Fissuração de origem térmica em vertedouro de PCH

Durante a construção do vertedouro de uma PCH situada no sul do Brasil, foram notadas fissuras cuja origem era inicialmente desconhecida. Um procedimento de injeção de água realizado através destas fissuras indicou que elas eram passantes (Figura 1.10) e, aparentemente, remetiam à origem térmica. Para avaliar o problema foi empregado o programa B4cast, de elementos finitos tridimensionais, por meio da simulação das concretagens efetuadas, o que permitiu determinar as temperaturas e tensões atingidas através de fluxo térmico tridimensional.

Na Figura 1.10 pode ser observada a fissura existente e a água passando do lado oposto após injeção, o zoneamento do concreto e as camadas de concretagem.

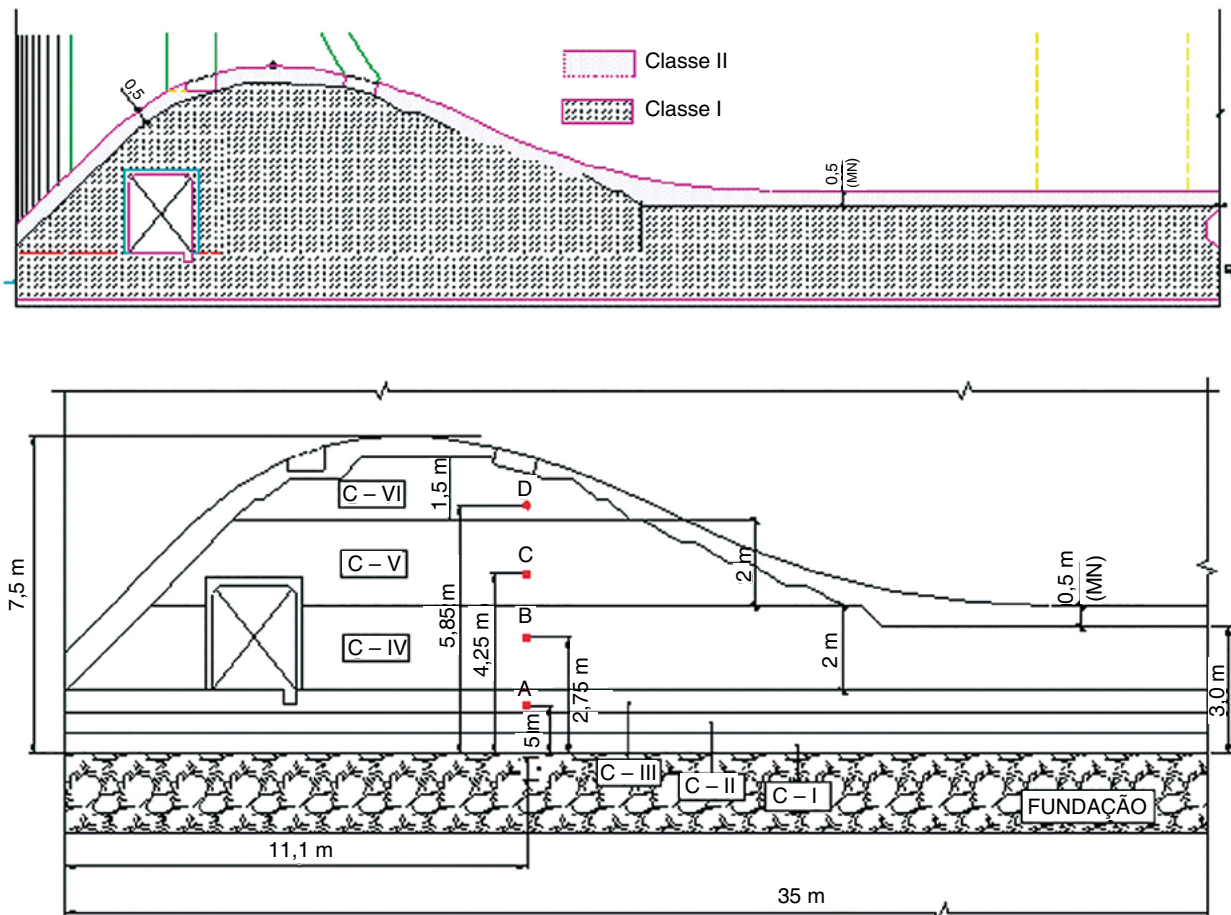
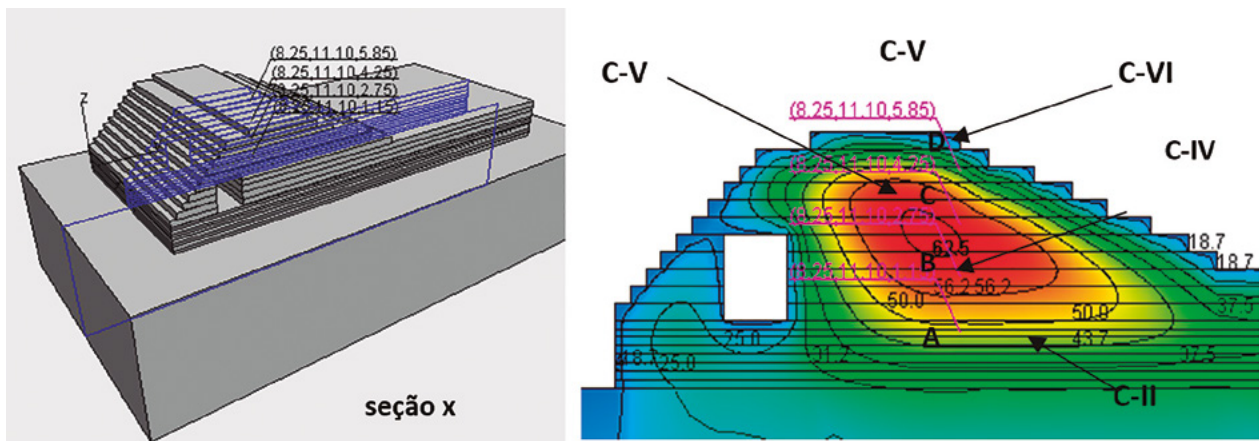


Figura 1.10 – Zoneamento, camadas de concretagem do vertedouro com localização dos pontos A, B, C e D utilizados para os estudos de temperaturas/tensões e fissura que atravessa o vertedouro – Seção transversal.

Para a verificação das fissuras presentes no bloco do vertedouro, o seu comprimento e largura considerados foram de 35 m e 15 m, respectivamente. A concretagem constou de três camadas iniciais de 0,5 m cada, seguidas por três camadas de 2,0 m de altura, tendo sido lançadas com intervalo de três dias cada, a uma temperatura de 32 °C. Foi empregado um cimento Portland pozolânico (CP IV) com consumos de 260 kg/m³ para o concreto da Classe I e de 350 kg/m³ para o concreto da Classe II. As resistências estimadas para 90 dias de idade foram 18 MPa e 24 MPa, respectivamente, para esses mesmos concretos. O módulo de elasticidade calculado para 90 dias de idade foi de 20 GPa para a classe I e de 25 GPa para a classe II. Já a elevação adiabática do concreto calculada indicou 64 °C para a classe II e 47 °C para a classe I. A temperatura média ambiente anual foi adotada como cerca de 20 °C, sendo que no mês de junho a média foi de, aproximadamente, 14 °C. A velocidade do vento incidente na estrutura adotada foi de 5 m/s, de acordo com as características locais, embora esse parâmetro seja considerado variável.

Na [Figura 1.11](#) são apresentadas as isotermas determinadas e a localização dos pontos de estudo para o bloco do vertedouro na seção x.



Pontos "A", "B", "C" e "D" na seção x - Isotermas

Figura 1.11 – Isotermas dos concretos com 35 dias de idade e localização dos pontos de estudo de temperaturas em uma seção montante-jusante do vertedouro.

O comportamento das curvas de temperatura para os pontos A, B, C e D nas camadas de concretagem C-III, C-IV, C-V e C-VI pode ser observado na [Figura 1.12](#). As temperaturas máximas atingidas nos pontos selecionados e localizados nas camadas C-IV e C-V foram de 61,0 °C e 61,3 °C, respectivamente.

Na [Figura 1.13](#) é apresentada a evolução das tensões principais máximas determinadas ao longo do tempo para os pontos localizados nas camadas C-III, C-IV, C-V e C-VI, respectivamente.

Para a verificação da possibilidade de fissuração foi realizada uma comparação entre a resistência à tração do concreto e as tensões máximas desenvolvidas em todo o período de cálculo. Deste modo, foi possível verificar a possibilidade de fissuração tanto no ponto "B", após 110 dias, como no ponto "D", após 10 dias do lançamento de suas camadas de concretagem, uma vez que nesses momentos a resistência à tração do concreto referente à classe I era ultrapassada pelas tensões desenvolvidas nos pontos estudados. As simulações de tensões de origem térmica efetuadas permitiram indicar as probabilidades de ocorrência de fissuração nas camadas C-IV, C-V e C-VI para o bloco do vertedouro, fato comprovado pela constatação da existência de fissuras térmicas quando da inspeção realizada.

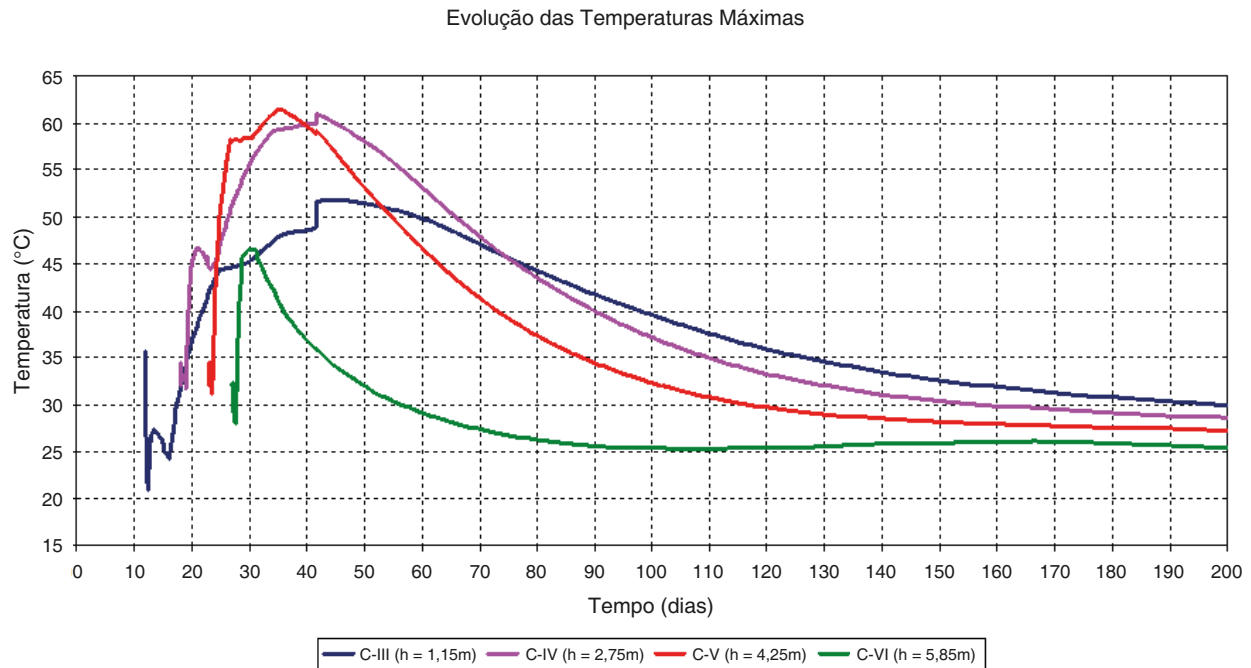


Figura 1.12 – Evolução das temperaturas – IL = 3 dias (altura de camadas de 2 m).

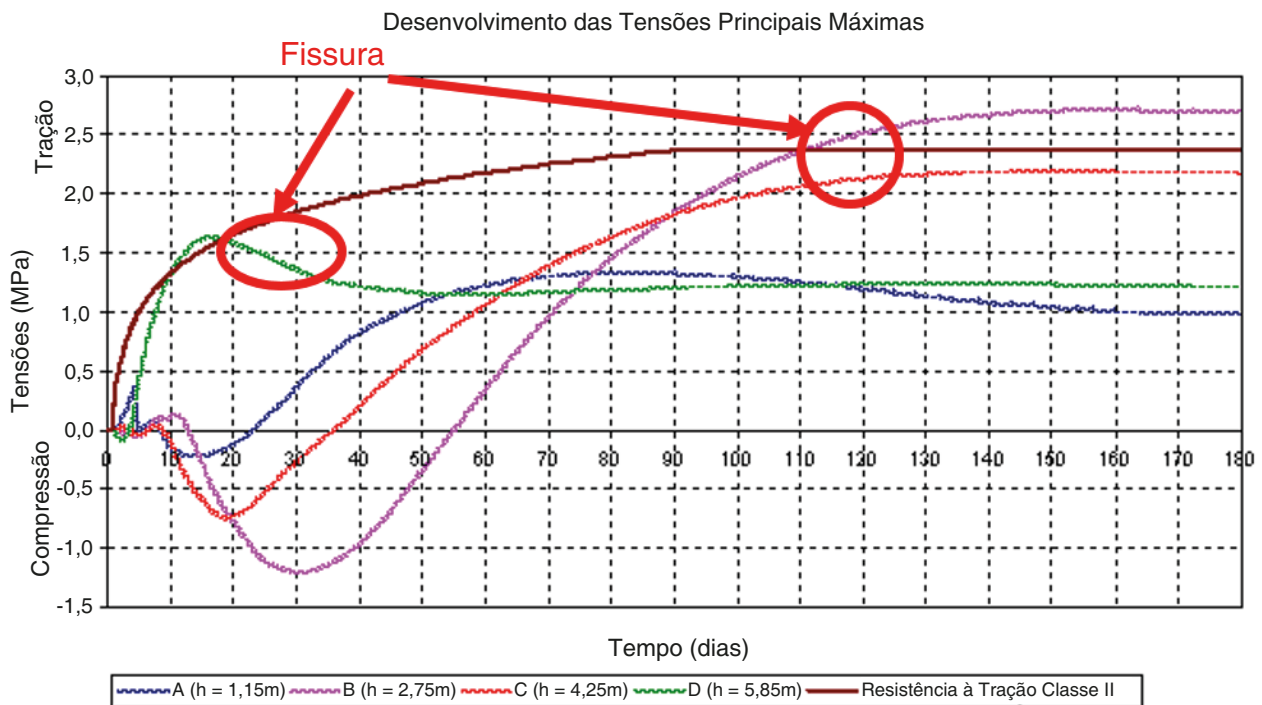


Figura 1.13 – Evolução das Tensões nos pontos “A”, “B”, “C” e “D”.

1.4.2. Fissuração de origem térmica em bloco de fundação de edificação

Um bloco de fundação nas dimensões de 13,0 m × 12,0 m × 2,30 m de um edifício situado na cidade de São Paulo, com f_{ck} de 40 MPa aos 28 dias foi concretado com

apenas uma camada, sem qualquer sistema de refrigeração, no qual as temperaturas de lançamento do concreto variaram entre 25 °C e 28 °C. O consumo de cimento de alto forno (CP III 40-RS) empregado foi de 330 kg/m³ tendo sido utilizado, além de um aditivo polifuncional, um aditivo estabilizador de hidratação para retardar o início de pega e, de certa maneira, tentar reduzir a temperatura máxima a ser atingida pelo concreto. Como resultado dessa concretagem, foram atingidas, no interior do bloco, temperaturas de até 75 °C com conseqüente ocorrência de fissuração de origem térmica. Esse fato comprovou que o uso do estabilizador de hidratação empregado serviu apenas para adiar o atingimento de temperaturas elevadas, e não evitar a fissuração. Diante dessa situação, as fissuras tiveram que ser injetadas com epóxi.

Para um outro bloco deste mesmo edifício, com dimensões de 5,80 m × 9,50 m × 2,0 m e consumo de cimento aumentado para 347 kg/m³, foi realizado um estudo térmico. Como conclusão, para a concretagem deste bloco em uma única etapa foi necessária a utilização de refrigeração por meio do emprego de gelo em substituição parcial à água de amassamento, para que as temperaturas de lançamento do concreto fossem reduzidas, conforme indicado na [Figura 1.14](#), para se evitar a fissuração térmica bem como a formação da etringita tardia (DEF).

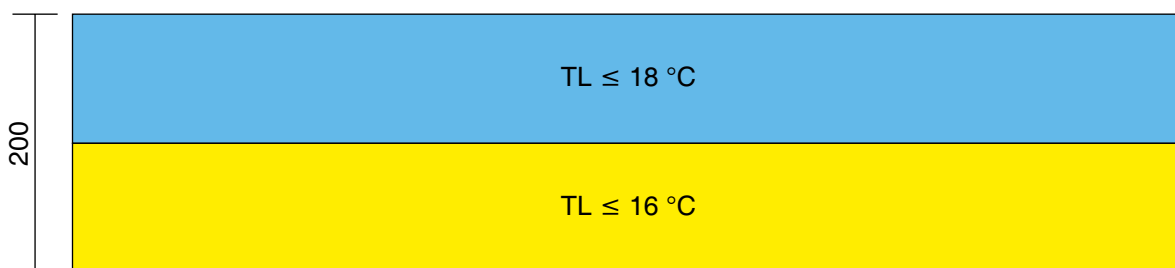


Figura 1.14 – Temperaturas especificadas para o lançamento do concreto em apenas uma camada de concretagem.

1.4.3. Fissuração de origem térmica em bloco de vertedouro

Em uma barragem em construção foram notadas fissuras características de origem térmica nas primeiras camadas lançadas em um bloco isolado. A resistência característica especificada (f_{ck}) era de 30 MPa aos 28 dias de idade e o consumo de cimento de alto forno (com um CP III–40 RS) na dosagem do concreto era de 360 kg/m³. As primeiras camadas foram lançadas com altura de 1 m. A [Figura 1.15](#) mostra detalhes das fissuras, sendo a abertura destas da ordem de 0,5 mm. A injeção de água sob pressão mostrou que as fissuras eram passantes na direção margem direita-margem esquerda e na direção montante-jusante. Todas essas fissuras originavam-se nas fundações e atingiam uma altura de aproximadamente oito metros.

A solução encontrada, inicialmente, foi a injeção de todas as fissuras com resina epóxi. Para a recuperação do concreto deste bloco foram usados, aproximadamente, 60 kg de resina na direção da margem direita-esquerda e 100 kg na direção de montante-jusante. Em seguida, houve a alteração na idade de controle do concreto para 90 dias, o que propiciou a redução no consumo de cimento do traço bem como a redução da altura das camadas de 1 m para 0,50 m, já que a construtora não teve a intenção de refrigerar o concreto.



Figura 1.15 – a) Vista de várias fissuras verticais, após teste com água; b) Detalhe de fissura antes do tratamento com injeção de resina epóxi.

O PAPEL DO CIMENTO

Conforme comentado anteriormente, uma vez que o ataque interno por DEF envolve o cimento, em especial, como fonte de íons sulfato dentro do concreto, é muito importante entender as principais características que afetam o seu desenvolvimento, como será discutido a seguir.

No que diz respeito às características químicas e térmicas do cimento, quando da sua hidratação, as que têm se apresentado mais intervenientes no fenômeno da DEF são:

- SO_3 ;
- C_3A ;
- C_3S ;
- $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- $(\text{SO}_3)^2/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- MgO ;
- Teor de álcalis;
- Calor de hidratação.

Como característica física, tem-se a finura do cimento (TOSUN, 2006; SILVA et al. 2018). Quanto mais fino, ou maior a área superficial, maior será a exposição do grão e, conseqüentemente, das reações químicas envolvidas no processo de hidratação, que podem ocasionar elevadas expansões em idades mais avançadas. Entretanto, é claro que existem os demais fatores que afetam simultaneamente a DEF, não sendo possível atribuir apenas à finura de maneira individualizada, a não ser que todas as demais características dos cimentos sejam mantidas constantes. Perondi (2022), por exemplo, ao avaliar a DEF com oito diferentes cimentos brasileiros, não observou nenhum comportamento claro com relação a esse parâmetro.

Quando o cimento entra em contato com a água, seus grãos interagem quimicamente (hidratação) por meio de reações exotérmicas. Os principais compostos contidos no clínquer e, conseqüentemente, no cimento Portland, são: C_2S ; C_3S ; C_3A ; C_4AF , sendo que cada um libera uma quantidade distinta de calor, dependendo da idade avaliada. Nas primeiras idades a maior geração de calor decorre da hidratação das fases aluminato (C_3A e C_4AF), e em especial do aluminato tricálcico. Posteriormente, com o passar do tempo, o composto C_3S passa a gerar mais calor (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Na Figura 1.10 esse comportamento pode ser observado. Considerando nas primeiras horas a maior participação do C_3A na geração de calor, esse composto deveria ser levado em consideração para a aplicação em concreto. Porém, isso nem sempre é possível por parte dos usuários, haja vista a dificuldade de obtenção de informações especificamente com relação à composição Bogue do clínquer empregado nos cimentos brasileiros.

O fato é que cimentos com teores de C_3A associados ao SO_3 mais elevados, trazem maiores riscos de ataques por sulfatos, em geral (OLDER; CHEN, 1995; CRAMMOND, 2003; TOSUN, 2006). Algumas publicações mostram esse comportamento, como a pesquisa desenvolvida por Older e Chen (1995). Nos ensaios de expansão apresentados,

foram observadas maiores expansões por DEF na presença de cimento com C_3A e SO_3 de 10% e 5%, ao ser comparado com outro de 7% e cerca de 3%, respectivamente. Caso a relação SO_3/Al_2O_3 seja avaliada, valores acima de 0,45 passam a trazer maiores riscos de DEF (HEINZ et al., 1999).

Na **Figura 2.1** encontram-se alguns resultados de calor de hidratação obtidos a partir do ensaio em garrafa de Langavant de vários cimentos brasileiros. Os dados foram agrupados entre menor (A) e maior (B) calor de hidratação observado, a partir do banco de dados da DESEK entre os anos de 2020 e 2022, e nas idades de 41 e 168 h. Cimentos do mesmo tipo, como se observa na figura, podem apresentar diferentes valores em função não apenas da finura, mas também do teor das adições incorporadas, bem como de suas demais características físico-químicas.

Dos 8 dados apresentados na **Figura 2.1**, 50% desses cimentos apresentam alto calor de hidratação (> 270 J/g), caso a avaliação seja realizada em 41 h. Por outro lado, caso a análise seja efetuada com 168 h, 75% dos cimentos seriam classificados como de alto calor de hidratação, ou seja, apenas 2 deles manteriam dados abaixo de 270 J/g (CP IV-RS-A e CP III-RS-A). Assim, ao avaliar os dados de ensaio com 168 h, confirma-se que ainda existe crescimento do calor de hidratação para todos os cimentos apresentados, o que pode colocar em risco a geração de calor no interior do concreto e riscos tanto de fissuração de origem térmica quanto da DEF, se análises mais apuradas não forem realizadas.

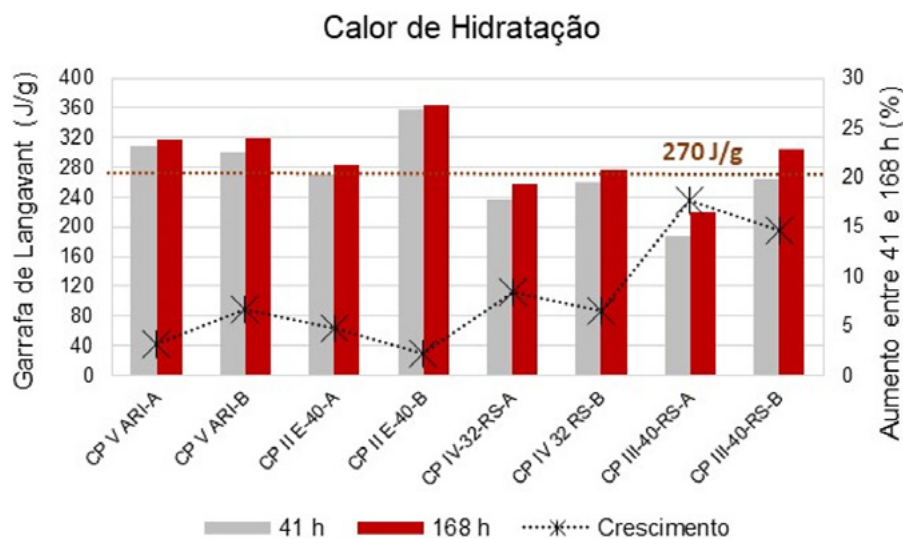


Figura 2.1 – Geração de calor decorrente da hidratação do cimento. Fonte: DeseK.

