

# Metodologia para análise paramétrica do fenômeno térmico do concreto massa de uma fundação de torre eólica

EDUARDO DE AQUINO GAMBALÉ - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2351-7147> | ELETROBRÁS FURNAS;  
LUCIANA DOS A. FARIAS - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3830-4611> (luciana.farias@rheoworks.eng.br) | RHEOWORKS TEC. DA CONSTRUÇÃO;  
PATRÍCIA G. GAMBALÉ - <https://orcid.org/0000-0001-8219-3616> (patricia.gambale@concrecon.com.br) | CONCRECON CONCR. E CONSTRUÇÕES

## RESUMO

**O**S BLOCOS DE FUNDAÇÕES DAS EDIFICAÇÕES ATUAIS E AS FUNDAÇÕES DE TORRES EÓLICAS TÊM SE TORNADO ELEMENTOS DE GRANDE PREOCUPAÇÃO NO MEIO TÉCNICO DEVIDO AO GRANDE VOLUME DE CONCRETO. ESSES ELEMENTOS, CATEGORIZADOS COMO CONCRETO MASSA, EXIGEM ATENÇÃO QUANTO ÀS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS ADVINDAS DO PROCESSO EXOTÉRMICO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO. NESSE SENTIDO, É RECOMENDADO O CONTROLE DA TEMPERATURA MÁXIMA DO CONCRETO DE MANEIRA A MINIMIZAR A OCORRÊNCIA DE DEF (DELAYED ETTRINGITE FORMATION) E A GERAÇÃO DE TENSÕES DE TRAÇÃO PROVENIENTES DOS FENÔMENOS TÉRMICOS. TAIS REAÇÕES, COM TENSÕES EM NÍVEIS SUPERIORES À TRAÇÃO ADMISSÍVEL DO CONCRETO, PODEM CAUSAR FISSURACIONES. NESTE CONTEXTO, ESTE TRABALHO OBJETIVA MOSTRAR UMA METODOLOGIA VIÁVEL DE SER EMPREGADA PARA A ANÁLISE PARAMÉTRICA DO FENÔMENO TÉRMICO DEVIDO À HIDRATAÇÃO DO CIMENTO DA BASE DE UMA TORRE EÓLICA, QUE PODE SER ADOTADA, TAMBÉM, PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE BLOCOS DE FUNDAÇÕES DE EDIFICAÇÕES.

**PALAVRAS-CHAVE:** CALOR DE HIDRATAÇÃO, FISSURAS, CONCRETO MASSA, REAÇÕES EXPANSIVAS.

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento do concreto ao longo do tempo é dependente de vários parâmetros, sendo que alguns têm influência significativa no desempenho e na durabilidade de uma estrutura. Dessa forma, há de se considerar as influências

relacionadas ao comportamento químico, térmico ou físico-mecânico do concreto. Estruturas massivas de concreto demandam, em sua grande maioria, elevados consumos de cimento e, dependendo do tipo e de suas características, fissurações podem ocorrer.

O fenômeno da hidratação do cimento Portland tem sido intensamente pesquisado nos últimos anos. Ele decorre de reações exotérmicas, podendo ocasionar elevações consideráveis de temperatura. No dia a dia do tecnólogo de concreto, é exigida a avaliação da temperatura máxima das estruturas com características massivas, tendo como principal objetivo a previsão de riscos e, a partir disso, são recomendadas medidas necessárias para a mitigação de ocorrência de fissuras decorrentes do fenômeno térmico da estrutura.

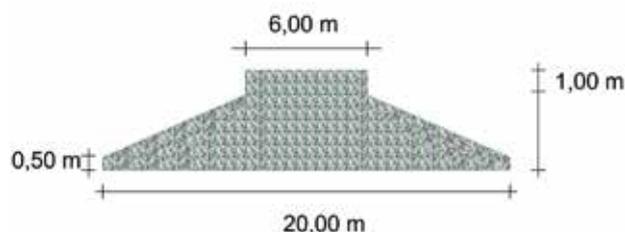
Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que pode ser empregada para a análise paramétrica

do fenômeno térmico devido à hidratação do cimento da base de uma torre eólica. Essa análise pode ser estendida à avaliação do comportamento de blocos de fundações de edificações, com o foco de esclarecer os principais pontos de análise e os critérios adotados para a recomendação de melhorias construtivas para a minimização do risco de fissurações.

## 2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DA FUNDAÇÃO DE TORRE EÓLICA

No controle tecnológico de bases de torres eólicas, cujas dimensões possuem magnitude suficiente para exigir que sejam tomadas medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente, o tecnólogo pode se deparar com diversos problemas relacionados aos fenômenos provenientes do processo de hidratação do cimento. A fissuração devido à geração de tensões de tração, por fenômenos térmicos ou provenientes de reações expansivas como a DEF, pode alcançar níveis superiores à tensão de tração admissível do concreto. Essa situação torna extremamente relevante o conhecimento dos métodos de mitigação desses tipos de manifestações patológicas no concreto massa.

O aumento do consumo de cimento, combinado com uma baixa relação água/cimento, tende a diminuir a permeabilidade, o que é uma condição interessante para



**FIGURA 1**  
SEÇÃO TÍPICA DA MALHA COM PROPAGAÇÃO BIDIRECIONAL

o aumento da durabilidade do concreto. Por outro lado, esse aumento no consumo do cimento conduz a maior elevação de temperatura, que, em determinados níveis, pode prejudicar a formação da etringita “primária”, necessária para o desenvolvimento de pega e endurecimento do concreto. Com isso, existe maior disponibilidade de íons sulfatos na solução dos poros do concreto e, já no estado endurecido, contribui de forma mais expressiva para a ocorrência da DEF. Segundo Melo (2011), esse risco aumenta quando a estrutura atinge temperaturas máximas superiores a 60-65 °C.

