PEDRO AURÉLIO OLIVEIRA ROCHA

FATORES INTERVENIENTES NA TEMPERATURA MÁXIMA ATINGIDA POR CALOR DE HIDRATAÇÃO EM BLOCOS DE TRANSIÇÃO - ESTUDO DE CASO

Monografia apresentada no Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Graduação em Engenharia Civil ou Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

Aprovado em: 14/12/2016.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo – Universidade Federal de Goiás (Orientador)

Prof. Dra. Helena Carasek – Universidade Federal de Goiás

Geovanne Caetano – Mestrando do PPG GECON

Atesto que as revisões solicitadas foram feitas:

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo (orientador)

Em: 15/12/2016

Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2016
Outubro / 2016

@ 2016 - IBRACON - ISSN 2175-8182

Fatores intervenientes na temperatura máxima atingida por calor de hidratação em blocos de transição - Estudo de caso

Factors involved in the maximum temperature reached due to hydration heat in transition blocks - Case Study

Pedro Aurélio Oliveira Rocha; Oswaldo Cascudo

(1) Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás

(2) Prof. Dr. Oswaldo Cascudo, Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás

(1) Rua 31-A, n° 126, apt° 503, CEP 74075-470 Setor Aeroporto, Goiânia-GO

Resumo

Com as recentes mudanças no cenário da construção civil, tornou-se comum o uso de blocos do sistema de transição estrutura-fundação com grandes dimensões e executados com concreto de mais alta resistência. Estes elementos se encaixam na definição de concreto massa e exigem conhecimento específico acerca do comportamento térmico e das consequências negativas que o calor de hidratação pode causar à estrutura de concreto, como um quadro de fissuração por retração térmica. Este trabalho estuda a evolução da temperatura em dois grandes blocos de uma edificação residencial em construção na cidade de Goiânia-GO e de outros dois blocos menores na mesma obra, estabelecendo comparações entre os comportamentos de cada um deles em função de diferenças de parâmetros desses elementos estruturais. Dentro desse contexto, os efeitos da redução do consumo de cimento por meio de bolsões e do pré-resfriamento do concreto são avaliados. É estabelecida, ainda, uma curva de correlação entre a temperatura de aplicação do material e o pico de temperatura registrado.

Palavra-Chave: Concreto massa; Calor de hidratação; Retração térmica.

Abstract

With recent changes in Brazil's construction scenario, it has become common to use large dimensions and high strength concrete blocks in building's structure-foundation systems. This type of structural piece fit the mass concrete definition and requires measures to be taken to prevent thermal cracking due to hydration heat. This article studies the temperature evolution in two pairs of mass concrete blocks in a construction site in Goiânia. Also, it stablishes comparisons between the results of blocks casted under different conditions and materials. In this context, it evaluates how much does the cement consumption reduction by using "bags" (described in the article), pre cooled concrete and the ambient temperature affects the temperature peak in the analyzed structural elements. Then, a correlation curve is constructed between the material application temperature and the highest temperature reached in the concrete blocks.

Keywords: Mass concrete; Hydration heat; Thermal cracking.

@ 2016 - IBRACON - ISSN 2175-8182

1 Introdução

Em 2013, o ano mais recente com os dados disponíveis, foi produzido no Brasil mais de 70 milhões de toneladas de cimento Portland dos mais diversos tipos, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013). Dentre os principais contribuintes para esta elevada produção do material, podem ser destacados os atuais edifícios multipavimentos, que cada vez mais se apresentam com maiores alturas. Esses edifícios mais altos implicam em maiores carregamentos atuantes em sua estrutura, já que uma edificação de maior altura e número de pavimentos tem, consequentemente, maior peso próprio, maiores cargas de utilização (no total), ação do vento mais intensa e maior transmissão de momento à fundação.

O suprimento dessa grande demanda por verticalidade somente é possível devido aos grandes avanços, sobretudo nas áreas de tecnologia do concreto e do projeto estrutural. Na primeira área mencionada, pode-se destacar o desenvolvimento de concretos de alta resistência (ou de alto desempenho), permitindo estruturas cada vez mais arrojadas e de maior porte. Some-se isso ao desenvolvimento de concretos fluidos, facilmente bombeáveis e de bombas capazes de vencer desníveis superiores a cem metros. Na segunda área, destaca-se a popularização do uso de *softwares* de extrema precisão, que processam a estrutura com relativa rapidez.

De acordo com Corelhano (2010), uma das alternativas viáveis para conferir rigidez aos esforços horizontais é o uso de núcleos rígidos de concreto. A fim de receber e transmitir estas elevadas cargas ao solo, os sistemas de fundações passaram a ser mais robustos, tornando-se comum em edifícios o uso de blocos de transição em concreto com grandes dimensões, que recebem os esforços do núcleo rígido e os transmitem ao sistema de fundação. Esses elementos de grandes dimensões e executados com concretos de elevado consumo de cimento se encaixam na definição de concreto massa, ou seja, são peças de grande volume nas quais devem ser tomadas medidas para se evitar ou eliminar os efeitos indesejáveis de origem térmica, como a fissuração ou a grande variação dimensional (ACI, 1978).

Quando de seu aquecimento e resfriamento, o concreto, como qualquer outro material, sofre deformações proporcionais ao seu coeficiente de dilatação térmica linear. Essas deformações, no entanto, sofrem restrições, e quando ocorre o resfriamento e tentativa de encurtamento, os impedimentos à sua deformação criam tensões normais de tração no interior do concreto. Quando estas tensões superam a resistência à tração do material ocorre a abertura de fissuras de retração térmica na peça, o que pode comprometer o desempenho estrutural, além da durabilidade, na medida em que permite a entrada de agentes agressivos ao concreto através das fissuras.

Diante desta realidade na qual se torna mais comum, a cada dia, o uso de peças que se enquadram na definição de concreto massa, faz-se necessário o conhecimento em obras civis da problemática que envolve o calor de hidratação, a fim de se evitar os problemas supracitados.

2 Calor de hidratação e fissuras térmicas

De acordo com a NBR 12006 (ABNT, 1990), o calor de hidratação de um concreto é definido como sendo a quantidade de calor liberado pela unidade de massa de cimento, a partir de sua reação com a água de amassamento.

