

REFRIGERAÇÃO DO CONCRETO NA CONSTRUÇÃO DA BASE DA CHAMINÉ DA FÁBRICA ELDORADO CELULOSE

CONCRETE COOLING ON THE CONSTRUCTION OF THE CHIMNEY'S BASE AT ELDORADO CELLULOSE PLANT

Eduardo Funahashi (1); Selmo Kuperman (2); Ana Barreta (3); Grazielle Vicente (4); Daniel Goldenbaum (5); Bruno Benassatto (6)

(1) Engenheiro Civil/DESEK Ltda., eduardo.desek@gmail.com

(2) Doutor em Engenharia Civil /DESEK Ltda., selmo@desek.com.br

(3) Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Mackenzie/DESEK Ltda., ana.desek@gmail.com

(4) Engenheira Civil/DESEK Ltda., grazielle.desek@gmail.com

(5) Engenheiro Civil/Azevedo&Travassos, danielg@azevedotravassos.com.br

(6) Engenheiro Civil/Azevedo&Travassos, brunobenassatto@azevedotravassos.com.br

Resumo

Estruturas maciças de concreto estão mais sujeitas a formação de um quadro fissuratório por tensões de origem térmica relacionadas ao fenômeno da geração de calor decorrente da reação exotérmica durante a hidratação do cimento. Por esta razão é necessário maior controle da elevação da temperatura através da utilização de materiais e metodologias executivas apropriadas.

Este trabalho apresenta a avaliação das temperaturas e tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem quando da construção, em 2011, da base da chaminé da fábrica Eldorado Celulose localizada na cidade de Três Lagoas – MS, bem como as medidas mitigadoras empregadas.

Foram instalados termômetros no interior da estrutura para monitoramento da evolução das temperaturas ao longo do tempo e comparação com os valores previstos. A partir das dimensões do bloco circular com diâmetro de 24,30m e altura de 3,0m, volume teórico de 1391m³ lançados em duas etapas de concretagem e resistência característica de 30 MPa aos 28 dias, foi realizado o estudo de tensões térmicas com uso do software B4Cast, com o objetivo de minimizar a possibilidade de fissuração de origem térmica e racionalizar o emprego de gelo na fabricação do concreto.

Os resultados mostraram a importância do emprego da refrigeração do concreto neste tipo de estrutura, a metodologia para otimizar a utilização da refrigeração e a adequação do cálculo de tensões térmicas através do modelo empregado. Chama-se a atenção para a importância da simulação computacional, pois com essa ferramenta pode-se orientar metodologias construtivas adequadas para a diminuição dos riscos de fissuração.

Palavra-Chave: concreto massa, tensões de origem térmica, fissuração, software B4cast, concreto refrigerado

Abstract

Massive concrete structures are more susceptible to the development of thermal cracks related to the heat generation due to exothermic reaction during cement hydration. Thus it is necessary to control the temperature rise through the use of appropriate materials and suitable construction methodologies.

This work presents the evaluation of temperatures and thermal stresses that could occur during the construction, in 2011, of the foundation block that supports a concrete chimney of the Eldorado Cellulose Plant located in Três Lagoas-MS as well as the construction methodology. Thermometers were embedded in the foundation block to monitor temperature development and measured values were compared with the computer simulation. Dimensions of the circular block of are 24.3 meters in diameter and 3.0 meters high comprising a theoretical volume of 1391m³ placed in two layers and a characteristic strength of 30MPa at 28 days. Thermal stresses studies using the B4Cast software were developed aiming in minimizing the possibility of thermal cracking in the structure and optimizing concrete cooling with ice.

The results showed the importance of concrete cooling in this type of structure, the methodology to optimize the utilization of ice and the adequacy of the thermal stresses calculation through the employed model. Attention is drawn to the importance of computer simulation as a tool to guide appropriate construction methodologies to be used for reducing the risk of concrete thermal cracking.

Keywords: mass concrete, thermal stresses, cracking, b4cast software, cooling concrete

1 Introdução

A Eldorado Celulose e Papel S.A. está construindo na cidade de Três Lagoas-MS a maior fábrica de celulose em linha única do mundo. Com conclusão prevista para o final de 2012, a indústria terá capacidade para produzir 1,5 milhão de toneladas por ano de celulose branqueada. Possui área total de 8.920.000m² onde a unidade industrial ocupa 5.700.000 m² e área preservada de 3.220.000 m². Devido ao volume de aproximadamente 1390m³ de concreto do bloco de fundação da chaminé da caldeira de recuperação química, foi adotada metodologia adequada para minimização dos efeitos de fissuração por tensões de origem térmica.

Concreto massa é aquele que precisa de cuidados especiais para a minimização dos efeitos de variação volumétrica e geração de calor decorrentes da hidratação do cimento. (MARQUES FILHO, 2011).

As estruturas com grandes dimensões e susceptíveis a variações térmicas consequentes das condições ambientais da região da obra, possibilitam que as temperaturas a serem desenvolvidas no interior da estrutura, pelo concreto, originem elevadas tensões de origem térmica. Estas têm como origem as reações de hidratação do cimento, sempre exotérmicas e que, em razão das dimensões da estrutura, encontrarão dificuldades em se dissipar para o meio circundante. Desta forma criam-se condições para que, durante o arrefecimento da temperatura do concreto surjam tensões de tração que, se forem superiores à resistência à tração do material poderão provocar fissuras no mesmo (KUPERMAN, 2005).