Dessa forma, pelos motivos expostos anteriormente, é de suma importância que a temperatura interna do concreto não exceda o limite de 60-65 °C. Caso sejam verificados riscos para que isso ocorra, medidas preventivas devem ser adotadas, tais como: o resfriamento dos agregados, da água ou do próprio concreto e até mesmo interferências construtivas, como a concretagem em camadas e adoção de intervalos de lançamento mais prolongados, quando possível.

## 2.1 Modelo de simulações numéricas: o método de elementos finitos

De acordo com Carlson (1939), em meados da década de 1930, o pesquisador Douglas McHenry havia iniciado seus estudos para proposição de um modelo estrutural que pudesse ser avaliado matematicamente. A partir daí, ele idealizou o método da analogia das treliças, o que permitiu que diversos pesquisadores buscassem representar a estrutura em pequenos elementos, denominados de elementos finitos. Dessa forma, foi criado o Método dos Elementos Finitos, que hoje é largamente utilizado em diversos ramos da engenharia, como é apresentado por Gambale & Traboulsi (2015).

Segundo Carlson *et al.* (1979), muitos trabalhos foram escritos sobre o método dos elementos finitos a partir de 1953, mas não havia procura relevante desse método para um emprego prático. Contudo, no ano de 1962, Clough (1962) apresentou uma utilização bem sucedida dessa metodologia para análise da segurança da estrutura de Norfolk Dam, uma barragem com 70 metros de altura, ins-



**FIGURA 2**

MODELO ESQUEMÁTICO DA MALHA DO MODELO UNIDIRECIONAL DE PROPAGAÇÃO DE CALOR

talada no rio North Fork, norte do Arkansas — Estados Unidos. Nela foi observada a ocorrência de uma considerável trinca vertical, ao longo de praticamente toda sua altura, tipicamente decorrente do fenômeno térmico do concreto e que repartia a estrutura em duas. Dessa forma, buscou-se quantificar a segurança dessa barragem por meio da análise paramétrica por elementos finitos, com enfoque na solução de problemas decorrentes da variação volumétrica da estrutura a partir de suas características geométricas, viscoelásticas, térmicas e mecânicas. Além disso, seria possível a consideração dos coeficientes de restrição existentes na estrutura, provenientes das restrições externas ou internas às deformações do concreto decorrentes das variações de temperatura. De acordo com o ACI 207.2R, os coeficientes de restrição são resultantes de um ou mais fatores, que podem ser a ligação da estrutura com as fundações ou com outras estruturas ou do concreto com as armaduras ou da seção interna do próprio concreto.

Com a consideração dos fatores mencionados acima, é possível estabelecer uma análise capaz de promover a determinação das deformações e tensões térmicas atuantes e, assim, prever soluções para a preservação da integridade da estrutura, caso a avaliação seja realizada de maneira prévia, ou permitir a proposta de correções em situações em que o dano já tenha sido observado.

A atuação na análise da segurança da estrutura de Norfolk Dam (CLOUGH, 1962) registra uma das primeiras aplicações conhecidas de utilização do método dos elementos finitos para resolver um problema da engenharia.

## 2.2 Considerações para análise do comportamento térmico da base de torre eólica

As dimensões da fundação de uma torre eólica permitem a análise da propagação de calor considerando uma ou duas direções, basicamente. Poderia, até mesmo, ser considerada a avaliação tridimensional do seu comportamento por meio de ferramentas mais sofisticadas de análise, como o ANSYS®, por exemplo. Todavia, na prática da engenharia civil para esse tipo de estrutura, considerando o lançamento típico adotado para sua concretagem, tem-se que a propagação de calor é preferencialmente unidimensional. Com isso, a forma de propagação inerente à peça permite a análise a partir de qualquer um dos modelos. Dessa forma, neste trabalho foram contemplados os modelos de propagação de calor em uma e em duas direções, que atendem ao objetivo de análise dessa estrutura, considerando o concreto um material isotrópico.

Desses modelos de propagação de calor, sabe-se que:

- O modelo unidirecional de propagação de calor representa a situação mais próxima à condição real da estrutura;
- O modelo bidirecional de propagação de calor demonstra o comportamento térmico da peça, com uma de suas dimensões — a altura — bem inferior às demais.

A seção típica tomada para as simulações demonstradas neste artigo possui malha de elementos finitos para propagação bidirecional de temperatura, como a representada na Figura 1. Já o modelo de propagação de calor unidirecional é representado na Figura 2.

É importante destacar que, para a realização da análise do comportamento térmico do concreto das fundações de torres eólicas, algumas ressalvas foram estabelecidas. A primeira é dada pela limitação quanto à consideração da

energia de ativação, que, neste caso, é desprezada devido à complexidade das equações que representam o fenômeno.

Outro fator não considerado nos cálculos é a influência do vento nesse tipo de estrutura, principalmente no que diz respeito a uma eventual contribuição para minimização do risco térmico no concreto. Para fins desse tipo de análise, considera-se que a influência desse fenômeno da natureza é desprezível, mesmo sabendo que esse tipo de concretagem ocorre em regiões com grandes movimentos de vento, já que normalmente são recomendadas proteções à estrutura após a concretagem justamente para que não surjam fissuras de retração nas peças e causem maiores problemas no concreto em seu estado endurecido.

