



Influência do calor de hidratação de cimentos com escória de alto forno no risco de formação da ettringita tardia (DEF)

Influence of hydraton heat of cements with blast-furnace slag on the risk of Delayed Ettringite Formation (DEF)

E. I. Funahashi Jr. (1); E. Possan (2); N. P. Hasparyk (3)

(1) *Doutorando em Engenharia Civil, UNILA/DESEK*

(2) *Doutora em Engenharia Civil, Professora, UNILA*

(3) *Doutora em Engenharia Civil, Professora, ELETROBRAS*

eduardo.funahashi@desek.com.br (1); edna.possan@ unila.edu.br (2); nicole@eletrobras.com (3)

Resumo

A ettringita tardia (ou *Delayed Ettringite Formation-DEF*), é um tipo de ataque interno por sulfatos (ISA) provenientes do cimento empregado em estruturas de concreto que vivenciaram temperaturas de cura superiores a 60-65°C. Temperaturas elevadas podem causar instabilidade na formação da ettringita primária, durante a hidratação do cimento, disponibilizando íons sulfatos na solução dos poros do concreto ao longo do tempo para reagirem e produzirem a ettringita secundária, que é expansiva e deletéria ao material no estado endurecido. Estruturas de concreto acometidas por este fenômeno apresentam quadro fissuratório intenso, com redução das suas propriedades mecânicas, durabilidade e vida útil. Alguns tipos de cimento têm apresentado calor de hidratação elevado, o que pode resultar na geração de temperaturas elevadas no interior do concreto, e aumentar o risco da DEF. Cimentos produzidos com escória de alto forno moída em diferentes teores podem provocar comportamentos distintos no que tange à DEF, principalmente quando são empregados no concreto aqueles com maior calor de hidratação. Este trabalho tem como objetivo apresentar a influência do calor de hidratação de cimentos contendo escória, e do tipo CP II-E e CP III, no risco da ocorrência da DEF. Para isso, foi analisado o histórico de ensaios de calor de hidratação e análise físico-química de cimentos brasileiros nas últimas duas décadas, compondo um banco de dados com aproximadamente 1700 resultados. Os resultados dos ensaios levantados permitiram constatar a forma com que estes cimentos têm variado ao longo dos últimos anos. Apesar de ser possível empregar estes dois tipos de cimento em estruturas massivas, o emprego de cimentos com menor teor de escória e maior calor de hidratação pode trazer sérios riscos de danos às estruturas devido a DEF, caso não seja feito um controle adequado da execução e lançamento do concreto.

Palavra-Chave: Formação de ettringita tardia (DEF), calor de hidratação, cimento, escória de alto forno, concreto.

Abstract

The delayed ettringite formation (or DEF) is a form of internal sulfate attack (ISA) that occurs in concrete structures cured at a high level of temperature (beyond 60-65°C. Significantly high temperatures can cause instability in the formation of primary ettringite during cement hydration, providing further sulfates in the pore solution to react over time and produce secondary ettringite, which is expansive and harmful to the material in the hardened state. Concrete structures affected by this phenomenon present expressive cracking with reduction of mechanical properties, durability and service life. Some types of cement produce a high heat of hydration, which can result in the generation of higher temperatures in concrete, increasing the risk of DEF. Cements produced with blast-furnace slag in different contents can cause distinct behaviors in terms of DEF, especially when binders containing high hydration heat are used in concrete. This paper aims to present the influence of the heat of hydration of two cements with blast-furnace slag (CP II-E and CP III) on the risk of DEF occurrence. For that, the history of heat of hydration tests and physical-chemical analyses of Brazilian cements over the last two decades was analyzed, composing an expressive database with approximately 1700 results. The results of the tests collected made it possible to evaluate how these cements have varied over recent years. Although it is possible to use these two types of cement in massive structures, the use of cements with lower blast-furnace slag content and higher hydration heat can result in serious risks of damage to structures by DEF when an adequate technological control over the execution of concrete structures is not applied.

Keywords: DEF-Delayed ettringite formation, heat of hydration, cement, blast-furnace slag, concrete.



1 Introdução

O avanço tecnológico constante e a busca por maior agilidade nos processos executivos relacionados às estruturas de concreto têm trazido modificações no processo de produção dos cimentos nacionais, o que merecem o devido cuidado e atenção do ponto de vista da durabilidade. Diante do desafio de buscar além de estruturas mais duráveis, com ganho de vida útil, e procurar meios para reduzir as emissões de CO₂, várias ações em sido implantadas. No âmbito da durabilidade tem-se o crescente número de normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e práticas recomendadas, visando a busca do melhor desempenho das estruturas no que tange reações expansivas especialmente devido à reação álcali-agregado e a formação da etringita tardia (ABNT NBR 15577, 2018; SBRIGHI et al., 2018; SBRIGHI et al., 2023; HASPARYK et al., 2020; 2023). Destaca-se que ainda não há uma norma específica para a prevenção da formação da etringita tardia (DEF) no Brasil e mundo. A DEF é um processo químico complexo, e que pode ocorrer em estruturas de concreto em decorrência do calor de hidratação dos cimentos ou de fonte de calor externa (cura térmica). Sua ocorrência se dá pela elevação da temperatura do concreto a patamares superiores a 60-65°C durante o período de cura inicial, nas primeiras horas de hidratação do cimento Portland. Com isso, a hidratação do cimento é modificada e um dos compostos formado normalmente, a etringita primária, fica instável, e provoca uma concentração de íons sulfatos tanto na solução dos poros do concreto quanto adsorvidos nos demais hidratos. Com a umidade presente, e ao longo do tempo, outra etringita denominada tardia é precipitada e capaz de provocar expansões e fissurações no concreto já endurecido e graves danos estruturais. Pesquisadores (MELO, 2010; SCHOVANZ, 2019; BRONHOLO, 2020; MIRANDA, 2020; LANGOSKI, 2021; QUEVEDO, 2021; OLIVEIRA, 2022 e PERONDI, 2022) tem avaliado o emprego de adições minerais na tentativa de redução do calor de hidratação, especialmente sílica ativa (OLIVEIRA, 2022), metacaulim (FUNAHASHI et al., 2021), cimentos pozolânicos (BRONHOLO, 2020) e escória de alto forno (BAUER et al., 2006; SILVA et al., 2010; RAMLOCHAN et al., 2003). SILVA et al. (2010) estudaram concretos produzidos com cimentos variando o teor de escória de alto forno de 10% até 40% por cerca de 2 anos e verificou maiores expansões com 10% de escória em relação à referência, sem escória. Já o concreto com 40% de escória reduziu as expansões da DEF, o que pode estar relacionado com o consumo de portlandita. RAMLOCHAN et al. (2003) estudaram o comportamento de argamassas produzidas com cimento com substituição parcial da escória em 25 % e 35 % e à temperatura de 95 °C por aproximadamente 1500 dias. Com 35 % de escória a expansão foi reduzida a longo prazo. Os mesmos benefícios foram verificados por KHELAN (1999) apud MELO (2010) com teor de escória entre 30% e 50%, por HOBBS (2001) apud MELO (2010), com 35 % e por MILLER&CONWAY (2003) com teor igual a 30%. Segundo registros dos estudos realizados pelo Laboratório de Engenharia Civil de Portugal (LNEC), conforme GODART & DIVET (2020), as adições minerais têm potencial para inibir a expansão por DEF em teores superiores a 40%. ZHUANG et al. (2020) monitoraram por 4 anos amostras de concretos com cimentos contendo escória (entre 30% e 60%) em condição de cura a vapor de 80°C e por meio de análises por difração de raios-X onde a etringita não foi observada nas amostras analisadas. O emprego maior teor de escória na fabricação dos cimentos CP II-E e CP III resultam na diminuição da área específica e do fator clínquer/cimento, o que representa redução no seu calor de hidratação e teor de álcalis no concreto. Além dos benefícios de durabilidade proporcionado por estes tipos de cimento frente aos agentes agressivos, esta adição é capaz de reduzir a temperatura máxima no interior do concreto massa e, por conseguinte, reduzir o risco da DEF. Apesar dos estudos citados mostrarem o benefício



