https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.066

CONTROLE DA TEMPERATURA DO CONCRETO MASSA DE ELEVADA RESISTÊNCIA

Eduardo I. Funahashi Jr.[1]*; Patrícia Guedes Gambale[2]
*Autor de contato: eduardo.funahashi@desek.com.br

[1] Desek, São Paulo, SP, Brasil
[2] Concrecon Concreto e Construções Ltda, Goiânia, GO, Brasil

RESUMO

Para garantir a maior durabilidade do concreto e o aumento da vida útil e segurança das estruturas devem ser elaboradas estratégias na fase inicial do projeto para controlar a elevação da sua temperatura devido ao calor de hidratação, principalmente para àqueles especificados com elevada resistência mecânica, evitando fissuras de origem térmica e a formação da etringita tardia (DEF). Dependendo do f_{ck}, dimensões da estrutura, condições ambientais e logísticas da região da obra, o uso de cimentos de baixo calor de hidratação e gelo no concreto massa podem não ser suficientes para reduzir o aumento da sua temperatura interna. Diante do exposto, este trabalho traz três estudos de caso de estruturas de fundação com volume variando de 70 até 800 m³, com utilização de traços de concreto com cimentos CP III E, CP II E e CP II F e com resistências de 50 e 70 Mpa, além de informações importantes no que diz respeito as técnicas utilizadas na fase de concepção de projeto para atender os limites máximos de temperatura para evitar eventuais problemas no futuro. Os planos executivos definidos através de estudos térmicos foram validados através do monitoramento das temperaturas do concreto, comprovando a eficácia das estratégias adotadas para reduzir os riscos de fissuração.
Palavras-chave: concreto massa; fissuras de origem térmica; DEF, estudos térmicos

ABSTRACT

In order to guarantee the greater durability of concrete and the increase in the useful life and safety of the structures, strategies must be developed in the initial phase of the project to control the elevation of its temperature due to the heat of hydration, especially for those specified with high mechanical strength, avoiding cracks. of thermal origin and the Delayed Ettringite Formation (DEF). Depending on the f_{ck}, dimensions of the structure, environmental and logistical conditions in the region of the work, the use of cements with low heat of hydration and ice in the mass concrete may not be sufficient to reduce the increase in its internal temperature. In view of the above, this work presents three case studies of foundation structures with a volume ranging from 70 to 800 m³, using concrete with CP III E, CP II E and CP II F cements and with resistances of 50 and 70 Mpa, in addition to important information regarding the techniques used in the project design phase in order to meet the maximum temperature limits to avoid possible problems in the future. The executive plans defined from mathematical modeling were validated by monitoring the temperatures of the concrete, proving the effectiveness of the strategies adopted to reduce the risk of cracking.
Keywords: mass concrete; thermal cracks; DEF, thermal study

1. INTRODUÇÃO

O concreto massa é definido como qualquer volume de concreto com dimensões grandes o suficiente para exigir que medidas sejam tomadas para lidar com a geração de calor durante a hidratação do cimento e respectiva variação do seu volume para minimizar fissuras. O ACI 207.1-21 (2021) afirma que a única característica que distingue o concreto massa de outros concretos é o seu comportamento térmico que pode causar perda da sua integridade estrutural e ação monolítica.

A temperatura do seu interior pode ser muito maior que a da sua região mais externa, principalmente, quando a dissipação do calor é lenta dependendo dos materiais constituintes do concreto, condições ambientais e das condições de restrição da estrutura à sua movimentação. A probabilidade de ocorrer fissuras de origem térmica neste tipo de estrutura é maior quanto maior for o gradiente térmico no seu interior. A utilização de concretos com agregados de menor módulo de elasticidade e menor coeficiente de dilatação térmica, por exemplo, também resultará em menores tensões, diminuindo o risco de fissuras deste tipo. Dependendo da abertura das fissuras, estas podem ser um caminho preferencial para a entrada de agentes agressivos presentes no meio e geralmente são notadas nos primeiros dias ou meses dependendo da geometria da estrutura e condições ambientais. Após a sua constatação e avaliação do projetista, geralmente é possível realizar a sua recuperação através de injeções com resinas estruturais que restabelecerá a sua monoliticidade, sem prejuízos a sua durabilidade e segurança durante a vida útil da estrutura.

No caso da DEF (*Delayed Ettringite Formation*) ou etringita tardia que é um dos tipos de Ataque Interno por Sulfatos (ISA), pode ocorrer quando as temperaturas internas do concreto superarem determinados limites e que podem variar de 60-65ºC, dependendo da composição química do cimento, tempo de manutenção do patamar de temperatura e condições de umidade no ambiente da estrutura durante a sua vida útil (MELO, 2010). O ACI 301.20 (2020) e ACI 305.1-14 (2020) limita a temperatura máxima do concreto de alguns tipos de construções, em clima quente, de até 35ºC no seu lançamento. No entanto, este limite não deve ser considerado para estruturas de concreto massa. De acordo com ACI 301, a temperatura máxima no concreto massa não deve exceder 70ºC e a diferença máxima de temperatura entre o seu núcleo e a sua superfície não deve superar 35ºC. Em concreto massa as temperaturas devem ser monitoradas desde o instante do seu lançamento até o instante de equilíbrio entre a temperatura média ambiente diária e as temperaturas internas do seu núcleo. TIECHER *et al.* (2021) estudaram o comportamento de argamassas com diferentes tipos de cimento induzidas à formação de DEF e verificaram neoformações significativas de etringita através de micrografias realizadas para os cimentos CP V e CP II F, onde para expansões acima de 0.45%, ocorreram reduções nas propriedades mecânicas da ordem de 50%. Caso ocorra DEF resultará em fissuração generalizada da estrutura de concreto, no tempo, além de reduzir o seu módulo de elasticidade e resistências à tração e à compressão, comprometendo a a sua durabilidade e segurança estrutural. Não há normas no Brasil e no mundo para avaliar o potencial da formação de etringita tardia de concretos previamente a sua aplicação. O único método existente no Brasil para avaliar o potencial de desenvolvimento da DEF foi publicado por FURNAS, compondo uma instrução técnica com método de ensaio em prismas de concreto (IT. GSTE004, 2020). Muitas vezes a necessidade de adotar práticas para controlar a temperatura do concreto massa é definida próxima à sua execução não sendo possível realizar ensaios em tempo adequado já que leva mais de 1 ano dependendo do tipo de cimento empregado.
A Figura 1 mostra estrutura de concreto massa no Brasil com fissuras devido a formação de DEF. A Figura 2 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de bloco de fundação com formação de DEF.