Devido à natureza exotérmica das reações de hidratação que ocorrem no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994), a peça concretada ganha temperatura em sua fase de endurecimento. O ganho de temperatura, dentre outros fatores, é dependente do consumo e tipo de cimento empregado na mistura, temperatura ambiente e de lançamento, além das dimensões e geometria da peça (EQUIPE DE FURNAS, 1997). Quanto maior o consumo de cimento no concreto e mais fino e puro (com menor teor de adições) for o aglomerante, maior será a quantidade de calor liberada na hidratação.

Reduzindo a quantidade de C_3A e C_3S no cimento, consegue-se diminuir o calor de hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994), uma vez que esses dois compostos do clínquer são responsáveis pela maior quantidade de calor liberado (Tabela 1). Esta alteração, no entanto, pode prolongar ou acelerar a pega do cimento (dependendo do teor de gesso), assim como, muito provavelmente, interferirá na resistência inicial do concreto produzido, reduzindo-a. Apesar disso, o controle da quantidade dos compostos do clínquer não é uma estratégia viável em escala industrial de produção. Uma medida adotada de maior viabilidade, em termos do cimento, é a moagem do clínquer em partículas não excessivamente finas (menor superfície específica Blaine), fazendo com que as reações de hidratação não ocorram tão rapidamente como em cimentos mais finos. Outra alternativa muito eficaz é aumentar o teor de adições no cimento (com isso reduzindo-se o teor de clínquer na composição do cimento), seja pela adição de escória de alto forno ou de pozolanas, conjugada à incorporação controlada de fíler calcário.

Tabela 1 – Calor de hidratação dos componentes do clínquer (NEVILLE; BROOKS, 2013)

Composto	Calor de hidratação	
	(J/g)	(cal/g)
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

Quando o concreto encontra-se no estado plástico, o ganho de temperatura provoca deformações proporcionais ao seu módulo de dilatação térmica e surgem, assim, tensões de compressão. Quando ocorre o resfriamento da peça, o material já se encontra na fase elástica com seu módulo de elasticidade desenvolvido. Desse modo, o concreto tende a se contrair e as tensões, outrora de compressão, tornam-se tensões de tração (GAMBALE; TRABOULSI; ANDRADE, 2008).

De acordo com Araújo (2013), a maior temperatura é alcançada no núcleo da peça, sendo o calor gerado conduzido para as superfícies, de onde é dissipado. Segundo Vicente,

Kuperman e Funahashi Jr (2014), as maiores temperaturas atingidas pela peça se encontram entre 30% e 50% da altura da camada, medidas a partir da face inferior. Os autores afirmam, ainda, que as tensões máximas atingidas no interior de um elemento estrutural acontecem na região entre 10% e 40% da altura da camada, ou seja, abaixo do núcleo, na região próxima à fundação. Este comportamento pode ser atribuído à restrição de deslocamentos imposta pelo sistema de fundação ao bloco.

É sabido que o concreto possui pouca resistência à tração (cerca de 10% de sua resistência à compressão); portanto, o surgimento deste tipo de tensão no interior dos blocos pode levar à sua fissuração caso a tensão de tração supere o valor último de resistência à tração do concreto. A fissuração do concreto compromete não só o desempenho estrutural como a durabilidade do material. Num quadro mais grave, de estado tensional crítico, pode ocorrer o seccionamento da peça e o comprometimento do seu funcionamento enquanto elemento monolítico.

De acordo com Melo (2010), em peças curadas sob altas temperaturas e submetidas à elevada umidade, como é o caso de elementos de concreto massa aterrados, estes são fatores determinantes na formação de etringita tardia (*delayed ettringite formation* – DEF). Segundo Taylor (1997), uma faixa de temperatura de 65°C a 70°C em um meio saturado (ou quase) de umidade é suficiente para a formação tardia de etringita. A DEF é danosa para a estrutura de concreto devido à formação de produtos expansivos no interior das peças, que levam à deterioração dos elementos estruturais. Taylor (1997) afirma que a formação de produtos expansivos na pasta de cimento em concretos com DEF é aumentada em temperaturas acima de 70°C e com fissuras pré-existentes.

3 Caracterização dos elementos de transição estudados

O trabalho estudou a concretagem de dois blocos de transição idênticos, ilustrados nas Figuras 1 a 4. O primeiro deles foi executado em setembro de 2015 e o segundo em maio/junho de 2016. Os blocos fazem parte do sistema de transição das estruturas de um empreendimento composto de duas torres de 31 pavimentos e dois subsolos cada, sendo, portanto, cada bloco pertencente a uma das torres.

Figura 1 – Preparação do bloco para receber armação

Figura 2 – Armaçao do bloco

Figura 3 – Armaçao dos pilares no bloco

Figura 4 – Concretagem do bloco

Os blocos em estudo possuem dimensões de 8,60 m x 8,90 m em planta e 1,80 m de altura, o que totaliza um volume de 138 m³ de concreto. Para os pilares da superestrutura (que descarregam nos blocos estruturais), o projeto estrutural especificou um concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 50 MPa. Já para os blocos, especificamente, o f_{ck} definido foi a metade desse valor, ou seja, 25 MPa. As tabelas 2 e 3 apresentam os traços dos dois concretos especificados.

Tabela 2 – Proporcionamento de mistura dos concretos especificados, em kg/m^3

f_{ck}	Abatimento		Composição (kg/m³)								Relações	
(MPa)	Chegada à obra (mm)	Com aditivo superpl. (mm)	Cimento	Sílica ativa	Areia natural	Areia artificial	Brita 1	Brita 0	Água	Gelo	Água/ Ligante	Pasta/ Agregado
25	80±10	160±30	300	15,8	526	360	841	148	30	140	0,54	0,26
50	50±10	160±30	497	26,2	297	298	839	148	40	160	0,38	0,46

Tabela 3 – Aditivos utilizados nos concretos

f_{ck}	Aditivos (l/m³)	
(MPa)	Aditivo polifunc.	Aditivo superpl.
25	1,8	2,0
50	2,6	3,4

Os elementos estudados foram especificados para serem executados com concreto de 25 MPa. Os pilares, no entanto, foram calculados para uma resistência de 50 MPa, tendo sido previstos para “nascerem” dentro do bloco. Logo, a concretagem do bloco usando o concreto menos resistente seria inviável, uma vez que as regiões nas quais saem os pilares seriam prejudicadas pela baixa resistência do concreto do bloco. O usual seria a concretagem da peça como um todo usando o concreto mais resistente, no caso o

concreto de f_{ck} igual a 50 MPa. Um material com tal resistência possui um consumo de cimento normalmente elevado, no caso em questão igual a 497 kg/m³, conforme se pode ver na tabela 1. Como se não bastante isso, o concreto fornecido pela usina era constituído de um cimento CPV-ARI, ou seja, de superfície específica muito elevada para alcançar resistências iniciais altas. Estes dois fatores – o elevado consumo de cimento e o tipo de cimento empregado – são fatores muito relevantes no que tange à geração excessiva de calor no bloco de concreto. Dessa forma, para evitar a ocorrência de fissuração térmica na peça, foram tomadas algumas medidas descritas na seção 4 deste artigo a fim de se reduzir o calor de hidratação.