do uso da escória de alto forno em maiores teores para a prevenção da DEF, estudos de longa duração em protótipos expostos ao ambiente se fazem necessários para avaliar o desempenho de concretos com os materiais locais. Além do exposto, atualmente têm sido observadas alterações na fabricação dos cimentos brasileiros, o que tem gerado mudanças nas suas características físico-químicas, a exemplo, finura, teor de SO_3 , entre outros, que aumentam a geração de calor durante as reações exotérmicas de hidratação. Paralelamente, há uma tendência dos projetos de edificações com estruturas em concreto massa possuírem maiores resistências, e de até 80 MPa, o que pode aumentar o risco da DEF caso não seja adotado plano executivo adequado para redução das máximas temperaturas em seu interior.

Nesse sentido, esse trabalho tem por objetivo avaliar a influência do calor de hidratação de cimentos compostos (tipo CP II-E) e de alto forno (tipo CP III) contendo escória, no risco de formação da etringita tardia (DEF) com base nos ensaios disponíveis em banco de dados restrito da empresa DESEK.

2 Calor de hidratação e riscos associados à DEF

Durante o início de pega e endurecimento do concreto há acúmulo de calor devido às reações exotérmicas de hidratação do cimento. Dependendo do tipo, composição química e consumo de cimento no traço, a liberação do calor pode variar. A taxa de liberação de calor varia em função da temperatura em que estas reações se desenvolvem, sendo aceleradas em função da maior temperatura ambiente, temperatura de lançamento ou temperatura de cura térmica (elementos pré-fabricados). A produção de cimentos mais finos é uma tendência nacional e proporciona bom desempenho mecânico devido à maior reatividade com o aumento da sua área específica, permitindo o uso de menor fator clínquer/cimento na fabricação. Concretos com melhor desempenho mecânico e maior durabilidade utilizando cimentos de menor fator clínquer/cimento é um desafio atual para atender as demandas de baixa emissão de CO_2 . A NBR 16697 (ABNT, 2018) classifica como cimento de baixo calor de hidratação aquele que apresenta valor inferior a 270 J/g na idade de 41 horas por meio de calorimetria semiadiabática, com o uso de garrafa de *Langavant* conforme NBR 12006 (ABNT, 1990). Apesar de ser possível avaliar e comparar o calor de distintas amostras de cimentos com base nesta idade, é importante avaliar o seu comportamento em maiores idades de ensaio, principalmente quando são utilizados cimentos com maiores teores de adições minerais e/ou pozolânicas. FUNAHASHI JR (2018) mostrou a influência da área específica no calor de hidratação de diferentes tipos de cimento produzidos com escória de alto forno, onde quanto maior a área e menor o teor de escória, maior foi o calor de hidratação. Neste estudo feito com calorímetro isotérmico foi verificado que quanto maior o teor de escória no cimento, menor foi a sua área específica e menor foi o calor de hidratação na idade de 168 horas. O cimento com um menor teor de escória (6%) apresentou calor de hidratação próximo ao de um cimento de referência sem este tipo de adição, igual a 362 J/g (finura *Blaine* = 5030 cm^2/g), enquanto o calor de hidratação do cimento com substituição de 70% de escória nesta mesma idade foi igual a 230 J/g (finura *Blaine* = 4230 cm^2/g). Não há norma nacional para ensaio em calorímetro isotérmico sendo adotada a C1702 (ASTM, 2017). Uma alternativa para avaliar a elevação adiabática de um concreto é por meio do método da NBR 12819 (ABNT, 2012) no entanto, há poucos laboratórios que realizam este tipo de ensaio. A temperatura em que ocorre a hidratação do cimento interfere na velocidade de desenvolvimento de calor que, para fins práticos, é mais importante que o calor total de hidratação. Segundo NEVILLE (2013) o mesmo valor total de calor produzido em um



período maior pode ser dissipado de forma gradual e, por consequência, com menor elevação de temperatura consequente das reações de hidratação. MEHTA & MONTEIRO (2014) afirmam que para um cimento Portland típico, aproximadamente 50% do calor potencial é liberado nos 3 primeiros dias, e 70% nos 7 primeiros dias de hidratação, enquanto NEVILLE (2013) mostrou que cerca de 90% do calor é liberado em seis meses. Dependendo das condições de ensaio, podem ser realizados estudos por este método por até um ano, conforme mostrado por LINDEROTH et al. (2021). MEHTA & MONTEIRO (2014) e NEVILLE (2013) mostraram as diferenças entre a energia liberada na hidratação para os principais compostos do clínquer. A maior geração de calor deve-se à presença, em ordem crescente, do C_3A , C_3S , C_4AF e C_2S . Segundo GODART & DIVET (2020), a aceleração das reações de hidratação verificadas em calorímetro isotérmico considerando temperatura de ensaios a $40^\circ C$ é de 2 até 4 vezes superior em comparação com o ensaio na idade de $20^\circ C$, influenciado pela energia de ativação da reação (E_a). A energia de ativação do cimento Portland é um parâmetro crítico do material na avaliação de suas características de hidratação e interfere no grau e taxa de hidratação do cimento. Para que o cimento tenha maior reatividade nas idades iniciais de forma a atingir as propriedades mecânicas requeridas, podem ser aumentados os teores de alita (C_3S) e aluminato tricálcico (C_3A). Segundo MEHTA & MONTEIRO (2014) as principais impurezas encontradas no C_3S são MgO , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e no C_3A são MgO , álcalis e SiO_2 . Os cimentos de baixo calor de hidratação possuem menores teores destes compostos químicos.

A composição química das escórias de alto forno é similar em diferentes regiões do mundo. As maiores concentrações são de CaO e SiO_2 , e o teor de Al_2O_3 pode variar de 5% até 19% segundo levantamento feito por ÖZBAY et al. (2016). O tipo e composição química da escória é de grande importância, principalmente para a avaliação de reatividade. A NBR 16697 (ABNT, 2018) especifica que a soma em porcentagem de massa de CaO , MgO e Al_2O_3 da escória de alto forno dividido pela porcentagem de SiO_2 seja inferior a 1, definindo limites para os cimentos produzidos com escória de alto forno CP II-E e CP III conforme tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos para cimentos com escória de alto forno: CP II-E e CP III – NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tipo de cimento	Composto com escória de alto forno	Alto forno
Sigla	CP II-E	CP III
Classe de resistência	25, 32 ou 40 ⁽¹⁾	
Sufixo	RS (resistentes a sulfatos) ⁽²⁾ ou BC (baixo calor de hidratação) ⁽³⁾	
Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	51-94	25-65
Teor de escória granulada de alto forno (%)	06-34	35-75
Material carbonático (%)	0-15	0-10
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 5,0	≤ 5,0
Perda ao fogo, PF (%)	≤ 8,5	≤ 6,5
Óxido de magnésio, MgO (%)	-	-
Trióxido de enxofre, SO ₃ (%)	≤ 4,5	≤ 4,5

Notas: (1) representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa; (2) expansão menor ou igual a 0,03 % aos 56 dias de idade quando ensaiado segundo premissas da NBR 13583 (ABNT, 2014); (3) calor de hidratação ≤ 270 J/g na idade de 41 horas segundo NBR 12006 (ABNT, 1990).