Figura 1 - Detalhe de fissuração mapeadas em fundação de duas edificações no Brasil causada por DEF



Fonte: Selmo C. Kuperman.

Figura 2: Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de bloco de concreto com DEF: a) etringita comprimida na interface e b) na matriz cimentícia, em detalhe.



Fonte: Nicole P. Hasparyk.

Alguns elementos estruturais de concreto não precisam ter volumes expressivos para exigir medidas de controle do calor de hidratação e, consequente, do aumento da sua temperatura interna. Dependendo da geometria e considerando as elevadas resistências especificadas para algumas estruturas como paredes, pilares, vigas de transição e lajes, há necessidade de controle da sua temperatura.

Diante desse cenário de expansão, o conhecimento dos variados tipos de fenômenos deletérios que podem deteriorar o concreto se torna de extrema importância para que medidas preventivas possam ser adotadas na fase de concepção do projeto. Um controle tecnológico adequado no que diz respeito à caracterização e ao controle dos materiais a serem empregados é de suma importância na fase que antecede a execução da obra, bem como durante a obra, de forma a acompanhar o avanço da construção. (HASPARYK; KUPERMAN, 2021).

A elevação da temperatura interna do concreto massa pode ser controlada através do seu lançamento nas fôrmas à uma temperatura mais baixa e/ou execução de camadas de concretagem de menor altura. A substituição parcial do consumo de cimento por material pozolânico e/ou redução do seu consumo através do uso de aditivos químicos contribuem para reduzir as máximas temperaturas no seu interior. A utilização de aditivos estabilizadores de hidratação é interessante quando o pico da hidratação é controlado para ocorrer em períodos do dia de menor temperatura ambiente, devendo ser avaliado previamente através de modelagens matemáticas, dosagens experimentais e testes em campo. Com os avanços tecnológicos para as análises estruturais e melhoria contínua das modelagens matemáticas através de softwares estão sendo observados

projetos estruturais de edifícios cada vez mais arrojados. Com o aumento das alturas das edificações e exigências de desempenho de durabilidade têm sido especificadas resistências características à compressão (f_{ck}) superiores à 50 MPa. Inevitavelmente, isto resulta no aumento do consumo de cimento nas dosagens e, no caso do concreto massa, aumentam os riscos de fissuração já que o aumento da temperatura é iminente. Este cenário é mais crítico em regiões com maiores temperaturas ambientais ou quando as concretagens são realizadas em dias quentes, sem nenhum planejamento prévio, resultando em maior risco de fissuras de origem térmica e DEF.

Segundo o ACI 207.1-21 (2021), a prática de pré-resfriamento dos materiais constituintes do concreto, antes do seu lançamento, para atingir uma temperatura máxima menor no interior da estrutura começou no início da década de 1940 e tem sido amplamente utilizada na construção de grandes barragens. No Brasil, o primeiro emprego de pré-refrigeração do concreto com gelo em usinas hidrelétricas foi na UHE Jupiá em 1965, onde os concretos foram lançados com temperaturas próximas de 11ºC. O maior volume de emprego de concreto pré-refrigerado foi na usina hidrelétrica de Itaipu, onde foram lançados à temperaturas inferiores a 7ºC (ANDRIOLO, 1998). Durante a construção da usina hidrelétrica de Belo Monte foram realizados estudos térmicos através de modelagens matemáticas para a definição dos intervalos de lançamento entre as diferentes etapas de concretagem, altura das camadas e temperatura de lançamento do concreto pré-refrigerado com substituição parcial da água de amassamento por gelo produzido em fábrica instalada no canteiro de obras, além da utilização cimento de baixo calor de hidratação (FUNAHASHI *et. al.*, 2018). Em algumas obras industriais e residências tem sido observada maior preocupação com a definição prévia de planos executivos e utilização de técnicas para controlar o aumento da temperatura interna do concreto através de pré-refrigeração dos materiais constituintes do concreto, subdivisão das camadas de concretagem para estruturas de maior volume (FUNAHASHI *et. al.*, 2011; 2018). VICENTE *et. al* (2014), verificaram a possibilidade das temperaturas internas do concreto de diferentes geometrias de base quadrada com alturas de 1m, 2m e 3m, próximas de 65ºC, 80ºC e 85ºC, respectivamente, através de modelagens matemáticas tridimensionais pelo método dos elementos finitos considerando cimento CP II E e traço de concreto com f_{ck} igual à 40 MPa. Os autores verificaram a maior probabilidade de fissuração de origem térmica para blocos com altura superior a 1,3 m, aproximadamente, para as condições de cálculo adotadas no estudo. Durante a execução do bloco de fundação com volume de cerca de 1400 m³, de chaminé com 145 m de altura de uma fábrica de celulose, em duas etapas de concretagem com altura de 1,5 m, cada, empregou-se concreto pré-refrigerado à temperatura de 20ºC. Foi empregado cimento de baixo calor de hidratação e aumento da idade de controle da resistência de projeto para idade 63 dias ao invés de 28 dias, que permitiu a redução do consumo de cimento do traço e resultou em temperaturas máximas monitoradas no concreto inferiores à 60ºC (FUNAHASHI *et. al*, 2012).