Considerando ainda as características cristalográficas das fases do clínquer, por exemplo, cita-se que as formas ortorrômbicas do C_3A são mais reativas, reagindo mais rapidamente quando comparadas às cúbicas (Kirchheim et al., 2018).

No que diz respeito aos álcalis do cimento bem como o teor de MgO , já existem relatos indicando a sua influência. Ainda, a presença de álcalis também tenderá a diminuir a formação da etringita primária e, assim, liberará sulfatos na solução, que serão adsorvidos pelo C-S-H. Esses sulfatos fornecerão, ao longo do tempo, reagentes

para formar a etringita “secundária” expansiva, ou etringita tardia, quando a matriz já estiver endurecida (THAULOW et al., 1997; TAYLOR et al., 2001; WIGUM et al., 2006; MARTIN et al., 2012; GODART et al., 2016).

Entre os vários tipos de cimento existentes e disponíveis no mercado, aquele denominado “Cimento Portland de Alta Resistência Inicial” do tipo CP V-ARI, é o mais vulnerável à DEF justamente pelas características citadas anteriormente, destacando ainda um maior calor de hidratação, na sua maioria. Entretanto, outros tipos de cimento, dependendo das características intrínsecas, também podem colocar em riscos o concreto frente à DEF (KCHAKECH et al., 2016; RASHIDI et al., 2017; SCHOVANZ, 2019; GAMBALE et al., 2019).

A partir da [Figura 2.2](#) a seguir, pode-se também notar a variação existente entre cimentos distintos no desenvolvimento de temperatura por meio de um calorímetro semiadiabático. Ainda, o calor de hidratação dos cimentos, determinado pela garrafa de Langavant e segundo NBR 12006, se encontram indicados dentro da Figura, na qual observa-se coerência entre os dados. Em ordem decrescente de geração de calor, tem-se CP V, CP II-F e CP IV. De qualquer modo, os três cimentos estudados se apresentam com elevado calor de hidratação. A norma NBR 16697 (2018) estipula um limite de 270 J/g para considerar um cimento como de baixo calor de hidratação, entretanto, esse limite foi antecipado para um tempo de 41 h, o que nem sempre acusará e indicará o real comportamento na prática. Antes o limite remetia à idade de 7 dias.

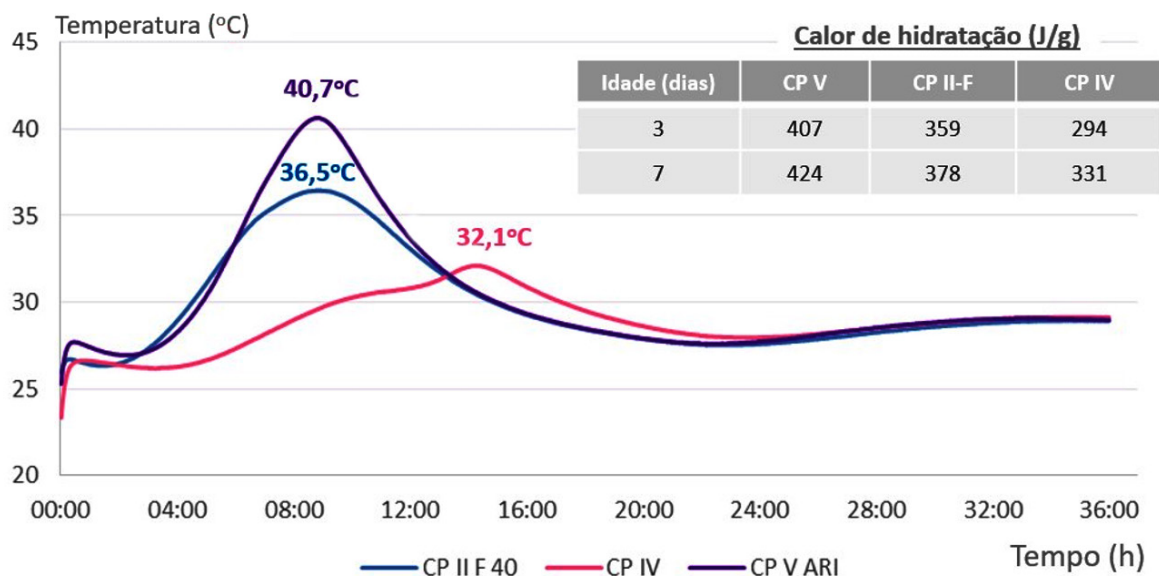


Figura 2.2 – Desenvolvimento de temperatura apresentado pelo calorímetro e dados do calor de hidratação, para cada tipo de cimento. Fonte: Gambale (2017).

Considerando todo o exposto, o ideal seria controlar e/ou limitar os teores dos constituintes indicados para um melhor desempenho e mitigação adequada no que diz respeito à DEF. Porém, como ocorre com os agregados, nem sempre é possível trocar o cimento disponível na região da obra e os materiais que o compõem.



INFLUÊNCIA DA DEF NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO

A dosagem do concreto, as suas características físicas e mecânicas, bem como a sua qualidade afetam diretamente a DEF e o seu comportamento expansivo ao longo do tempo. Concretos com consumos mais elevados de cimento e menores relações a/c podem trazer mais riscos da ocorrência da DEF (TAYLOR et al., 2001; SHYMADA et al., 2005; MELO, 2010; GAMBALE et al., 2019), bem como elementos de concreto de maiores dimensões. O tipo de cimento, tipo de adição e o seu teor desempenham um papel importante nesse sentido.

Para exemplificar o potencial que um concreto tem de elevar a sua temperatura por decorrência das reações exotérmicas, geradas a partir das reações químicas de hidratação do cimento, pode ser citado o trabalho apresentado por Gambale et al. (2019). Por meio de uma análise comparativa entre três tipos de cimento distintos (CP V, CP II-F e CP IV), e a partir do ensaio de elevação adiabática de temperatura, nota-se que o CP V-ARI e o CP II F-40 são os que promovem maiores temperaturas ao concreto (com consumo de 350 kg/m^3 de cimento), possuindo valores semelhantes nas máximas. Por outro lado, o CP IV, pela presença da cinza volante (teor de 26%), consegue trazer alguma redução no nível máximo de temperatura. Na [Figura 3.1](#) a seguir são apresentados os resultados obtidos nas primeiras 24 horas do estudo.

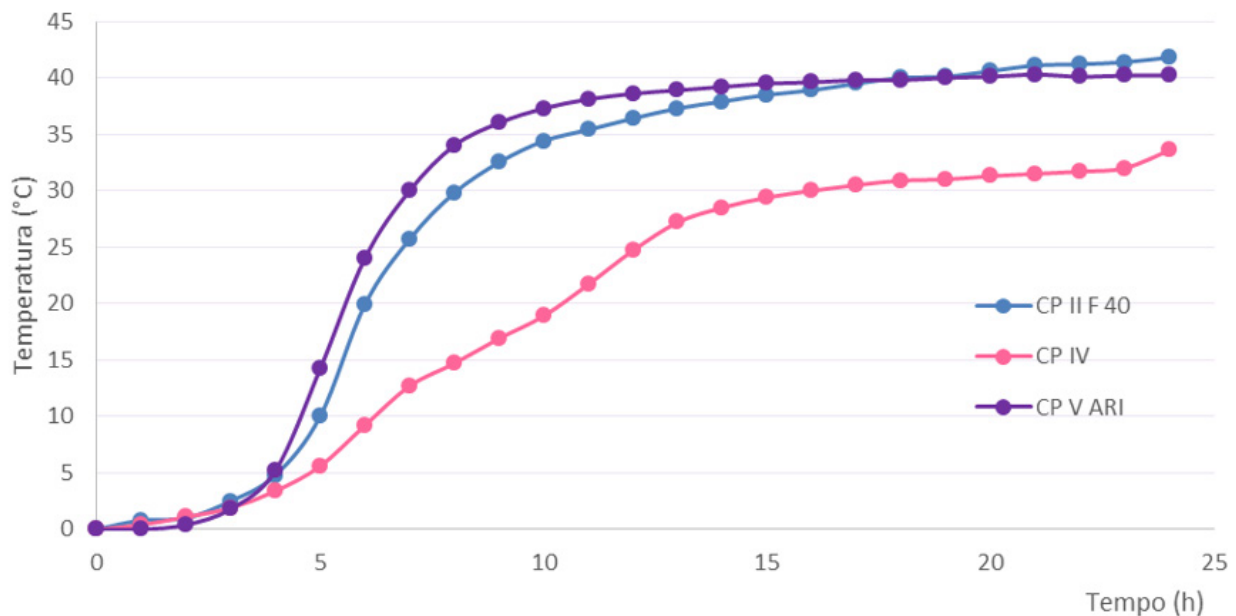


Figura 3.1 – Resultados do ensaio em laboratório de elevação adiabática de temperatura de concretos com diferentes cimentos. Fonte: Gambale et al., 2019.

Na [Figura 3.2](#) podem ser notadas as variações da elevação adiabática de temperatura decorrentes do consumo de cimento e da idade dos concretos avaliados em laboratório.

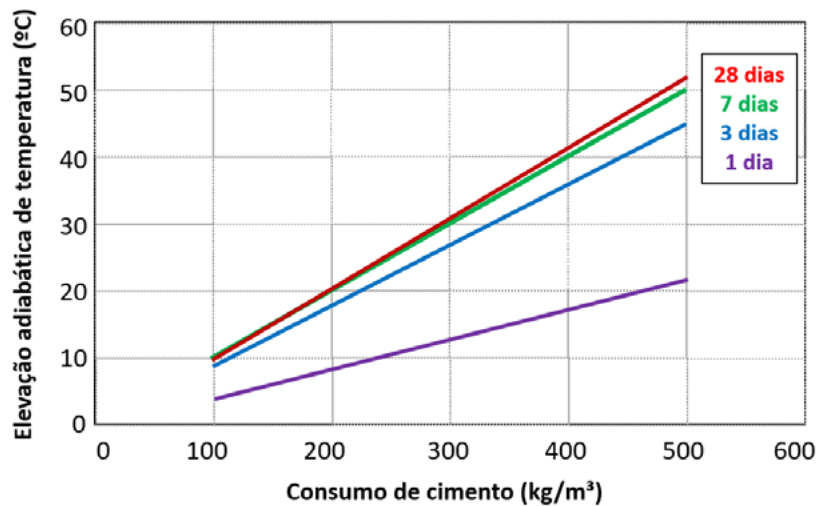


Figura 3.2 – Elevação adiabática de temperatura de concretos variados. Fonte: Furnas, 1997.

A partir dos primeiros estudos mencionados anteriormente, Gambale et al. (2019) apresentam outros resultados obtidos em blocos de concreto expostos ao tempo, decorrente do monitoramento das temperaturas internas, chegando-se aos valores reais em campo. Todos os três cimentos testados nos protótipos (com consumo de 350 kg/m³) foram responsáveis por produzirem elevadas temperaturas, e acima de 63 °C (Figura 3.3), na seguinte ordem decrescente: CP V-ARI (81 °C); CP II-F (73 °C); CP IV (63 °C). Ainda, no protótipo adicional confeccionado com um maior consumo de cimento, a temperatura medida foi de cerca de 100 °C, sendo observada fissuração após o resfriamento do concreto com uma semana, originada a partir das tensões de origem térmica.

Nos estudos de Graeff (2017), mesmo na presença de baixos consumos de cimento, podem ser notadas variações importantes no coeficiente de elevação adiabática de temperatura do concreto com cinza volante, conforme pode ser observado na Figura 3.4.

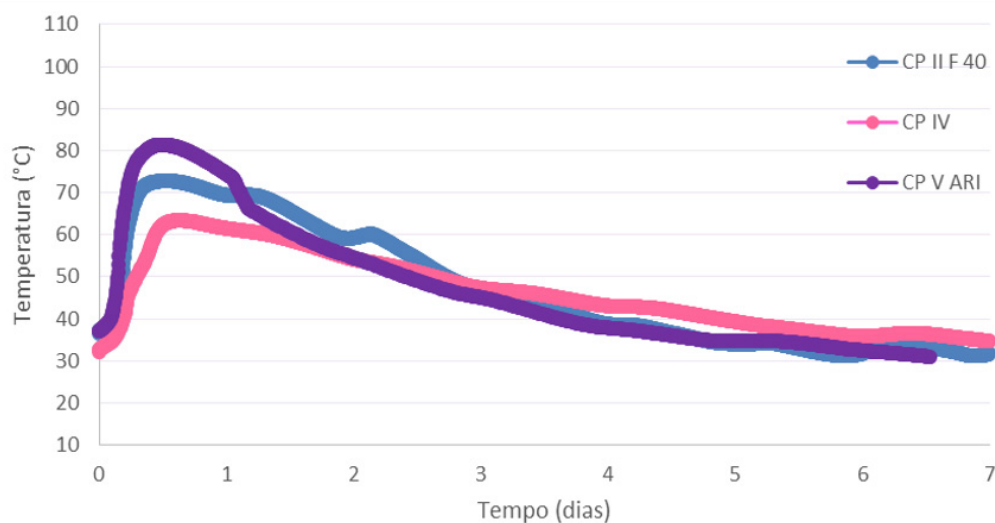


Figura 3.3 – Evolução da temperatura em protótipos obtida por termômetros instalados internamente. Fonte: Gambale, 2017.

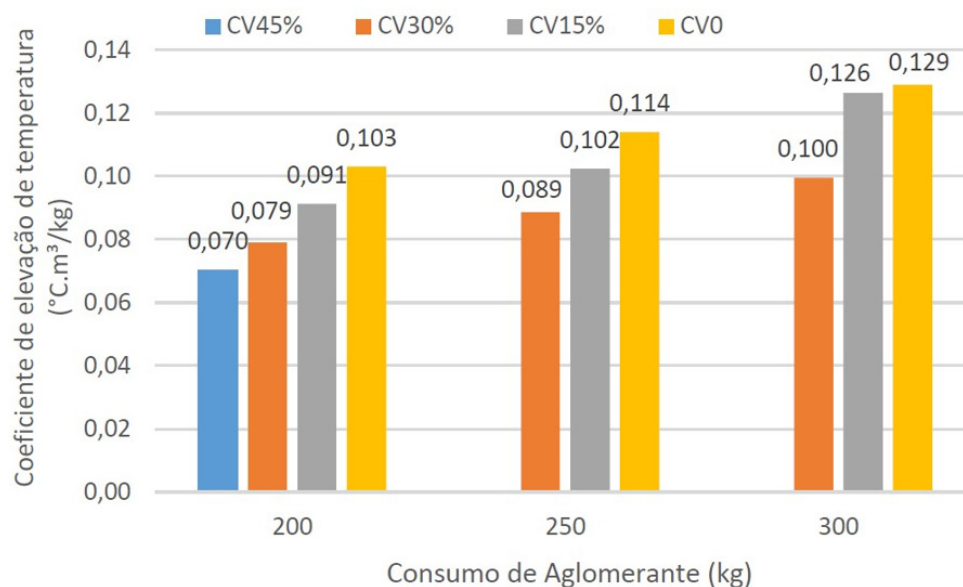


Figura 3.4 – Coeficiente de elevação de temperatura de concretos com diferentes consumos de cimento e teores de cinza volante (CV). Fonte: Graeff, 2017.

Em se tratando do processo de **cura térmica** do concreto fresco, são vários os fatores envolvidos e que podem também potencializar a DEF se não devidamente levados em consideração e cuidadosamente controlados. Entre esses fatores, além da presença da água ou umidade, destaca-se o período de **pré-cura**, desde as primeiras horas após lançamento. De maneira a garantir a pega inicial do cimento, faz-se necessária a realização de uma cura convencional nessas primeiras horas de hidratação, antes do aquecimento do concreto, o que em geral ocorre em torno de 4 horas, dependendo do tipo de cimento. Na sequência, quando da execução do procedimento da cura térmica, tanto a **taxa de aquecimento** bem como a de **resfriamento** são parâmetros que devem ser controlados para evitar fissuração de origem térmica. Geralmente, uma taxa acima de 20 °C/h traz maiores riscos, não devendo ser ultrapassado esse valor. A **máxima temperatura**, como já discutido anteriormente, deve ser radicalmente limitada, embora ainda não haja um consenso entre os especialistas e entre as várias publicações e práticas no meio técnico, a mais rigorosa traz a temperatura de 60 °C e não 65 °C como patamar máximo na cura térmica (SAHU; THAULOW, 2004; BAUER et al., 2006), aplicada na Alemanha e África do Sul. Já países como o Canadá, Dinamarca, Inglaterra e Espanha adotam 65 °C. Porém, não só a limitação da máxima, mas também o controle da **duração da temperatura máxima (platô)** é fundamental. Conforme disposto em IFFSTAR (2018), para uma máxima de 65 °C, por exemplo, a duração não deve variar além de 4 a 12 horas na cura.

O comportamento expansivo por DEF de concretos contendo altos consumos de cimento (470 kg/m³) na presença de dois tipos de cimento se mostra claramente distinto, como pode ser observado na **Figura 3.5**. Por meio de indução da DEF em laboratório, fazendo-se uso de ciclo térmico inicial (HASPARYK et al., 2020), observa-se que enquanto um cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) potencializa as expansões por DEF logo nas primeiras idades, crescendo rapidamente no tempo e atingindo elevadas taxas de expansão até 9 meses após a moldagem (> 1%), o cimento pozolânico com cinza volante (CP IV) mostra um crescimento lento e gradual das expansões até a idade avaliada, porém, ainda sem estabilização, atingindo mais do que 0,20% de expansão.

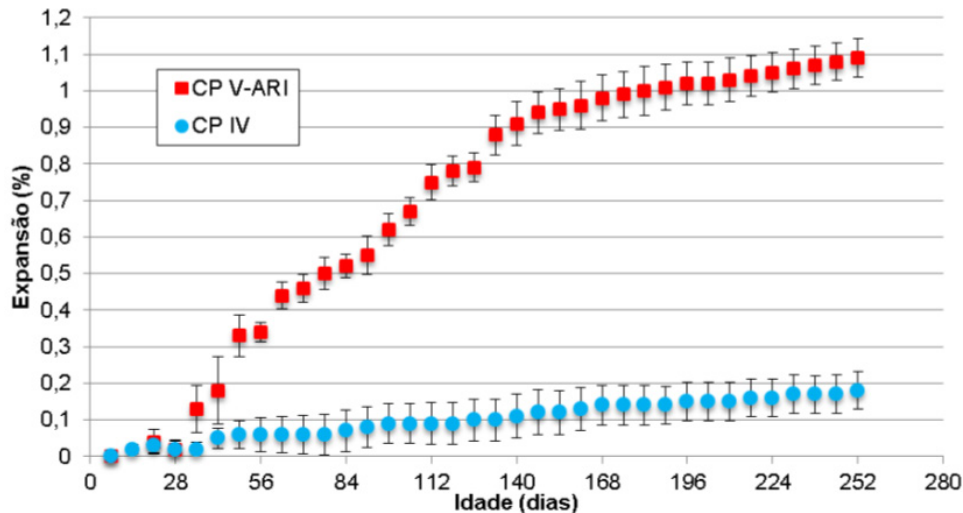


Figura 3.5 – Comportamento expansivo em concretos sujeitos à DEF. Fonte: Schovanz, 2019.

Embora adições pozolânicas possam ser atrativas do ponto de vista do combate às reações expansivas, a exemplo a RAS (HASPARYK et al., 2022), no caso das expansões por DEF, alguns estudos já mostram um risco por afetarem o desenvolvimento das reações internas; assim um efeito inverso pode ocorrer pela aceleração das reações pozolânicas, conforme apresentado por Graeff (2017) na presença da cinza volante.

As propriedades mecânicas podem ser seriamente afetadas quando a DEF acomete o concreto. Os resultados apresentados por Schovanz et al. (2021) mostram níveis bastante elevados de expansão em apenas 6 meses de estudo (da ordem de 1%), na presença do CP V-ARI e com elevado consumo de cimento, com redução de mais de 70% do módulo de elasticidade no mesmo período e da ordem de 55% de queda nas resistências à compressão e à tração. Além disso, caso as previsões normativas fossem seguidas, para concretos atacados por DEF não se segue o esperado na NBR 6118, quando se projeta o módulo a partir da resistência à compressão em concretos deteriorados por DEF. Os valores reais de módulo determinados em laboratório sempre se apresentam abaixo da curva estimada, independente do cimento testado (Bronholo, 2020). Nos gráficos da Figura 3.6 esses comportamentos podem ser observados.

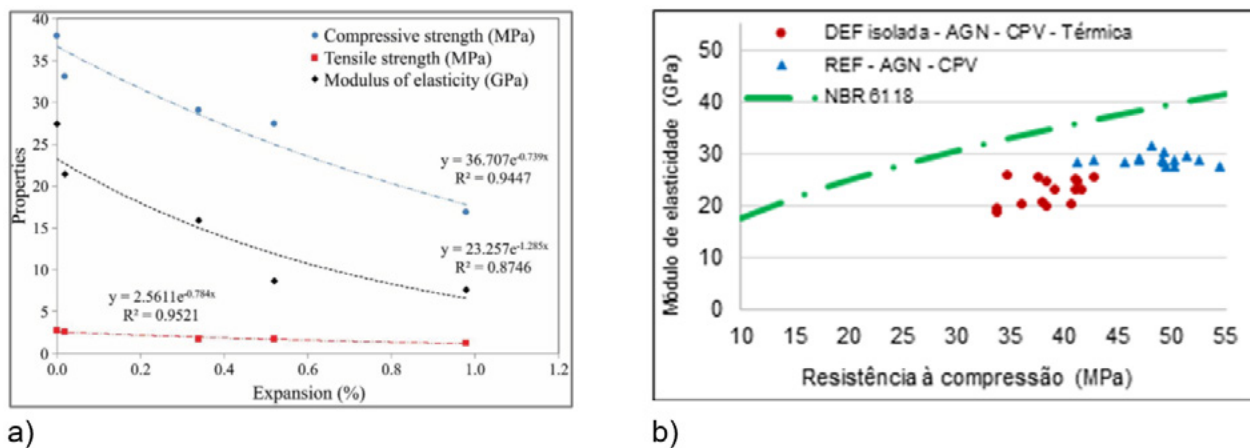


Figura 3.6 – Comportamento das propriedades mecânicas frente à DEF e aumento das expansões. Fonte: a) Schovanz et al., 2021; b) Bronholo, 2020.

Outro tipo de investigação complementar interessante que pode auxiliar no estudo de reações expansivas é o ensaio denominado SDT (*Stiffness Damage Test*). Esse ensaio permite avaliar o comportamento do concreto por meio da relação tensão-deformação e dos índices de dano de rigidez (SDI) e de deformação plástica (PDI), parâmetros obtidos após ensaio (HASPARYK et al., 2021). Os ensaios do SDT contidos em Schovanz (2019) mostram claramente as graves consequências da fissuração decorrente da DEF ao concreto por meio dos diagramas apresentados na [Figura 3.7](#), com elevadas deformações em função do elevado nível de expansão atingido (~1%).