As informações relacionadas às composições físico-químicas do clínquer (composição Bogue) e do cimento, bem como os ensaios de calor de hidratação são importantes para avaliação do risco da DEF. Em função dos teores de C_3A , SO_3 , Al_2O_3 e álcalis presentes nos cimentos e nas adições e/ou subprodutos empregados na sua fabricação o risco pode



ser aumentado. Quando as temperaturas no interior do concreto são superiores a 60-65°C, além das características dos materiais empregados no concreto, a condição de umidade do local e temperatura do ambiente influenciam no risco da DEF. O maior tempo de manutenção da temperatura do concreto à patamares elevados e disponibilidade de sulfatos e álcalis totais no concreto aumentam o risco da DEF.

Na região Sudeste do Brasil tem sido empregado cimentos com escória, CP II-E e CP III, em diferentes tipos de elementos estruturais devido a disponibilidade local destes tipos. Em estruturas de concreto massa como blocos de fundação, sapatas, vigas de transição, pilares entre outros tipos tem-se empregado concretos com cimentos de baixo calor de hidratação com o emprego de pré-refrigeração e/ou divisão da estruturas em camadas de concretagem para controlar o aumento da temperatura e evitar fissuras de retração por tensões de origem térmica e devido à DEF. No entanto, em algumas obras não são adotadas medidas preventivas para o controle do aumento da temperatura do concreto massa. Considerando os projetos de estruturas especiais com resistência característica (f_{ck}) elevada que demandam maior consumo de cimento no traço e finura do cimento elevada e com maior calor de hidratação o risco da DEF pode ser aumentado dependendo do tipo de cimento empregado. Somado ao aumento das médias das temperaturas globais alcançado em 2023 segundo a OMM (Organização Meteorológica Mundial) são muitos os desafios para controlar a geração de calor no concreto para garantir estruturas duráveis, com menor pegada de carbono e com menor risco de DEF.

3 Desenvolvimento do trabalho

Para a avaliação dos fatores intervenientes na formação da DEF relacionados ao tipo de cimento com adição de escória, foram levantados os boletins de ensaios de análises físico-químicas das últimas duas décadas (2004 até 2024), que se encontravam disponíveis no banco de dados restrito da DESEK (empresa especializada e consultoria de engenharia), e que foram empregados em estruturas de concreto massa de obras localizadas na região Sudeste do Brasil. No total, foram avaliadas as informações de pouco mais de 130 obras ao longo destes anos. Destas obras, em 44% delas foi usado o cimento do fabricante A, 25% do fabricante B, 16% do fabricante C, 10% do fabricante D e 5 % do fabricante E. Nesse contexto, foram levantadas informações relacionadas aos cimentos do tipo CP II-E e CP III de cinco fabricantes de cimento. Foram avaliados os boletins técnicos disponíveis com as análises físico-química, além dos dados dos ensaios de calor de hidratação pelo método da garrafa de *Langavant* até a idade de 168 horas. Foram levantados ensaios destes cimentos desde 2009, totalizando aproximadamente 1700 testes. Com base nos dados de ensaios foi feita uma comparação entre eles até o ano de 2018 e após o ano de 2018 com o objetivo de avaliar as suas características após 6 anos da revisão da norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Para as análises gráficas com os dados primários deste levantamento adotou-se período de 240 meses, sendo o início do período em janeiro de 2004.

4 Resultados e discussões

4.1 Calor de Hidratação

Com base nas curvas históricas verifica-se que há um aumento do calor de hidratação dos cimentos CP II-E, no período analisado. Para o cimento CP III não foi verificado o mesmo comportamento, onde o calor vem diminuindo.



O calor de hidratação do cimento CP II-E apresentou maior aumento médio na idade de 12 horas, ou seja, 15,4% após a revisão da norma brasileira. Foi constatado um aumento médio de 8,9% no calor de hidratação deste cimento na idade de 41 horas que passou de 282 J/g para 313 J/g. Para a idade de 168 horas este aumento foi de 308 J/g para 325 J/g, ou seja, igual a 5,4%. O calor de hidratação para a idade de 41 horas é superior ao limite estabelecido pela norma brasileira e não pode ser classificado como de baixo calor de hidratação. O cimento CP III apresentou entre os anos de 2009 até 2018 calor de hidratação médio igual a 97 J/g, 238 J/g e 269 J/g para as idades de 12, 41 e 168 horas, respectivamente. Entre os anos de 2019 até 2024 houve uma redução de 3,5% e de 4,3% no calor de hidratação médio para as idades de 41 e 168 horas, respectivamente. Assim como observado para o cimento CP II-E, notou-se um aumento de 19% no calor de hidratação dos cimentos na idade de 12 horas. Possivelmente o aumento do calor de hidratação nesta idade deve-se ao maior teor de material carbonático e processos de moagem permitidos na sua fabricação o que resultou em maior área específica. A partir da revisão da norma, o teor de material carbonático máximo na fabricação do cimento CP II-E e CP III é igual a 15% e 10%, respectivamente, ou seja, 5% superior ao limite antes da sua alteração em 2018. O calor de hidratação do cimento CP II-E indica tendência de aumento para os próximos anos. O cimento CP III vem apresentando uma redução na geração de calor ao longo dos últimos anos conforme dados analisados. Possivelmente esta redução está relacionada ao emprego de maior teor de escória de alto forno como substituição parcial ao clínquer para atingir os objetivos de redução das emissões de CO₂. A figura 1 mostra o calor de hidratação dos cimentos CP II-E e CP III entre 2009 e 2024. A figura 2 e a figura 3 mostram índices de calor de hidratação das idades de 12 e 41 horas em relação a idade de 168 horas, respectivamente. Por meio das figuras 2 e 3 nota-se tendência ao aumento do índice de calor de hidratação entre as idades de 12 horas e 168 horas para os cimentos CP II-E e CP III. O cimento CP III apresentou o menor índice para o período analisado em relação ao CP II-E.