No entanto, é necessário maior conscientização por parte dos projetistas e construtores sobre os mesmos riscos associados quando da execução de estruturas de menor volume e elevada resistência. Para garantir o atendimento das resistências especificadas, alguns projetistas têm limitado a relação água-cimento resultando no aumento exagerado do consumo de cimento nos traços, principalmente, quando não são realizados estudos prévios das dosagens do concreto massa. Na etapa de desenvolvimento do projeto estrutural, a definição da geometria da estrutura, principalmente altura, especificações das resistências mecânicas e módulo de elasticidade, relação água-cimento ou água-aglomerante influenciam no maior ou menor risco de fissuras em uma estrutura em concreto massa. Segundo Kuperman *apud* Tecomat (2021) um dos pontos importantes diz respeito à necessidade de constar dos projetos, seja em plantas de formas ou em especificações, de limitações relativas às temperaturas atingidas pelos concretos com o intuito de evitar a formação de etringita tardia e/ou a fissuração de origem térmica.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Inicialmente foram realizados estudos prévios em laboratório para definição das dosagens do concreto massa focando na redução do consumo de cimento. Com base nas características dos agregados e cimentos disponíveis nas regiões foram definidos os planos executivos à partir de cálculos térmicos para os três blocos de fundação localizados no sudeste e centro-oeste do Brasil. Para os casos estudados foram utilizados traços de concreto com cimentos CP III E, CP II E e CP II F com substituição parcial por sílica ativa. Os blocos foram monitorados por meio de termopares imersos no concreto para acompanhamento da evolução das temperaturas estruturas. A Tabela 1 apresenta a geometria das estruturas analisadas e especificação dos diferentes concretos.

Tabela 1. Resumo dos casos estudados

Empreendimento	**Caso 1**	**Caso 2**		**Caso 3**
Localização	Sudeste	Sudeste		Centro-Oeste
Dimensões de base (m)	11 x 19	5,7 x 5	10 x 7,5	20 x 21
Altura total (m)	4	2,5	3,5	1,9
Volume total (m³)	840	70	263	798
f_{ck} (MPa)	50	50	50	70
E_{cs} (GPa)	37	-	-	-

A Tabela 2 mostra as dosagens empregadas nos concretos dos diferentes casos estudados.

Tabela 2 – Dosagens dos concretos dos casos 1, 2 e 3

Empreendimento	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3**	
Tipo de cimento	CP III E	CP II E	CP II F	
Fabricante	A	B	C	
Consumo de cimento (kg/m³)	378	334	410	380
Consumo de sílica ativa-SA (kg/m³)	28	25	50	50
Agregados miúdos (kg/m³)	809	826	1013	1166
Agregados graúdos (kg/m³)	1099	1052	861	753
Água e/ou gelo (kg/m³)	175	180	190	180
Aditivo plastificante	3,5	4	4,1	3,80
Aditivo superplastificante	4	3	3	1,5
Relação água-aglomerante (cimento+SA)	0,43	0,50	0,41	0,42

3. RESULTADOS

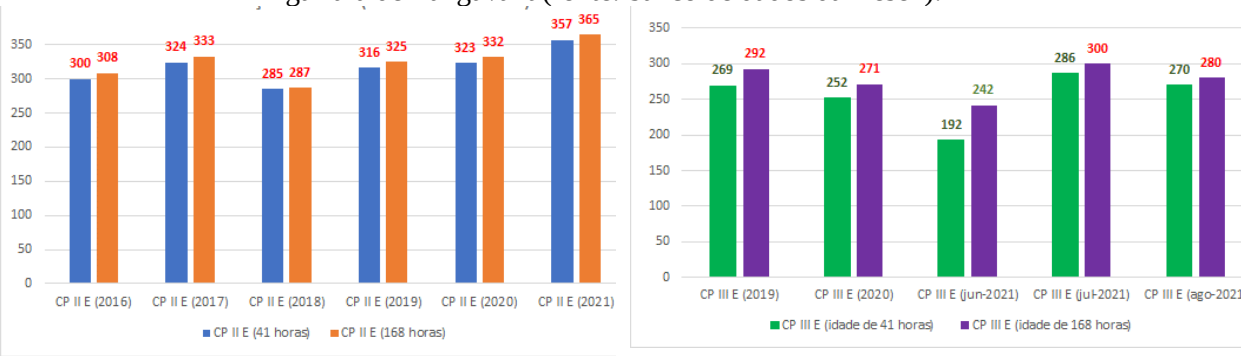
3.1 Investigações em Laboratório

Para diminuir as temperaturas internas dos concretos deve-se optar por cimentos de baixo calor de hidratação, além de avaliar qual o seu consumo no traço para atender as resistências mecânicas especificadas em projeto. As reações químicas exotérmicas que ocorrem após o contato do cimento com a água são denominadas reações de hidratação e a solubilidade de cada uma das fases constituintes, área específica e reatividade das fases do clínquer são fundamentais no desenvolvimento das propriedades deste ligante hidráulico (TAYLOR, 1998; CINCOTTO, 2011). Quanto maior for a reatividade das fases mais rapidamente é iniciada a interação e formação dos produtos hidratados, como também, quanto maior a área superficial maior é o contato entre a água e o cimento, com favorecimento da taxa de reação. Quanto maior for a temperatura e/ou pressão do meio maior será a velocidade das reações de hidratação.

A evolução destas reações durante o processo de mistura e endurecimento de materiais cimentícios, pode ser quantificada pelo calor liberado e/ou pelo ganho de massa pela formação dos compostos hidratados. As curvas de calor de hidratação indicam a quantificação global no calorímetro em relação ao conjunto de reações químicas que ocorrem para cada fase do cimento.

Através dos calorímetros isotérmicos, semi-adiabáticos e adiabáticos é possível determinar as curvas de calor em função do tempo para amostras de pastas, argamassas e concretos, dependendo do tipo e dimensões do calorímetro. Geralmente, os ensaios são realizados através de calorímetro semiadiabático pelo método da garrafa de Langavant segundo a NBR 12006 (ABNT, 1991) sendo, na maior parte das vezes, realizado com pouca frequência por ter poucos laboratórios com este tipo de equipamento. Através da curva de calor de hidratação é possível calcular a elevação da temperatura adiabática do concreto (FURNAS, 1997; BOFANG, 2014). A Figura 5 mostra ensaios de calor de hidratação dos cimentos comerciais CP II E e CP III E realizados nos últimos anos no laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) em São Paulo, SP. Através da Figura 5 nota-se que o cimento CP II E não pode ser classificado como cimento de baixo calor de hidratação, porque na idade de 41 horas o calor é superior ao limite de 270 J/g conforme preconizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018) e EN 197-11 (BS, 2011). A partir destes dados nota-se um aumento do calor de hidratação deste tipo de cimento de até 19%, aproximadamente, entre os anos de 2016 e 2021. Apesar do cimento composto com escória CP III E ser classificado como de baixo calor de hidratação, na idade de 168 horas o calor acumulado determinado por este método é superior ao limite normativo, excetuando-se o ensaio realizado em junho de 2021.