Os estudos realizados por Giannini et al. (2018) já indicavam que à medida que as expansões avançavam, existia uma relação direta com os índices obtidos no SDT ([Figura 3.8](#)), mostrando a gravidade da DEF e o potencial desse ensaio, apesar de algumas variações observadas bem como maiores dispersões para o PDI.

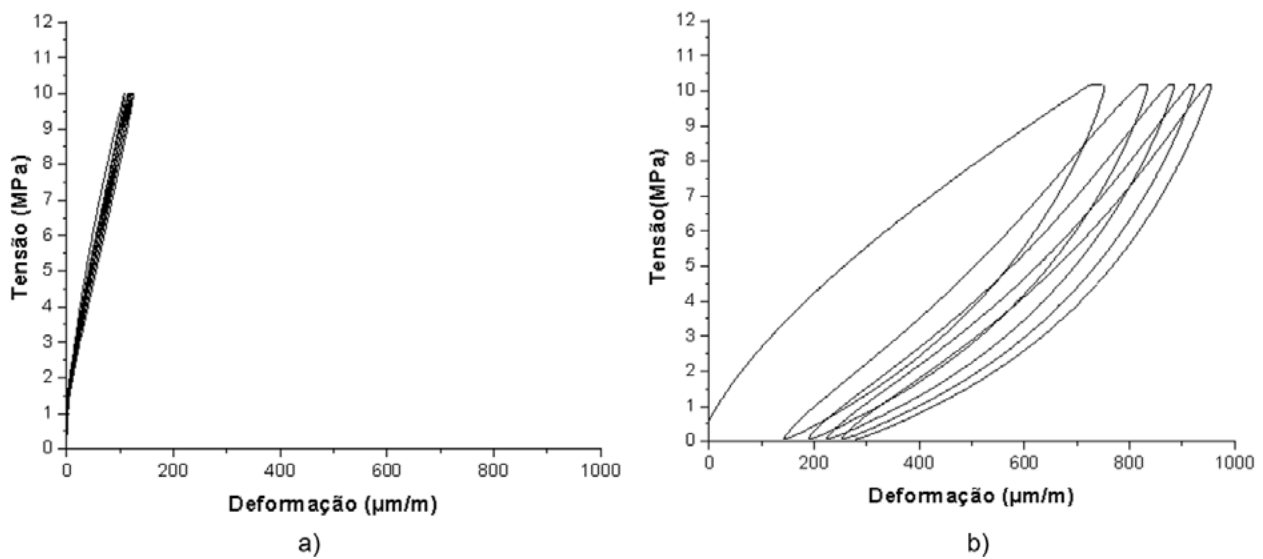


Figura 3.7 – SDT - Diagrama tensão-deformação e índices determinados para um concreto contendo CP V-ARI, com expansão de: a) 0,02% (SDI = 0,10; PDI = 0,01); b) 1,09% (SDI = 0,50; PDI = 0,27). Fonte: Schovanz, 2019.

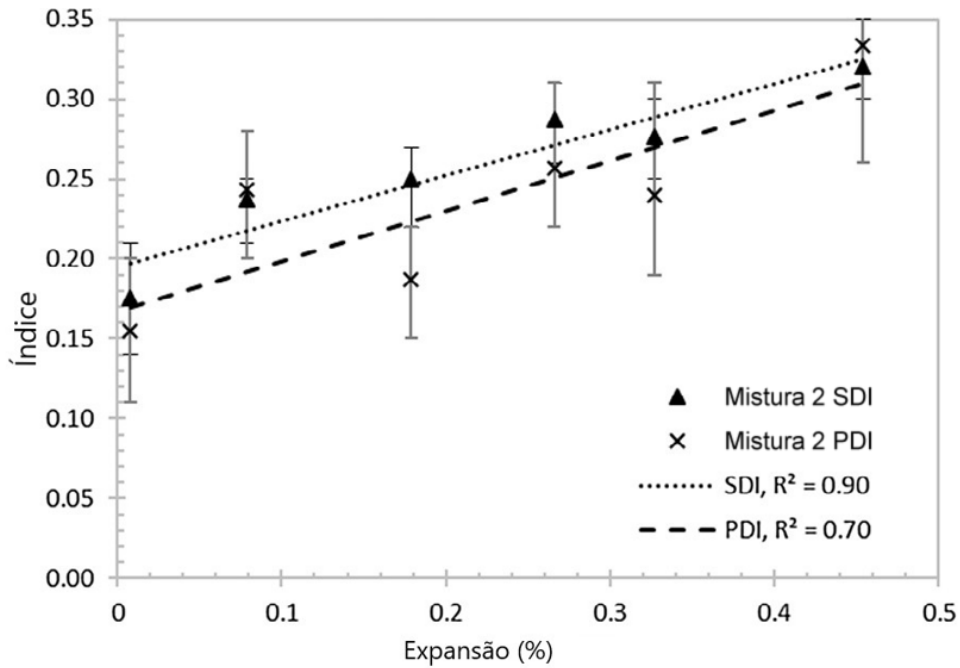
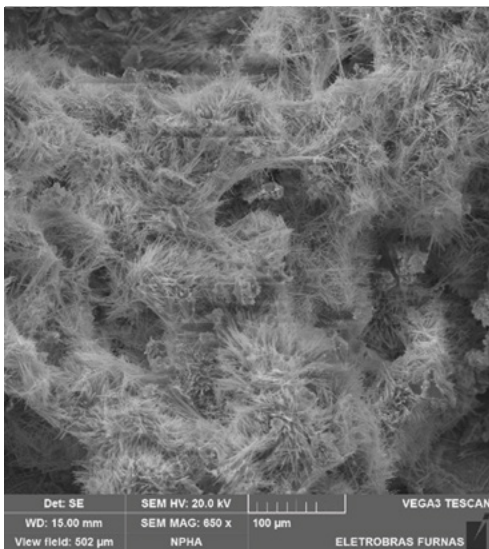
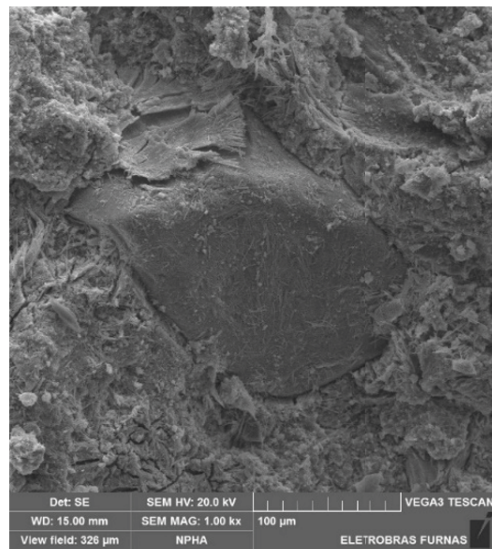


Figura 3.8 – Índices obtidos em ensaio SDT em função dos diferentes estágios de desenvolvimento da DEF expansiva. Fonte: Giannini et al. (2018).

Reações expansivas, como já esperado, alteram a microestrutura do concreto. No caso da DEF não é diferente. Esse tipo de patologia traz alterações internas que, ao longo do tempo, vão evoluindo a ponto de gerar uma intensa fragilização da pasta, com incidência de microfissuração bem como prejuízos à zona de transição pasta-agregado (ZT), com perda de aderência, explicando os reflexos negativos e os comportamentos mecânicos observados. Nas **Figuras 3.9.a e 3.9.b** são apresentadas micrografias de um concreto contendo CP V-ARI, na idade de 2 e 9 meses, respectivamente, indicando a intensificação da deterioração no tempo.



a) 2 meses: aglomeração de vários cristais de etringita preenchendo um poro.



b) 9 meses: disseminação de etringita comprimida, fragilização da pasta, microfissuração e ZT-perda de aderência.

Figura 3.9 – Micrografias obtidas por MEV indicando a evolução da DEF no tempo. Fonte: Hasparyk.

Na **Figura 3.10** podem ser observadas as diferenças microestruturais internas, por meio das neoformações de etringita, entre concretos com cimentos distintos e que ultrapassaram 63 °C.

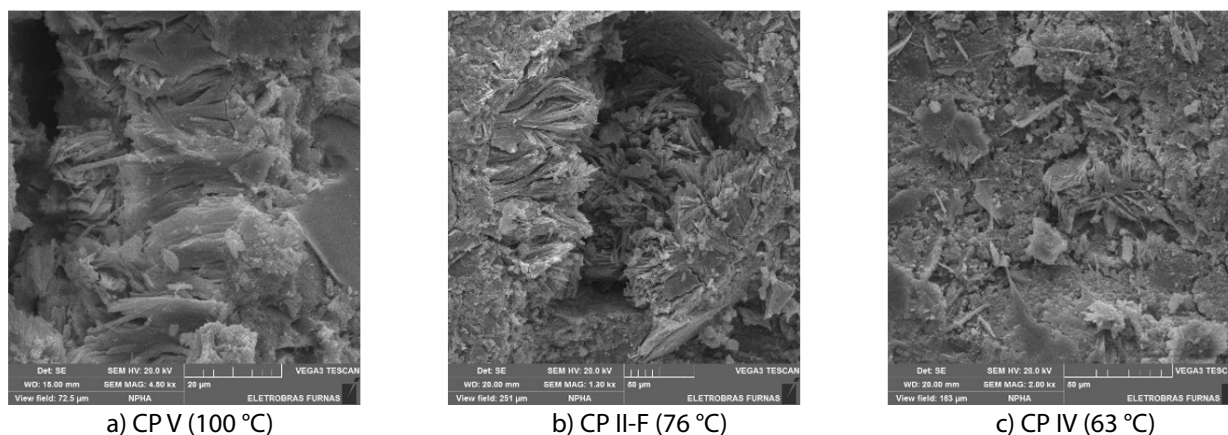


Figura 3.10 – Micrografias de concretos com diferentes cimentos e consumos: a) 500 kg/m³; b-c) 350 kg/m³. Fonte: Hasparyk.

De acordo com Taylor et al. (2001), a expansão é dependente do tipo de poro existente. Caso os poros sejam pequenos e com pouca conexão, a expansão produzida pela deposição da etringita será maior se comparada àquela gerada em poros grandes e conectados.

Concretos deteriorados por algum outro tipo de patologia pré-existente, a exemplo da RAS, provocam microfissuras criando caminhos preferenciais, e permitem o ingresso mais facilitado e adicional de água para o seu interior, promovendo assim um ambiente adequado para a DEF, caso haja sulfato interno e/ou externo suficiente para reagir. Ou seja, a presença de fissuras pré-existentes, e de qualquer natureza, intensifica a gravidade das consequências ao concreto (COLLEPARDI, 2003). A presença de umidade ou água é fundamental para que o processo químico da DEF ocorra. Sabe-se que o concreto mantém alta umidade no seu interior, independente do aporte externo de água, na sua solução dos poros. Os estudos realizados por Albertini (2014) com o intuito de desenvolver um sensor específico para medir a umidade no interior de protótipos em concreto empregados em usinas hidrelétricas da Cesp com mais de 40 anos, e avaliar a RAA, mostraram resultados importantes nessa linha e provaram essa constatação. Os sensores empregados por Albertini (2014) acusaram valores de umidade acima de 90% nos corpos de prova moldados, e acima de 99% nos concretos antigos, justificando a não necessidade de monitoramento desse parâmetro nas estruturas de uma tomada d'água, que era um dos objetivos iniciais da pesquisa proposta.

O ambiente no qual a estrutura está exposta também influencia diretamente no agravamento dos danos. Além da umidade do meio, ciclos de secagem e molhagem predispõe e/ou podem acelerar o ataque. Um exemplo disso é o próprio método do LCPC, que traz um procedimento de ensaio no qual, após ciclo térmico, o concreto é exposto a ciclos de secagem e molhagem de modo a acelerar o processo da DEF em laboratório (LCPC, 2007). Em IFFSTAR (2018), ainda, uma análise de risco é abordada, na qual se faz referência ao ambiente de exposição para a adoção da medida preventiva mais adequada.

Casos de ataques conjugados têm sido observados em estruturas de concreto (HASPARYK, KUPERMAN, 2019; HASPARYK et al., 2022); existe uma sinergia entre as duas reações expansivas (DEF & RAS), do ponto de vista químico. Os estudos realizados dentro de um programa de P&D Furnas Aneel, e contidos em Bronholo (2020) mostram essa situação de ataque combinado e uma maior aceleração das expansões ao longo do tempo, conforme pode ser observado na [Figura 3.11](#), além de agravamento dos danos quando comparado aos ataques individuais (apenas DEF, ou RAS).

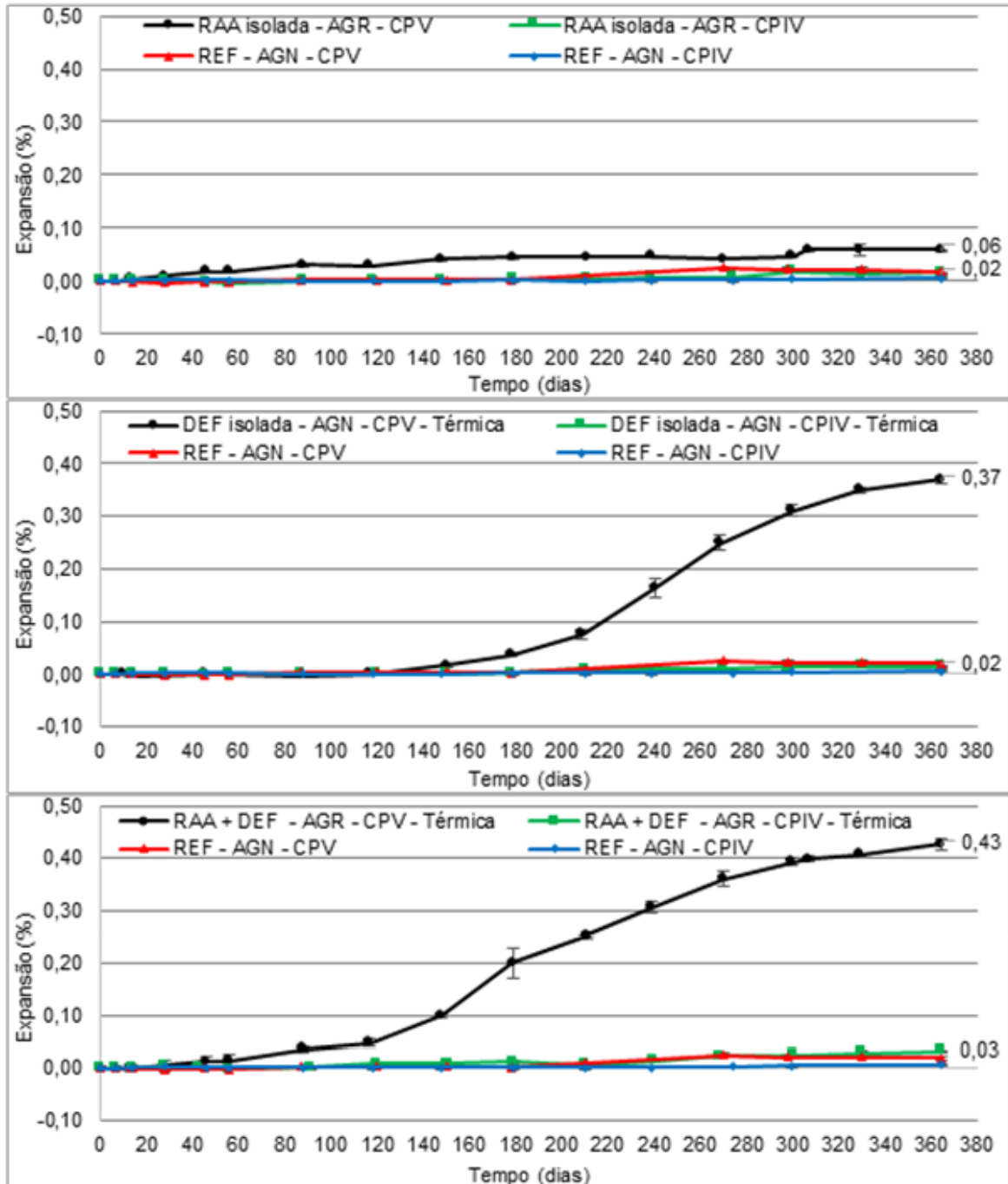


Figura 3.11 – Comportamento expansivo de concretos frente à RAS, DEF e ao ataque combinado DEF+RAS. Fonte: Bronholo, 2019.

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A DEF

Não existe normalização técnica de ensaio para avaliar o potencial de ocorrência da DEF e, em especial, em concreto, a nível nacional. O que já existe, a nível internacional, são publicações técnicas específicas nas quais cada pesquisador adota um procedimento, sendo alguns muitas das vezes bastante agressivos, incluindo aqueles apenas em argamassas. O método francês, publicado em 2007 pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC n° 66), traz um procedimento interessante de avaliação do potencial da DEF em concreto, porém, foi criado e destinado, principalmente, a ambientes de infraestrutura de transporte, como pontes, viadutos e rodovias, e envolve ciclos de secagem e molhagem após uma cura térmica.

No âmbito do Brasil, publicado, existe um documento técnico – IT-GSTE.004-R0, denominado Instrução Técnica, intitulada “[Método de Ensaio para Avaliação do Potencial para ocorrência de DEF](#)” (Hasparyk et al., 2020). Essa IT foi desenvolvida dentro de um projeto de P&D ANEEL de Furnas (Metodologias e infraestrutura tecnológica para aperfeiçoamento das avaliações de confiabilidade e otimização de empreendimentos de energia). A IT foi criada para atendimento às condições dos materiais nacionais, tomando-se como base algumas referências internacionais como as de Fu (1997), Rashidi et al. (2017), Giannini et al. (2018) e Kchakech et al. (2016), além de Schovanz (2019), contemplando algumas alterações pertinentes ao objetivo proposto.

Na [Tabela 4.1](#) são apresentados muitos estudos relacionados ao tema DEF, na sua maioria compilados por Schovanz (2019), com a atualização das informações para esse documento.

Tabela 4.1 – Métodos de ensaio apresentados por alguns pesquisadores.

Referência	Tipo e Dimensão da Amostra	Método de Aquecimento e Resfriamento	Condições da Cura e do Ambiente de Exposição	Tempo de Estudo
Fu (1997)	Argamassa em formato de prisma (25x25x160mm)	Pré-cura a 23 °C por 1 a 5 h; Aquecimento por 60 min até o pico; Permanência a 80 °C e 90 °C /12 h; Taxa de resfriamento ~16 °C/h; Permanência inicial a 23 °C/6 h; Permanência final a 23 °C.	Pré-cura em câmara úmida; Aquecimento e resfriamento em forno; Armazenagem em água saturada com cal.	250 dias
Dayarthne et al. (2013)	Argamassa em formato de prisma (25x25x285mm)	Pré-cura a 30 °C por 1h; Taxa de aquecimento 65 °C/h; Permanência 95 °C/12 h; Taxa de resfriamento ~16 °C/h; Permanência a 30 °C por 6 h; Secagem em estufa a 85 °C/24 h.	Pré-cura, aquecimento e resfriamento em água; Secagem em estufa; Imersão em água com cal, a 30 °C, até o final do ensaio.	~140 dias

(continua)

Tabela 4.1 – Métodos de ensaio apresentados por alguns pesquisadores (continuação).

Referência	Tipo e Dimensão da Amostra	Método de Aquecimento e Resfriamento	Condições da Cura e do Ambiente de Exposição	Tempo de Estudo
Leklou <i>et al.</i> , (2016)	Argamassa em formato de prisma (40 × 40 × 160 mm)	Pré-cura a 20 °C por 2 h; Taxa de aquecimento 30 °C/h; Permanência em 80 °C/10 h; Taxa de resfriamento 5,5 °C/h;	Aquecimento e resfriamento em forno; Armazenagem em tanques fechados com água deionizada a 20 °C;	650 dias
Rashidi <i>et al.</i> (2017)	Argamassa em formato de prisma (25 × 25 × 285 mm)	Pré-cura a 23 °C por 4 h; Taxa de aquecimento 20 °C/h; Permanência 95 °C/12 h; Taxa de resfriamento 20 °C/h; Permanência em 23 °C.	Pré-cura em ambiente normal; Armazenagem em água saturada com cal.	450 dias
Teste de Duggan e Scot (BAUER, 2006)	Testemunhos de Concreto cilíndricos (25 × 50mm)	Pré-cura a 21 °C por 72h em água destilada; Ciclo 1: Secagem em forno a 82 °C por 24 h; Resfriamento por 1 h; Imersão em água destilada por 24 h. Ciclo 2: Repetição do ciclo 1. Ciclo 3: Amostras permanecem a 82 °C por 72 h e então resfriam por 1 h; Resfriamento por 1 h; Permanência em água destilada a 21 °C.	Pré-cura em água destilada, em recipiente fechado; Aquecimento em forno a ar seco; Permanência final com imersão em água destilada a 22 °C.	-----
Fonte: Dados acima extraídos de Schovanz (2019).				
Bronholo (2020)	Prismas de concreto (75 × 75 × 285 mm) Barras de argamassa (25 × 25 × 285 mm)	Pré-cura a 23 °C por 6h; Taxa de aquecimento 10 °C/h; Permanência 85 °C/12 h; Taxa de resfriamento 5 °C/h; Permanência em 38 °C.	Pré-cura, aquecimento e resfriamento em câmara climática; Desforma e manutenção da imersão em água a 38 °C até o final do ensaio.	1 ano
Melo (2021) LCPC N. 66	Prismas de concreto (75 × 75 × 285 mm)	Pré-cura a 25 °C por 6 h; Taxa de aquecimento 10 °C/h; Permanência 85 °C/12 h; Taxa de resfriamento 10 °C/h; Permanência em 38 °C; Nota: No LCPC, a cura é definida pelo interessado, com base nas informações relacionadas ao cimento e concreto empregados.	Ciclos de secagem e molhagem	1 ano
Hasparyk, Schovanz, Kuperman (2020); Hasparyk et al. (2022)	Prismas de concreto (75 × 75 × 285 mm)	Pré-cura a 25 °C por 6 h; Taxa de aquecimento 10 °C/h; Permanência 85 °C/12 h; Taxa de resfriamento 10 °C/h; Permanência em 38 °C.	Pré-cura, aquecimento e resfriamento com imersão em água; Desforma e manutenção da imersão em água a 38 °C até o final do ensaio.	1 ano para cimento CP V 2 anos para cimentos compostos, ou com a incorporação de adições minerais.

Fonte: Os autores desta publicação (atualização dos dados), a partir de Bronholo (2020); LCPC N.66 (2007); Melo (2021); Hasparyk et al. (2020) e Hasparyk et al. (2022)

Enquanto não se dispôs de métodos normalizados, recomenda-se a adoção da instrução técnica denominada IT.GSTE004-R0 e, caso se faça aplicável, o método n. 66 do LCPC.

Essa instrução técnica de autoria de Hasparyk, Schovanz e Kuperman (2020) foi desenvolvida de modo a avaliar o potencial de um concreto para o desenvolvimento da DEF por meio da avaliação de variação dimensional, sendo os resultados expressos em % de expansão. Os resultados obtidos prestam-se também ao estabelecimento de diversas correlações com outros parâmetros e propriedades mecânicas. O método foi desenvolvido pelo projeto de pesquisa citado e envolveu um estudo inicial contemplando cimentos de alta resistência inicial, do tipo CP V-ARI, e pozolânico – com adição de cinza volante, do tipo CP IV, bem como dosagens específicas. Resultados médios de expansão acima de 0,04% indicaram reduções expressivas nas propriedades mecânicas dos concretos testados até 1 ano de idade e, em especial, com o CP V-ARI. Na presença do cimento pozolânico, embora tenham sido observados menores valores de expansão dos concretos com relação ao CP V, o comportamento expansivo indica crescimento lento ao longo do tempo, sendo recomendado para esse tipo de cimento uma avaliação de mais longo prazo, por exemplo, em torno de dois anos. Na [Figura 4.1](#) é apresentado o ciclo adotado nas primeiras idades para a indução da DEF potencial em concretos.