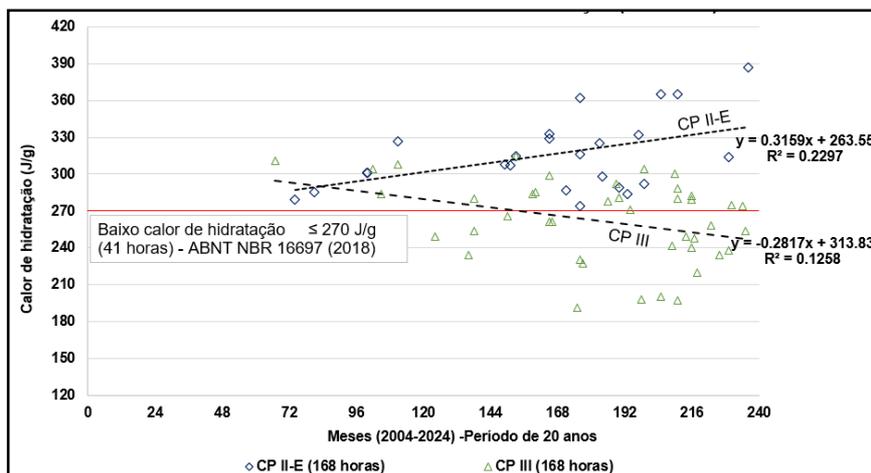


Figura 1 - Calor de hidratação – 168 horas (J/g) dos cimentos CP II-E e CP III

Na figura 3 tem-se a tendência ao aumento do índice de calor de hidratação entre a idade de 41 e 168 horas para os dois tipos de cimentos. Para o período analisado verificou-se que a relação média do calor de hidratação do cimento CP II-E entre as idades de 12 e 168 horas foi igual a 0,58 e 0,62 de 2009 até 2018 e de 2019 até 2024, respectivamente. Isto indica uma maior reatividade deste tipo de cimento na idade de 12 horas. Já para a idade de 41 horas este índice aumentou de 0,92 para 0,96 para o mesmo período analisado. Com base nestes dados verifica-se que para este cimento, 62% do máximo



calor determinado pelo método da garrafa de *Langavant* é atingido na idade de 12 horas e 96% na idade de 41 horas para o período mais recente. Já para o cimento CP III estes valores são inferiores em relação ao tipo CP II-E. O índice do calor de hidratação entre as idades de 12 e 168 horas para o cimento CP III foi igual a 0,36 (2009 até 2018) e 0,44 entre 2019 até 2024. De acordo com os dados analisados, na idade de 41 horas é atingido de 89% até 91% do calor em relação a idade de 168 horas, mostrando a importância da determinação do calor de hidratação para idades superiores a 41 horas, quando da análise de cimentos com maior teor de adições minerais ou pozolanas.

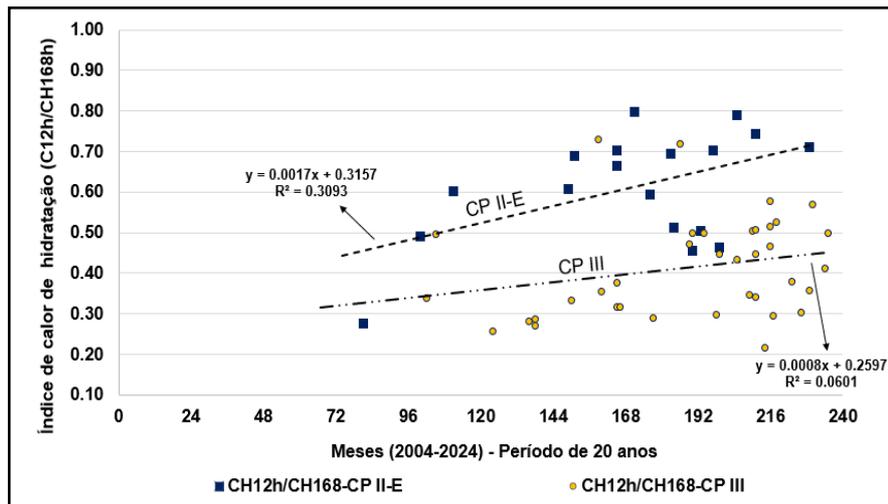


Figura 2 - Índice de calor de hidratação entre as idades de 12 e 168 horas: CP II-E e CP III.

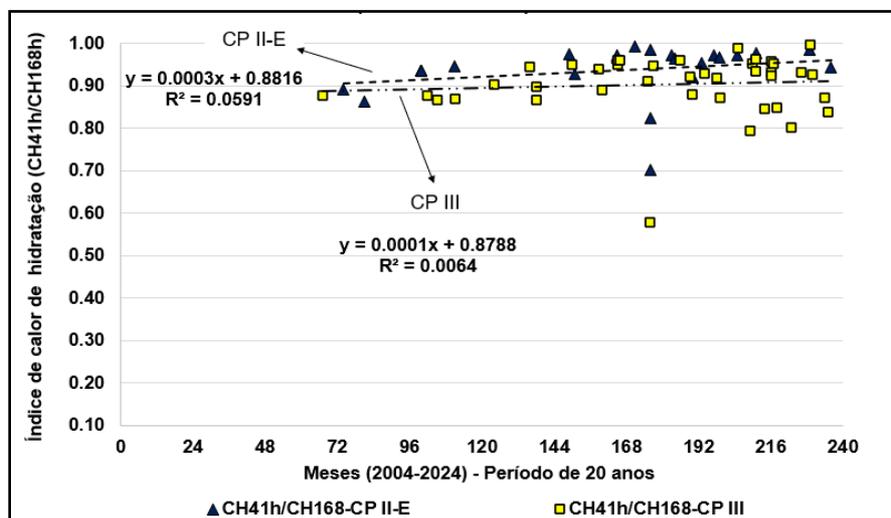


Figura 3. Índice de calor de hidratação entre as idades de 41 e 168 horas: CP II-E e CP III

Na figura 4 tem-se a comparação entre a área específica (finura *Blaine*) dos cimentos CP II-E e CP III e o calor de hidratação dos ensaios disponíveis no banco de dados. Nota-se tendência ao aumento do calor de hidratação e da área específica do cimento CP II-E para o período analisado.

Para o cimento CP III observa-se tendência de aumento da sua finura ao passo que ocorre uma diminuição no calor de hidratação (figura 5) devido ao provável maior teor de escória adicionado na fabricação (figura 6).

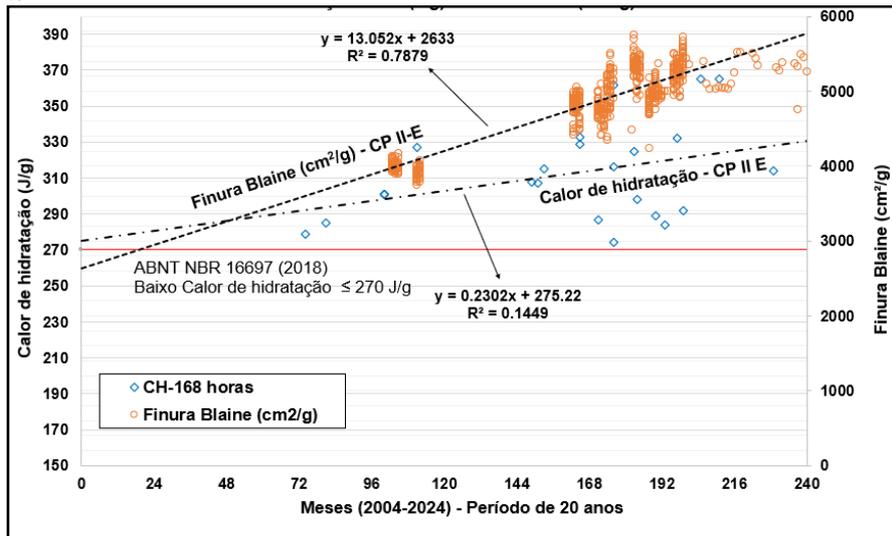


Figura 4 – Calor de hidratação-168 horas (J/g) x Finura Blaine (cm²/g) para o cimento CP II-E