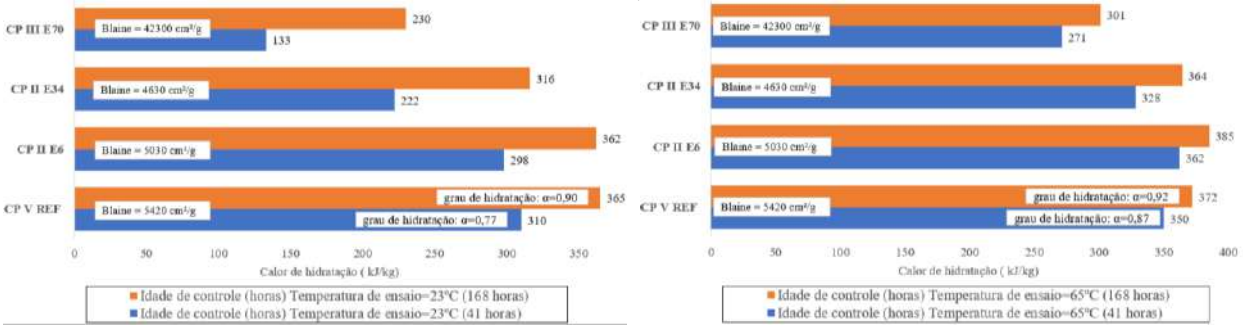
Figura 5 – Calor de hidratação dos cimentos CP II E (2016-2021) e CP III E (2019- 2021) - Método da garrafa de Langavant (fonte: banco de dados da Desek).



Através de ensaios realizados em calorímetro isotérmico (ASTM 1702) é determinado o fluxo de calor e calor acumulado para amostras de pastas e argamassas e a temperatura durante o período de ensaio é constante. A evolução das reações hidratação determinada através de calorímetros isotérmicos não representa fidedignamente o que ocorre na prática em estruturas em concreto massa, onde o desenvolvimento das propriedades mecânicas ocorre em condições semiadiabáticas e não isotérmicas. Através de estudos realizados por Funahashi (2018), os cimentos com adição de escória de alto forno apresentam comumente um perfil de fluxo de calor determinado através de calorímetro isotérmico com dois picos de aceleração quase superpostos, onde o primeiro deve-se a hidratação do clínquer (especificamente a fase C_3S) e o segundo à escória por ser de hidratação mais lenta que o clínquer. A pozolana reage de forma mais lenta em função da sua mineralogia, com diâmetro de partículas maiores quando comparados com as partículas do cimento de referência sem adição adotado nesta pesquisa. O hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando está adicionada ao cimento. Dependendo do seu teor na fabricação reduz o calor de hidratação e, respectivamente, o potencial térmico do traço de concreto quando da sua utilização. A Figura 6 mostra a influência da substituição parcial do

cimento Portland CP V REF por diferentes teores de escória de alto forno variando de 6% (CP II E6) até 70% (CP II E70) a partir de determinações através de calorímetro isotérmico para diferentes temperaturas constantes de ensaio. O autor mostrou que quanto menor for o teor de adição de escória no cimento maior é a sua área específica e, maior é o seu calor de hidratação. A partir dos testes constatou-se que o calor de hidratação do cimento CP II E6, limite mínimo permitido pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), é praticamente o mesmo do cimento CP V REF sem adição. O mesmo tipo de cimento CP II 34, com teor de escória de 34%, apresentou calor de hidratação 16% menor que o CP II E6, com teor 6 %. Quanto maior a temperatura constante adotada no ensaio maior é o grau de hidratação e maior é a taxa de hidratação do cimento. A Figura 6 mostra os resultados dos ensaios através de calorímetro isotérmico.

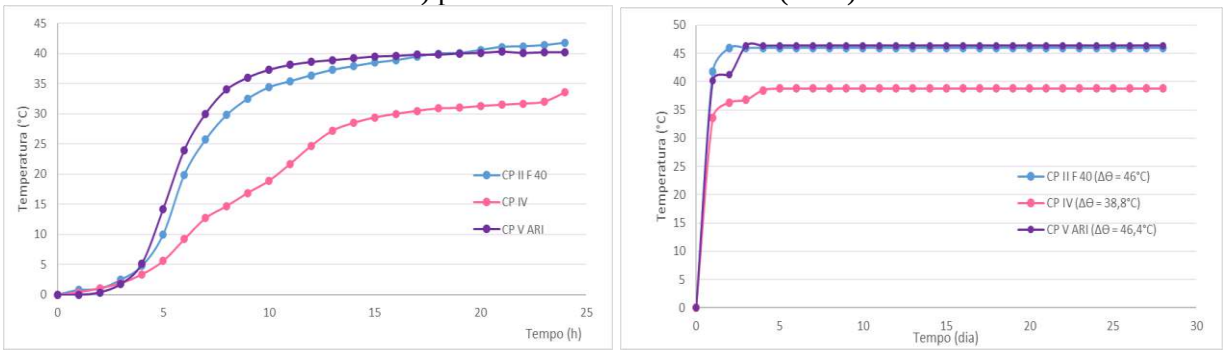
Figura 6 – Calor de hidratação dos cimentos determinado a partir de calorímetro isotérmico com temperaturas de ensaios iguais a 23ºC (a) e 65ºC (b) segundo a ASTM 1702 (adaptado de Funahashi, 2018).