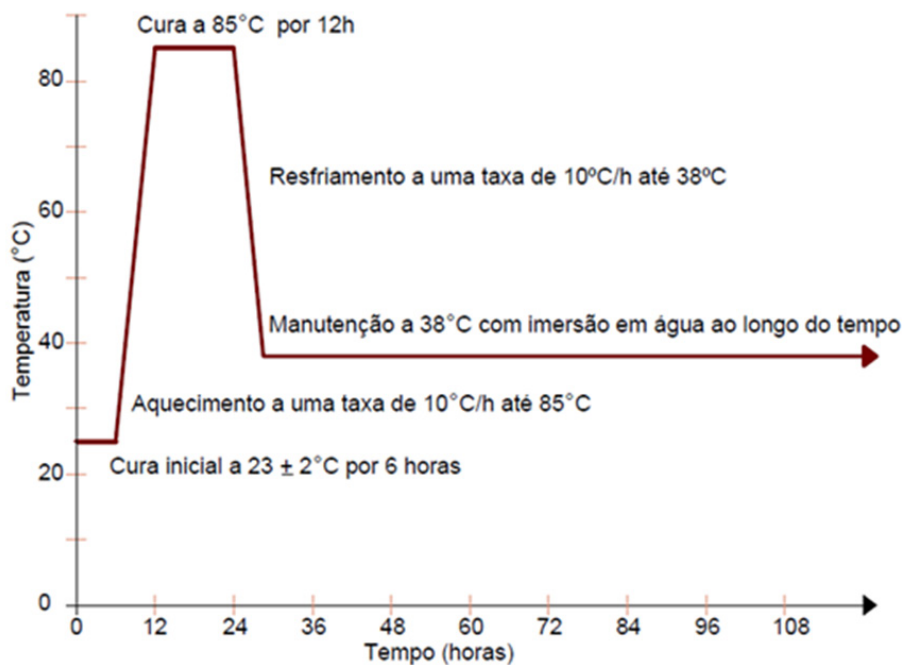


Figura 4.1 – Curas e ambiente de exposição. Fonte: Hasparyk, Schovanz, Kuperman, 2020.

A necessidade de avanço nos estudos laboratoriais é fato, e simulações de campo são necessárias de modo a validar os métodos de ensaio. As condições ambientais são extremamente interferentes no desencadeamento e aceleração da DEF. Todos esses aspectos devem ser conhecidos e bem compreendidos de modo a prever o desempenho de uma estrutura de concreto em campo. Nesse sentido, estudos em protótipos de blocos de concreto encontram-se em andamento com o objetivo de avançar nesse conhecimento (Hasparyk et al., 2021; Bragança et al., 2023).



MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA A DEF

A primeira medida preventiva que deve ser adotada de modo a evitar o fenômeno da DEF é limitar a temperatura de cura térmica, apesar de ainda não existir consenso na literatura, pois alguns países remetem à temperatura limite de 60 °C ou de 65 °C, outros de 70 °C.

Com isso, mesmo que o cimento possua alguma característica específica que seja claramente interveniente, a geração interna de calor no concreto pode ser reduzida. Para pré-moldados de concreto, uma prática adotada é a realização de uma pré-cura na temperatura ambiente, sem adoção da cura térmica durante ao menos o início de pega do cimento, o que geralmente varia de 4 a 6 horas, dependendo do tipo de cimento. Isso não minimiza os riscos da DEF causados pela cura térmica posterior.

No caso de concretos massa, e com elevados consumos de cimento, quando a dosagem não pode ser modificada, deve-se adotar um tipo de cimento que tenha menor predisposição para a geração de calor interno. Recomenda-se, portanto, ser descartado o emprego do cimento puro, de alta resistência inicial (CP V-ARI), ou serem realizados ensaios prévios para a verificação de seu potencial ou não para o desencadeamento da DEF.

Outra medida que pode ser destacada é a limitação da finura e do teor de SO_3 dos cimentos pretendidos para uso na especificação técnica, além do calor de hidratação do cimento.

No que tange ao SO_3 , esse só pode ser controlado na fábrica, mas a recomendação é que esse parâmetro seja avaliado com cautela. Embora a normalização brasileira limite o teor total de SO_3 a 4,5% nos cimentos (NBR 16697, 2018), segundo Heinz et al. (1999) e Taylor et al. (2001), valores acima de 3% propiciam a DEF. Conforme LCPC (2007), o valor limite crítico considerado é de 2,64% para o SO_3 , porém, sabe-se que dados acima de 2,5% já trazem uma maior probabilidade de DEF. Ou seja, restringir, sempre que possível, esse teor a 2,5% seria o mais apropriado.

Não somente o teor de SO_3 , mas também as relações $(\text{SO}_3)_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ do cimento têm sido abordadas na literatura por representarem parâmetros atrelados ao nível de danos pela DEF. Estudos de longa data já apontavam para o parâmetro $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, como os de Heinz e Ludwig (1987), que verificaram que à medida que a relação molar aumentava, as expansões também cresciam. Alguns pesquisadores (Grabowski et al., 1992; Fu et al., 1997 e Famy, 1999) atribuíam maiores expansões para relações da ordem de 1,00. Segundo Zhang et al. (2002), valores abaixo de 0,8 trazem menores riscos da DEF. Por outro lado, conforme descrito em Bauer et al. (2006), caso as relações $(\text{SO}_3)_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ se apresentarem inferiores 2 e 0,67, respectivamente, menores serão os riscos de ocorrência da DEF. Especificamente no que diz respeito ao parâmetro isolado $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ do cimento, valores abaixo de 0,5 já vêm sendo recomendados.

Além dos parâmetros citados como potencializadores da DEF, convém ressaltar que maiores quantidades de C_3A e álcalis do cimento predis põem a sua ocorrência e intensificação.

Quanto ao calor de hidratação, recentemente a normalização reduziu o tempo de análise desse parâmetro no ensaio laboratorial. A sua determinação geralmente era

feita por meio de ensaio em garrafas de Langavant, entretanto o calorímetro isotérmico vem ganhando um maior número de adeptos e confiabilidade dos resultados obtidos. O fato é que alguns cimentos ainda geram calor em idades superiores às especificadas, colocando o concreto em riscos de atingimento de elevadas temperaturas quando em serviço. Para se obter um cimento com baixo calor de hidratação, o limite atual é de 270 J/g em 41 horas (NBR 16697, 2018), valor corriqueiramente suplantado pelos cimentos do tipo V-ARI.

A adoção de medidas preventivas tem o papel de mitigar (reduzir ou anular) as expansões deletérias causadas pela DEF. Assim, combinações binárias, contemplando o emprego de adições minerais como a cinza volante, a sílica ativa, o metacaulim e a escória de alto-forno moída podem trazer condições mais favoráveis nesse sentido, ou mesmo combinações ternárias, sempre em teores ótimos previamente testados (Hobbs, 1999; Ramlochan et al., 2003; Bauer et al., 2006; Silva et al., 2010; Nguyen et al., 2013; Leklou et al., 2016; Silva et al., 2021). A mitigação se deve, inicialmente, pela simples substituição do cimento pela adição, reduzindo, portanto, a quantidade de sulfatos presente na mistura. Além disso, as reações pozolânicas produzem uma matriz cimentícia mais densa, dificultando a migração dos íons e, portanto, suas reações químicas envolvidas no processo de formação da etringita secundária (DEF). Estudiosos como Leklou et al. (2016) atribuem à quantidade de aluminatos a boa performance de determinadas adições na mitigação da DEF. Porém, deve-se destacar que os cimentos tipo CP IV brasileiros não têm se mostrado resistentes à DEF, conforme mostram os estudos de Schovanz (2019), Bronholo (2020), Langosky (2021), Melo (2021) e Perondi (2022).

Em se tratando da sílica ativa, é sempre importante limitar o seu teor a valores da ordem de 10% (em massa) de modo a serem evitados problemas tanto de trabalhabilidade como de dispersão inadequada desta superpozolana. Além do exposto, na presença da sílica ativa deve ser levado ainda em consideração o emprego de um aditivo adequado, compatível com a mesma e em teores previamente estudados antes do seu uso. Nesse aspecto, estudos reológicos complementares são bastante úteis e podem se fazer necessários para um melhor desempenho das adições. No entanto, os estudos contidos em Oliveira et al. (2021) não indicam eficiência desse material para a DEF. O metacaulim e a cinza de casca de arroz também mostram algum potencial de redução das expansões, porém, sem a mitigação completa da DEF, não sendo o seu emprego suficiente para o combate dessa manifestação patológica (Funahashi et al., 2022; Hasparyk et al., 2023). Ainda, qualquer que seja a % da sílica ativa empregada, é importante realizar ensaios complementares para se ter certeza que eventuais aglomerações de suas partículas não causem uma reação álcali-sílica inesperada.

Considerando a impossibilidade de troca do cimento (tendo-se conhecimento prévio das suas características) e/ou alteração na dosagem, pode vir a ser necessária a refrigeração do concreto e/ou de seus materiais constituintes de modo a minimizar a elevação de calor dentro das estruturas de concreto e evitar tanto a formação de DEF quanto as fissurações causadas por tensões de origem térmica. Esse procedimento pode ocorrer no lançamento do concreto, como pré-refrigeração ou pós-refrigeração.

ESTUDOS TÉRMICOS

6.1. Introdução

Concreto massa é qualquer volume de concreto com dimensões suficientes para que sejam tomadas medidas preventivas para minimizar a geração de calor quando da hidratação do cimento, após o seu lançamento nas formas, e respectiva mudança do volume quando da dissipação do calor para o meio ambiente. Essas medidas visam minimizar fissuras térmicas que podem vir a causar perda de integridade estrutural e, também, de monoliticidade e, no futuro, afetar a durabilidade e reduzir a vida útil de projeto das estruturas de concreto, dependendo do quadro fissuratório.

O concreto massa não se limita apenas às estruturas com grandes volumes, como aquelas inerentes às barragens e às usinas hidrelétricas, por exemplo, devendo ser considerados também blocos de fundação de edificações, vigas de transição, pilares, lajes espessas, estacas, tubulões, dentre outros elementos de concreto.

Para estes tipos de estrutura é fundamental avaliar, através de análises térmicas ainda na fase de projeto, o risco potencial de fissuração causada por tensões de tração de origem térmica e/ou por DEF de modo a auxiliar na definição da metodologia executiva a ser adotada. Nos grandes centros urbanos têm sido projetados edifícios cada vez mais esbeltos, com elementos estruturais de fundação com elevadas resistências de projeto variando de 40 MPa até 70 MPa, por exemplo, e mesmo com menor volume (inferior a 30 m³, em alguns casos) resultam em elevado risco de fissuração, dependendo das suas dimensões, da dosagem e dos materiais constituintes do concreto, além das condições ambientais da obra e das técnicas empregadas durante o seu lançamento. Os principais fatores que podem resultar em tensões de tração superiores à resistência à tração do concreto são os gradientes de temperatura e as restrições impostas à peça estrutural. Devido às altas temperaturas desenvolvidas no interior do concreto massa durante a hidratação do cimento, quase adiabáticas, elevados gradientes térmicos entre a região próxima ao centro geométrico da estrutura e as regiões periféricas com temperaturas próximas da temperatura ambiente podem ocorrer. Neste caso podem ser induzidas tensões térmicas que, caso sejam superiores à resistência à tração do concreto, resultam em fissuras de maior abertura e com maior profundidade, causadas pela restrição interna. As elevadas temperaturas no interior do concreto podem também representar um elevado risco de fissuração e deterioração decorrente da formação de etringita tardia (DEF).

Atualmente a limitação máxima de temperatura de 65 °C tem sido adotada em projetos para reduzir ao mínimo as possibilidades de formação de etringita tardia, sendo fundamental constar de notas de projeto e/ou especificações técnicas.

Uma avaliação inicial envolvendo o potencial de fissuração resultante de efeitos térmicos tem sido relevante tanto para projetistas quanto para construtores durante a concepção do projeto. Conforme NBR 6118:2014, as análises estruturais de segurança relacionadas às limitações de fissuração, quando da verificação dos ELS e ELU em estruturas de concreto a partir das deformações impostas, devem garantir os critérios de durabilidade e de vida útil (NBR 15575:2013) através da limitação da abertura das fissuras.

Dependendo do tipo de estrutura e das características das fissuras, o restabelecimento das suas características de durabilidade muitas vezes resulta em despesas adicionais para análise das suas causas e consequências e, na maioria dos casos, implicam em serviços de recuperação com elevados custos não previstos.

6.2. Análise do comportamento térmico

Os estudos térmicos consistem em análises das temperaturas e das tensões a serem desenvolvidas no interior de uma estrutura de concreto quando das reações exotérmicas da hidratação do cimento, após o seu lançamento, e das tensões e deformações resultantes na estrutura quando da dissipação do calor acumulado do interior para o meio ambiente. Para as análises de temperaturas e tensões, além das propriedades térmicas e mecânicas do concreto, é importante considerar as condições de contorno próximas da realidade, como a evolução da temperatura ambiente para o período de cálculo, as características das restrições, o tipo de forma, a velocidade do vento, o tipo de cura, dentre outros.

O controle de eventuais fissuras é importante para evitar o ingresso de água e/ou agentes agressivos ao concreto e à armadura, pois estes contribuem para acelerar os processos químicos expansivos que podem prejudicar a durabilidade e a vida útil. A partir da realização dos estudos térmicos previamente à concretagem é possível definir um plano de execução adequado, minimizando o risco de manifestações patológicas no concreto durante a concepção do projeto estrutural ou projeto básico, por meio da simulação de diferentes hipóteses de execução de uma determinada estrutura. As medidas a serem adotadas para execução têm reflexos diretos nos custos e no cronograma da obra e auxiliam na definição da solução com melhor custo-benefício e menor probabilidade de fissuração de origem térmica. Estes estudos permitem avaliara real necessidade de emprego de sistemas de pré-refrigeração e/ou pós-refrigeração em concretos.

Os estudos térmicos são fundamentais nos estudos de cronogramas de obras, na definição de planos de execução e logística, definição da temperatura de lançamento do concreto fresco, estimativa de custos e definição prévia de procedimentos de refrigeração a serem empregados (pré-refrigeração e/ou pós-refrigeração). Ainda, definem as alturas das camadas de concreto em lançamentos com mais de uma etapa, estimativa da produção de gelo para dimensionamento de fábrica de gelo a ser instalada no canteiro (no caso de barragens, usinas hidrelétricas e parques eólicos, por exemplo), escolha mais adequada da dosagem e dos materiais constituintes do concreto.

Os estudos térmicos são divididos em duas etapas distintas de análises. Inicialmente são avaliadas as evoluções das temperaturas na estrutura de concreto a ser analisada e, a partir destas evoluções térmicas, são avaliadas as tensões e deformações térmicas resultantes.

6.3. Cálculo do desenvolvimento das temperaturas no concreto massa

A estimativa do desenvolvimento das temperaturas em uma estrutura de concreto depende de uma série de parâmetros relacionados aos materiais constituintes do concreto como: tipo e consumo de cimento, tipo e teor de adições pozolânicas, características litológicas dos agregados graúdos e miúdos e a dosagem do concreto. Com base na

geometria da estrutura, condições ambientais e propriedades térmicas do concreto, são realizados cálculos térmicos previamente à concretagem com precisão satisfatória.

Quando não se dispõe de resultados de ensaios de laboratório, as propriedades térmicas são estimadas com base na dosagem prevista e nas características dos materiais a serem empregados no concreto. Em alguns casos, as propriedades térmicas do concreto podem ser estimadas por meio de retroanálises da execução de blocos de menor dimensão (protótipos) devidamente monitorados com termopares ou termômetros instalados em seu interior.

Importante destacar que a condição ideal na definição do plano de executivo contemplando as condições de lançamento do concreto deve ser baseada em estudos térmicos realizados com o emprego das propriedades reais do concreto, determinadas por ensaios laboratoriais.

6.3.1. Propriedades térmicas do concreto para avaliação das temperaturas

O aumento da temperatura no concreto é resultante de fenômenos de dissolução-precipitação quando do contato do cimento anidro com a água, de natureza exotérmica. Para entender melhor este comportamento em concretos e argamassas podem ser utilizados calorímetros semiadiabáticos, adiabáticos e isotérmicos. A elevação adiabática de temperatura do concreto é um dos parâmetros mais importantes nos estudos térmicos e depende, principalmente, do tipo e consumo de cimento empregado na dosagem e representa a elevação da temperatura do concreto sem troca de calor com o ambiente.

A elevação adiabática de temperatura pode ser determinada por meio de ensaios laboratoriais, conforme a ABNT NBR 12819:2012. No caso de obras de infraestruturas, como barragens, por exemplo, há diferentes classes de concreto com consumos distintos, considerando um mesmo tipo de cimento e agregados. Desse modo, a elevação adiabática pode ser estimada a partir do coeficiente de elevação adiabática ou rendimento térmico ($^{\circ}\text{C}/\text{kg}\cdot\text{m}^3$), sendo este calculado a partir de uma dosagem de referência (FURNAS, 1997; Gambale et al., 2010; Funahashi et al., 2018).

Quando não for possível a realização desse ensaio, recomenda-se a realização de retroanálise por meio de modelagem matemática de protótipos como blocos experimentais em concreto massa de menor dimensão. Esse parâmetro pode ser estimado a partir de modelos de dados baseado em redes neurais com informações relacionadas a dosagem e características físico-químicas do cimento (FARIA, 2004; GAMBALE et al., 2018).

Quando resultados de ensaios de elevação adiabáticas não estão disponíveis, o seu desenvolvimento pode ser estimado a partir de ensaios de calor de hidratação determinados por calorimetria semiadiabática (método da garrafa de Langavant), segundo a NBR 12006:1990. A NBR 16697:2018 fixa valor máximo, em J/g ou kJ/kg, para classificar os cimentos como de baixo calor de hidratação com calor acumulado $\leq 270 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ na idade de 41 horas. Para as análises térmicas sugere-se dispor de ensaios atualizados e realizados até a idade de 168 horas. O calor de hidratação também poderá ser determinado através de calorímetro isotérmico a uma determinada temperatura constante de ensaio. No Brasil não há norma da ABNT para a determinação do calor por este método, sendo adotada a ASTM 1702:2017 como base. Também podem ser empregados calorímetros semiadiabáticos acoplados a aplicativos computacionais e aplicativos com interfaces amigáveis, por exemplo, onde a partir do conhecimento dos coeficientes de dissipação de calor do equipamento, é possível estimar o calor de hidratação acumulado em função da maturidade e da elevação adiabática. Outros métodos para esta determinação baseiam-se na contribuição individual de calor determinado

para os principais compostos químicos do clínquer ou cimento, dependendo da idade (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF), e que podem ser quantificados através de difração de raios X (DRX), usando o método quantitativo (baseado em Rietveld).

A partir dos dados de calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant, é possível estimar a evolução da temperatura em concretos, segundo a equação de Rastrup (1954), a seguir:

$$\Delta T = \frac{C \cdot CH}{\gamma \cdot c}$$

Equação 6.1

Onde:

ΔT = Elevação adiabática de temperatura ($^{\circ}C$)

γ = Massa específica (kg/m^3)

c = Calor específico ($kJ/kg \cdot ^{\circ}C$)

C = Consumo de cimento (kg/m^3)

CH = Calor de hidratação ($kJ \cdot kg^{-1}$ ou $J \cdot g^{-1}$)

A escolha do tipo de cimento bem como do seu consumo tem influência direta no aumento da temperatura no concreto. Caso o consumo de cimento seja elevado, maiores temperaturas podem ser atingidas no interior do concreto após o seu lançamento, mesmo o cimento sendo classificado como de baixo calor de hidratação. A [Figura 6.1](#) mostra curva de elevação adiabática calculada partir do coeficiente de elevação adiabática ($^{\circ}C/kg/m^3$) obtido através de ensaio de elevação adiabática em concreto de referência com o mesmo tipo de cimento e consumo de $357 kg/m^3$. A partir do cálculo do coeficiente de elevação adiabática ou rendimento térmico estimou-se a elevação adiabática dos concretos das classes C e G.

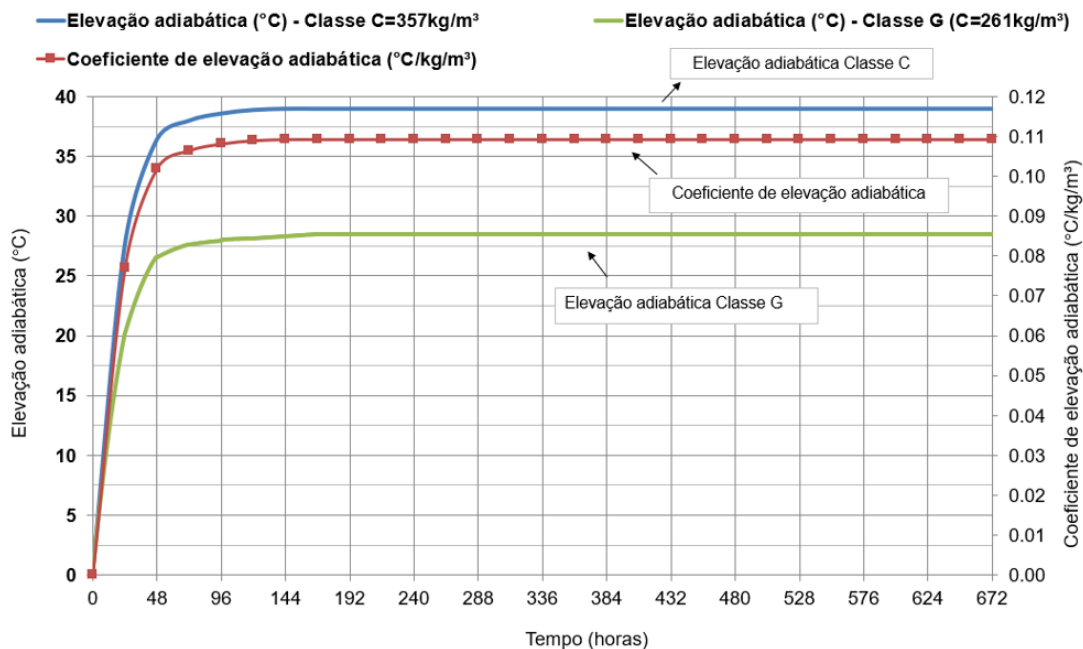


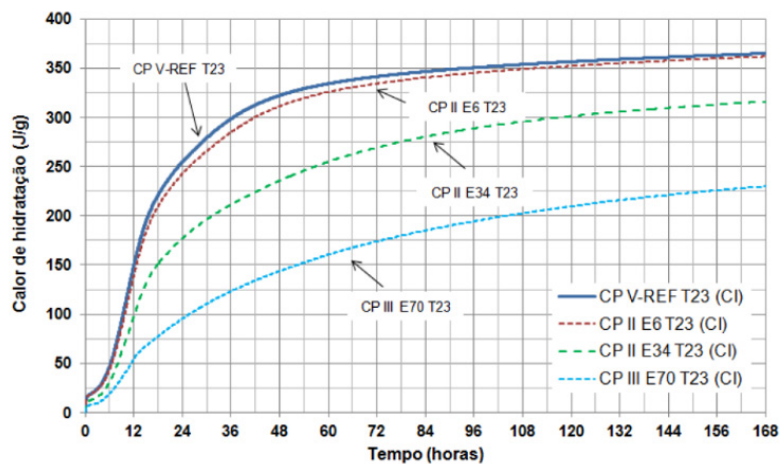
Figura 6.1 – Estimativa da elevação adiabática dos concretos a partir de coeficiente de elevação adiabática calculado através de ensaio em concreto referência. Fonte: adaptada de Funahashi et al., 2018.

A [Figura 6.2](#) mostra calorímetro adiabático desenvolvido em projeto de P&D de Furnas.



Figura 6.2 – Calorímetro adiabático desenvolvido no projeto P&D de Furnas- Modelagem de concreto em poucas idades com aplicações para barragens: novos paradigmas e suas soluções (Gambale et al., 2018).