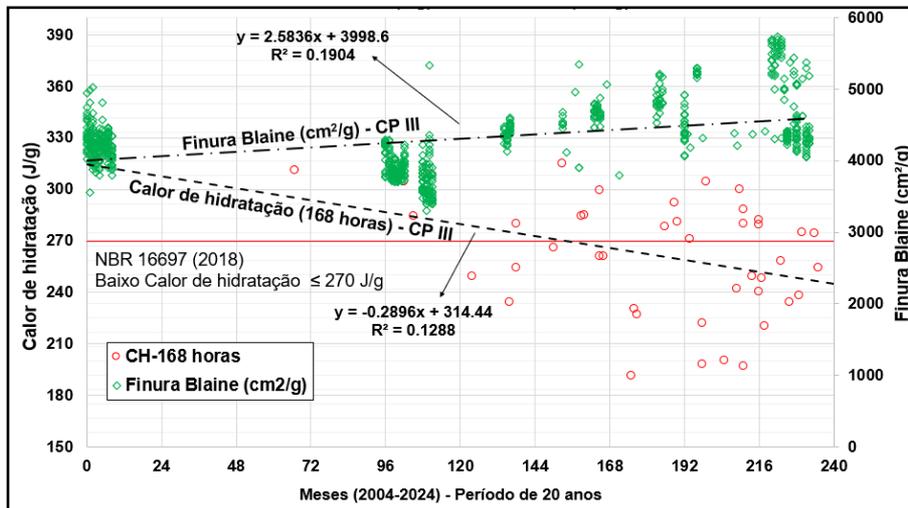


Figura 5 – Calor de hidratação-168 horas (J/g) x Finura Blaine (cm²/g) para o cimento CP III

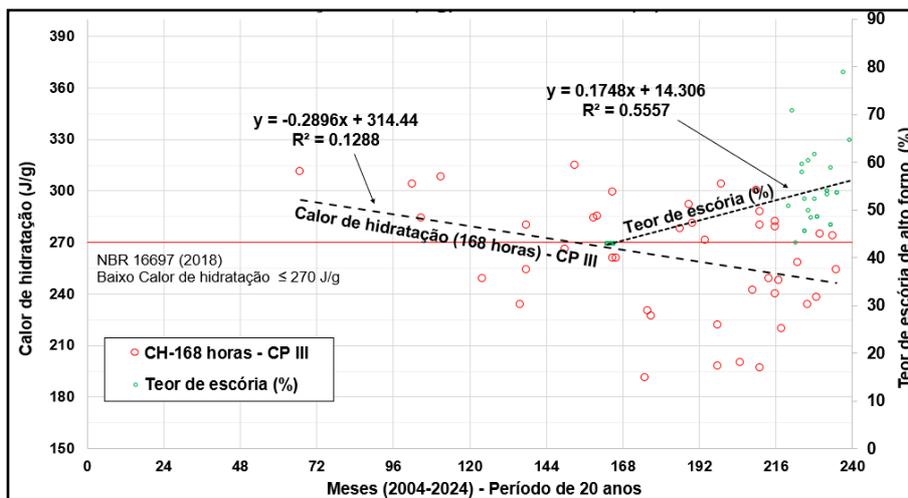


Figura 6 – Calor de hidratação (J/g) em relação ao teor de escória do cimento CP III

4.2 Análises Físico-química dos Cimentos CP II-E e CP III

Com base na evolução da composição química dos cimentos CP II-E e CP III desde 2004, foram avaliados os fatores intervenientes na formação da DEF, principalmente os teores ANAIS DO 65° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2024 – 65CBC2024



de SO_3 , Al_2O_3 , C_3A , MgO e álcalis equivalentes quando disponíveis. Além dos teores dos compostos químicos limitados pela norma de cimento, na maior parte deles foram informados os teores de SO_3 , finura *Blaine* e MgO . Em alguns poucos boletins foram informados os teores de escória, Al_2O_3 , C_3A e de álcalis equivalentes. A figura 7 mostra tendência do aumento do teor de SO_3 para os dois tipos de cimento ao longo das últimas duas décadas em função do aumento da sua área específica. Os teores de Al_2O_3 para o cimento CP II-E mantiveram-se constante com base nos dados disponibilizados, indicando uma tendência ao crescimento deste composto para o CP III. O mesmo ocorre para os teores de MgO mantendo-se praticamente constante ao longo do período analisado.

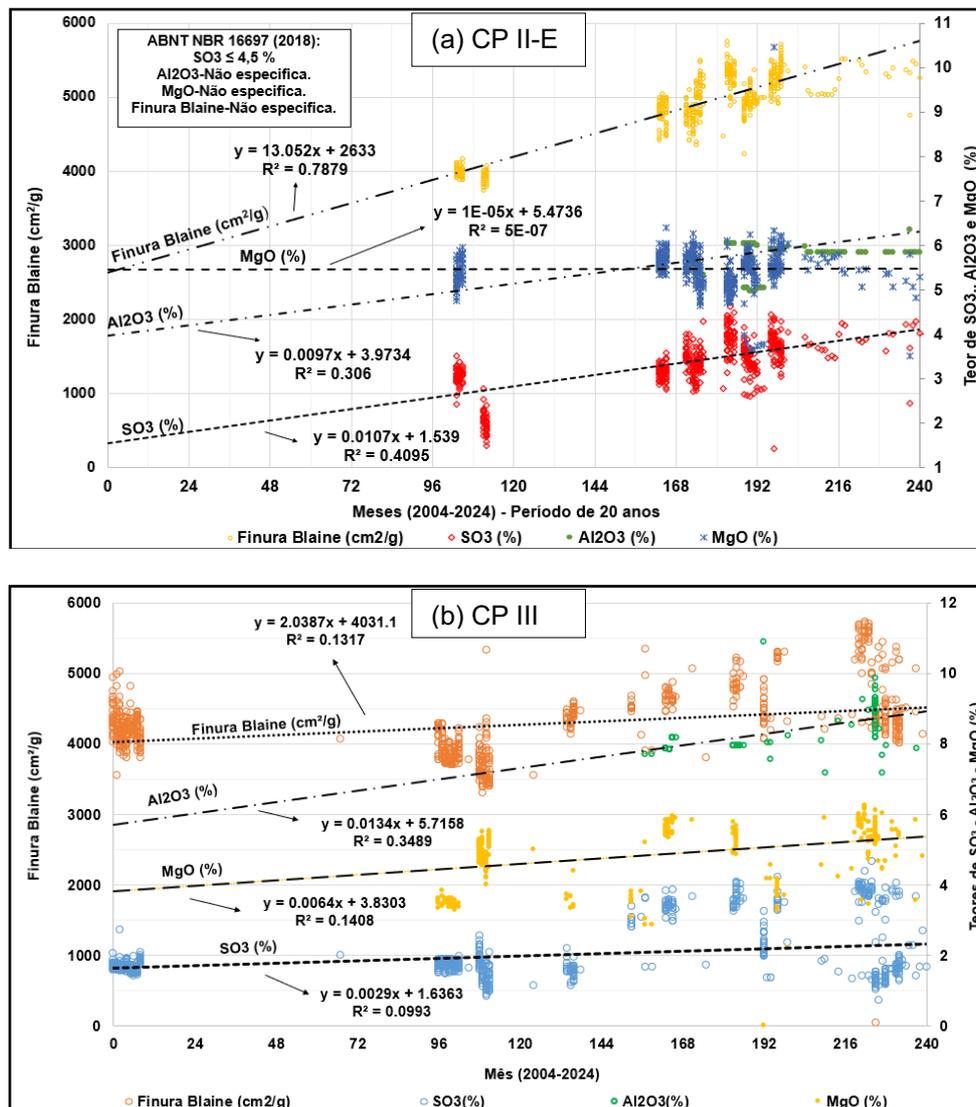


Figura 7 – Variação dos teores de SO_3 , Al_2O_3 e MgO e da finura Blaine ao longo do tempo para os cimentos CP II-E (a) e CP III (b).

