



Estruturas de pequenos volumes em concreto massa

Small volumes structures in mass concrete

Caio Farinacio* (1); Selmo Kuperman (1); Eduardo Funahashi Jr. (1); Thomas Kuninari (1)
Grazielle Vicente (1)

(1) *Engenheiro Civil, DeseK*
**caio.farinacio@deseK.com.br*

Resumo

Concreto massa é definido como qualquer estrutura com características suficientes para requerer que sejam tomadas medidas a fim de enfrentar a geração de calor oriunda da hidratação do cimento. É sabido que uma das manifestações patológicas mais observadas em concreto massa é a fissuração de origem térmica, que ocorre quando a tensão de tração resultante da variação de volume devido ao resfriamento do concreto supera a resistência à tração do material. Outra manifestação patológica que pode ser potencializada pela alta temperatura nas estruturas de concreto massa é a formação da etringita tardia ou DEF (*Delayed Ettringite Formation*). Esta reação química e expansiva ocorre lentamente no concreto durante anos e promove a perda da sua resistência mecânica devido ao estado de fissuração na estrutura, resultante de esforços internos de tração. Devido ao avanço da tecnologia do concreto e concepções estruturais, concretos com resistências maiores e conseqüentemente com maior consumo de cimento estão sendo utilizados, além de cimentos mais finos e reativos, aumentando a geração de calor do concreto. Com isso, é equivocado o pensamento de que estruturas de concreto massa são apenas aquelas de grandes volumes, como visto em construções de barragens, por exemplo, ou estruturas de fundações de edifícios altos. A elevada geração de calor de alguns concretos pode fazer que com a temperatura interna de estruturas com menos de 20 m³ supere os 65°C, tal como os casos apresentados neste trabalho. Tendo em vista que na maioria das vezes não são tomados os devidos cuidados para reduzir a geração de calor durante a execução de estruturas de menor volume, há um risco do aumento de casos com ocorrência de DEF, no futuro, podendo diminuir a durabilidade e vida útil destas estruturas.

Palavra-Chave: Concreto massa. Fissuração de origem térmica. Formação de etringita tardia.

Abstract

Mass concrete is defined as any concrete structure with enough characteristics to require procedures to be taken to deal with heat generation from cement hydration. One of the pathological manifestations most seen in mass concrete is thermal cracking, which occurs when the tensile stress caused by volume variation due to concrete cooling exceeds the tensile strength of the material. Another pathological manifestation that can be potentiated by elevated temperature in mass concrete structures, among other factors, is DEF (delayed ettringite formation), which occurs slowly over the years leading to an increase on internal tensile stresses, promoting the loss of mechanical properties and cracking the structure. Due to advances in concrete technology and structural concepts, concretes with higher strength and with higher cement content are being used, in addition to more reactive cements, increasing the heat generation of the concrete. Therefore, it is a mistaken thought that mass concrete structures are only those with large volumes, as seen in dam constructions, for example, or in buildings foundations. The high heat generation of some concretes can lead the internal temperature of structures with less than 20 m³ (26 yd³) to exceed 65°C, as in some cases presented in this paper. Since in many cases the right procedures are not taken to reduce concrete heat generation on small volumes structures, there is a possibility of an increase in the number of occurrences of DEF, which may reduce those structures service lives through time.

Keywords: Mass concrete. Thermal cracking. Delayed ettringite formation.



1 Introdução

Estruturas de concreto massa não podem ser caracterizadas apenas pelo seu grande volume e maiores dimensões, como existentes em estruturas de barragens, fundações em radier ou blocos, bases de torres eólicas, entre outras. Como exemplo, Fortes *et al.* (2023) mostram o estudo térmico realizado para a concretagem de uma fundação de uma edificação em São Paulo/SP, com volume de concreto de 2987 m³, onde foram especificadas temperaturas máximas de lançamento do concreto fresco pré-refrigerado com gelo entre 15°C e 25°C. Também, Funahashi Jr. *et al.* (2018) mostram os estudos térmicos realizados para uma estrutura do vertedouro da usina hidrelétrica de Belo Monte, no estado do Pará, com volume aproximado de 2383 m³, com o emprego de concreto pré-refrigerado lançado a 25°C. Além da utilização de gelo como substituição parcial da água de amassamento do traço, nestes dois casos houve a necessidade da divisão das camadas de concretagem e definição de um intervalo de lançamento entre elas para reduzir as máximas temperaturas no interior do concreto.

Contudo, a definição de concreto massa não está relacionada à um determinado volume da estrutura, e sim com a probabilidade de ocorrerem problemas oriundos da geração de calor devido às reações exotérmicas da hidratação do cimento, dependendo das dimensões do elemento estrutural. Com base em cálculos térmicos por modelagens matemáticas pelo método de elementos finitos, Vicente *et al.* (2014) verificaram que blocos com volumes de concreto superiores a 22,5 m³ (3 mx3 mx2,5 m) para $f_{ck} = 30$ MPa e 24,3 m³ para $f_{ck} = 40$ MPa poderiam ser considerados como estruturas de concreto massa, devido à possibilidade de fissuração por origem térmica para os parâmetros empregados nestes estudos.

Este trabalho apresenta três casos de concretagens de estruturas com pequenos volumes, de até 20 m³, onde as temperaturas máximas monitoradas por instrumentação foram elevadas aumentando o risco de fissuras de origem térmica, além da eventual formação da etringita tardia (ou DEF, *Delayed Ettringite Formation*).

2 Concreto Massa

Concreto massa é definido como qualquer volume de concreto que possua características suficientes para requerer que sejam tomadas medidas para enfrentar a geração de calor oriunda da hidratação do cimento e minimizar a fissuração originada pela sua mudança volumétrica (ACI COMMITTEE 207, 2022). Com base nisso, qualquer estrutura com dimensões suficientes para dificultar a dissipação deste calor para o seu meio externo pode resultar em elevadas temperaturas do concreto devido ao calor de hidratação e gerar maiores tensões de origem térmica, e reações químicas expansivas deletérias devido à DEF causando a sua fissuração. Caso a DEF ocorra, haverá a redução gradual das resistências mecânicas, durabilidade e vida útil das estruturas de concreto em longo prazo. As dimensões da estrutura, condições ambientais, tipo de lançamento do concreto, velocidade de concretagem, cura, características da dosagem do concreto e principalmente consumo e tipo de cimento influenciam na determinação dos riscos de fissuração do material.