Em trabalhos de consultoria realizados pelos engenheiros Walton Pacelli de Andrade, Eduardo de Aquino Gambale e Luciana dos Anjos Farias para diversos complexos eólicos do nordeste do Brasil, as retroanálises realizadas indicaram efetiva aderência do comportamento térmico do concreto analisado previamente à concretagem com as leituras de temperatura realizadas no canteiro após a concretagem, com respostas similares às observadas na Figura 19. Essa constatação respalda a confiabilidade da resposta do cálculo térmico, mesmo ao desconsiderar qualquer influência que os fatores mencionados acima possam promover ao concreto.

### 3. PROPRIEDADES DO CONCRETO EMPREGADAS NA ANÁLISE TÉRMICA

A distribuição de calor está diretamente ligada às propriedades térmicas do concreto. Por isso, o conhecimento sobre elas é de fundamental importância para os estudos da propagação de calor gerado durante o processo de hidratação. De acordo com Calmon (1995), os parâmetros básicos que influenciam na análise no campo da temperatura do concreto são:

- Consumo e tipo de cimento, além do tipo de adição mineral componente do ligante, que influencia na elevação adiabática da temperatura do concreto;
- Temperatura de colocação do concreto na praça e temperatura ambiente;
- Altura e intervalo de lançamento das camadas de concretagem;
- Geometria da estrutura a ser analisada;
- Calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica do concreto;
- Tipo litológico de agregado;
- Transmissão superficial de temperatura.

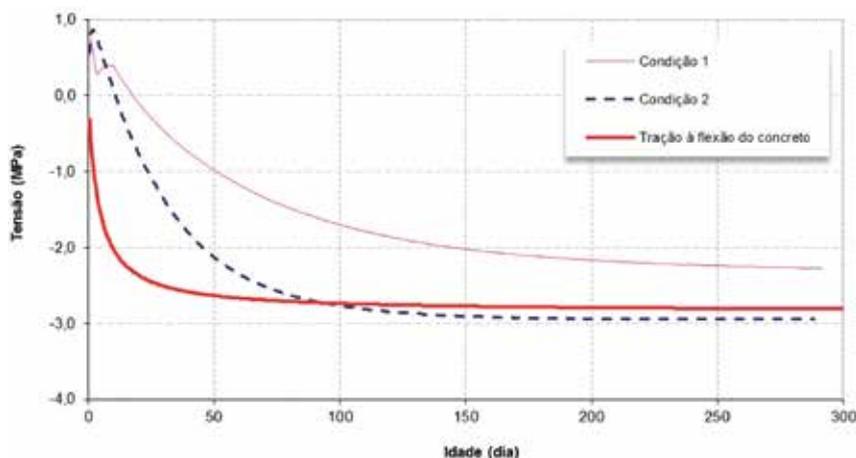
Em análises estatísticas conduzidas por Gambale *et al.* (2010), foi avaliada a distribuição dos valores e os parâmetros significativos das propriedades térmicas do concreto. Para tanto, foram realizados teste de normalidade, análise de variância e agrupamento de médias homogêneas. Como resultado, foi observado que os fatores mais significativos foram a elevação adiabática de temperatura, o

consumo de cimento, a temperatura de colocação do concreto e a altura das camadas de colocação do concreto na praça. Devido a isso, este artigo se concentrou principalmente nestes fatores relacionados.

Ressalta-se que as propriedades significativas relacionadas acima são suficientes para a previsão do desenvolvimento de calor na estrutura. Contudo, para a análise de tensões provenientes do efeito térmico, é necessário o conhecimento das propriedades viscoelásticas do concreto, como a fluência e o módulo de elasticidade, e da resistência à tração do concreto, preferencialmente, à flexão. O resultado tensional obtido é comparado à resistência à tração e, assim, é possível observar se o concreto tem propensão ou não de fissurar em decorrência do fenômeno térmico e em que momento do resfriamento essa manifestação ocorrerá (Fig 3).

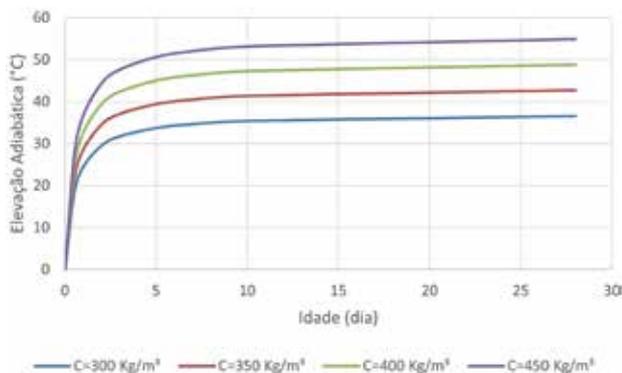
No entanto, na realidade dos empreendimentos eólicos, dificilmente são realizados os ensaios para determinação das propriedades necessárias para a análise tensional. Em alguns casos, tendo as informações do traço, cimento e agregado, elas até podem ser estimadas, baseando-se em um banco de dados confiável, como o constante no livro de Furnas (1997). Contudo, em alguns casos, a estimativa pode incorrer em uma imprecisão, principalmente pelo tipo de concreto normalmente empregado nesse tipo de estrutura - com elevado teor de argamassa - e prejudicar a análise tensional. Dessa forma, para efeitos de fundações de torres eólicas, tem-se que, ao limitar a temperatura à necessária para minimização da ocorrência da DEF e considerando que se trata de uma estrutura densamente armada, o risco de fissuração por origem térmica, consequentemente, é bastante diminuído.

Com isso, para fins deste artigo, o entendimento é que a limitação existente é a temperatura necessária para minimização da ocorrência de DEF e a análise tensional, quando necessária, é realizada com as propriedades determinadas a partir de uma condição favorável, seja por ensaios laboratoriais, seja por estimativa das propriedades em condições próximas ao concreto lançado.