Paralelamente, foram feitos estudos em outro par de blocos idênticos pertencentes à mesma torre. Este estudo teve por objetivo simplesmente quantificar a diferença entre as temperaturas máximas obtidas nas concretagens utilizando o concreto de 50 MPa e o de 25 MPa, em condições semelhantes de temperatura de lançamento e de temperatura ambiente. Estes blocos menores possuem dimensões em planta de 5,50 m x 2,50 m e 2,50 m de altura.

4 Detalhes do método executivo

Visando reduzir os efeitos negativos do calor de hidratação do bloco, foram tomadas medidas do ponto de vista da execução da peça de concreto. Foi adicionado gelo em substituição a parte da água de amassamento da mistura, como forma de se pré-resfriar o concreto (Figura 3). Diante da impossibilidade de se alterar o tipo de cimento empregado por razões logísticas da empresa fornecedora de concreto, foram substituídos 5% do cimento do traço por sílica ativa.

Figura 5 – Adição de gelo no concreto

Com relação à execução propriamente dita, a primeira das medidas adotadas foi a divisão da concretagem do bloco em duas camadas de 90 cm, com um intervalo de pelo menos 72 horas entre as concretagens.

O detalhe principal da execução tratou do uso de bolsões de tela e aço, visando confinar o concreto dos pilares e separá-lo fisicamente do concreto do bloco. Tal medida pode ser

considerada de suma importância, pois permitiu a execução da peça usando os concretos especificados para cada um dos casos, evitando assim o uso do concreto de 50 MPa na peça toda e restringindo-o somente à região de arranque dos pilares.

Os bolsões permitiram reduzir o consumo de cimento de 497 kg/m³ para 300 kg/m³, o que representa uma redução de cerca de 40%. Esta redução por si só é bastante significativa e torna-se ainda mais importante devido ao fato de que ambos os concretos são produzidos com cimento CPV-ARI, ou seja, com liberação rápida e intensa de calor. Com o uso da técnica, foi possível também reduzir a quantidade total de gelo adicionado à mistura com objetivo de se reduzir a temperatura de lançamento. De acordo com Gambale e Traboulsi (2015), a redução do consumo de cimento ao mínimo possível (dentro das exigências de projeto), a pré-refrigeração do concreto e limitação da altura das camadas são fatores que minimizam o quadro de fissuração.

Para a execução dos bolsões, foi colocada tela de arame galvanizado com malha hexagonal do tipo viveiro ao redor da seção transversal dos pilares, acrescida de 30 a 50 cm em cada dimensão. Para resistir ao empuxo provocado pelo concreto fresco na tela, os bolsões foram estruturados com barras longitudinais e armaduras transversais semelhantes a estribos e ganchos, todos de aço CA-50.

O bloco foi, então, concretado em duas camadas de 90 cm cada, incluindo os bolsões para evitar a formação de juntas frias. Nesta etapa, os bolsões foram executados primeiro até a metade de sua altura, empregando-se o concreto de f_{ck} igual a 50 MPa. Imediatamente após esta ação, procedeu-se ao lançamento de concreto no interior do bloco propriamente dito, utilizando-se o concreto de 25 MPa até a altura de 90 cm. A execução da peça como um todo é mostrada nas Figuras 6 a 9.

Figura 6 – Bolsões para separação física dos concretos

Figura 7 – Detalhe dos ganchos para resistir ao empuxo

Figura 8 – Concretagem da primeira etapa

Figura 9 – Concretagem da segunda etapa

Para o par de blocos menores a execução se deu de forma diferente: em um dos blocos, foi feito um bolsão como nos maiores e preenchido com o concreto de 50 MPa, enquanto o resto do bloco foi executado usando-se o material de menor resistência. No outro bloco, foi usado somente o concreto de 50 MPa em todo seu volume. Nestes, não foi usado gelo para pré-resfriamento do concreto e nem a divisão da peça em camadas, de modo que o fator a causar a diferença entre os dois picos máximos de temperatura é somente o concreto utilizado.

5 Metodologia da coleta de dados

Para a medição de temperatura do concreto foram utilizados dois instrumentos, sendo um para controle da temperatura de lançamento do concreto e outro para monitoramento da evolução da temperatura no interior da peça de concreto.

Para o controle de temperatura de lançamento foi usado um termômetro de superfície infravermelho de bolso Instrutherm TI-860 (Figura 10). As temperaturas de lançamento foram obtidas na saída do concreto pela tubulação, estando apresentadas no item 6 do trabalho.

Figura 10 – Termometro Instrutherm TI-860

Para o monitoramento de temperatura ao longo do tempo, após o lançamento, foram posicionados termopares tipo K no centro geométrico das camadas de concretagem, contendo o concreto de 25 MPa (conforme a Figura 11). A leitura foi realizada por um leitor apropriado para o termopar. Foram feitas leituras a cada duas horas até 150 horas do lançamento da primeira camada, o que possibilitou a construção das curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo apresentadas no item 6 deste trabalho.