Nos projetos de barragens, onde o volume de concreto das estruturas é expressivamente significativo, o conceito de concreto massa, seus desafios e possíveis manifestações



patológicas são amplamente difundidos. No Brasil, desde 1965 é empregado concreto pré-refrigerado com gelo para a execução destas estruturas, com destaque para a barragem de Itaipu, onde o volume de concreto pré-refrigerado foi de, aproximadamente, 13 milhões de m³ (FUNAHASHI, 2021).

Contudo, não é somente em estruturas de barragens onde há o emprego de concreto massa. Tendo como base a evolução das tecnologias construtivas, incluindo fabricações de cimentos e produção de concretos, torna-se cada vez mais comum a especificação de concretos de alta resistência em estruturas de menor dimensão que demandam um maior consumo de cimento em suas dosagens, na maioria das vezes. Assim, a geração de calor é maior e pode elevar a temperatura interna de diversas estruturas de concreto a patamares superiores à 65°C, aumentando as chances da ocorrência da DEF, no futuro.

A DEF é uma manifestação patológica que pode danificar de maneira severa uma estrutura de concreto. É definida como uma formação de etringita no concreto após seu endurecimento, sem que haja fonte externa de sulfatos, apenas suprimento de água ou umidade. Caso a temperatura no interior do concreto seja superior à 60-65°C, os sulfatos podem ser incorporados a outras fases do cimento e, posteriormente após o endurecimento, se formam cristais de etringita com aumento de volume podendo causar fissuras (MELO, 2010). A DEF é influenciada, além das temperaturas internas do concreto, pela composição química do cimento, do tempo de manutenção das altas temperaturas e das condições de umidade da estrutura durante a sua vida útil. A origem dos sulfatos empregados na reação química origina-se do C₃A e do C₄AF providos pelo cimento e existentes internamente no concreto.

Além do risco de DEF, deve-se avaliar também as tensões de origem térmica atuantes na estrutura. Devido ao calor gerado, ocorre o aumento da temperatura da estrutura e a seguir queda da mesma até o equilíbrio com o meio ambiente. Esta queda de temperatura que ocorre pode originar elevadas tensões de tração que, se superarem a resistência à tração do concreto, resultarão em fissuras que podem ser indesejáveis. A tensão por tração no resfriamento do concreto pode inicialmente ser considerada seguindo a Equação 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

$$\sigma = K_r \times \frac{E}{1 + \varphi} \times \alpha \times \Delta T \text{ [MPa]} \quad (1)$$

em que:

K_r= grau de restrição;

E= módulo de elasticidade;

α = coeficiente de dilatação térmica;

φ = coeficiente de fluência;

ΔT = queda de temperatura ou resfriamento (T_{máxima} - T_{ambiente}).

3 Estudos de Caso

3.1 Caso 1 – Blocos de fundação - São Paulo/SP

Os blocos de fundação do caso 1 (blocos A e B) estão localizados na cidade de São Paulo/SP, e foram executados no mesmo dia em junho de 2022. Neste caso, adotou-se com o aval do responsável pelo projeto estrutural a idade de controle do concreto aos 63 dias, além do emprego de cimento CP III 40 RS, de baixo calor de hidratação, e substituição parcial do cimento por sílica ativa. Estas medidas tiveram o intuito de reduzir a geração de calor do concreto empregado. A dosagem empregada é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Traço de concreto – Caso 1 (blocos A e B).

Características do traço de concreto	
f_{ck} (MPa) ⁽¹⁾	45 aos 63 dias
E_{cs} (GPa)	34
Classe de abatimento	S160 (160 ≤ A < 220 mm)
Agregados graúdos	Britas 0 e 1
Relação água/aglomerante	0,49
Tipo de cimento	CP III 40 RS
Consumo dos materiais constituintes do concreto (kg/m ³)	
Cimento	354
Sílica ativa	25
Areia natural	253
Areia artificial	590
Brita 0	160
Brita 1	902
Aditivo 1 – Polifuncional	3,221
Aditivo 2 - Controlador de hidratação	0,758
Água + gelo	185

Nota:

(1) Idade de controle aos 63 dias.

O bloco A possui dimensões de 1,60 x 4,08 x 2,25 m (Largura x Comprimento x Altura), com um volume teórico de aproximadamente 15 m³, enquanto o bloco B possui dimensões de 1,10 x 2,70 x 1,05 m, com um volume teórico de aproximadamente 3 m³. O concreto foi pré-refrigerado com gelo em substituição parcial da água de amassamento do traço. Para monitoramento da evolução das temperaturas internas, foram instalados sensores tipo termopar no interior das estruturas, conectadas a um *datalogger* para aquisição e armazenamento automático dos dados. A Figura 1 mostra uma vista geral da fôrma dos blocos monitorados, e a Figura 2 mostra a localização dos pontos de monitoramento das temperaturas por termopares.

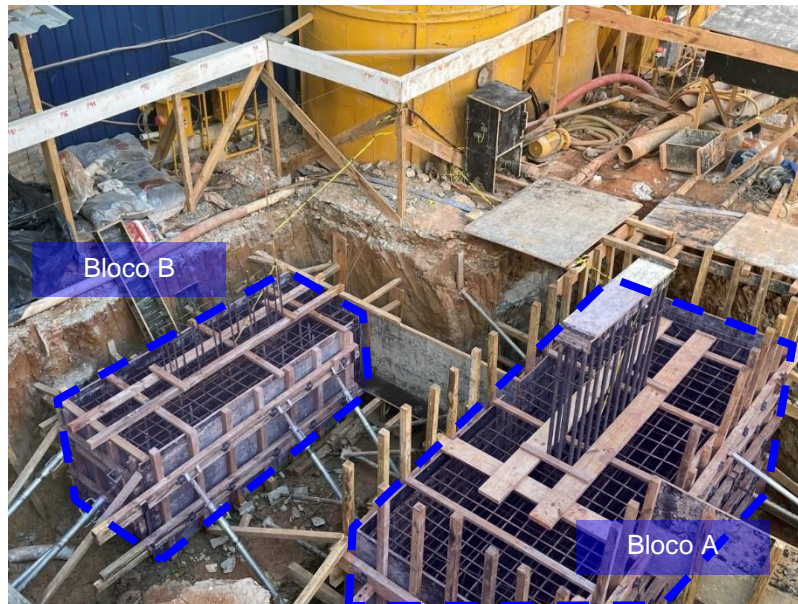


Figura 1 – Vista geral dos blocos concretados – Caso 1.