Nesta pesquisa também foram realizados ensaios pelo método da garrafa de Langavant, onde o cimento CP V REF apresentou calor de hidratação acumulado igual a 317 J/g e 319 J/g nas idades de 41 e 168 horas. Para os ensaios realizados com o cimento de referência pelo método da garrafa de Langavant, realizado no laboratório da ABCP, e calorímetro Heatbox (estudo explorário), no laboratório do IPT (Instituo de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo), em argamassas, apresentaram máximas temperaturas de ensaio iguais 59ºC e 72ºC, com resultados de calor de hidratação máximo acumulado iguais a 319 J/g e 332 J/g, respectivamente, para o mesmo traço de argamassa. Apesar de ser possível realizar ensaios através do Heatbox em concretos (molde da amostra com dimensões de 15 cm x 30 cm), devido ao período da pesquisa e prazo de licença do software acoplado ao calorímetro Heatbox não foi possível realizar ensaios em concretos. Através da utilização deste calorímetro e determinação do coeficiente de perda de calor do equipamento é determinado o calor de hidratação em função da maturidade e mais próximo das condições verificadas nas estruturas de concreto massa. O grau de hidratação (α) determinado para cada um dos métodos é de 79% (método da garrafa de Langavant normatizado) e 83% (estudo exploratório-Heatbox), em relação ao calor total do cimento calculado através da equação de Bogue considerando os teores de C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF, SO_3, Ca livre e MgO do cimento, resultando em H_{cem}=404,4J/g (BOGUE, 1950; SCHINDLER AK, 2002; POOLE, 2007). As composições mineralógicas das amostras anidras do cimento CPV REF foram determinadas pelo laboratório de microestrutura do IPT a partir de difração de raios-X, aplicando-se refinamento pelo método de Rietveld. As maiores contribuições de calor devem-se aos teores de C_3A e C_3S. Os ensaios realizados com o calorímetro isotérmico nas temperaturas constantes de ensaio de 23ºC, 44ºC e 65ºC, apresentaram resultados máximos de calor acumulado iguais a 365 J/g (α=90%), 360 J/g (α=89%) e 372 J/g (α=92%), respectivamente. O grau de hidratação determinado através do calorímetro isotérmico é 10-13% maior que àquele determinado pelo método da garrafa de Langavant e 6-9% maior que o calorímetro Heatbox (FUNAHASHI, 2018).

A determinação da elevação adiabática da temperatura de concretos pode ser realizada através de calorímetros adiabáticos (FURNAS, 1997; NBR 12819; GAMBALE *et. al.*, 2004) onde é possível monitorar o aumento de temperatura para uma amostra com os consumos e materiais constituintes do traço de concreto. Através deste ensaio é possível definir índices de eficiência térmica ºC/kg/m³ e/ou rendimento térmico do traço (ºC/MPa) sendo possível adotar o traço do concreto massa com menor potencial térmico. Através de sensores térmicos (ou termopares) instalados no seu interior, a água no seu entorno e que funciona como material isolante muda a sua temperatura concomitantemente com a elevação da temperatura do concreto da amostra. Como existem poucos laboratórios que realizam este ensaio, são realizados com menor frequência para os concretos de edificações e obras distantes destes laboratórios. Gambale (2017) analisou os resultados de elevação adiabática para três tipos de cimento (Figura 7), onde percebe-se que os cimento CP II F-40 e CP V-ARI apresentaram temperaturas máximas muito próximas, porém o ganho de temperatura do cimento CP V-ARI foi mais rápido quando comparada com os cimentos CP II F 40 e CP IV. Já o cimento CP IV apresentou a menor temperatura máxima, conforme já era esperado no trabalho, uma vez que ele possui menor teor de clínquer na sua fabricação, em relação aos outros tipos, que contribui para redução da temperatura durante as reações de hidratação.

Figura 7: Resultados de elevação adiabática para cimento CP II F-40, CP IV e CP V ARI: a) por 24 horas; b) por 28 dias. Fonte: Gambale (2017)



Na maioria das vezes são disponibilizados pelos fornecedores de concreto e fábricas de cimento ensaios de calor de hidratação semiadiabáticos pelo método da garrafa de Langavant defasados e que influenciam diretamente na estimativa do aumento da temperatura do concreto independentemente do tipo de estudo e/ou análise térmica a ser realizada. Quando não há informações disponíveis sobre as propriedades térmicas e mecânicas do concreto, alguns parâmetros podem ser estimados a partir de dosagens experimentais, monitoramento das temperaturas de protótipos feitos em obra e realização de retroanálises através de modelagem matemática (GAMBALE, 2017; GAMBALE, *et al.*, 2021).

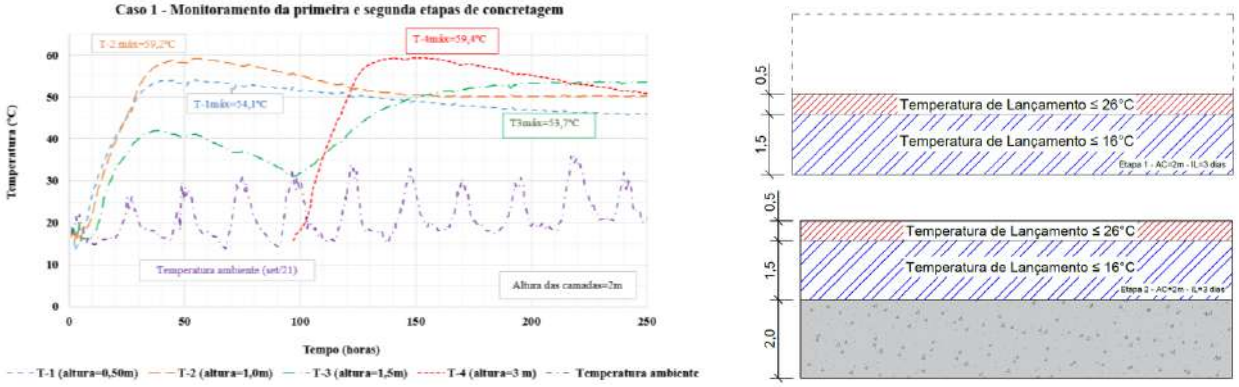
3.2 Investigações em Campo

3.2.1 Estudo de Caso 1 – f_{ck}=50 MPa (CP III E)

A partir dos cálculos térmicos realizados para a definição do plano executivo do bloco de fundação com 11 m de largura, 19 m de comprimento e 4 m de altura e volume de 840 m^3, concluiu-se que não seria possível a sua execução em única etapa de concretagem mesmo utilizado cimento de baixo calor de hidratação, idade de controle da resistência aos 63 dias e pré-refrigeração do concreto com gelo. Para não impactar no cronograma da obra foi definida a melhor estratégia com base em hipóteses executivas com o menor intervalo de lançamento através de modelagens matemáticas adotando o traço de concreto a ser empregado, detalhes intrínsecos ao projeto,