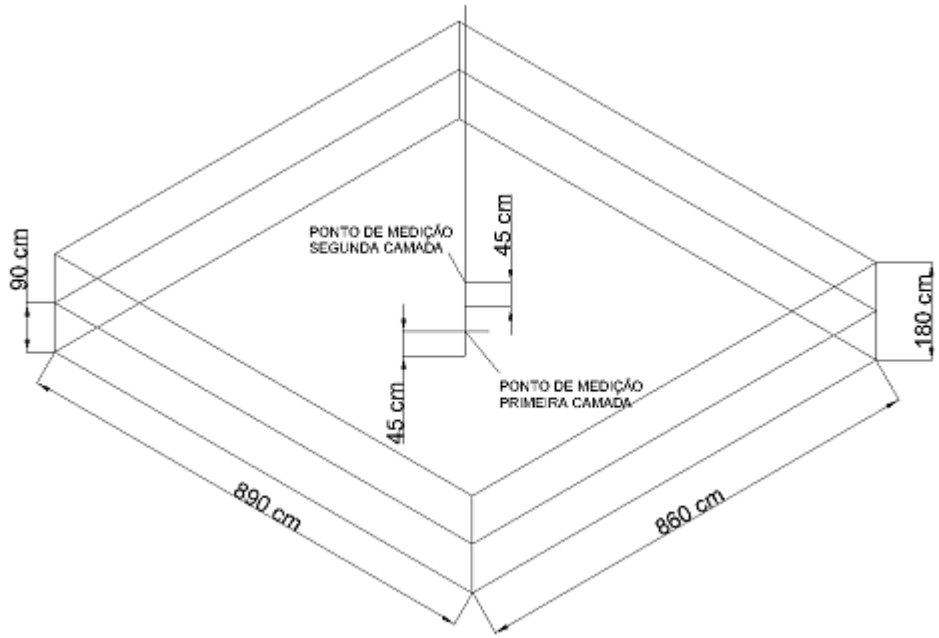

Figura 11 – Croqui representando local de medição dos blocos

Para o par de blocos menores, a mediçao foi feita com periodicidade semelhante. No entanto, foram monitoradas as temperaturas somente até começarem a decrescer. Na peça executada com dois concretos diferentes, foi posicionado um termopar na região do bolsão contendo o concreto de 50 MPa e outro na região contendo concreto de 25 MPa. Para o bloco concretado com somente um f_{ck}, foi posicionado somente um termopar na região do núcleo da peça.

6 Resultados e discussão

6.1 Blocos maiores

6.1.1 Primeiro bloco

O primeiro dos dois blocos teve sua primeira camada concretada no dia 26 de setembro de 2015 e a segunda no dia 29 de setembro de 2015. Primeiramente são apresentados, nas tabelas 4 e 5, os dados referentes às temperaturas de lançamento do concreto, por cada caminhão envolvido.

Tabela 4 – Temperaturas de aplicação dos concretos da primeira camada do bloco 1

CAMINHÃO	f_{ck} (MPa)	HORÁRIO DO LANÇAMENTO	TEMPERATURA DE APLICAÇÃO
1	50	09:12	18,3 °C
2	50	09:48	16,0 °C
3	25	10:05	24,0 °C
4	25	10:27	24,4 °C
5	25	11:00	24,3 °C
6	25	11:20	26,6 °C
7	25	11:40	25,4 °C
8	25	12:31	24,5 °C
9	25	12:53	26,5 °C
10	25	13:45	25,4 °C
MÉDIA DA TEMPERATURA DE APLICAÇÃO			23,5 °C

Tabela 5 – Temperaturas de aplicação dos concretos da segunda camada do bloco 1

CAMINHÃO	fck (MPa)	HORÁRIO DO LANÇAMENTO	TEMPERATURA DE APLICAÇÃO
1	50	10:19	13,1 °C
2	50	10:40	19,0 °C
3	25	11:05	18,5 °C
4	25	11:24	22,5 °C
5	25	11:48	20,0 °C
6	25	12:03	21,0 °C
7	25	12:35	23,0 °C
8	25	13:02	20,0 °C
MÉDIA DA TEMPERATURA DE APLICAÇÃO			19,6 °C

Observa-se das tabelas 4 e 5 a tendência ao aumento de temperatura de lançamento à medida que o tempo passa. Este efeito é esperado e é atribuído aos efeitos da evolução temporal da temperatura ambiente, bem como do calor gerado pela hidratação do cimento. Dentre os efeitos do aumento da temperatura ambiente, pode-se destacar a maior temperatura dos agregados do concreto na central dosadora e o aquecimento provocado pela radiação solar no balão dos caminhões betoneira. Percebe-se, também, uma menor temperatura de lançamento associada ao concreto de 50 MPa. Isto provavelmente ocorre porque este concreto de maior f_{ck} possui maior volume de pasta de cimento e, consequentemente, menor quantidade de agregados (notadamente agregados graúdos). A relação pasta/agregado no concreto de f_{ck} igual a 50 MPa é, de acordo com a Tabela 2, 56% maior que no concreto de 25 MPa. Estes agregados exercem significativa influência na temperatura de lançamento do concreto, por absorverem quantidade

relevante de energia térmica do ambiente, já que são agregados normalmente escuros, presentes em grande quantidade nos concretos, e que ficam expostos à radiação solar em baias ou em montes abertos nos pátios das concreteiras.

Na Figura 12, a seguir, apresenta-se a curva de evolução da temperatura no núcleo das camadas de concretagem do bloco.