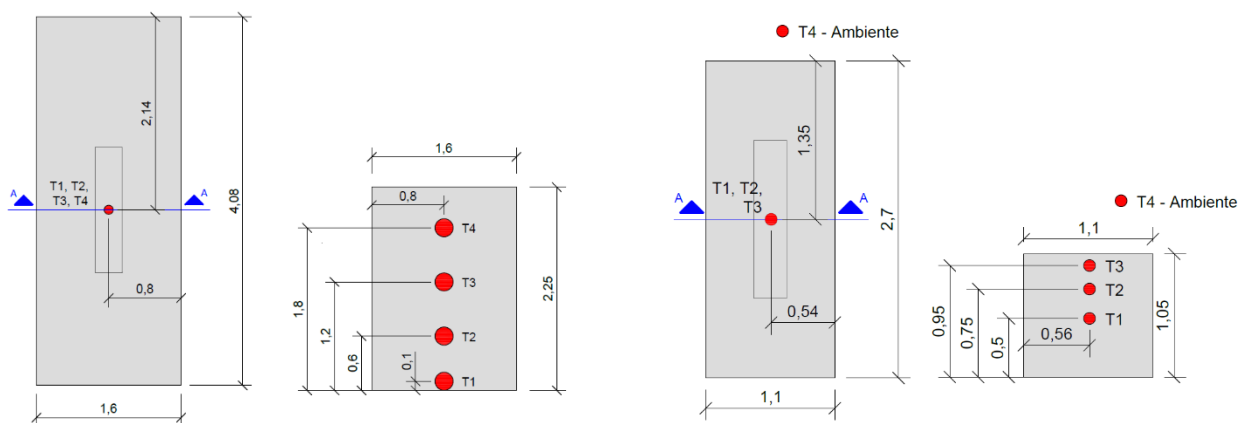


Figura 2 – Localização dos termopares – Bloco A (esquerda) e bloco B (direita) (medidas em metros).

A temperatura média de lançamento do concreto no bloco A, com altura de 2,25 m e volume de 15 m³, foi de 16°C, e a temperatura máxima interna medida foi de 62°C. No caso do bloco B, de 1,05 m de altura e volume de 3 m³, a temperatura média de lançamento foi de 23°C e a temperatura máxima interna de 57°C. A temperatura ambiente no período monitorado variou em 13°C e 26°C, com média em 19°C.

A Figura 3 e a Figura 4 apresentam os gráficos de evolução das temperaturas monitoradas nos blocos A e B, respectivamente.

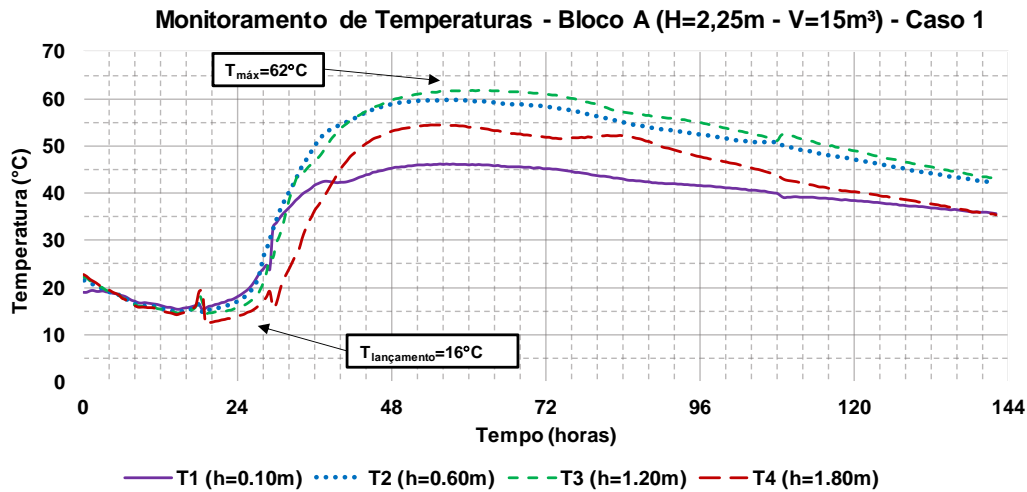


Figura 3 – Evolução das temperaturas internas – Bloco A (H=2,25 m e V=15 m³) – Caso 1.

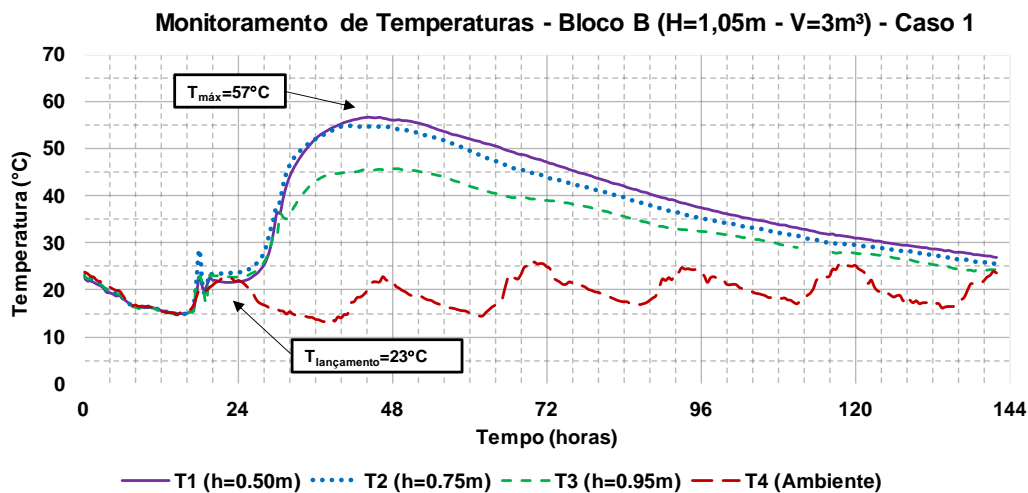


Figura 4 – Monitoramento da evolução das temperaturas do concreto – Bloco B (H=1,05 m e V=3 m³) – Caso 1.

Neste caso, o monitoramento interno das temperaturas dos blocos de pequenos volumes fez parte da avaliação preliminar do concreto utilizado para a concretagem de blocos de maiores dimensões desta mesma obra, incluindo um bloco com volume de 243 m³ e altura de 4,15 m. Com os dados obtidos, foi possível estimar com maior precisão as propriedades térmicas do concreto empregado, tais como a evolução do calor de hidratação, além do seu calor específico e da sua condutividade térmica. Estas propriedades foram posteriormente utilizadas nas simulações computacionais pelo método dos elementos finitos para a definição das temperaturas máximas de lançamento admitidas para o concreto dos blocos de maior volume a serem executados.