**FIGURA 3**

EXEMPLO GRÁFICO DO RESULTADO DE UMA ANÁLISE TENSIONAL DO CONCRETO



**FIGURA 4**  
ELEVÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA PRA DIFERENTES  
CONSUMOS DE CIMENTO

### 3.1. Predição da elevação adiabática de temperatura

A determinação da elevação adiabática de temperatura do concreto é um dos parâmetros mais importantes, podendo ser obtida por meio de ensaio laboratorial realizado em calorímetro adiabático, que fornece a elevação da temperatura do concreto sem trocas de calor com o meio. Porém, não existe disponibilidade suficiente de laboratórios capazes de determinar essa propriedade, restando a sua previsão a partir das características do cimento e dos traços de concreto estabelecidos para a estrutura. A estimativa nessas condições fornece um resultado confiável e bastante aderente aos resultados obtidos nas leituras de campo.

A elevação adiabática de temperatura pode ser estimada, como segue:

- Por meio de resultados do calor de hidratação realizados em ensaios de laboratório ou pelos laudos fornecidos pelo fabricante. O ensaio pode ser realizado por meio da garrafa de Langavant (ABNT NBR 12006:1990), ou por outra metodologia confiável (calorimetria isotérmica, por exemplo), e fornece a evolução do calor com o tempo, normalmente para as idades de 24h, 41h, 72h e 168h, podendo ser consideradas outras idades caso seja necessário ou determinado pelo laboratório executor. Conhecendo a evolução do calor nesse intervalo e os consumos de cimento dos traços empregados na estrutura, é possível estabelecer um parâmetro para estimar a elevação adiabática

do concreto, cujos cálculos matemáticos e banco de dados de apoio são demonstrados no livro da Equipe de FURNAS (1997);

- Por meio de um modelo de dados baseado em redes neurais artificiais apresentado por Étore, F. F. (2004).

- Por referências bibliográficas, onde alguns parâmetros, como a difusividade térmica e o calor específico, podem ser obtidos através das características do tipo litológico de agregado utilizado no concreto (Gambale *et al.*, 2008).

d. Alguns consultores e pesquisadores recorrem à moldagem de blocos experimentais ou de instrumentação de peças de concreto com termômetros no início das concretagens, para que seja possível a obtenção da elevação de temperatura por meio da retroanálise (Gambale *et al.*, 2010).

**TABELA 1**

SIMULAÇÕES COM PROPAGAÇÃO DE CALOR EM DUAS DIREÇÕES:  
MODELO BIDIRECIONAL

Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura inicial (°C)	Temperatura máxima (°C)
300	15	47,80
	25	56,73
	35	66,02
350	15	52,99
	25	61,93
	35	71,22
400	15	58,19
	25	67,14
	35	76,43
450	15	63,39
	25	72,35
	35	81,65

Para as simulações indicadas neste artigo, foi tomado como base um cálculo térmico realizado para concreto produzido com cimento CP IV-32 RS, com adição de pozolana de argila calcinada e com resultado de ensaio de calor de hidratação fornecido pelo fabricante, que indica que o ligante possui baixo calor de hidratação conforme a norma NBR 16697:2018 ( $\leq 270$  J/g, na idade de 41 h). A elevação

**TABELA 2**

SIMULAÇÕES COM PROPAGAÇÃO DE CALOR EM UMA DIREÇÃO: MODELO UNIDIRECIONAL  
LANÇAMENTO EM DUAS CAMADAS DE 2 METROS

Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Propagação de calor em uma direção		Intervalo de colocação (dia)		
	Temperatura inicial (°C)	Temperatura máxima (°C) Concretagem instantânea	1	2	5
300	15	48,08	47,61	46,97	45,63
	25	57,45	56,04	54,91	53,74
	35	66,88	64,59	63,42	62,00
350	15	53,38	52,58	51,69	50,10
	25	62,80	61,01	59,63	58,32
	35	72,22	69,46	68,21	66,55
400	15	58,72	57,54	56,42	54,68
	25	68,14	65,97	64,41	62,60
	35	77,56	74,43	73,00	71,12
450	15	64,08	62,53	61,16	59,26
	25	73,49	70,95	69,20	67,48
	35	82,92	79,40	77,79	75,70

**TABELA 3**

SIMULAÇÕES COM PROPAGAÇÃO DE CALOR EM UMA DIREÇÃO: MODELO UNIDIRECIONAL LANÇAMENTO EM QUATRO CAMADAS DE 1 METRO

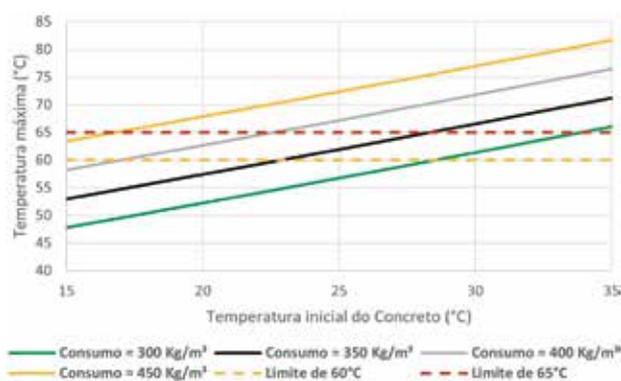
Propagação de calor em uma direção			Intervalo de colocação (dia)		
Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura inicial (°C)	Temperatura máxima (°C) Concretagem instantânea	1	2	5
300	15	48,08	47,35	45,04	41,67
	25	57,45	54,73	51,14	47,65
	35	66,88	62,17	57,39	54,31
350	15	53,38	51,95	48,90	44,46
	25	62,80	59,34	55,03	50,94
	35	72,22	66,77	61,27	57,63
400	15	58,72	56,52	56,42	48,25
	25	68,14	63,95	58,91	54,23
	35	77,56	71,39	65,16	60,95
450	15	64,08	61,14	56,63	51,54
	25	73,49	68,57	62,80	57,53
	35	82,92	76,01	69,05	64,27

adiabática de temperatura para esse caso é estimada conforme a condição a.