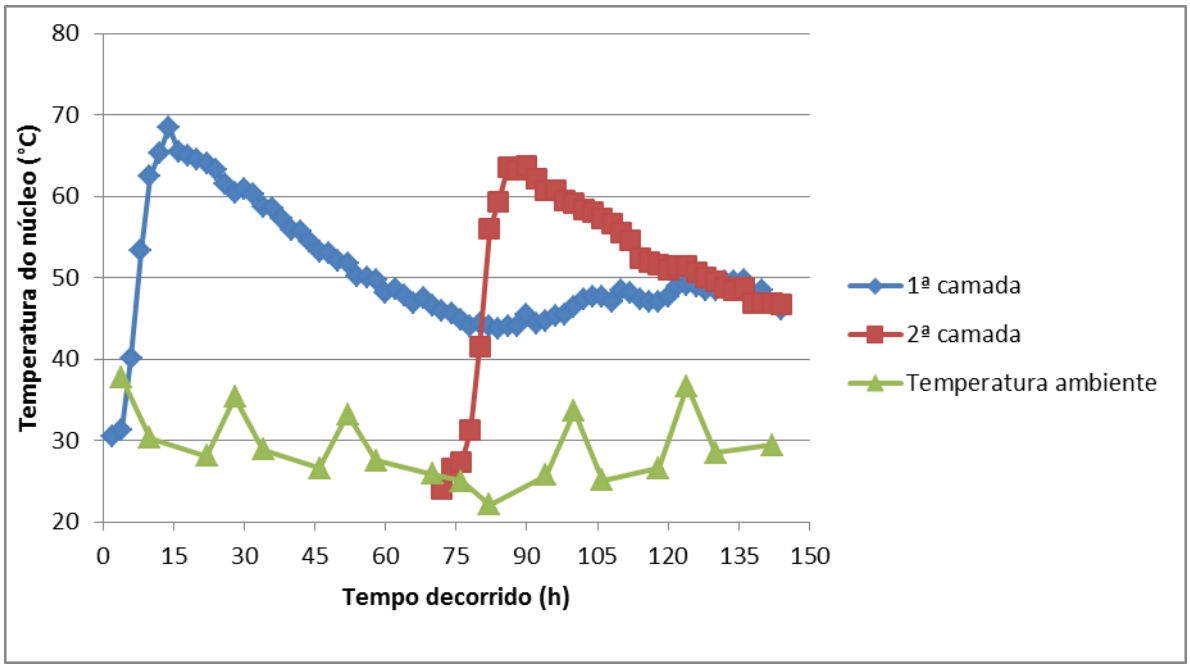

Figura 12 – Gráfico de evolução da temperatura no bloco 1

A primeira camada atingiu pico de 68,5°C após 14 horas da finalização da concretagem, ou seja, por volta das 4 h da manhã do dia 27 de setembro de 2015. A segunda camada atingiu um máximo de 63,8°C cerca de 8 h do dia 30 de setembro de 2015, após 18 horas do término da concretagem.

Como pode ser concluído a partir do gráfico, o lançamento da segunda camada acabou por elevar sensivelmente a temperatura da primeira, que já se encontrava em processo de resfriamento. Percebe-se, também, o equilíbrio térmico atingido entre as duas após aproximadamente 50 h da execução da segunda etapa.

Percebe-se das tabelas de temperaturas de lançamento (tabelas 4 e 5), que os caminhões envolvidos na concretagem da primeira camada apresentaram uma média 3,9°C maior que a da segunda camada. Este fato pode ser atribuído à temperatura ambiente mais baixa quando da concretagem da segunda camada, conforme se pode ver na Figura 12.

Observa-se no período, segundo os *Dados da Rede* do INMET (2016), que as condições de temperatura no período se mantiveram praticamente constantes, com variações

horárias apenas. Nota-se que a maior temperatura do período no qual foram feitas medições foi de 37,7°C, atingida às 18 h do dia da concretagem da primeira camada, ou seja, durante a fase de aquecimento do concreto.

Para a segunda camada, a temperatura máxima atingida no núcleo de concretagem foi 4,7°C menor que a atingida na primeira etapa. Pode-se associar este fato às condições de temperatura ambiente, uma vez que durante o aquecimento da camada a temperatura máxima atingida foi de 25,9°C, somada à menor temperatura de lançamento média dos caminhões da segunda etapa. Após a execução da segunda camada, a maior temperatura ambiente foi alcançada já na fase de resfriamento da peça, não influenciando, portanto, no aquecimento da peça.

6.1.2 Segundo bloco

Para o segundo bloco, foi monitorada somente a segunda camada de concretagem, executada no dia 31 de maio de 2016, devido à ruptura do termopar durante a execução da primeira etapa. Por esta razão, serão apresentados somente os resultados referentes à segunda camada. Na tabela 6, a seguir, são apresentadas as temperaturas de lançamento para a referida etapa.

Tabela 6 – Temperaturas de aplicação dos concretos da segunda camada do bloco 2

CAMINHÃO	f_{ck} (MPa)	HORÁRIO DO LANÇAMENTO	TEMPERATURA DE APLICAÇÃO
1	50	09:08	17,2°C
2	50	09:22	16,8°C
3	25	10:04	21,1°C
4	25	10:27	19,3°C
5	25	11:02	22,2°C
6	25	11:31	20,8°C
7	25	12:10	21,3°C
8	25	12:57	23,6°C
TEMPERATURA DE APLICAÇÃO MÉDIA			20,3°C

A partir destes dados, ratifica-se a tendência da temperatura de lançamento aumentar no decorrer do tempo, por razões já levantadas anteriormente. Nesta etapa, verificou-se uma temperatura de aplicação média de 20,3°C, enquanto que nas outras camadas concretadas foram registradas médias de 23,9°C e 19,6°C. Nesta camada, a temperatura média não foi a menor, porém se verificou uma maior uniformidade na temperatura dos caminhões, chegando-se a um valor de 2,36°C para o desvio padrão. A seguir são apresentadas, na Figura 13, a evolução da temperatura no núcleo de concretagem e a evolução da temperatura ambiente

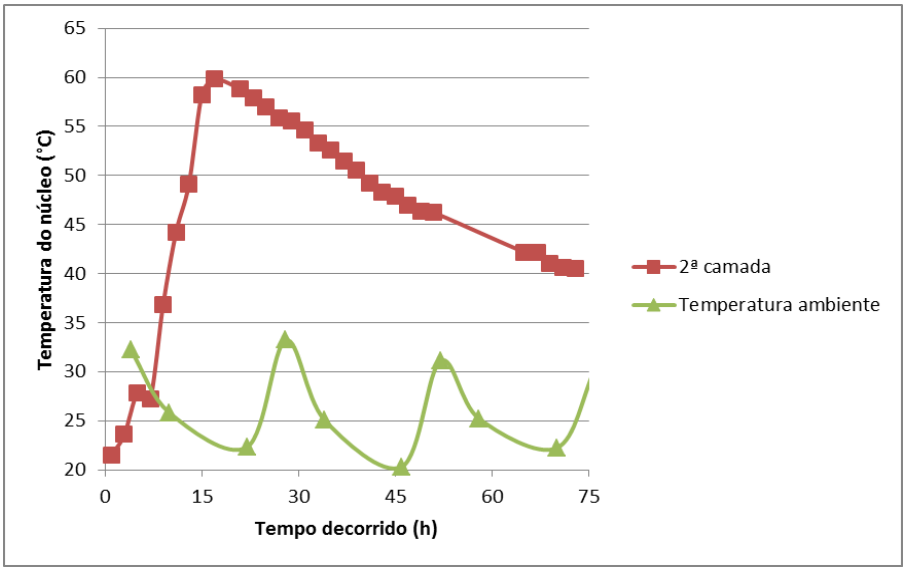

Figura 13 – Gráfico de evolução da temperatura no bloco 2

Como se pode observar, a camada atingiu um máximo de 59,8°C, 17 horas após o término da concretagem da peça, ou seja, às 7 h do dia 1º de junho de 2016. Devido à ruptura do termopar, não foi possível fazer nenhuma comparação entre esta e a primeira camada do bloco. No entanto, é possivel compará-la com os resultados obtidos na primeira e segunda camadas do outro bloco, idêntico a este, porém executado num período de temperaturas ambiente mais altas. Observa-se que o pico de 59,8°C ficou 8,7°C e 4,0°C abaixo, respectivamente, das marcas alcançadas pela primeira e segunda camadas da outra peça.