3.2 Caso 2 – Viga de transição – São Paulo/SP

A estrutura do caso 2 é uma viga de transição existente entre os pavimentos térreo e tipo, de um empreendimento na cidade de São Paulo/SP, executada no mês de fevereiro de 2022. Neste caso, foi especificado pelo projetista resistência à compressão igual à 45 MPa na idade de 7 dias, o que requereu o desenvolvimento de um traço especial de maior resistência inicial. Neste caso não houve a possibilidade de utilização de um cimento de baixo calor de hidratação, tendo sido empregado o cimento CP II E 40. O traço de concreto empregado é apresentado na Tabela 2

Tabela 2 – Traço de concreto – Caso 2.

Características do traço de concreto	
f_{ck} (MPa)/Idade de 7 dias ⁽¹⁾	45
E_{cs} (GPa)	32
Classe de abatimento	160 ± 30 mm
Agregados graúdos	Britas 0 e 1
Relação água/aglomerante	0,50
Tipo de cimento	CP II E 40
Consumo dos materiais constituintes (kg/m ³)	
Cimento	355
Sílica ativa ⁽²⁾	26
Areia natural	414
Areia artificial	414
Brita 0	154
Brita 1	875
Aditivo 1 – Polifuncional	1,72
Aditivo 2 – Superplastificante	1,33
Água + gelo	170

Notas:

- (1) Idade de controle aos 7 dias;
- (2) Sílica dispersa em água (50% sílica ativa e 50% água).

A viga de transição possui seção transversal de 0,95 x 2,30 m e comprimento de 8,30 m, com um volume teórico de aproximadamente 18 m³. O concreto foi pré-refrigerado com substituição parcial da água de amassamento por gelo. A Figura 5 mostra a localização dos pontos de monitoramento das temperaturas com termopares, a Figura 6 mostra as isotermas providas dos estudos realizados pelo métodos dos elementos finitos, e a Figura 7 mostra a região da viga de transição previamente a sua concretagem.

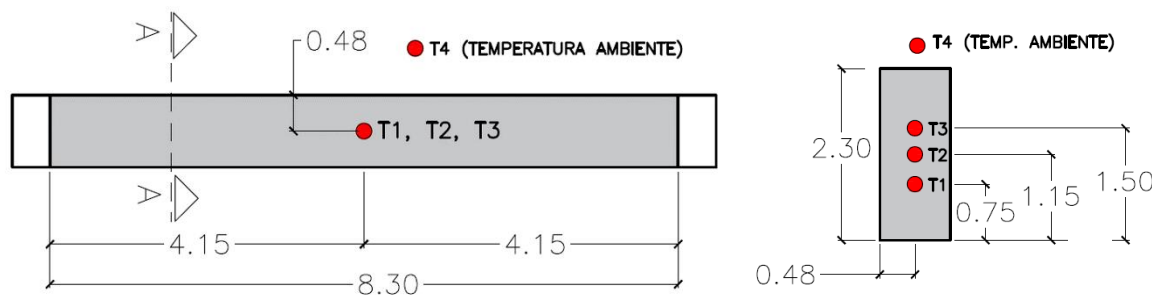


Figura 5 – Localização dos termopares – Viga de transição (medidas em metros).

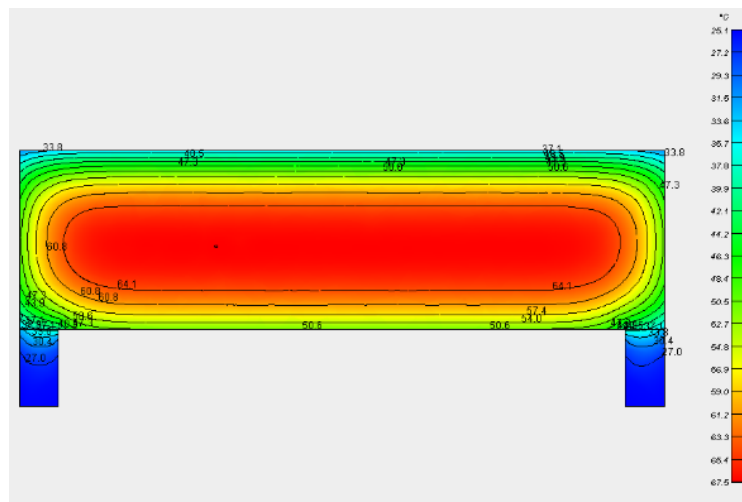


Figura 6 – Isotermas na seção longitudinal da viga de transição a partir dos cálculos de temperaturas em três dimensões pelo método dos elementos finitos (MEF) – 40 horas após o início do lançamento do concreto ($y = 0,47\text{m}$) – Temperatura de lançamento= 25°C .

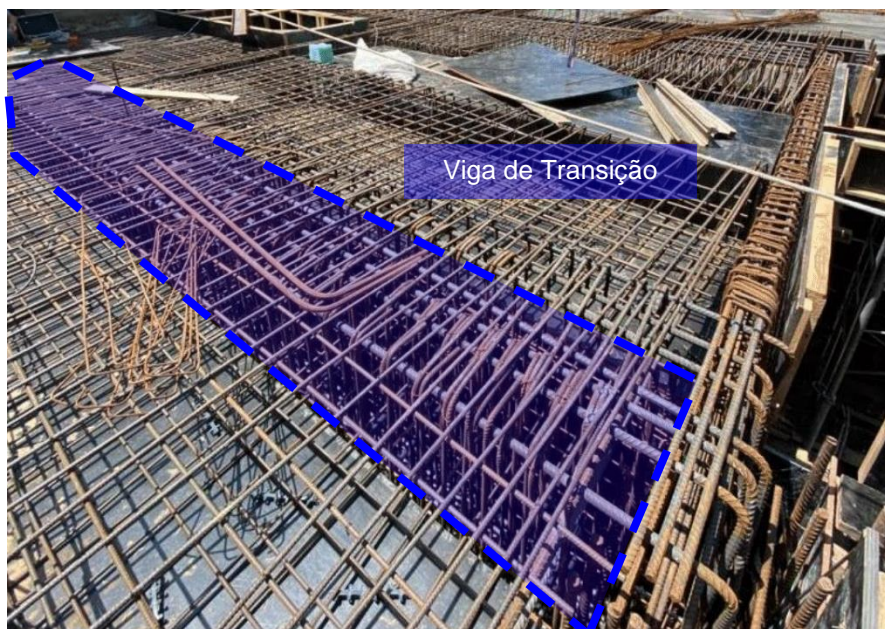


Figura 7 – Concretagem da viga de transição ($0,95\text{ m} \times 2,3\text{ m}$ e volume= 18 m^3) – Caso 2.