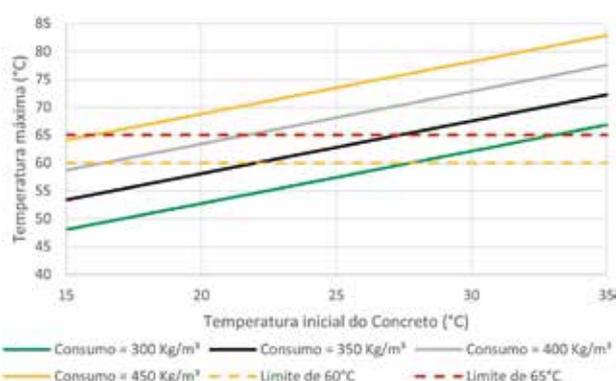
Na Figura 4, é apresentada a evolução da elevação adiabática de temperatura em função do tempo obtida para concretos com consumos de cimento de 300, 350, 400 e 450 kg/m<sup>3</sup>. As simulações foram realizadas considerando uma temperatura ambiente média de 30 °C.

#### 4. HIPÓTESES SIMULADAS E TEMPERATURAS MÁXIMAS OBTIDAS

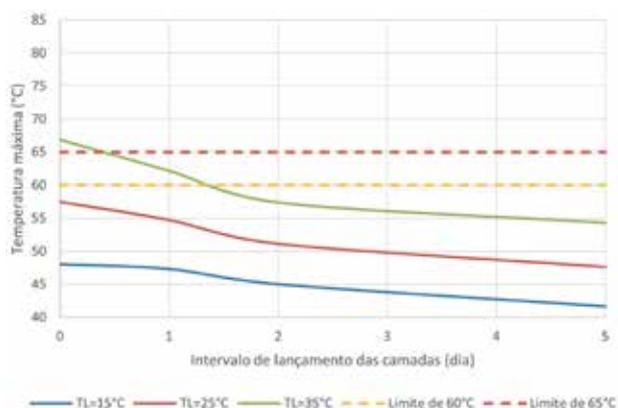
Foram simuladas as condições de propagação de calor em uma e em duas direções, com concreto sendo lançado a temperaturas iniciais de 15, 25 e 35 °C e consumos de cimento de 300, 350, 400 e 450 kg/m<sup>3</sup>. Além disso, foi considerado o lançamento do concreto em camadas de 2 metros de altura, com intervalos de colocação de 1, 2 e 5 dias.

**FIGURA 5**

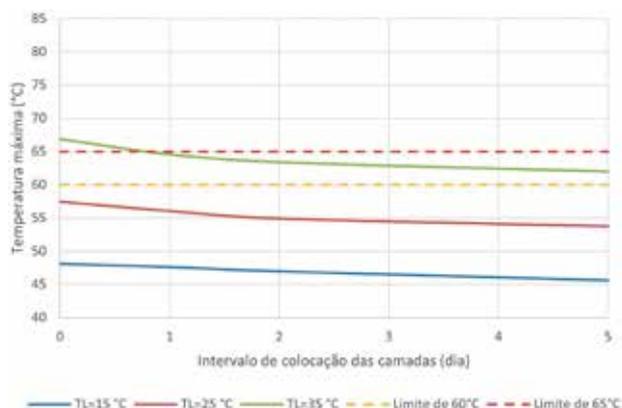
AVALIAÇÃO PELO MODELO BIDIRECIONAL DE PROPAGAÇÃO DE CALOR

**FIGURA 6**

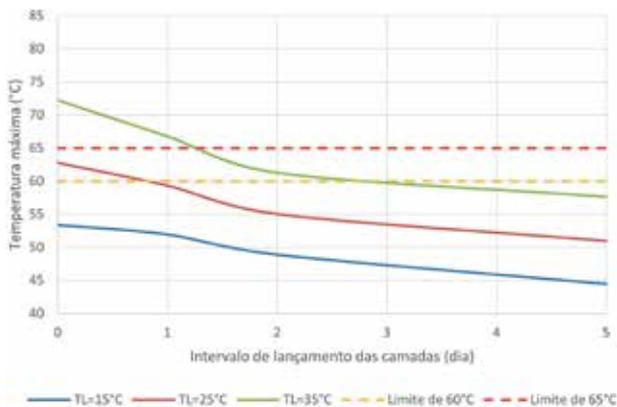
AVALIAÇÃO PELO MODELO UNIDIRECIONAL DE PROPAGAÇÃO DE CALOR

**FIGURA 7**

CONSUMO DE CIMENTO DE 300 KG/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 1 METRO

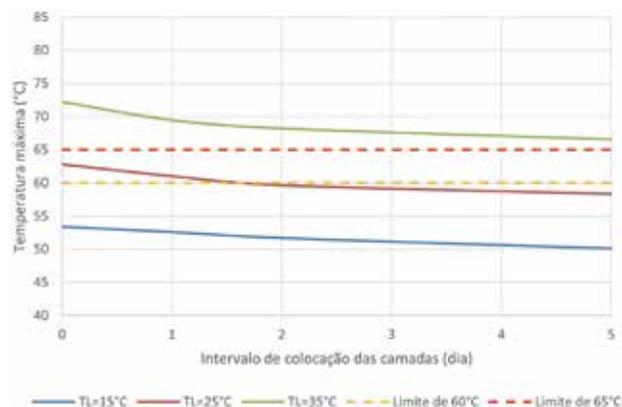
**FIGURA 8**

CONSUMO DE CIMENTO DE 300 KG/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 2 METROS