Na **Figura 6.3** são mostradas algumas curvas da evolução do calor de hidratação de pastas cimentícias preparadas em laboratório. A **Figura 6.3** (a) e (b) mostra estudo realizado a partir de um cimento CP V ARI com diferentes teores de escória de alto forno (variando de 6% até 70%) e a utilização de calorímetro isotérmico com temperatura de ensaio igual a 23 °C no laboratório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).



(a)

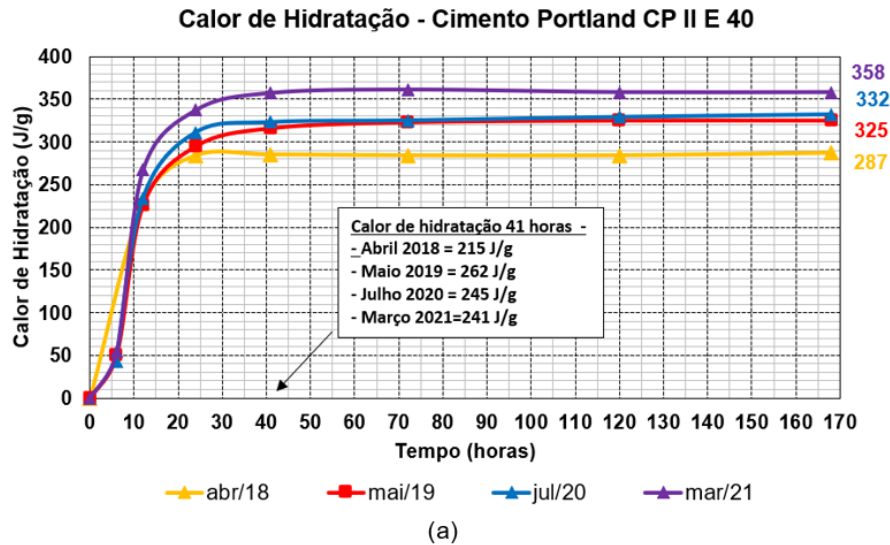


(b)

Figura 6.3 – (a) Curvas de calor de hidratação acumulado determinado por calorímetro isotérmico e amostras de cimento CPV com adição de diferentes teores de escória, e temperatura de ensaio igual a 23 °C; (b) Calorímetro isotérmico de condução e (c) ampola de vidro com volume de 25 mL.

Fonte: Funahashi, 2018.

Conforme apresentado na [Figura 6.4](#), o estudo realizado envolveu a análise do comportamento de um CP II E - 40 comercial por meio de ensaios na garrafa de Langavant, realizados entre abril de 2018 e março de 2021, com diferentes valores de calor de hidratação nas idades de 41 e 168 horas.



(b)



(c)

Figura 6.4 – (a) Curvas de calor de hidratação acumulado determinado através de calorímetro semiadiabático (garrafa de Langavant, ABCP) com cimento CP II E-40, na região sudeste (arquivo da Desek, 2019). (b) Detalhe da garrafa de referências e (c) detalhe da garrafa para colocação da amostra de argamassa. Fonte: Funahashi, 2018.

O calor específico do concreto pode variar, geralmente, de 0,42 kJ/kg. °C a 1,67 kJ/kg. °C, é uma propriedade que influencia na capacidade de armazenamento de calor, sendo expressa numericamente pela quantidade de calor que deve ser cedida à unidade de massa do material para elevar um grau a sua temperatura. Já a condutividade térmica representa a velocidade do fluxo de calor por uma espessura ou área unitária dos materiais submetidos a uma diferença unitária de temperatura, entre duas faces paralelas, e normalmente situa-se entre 5 kJ/m.h. °C e 13 kJ/m.h. °C, dependendo da dosagem do concreto e da litologia dos agregados graúdos e miúdos (GAMBALE et al., 2010; GAMBALE et al., 2008). Dados de calor específico e condutividade térmica de concretos, considerando dosagens com diferentes consumos de cimento e material pozolânico, diferentes litotipos de agregados graúdos e miúdos, podem ser verificados em Furnas (1997).

No caso da impossibilidade de realização de ensaios de condutividade térmica e calor específico do concreto para alimentar as análises térmicas, estes podem ser

estimados com base nas características dos materiais a serem empregados e dosagem do concreto (FURNAS, 1997). A difusividade térmica também pode ser estimada (GAMBALE et al., 2008).

Para a estimativa dos valores de condutividade térmica (k) e do calor específico (c) do concreto, devem ser considerados os valores individuais de cada material constituinte, conforme as expressões a seguir:

$$k = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \quad \text{Equação 6.2}$$

$$k = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \quad \text{Equação 6.3}$$

Onde:

k_i = condutividade térmica de cada constituinte do concreto;

m_i = massa de cada constituinte da dosagem.

A difusividade térmica do concreto pode ser calculada pela seguinte equação:

$$h^2 = \frac{k}{c \cdot \gamma} \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde:

h = difusividade térmica;

k = condutividade térmica (kJ/m.h. °C);

c = calor específico (kJ/kg.°C);

γ = massa específica (kg/m³).

Na [Figura 6.5](#) é apresentado um bloco instrumentado através de um tubo embutido no concreto para o monitoramento da elevação de temperatura. A [Figura 6.6](#) apresenta equipamento datalogger para a aquisição automática das leituras em intervalo de tempo previamente definido.



Figura 6.5 – Bloco preparado para ser monitorado por um termômetro instalado internamente. Fonte: Gambale et al., 2018.

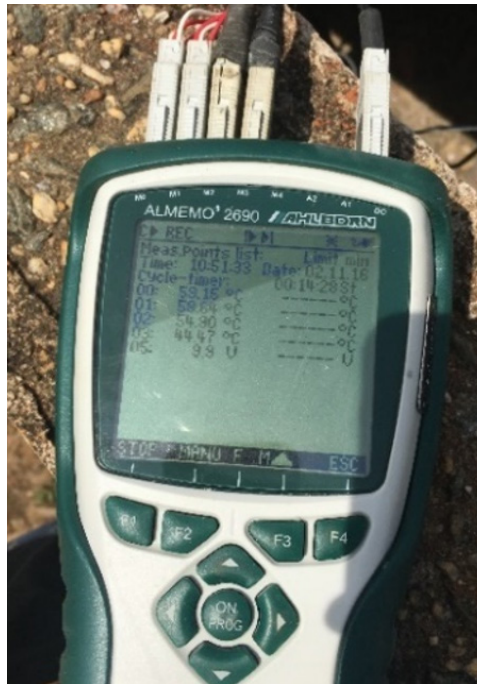


Figura 6.6 – Equipamento automático de leitura de termômetro. Fonte: Gambale et al., 2018.

Em estruturas de concreto o monitoramento de temperaturas deve ser realizado através de termopares ou de termômetros inseridos no interior do concreto massa acoplados a sistemas automáticos de leitura. Podem ser empregados equipamentos tipo datalogger onde os dados de leitura armazenados são descarregados para um smartphone ou notebook. Sistemas tipo real-time data com armazenamento em nuvens de dados, com leituras em tempo real, é uma boa alternativa considerando a sua maior praticidade de monitoramento durante a execução.

Na [Tabela 6.1](#) é apresentado um exemplo de cálculo de elevação adiabática teórica a partir da equação proposta por Rastrup (1954), para a verificação do desempenho térmico de três fornecedores de concreto distintos na região Sudeste do Brasil, denominados A, B e C. Com base nesta avaliação preliminar, nota-se que o traço A apresenta menor elevação adiabática e, portanto, menor probabilidade de resultar em fissuras de origem térmica comparado com as demais dosagens. No entanto, convém atentar que o calor de hidratação (em 41 horas) entre os cimentos do tipo CP II E-40 e CP II F-40 (traços A e B, respectivamente), é de cerca de apenas 5%. Como a porcentagem de escória de alto forno adicionada a um cimento do tipo CP II E (conforme a NBR 16697) pode variar entre 6% e 34%, é provável que no traço A, o teor de escória adicionado na fabricação do cimento tenha sido baixo, o que não resultou em redução significativa de calor com relação ao cimento CP II F. Com base na [Figura 6.3](#), pode se ter essa comprovação, na qual o calor de hidratação do cimento CP II E, com teor de 6% de escória se apresentou próximo ao do cimento CP V, sem adição. Já para o mesmo tipo de cimento CP II E, porém, com 34% da escória, apresentou calor de hidratação 16% menor que aquele com 6%, mostrando o efeito positivo desta adição na redução de calor.

Tabela 6.1 – Exemplo de verificação do potencial térmico de cada dosagem de concreto proposta por fornecedores de concreto considerando agregados graúdos e miúdos da mesma região. Fonte: Desek, 2021.

Possível fornecedor de concreto	A	B	C
f_{ck} (MPa)/28 dias de idade		40	
Tipo de cimento	CP II E 40	CP II F 40	CP II F 40
Consumo de cimento (kg/m ³)	314	325	337
Consumo de sílica ativa(kg/m ³)	20	20	23
Consumo de aglomerante (cimento + adição pozolânica) (kg/m ³)	334	345	360
Calor de hidratação na idade de 168 horas (kJ/kg)	314	322	322
Calor de hidratação na idade de 41 horas (kJ/kg)	298	313	313
Cimento de baixo calor de hidratação segundo NBR 16697 (CH ≤ 270 J/g em 41 horas)	Não	Não	Não
Calor específico (kJ/kg · °C)	0,93	0,93	0,92
Massa específica (kg/m ³)	2445	2396	2430
f_{c28} (MPa)	56,9	52,7	51,7
Elevação adiabática estimada (°C)	44,7	48,4	50,2
Rendimento térmico por kg/m ³ de aglomerante (°C/kg/m ³)	0,134	0,140	0,139
Rendimento térmico por MPa (°C/MPa)	1,272	1,089	1,030

6.3.2. Condições ambientais e cálculos de temperaturas

Além das propriedades do concreto, estas análises necessitam de conhecimento prévio do histórico de temperaturas ambiente do local da obra e que influenciam no aumento da temperatura no interior do concreto e na sua temperatura de lançamento. As temperaturas dos materiais constituintes do concreto são influenciadas pela temperatura ambiente. Em alguns casos são programadas concretagens noturnas para serem atingidas menores temperaturas de lançamento do concreto, dependendo das especificações de projeto e dos estudos térmicos realizados. Quando os dados de temperatura ambiente não estão disponíveis, é possível adotar os históricos constantes em sites especializados em meteorologia como o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Tecnológicas), Clima Tempo, dentre outros. Dependendo do tipo de estrutura e análise térmica a ser realizada, podem ser empregados os valores médios em um determinado período baseado no histórico de temperaturas locais ou temperatura de cura quando da análise de elementos pré-fabricados. Informações relacionadas ao tipo e espessura de forma, tipo de cura e duração, características da base da estrutura, juntas de construção, concretagens em contato com solos ou alvenaria, velocidade do vento, radiação dentre outras são importantes para que a modelagem seja a mais próxima das condições reais de execução da estrutura.

Para o cálculo do desenvolvimento das temperaturas no interior de uma estrutura de concreto são adotados diferentes métodos, sendo os principais o método das diferenças finitas (MDF) e o método dos elementos finitos (MEF). Devido à elevada

quantidade de cálculos para os testes de diferentes hipóteses de concretagem, atualmente são realizados cálculos através de softwares computacionais.

O método das diferenças finitas, como o método de *Schmidt* e o de *Carlson*, calculados a partir de processos simplificados não permitem considerar fidedignamente as diferentes condições de trocas de calor através das superfícies das estruturas, sendo mais limitados e imprecisos dependendo do tipo de estrutura a ser analisada. Os métodos de *Schmidt* e de *Carlson* (fluxo unidirecional de calor) são processos de cálculo bastante simples em que se divide a estrutura de concreto em pequenos elementos de volume e se calculam as temperaturas em cada elemento, para diferentes intervalos de tempo. A precisão dos resultados varia de acordo com as dimensões estabelecidas para os elementos de volume e para os intervalos de tempo considerados.

Quando os cálculos são realizados por modelagem matemática pelo método dos elementos finitos (MEF) é possível utilizar elementos com fluxo de calor em três direções, bem como calcular tridimensionalmente as tensões atuantes, derivadas das quedas de temperaturas que ocorrerão.

Nessas modelagens podem ser adotadas simetrias, dependendo da geometria da estrutura, além de fluxos unidirecional e/ou bidirecional, já que esta hipótese pode apresentar vantagens em alguns casos, com resultados satisfatórios com maior rapidez e menor número de cálculos. As malhas de elementos finitos devem representar de forma fidedigna as condições locais, geometria da estrutura e permitir a diferenciação dos materiais envolvidos nas trocas de calor (rocha de fundação, lastro, estacas, solos laterais, além das diferentes dosagens empregadas em cada local da estrutura, tipo e duração da cura, por exemplo). Devem, ainda, permitir a representação das diferentes alturas de camadas de concretagem a serem estudadas com os intervalos entre as concretagens pré-definidos, a partir do cronograma da obra. A rocha de fundação, lastro de concreto, tipo de solo, juntas de construção, dentre outros, devem ser considerados na malha de modo que não prejudiquem a precisão dos cálculos de temperatura e nem aumentem, desnecessariamente, o tempo destinado aos cálculos.

6.3.3. Propriedades para análise do comportamento térmico-tensional do concreto

Para a análise de tensões e/ou deformações em uma estrutura de concreto há necessidade do conhecimento prévio de algumas propriedades do material, como segue:

- Coeficiente de dilatação térmica;
- Módulo de elasticidade;
- Fluência;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração;
- Capacidade de deformação;
- Coeficiente de Poisson.

Essas propriedades podem ser determinadas por meio de ensaios específicos e, caso não estejam disponíveis, poderão ser adotados valores de referência da NBR 6118:2014, ou a partir de estimativas, com valores constantes de bibliografia

específica, em função da litologia dos agregados e das proporções dos materiais constituintes do concreto.

6.3.4. Cálculo das tensões de origem térmica

Existem diferentes processos de cálculo das tensões térmicas em estruturas de concreto, os quais devem levar em conta o comportamento viscoelástico do concreto. Os cálculos poderão ser realizados através do método dos elementos finitos, método simplificado, baseado na transformação do comportamento viscoelástico linear em função da maturidade (envelhecimento do concreto), na superposição de problemas elásticos associados, e com emprego do modelo de Boltzmann para descrever a fluência do concreto, dentre outros.

Em estruturas com grandes dimensões é possível que as temperaturas a serem desenvolvidas no seu interior possam originar elevadas tensões de origem térmica. Essas têm como origem as reações de hidratação do cimento, sempre exotérmicas e que, em razão das dimensões da estrutura, encontrarão dificuldades em se dissipar para o meio circundante. Condições propícias passam a existir para que, durante o arrefecimento da temperatura do concreto, surjam tensões elevadas de tração que, se forem superiores à capacidade resistente do concreto, poderão provocar fissuras no mesmo (KUPERMAN, 2005). A deformação do material associada à mudança de temperatura interna ao longo do tempo depende do grau de restrição com relação à região analisada, coeficiente de dilatação térmica do concreto, módulo de elasticidade, fluência, gradientes térmicos entre a temperatura interna do concreto e temperatura ambiente e gradiente térmico diferencial no interior do concreto devido às dimensões da estrutura. Em problemas térmicos simplificados é possível realizar o cálculo das tensões térmicas em qualquer altura do eixo de simetria de um bloco, por exemplo, sobre um determinado tipo de apoio. A tensão de tração resultante do resfriamento do concreto pode causar fissuração dependendo do módulo de elasticidade, do grau de restrição e da relaxação da tensão decorrente da fluência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014), conforme equação a seguir:

$$\sigma_t = k_r \cdot \left(\frac{E_c}{1 + \Psi} \right) \alpha \cdot \Delta T \quad \text{Equação 6.5}$$

Onde:

σ_t = tensão de origem térmica;

E_c = módulo de elasticidade do concreto;

K_r = coeficiente de restrição para uma função infinitamente rígida;

α = coeficiente de expansão térmica do concreto;

Ψ = coeficiente de fluência do concreto para o período de cálculos;

ΔT = diferencial de temperatura.

O concreto massa fica restringido, externamente, pela fundação de rocha, lastro, estacas, paredes ou, internamente, pelas deformações diferenciais em diferentes áreas da estrutura devido à presença de gradientes de temperatura.

Uma maneira simplificada de avaliar a influência da restrição é encontrada em um nomograma publicado pelo ACI e constante da [Figura 6.7](#). Nele os valores foram estimados considerando um bloco de concreto apoiado sobre uma base rígida. A restrição é de 100% junto à base e diminui à medida que a distância até ela aumenta.

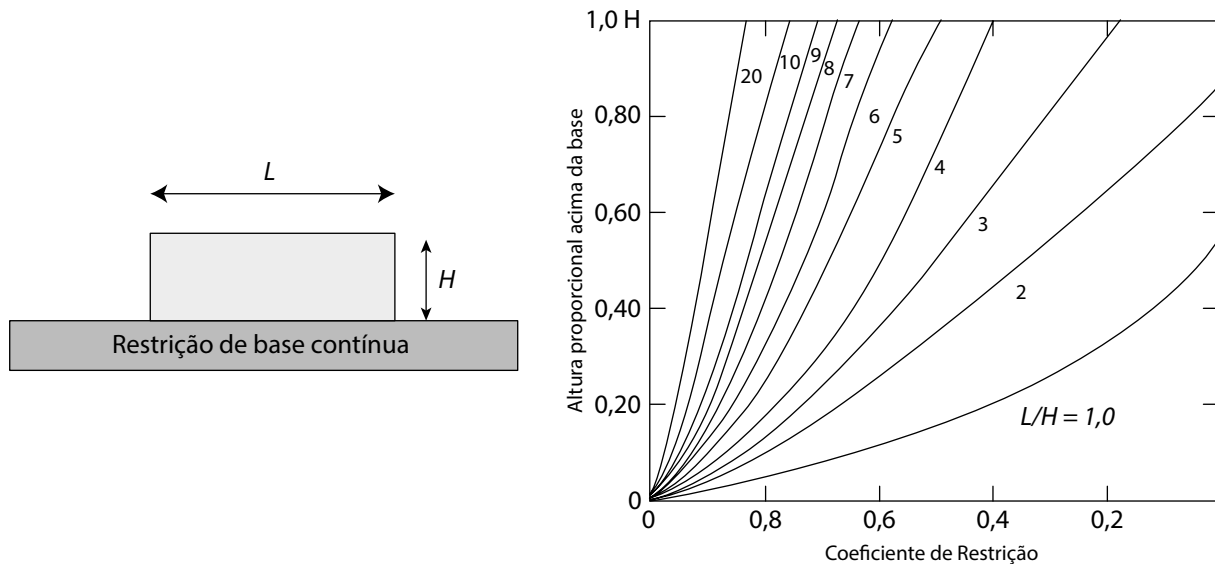


Figura 6.7 – Grau de restrição de tração na seção central (ACI COMMITTEE 207.1-05).

Caso a tensão de origem térmica (σ_t) < resistência à tração do concreto (f_t), não haverá fissuras. A f_t é a resistência a tração simples do concreto. A deformação de origem térmica do concreto pode ser calculada como:

$$\varepsilon = \Delta T \cdot \alpha$$

Equação 6.6

Caso a deformação (ε) se situe abaixo da capacidade de deformação do concreto, não haverá fissuras.

Com base na equação de tensões de origem térmica e nas características mecânicas do concreto, é possível avaliar o risco de fissuração de uma estrutura de concreto resultante do gradiente térmico entre as temperaturas interna do bloco e a ambiente. Concretos com menores coeficiente de dilatação térmica e módulo de elasticidade apresentam menor risco de fissura por tensões de origem térmica. Quanto maior o grau de restrição e o módulo de elasticidade da base de apoio ou restrição lateral maior é o risco de fissuração do concreto.

Para avaliar a eventual probabilidade de fissuração do concreto sugere-se adotar nos cálculos um Fator de Segurança (FS), no mínimo, de 1,1. Esse valor é indicado nas Diretrizes para Elaboração de Projetos de Barragens, volume V, do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016), da Agência Nacional de Águas (ANA). O fator de segurança a ser empregado poderá ser maior dependendo das informações disponíveis relacionadas às propriedades térmicas e mecânicas dos concretos. A fluência do concreto tem influência na relaxação das tensões, mas raramente é determinada por ensaios laboratoriais, sendo muitas vezes adotados valores com base na literatura.

Um exemplo do comportamento térmico de uma estrutura de concreto massa a partir de monitoramento realizado por meio de sensores de temperatura (termopares) instalados no concreto pode ser observado na [Figura 6.8](#).

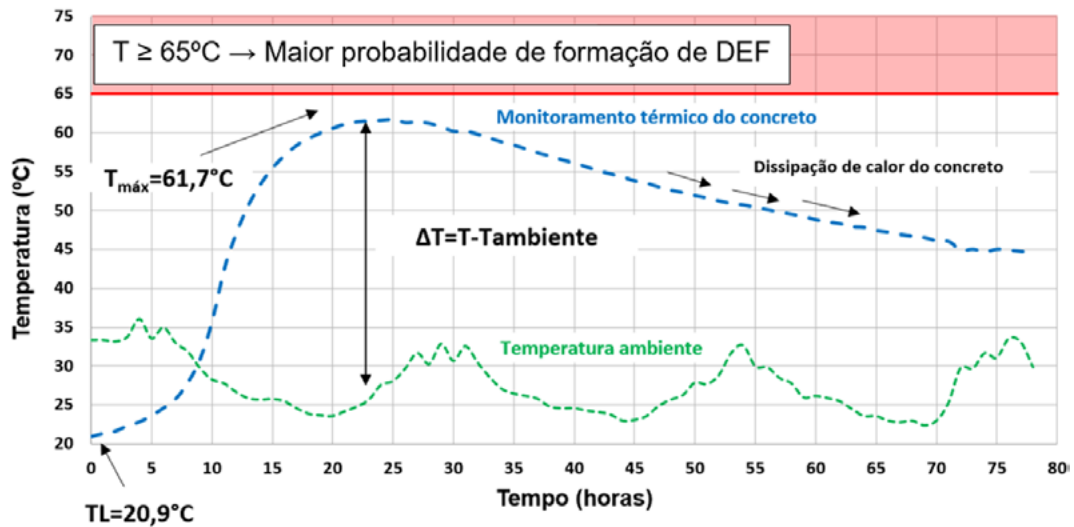


Figura 6.8 – Exemplo de monitoramento da temperatura ambiente e da elevação de temperatura de um bloco de concreto em campo. Fonte: Desek, 2021.

A seguir (Figura 6.9), é apresentado um fluxograma das principais etapas envolvidas durante a realização dos cálculos térmicos como ferramenta para minimização de eventuais fissurações de origem térmica.