Neste caso, percebeu-se que mesmo com a pré-refrigeração do concreto, a temperatura de lançamento foi igual a 26°C , acima do especificado para que o risco da eventual formação de DEF fosse minimizado. Durante o lançamento do concreto, a temperatura ambiente esteve próxima de 30°C . A Figura 8 apresenta o gráfico de evolução das temperaturas internas monitoradas na viga de transição, mostrando que a temperatura máxima atingida foi de 73°C . Durante o período monitorado pelos termopares, a temperatura ambiente variou em 21°C e 35°C , com média em 26°C .

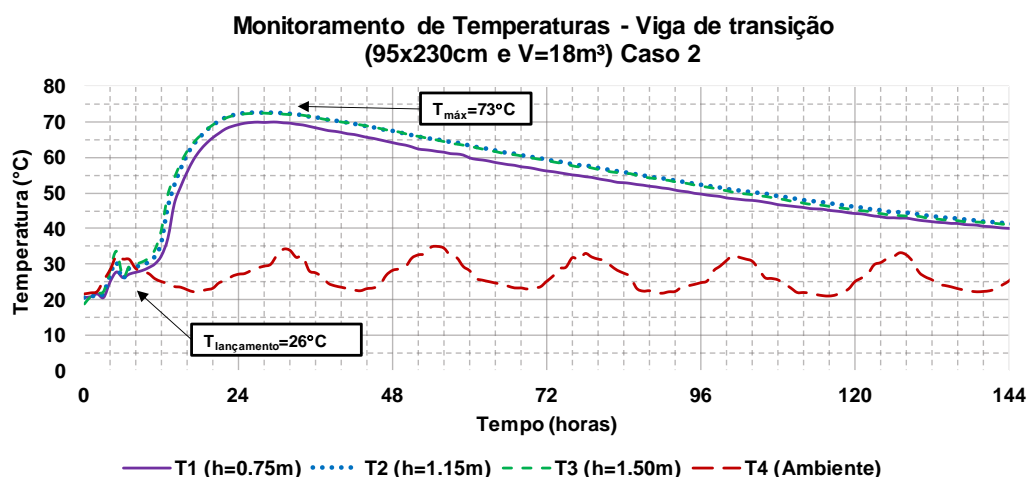


Figura 8 – Monitoramento da evolução das temperaturas no interior do concreto – Viga de transição (0,95 x 2,30 m e volume=18 m³) – Caso 2.

3.3 Caso 3 – Bloco de fundação – Santa Catarina

A estrutura do caso 3 é um bloco de fundação projetado com f_{ck} de 50 MPa de um edifício no interior do estado de Santa Catarina. Neste caso, o projetista inicialmente não permitiu que fosse adotada a idade de controle aos 63 dias e nem a redução do f_{ck} , alternativas que poderiam auxiliar na redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, nos riscos de fissuração. Além disso, a responsável pelo fornecimento do concreto não permitiu que a dosagem fosse previamente estudada e, portanto, não foi possível adotar alternativas para a redução da geração de calor do traço empregado. O traço de concreto disponibilizado pela concreteira e utilizado no caso 3 é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Traço de concreto – Caso 3.

Características do traço de concreto	
f_{ck} (MPa)	50
Classe de abatimento	S100 ($100 \leq A < 160$ mm)
Agregados graúdos	Britas 0 e 1
Relação água/aglomerante	0,45
Tipo de cimento	CP II F 40
Consumo dos materiais constituintes (kg/m³)	
Cimento	440
Areia natural	269
Areia artificial	497
Brita 0	311
Brita 1	727
Aditivo 1 – Polifuncional	5,74
Água + Gelo	200

Não foi disponibilizado o ensaio de calor de hidratação do cimento utilizado pela concreteira e devido ao cronograma da obra não houve tempo hábil para a realização dos estudos térmicos. Tendo em vista que há um histórico de elevado calor de hidratação para cimentos do tipo CP II F, somado ao maior consumo de cimento para o traço proposto, recomendou-se que o primeiro bloco da obra, com dimensões de 2,40 x 5,40 x 2,10 m (Largura x Comprimento x Altura) e volume teórico de 27 m³, fosse executado em duas

etapas de concretagem, com alturas de 1,05 m, cada, com intervalo de lançamento de no mínimo de 72 horas entre elas, além da pré-refrigeração do concreto com substituição total da água do traço por gelo, desconsiderando apenas a umidade dos agregados.

Recomendou-se, ainda, o monitoramento térmico das temperaturas internas das duas etapas de concretagem, com o objetivo de realizar uma avaliação preliminar do concreto a ser utilizado para a concretagem de blocos de maiores dimensões desta mesma obra. A Figura 9 mostra a localização dos pontos de monitoramento das temperaturas através de termopares, executado em maio de 2023.

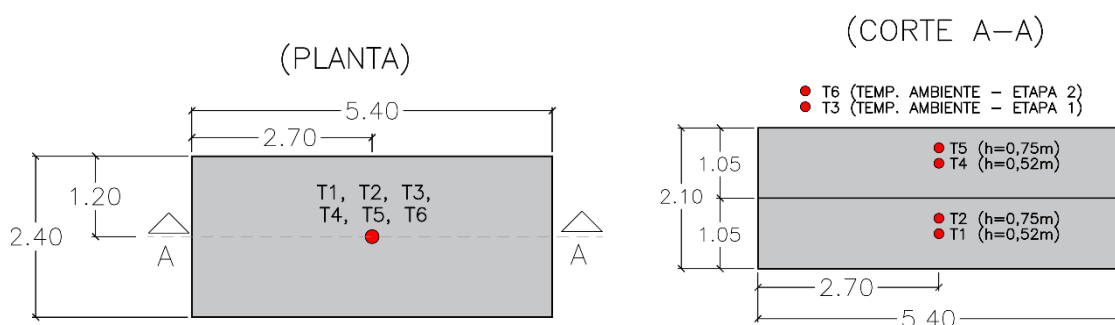


Figura 9 – Localização dos termopares (medidas em metros) – Caso 3.