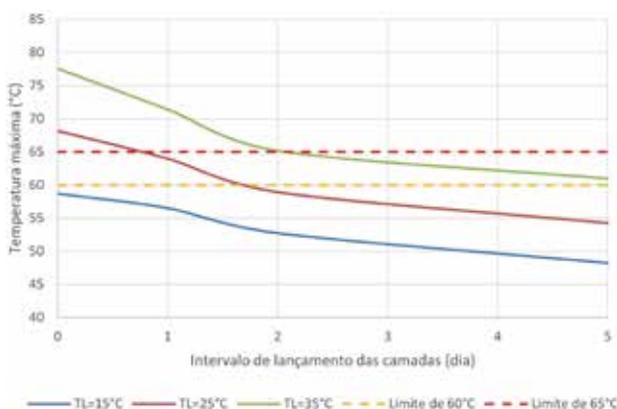
**FIGURA 9**

CONSUMO DE CIMENTO DE 350 kg/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 1 METRO



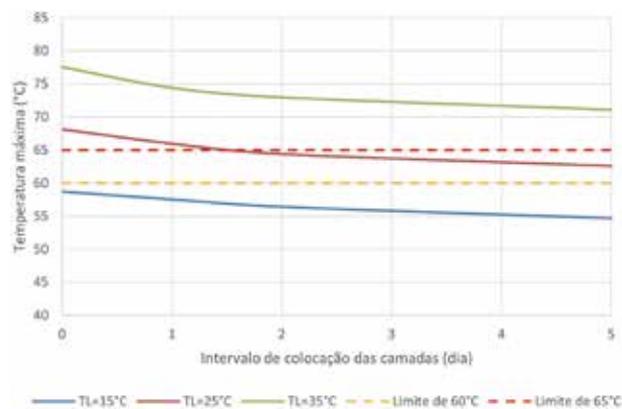
**FIGURA 10**

CONSUMO DE CIMENTO DE 350 kg/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 2 METROS



**FIGURA 11**

CONSUMO DE CIMENTO DE 400 kg/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 1 METRO



**FIGURA 12**

CONSUMO DE CIMENTO DE 400 kg/M<sup>3</sup>: CAMADA DE 2 METROS

Os resultados obtidos para as temperaturas máximas na estrutura estão registrados nas Tabelas 2 (modelo bidirecional), 3 (unidirecional em camadas de 2 metros) e 4 (unidirecional em camadas de 1 metro). São destacadas em vermelho as temperaturas acima de 65 °C, para o melhor entendimento em relação ao resultado obtido acima do nível recomendado.

Para melhor visualização dos resultados apresentados nas Tabelas 1 a 3, as Figuras 5 e 6 demonstram o comportamento da temperatura máxima em função do consumo de cimento.

Já, nas Figuras 7 a 14, é apresentada a influência do intervalo de colocação para duas camadas de 2 metros e para quatro camadas de 1 metro.

Por fim, as Figuras 15 a 18 mostram o comportamento da propagação do calor

na seção transversal para os consumos mínimo e máximo do estudo, de 300 kg/m<sup>3</sup> e de 450 kg/m<sup>3</sup> de cimento. Para tanto são consideradas as temperaturas mínima e máxima iniciais do estudo, de 15 °C e 35 °C, com o intuito de observar a temperatura máxima na estrutura conforme as simulações de propagação de calor pelo modelo bidirecional, em duas direções.

A Figura 19 ilustra o resultado do monitoramento executado em uma base de uma torre eólica implantada no Brasil.

## 5. CONCLUSÕES

Observa-se, nas Figuras 5 e 6, uma grande semelhança entre as simulações, considerando a propagação de calor em duas direções e em uma direção, o que é importante para a simplificação do pro-

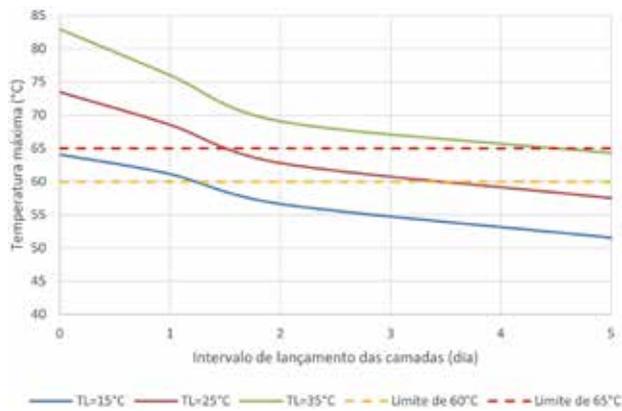
cesso de cálculo. Em relação ao resultado apresentado nessas figuras, observa-se o comportamento linear da temperatura máxima em função da temperatura inicial do concreto. Esse comportamento facilita a definição de uma condição que não ultrapasse os limites das temperaturas máximas. Para ilustrar o que foi apresentado nesses gráficos, pode-se tomar um exemplo de uso: se a temperatura inicial do concreto for 27 °C, para um concreto de 300 kg/m<sup>3</sup>, a sua temperatura máxima não ultrapassa o limite de 60 °C, sendo uma condição segura de concretagem. Em exemplo contrário, em lançamento de um concreto de 450 kg/m<sup>3</sup>, no caso deste artigo, para todas as situações a temperatura máxima ultrapassa o limite de 60 °C, sendo necessário recorrer a medidas que

possibilitem a redução de temperatura como refrigeração, uso de adições mineiras, redução do consumo de cimento, diminuição de camada de concretagem, entre outros. Com a facilidade de simulações de propagação de calor em uma direção,

pode-se fazer estudos paramétricos mais rápidos e com rápida implementação para decisões em campo.