Os parâmetros básicos que influenciam no projeto e na análise de estruturas de concreto massa em geral são: tipo de cimento (calor de hidratação do cimento); consumo de cimento por m³ de concreto (elevação adiabática da temperatura do concreto); litologia do agregado (difusividade térmica); temperatura ambiente; temperatura de lançamento do concreto fresco; geometria da estrutura de concreto; altura das camadas de concretagem; intervalo de lançamento das camadas de concretagem, transmissão superficial de temperatura (tipo de cura e fôrmas) e propriedades mecânicas do concreto.

2 Objetivo

Apresentar a metodologia adotada pela Azevedo Travassos para minimização da probabilidade de fissuração de origem térmica através de uma avaliação das tensões de origem térmica passíveis de ocorrerem quando da concretagem do bloco de fundação da base da chaminé e os procedimentos adotados para o controle tecnológico.

3 Estudo de Caso

Para evitar a ocorrência de fissuras térmicas é necessário reduzir a temperatura máxima a ser atingida pelo concreto. O controle da temperatura de seu lançamento é de grande relevância para evitar a fissuração do concreto massa. Em geral, quanto mais baixa a temperatura do concreto quando de seu lançamento, quando este passa do estado plástico para o estado elástico, menor será a tendência de fissuração.

Previamente à definição do nível de refrigeração através de simulação matemática computacional pelo método dos elementos finitos foram adotadas medidas tecnicamente disponíveis e já consagradas pelo meio técnico de acordo com as características do projeto para que o calor gerado fosse mínimo, como descrito a seguir:

- a) Utilização de cimento com baixo calor de hidratação e disponível no mercado. Segundo a NBR 13116 (1994) cimento com baixo calor de hidratação é aquele que possui um calor menor que 260J/g e 300J/g, para tempo de ensaio de 72 horas e 168 horas, respectivamente, através da determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant;
- b) Redução parcial do consumo de cimento na dosagem desde que não comprometesse a resistência característica e os requisitos de trabalhabilidade do concreto previamente especificado pelo projetista, através da adição de material pozolânico de alta reatividade (sílica ativa).
- c) Iniciar a concretagem a partir das 06h00minh da manhã quando a temperatura ambiente e temperatura dos agregados são mais amenas e contribuem para melhor refrigeração do concreto;
- d) Adição de maior parte do gelo diretamente no canteiro da obra, devido à distância entre a usina de concreto e o local de lançamento do concreto, diminuindo desta maneira o ganho de temperatura durante o transporte.

Para o estudo da evolução da temperatura e tensões térmicas resultantes e definição do zoneamento de temperatura de lançamento dos concretos, foi realizada simulação matemática através do software B4Cast 4.0 baseado no método dos elementos finitos.

Para esta simulação foram considerados alguns parâmetros térmicos e mecânicos e condições de contorno que influenciariam nas tensões de origem térmica como o calor de hidratação e tipo cimento, dosagem do concreto prevista, elevação adiabática do concreto, massa específica do concreto, propriedades térmicas e mecânicas do concreto e fundação, condições de contorno (velocidade do vento, temperatura ambiente, tipo de fôrma e cura), temperaturas de lançamento do concreto, intervalo de lançamento entre concretagem, altura de camadas de concretagem entre outros.

O projeto deste bloco de fundação circular, com diâmetro de 24,3m, altura igual a 3m e volume teórico de 1390m³, previa sua concretagem em duas etapas com alturas iguais de camada de 1,5m, com $f_{ck}= 30$ MPa aos 28 dias e emprego de 100% de gelo em substituição à água de amassamento.

A partir das das simulações matemáticas realizadas, verificou-se que a probabilidade de fissuração seria mínima quando a temperatura de lançamento da primeira camada de concretagem fosse de 18°C, através da substituição de, no mínimo, 90% de água de amassamento por gelo. A temperatura de lançamento da segunda camada não deveria ser superior a 20°C e para que isto ocorresse o cálculo mostrou que bastaria substituir 80% da água de amassamento por gelo.

Para verificar o comportamento térmico no interior do bloco de fundação, foram instalados 9 termopares (nomeados de T-1 a T-9), sendo as leituras efetuadas em intervalos de 2 horas durante um período de 2 dias; após esse período era realizada leitura diária durante um período total de 10 dias. As Figuras 1 a 5 mostram detalhes da concretagem da base da chaminé.



Figura 1 – Vista geral do bloco de fundação da base da chaminé – Notar fôrmas de alvenaria



Figura 2 – Caminhões frigoríficos – Notar montagem das plataformas para adicionar gelo no canteiro de obra



Figura 3 – Adição de gelo no caminhão betoneira no canteiro de obra

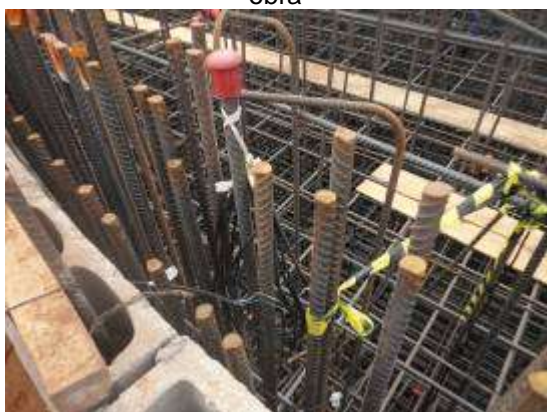


Figura 4 - Posicionamento dos termopares na estrutura – Notar sinalização dos termopares para evitar que fossem danificados



Figura 5 – Medição da temperatura de lançamento do concreto com termômetro digital – Temperatura indicando 16°C

A partir dos dados de leitura dos termopares instalados no bloco de fundação foi realizada uma comparação com os valores obtidos do estudo térmico realizado pela Deseq.