Notou-se que na 1ª etapa de concretagem a temperatura média de lançamento do concreto foi de 26°C e a temperatura máxima interna foi de 78°C, enquanto na 2ª etapa a temperatura média de lançamento foi de 16°C e temperatura máxima interna foi de 68°C. Percebe-se por meio do monitoramento térmico que na 1ª etapa, a temperatura ambiente esteve próxima de 30°C durante o lançamento do concreto, enquanto na segunda etapa, a temperatura ambiente esteve próxima de 20°C. A Figura 10 e a Figura 11 mostram os gráficos de evolução das temperaturas internas monitoradas na 1ª e 2ª etapas de concretagem, respectivamente.

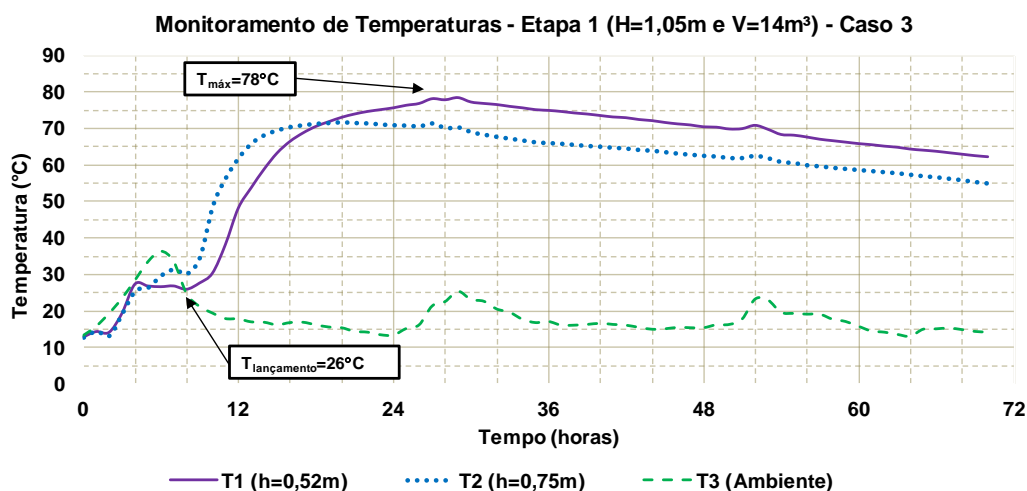


Figura 10 – Evolução das temperaturas internas do concreto – Primeira etapa (Altura=1,05 m e volume=14 m³) – Caso 3.

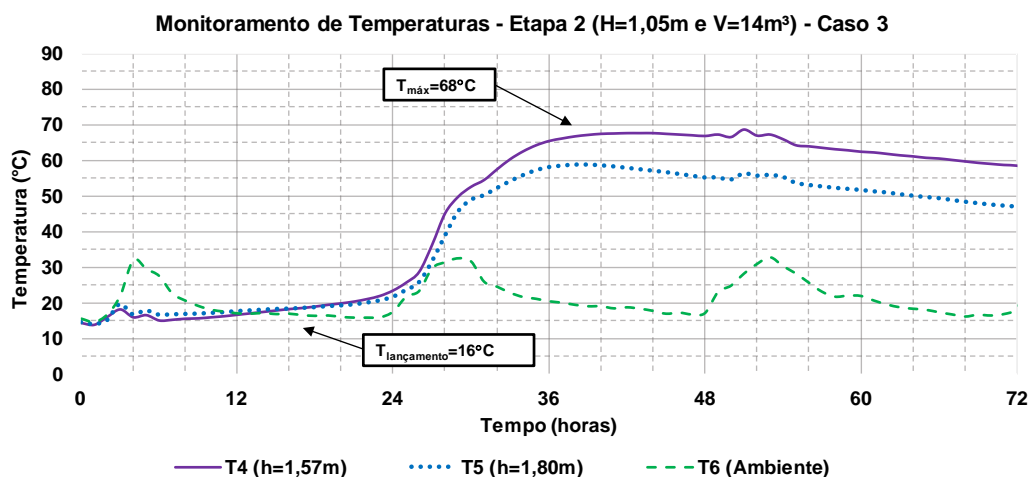


Figura 11 – Evolução das temperaturas internas – Segunda etapa de concretagem (Altura=1,05 m e volume=14 m³) – Caso 3.

Apesar da recomendação de utilização de pré-refrigeração com substituição total da água de amassamento por gelo, notou-se que a 1ª etapa foi executada com temperatura média de lançamento de 26°C, o que resultou em uma temperatura máxima monitorada de 78°C. Já a 2ª etapa de concretagem, com altura de 1,05 m e volume de aproximadamente 14 m³, foi executada com concreto refrigerado a uma temperatura média de lançamento de 16°C, e ainda assim atingiu uma temperatura de 68°C, acima do limite desejado de 65°C.

Após a evidência da altíssima geração do concreto por meio dos monitoramentos térmicos deste bloco, o projetista estrutural aprovou a redução do f_{ck} de 50 MPa para 40 MPa para outros blocos e que ainda seriam executados nesta obra. Desta maneira, a partir de ajuste na dosagem do concreto e da realização de simulações computacionais tridimensionais com os dados obtidos nos monitoramentos, foi possível definir o plano de concretagem para os demais blocos de fundação da obra.

Nesta obra, sete blocos de fundação com alturas entre 1,80 m e 2,40 m e volumes entre 27 m³ e 160 m³ requereram sua execução em duas etapas de concretagem com a utilização de concreto pré-refrigerado com substituição total da água de amassamento por gelo. Constatou-se que caso o f_{ck} de 50 MPa e o traço de concreto inicialmente proposto continuassem sendo empregados, os blocos de maiores volumes e alturas desta obra deveriam ser executados em 3 etapas de concretagem distintas, no mínimo, segundo os cálculos térmicos realizados.

4 Discussão e comentários

A Tabela 4 traz os dados sintetizados dos casos apresentados anteriormente.

Tabela 4 – Síntese dos casos apresentados.