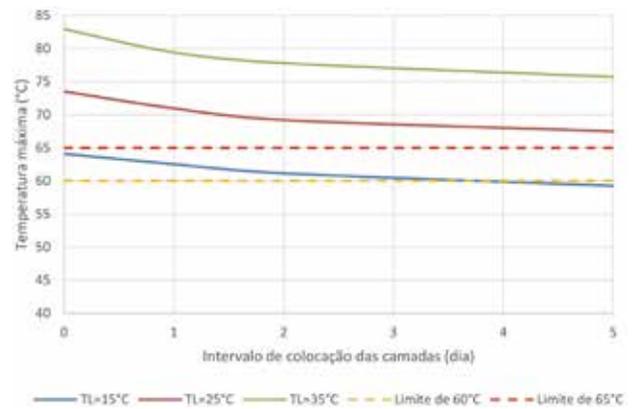
Nas Figuras 7 a 14, é possível observar claramente a influência da altura de concretagem em camadas, tornando-se mais

crítica à medida que aumenta a altura de concretagem. Considerando as temperaturas de colocação indicadas, de 15 °C a 35 °C, é possível minimizar os efeitos adversos provenientes das camadas de alturas maiores e contribuir com a segurança



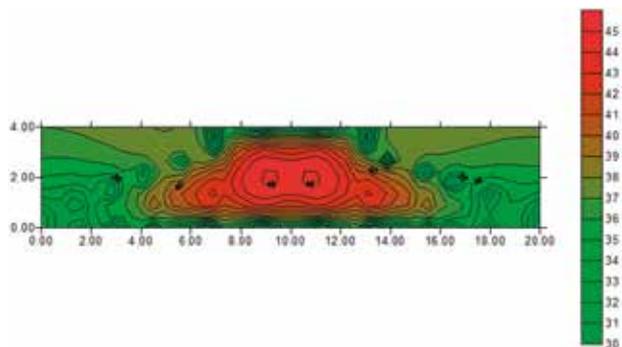
**FIGURA 13**

CONSUMO DE CIMENTO DE 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ : CAMADA DE 1 METRO



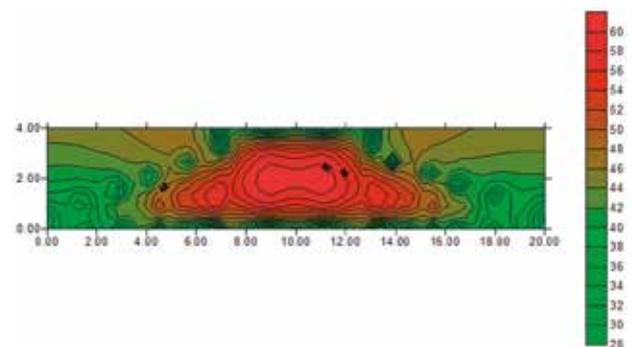
**FIGURA 14**

CONSUMO DE CIMENTO DE 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ : CAMADA DE 2 METROS



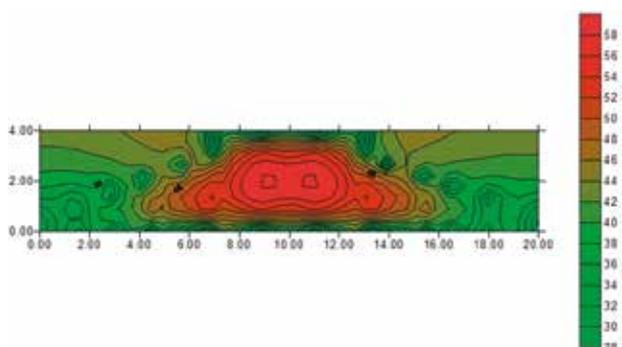
**FIGURA 15**

CONSUMO DE 300  $\text{kg}/\text{m}^3$ : TEMPERATURA INICIAL DE 15 °C



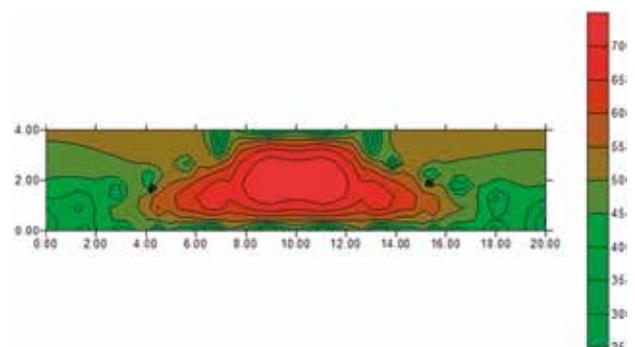
**FIGURA 16**

CONSUMO DE 300  $\text{kg}/\text{m}^3$ : TEMPERATURA INICIAL DE 35 °C



**FIGURA 17**

CONSUMO DE 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ : TEMPERATURA INICIAL DE 15 °C