3.1 Parâmetros de Cálculo

3.1.1 Dosagem do Concreto

A Tabela 1 apresenta a dosagem do concreto utilizada na base da chaminé da fábrica.

Tabela 1 – Dosagem do concreto – Bloco de fundação da chaminé - Fábrica Eldorado Papel e Celulose S/A

Projeto: Bloco de fundação – Fábrica Eldorado Papel e Celulose S/A		
Material	Fornecedor	Consumo (kg/m ³)
Cimento: CP-II –E-32	Cauê	349
Sílica Ativa	Ferbasa	27
Areia Natural	P. N. Sra. Aparecida	734
Seixo 0	P. N. Sra. Aparecida	337
Seixo 1	P. N. Sra. Aparecida	782
Água	Abastecimento da obra	155
Aditivo Polifuncional	Tecmult 830	1,550
Aditivo Superplastificante	Viscocrete 5700	1,550

3.1.2 Características Mecânicas do Concreto

A partir do f_{ck} especificado em projeto foram ajustados os valores de resistência à compressão para se enquadrarem em uma equação que pudesse ser utilizada nos cálculos de tensões de origem térmica. A resistência à tração foi considerada como 10% da resistência a compressão como mostra a Figura 6.

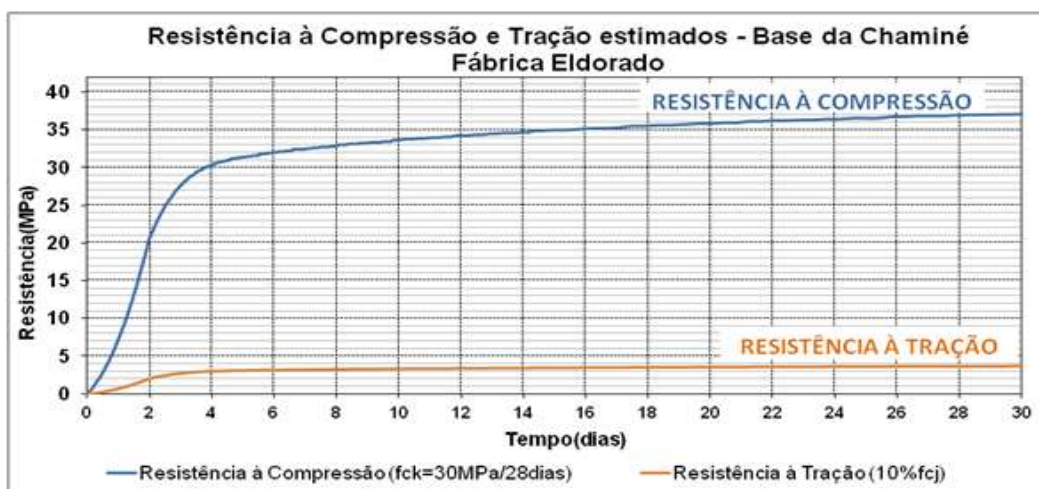


Figura 6 – Evolução da resistência à compressão e à tração do concreto, dados estimados.

O valor de módulo de elasticidade foi estimado a partir das premissas constantes da NBR 6118, onde:

$$E_{ci} = 5600 \cdot (f_{cj})^{1/2}, \text{ à idade de 28 dias} = \text{módulo de elasticidade inicial} \quad (\text{Equação 1})$$

$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci}$ = módulo de elasticidade secante

(Equação 2)

Os dados de módulo de elasticidade estimados foram ajustados para se adequarem a uma equação que pudesse ser utilizada nos cálculos de tensões de origem térmica. A Figura 7 mostra a evolução do módulo de elasticidade adotada para a simulação.

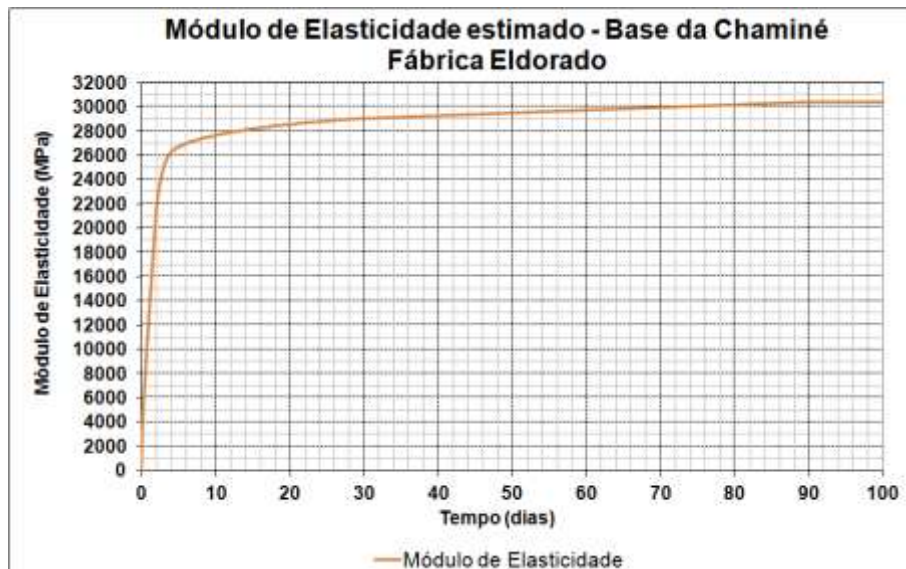


Figura 7 – Evolução do módulo de elasticidade do concreto, dados estimados.