condições ambientais locais da época da construção e características logísticas da obra. A sua execução foi realizada em duas etapas com altura das camadas de concretagem iguais a 2 m e intervalo de lançamento de 3 dias, entre elas. Para o estudo térmico foi considerado o traço de concreto com f_{ck}=50 MPa, E_{cs} = 37 GPa, consumo de cimento de 378 kg/m³ e consumo de sílica ativa de 28 kg/m³, além do ensaio atualizado de calor de hidratação do cimento CP III E. A partir dos estudos térmicos foi definido o zoneamento de temperaturas de lançamento do concreto fresco com substituição parcial da água por gelo para as duas etapas de concretagem. As quantidades de gelo a serem empregadas no concreto para atingir as temperaturas de lançamento especificadas foram definidas através de cálculo do balanço térmico considerando o traço de concreto e características térmicas dos materiais. As concretagens foram realizadas no mês de setembro de 2021 no sudeste do Brasil e a temperatura ambiente variou de 15 até 35ºC, aproximadamente, conforme monitoramento realizado. Para o monitoramento térmico do concreto das duas etapas foram instalados oito termopares imersos no concreto, por etapa, além do monitoramento das temperaturas ambiente com leituras programadas a cada 30 minutos através da utilização de equipamento datalogger. A Figura 8 mostra monitoramento térmico das camadas de concretagem do caso 1 e o zoneamento de temperaturas de lançamento definido previamente através de cálculos térmicos.

Figura 8: (a) Monitoramento da primeira etapa de concretagem do caso 1 e (b) zoneamento das temperaturas de lançamento do concreto fresco definidas através de estudos térmicos

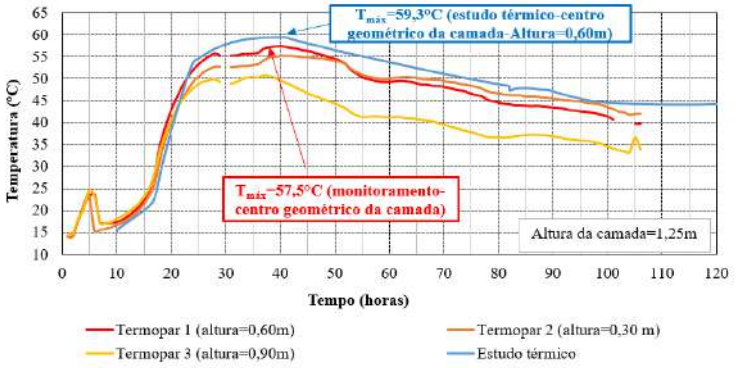


3.2.2 Estudo de Caso 2 – f_{ck}=50Mpa (CP II E)

Em uma obra localizada no sudeste do Brasil foram executados dois blocos de fundação com volumes de 70 m^3 (Bloco A) e 263 m^3 (Bloco B) entre os meses de novembro e dezembro de 2021. O Bloco A de menor volume possui dimensões de base iguais a 6 m x 5 m e altura de 2,5 m e o Bloco B de maior volume possui dimensões de base iguais a 10 m x 7,5 m e altura igual a 3,5 m. O concreto foi especificado com f_{ck} igual a 50 MPa aos 28 dias. Devido as considerações de cálculo do Projetista e desempenho mecânico do cimento CP II E empregado não foi considerado o aumento da idade de controle do f_{ck}. Com base nas características logísticas da obra foram elaborados planos executivos a partir de estudos térmicos considerando dois intervalos de lançamento distintos (3 e 5 dias) de modo a auxiliar a obra na gestão dos prazos executivos naquela época do ano devido as altas temperaturas ambiente e maior probabilidade de chuvas. A execução do menor bloco foi realizada em duas etapas distintas com alturas iguais a 1,25 m, cada. O bloco maior com altura igual a 3,5 m foi executado em três etapas de concretagem, sendo a primeira e segunda camadas executadas com alturas iguais a 1,25 m e a terceira camada com altura igual a 1,0 m. A Figura 9 (a) mostra monitoramento do comportamento térmico da primeira camada de concretagem com altura de 1,25 m do bloco de volume igual 70m³ onde a maior temperatura monitorada foi de 59 ºC. Para a execução das estruturas nesta época do ano as concretagens foram

iniciadas as 5h da manhã, com os controles da pesagem dos materiais e gelo, da determinação da umidade dos agregados, da temperatura do concreto pré-refrigerado na central de concreto. Na obra foram realizados os controles da sua consistência (*Slump*), temperaturas de lançamento do concreto fresco, determinação do teor de ar incorporado e massa específica, além da realização de moldagens de corpos de prova para ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade conforme especificação de projeto. As temperaturas internas forma monitoradas através da instalação de termopares nas alturas de 30, 60 e 90 cm, em relação a sua base, e na seção central da estrutura. A Figura 9 (b) mostra carregamento manual do gelo a diretamente no balão do caminhão betoneira.

Figura 9: (a) Monitoramento das temperaturas internas do concreto da primeira etapa de concretagem (altura da camada igual a 1,25m) do Bloco A (v=70 m^3) e (b) caminhão frigorífico utilizado para armazenamento do gelo e sua adição diretamente no caminhão betoneira.