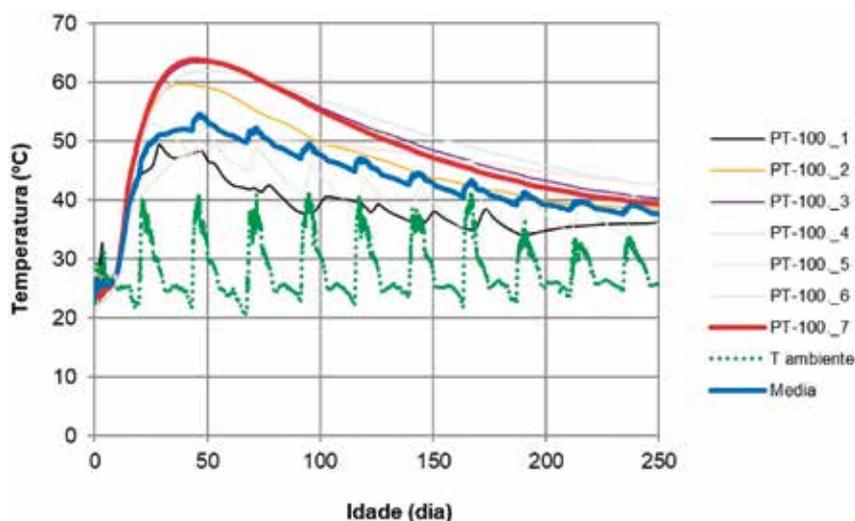


**FIGURA 18**

CONSUMO DE 450  $\text{kg}/\text{m}^3$ : TEMPERATURA INICIAL DE 35 °C

da peça no que diz respeito ao seu comportamento térmico, considerando-se a adequação dessa temperatura de lançamento com a minimização do risco de fissuração por origem térmica e do desenvolvimento da DEF. Logicamente que quanto menor a altura de concretagem, menor o nível de risco de fissuração de origem térmica. Contudo, deve-se levar o bom senso da prática construtiva e, nos casos que indiquem riscos de fissuração de origem térmica para uma determinada altura de camada, tomar as medidas necessárias para minimização dessas ocorrências, com sugestões expostas ao longo deste artigo.

As isotermas apresentadas nas Figuras 15 a 18 funcionam como um importante indicador para o posicionamento de termômetros, objetivando monitorar a evolução da temperatura de maneira mais assertiva e contribuir com maior precisão com os resultados de uma possível retro-análise. Esse recurso permite que o usuário empregue tantos termômetros forem necessários, principalmente nas regiões em que são visualizadas as previsões de maiores temperaturas e facilitar a tomada de decisões para minimização de riscos, caso seja necessário. As leituras dos termômetros podem ser plotadas, como apresentado na Figura 19, e, partir desses



**FIGURA 19**

MONITORAMENTO DE UMA FUNDAÇÃO DE TORRE EÓLICA NO BRASIL. O EIXO X REPRESENTA A IDADE (DIAS) E EIXO Y A EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA (°C)

resultados, observar a aderência da análise matemática da previsão de temperaturas com os resultados reais obtidos em campo. Para observação dessa aderência, basta tomar as condições ambientais e de lançamento do concreto, inserir essas entradas nos resultados obtidos no mo-

delo matemático e, a partir daí, traçar a curva correspondente obtida pelo cálculo realizado. Com isso, com uso de gráficos comparativos, é possível demonstrar a correlação existente entre a teoria e a prática, garantindo, assim, a confiabilidade do modelo empregado para a análise. ☺

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MELO, S. K. et al.. "Influência do calor de hidratação na formação da etringita tardia (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico". 53º Congresso Brasileiro do Concreto - Florianópolis - SC, 2011.
- [2] CARLSON, R.W., "A simple method for the computation of temperatures in concrete structures", ACI Journal, V.34, 1937, pp.89-102
- [3] GAMBALE, E.A., TRABOULSI, M.A. "Avaliação da temperatura máxima em estruturas executadas com concreto massa". In: 57º Congresso Brasileiro do Concreto, 2015, Bonito-MS.
- [4] CARLSON, R.W., HOUGHTON, D.L., POLIVKA, M. "Causes and control of cracking in reinforced mass concrete", ACI Journal, 1979, pp.821-837
- [5] CLOUGH, R.W. "The stress distribution of Norfolk Dam", Structures and Materials Research, Series 100, Issue 19 - Institute of Engineering Research, University of California - Berkeley. Final Report to U.S. Engineer District, Little Rock Corps of Engineers. 1962, 152p.
- [6] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE. Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete - ACI 207.2R-07. Michigan - USA, ACI, 2007.
- [7] CALMON, J.L.N. "Estudio Térmico y Tensional en Estructuras Macivas de Hormigon. Aplicacion a Las Presas Durante la etapa de Construccion". Tesis Doctoral dirigida por Mirambell Arrizabalaga, Barcelona, mayo de 1995, 649p.
- [8] GAMBALE, E. A.CASTRO,A.,TRABOULSI M.A.,ANDRADE M.A.S. "Análise Estatística dos Parâmetros que intervêm no Fenômeno Térmico do Concreto Massa". 52º Congresso Brasileiro do Concreto - Fortaleza - CE, 2010.
- [9] Equipe de FURNAS - Editor Walton Pacelli de Andrade - Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo - Ensaios e Propriedades - Ed. Pini, São Paulo-SP, 1997.
- [10] ÉTORE, F.F., "Predição da exotermia da reação hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados" 130p. Tese (Mestre em Ciências) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [11] GAMBALE, E.A., TRABOULSI, M.A., ANDRADE, M.A.S. "Análise paramétrica do fenômeno térmico do concreto massa". In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, 2008, Salvador-BA.
- [12] GAMBALE, P.G., "Estudo do calor de Hidratação do massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração". Tese Mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil pela UFG, Goiânia,2017.