Adotou-se para a simulação computacional coeficiente de Poisson de 0,21.

3.1.3 Características térmicas do concreto

A evolução do calor de hidratação do cimento CII E 32, foi estimado a partir dos dados de ensaio realizado pelo laboratório da ABCP e dados fornecidos pela InterCement. A Figura 8 apresenta o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento considerado para o cálculo.

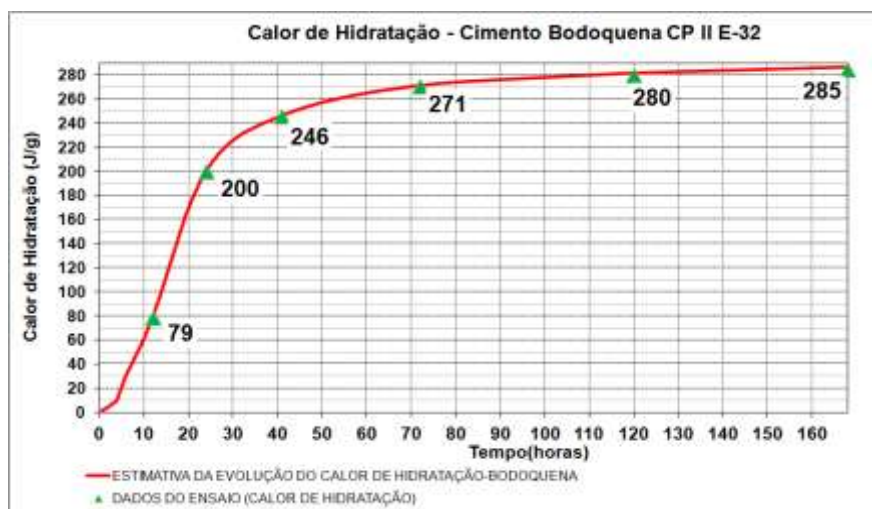


Figura 8 - Evolução do calor de hidratação do cimento CP II E-32

A curva de elevação adiabática do concreto mostrada na Figura 9, foi calculada através da fórmula de Rastrup a partir dos valores de calor de hidratação do cimento, consumo de cimento, massa específica e calor específico do concreto como mostra a Equação 3.

$$\Delta T = \frac{C \cdot (\text{calor de hidratação})}{\gamma \cdot c} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: ΔT = Elevação adiabática (°C)
 γ = Massa específica (kg/m³)
 c = Calor específico (kJ/kg °C)
 C = Consumo de cimento (kg/m³)

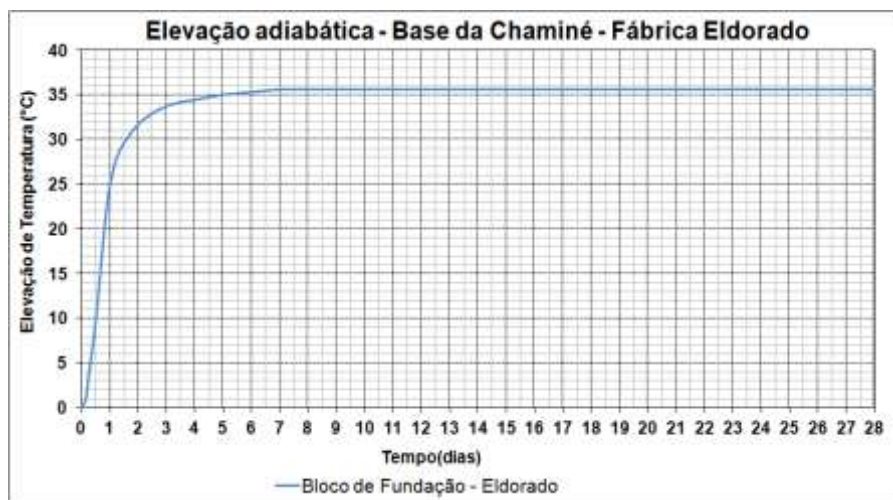


Figura 9– Curva de elevação adiabática do concreto

Como não haviam informações relacionadas às características térmicas dos materiais constituintes do concreto utilizado na simulação, estes valores foram estimados a partir da dosagem prevista e através de dados de bibliografias, periódicos e dissertações existentes considerando as características dos materiais disponíveis na região.

Os valores do calor específico (c) e condutividade térmica (k) do concreto foram estimados considerando os valores individuais de cada material nas expressões a seguir:

$$c = \frac{\sum m_i c_i}{\sum m_i} \quad (\text{Equação 4}) \quad \text{e} \quad k = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: c_i = calor específico de cada constituinte da dosagem; k_i = condutividade térmica de cada constituinte do concreto; m_i = massa de cada constituinte da dosagem.

Os valores de calor específico, condutividade térmica e coeficiente de dilatação térmica adotados constam da Tabela 2

O coeficiente de dilatação térmica adotado foi estimado a partir de informações de concretos que utilizaram seixo próximo a região da obra como agregado.