De acordo com *Dados da Rede* do INMET (2016), no mês de setembro, quando ocorreu a concretagem do primeiro bloco, a temperatura compensada média registrada foi de 27,7°C, enquanto que no mês de junho de 2016, período no qual o bloco ganhou temperatura (foi concretado dia 31 de maio), a temperatura compensada média foi de 23,4°C. Pode-se atribuir a esta menor temperatura ambiente e à baixa temperatura de lançamento, o pico mais baixo dentre todas as camadas analisadas.

6.2 Blocos menores

O primeiro destes blocos (bloco 3) foi concretado no dia 23 de março de 2016, sob uma temperatura compensada média de 26,7°C. Já o segundo bloco, concretado com dois concretos distintos por meio dos bolsões (bloco 4), foi executado no dia 18 de abril de 2016 a uma temperatura ambiente também de 26,7°C. Os dois foram, portanto, concretados em condições ambientais idênticas. Nas tabelas 7 e 8 são apresentadas as temperaturas de aplicação de cada um dos caminhões de concreto envolvidos. Na figura 14, tem-se o gráfico de evolução de temperatura do bloco 3, executado em uma só camada com concreto de 50 MPa sem pré-resfriamento.

Tabela 7 – Informações do lançamento de concreto no bloco 3

BLOCO 3		
CAMINHÃO	f_{ck} (MPa)	TEMPERATURA DE APLICAÇÃO
1	50	37,1°C
2	50	37,2°C
3	50	38,2°C
4	50	39,3°C
5	50	37,0°C
Média da temperatura de aplicação		37,8°C

Tabela 8 – Informações do lançamento de concreto no bloco 4

BLOCO 4		
CAMINHÃO	f_{ck} (MPa)	TEMPERATURA DE APLICAÇÃO
1	50	34,8°C
2	25	31,0°C
3	25	32,3°C
4	25	33,0°C
5	25	33,5°C
Média da temperatura de aplicação		32,9°C

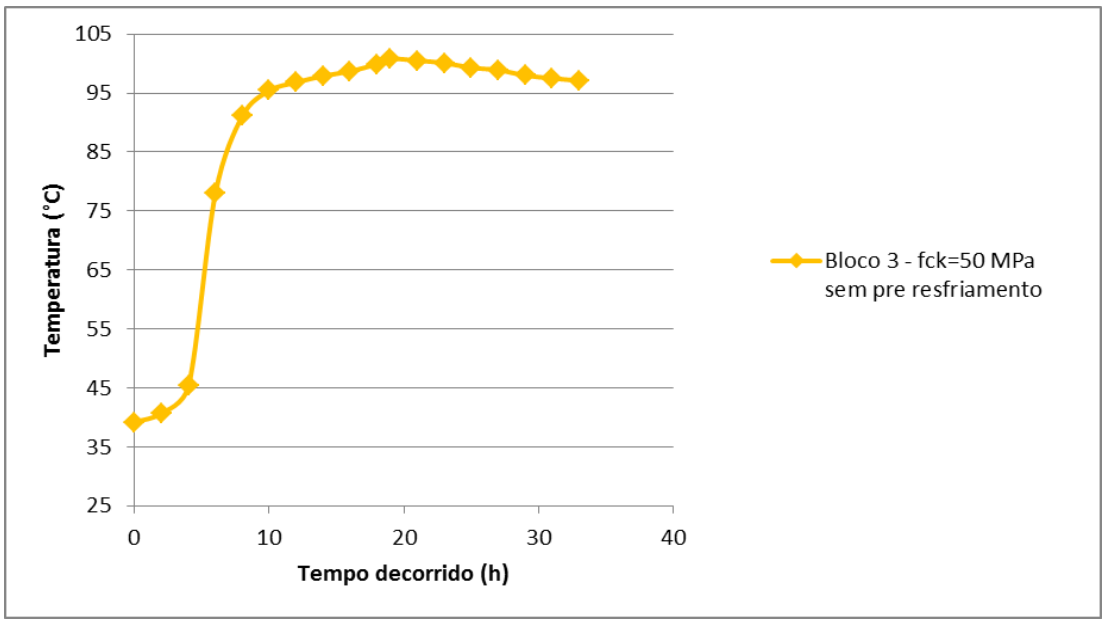

Figura 14 – Gráfico de evolução da temperatura no bloco 3

Para o bloco 3, a temperatura máxima atingida foi de 100,8°C, 19 horas após o término da concretagem. Este valor é altíssimo quando comparado aos valores obtidos com o concreto de menor resistência e pré-resfriado.

Para o bloco 4, foram obtidas duas curvas de evolução de temperatura, sendo uma para o concreto de 50 MPa e outra para o de 25 MPa. Os resultados são apresentados na Figura 15, a seguir.

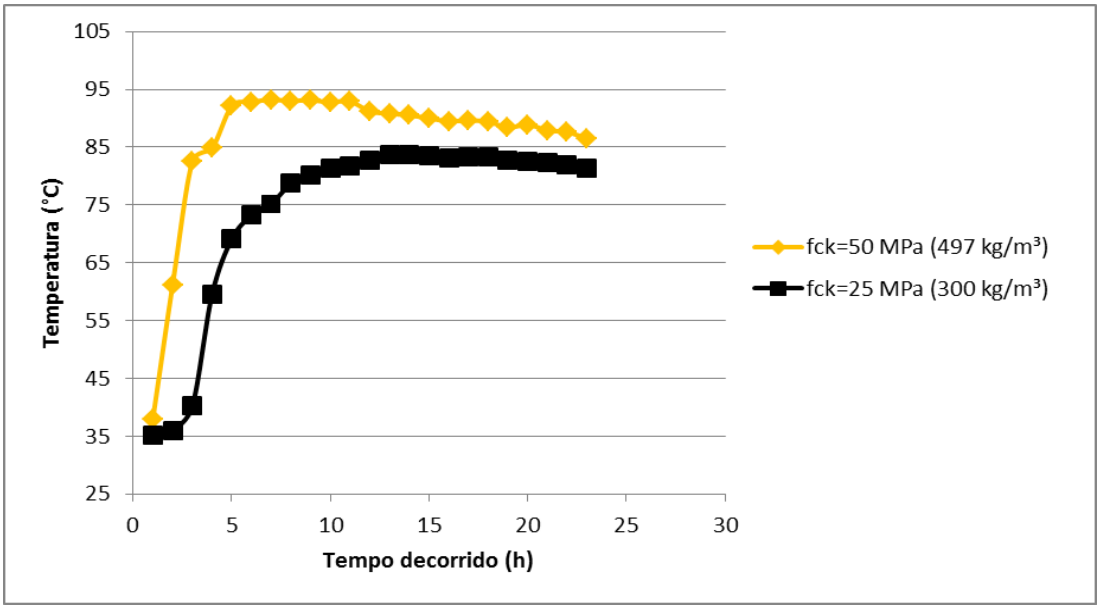

Figura 15 – Evolução da temperatura no bloco 4 – comparação entre o concreto de 50 MPa e 25 MPa na mesma peça