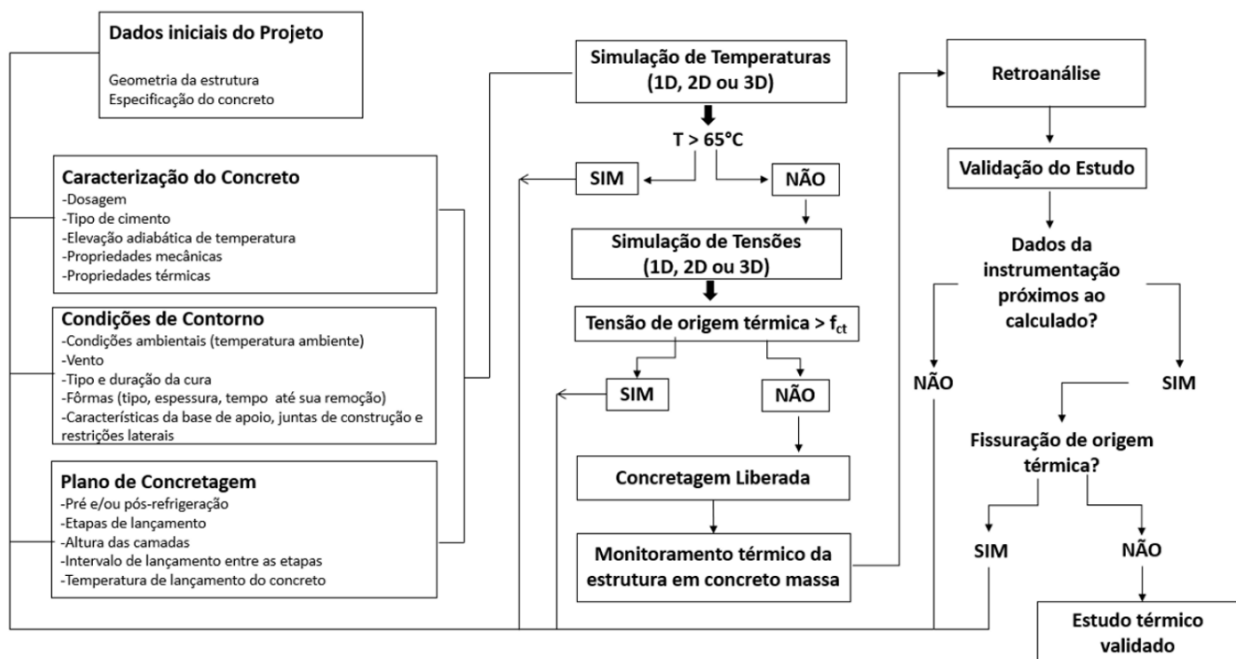


Figura 6.9 – Fluxograma de análise térmica e tensional em estruturas de concreto massa.



EXEMPLOS DE ESTUDOS TÉRMICOS

7.1. Introdução

Estruturas de concreto massa são mais suscetíveis à fissuração de origem térmica e à formação da etringita tardia (DEF), por esse motivo torna-se necessário o controle da elevação de temperatura em seu interior, através da utilização de dosagem de concreto adequada e definição do plano de concretagem, conforme condições específicas de cada obra.

A fissuração de origem térmica pode ocorrer em peças cuja menor dimensão seja inclusive de 1 m, dependendo das restrições existentes e do calor gerado (Sachs, 2012). Uma estrutura massiva de concreto gera uma grande quantidade de calor a partir das reações exotérmicas do material cimentício e, em seguida, resfria até que a temperatura atinja o equilíbrio com o meio ambiente. Esta queda de temperatura poderá originar elevadas tensões de tração que, se superarem a resistência à tração do concreto, resultarão em fissuras indesejáveis. Além disso, é importante considerar como fator limitante a temperatura máxima no interior da estrutura de 60-65 °C, para evitar a DEF no futuro.

Há algumas maneiras de resfriar o concreto para mitigar problemas relacionados às elevadas temperaturas nas estruturas de concreto. Tais formas são a pré-refrigeração, a pós-refrigeração ou a aplicação de ambas. As maneiras de realizá-las são, dentre outras:

- Adição de gelo em substituição à água do traço;
- Injeção de nitrogênio líquido no concreto fresco;
- Instalação de tubulação em forma de serpentina no interior da estrutura para passagem de água gelada;
- Refrigeração dos agregados graúdos sob diversas maneiras: com aplicação de nitrogênio líquido na esteira, insuflação de ar frio no silo, imersão em água gelada, dentre outros.

A seguir serão apresentadas algumas obras nas quais houve a necessidade da realização de estudos térmicos por meio de simulação computacional tridimensional para a definição das temperaturas de lançamento do concreto e dos planos de concretagem. São indicadas ainda as soluções adotadas para minimizar a possibilidade de fissuração de origem térmica e a formação de etringita tardia. Nestes casos, a simulação foi realizada usando o software de elementos finitos B4cast.

7.2. Base de aerogerador de torre eólica

O projeto consistiu em apresentar uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem após a concretagem de bases de aerogeradores, todas iguais, com diâmetro de 17,6 m e altura de 2,85 m, com volume teórico de 464 m³. As bases

de concreto com $f_{ck} = 30$ MPa foram concretadas em uma única etapa, sobre concreto magro ($f_{ck} = 15$ MPa) com espessura de 10 cm e uma base de concreto de $f_{ck} = 25$ MPa na parte central com 33 cm de espessura, sobre uma camada de isopor de 20 cm.

As malhas de elementos finitos utilizadas nos cálculos da estrutura são apresentadas na [Figura 7.1](#). Já a evolução das temperaturas e tensões podem ser observadas nas [Figuras 7.2 a 7.5](#). Na [Figura 7.5](#) é possível observar que se o concreto fosse lançado a 25°C haveria probabilidade de ocorrência de fissuração de origem térmica em cerca de 20 dias.

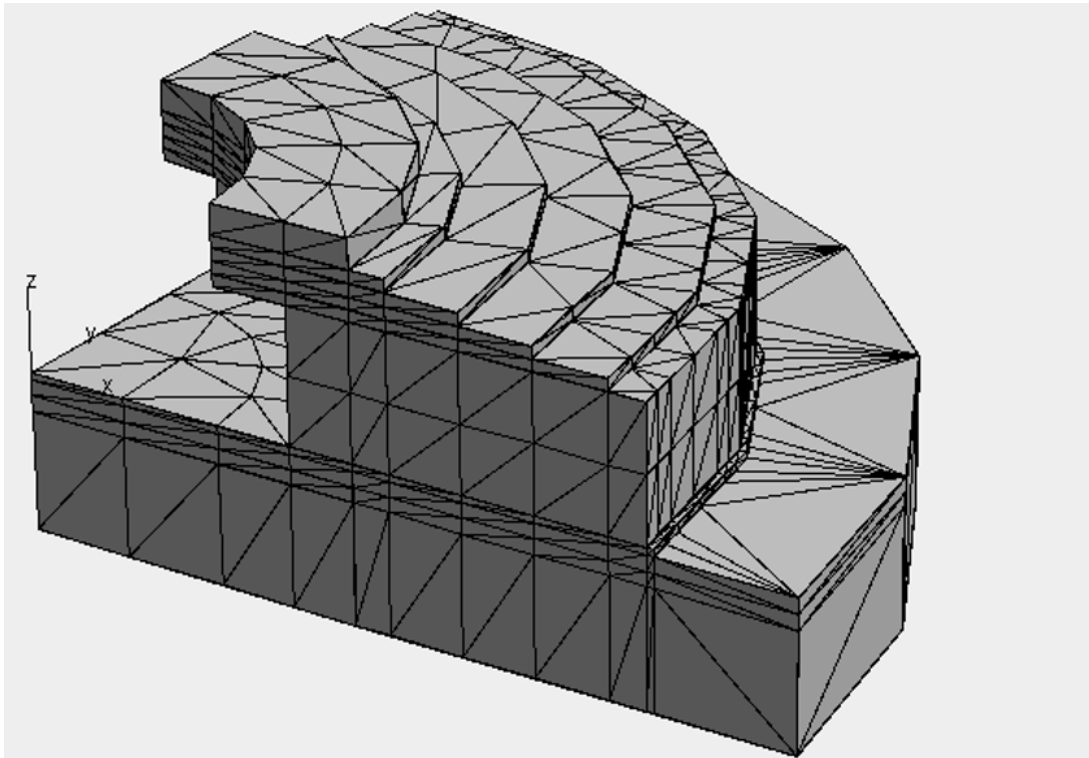


Figura 7.1 – Malha de elementos finitos para estudo térmico do concreto – Base de aerogerador.
Fonte: Desek.

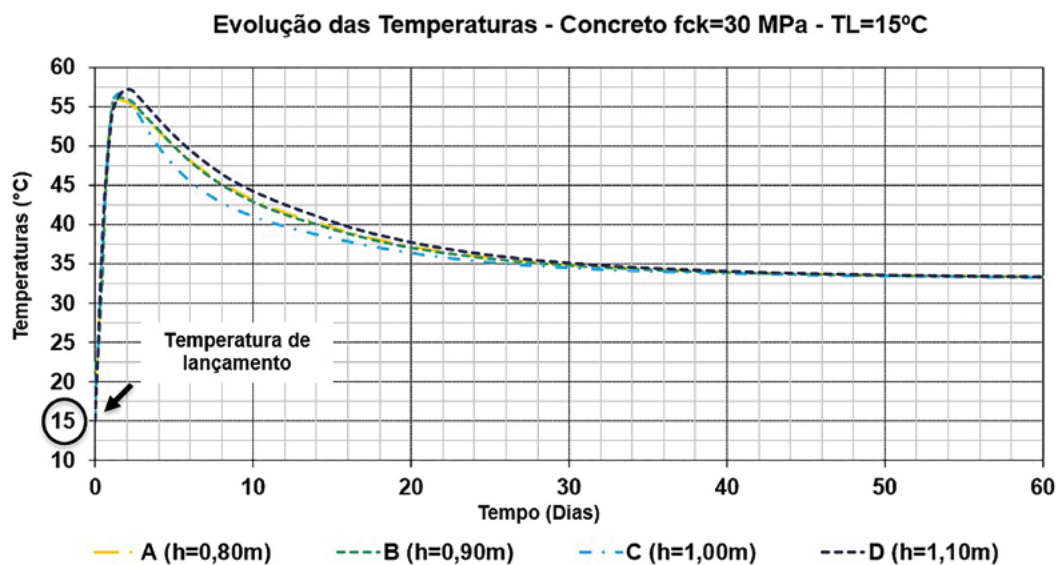


Figura 7.2 – Evolução das temperaturas no interior da base do aerogerador nos pontos de estudo – Considerando temperatura de lançamento do concreto igual a 15°C . Fonte: Desek.

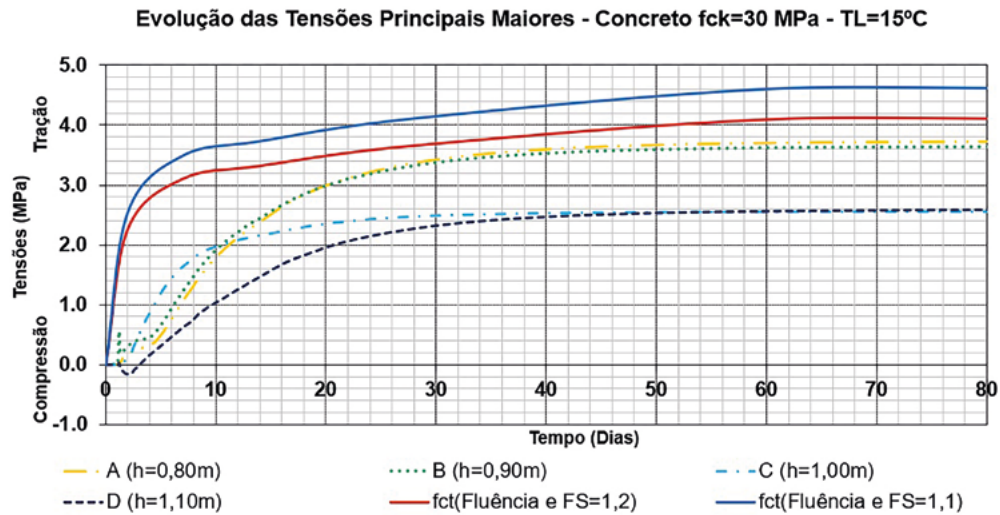


Figura 7.3 – Evolução das tensões principais maiores no interior da base do aerogerador nos pontos de estudo – Considerando temperatura de lançamento do concreto igual a 15°C . Fonte: Deseq.

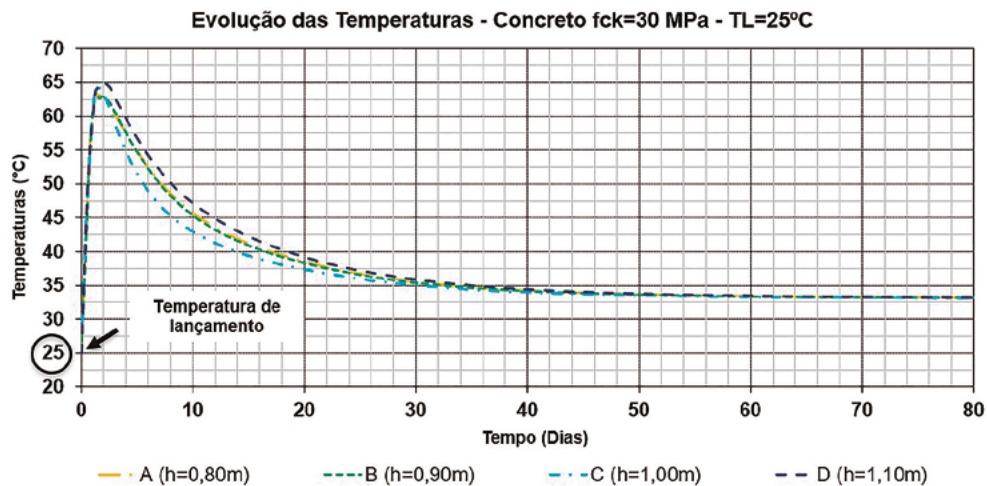


Figura 7.4 – Evolução das temperaturas no interior da base do aerogerador nos pontos de estudo – Considerando temperatura de lançamento do concreto igual a 25°C . Fonte: Deseq.

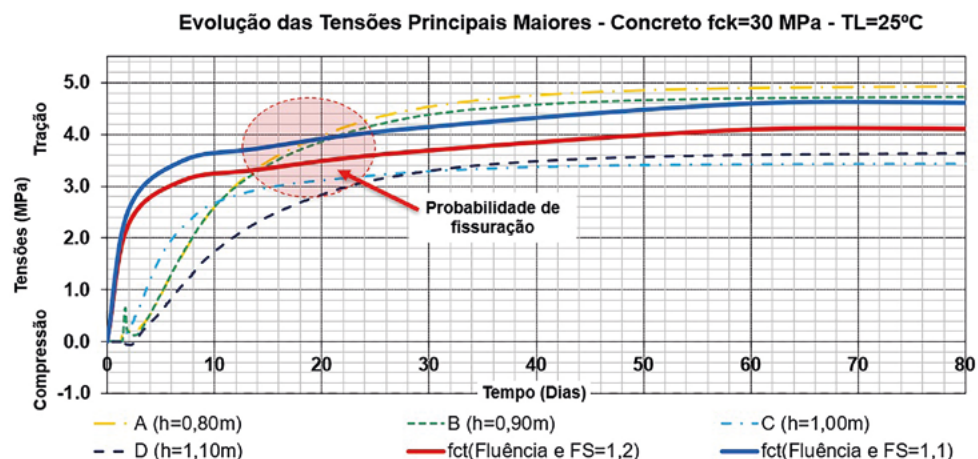


Figura 7.5 – Evolução das tensões principais maiores no interior da base do aerogerador nos pontos de estudo – Considerando temperatura de lançamento do concreto igual a 25°C . Fonte: Deseq.

A partir da análise das temperaturas e tensões no interior da base do aerogerador foram definidas as temperaturas máximas de lançamento do concreto, de modo a evitar a fissuração de origem térmica e a eventual formação de DEF.

A Figura 7.6 mostra o zoneamento de temperaturas máximas de lançamento do concreto, já nas formas, considerando uma etapa de concretagem, fluência (30%), Fator de Segurança (FS) igual a 1,1 e a limitação de temperatura de 60 °C.

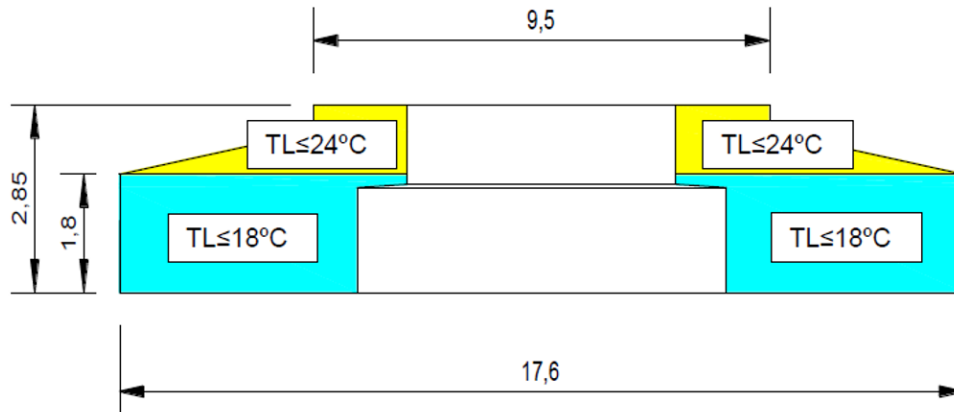


Figura 7.6 – Zoneamento de temperaturas de lançamento máximas do concreto fresco (dimensões em metros). Fonte: DeseK.

Segundo informações obtidas do fornecedor de concreto, baseado em testes práticos realizados em obra com a adição de 51 kg/m³ de gelo, a temperatura do concreto resultou em 28,2 °C. Com base nisso, foram feitos balanços térmicos para determinar a quantidade de gelo necessária para a obtenção de um concreto com temperaturas de lançamento iguais a 18 °C e 24 °C.

Na Figuras 7.7 e 7.8 são apresentadas as comparações entre as temperaturas medidas através dos termopares instalados internamente e as temperaturas calculadas pela simulação computacional.

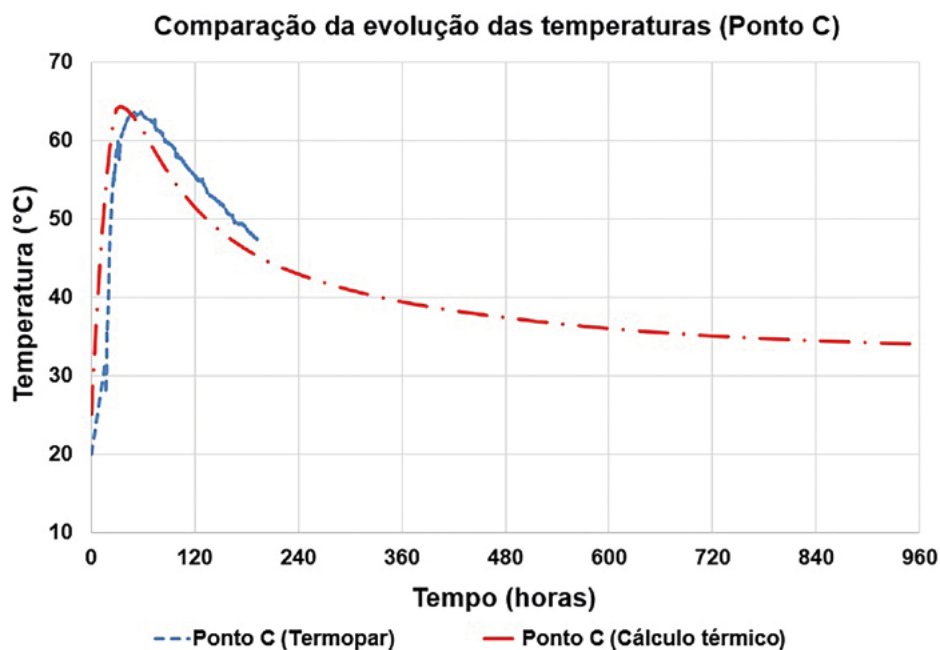


Figura 7.7 – Comparação das temperaturas do termopar C.

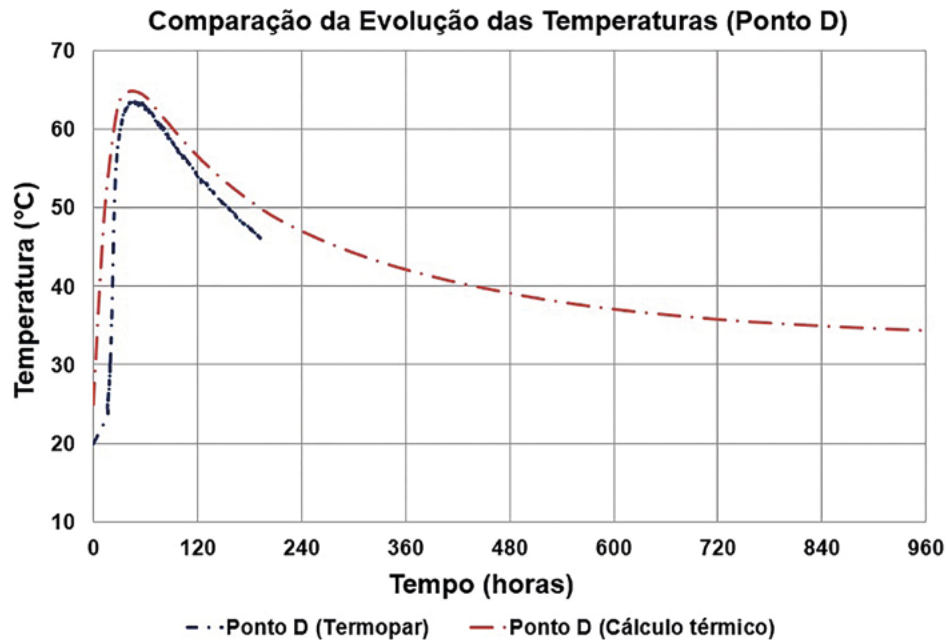


Figura 7.8 – Comparação das temperaturas do termopar *D*.

7.3. Lajes e paredes de moinhos

O projeto consistiu em apresentar uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem nas lajes e paredes de estruturas de moinhos, divididos em 5 etapas de concretagem. Foram simuladas as evoluções de temperaturas e tensões que ocorreriam num modelo tridimensional de elementos finitos, nas seções mais críticas das lajes da base dos moinhos e paredes. As malhas de elementos finitos utilizadas nos cálculos da estrutura são apresentadas nas [Figuras 7.9 e 7.10](#).

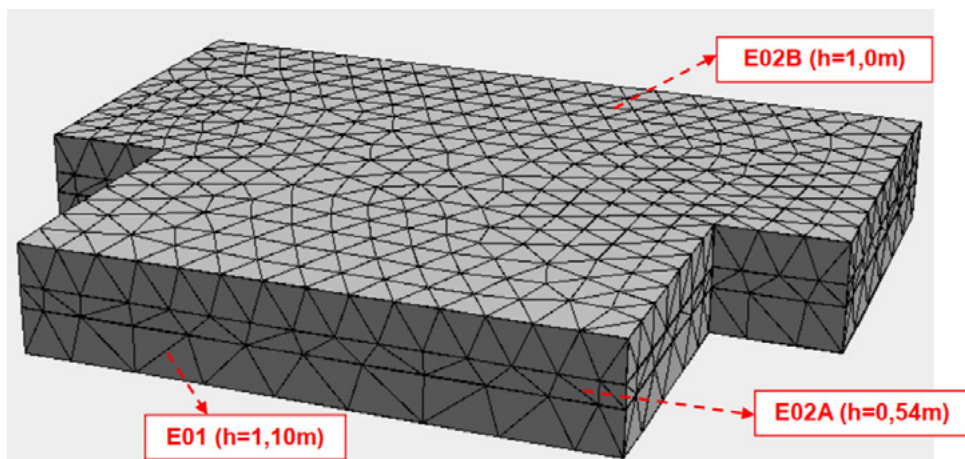


Figura 7.9 – Malha de elementos finitos para estudo térmico do concreto – Lajes de moinhos.
Fonte: Deseq.