Tabela 2 - Calor específico, condutividade térmica e coeficiente de dilatação térmica do concreto

Propriedade térmica	Projeto Eldorado
Calor específico (kJ/kg.°C)	1,2
Condutividade térmica (kJ/m.h.°C)	13,5
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	12,5

4 Condições de Contorno

As características da fundação adotadas foram as de uma rocha basáltica, pois não se dispunha na ocasião das simulações dos detalhes da rocha do local. Para este tipo de formação geológica foram adotados os valores indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades da rocha de fundação

Características da Fundação	Parâmetros
Massa Específica (kg/m ³)	2840
Calor específico (kg/kg.°C)	0,91
Condutividade térmica (kg/m. h.°C)	6,8
Módulo de elasticidade (MPa)	61000
Resistência à compressão (MPa)	115,1
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	8,5
Coeficiente de Poisson	0,21

Os dados de temperatura média ambiente e a velocidade média do vento foram baseados nos registros da estação meteorológica de Ilha Solteira-SP, como mostra a Figura 10 e a Figura 11.



Figura 10- Temperatura média ambiente – Região de Ilha Solteira-SP



Figura 11 - Velocidade média do vento – Região de Ilha Solteira - SP

Os coeficientes de transmissão superficial de calor considerados no modelo simulado constam da Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão superficial de calor

Tipo de troca	Transmissão superficial (kJ/m ² .h.°C)
Concreto-ar	48,6
Concreto - água de cura	1256,0
Concreto – fôrma+vento	48,6

5 Modelo Analisado e Malha de Elementos Finitos

Foram simuladas as evoluções de temperaturas e tensões que ocorreriam num modelo tridimensional de elementos finitos, nas seções mais críticas do bloco de fundação. A malha de elementos finitos utilizada nos cálculos da estrutura é apresentada na Figura 12. O cálculo tridimensional de temperaturas, no elemento de concreto, pressupõe que a propagação de calor ocorre na seção transversal e longitudinal simultaneamente aproximando-se de uma situação real.

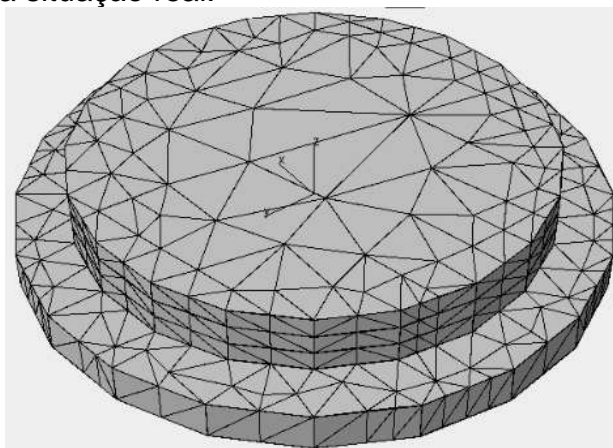


Figura 12 – Malha de elementos finitos utilizada para o cálculo

Para os estudos de temperatura decidiu-se analisar pontos situados em regiões mais críticas e escolhidos a partir das isotermas e isotensões obtidas através simulações. Foram instalados termômetros para o monitoramento do desenvolvimento das temperaturas nestas regiões.

A Figura 13 e a Figura 14 mostram corte transversal e longitudinal, respectivamente, mostrando a localização dos pontos de estudo da base da chaminé.

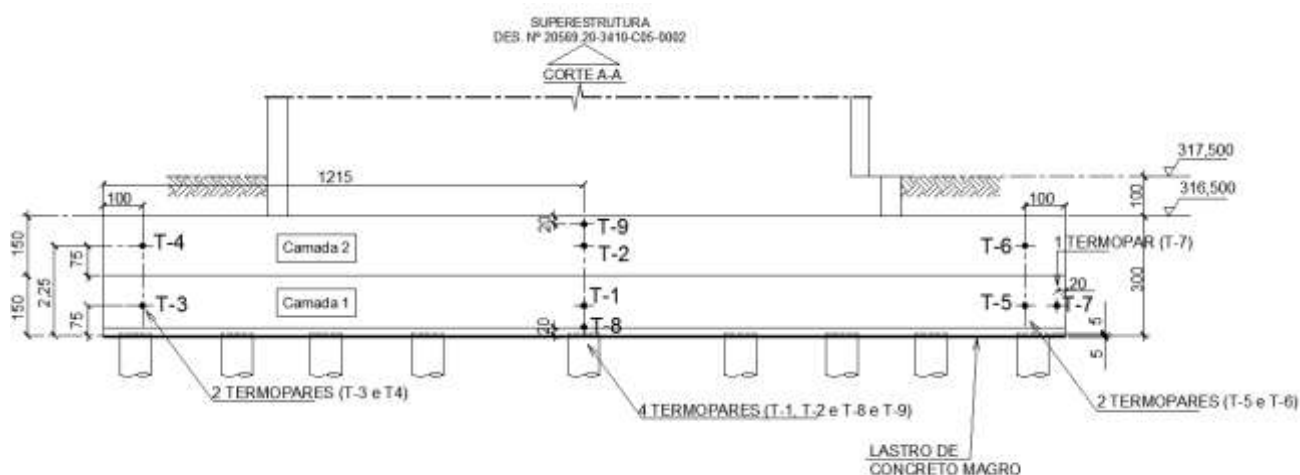


Figura 13 – Corte transversal com localização dos termopares – Base da chaminé – Projeto Fábrica Eldorado