A partir das análises físico-químicas dos cimentos (dados dos fabricantes e de alguns ensaios realizados pela obra) verificou-se tendência no aumento do teor de SO_3 (%) e finura *Blaine* (cm²/g). Considerando os valores médios para os dados de ensaio antes da alteração da norma de cimento em 2018, verificou-se um aumento no teor de SO_3 de 21% e 28% para os cimentos CP II-E e CP III, respectivamente. Este aumento é acompanhado pelo aumento da finura destes dois tipos e igual a 14% (CP II-E) e 12% ANAIS DO 65° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2024 – 65CBC2024



(CP III). Para o cimento CP II-E notou-se redução dos teores de MgO e de álcalis. O teor de Al_2O_3 aumentou 7,7% entre os períodos analisados para este tipo. Já para o cimento CP III nota-se uma tendência ao aumento dos teores de MgO de pouco mais de 10,9% e de Al_2O_3 de 6,2%. Chama atenção o aumento do teor de resíduo insolúvel de pouco mais de 90% para o CP III entre os períodos de antes e depois da atualização norma que permitiu adição de maior teor de escória como substituição parcial do clínquer.

BAUER et al. (2006) consideram que a composição química do cimento é importante na formação da DEF em concretos submetidos a temperaturas elevadas, principalmente o teor de SO_3 . Maiores teores de álcalis e C_3A aumentam o risco da DEF. TAYLOR et al. (2011) afirmam que quando um material cimentício submetido a uma cura térmica retorna à temperatura ambiente, as principais fontes de reagentes para a formação de etringita tardia são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que ao final do da cura térmica adsorve uma parte do Al_2O_3 e do SO_3 , o monossulfato e a solução dos poros, sendo a principal fonte de sulfatos o monossulfato. A reação ocorre por dissolução e precipitação na presença de água e é acelerada em função do teor de álcalis. Por esta razão, são propostas as relações para a composição química do cimento SO_3/Al_2O_3 e $(SO_3)^2/Al_2O_3$ inferiores a 0,50 e 2,0, respectivamente, como medida preventiva para a eventual formação da DEF.

As figuras 8(a) e 8(b) mostram a variação das relações entre SO_3 e Al_2O_3 para os cimentos CP II-E e CP III, respectivamente, para o período analisado. O cimento CP II-E apresentou elevada relação entre SO_3 e Al_2O_3 neste período, além de tendência de aumento evidenciando o maior risco de DEF em estruturas que vivenciaram temperaturas elevadas. Já para o cimento CP III nota-se uma diminuição desta relação o que representa menor risco quando do uso deste tipo em relação ao cimento CP II-E.

A tabela 2 mostra os valores médios de calor de hidratação dos cimentos tipos CP II-E e CP III e da sua composição química nos últimos 20 anos na região Sudeste do Brasil.

Com base nos dados levantados verificou-se que em ambos os cimentos há uma tendência de aumento da sua finura no período analisado. O aumento do calor de hidratação do cimento CP II-E vem acompanhando o aumento da sua finura. Além disso, para este tipo de cimento notou-se um aumento do teor de SO_3 ao longo dos últimos anos mostrando que o risco devido a DEF é aumentado para aquelas estruturas submetidas ao calor de fonte interna ou externa superior a 60-65°C. Para o cimento CP III foi observada uma redução do calor de hidratação, este possivelmente impulsionado pelo aumento do teor da escória na sua fabricação. O uso de maior teor desta adição traz benefícios para diminuir o calor de hidratação e ao mesmo tempo contribuir para a redução do fator clínquer/cimento, garantindo baixas emissões de CO_2 quando da produção do cimento.

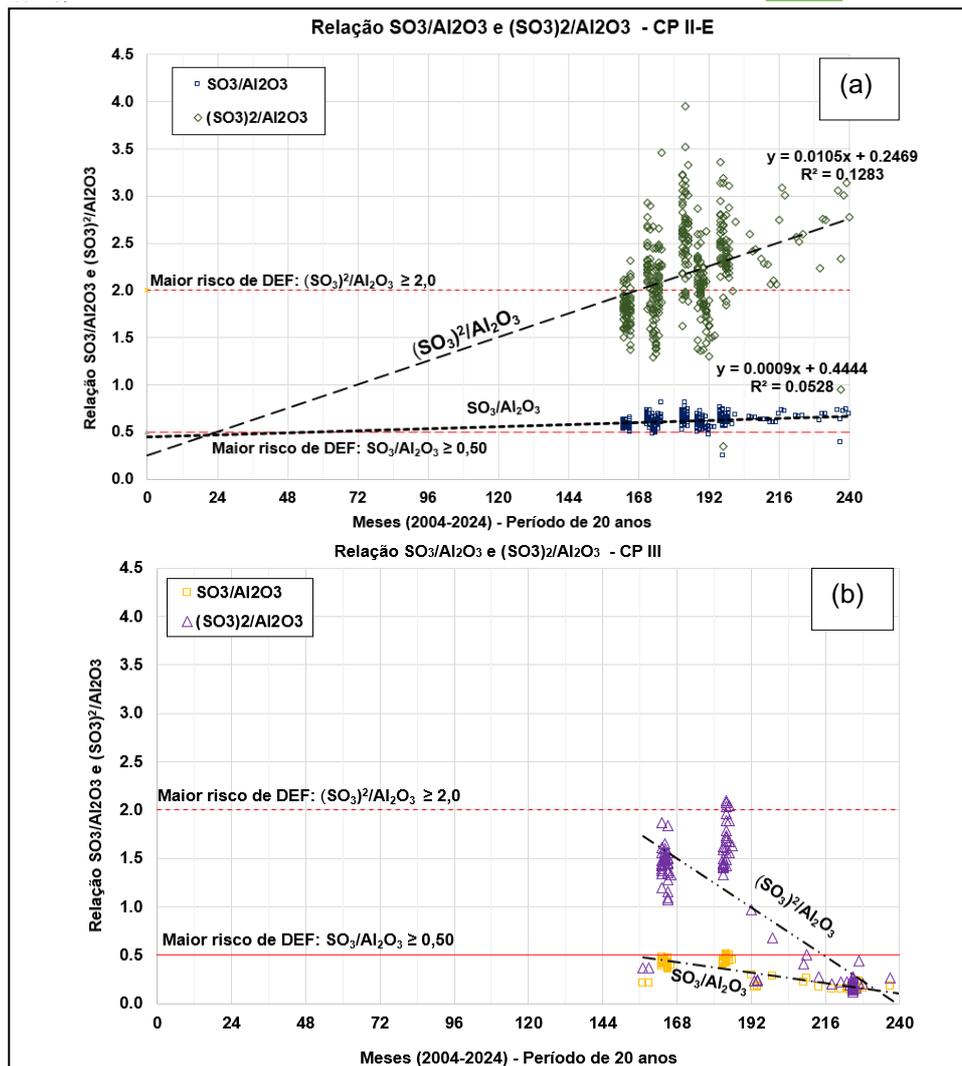


Figura 8 - Variação da relação $(SO_3)_2/Al_2O_3$ e SO_3/Al_2O_3 no período analisado: CP II-E (a) e CP III (b)