Na Figura anterior, percebe-se a diferença de comportamento entre os dois concretos. Enquanto que para o material mais resistente a temperatura máxima atingida foi de 93,2°C, para a região executada com menor consumo de cimento a maior temperatura registrada foi de 83,8°C. Esta diferença de quase 10°C é atribuída exclusivamente ao consumo de cimento. Até mesmo a elevada temperatura de lançamento do concreto de 50 MPa é causada por este fator, uma vez que toda o concreto foi lançado sob as mesmas condições.

6.3 Comparações estabelecidas

6.3.1 Comparação entre os blocos executados com concretos de 25 MPa e 50 MPa sem pré-resfriamento

Comparando os resultados obtidos nos blocos de números 3 e 4, pode-se mensurar o efeito da substituição do concreto mais resistente, com maior consumo de cimento, pelo de 25 MPa, possível por meio da utilização dos bolsões. A tabela 9 mostra, então, as temperaturas máximas alcançadas nessas duas peças.

Tabela 9 – Temperaturas máximas obtidas nos blocos 3 e 4

BLOCO	f_{ck} (MPa)	TEMPERATURA MÁXIMA
3	50	100,8°C
4	25	83,2°C

Da tabela anterior, conclui-se que a redução do consumo de cimento de 497 kg/m³ para 300°kg/m³ foi responsável pela redução da temperatura máxima obtida em 17,6°C,

equivalente a 17,5%. A redução é extremamente significativa, embora as duas temperaturas alcançadas sejam bastante elevadas.

6.3.2 Comparação de blocos executados com concreto de 25 MPa com pré-resfriamento e sem pré-resfriamento

Nesta seção são comparados os resultados obtidos do bloco 2 com os do bloco 4. A comparação foi realizada, pois o bloco 2 foi o que obteve os valores mais baixos de temperatura em seu núcleo. Além do resfriamento, o referido bloco foi executado em duas etapas. A tabela 10 apresenta os dados dessas duas peças.

Tabela 10 – Temperaturas máximas registradas em blocos de f_{ck} igual a 25 MPa, com e sem resfriamento

BLOCO	TEMPERATURA MÉDIA DE APLICAÇÃO	GELO (kg/m³)	ALTURA DA CAMADA (m)	TEMPERATURA MÁXIMA
2	20,3°C	140	0,90	59,8°C
4	32,9°C	0	2,50	83,2°C

Apesar de não serem idênticos, percebe-se uma grande diferença entre as temperaturas máximas obtidas nos dois blocos. A peça executada com concreto resfriado e lançamento em camadas atingiu uma temperatura 23,4°C menor que o máximo atingido pelo bloco feito com concreto sem resfriamento.

6.4 Correlação entre temperatura de lançamento e pico atingido no núcleo

Por meio deste estudo, estabeleceu-se uma correlação entre as temperaturas médias de lançamento do concreto e a temperatura máxima atingida no núcleo de cada bloco. Esta correlação foi estabelecida usando-se os dados das peças executadas com concreto de 25 MPa. A referida correlação é apresentada na Figura 16.

Como pode ser percebido da Figura 16, a correlação estabelecida é linear, ou seja, a temperatura máxima atingida nos núcleos dos blocos estudados, nestes casos, varia proporcionalmente à temperatura média de aplicação. A correlação foi construída utilizando os dados obtidos de quatro dos casos estudados, tendo sido todos estes executados utilizando o mesmo material (concreto de f_{ck} igual a 25 MPa).

A reta obtida possui um bom coeficiente de determinação (R^2), próximo a um, tendo sido o caso em que se obteve o melhor ajuste. Esse fato corrobora a tese de que há uma forte dependência entre os parâmetros estudados. Diante do exposto, conclui-se que a redução da temperatura de lançamento do concreto é extremamente eficaz na redução do pico de temperatura no interior do elemento estrutural. Para os casos estudados, chegou-se a uma taxa de variação de 1,7°C, ou seja, a cada 1°C de aumento na temperatura de aplicação, aumentou-se o pico de 1,7°C.

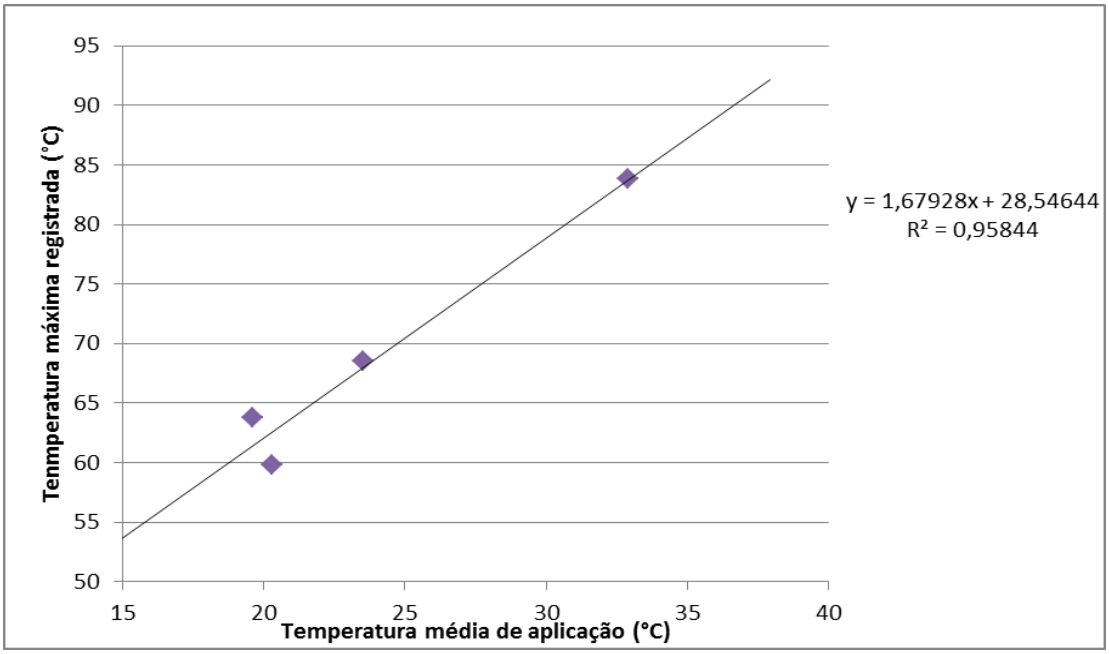

Figura 16 – Correlação entre a temperatura média de aplicação e a temperatura máxima registrada