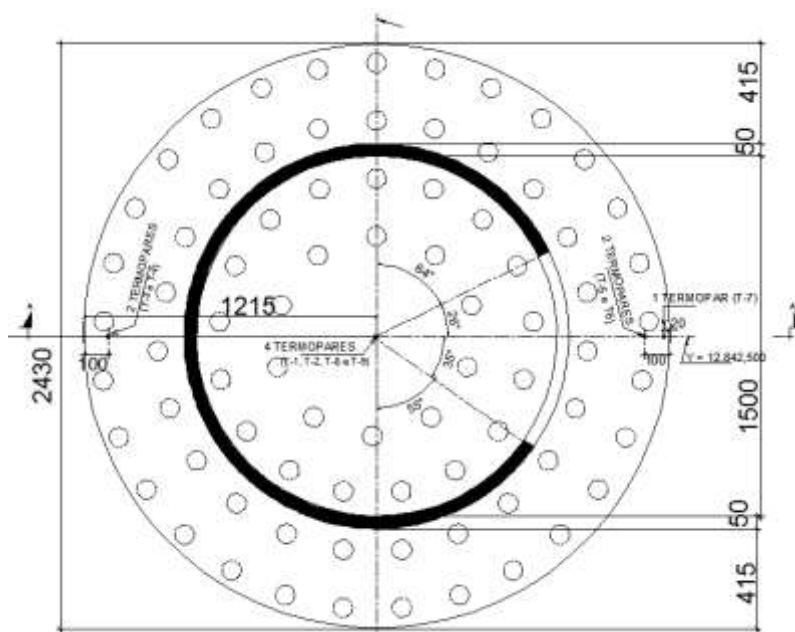
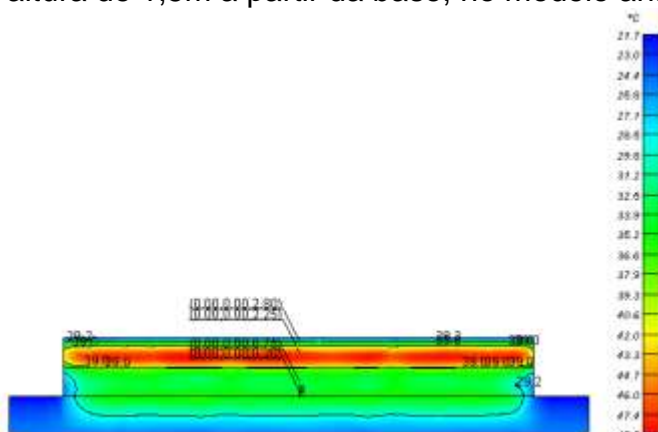


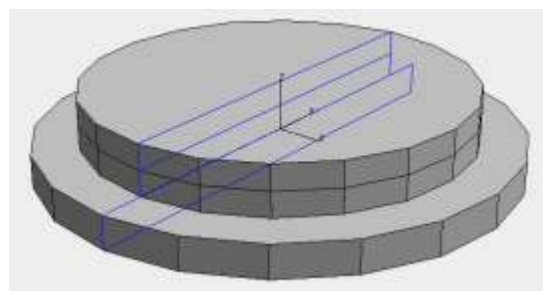
Figura 14 – Desenho do corte longitudinal com localização dos pontos de estudo – Base da chaminé – Projeto Fábrica Eldorado

6 Resultado da análise térmica

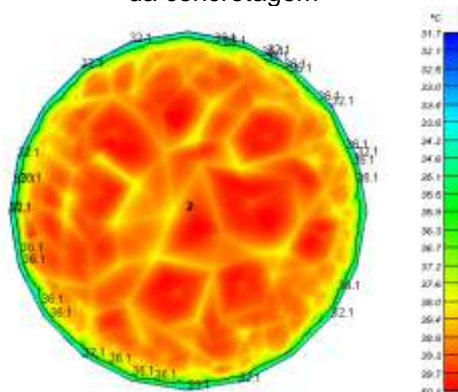
A Figura 15 apresenta as isotermas e a localização dos pontos de estudo no bloco de fundação circular na seção longitudinal (a 12,15m em relação à face externa) e em planta a altura de 1,5m a partir da base, no modelo analisado.



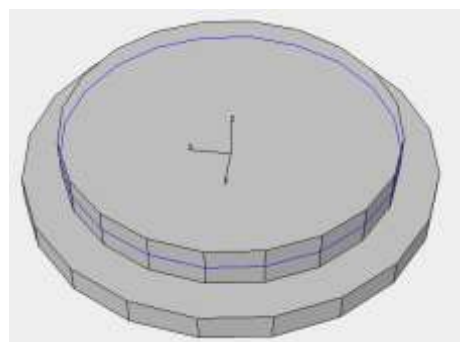
Isotermas na seção longitudinal 187 horas após o início da concretagem



Localização da seção de análise - d=12,15m⁽¹⁾ (Contorno azul)