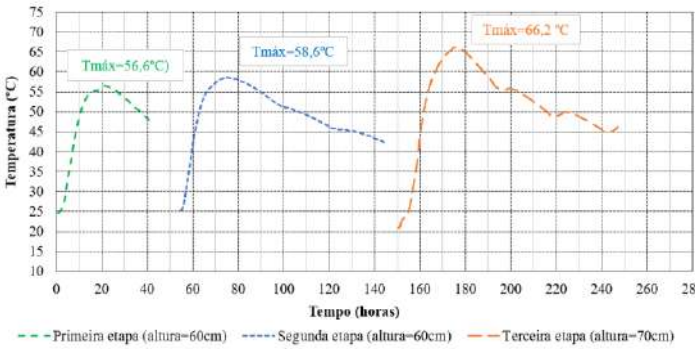




3.2.3 Estudo de Caso 3 – f_{ck}= 70 MPa (CP II F)

Em obra localizada no centro-oeste do Brasil foi executado radier com dimensões de 20 m x 21 m x 1,9 m com volume total de 798 m³ em agosto de 2021. Foram realizados estudos térmicos previamente a sua execução, empregando o traço de concreto definido à partir de estudos de dosagens prévios focando na redução do consumo de aglomerante, para avaliar a melhor estratégia de execução com menor risco de fissuração. A partir das modelagens matemáticas conclui-se que a sua execução deveria ser realizada em três etapas de concretagem distintas: primeira e segunda camadas de concretagem com altura de 60 cm e a terceira camada com altura igual à 70 cm. Foi adotado intervalo de lançamento de 3 dias, entre elas, para não impactar no cronograma da obra. Para a primeira etapa foi utilizado concreto autoadensável devido a alta taxa de armadura, e com consumo de cimento igual à 410 kg/m³ e adição de 50 kg/m³ de sílica ativa, resultando em consumo de aglomerante total igual a 460 kg/m³. As camadas seguintes foram executadas com concreto com aditivo superplastificante e consumo de cimento de 380 kg/m³ e adição de 50kg/m³ de sílica ativa, resultando em um consumo de aglomerante igual à 430 kg/m³. Para reduzir as máximas temperaturas no interior do concreto foi empregado concreto pré-refrigerado com substituição parcial da água por gelo. A temperatura de lançamento do concreto foi de 15ºC, aproximadamente, no início da manhã chegando até 24ºC próximo ao meio-dia. O monitoramento térmico do concreto das três etapas de concretagem e vista geral do radier é mostrada na Figura 10.

Figura 10: (a) Monitoramento das temperaturas internas do concreto da primeira, segunda e terceira etapas de concretagem e (b) vista geral da estrutura do radier





4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho traz informações importantes no que diz respeito as técnicas utilizadas para controlar a elevação da temperatura interna do concreto massa das estruturas visando atender os limites máximos de temperatura para evitar problemas futuros na estrutura. A partir dos estudos realizados em laboratório, estudos de casos de três obras distintas com resistência à compressão de 50 MPa e 70 MPa com traços confeccionados com diferentes tipos de cimento e estudos térmicos foram elaboradas diferentes estratégias para controlar a elevação da temperatura do concreto e minimizar o risco de fissuração, a seguir:

- Com base nos ensaios realizados em laboratório em pastas (calorímetro isotérmico), argamassas (método da garrafa de Langavant) e concretos (calorímetro adiabático) foi possível observar a influência dos diferentes tipos de cimento no calor de hidratação e elevação adiabática do concreto. Os cimentos pozolânicos e com maior teor de escória de altor forno apresentaram baixo calor de hidratação sendo preferível a sua utilização na execução destas estruturas. Na falta deste tipo de cimento na região da obra, é possível utilizar cimentos de calor de hidratação maior desde que sejam realizados ensaios prévios com este tipo, além do uso de adições pozolânicas que possibilitem a redução do seu consumo no traço e respectiva geração de calor no concreto.
- Para os casos estudados foram empregados os cimentos disponíveis na região da obra: CP III E (caso 1), CP II E (caso 2) e CP II F (caso 3). Em todos os concretos dos casos apresentados foi empregada adição pozolânica (sílica ativa), disponível na região da obra, como substituição parcial do consumo de cimento para reduzir a geração de calor na estrutura e aumentar a sua durabilidade durante a vida útil da estrutura.
- A realização de dosagens experimentais prévias foram importantes para reduzir o consumo de cimento concreto através da utilização de aditivos químicos, além de ser possível avaliar o desempenho dos diferentes concretos pré-refrigerados com substituição parcial da água de amassamento por gelo no laboratório.
- Após a definição das dosagens dos diferentes concretos, os planos executivos foram previamente definidos a partir de estudos térmicos através de modelagens matemáticas. Em todos os casos estudados, independentemente do volume da estrutura, houve a necessidade da subdivisão da sua execução em mais de uma etapa considerando menor altura da camada de concretagem, além do emprego de concreto pré-refrigerado.
- A estrutura executada com traço de concreto com cimento CP II E (caso 2) e f_{ck}=50 MPa foi dividida em duas etapas de concretagem (Bloco A, altura de 2,5 m) com volume de 35 m^3, cada. O Bloco B, de altura igual a 3,5 m e volume pouco inferior a 300 m^3, foi executado em três etapas de concretagem. Para este bloco foram executadas camadas de

concretagem com altura máxima de 1,25 m e, apenas a terceira camada do Bloco B foi executada com altura igual a 1 m.

- O caso 3, onde foi empregado traço de concreto com utilização de cimento CP II F e f_{ck}=70MPa houve a necessidade de divisão da sua execução em três etapas de concretagem com camadas de altura inferior a 1 m.
- Apenas no caso 1 com utilização de cimento CP III E, com menor calor de hidratação, foi possível executar a estrutura em duas camadas de concretagem com altura de 2 m e superior aos casos 2 e 3, onde foram empregados concretos com utilização de cimento CP II E e CP II F de maior calor de hidratação.
- O monitoramento das estruturas dos diferentes casos foi fundamental para avaliar o comportamento térmico da estrutura, onde mostrou que as temperaturas máximas atingidas foram de 59,4°C, 59,3°C e 66,2°C, nos casos 1, 2 e 3, respectivamente. As máximas temperaturas verificadas nas estruturas dos casos 1 e 2 e primeira e segunda camadas do caso 3 foram inferiores aos limites de 60-65 ºC. Para o caso 3, as temperaturas máximas da terceira etapa de concretagem foi pouco superior (1,2 ºC) ao limite especificado de 65ºC. Em todos os casos os dados de monitoramento das temperaturas confirmaram as estratégias adotadas para controle da elevação da temperatura interna do concreto resultando em menor risco de fissuração de origem térmica e eventual formação de etringita tardia (DEF).