Tabela 2 – Valores médios das características dos cimentos entre 2004-2018 e 2019-2024: CP II-E e CP III (fonte: DESEK)

		CP II-E (2004-2018)	CP II-E (2019-2024)	CP III (2004-2018)	CP III (2019-2024)
Calor de hidratação médio (J/g)	12	178	206	97	116
	41	282	313	238	237
	168	308	325	269	258
Teor de escória (%) ⁽¹⁾		6-34	6-34	35-70 ⁽¹⁾	35-75 ⁽²⁾
CH 12h/CH 168h		0,58	0,92	0,36	0,44
CH 41h/CH 168h		0,92	0,96	0,89	0,91
Área específica (cm ² /g)		4531	5181	4115	4613
SO ₃ (%)		3,04	3,68	1,82	2,33
Al ₂ O ₃ (%)		5,51	5,93	7,97	8,46
MgO (%)		5,52	5,43	4,69	5,20
Álcalis equivalente (%)		0,95	0,76	0,68	0,56
SO ₃ / Al ₂ O ₃		0,59	0,62	0,42	0,27
(SO ₃) ² / Al ₂ O ₃		1,95	2,33	1,40	0,75
CH _{168h} / (1000 cm ² /g)		68,0	62,7	65,4	55,9

Notas: (1) NBR 5735 (ABNT, 1991) substituída pela (2) NBR 16697 (ABNT, 2018).



4.3 Estudos de casos

Independentemente do tipo de cimento a ser escolhido há a necessidade de cuidados na execução das estruturas para a garantia de menores temperaturas no seu interior, principalmente naquelas estruturas com elevada resistência característica, sendo necessário realizar o planejamento da execução e definição das temperaturas de lançamento do concreto por meio de estudos térmicos. É comum verificar a preocupação dos construtores e projetistas com relação aos procedimentos especiais em estruturas de grandes volumes, mas é quase inexistente a preocupação com as estruturas de menores dimensões volumes. A depender do traço do concreto e das temperaturas de lançamento, estruturas de pequenas dimensões podem alcançar temperaturas elevadas como mostrado por FARINACIO et al. (2023) onde uma estrutura de concreto de $f_{ck}=45$ MPa, volume igual a 18 m^3 e emprego de cimento tipo CP II-E atingiu temperatura igual a 73°C mesmo com o uso de concreto pré-refrigerado.

Apesar de não existir norma técnica com relação aos ensaios para avaliação do desempenho da DEF, alguns protocolos como apresentado por GODART&DIVET (2020) abordam uma classificação de risco em função das características da obra, condições de umidade durante sua vida útil, características dos materiais locais constituintes do concreto e tipos de adições e comportamento térmico destas estruturas. A relação entre o $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, bem como as máximas temperaturas atingidas em um determinado período e condições de umidade podem indicar um potencial risco de manifestação desta reação expansiva em estruturas de concreto. Segundo estes pesquisadores o risco da DEF pode ser reduzido considerando teor de SO_3 do cimento $< 3\%$, teor de C_3A do clínquer inferior a 8% e álcalis equivalentes no concreto inferior a 3 kg/m^3 . Maiores teores de adições minerais como substituição parcial do clínquer auxiliam na redução do risco, mas ensaios em protótipos por maior período de monitoramento são necessários para avaliar a sua eficácia.

Na tabela 3 são apresentadas informações de três tipos de obra executadas no Sudeste onde foi feito o monitoramento térmico com o uso de termopares e registro automático por datalogger. Em função do traço de concreto com CP III ou CP II-E, geometria da estrutura, condições ambientais e especificação do projeto com relação às máximas temperaturas admissíveis no seu interior, para todos os casos foram realizados estudos térmicos por modelagem matemática computacional 3D para definição da adequada estratégia executiva. Com base nos casos verificou-se que independentemente do f_{ck} e tipo de cimento empregado no concreto, as máximas temperaturas no seu interior atenderam a especificação do projeto reduzindo o risco de fissuras de origem térmica eventual formação da DEF.

Para o pilar da UHE foi definida a sua execução em etapas com volume de 168 m^3 , cada, com camadas de altura de até $1,80 \text{ m}$ sem o emprego de pré-refrigeração do concreto. As temperaturas de lançamento variaram de 29°C até 32°C para a região da obra. Isto foi possível em função do menor consumo de cimento considerado no traço para o f_{ck} igual a 20 MPa na idade de 90 dias e cimento CP III (baixo calor de hidratação). Para o concreto de $f_{ck}=40 \text{ MPa}$ da sapata da edificação, com altura igual a $2,0 \text{ m}$ e volume igual a 520 m^3 , houve necessidade de pré-refrigeração do concreto mesmo com o emprego do cimento CP III. O consumo de cimento adotado no traço de concreto foi 110 kg/m^3 maior que o do concreto de $f_{ck}=20 \text{ MPa}/90$ dias.



Tabela 3 - Execução de estruturas de concreto massa – Região Sudeste (fonte: DESEK)

Estrutura	Pilar de UHE	Sapata	Bloco
Tipo	Infraestrutura	Edificação	Edificação
Elemento	Vertedouro	Fundação	Fundação
Contato com água e/ou umidade?	Sim	Sim	Sim
Data da execução	abr/22	mai/24	jun/24
Temperatura ambiente (°C)	31-36	12-22	13-20
Altura (m)	1,80	2,0	1,6
Volume (m ³)	158	520	25
f _{ck} (MPa)	20	40	50
Idade de controle (dias)	90	28	28
Tipo de cimento	CP III	CP III	CP II-E
Temperatura máxima especificada no projeto (°C)	60	65	65
Consumo de cimento (kg/m ³)	260	370	351
Material pozolânico (kg/m ³)	-	-	20
Teor de escória (kg/m ³)	63-66%	49-52%	17-21%
Uso de gelo?	Não	Sim	Sim
Temperatura de lançamento (°C)	29-32	19-21	16-17°C
Temperatura máxima (°C)	56,5	54,8	58,8
Maior taxa de aumento da temperatura (°C/h)	1,0°C/h	2,0°C/h	1,9°C/h
SO ₃ (%)	4,2	3,4	4,4
MgO (%)	1,8	5,5	4,7
Al ₂ O ₃ (%)	8,6	7,6	5,6
C ₃ A (%)	9,3	-	-
Teor de material carbonático (%)	-	6,8	8,1
Equivalente alcalino em Na ₂ O (%)	0,61	0,60	0,70
Relação SO ₃ /Al ₂ O ₃	0,49	0,45	0,76
Relação (SO ₃) ² /Al ₂ O ₃	2,05	1,52	3,46
Teor de álcalis (kg/m ³) ⁽¹⁾	1,57	2,22	2,46
Teor de SO ₃ no concreto (kg/m ³) ⁽¹⁾	10,9	12,6	15,4
Risco da DEF (Sim ou Não?)	Não	Não	Não

Nota: (1) Teor de álcalis e SO₃ calculado com base no consumo de cimento do traço de concreto.