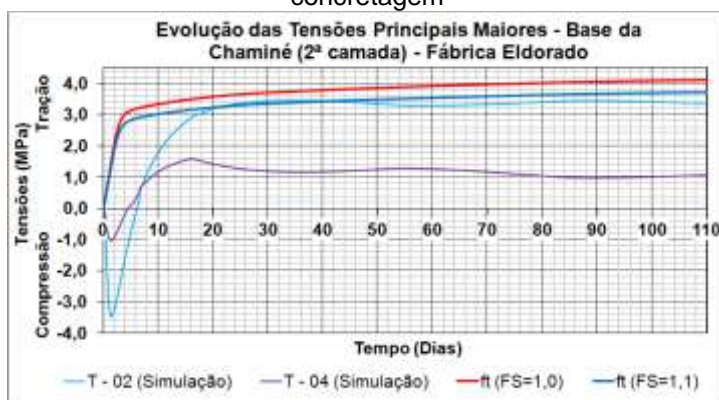
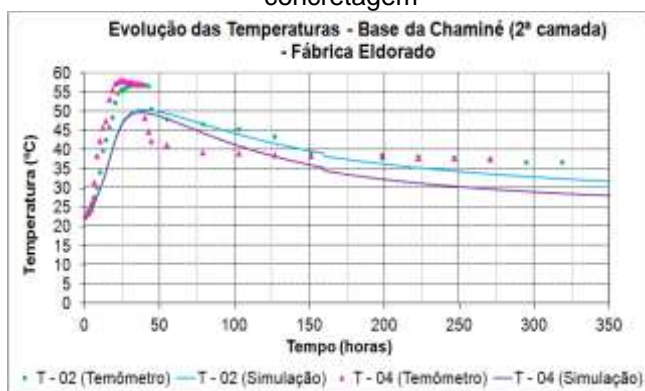
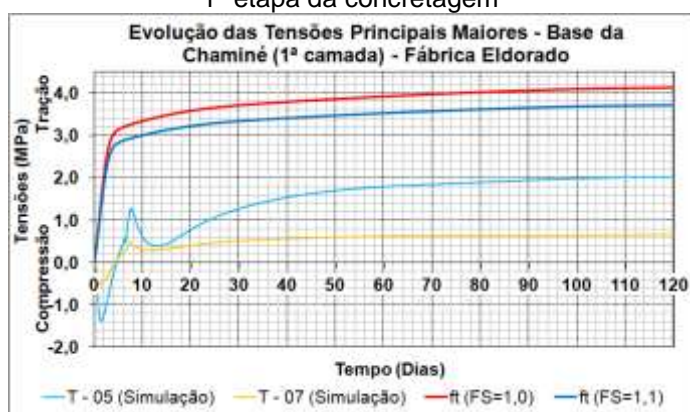
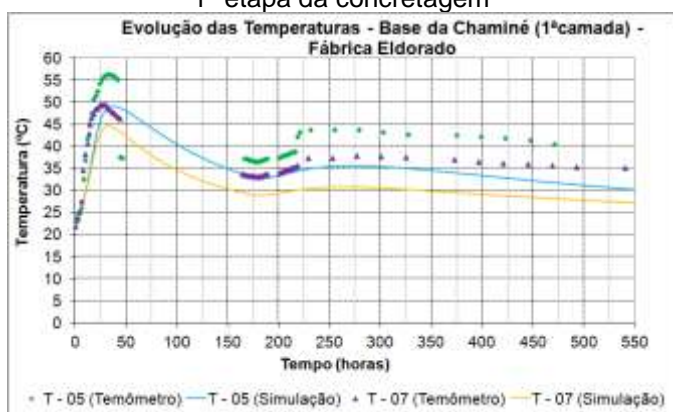
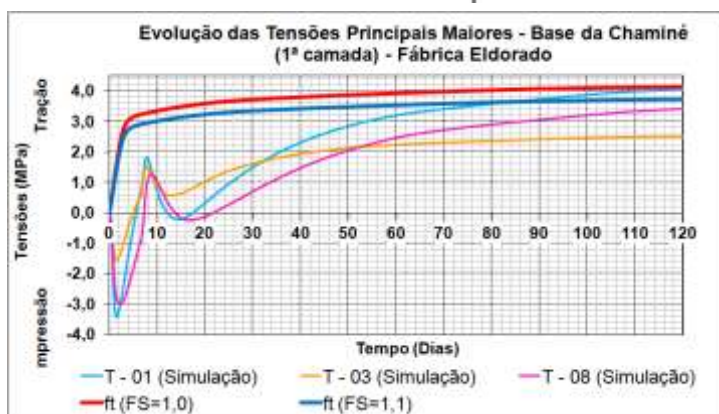
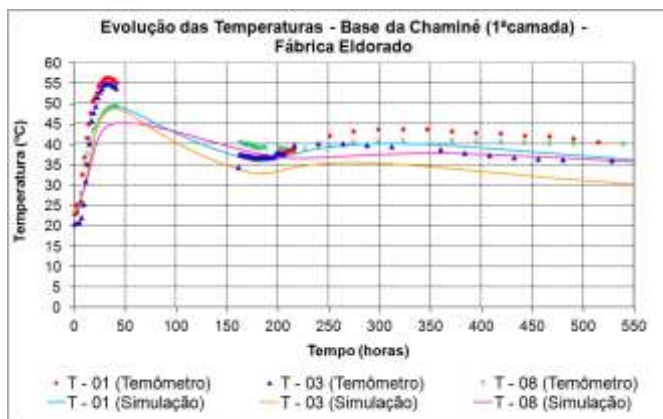
Isotermas em planta - 187 horas após o início da concretagem



Localização da seção de análise - h=1,5m⁽²⁾ (Contorno azul)

Nota: (1) distância da seção em relação à face externa; (2) Altura da seção em relação à base da estrutura
 Figura 15 - Isotermas para as seções longitudinal e em planta

Os gráficos (Figura 16 a Figura 23) mostram uma comparação das entre as leituras realizadas pelos termopares instalados na estrutura e a simulação através do programa.