O levantamento de dados apresentado pelo trabalho mostra a importância de se ter conhecimento dos fenômenos deletérios ocasionados pelas altas temperaturas internas do concreto massa de elevada resistência, bem como das estratégias e medidas preventivas que podem ser adotadas ainda na fase inicial do projeto bem como o controle da sua execução.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 301-20: **Specifications for Concrete Construction**. **ACI Commitee 301**. 69 p., 2020

___. ACI 305.1-14: **Specification for hot weather concreting**, 7p., 2020.

___. ACI-207.1-21: **Mass Concrete - Guide. ACI Committee 207**, 34p., ISBN: 9781641951715, 2021.

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**, 2017.

ANDRIOLO, F. M., SKWARCZYNSKI, T., M.. **Concreto pré-refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos**, Grapho, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12006: **Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant**, Rio de Janeiro, 1991.

___. NBR 128189: **Concreto e argamassa - Determinação da elevação adiabática da temperatura - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

___. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**, Rio de Janeiro, 2018.

BOFANG, Z.. **Thermal Stresses and temperature control of mass concrete**. China Institute of Water Resources and Hydropower Research and Chinese Academy of Engineering. ISBN: 978-0-12-407723-2, 2014.

BOGUE, R.H. **Chemistry of Portland Cemen**t.New York, Reinhold, 1955.

BRITISH STANDARD . EN 197: **Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements**, 2011.

CINCOTTO, M. A. **Reações de hidratação e pozolânicas**. In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed. São Paulo: Ibracon, p. 381-p.412., 2011.

FUNAHASHI JR., E. I, GRAÇA, N. G., KUPERMAN, S. C.. **Belo monte Hydropower Plant - Temperatures and thermal stresses analysis of the intake**, In: Third International Dam World, pp. 17-21, , **Anais** […]. Foz do Iguaçu, 2018.

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, IPT, São Paulo, SP, Brasil, 2018. Disponível em: https://cassiopea.ipt.br/teses/2018_HAB_Eduardo_Issamu.pdf.

FUNAHASHI JR., KUPERMAN, S. C., BARRETA, A., VICENTE, G. R., GOLDENBAUM, D., BENASSATO, B.. Refrigeração do concreto na construção da base da chaminé da fábrica Eldorado Celulose, In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais** [...], 2012

FUNAHASHI JR., KUPERMAN, S. C., ROSSINI, D. Simulação de tensões térmicas do bloco de fundação do edifício Paulista Corporate. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais** [...]. Florianópolis, SC: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

FUNAHASHI JR., KUPERMAN, S. C., VICENTE, G. R., SOBRINHO, F., VALTORTA, R. Práticas recomendadas para execução do bloco de fundação do edifício Grande Ufficiale Evaristo Comolatti. In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu, PR: Instituto Brassileiro do Concreto, 2018.

FURNAS. **Concretos: Massa, estrutural, projetado e compactado com rolo. Ensaios e propriedades.** Editor: Pacelli W. A., PINI, São Paulo, 1997.

GAMBALE, E. A. Avaliação da temperatura máxima em estrutras executadas com concreto massa In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015. **Anais** [...]. Bonito, MS: Instituto Brasileiro do Concreto, 2015.

GAMBALE, E. A.SOUZA, M. A. A.; BITTENCOURT, R. M.; BOTASSI, S. S. Avaliação do ensaio de elevação adiabática do concreto massa com base em um novo calorímetro. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004. **Anais** [...]. Florianópolis, SC: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.

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, P. G., GAMBALE, E. A., S. C., HASPARYK, N. P. **Modelagem e retroanálise do comportamento térmico do concreto em protótipo e fundação in loco**, Revista Concreto & Construções, vol. 103, pp. 55-60, 2021

GAMBALE, P. G.; GAMBALE, E. A.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF. In: 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2019**. Anais** [...]. Fortaleza, CE: Instituto Brasileiro do Concreto, 2019.

HASPARYK, N. P., KUPERMAN, S. C., **Reações expansivas deletérias no concreto**, Revista Concreto & Construções, vol. 102, pp. 60-66, 2021

HASPARYK, N. P., SCHOVANZ, D., KUPERMAN, S. C., **Instrução Técnica nº. GSTE004R0 – Método de ensaio para a avaliação do potencial de ocorrência da etringita tardia (DEF) em concreto**, 2020.

HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. F. M. **Instrução Técnica n° DSBE001 - SDT - Método de ensaio para a determinação do Índice de Dano de Rigidez (SDI) e Índice de Deformação Plástica (PDI) em concretos**, 2021.

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

POOLE, J.L., RIDING, K.A., FOLLIARD, K.J., JUENGER, M.C.G., & SCHINDLER, A.K. **Methods for Calculating Activation Energy for Portland Cement.** ACI Materials Journal,vol. 104, Issue 1. pp 303-311, 2007.

SCHINDLER, A.K. **Concrete hydration, temperature development, and setting at early ages**. PhD Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX, 2002.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. Ed. London: Thomas Telford, 459p., 1998.

TECOMAT ENGENHARIA. **Cuidados na execução de de fundações em concreto-massa: edificações verticais**. J, R. De Carvalho. 55p. Ed. Recife, Tecomat Engenharia, 2020.

TIECHER, F., LANGOSKI, M., HASPARYK, N. P.. **Behavior of mortars with different types of cement when induced to Delayed Ettringite Formation (DEF)**, Revista ALCONPAT, vol. 11 (3), pp. 1-16, 2021., 2021.

VICENTE, G. R., KUPERMAN, S. C., FUNAHASHI JR., E. I.. Fissuração de origem térmica em blocos de fundação: quando refrigerar o concreto?, In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais** [...]. Natal, RN: Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.