Para controlar a máxima elevação da temperatura do concreto foi necessário um consumo de gelo próximo a 90 kg/m³ para atingir menores temperaturas no seu lançamento que variou de 19°C até 21°C para a época do ano da sua construção. A relação SO₃/Al₂O₃ para os casos do pilar da UHE e da sapata da edificação foi igual a 0,49 e 0,45, respectivamente. A relação (SO₃)²/Al₂O₃ foi igual a 2,05 e 1,52 para a UHE e a sapata de edificação, respectivamente. Considerando a máxima temperatura monitorada no interior da estrutura e as relações entre SO₃ e Al₂O₃ o risco da DEF foi reduzido. Já para a sapata da edificação com f_{ck} igual a 50 MPa na idade de 28 dias, menores volume (25 m³) e altura (1,60 m) com o uso de concreto com cimento CP II-E, apresentou a maior pico de temperatura (58,8°C) no seu interior em relação aos outros dois casos. Devido ao elevado f_{ck} e emprego de concreto com cimento tipo CP II-E houve necessidade de lançamento do concreto com menores temperaturas e de até 17°C com consumo de gelo próximo de 120 kg/m³ para as condições locais da obra e época do ano. O uso de cimentos de maior calor de hidratação no concreto, como é o caso do CP II-E, e emprego de maior consumo para atender o elevado f_{ck} especificado demandaram menores níveis de pré-refrigeração do concreto para reduzir os riscos fissuras de origem térmica e DEF. As relações SO₃/Al₂O₃ e (SO₃)²/Al₂O₃ para este cimento foram iguais a 0,76 e 3,46, respectivamente, indicando maior risco de DEF caso as temperaturas máximas especificadas no projeto não fossem atendidas. Como as temperaturas máximas



monitoradas no interior da estrutura foram inferiores ao especificado e de até 60°C este risco foi minimizado para este caso.

5 Considerações finais

Os dados levantados indicam um aumento na finura *Blaine* dos cimentos CP II-E e CP III ao longo dos anos, e que é acompanhado do aumento do teor de SO₃, sendo esta tendência mais pronunciada para o cimento CP II-E e aqueles produzidos no Sudeste para atingir as especificações de projeto com menor consumo no traço. Pelo fato de o cimento CP III conter adição de escória, não foi verificado aumento neste teor para o período analisado. Ainda, o calor de hidratação do cimento CP II-E é superior ao do cimento CP III, como esperado. Isto deve-se ao maior fator clínquer/cimento do CP II-E em relação ao CP III, e que pode ser produzido com substituição de 35 a 75% de escória de alto forno.

Os maiores teores de SO₃ presentes no cimento CP II-E observados nos últimos anos, seja para controlar o início de pega devido à maior finura e/ou pelo processo de queima do clínquer, indicam maior risco da DEF. Mesmo que este teor se apresente dentro do limite normativo, pode representar maior risco deste tipo de ocorrência. Enquanto alguns países têm limitado o teor de SO₃, o Brasil permite adição de até 4,5% na fabricação do cimento, o que representa um teor bem elevado.

Além das condições térmicas vivenciadas pela estrutura e das características dos materiais constituintes do concreto, principalmente do cimento, as condições de umidade e temperatura ambiente durante a sua vida útil são parâmetros importantes na avaliação do risco deste tipo de reação expansiva deletéria, além dos demais parâmetros destacados neste trabalho.

Com base no presente trabalho, o emprego de cimentos com menor teor de escória e maior calor de hidratação pode trazer sérios riscos de danos às estruturas devido a DEF, caso não seja feito um controle adequado da execução e do lançamento do concreto.

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697. Cimento Portland – Requisitos.** ABNT. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12006. Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant.** ABNT Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15577-1. Agregados. Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** ABNT. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12819. Determinação da elevação adiabática da temperatura – Método de ensaio.** ABNT. Rio de Janeiro, 2012.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13583. Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.** ABNT. Rio de Janeiro, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 1702. Standard test method for measurement of heat of hydration of hydraulic cementations materials using isothermal conduction calorimetry.** ASTM. 2017.

BAUER, S. C., et al.. 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.

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.** Curitiba, 2020.

FARINACIO, C., et al.. Estruturas de pequenos volumes em concreto massa. **Anais. 64° Congresso Brasileiro do Concreto,** 2023.

FUNAHASHI JR, E.I., et. al.. Influência do metacaulim na elevação da temperatura e na formação de etringita tardia em compósitos cimentícios. **Revista Matéria,** Rio de Janeiro, RJ, 2021.

GODART, B., DIVET, L. The revision of the French recommendations for the prevention of Delayed Ettringite formation. **Proceedings of the JCI-RILEM International Workshop on Control of Cracking in Concrete Structures 5,** CONCRACK5, Apr 2017, TOKYO, Japan. 10p. hal-02541755, 2020.

HASPARYK, N.P., et. al.. Instrução Técnica nº. GSTE004R0. **Método de ensaio para a avaliação do potencial de ocorrência da etringita tardia (DEF) em concreto.** Furnas, Goiânia, GO, 2020.

HASPARYK, N. P., et al.. A. **Recomendações técnicas para a prevenção da DEF e da fissuração térmica no concreto.** Primeira edição. São Paulo, SP. 76p. 2023.

LANGOSKI, M. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em argamassas preparadas com diferentes tipos de cimento Portland. **Dissertação de Mestrado (IMED).** Passo Fundo, 2021.

LINDEROTH A. O., et al.. Long-term cement hydration studies with isothermal calorimetry. **Cement and Concrete Research.** 2021.

MELO, S.K. Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento. **Dissertação de Mestrado.** Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

MILLER, F. M. G.; CONWAY, T. Use of ground granulated blast furnace slag for reduction of expansion due to delayed ettringite formation. **Cement, Concrete, and Aggregates,** Dec. 2003, Vol. 25, Nº. 2, 2003.



MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. HASPARYK, N. P. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRANDA, D. C. Estudo da formação de etringita tardia (DEF) em compósitos de cimento com e sem nanosilica. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2.ed. Porto Alegre. Bookman, 2013.

OLIVEIRA, S. Avaliação do potencial mitigador da sílica ativa e do metacaulim frente à formação de etringita tardia (DEF) em concretos. **Dissertação de Mestrado**. Goiânia, GO. 2022.

PERONDI, L. Z. Estudo do ataque por sulfatos em matrizes cimentícias com diferentes cimentos pozolânicos. **Dissertação de Mestrado** (IMED). Passo Fundo, RS. 2022.

QUEVEDO, R. R. Q. M. Avaliação da formação da etringita tardia (DEF) em laboratório e monitoramento de concreto no tempo. **Dissertação de Mestrado** (IMED). Passo Fundo, RS. 2021.

RAMLOCHAN, T., et al.. 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, p.807-814, 2003.

SBRIGHI, C. N., et. al.. Guia da prevenção da reação álcali-agregado. Primeira edição. **Prática recomendada Ibracon**. Comitê 201 Ibracon, 25p. São Paulo, SP, 2018.

SBRIGHI, C. N., et. al.. Inspeção de estruturas de concreto visando avaliar manifestações da reação álcali-agregado (RAA) e etringita tardia (DEF). **Prática recomendada Ibracon**. Comitê 201 Ibracon, 32p. São Paulo, SP, 2018.

SCHOVANZ, D.. Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência. **Dissertação de Mestrado** (IMED). Passo Fundo, 2019.

SILVA A.S, et al.. Influence of Mineral Additions in the Inhibition of Delayed Ettringite Formation in Cement based Materials – A Microstructural Characterization. **Materials Science Forum**. Vol. 636-637. 1272-1279 pp. 2010.

TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v.31, p. 683-693, 2001.

ZHUANG, S.; SUN, J. The feasibility of properly raising temperature for preparing high-volume fly ash or slag steam-cured concrete: An evaluation on DEF, 4-year strength and durability. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 1-9, 2020.