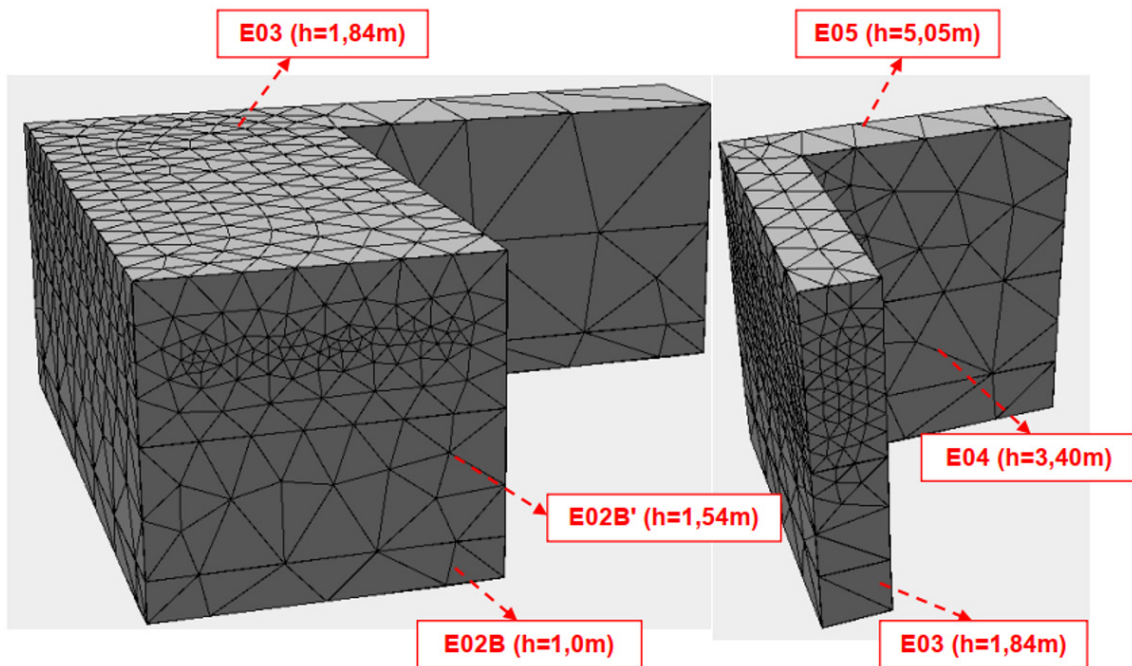


Figura 7.10 – Malha de elementos finitos para estudo térmico do concreto – Paredes de moinhos.
Fonte: Deseq.

A etapa 02B' (altura de 1,54 m) foi simulada considerando intervalo de lançamento de 7 dias após o término do lançamento da camada anterior (etapa E02B). Para este cálculo foi adotada uma dosagem com adição de macrofibras, com consumo de cimento equivalente de 354 kg/m^3 . Considerou-se a instalação de um sistema de pós-refrigeração, com tubos metálicos, em latão, espaçados 0,50 m entre si e além do sistema de pós-refrigeração, adotou-se temperatura de lançamento do concreto fresco de $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Para avaliar a influência do sistema de pós-refrigeração a ser instalado na estrutura, foram estudados diversos pontos nas regiões mais críticas da estrutura a partir das isotermas e isotensões fornecidas pelo software, conforme apresentado na Figura 7.11.

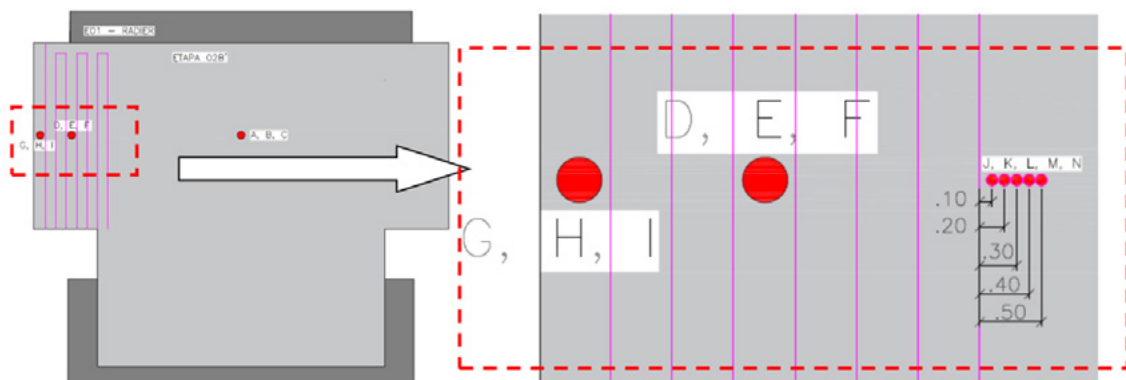


Figura 7.11 – Pontos de estudo – TL = $22 \text{ }^\circ\text{C}$ (etapa: E02-B') – Dosagem com macrofibras ($f'_{ck}=40 \text{ MPa}$ aos 28 dias) – Seção em planta. Fonte: Deseq.

A Figura 7.12 mostra o incremento de temperatura, no concreto, em função da sua distância com relação à tubulação de pós-refrigeração, e variando de 10 cm até 50 cm.

concreto, é cerca de 10 °C menor com relação aos locais onde não foi prevista a instalação da tubulação e com altura de 1,54 m. Os cálculos possibilitaram identificar o desenvolvimento das tensões de origem térmica em cada ponto analisado.

O mesmo estudo foi realizado para as 4 etapas subsequentes. O resumo de temperaturas máximas atingidas é apresentado na Figura 7.14 e o resumo das máximas tensões principais maiores é apresentado na Figura 7.15.

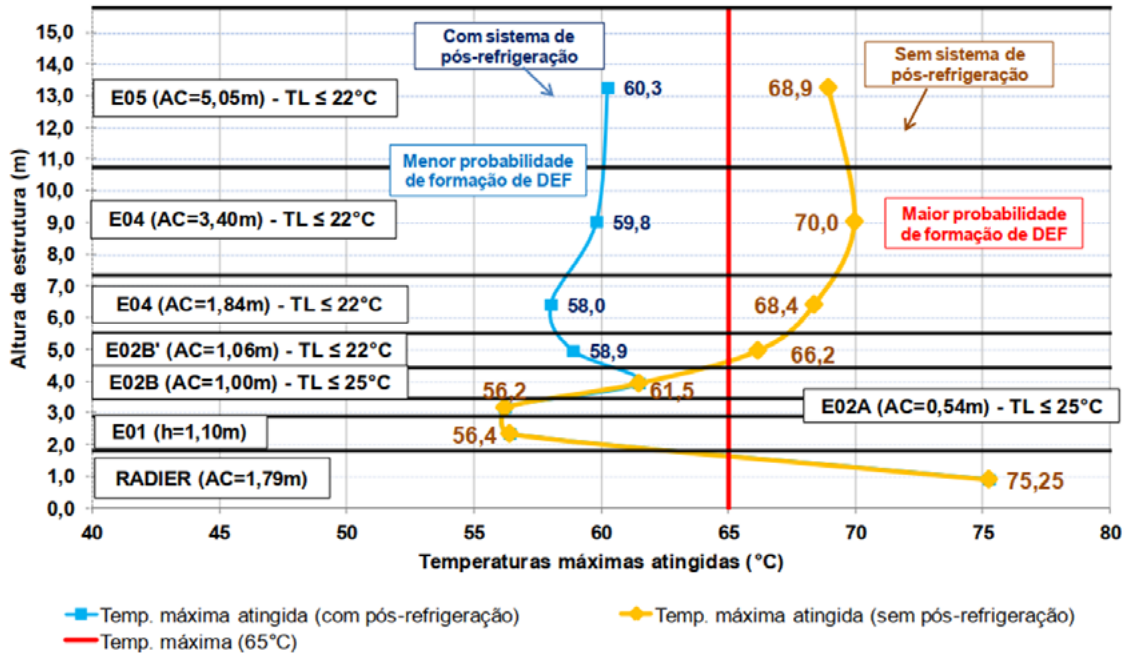


Figura 7.14 – Resumo das máximas temperaturas verificadas para a estrutura do moinho (etapas: E02A, E02B, E02B', E03, E04 e E05). Fonte: Deseq.

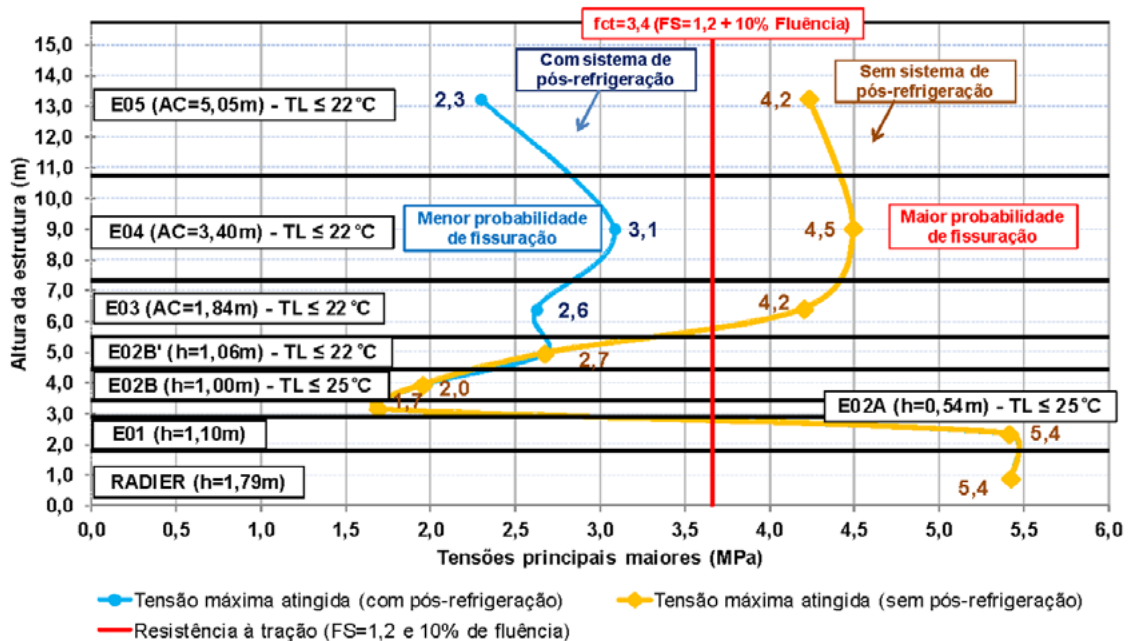


Figura 7.15 – Resumo das máximas tensões principais maiores verificadas para a estrutura do moinho (etapas: E02A, E02B, E02B', E03, E04 e E05). Fonte: Deseq.

7.4. Bloco de fundação de edifício em São Paulo

O projeto consistiu em apresentar uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem em blocos de fundação de um edifício em São Paulo. Um dos blocos possui 25,45 m de comprimento, 9,95 m de largura e altura de 4,00 m, com um volume teórico de, aproximadamente, 1.013 m³ com concreto de f_{ck} igual a 50 MPa e $E_{cs} \geq 33,65$ GPa aos 28 dias.

Inicialmente foi feito um estudo preliminar considerando o uso de concreto convencional. Porém, devido às dimensões do bloco e ao elevado f_{ck} , seria necessário dividir a concretagem em duas etapas para mitigar a possível ocorrência de manifestações patológicas causadas pelas elevadas temperaturas no interior dos blocos (podendo induzir a DEF), pois, mesmo adicionando 100% de gelo em substituição à água do traço, a temperatura no interior da estrutura seria superior a 65 °C.

Como o cronograma da obra não permitia a execução dos blocos de fundação em duas etapas, foi necessário viabilizar a concretagem em uma única etapa e, por isso, foi necessário utilizar um concreto especial com baixo consumo de cimento (310 kg/m³) do tipo CP II E 40.

A Figura 7.16 mostra o zoneamento de temperaturas máximas de lançamento do concreto, já nas fôrmas, considerando uma etapa de concretagem, sendo a primeira com duas zonas de temperaturas, Fator de Segurança (FS) igual a 1,1, fluência de 10% e a limitação de temperatura máxima no interior da estrutura de 65 °C.

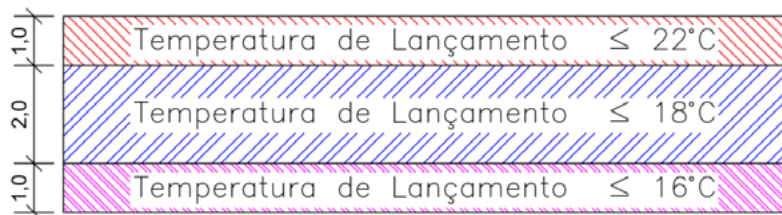


Figura 7.16 – Zoneamento de temperaturas de lançamento máximas do concreto fresco (dimensões em metros). Fonte: Desek.

Para o concreto atingir 16 °C foi necessário adicionar, no mínimo, 100 kg/m³ de gelo em substituição à água do traço. Para atingir 18 °C foi necessário adicionar, no mínimo, 90 kg/m³ de gelo em substituição à água do traço e, para atingir 22 °C foi necessário adicionar, no mínimo, 65 kg/m³ de gelo em substituição à água do traço.

A Figura 7.17 apresenta a concretagem do bloco de fundação com concreto especial em uma única etapa, com base nos protocolos definidos pela Desek.



Figura 7.17 – Concretagem do bloco de fundação (altura de 4,00 m e volume aproximado de 1.000 m³). Fonte: DESEK.

7.5. Radier de edifício em São Paulo

A concretagem da primeira etapa de um radier com, aproximadamente, 5 m de largura, 12 m de comprimento e altura de 1,8 m, e um volume teórico de, aproximadamente, 110 m³, é discutida a seguir.

A partir dos estudos térmicos realizados, verificou-se que as máximas temperaturas de lançamento do concreto fresco, nas formas, não deveriam ser superiores a 18 °C até a altura de 1,2 m e 25 °C entre 1,2 m e 1,80 m de altura, conforme mostra a Figura 7.18.

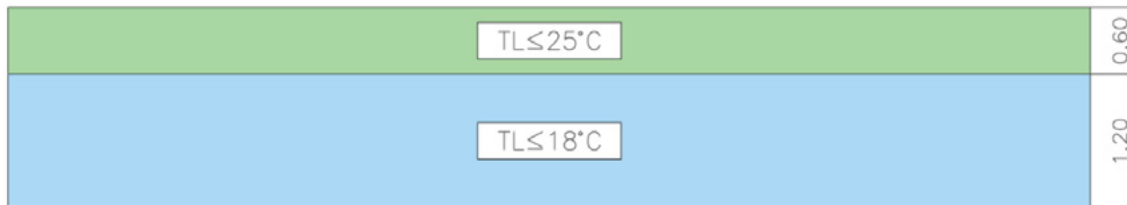


Figura 7.18 – Zoneamento de temperaturas de lançamento máximas do concreto fresco - Seção longitudinal do radier (dimensões em m) - Altura do radier de 1,80 m. Fonte: Deseq.

A partir do teste realizado em campo para o concreto refrigerado do lastro (adição de todo o gelo na central (~ 120 kg/m³) e tempo de transporte de ~ 1 h 30 min), verificou-se que devido ao tempo de transporte e temperaturas médias ambiente elevadas, mesmo com a utilização de gelo, a temperatura do concreto fresco, no lançamento, era superior a 20 °C.

Em função do cronograma da obra, restrições locais para fornecimento do concreto e logística, optou-se pela utilização de nitrogênio líquido e gelo na central de concreto para que as temperaturas de lançamento do concreto fresco fossem atingidas.

A Figura 7.19 apresenta as isotermas fornecidas pelo software a partir dos cálculos de temperaturas realizados para a primeira etapa de concretagem do radier.

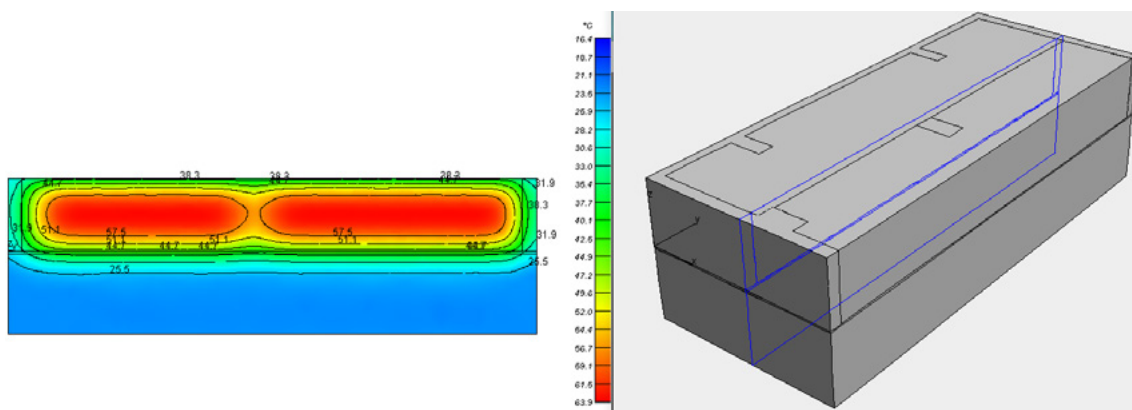


Figura 7.19 – Isotermas na seção transversal do radier a partir dos cálculos de temperaturas – 29 horas após o início do lançamento do concreto (x = 2,97 m) – TL = 18 °C.

A partir do teste realizado foi possível avaliar o desempenho do concreto refrigerado com adição de nitrogênio líquido e gelo, onde verificou-se um aumento da temperatura do concreto durante o seu transporte de 8 °C até 10 °C, aproximadamente. O tempo de injeção mínimo de nitrogênio foi de 5 min para redução de 10 °C com relação

à temperatura do concreto. O tempo de injeção do nitrogênio variou de 5 min até 8 min, dependendo da temperatura média ambiente, temperatura dos materiais e temperatura do concreto fresco.

Após a adição do gelo e medição da temperatura do concreto refrigerado, previamente à saída do caminhão betoneira da central, foi realizada a injeção de nitrogênio líquido para saída do concreto com temperatura máxima de 10 °C. O tempo de injeção do nitrogênio líquido foi definido com base na temperatura do concreto refrigerado (após a adição de gelo), na central, na temperatura ambiente quando do seu carregamento e tempo de transporte entre a central de concreto e a obra. A injeção do nitrogênio líquido durante o tempo de 5 min, resultou no consumo aproximado de nitrogênio líquido variável de 800 a 1.000 litros por caminhão betoneira de 8 m³ e 10 m³, respectivamente. Este tempo de injeção de nitrogênio foi adotado considerando a temperatura do concreto de 20 °C, após a adição do gelo. Caso a temperatura do concreto fosse superior a 20 °C, foi recomendado que o tempo de injeção do nitrogênio líquido aumentasse para 7 a 9 min.

A partir da primeira etapa de concretagem com o concreto refrigerado com a adição de 130 kg/m³ de gelo e injeção de nitrogênio líquido, verificou-se que as temperaturas de lançamento do concreto fresco atenderam a especificação de projeto. A temperatura média do concreto refrigerado apenas com gelo, na central, foi de 19,5 °C. Após a injeção de nitrogênio líquido com tempo médio de 7 minutos, a temperatura média de saída do concreto da central foi de 8,7 °C, considerando caminhão betoneira com volume de 8 m³ e temperatura média ambiente de 28 °C, aproximadamente.

As Figuras 7.20 a 7.22 apresentam uma comparação entre os termopares instalados na estrutura do radier e o modelo matemático através do software b4cast. Convém salientar que por razões de economia as leituras dos termopares foram realizadas até que a temperatura máxima fosse atingida.

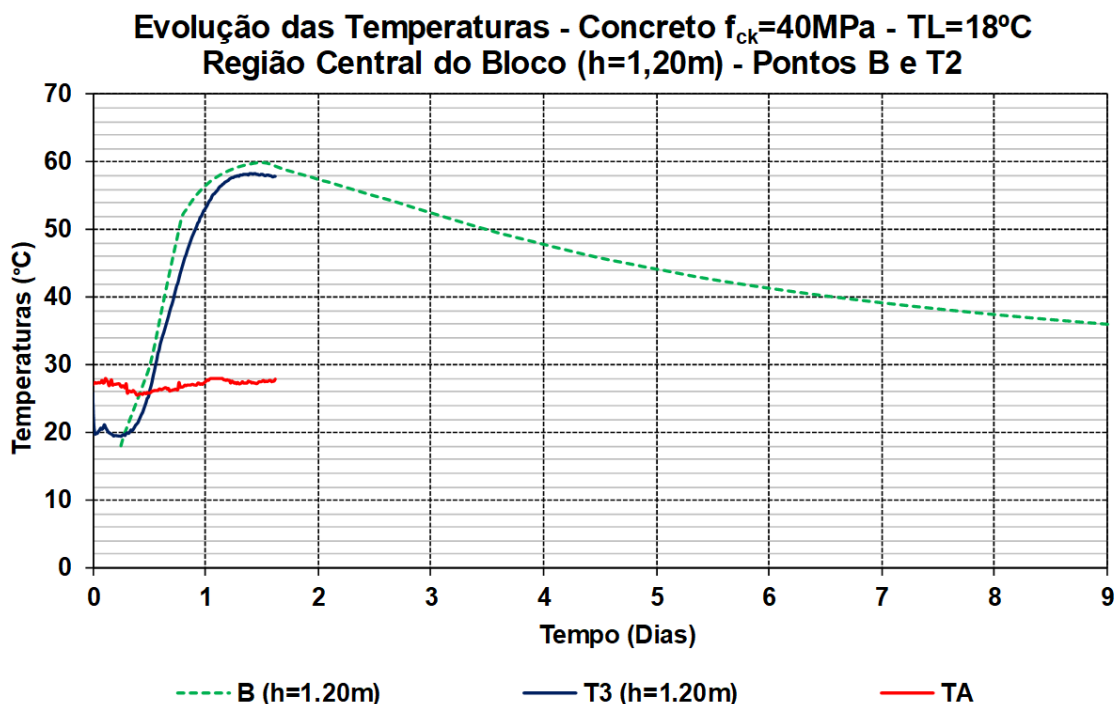


Figura 7.20 – Comparação da evolução de temperaturas entre termopar T3 e o ponto de estudo B (modelo matemático). Fonte: DeseK.

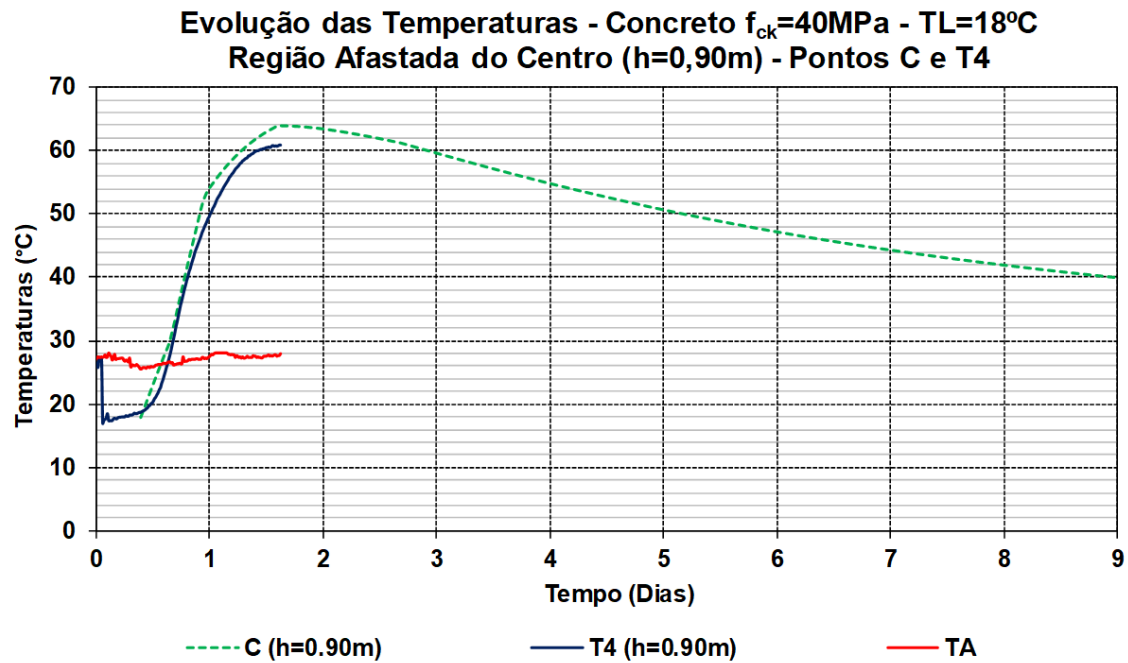


Figura 7.21 – Comparação da evolução de temperaturas entre termopar T4 e o ponto de estudo C (modelo matemático). Fonte: Deseq.