Estrutura	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Blocos de fundação		Viga de transição		Bloco de fundação	
	Bloco A	Bloco B			Etapa 1	Etapa 2
Dimensões (LxCxA) (m)	1,60x4,08x2,25	1,10x2,70x1,05	0,95x2,30x8,30		2,40x5,40x1,05	2,40x5,40x1,05
Volume (m ³)	15	3	18		14	14
f_{ck} (MPa)	45 ⁽¹⁾	45 ⁽¹⁾	45 ⁽²⁾		50	
Tipo de cimento	CP III 40 RS		CP II E 40		CP II F 40	
Traço de Concreto						
Consumo de cimento (kg/m ³)	354		355		440	
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	25		26 ⁽³⁾		-	
Relação água/aglomerante	0,49		0,50		0,45	
Calor de hidratação do cimento (J/g)	41h	168h	41h	168h	41h	168h
	316 ⁽⁴⁾	338 ⁽⁴⁾	357 ⁽⁵⁾	365 ⁽⁵⁾	365 ⁽⁴⁾	369 ⁽⁴⁾
Estimativa de elevação adiabática ⁽⁶⁾ (°C)	50		58		60	
Monitoramento Térmico						
Temp. lançamento (°C)	16	23	26		26	16
Temp. máxima (°C)	62	57	73		78	68
Aumento da temperatura (°C)	46	34	47		52	52
Perda de temperatura para o ambiente (°C)	4	16	11		8	8

Notas:

- (1) Idade de controle aos 63 dias;
- (2) Idade de controle aos 7 dias;
- (3) Sílica dispersa em água (50% sílica ativa e 50% de água);
- (4) Estimado a partir do monitoramento térmico da estrutura;
- (5) Valor de ensaio conforme NBR 12006 (ABNT, 1990);
- (6) Dado estimado a partir do traço, ensaio fornecido de calor de hidratação do cimento utilizado e monitoramento térmico do concreto em estrutura (casos 1 e 3).

Tendo em vista a maior dissipação de temperatura para o ambiente nas estruturas menores, percebe-se que há uma relação entre a perda da temperatura gerada para o ambiente e as dimensões da estrutura, sendo esta influenciada principalmente pela sua menor dimensão. A menor dimensão é a altura no caso dos blocos de fundação (bloco B-caso 1) e a largura no caso da viga de transição (caso 2). Esta relação, no caso de blocos de fundação, é válida principalmente para geometrias que tenham uma área a partir das dimensões em planta de 3,0 x 3,0 m, aproximadamente (Vicente *et al.*, 2014). Ou seja, nestes casos, a altura passa a ser a dimensão mais crítica, inclusive mais que o volume da estrutura.

A Figura 12 mostra uma relação entre a temperatura máxima atingida nas estruturas estudadas e as suas respectivas temperaturas de lançamento.

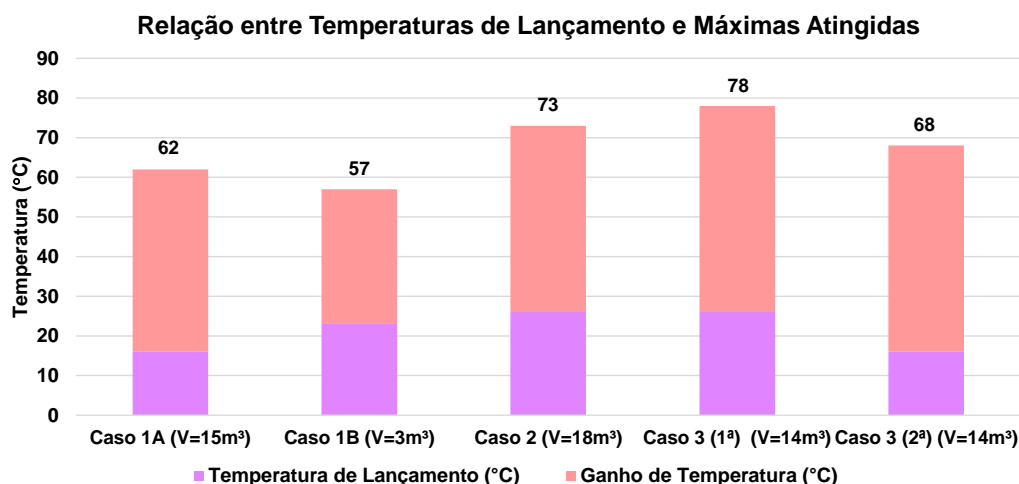


Figura 12 – Relação entre temperatura de lançamento e máximas atingidas.

A temperatura de lançamento do concreto varia em função das temperaturas dos materiais constituintes do traço, temperatura ambiente e da incidência solar nos materiais armazenados. Para efeitos de estudo, estimou-se uma temperatura média de lançamento de concreto sem pré-refrigeração da ordem de 30°C, em uma condição comum de dia quente (verão) para algumas regiões do país. A Figura 13 mostra uma estimativa de que poderiam ter sido as temperaturas máximas no interior das estruturas estudadas caso os concretos fossem lançados com temperatura iguais a 30°C (sem refrigeração – verão).

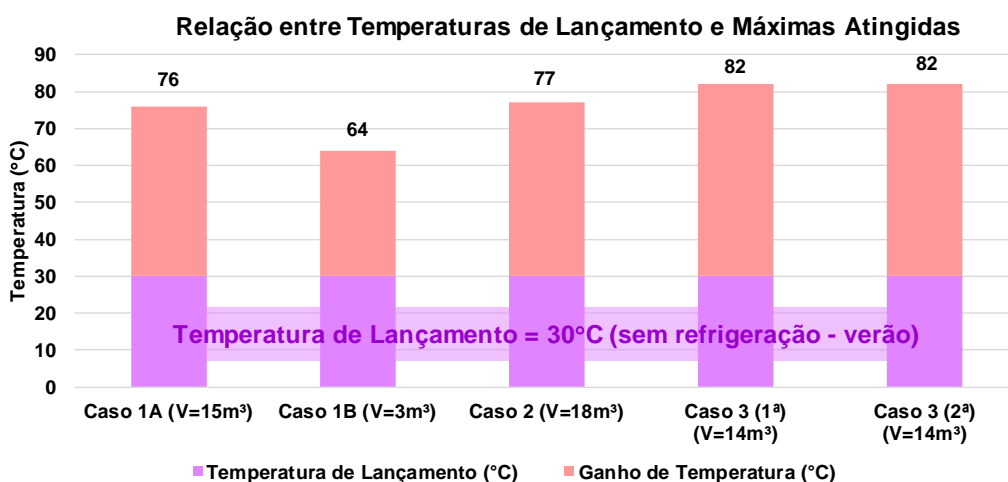


Figura 13 – Relação entre temperatura de lançamento em 30°C e máximas atingidas.