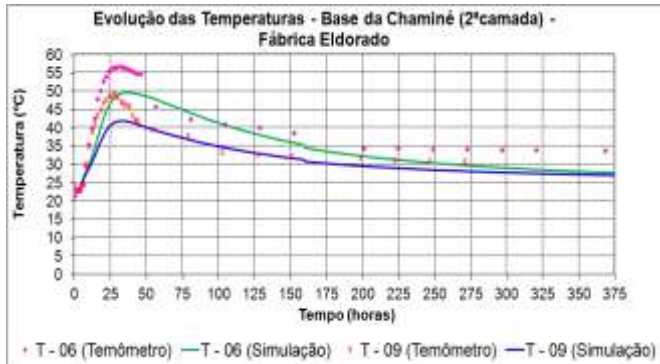


Figura 22. T-06/ T-09 – Evolução das Temperaturas - Base da chaminé – Projeto Eldorado – 1ª etapa da concretagem

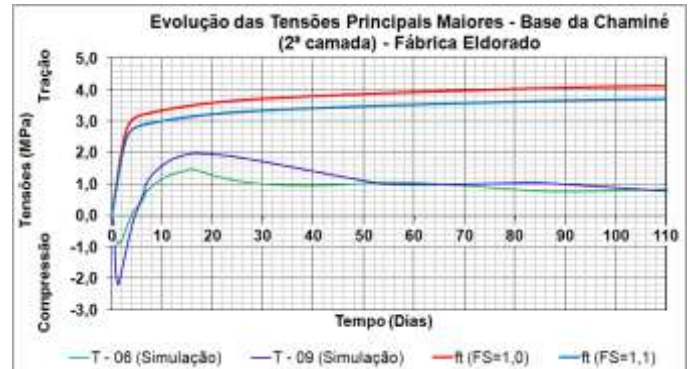


Figura 23. – T-06/ T-09 – Evolução das Tensões Principais Maiores - Base da chaminé – Projeto Eldorado – 1ª etapa da concretagem

7 Conclusão

Os estudos sobre a possibilidade de riscos de fissuração por origem térmica em estruturas massivas de concreto é importante para garantir maior durabilidade deste tipo de estrutura. Atualmente têm-se consciência que projetistas de estruturas devem avaliar além das propriedades mecânicas e/ou custo inicial da obra, aspectos relacionados a durabilidade dos materiais evitando custos adicionais referentes a reparos e/ou recuperação das estruturas por falhas relacionadas a escolha dos materiais ou adoção de metodologia de concretagem inadequada. Além dos custos de realização dos reparos o cronograma da obra também poderá ser prejudicado, dependendo do tipo de estrutura.

No caso de estruturas massivas os estudos térmicos são importantes para minimizar os efeitos do aumento de temperatura no concreto e conseqüentemente diminuir a probabilidade de fissuração por retração térmica, através do menor gradiente de temperatura entre a temperatura máxima no interior do concreto e a temperatura ambiente. Algumas metodologias já consagradas e conhecidas pelo meio técnico contribuem significativamente para minimização dos problemas relacionados ao aumento de temperatura no interior do concreto, como descritas a seguir:

- Adição de gelo ao concreto previamente ao seu lançamento;
- Redução do consumo de cimento através do aumento da idade de controle para idade superior a 28 dias caso possível; adição parcial de material pozolânico ao concreto e avaliação por parte do projetista da possibilidade de diminuição do f_{ck} de projeto para elementos de fundação;
- Utilização de cimentos com baixo calor de hidratação como CP III e/ou CP IV;
- Lançamento do concreto no período noturno quando viável ou início de lançamento do concreto no início da manhã quando as temperaturas são amenas e contribuem para diminuição da temperatura de lançamento do concreto.

Para que os estudos térmicos sejam utilizados como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão de medidas apropriadas para ação mitigadora de fissuração por origem térmica, além da realização de estudo técnico-financeiro através de zoneamento de



Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2012
Outubro / 2012



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

temperatura de lançamento do concreto fresco e diminuição de cronograma de concretagem, por exemplo, é necessária a caracterização dos materiais a serem empregados. .

No caso dos estudos realizados para a base da chaminé da fábrica Eldorado, os parâmetros térmicos relacionados ao concreto foram estimados a partir de bibliografia e informações sobre materiais disponíveis na região da obra, portanto, isso pode explicar as diferenças entre os picos de temperaturas de aproximadamente 5°C entre as temperaturas lidas por meio dos termopares instalados e as temperaturas obtidas por meio da simulação.

Apesar de alguns parâmetros adotados e condições de contorno não serem idênticos às condições reais impostas à estrutura, pode-se concluir que os resultados apresentaram boa representatividade, comprovando a utilidade de aplicação deste tipo de estudo para definição de metodologia adequada visando minimizar a probabilidade de fissuração por tensões de origem térmica.



Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2012
Outubro / 2012



@ 2012 - IBRACON - ISSN 2175-8182

8 Referências

- ABNT NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, 2004.
- ABNT NBR 13116. **Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação – Especificação**, 1994.
- SANTOS S. B., BITTENCOURT R. M., GRAÇA N. G. **Efeitos da Temperatura sobre o Concreto**, Concreto: Ciência e Tecnologia, Editor: Geraldo C. Isaia, IBRACON, São Paulo, Vol I e II, 2011.
- FILHO, J. M. **Concreto Massa e Compactado com Rolo**, Concreto: Ciência e Tecnologia, Editor: Geraldo C. Isaia, IBRACON, São Paulo, Vol. II, 2011.
- FURNAS, **Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com rolo: Ensaio e propriedades**, Editor: Walton Pacelli de Andrade, PINI, São Paulo, 1997.
- KUPERMAN, S. C.. **Concreto Massa Convencional e Compactado com Rolo para Barragens**, Concreto-Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, São Paulo, Vol. 2, 2005.
- ACI COMMITTEE 207, Mass Concrete, American Concrete Institute.