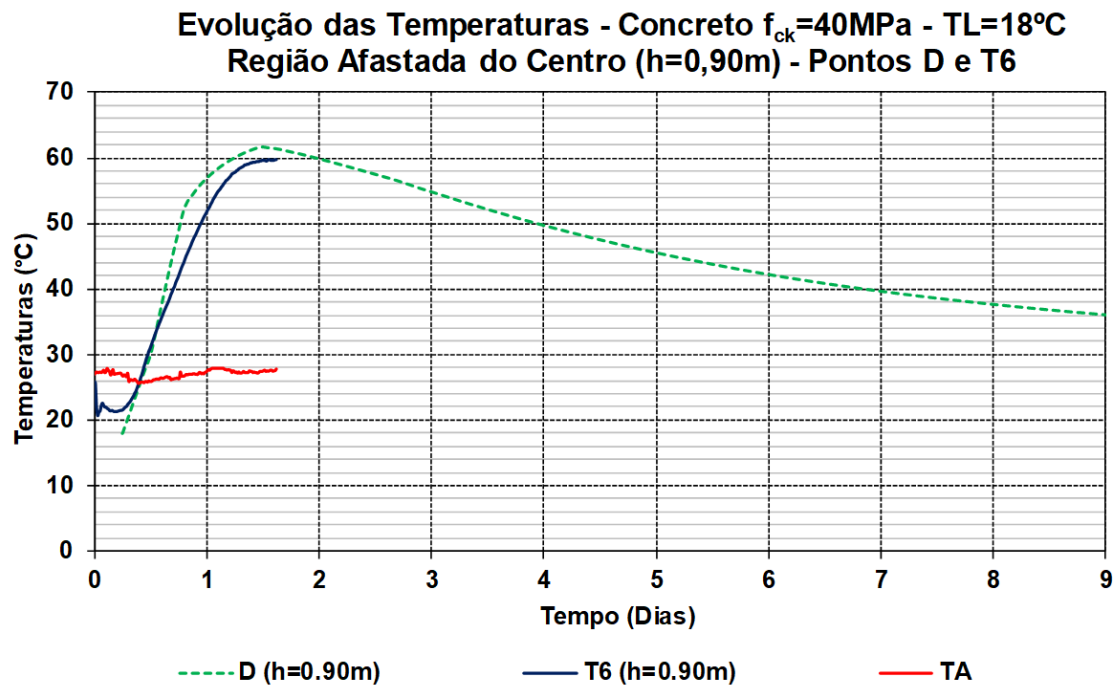


Figura 7.22 – Comparação da evolução de temperaturas entre termopar T6 e o ponto D (modelo matemático). Fonte: Deseq.

REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO

Quando se espera que altas temperaturas possam ocorrer, torna-se necessária a implementação de procedimentos de refrigeração. Nesse sentido podem ser empregadas tanto práticas de pré-refrigeração, que envolvem o resfriamento dos materiais constituintes do concreto, em geral os agregados, e o emprego de água gelada ou gelo em substituição à água de amassamento, como sistemas de pós-refrigeração, sendo nesse caso feito o uso de serpentinas instaladas internamente ao concreto, com circulação de água gelada. A pré-refrigeração também pode ser realizada mediante o emprego de nitrogênio líquido no concreto fresco. Essas práticas permitem que tensões de origem térmica e fissurações decorrentes do resfriamento do concreto, após o pico de temperatura atingido, bem como a ocorrência da DEF possam ser evitadas.

O uso de gelo é um dos recursos importantes para se pré-refrigerar e reduzir as temperaturas de produção do concreto. As obras de grande porte, como as usinas hidrelétricas, normalmente utilizam fábricas de gelo em escamas com capacidades nominais de produção, geralmente, entre 600 kg e 1.000 kg de gelo por hora. Na foto da [Figura 8.1](#) pode ser vista uma central de gelo instalada na obra.



Figura 8.1 – Exemplo de uma central de gelo. Fonte: Gambale.

Todas as máquinas de fabricação de gelo são basicamente de um mesmo tipo, onde o gelo que se forma é raspado e transformado em escamas, como mostrado na [Figura 8.2](#).



Figura 8.2 – Gelo em escamas. Fonte: Gambale.

Normalmente, em obras urbanas, utiliza-se gelo na forma de cilindros ou em cubos fornecidos em sacos, como está mostrado na [Figura 8.3](#).



Figura 8.3 – Gelo em cubos. Fonte: Gambale.

Na [Figura 8.4](#) consta um exemplo do consumo de gelo para ajustar a temperatura de partida para que o concreto apresente um risco menor de fissuras de origem térmica. Esses valores podem ter pequenas alterações para que seja possível o alcance da temperatura ideal de lançamento do concreto em campo, já que eles são dependentes de muitas variáveis existentes no processo produtivo.

Por exemplo, se o concreto for produzido e atingir temperatura em torno de 30 °C, sem nenhum recurso de resfriamento, caso tenha sido especificado que a

temperatura de lançamento deva ser de 20 °C, torna-se necessária uma redução de 10 °C. A [Figura 8.4](#) mostra que, para reduzir em 10 °C a temperatura do concreto, é necessário que seja empregado aproximadamente 40% de gelo em substituição à água de amassamento.

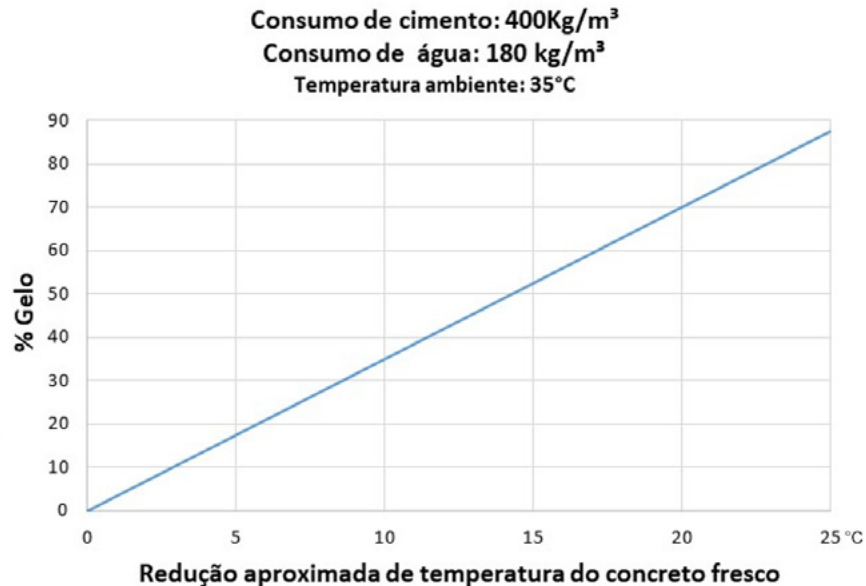


Figura 8.4 – Porcentagem de gelo definida para emprego na água de amassamento. Fonte: Gambale.

Denomina-se comumente “Balanço Térmico” o procedimento que visa determinar a redução de temperatura dos componentes do concreto para a obtenção da temperatura desejada de lançamento do concreto. Deve-se então determinar a contribuição de temperatura individual de cada um dos materiais constituintes do concreto, para redução da temperatura do concreto fresco em 1 °C.

A quantidade de calor perdida pelo concreto, para que se verifique a redução de sua temperatura em 1 °C, é dada pela expressão:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad \text{Equação 8.1}$$

onde:

Q = quantidade de calor;

c = calor específico do concreto;

m = massa do concreto;

$\Delta t = 1 \text{ °C}$.

O calor específico é dado pela expressão:

$c = (\sum m_i \cdot c_i) / (\sum m_i)$;

m_i = massa do constituinte;

c_i = calor específico do constituinte.

Desse modo, a expressão (8.1) será:

$$Q = \sum m_i \cdot c_i \quad \text{Equação 8.2}$$

Essa quantidade de calor determinada será a quantidade total de calor que terá que ser confrontada com a perda de calor de cada um dos componentes para que se obtenha a mesma queda de temperatura de 1 °C do concreto.

A quantidade de calor de cada constituinte do concreto é dada por:

$$Q = m_i \cdot c_i \cdot \Delta t_c \quad \text{Equação 8.3}$$

Onde:

Δt_c = abaixamento da temperatura do constituinte.

Igualando-se (Equação 8.2) e (Equação 8.3):

$\Sigma m_i \cdot c_i = m_i \cdot c_i \cdot \Delta t_c$, se tem $\Delta t_c = (\Sigma m_i \cdot c_i) / (m_i \cdot c_i)$.

A quantidade de calor a ser retirada do concreto para baixar a sua temperatura a partir da temperatura inicial de cada constituinte (t_i) para a temperatura final de lançamento (t_p) é dada por:

$$Q = \Sigma m_i \cdot c_i \cdot (t_i - t_p) \quad \text{Equação 8.4}$$

Esta quantidade de calor será consumida e levará o gelo a se fundir e atingir a temperatura de lançamento do concreto (t_p).

A quantidade de calor necessária para fundir o gelo e levá-lo à temperatura (t_p) é dada por:

$$Q = m_g (80 + t_p) \quad \text{Equação 8.5}$$

onde:

m_g = massa de gelo;

calor latente de fusão do gelo = 80 kcal/kg.

Igualando-se (Equação 8.4) com (Equação 8.5) ter-se-á:

$$m_g = ((\Sigma m_i \cdot c_i) \cdot (t_i - t_p)) / (80 + t_p)$$

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

Onde:

Q_1 = quantidade de calor cedida pelo concreto;

Q_2 = quantidade de calor retirada do concreto.

Dependendo da temperatura de lançamento especificada para o concreto, em alguns casos pode ser utilizada água de amassamento gelada e os agregados serem refrigerados nos silos através da aspersão de água gelada. A adição de água gelada como água de amassamento tem um efeito muito pequeno na redução da temperatura máxima atingida pelo concreto se comparada com a substituição da água por gelo.

A pós-refrigeração por meio da circulação de água gelada através de serpentinas (Figura 8.5) pode ser uma alternativa para a redução das temperaturas a serem atingidas pelo concreto. No entanto, para seu emprego é importante que simulações computacionais sejam feitas com o objetivo de dimensionar a distância entre os tubos, uma vez que já se tem

conhecimento com experiências de campo da pouca eficiência quando distâncias maiores do que 50 cm entre tubos são empregadas, com eventual incidência de fissuração preocupante.

O nitrogênio líquido é outra opção para a refrigeração de concretos. O produto é obtido diretamente do ar, podendo ser mantido a temperaturas muito baixas em tanques isolados, praticamente sem perdas. Ao entrar em contato com o concreto, o nitrogênio líquido absorve energia em geral a uma taxa de aproximadamente 200 kJ/kg e evapora no processo. O nitrogênio é um gás inerte que não reage quimicamente quando esfria e pode ser liberado diretamente na atmosfera como constituinte do ar.

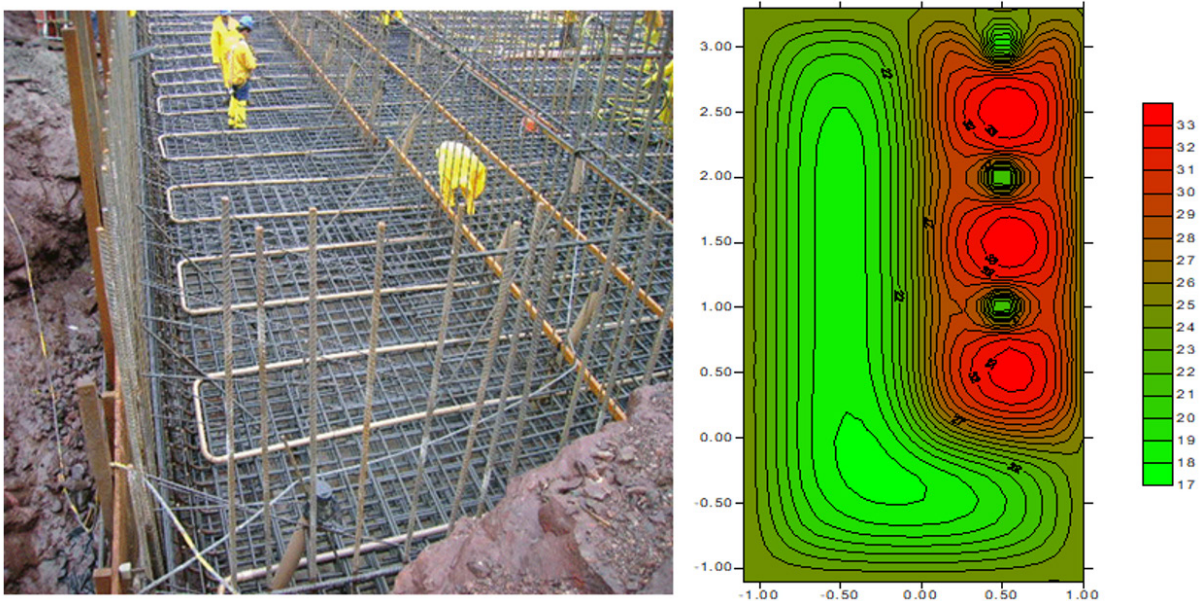


Figura 8.5 – Sistema de pós-refrigeração. Fonte: Gambale.

Seu emprego mais comum é através do emprego de lança que injeta o gás diretamente no caminhão-betoneira (**Figura 8.6**). Alternativamente, pode ser lançado na esteira de transporte dos agregados graúdos para a betoneira da central de concreto, promovendo a refrigeração deles. Outra metodologia de aplicação é promover a injeção de nitrogênio líquido diretamente no misturador da central de concreto.

A **Figura 8.7** mostra uma operação de refrigeração em andamento, no Brasil. Notar o vapor de N_2 .



Figura 8.6 – Início de operação. Notar lança para inserção do N_2 no caminhão-betoneira. Fonte: Desek.



Figura 8.7 – Operação de refrigeração em andamento. Notar vapor de N_2 . Fonte: Deseq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 207.1R-05: Guide to mass concrete**. Reported by ACI Committee 207, Detroit, Michigan, U.S.A, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1702: Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementitious materials using isothermal conduction calorimetry**. West Conshohocken, 2017.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Diretrizes para elaboração de projetos de barragens**. Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, v.5, Brasília, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12819: Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BAUER, S.; CORNELL, B.; FIGURSKI, D.; LEY, T.; MIRALLES, J.; FOLLIARD, F. 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, 2006.
- BLANCO, A.; PARDO-BOSCH, F.; CAVALARO, S.; AGUADO, A. 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, 2019.
- BRAGANÇA, M.O.G.P.; HASPARYK, N.P.; PORTELLA, K.F. et al. Def-related expansion in concrete samples and blocks with nano-sio2. **Construction and Building Materials**, v. 384, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131009.
- 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 de Mestrado** - Instituto de Engenharia do Paraná. Curitiba, 2020.
- BROWN, P.W.; BOTHE, J.V. The stability of ettringite, **Advances in Cement Research**, v. 5, n. 18, p.47- 63, 1993.

- CARVALHO, J.R.; ANDRADE, T.W.C.O. Cuidados na execução de fundações em concreto-massa. **Edificações verticais**. 55p. Tecomat Engenharia, Recife/PE, 2020.
- FAMY, C. **Expansion of heat-cured mortars**. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 1999.
- FARIA, É. F. Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados. **Dissertação de Mestrado**, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- FU, Y.; DING, J.; BEAUDOIN, J. J. Expansion of portland cement mortar due to internal sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 9, p. 1299–1306, 1997.
- 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 de Mestrado** - Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo, 2018.
- FUNAHASHI JR, E. I.; GAMBALE, P.; OLIVEIRA, S.; HASPARYK, N.P. Influence of metakaolin on temperature rise and delay ettringite formation in cement composites. **Revista Matéria**, v.27, n.2, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2021-47252.
- FUNAHASHI JR., E. I.; GRAÇA, N. G.; KUPERMAN, S.C.; OLIVEIRA, A.S.; BANDEIRA, O.M. Belo Monte Hydropower Plant - Temperatures and thermal stresses analysis of the intake. In: **Third International Dam World** , DW2018, Foz do Iguaçu, Brazil, 2018.
- FUNAHASHI JR., E. I.; KUNINARI, T.H.; KUPERMAN, S.C. et al. Alternativas executivas para controle da elevação da temperatura do concreto massa de edificações. **Concreto & Construções**, ed. 109. DOI: 10.4322/1809-7197.2023.109.0003
- FURNAS, Equipe de. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaio e propriedades**. In: Walton Pacelli de Andrade (editor), PINI, São Paulo, 1997.
- GAMBALE, P. G. Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Goiás - UFG, Goiânia, GO, Brasil, 2017.
- GAMBALE, E. A.; CASTRO, A.; ANDRADE, M.A.S. et al. Análise estatística dos parâmetros que intervêm no fenômeno térmico do concreto massa. In: **52º Congresso Brasileiro do Concreto**, CBC 2010, Fortaleza, 2010.
- GAMBALE, E.A.; CASTRO, A.; TRABOULSI, M.A. Behavior and thermal performance of the concrete mass: experience of Eletrobras Furnas. In: **Third International Dam World**, DW2018, Foz do Iguaçu, Brazil, 2018.
- GAMBALE, E.A.; TRABOULSI, M.A.; ANDRADE, M.A.S. Análise paramétrica do fenômeno térmico do concreto massa. In: **50º Congresso Brasileiro do Concreto**, CBC 2008, Salvador, 2008.
- GRABOWSKI, E.; CZARNECKI, B.; GILLOTT, J.E.; DUGGAN, C.R.; SCOTT, J. F. Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack, **ACI Materials Journal**, v. 89, n.5, p. 469–480, 1992.

- HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C.; BRONHOLO, J.L. et al. Concrete block sites in Brazil for assessing ASR, ISA and coupled attack over time. In: A.L. Batista, A.S. Silva, I. Fernandes, L.O. Santos, J. Custódio and C. Serra (editors): **Proceedings of 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete (16th ICAAR)**, Lisboa, Portugal, 2021.
- HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C.; TORRES, J.R. Combined attack from AAR and DEF in the foundation blocks of a building. In: H. Bernardes and N. P. Hasparyk (editors): **Proceedings of 15th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete (15th ICAAR)**, São Paulo, 2016.
- HASPARYK, N. P., SCHOVANZ, D., KUPERMAN, S. **Método de Ensaio para a Avaliação do Potencial de Ocorrência da Etringita Tardia (DEF) em Concreto** - Instrução Técnica ITGSTE004. Goiânia: Ed. Furnas, 2020.
- HASPARYK, N.P.; SCHOVANZ, D.; TIECHER, F.; KUPERMAN, S.C. Global analysis of DEF damage to concretes with and without fly-ash. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v.15, n.3, e15305, 2022.
- HASPARYK N.P.; TORRES S.M.; TIECHER F. et al. AFt/AFm distribution and microstructural properties of thermally cured concretes containing rice husk ash, **Advances in Cement Research**, 2023. DOI: 10.1680/jadcr.22.00116.
- HEINZ, D.; KALDE, M.; LUDWIG, U.; RUEDIGER, I. Present state of investigation on damaging late ettringite formation (DEF) in mortars and concretes. In: Erlin, B. (editor). **Ettringite: the sometimes host of destruction**. Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 1-13, 1999.
- HEINZ, D.; LUDWIG, U. Mechanisms of secondary ettringite formation in mortars and concretes subject to heat treatment, in: J.M. Scanlon (Ed.), **Concrete Durability: Proc. Katharine and Bryant Mather Intern. Conf., ACI SP-100**, American Concrete Inst., Detroit, pp. 2059– 2071, 1987.
- HOBBS, D.W. Expansion and cracking in concrete associated with delayed Ettringite formation. In: Erlin, B. (editor). **Ettringite: the sometimes host of destruction**. Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 159-182, 1999.
- KUPERMAN, S. C. **Concreto massa, convencional e compactado com rolo para barragens**. In: **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. Ed. G. I. Cechella, IBRACON. São Paulo, cap.41, p. 1259-1295, 2005.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (LCPC). “Réactivité d’un béton vis-à-vis d’une réaction sulfatique interne”, **Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, Méthode d’essai des LCPC n° 66**, Paris, 2007.
- LANGOSKI, M. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em argamassas preparadas com diferentes tipos de cimento Portland. **Dissertação de Mestrado** - Faculdade Meridional – IMED. Passo Fundo, 2021.
- 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**, p. 1-8, 2016. DOI:10.1007/s12205-016-0778-9.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**, Ed. N. P. Hasparyk, IBRACON. São Paulo, 2014.

- MELO, R.H.R.Q. Avaliação da formação da etringita tardia (DEF) em laboratório e monitoramento de concretos no tempo. **Dissertação de Mestrado** - Faculdade Meridional – IMED. Passo Fundo, 2021.
- MELO, R.H.R.Q., HASPARYK, N.P.; TIECHER, F. Assessment of concrete impairments over time triggered by DEF. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n.8, 2023. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15041.
- NGUYEN, V.; LEKLOU, N.; AUBERT, J.E.; MOUNANGA, P. The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 479-484, 2013.
- OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA, A.M.; HASPARYK, N.P. DEF Induction in the Laboratory and Effect of Silica Fume on the Expansions of Mortars. In: **Anais do XVI Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción**, CONPAT 2021, Brasil, 2021.
- PERONDI, L. Z. Estudo do ataque por sulfatos em matrizes cimentícias com diferentes cimentos pozolânicos, **Dissertação de Mestrado** - Faculdade Meridional – IMED. Passo Fundo, 2022.
- PORTELLA, K.F.; HASPARYK, N.P.; BRAGANÇA, M.D.O.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. 311, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125341.
- RAMLOCHAN, T.; ZACARIAS, P.; THOMAS, M.D.A.; HOOTON, R.D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: Part I: Expansive behaviour. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 6, p. 807-814, 2003.
- RASTRUP, E. Heat of hydration in concrete. **Magazine of Concrete Research**, ed. 17, v. 6, p. 79-92, 1954.
- RILEM. **Thermal cracking of massive concrete structures: State of the art report of the Rilem Technical Committee 254-CMS**, Ed. FAIRBAIRN, E. M. R.; AZENHA, M., v.27, Switzerland, 2019.
- SACHS, A. Calor sob controle: Concretagem de peças estruturais de grande volume exige controle tecnológico rigoroso para evitar fissuras e patologias que afetem sua durabilidade. **Téchne**, ed. 190, 2012.
- SCHOVANZ, D. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento portland pozolânico e de alta resistência. **Dissertação de Mestrado** - Faculdade Meridional – IMED. Passo Fundo, 2019.
- SILVA, A.S.; RIBEIRO, A.B.; DIVET, L. Prevention of internal sulphate reaction in concrete. Long-term results of the effect of mineral additions. In: A.L. Batista, A.S. Silva, I. Fernandes, L.O. Santos, J. Custódio and C. Serra (editors): **Proceedings of 16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete (16th ICAAR)**, Lisboa, Portugal, 2021.
- TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 683-693, 2001.

- THAULOW, N.; JAKOBSEN, U.H.; JOHANSEN V. What causes delayed ettringite formation? In: Scrivener, K. L.; Young, J.F (editors). Proceedings of the Materials Research Society's. **Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems**. E&FN SPON, London: 219– 226, 1997.
- TIECHER, F.; LANGOSKY, M.; HASPARYK, N. Behavior of mortars with different types of cement when induced to Delayed Ettringite Formation (DEF). **Revista Alconpat**, v. 11, n. 3, p.1–16, 2021. DOI: 0.21041/ra.v11i3.537.
- ULM, F.-J.; COUSSY, O. Modeling of thermochemomechanical couplings of concrete at early ages. **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, v. 121, p. 785-794, 1995.
- ZHANG, Z.; OLEK, J.; DIAMOND, S. Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat cured mortars: Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity, and weight gains. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1729-1736, 2002.