Como o ganho de temperatura está diretamente relacionado à taxa de hidratação do cimento e conseqüentemente à sua temperatura de lançamento, poderia haver variações nestas temperaturas máximas estimadas caso as temperaturas no seu lançamento fossem mais altas.

É possível notar que, considerando o limite de 65°C para aumento da probabilidade de ocorrência de DEF, as estruturas dos casos 2 e 3 apresentam maior risco mesmo com a



utilização de concreto pré-refrigerado com gelo. Partindo para hipótese de não refrigeração dos concretos (Figura 13), com exceção da estrutura B do caso 1, todas as estruturas apresentariam maior risco de formação de DEF, no futuro.

Nos três casos apresentados neste trabalho, a maior criticidade para definição dos parâmetros de controle das máximas temperaturas internas foi o potencial risco de formação da etringita tardia, devido ao elevado calor gerado pelo concreto. No entanto, também foram analisadas as tensões de origem térmica devido ao gradiente ao térmico quando do resfriamento da estrutura. Estas por sua vez não foram elevadas devido às suas menores dimensões e menor restrição da estrutura.

Além das temperaturas máximas internas do concreto, outros fatores devem ser avaliados para determinação do risco da formação da etringita tardia (DEF), como as condições de exposição ambiental, presença de umidade ou água em contato com a estrutura, teores de álcalis do concreto e composição química do cimento.

5 Conclusões

A partir dos dados apresentados, conclui-se que todas as estruturas estudadas podem ser consideradas como de concreto massa por demandarem precauções para controlar o calor gerado pelas reações de hidratação do cimento, mesmo com seus volumes de concreto entre 3 m³ e 18 m³. Isso deve-se principalmente aos valores de f_{ck} especificados, entre 45 MPa e 50 MPa, que demandam dosagens de concreto com maiores consumos de cimento na maioria das vezes.

No caso do bloco de fundação B do caso 1, com volume igual a 3 m³, o risco de formação da DEF poderia ser reduzido caso a temperatura de lançamento do concreto fosse inferior à 30°C. Dependendo do horário da concretagem, as temperaturas ambiente e dos materiais empregados podem ser elevadas, e para atingir esta temperatura de lançamento é necessário o uso de pré-refrigeração do concreto como substituição parcial da água do traço de concreto por gelo.

A partir dos estudos de caso apresentados, evidencia-se a importância da realização de estudos térmicos previamente à concretagem para blocos de pequeno volume e com f_{ck} superior a 45 MPa. De acordo com os estudos realizados, as estruturas de concreto cuja menor dimensão é igual a 0,95 m podem ser considerada como concreto massa. Esta dimensão pode ser ainda menor caso as resistências sejam mais elevadas como verificado por Funahashi *et al.* (2022) onde a temperatura do concreto de uma das etapas construtivas com altura de 70 cm, de um bloco de fundação, superou o limite de 65°C.

Assim, considera-se fundamental que para as estruturas de fundação com concreto de alta resistência, sejam tomadas medidas de modo a enfrentar o calor gerado pelo concreto. Dentre as possíveis alternativas, algumas são citadas por Funahashi *et al.*, (2023), como:

- a) Estudos prévios de dosagens para definição daquela com menor consumo de cimento;
- b) Utilização de cimentos de baixo calor de hidratação;



- c) Aumento da idade de controle da resistência característica (f_{ck}) para 63 ou 90 dias dependendo do tipo cimento a ser adotado;
- d) Zoneamento das classes de resistência do concreto;
- e) Especificação de menor módulo de elasticidade a partir de reavaliação estrutural da projetista estrutural;
- f) Estudos térmicos com o uso de modelagens matemáticas 3D ainda na fase inicial de projeto;
- g) Programação das concretagens para dias com menor temperatura ambiente;
- h) Pré-refrigeração do concreto por meio substituição da água por gelo e/ou com o uso de nitrogênio;
- i) Emprego de água refrigerada no carregamento dos concretos;
- j) Redução da altura e volume da camada de concretagem;
- k) Emprego de pós-refrigeração com a utilização de tubulação embutida no interior da estrutura.



6 Referências

ACI COMMITTEE 207. **Mass Concrete - Guide**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2022.

ANDRIOLO, F.; SKWARCZYNSKI, T. **Concreto pré-refrigerado no Brasil: uma evolução com mais de 20 anos**. Rio de Janeiro: Logos engenharia, 1988.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12006: Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

FORTES, Gustavo Licht; CARIA, Juliano; FUNAHASHI, Eduardo Issamu; KUPERMAN, Selmo Chapira. Fundação em radier de grandes dimensões: projeto estrutural e estudo térmico. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. L, n. 109, p. 25-34, 2023. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2023.109.0002>.

FORTES, Gustavo Licht; CARIA, Juliano; FUNAHASHI JUNIOR, Eduardo Issamu; KUPERMAN, Selmo Chapira. Belo Monte Hydropowerplant - Temperatures and thermal stresses analysis of the intake. In: THIRD INTERNATIONAL DAM WORLD CONFERENCE, 2018, Foz do Iguaçu. **Proceedings of the Third International Dam World Conference**. Foz do Iguaçu: 2018.

FUNAHASHI Jr., Eduardo Issamu. **Concreto Refrigerado**. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/live/l-2lclOaqSs?si=SyLI8XV3-C9XDMWR>. Acesso em 01 de junho de 2023.

FUNAHASHI Jr., Eduardo Issamu; GAMBALE, Patrícia Guedes; OLIVEIRA, Solanda; HASPARYK, Nicole Pagan. Influência do metacaulim na elevação da temperatura e na formação de etringita tardia em compósitos cimentícios. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 1-19, 2022.

FUNAHASHI, Eduardo Issamu; KUNINARI, Thomas Hideki; KUPERMAN, Selmo Chapira; VICENTE, Grazielle Ribeiro; FARINACIO, Caio Farto. Alternativas executivas para controle da elevação da temperatura do concreto massa de edificações. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. L, n. 109, p. 35-42, 2023. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/1809-7197.2023.109.0003>.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo. 2014.

MELO, Sandra Kurotusch de. **Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico por calor de hidratação**. 2010. 1 v. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

VICENTE, Grazielle Ribeiro; KUPERMAN, Selmo Chapira; FUNAHASHI JUNIOR, Eduardo Issamu. Fissuração de Origem Térmica em Blocos de Fundação: Quando Refrigerar o Concreto? In: 56° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2014, Natal. **Anais do 56° Congresso Brasileiro do Concreto**. Natal: IBRACON, 2014. p. 1-16.