7 Conclusões

Após a coleta dos dados nos dois blocos, antes dos mesmos serem aterrados, não foi constatada a existência de nenhuma fissura na superfície dos blocos de maiores dimensões no período analisado. Para os dois blocos menores nos quais não foram tomados cuidados tais como pré-resfriamento do concreto e subdivisão da peça em camadas, surgiram fissuras. As medidas tomadas, portanto, são consideradas efetivas no combate à fissuração de origem térmica desde que tomadas como um todo, uma vez que a não adoção de parte destas se mostrou ineficaz na prevenção do quadro de fissuração.

Nos blocos 3 e 4, chama atenção as altas temperaturas atingidas por estes (100,8°C e 83,2°C, respectivamente), superiores àquelas citados por Taylor (1997) como sendo valores favoráveis à DEF (faixa de 65°C a 70°C). Nestes elementos, provavelmente haverá formação de etringita tardia, dadas as condiçoes de: alta temperatura no período de cura, umidade elevada (uma vez que se encontra em contato com o solo) e existência de fissuras. Estes blocos, portanto, merecem atenção especial com o objetivo de identificar manifestações patológicas que devem vir a ocorrer.

A adoção dos chamados bolsões foi a medida que possibilitou a concretagem do bloco usando um concreto de menor resistência e, consequentemente, um menor consumo de cimento, logo, com menor calor de hidratação. Por meio do estudo realizado com os dois blocos menores, foi possível avaliar a contribuição da prática, que se mostrou extremamente efetiva. Quando comparados dois blocos geometricamente idênticos, a redução de temperatura foi de 17,5%. Comparando os dois concretos dentro de uma

mesma peça, caso do bloco 4, percebe-se a grande influência que o consumo de cimento exerce na temperatura máxima atingida no centro do bloco.

Como pode ser notado, tanto a temperatura de lançamento do concreto como a temperatura ambiente exerceram grande influencia no comportamento térmico do bloco. Pode-se afirmar que o pré-resfriamento do concreto foi fator de suma importância na execução da peça, uma vez que, para uma mesma quantidade de calor liberada, esta ação contribui significativamente para reduzir a temperatura máxima alcançada pelo elemento. Quando comparados dois blocos, um usando concreto pré-resfriado e outro não, verificou-se que este é um fator de suma importância.

A temperatura ambiente interferiu, de forma intensa, na variação interna da temperatura do bloco, como pôde ser observado no bloco 2. Recomenda-se, portanto, a concretagem de peças semelhantes em épocas mais amenas, caso seja possível.

A partir do gráfico exposto em 6.4, existe uma correlação linear entre a temperatura média de aplicação do concreto e a máxima temperatura atingida por este. Esta correlação mostra a dependência direta que a temperatura de lançamento exerce na temperatura. Nos casos estudados, a redução de 1°C na temperatura de aplicação acarretaria uma diminuição de cerca de 1,7°C na temperatura máxima atingida. Desse modo, pode-se afirmar que resfriar o concreto é um dos meios mais eficientes de se reduzir os efeitos do calor de hidratação do concreto. Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se construir um gráfico de correlação com maior quantidade de pontos, de modo que ele retrate de forma mais confiável esse comportamento.

Neste estudo, ao se compararem os blocos 1 e 2 com o 3, chega-se a situações exatamente opostas. Enquanto nos dois primeiros foram adotadas medidas como bolsões, pré-resfriamento e concretagem em camadas, no terceiro bloco nenhuma destas medidas foram tomadas. O resultado foi uma diferença de até 41°C entre as situações, motivada por estes fatores. Conclui-se, portanto, que a redução do consumo de cimento, o pré-resfriamento do concreto e a divisão da peça em camadas são medidas extremamente efetivas na redução do pico de temperatura e, portanto, são medidas preventivas dos efeitos negativos do calor de hidratação.

Como as estruturas se apresentam cada vez mais altas e a tendência é que continue dessa forma, será cada vez mais comum o uso de blocos de transição de grandes dimensões. Para minimizar os efeitos adversos do calor de hidratação, serão cada vez mais exigidos dos engenheiros conhecimentos na área, de modo a evitar as manifestações patológicas associadas.

8 Referências

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

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee N° 207. **Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete**, Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice, 1978.

ARAÚJO, J. M. Tensões térmicas em blocos de concreto armado. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Brasil, v. 13, n. 22, p. 1-14, 2013

CORELHANO, A. G. B. **Análise não linear geométrica e física de núcleos rígidos de edifícios altos em concreto armado**. 2010. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO, DEPARTAMENTO DE APOIO E CONTROLE TÉCNICO. **Concretos**: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. São Paulo: Pini, 1997

GAMBALE, E. A.; TRABOULSI, M. A. Avaliação da temperatura máxima em estrutras executadas com concreto massa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 57, 2015, Bonito. **Anais...** São Paulo, IBRACON, 2015.

GAMBALE, E. A.; TRABOULSI, M. A.; ANDRADE, M. A. S. Análise Paramétrica do Fenômeno Térmico do Concreto Massa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. **Anais...** São Paulo, IBRACON, 2008.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>. Acesso em 01 de dezembro de 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Pini, 1994.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Números**: Relatório Anual: 2013. Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em 10 de dezembro de 2016.

VICENTE, G. R.; KUPERMAN, S. C.; FUNAHASHI JR., E. I. Fissuração de Origem Térmica em Blocos de Fundação: Quando Refrigerar o Concreto? In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56, 2014, Natal. **Anais...** São Paulo, IBRACON, 2014.

TAYLOR, H. F. **Cement Chemistry**. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1997.