

# AN ANALYTICAL-NUMERICAL STUDY OF THERMAL STRESS IN STRUCTURES OF MASS CONCRETE

Nailde de A. Coelho<sup>1</sup>, Lineu J. Pedroso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Colegiado de Engenharia Civil, Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF  
Avenida Antonio Carlos Magalhães, n°. 510 Country Club, Juazeiro/BA, CEP: 48.902-300, Brasil  
nailde.coelho@univasf.edu.br*

<sup>2</sup> *Dept. de Engenharia Civil e Ambiental, Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília  
Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília-DF, Brasil  
lineu@unb.br*

**Abstract.** The construction of gravity dams was a milestone for the development of studies and technological control of the concrete of mass, because the internal temperature increases began to appear and this generated cracks. During the process of hydration of the cement particles, there is release of heat, in a process called heat of hydration, raising internally the temperature of the concrete. This phenomenon causes the internal temperature of the concrete to differ from the surface temperature, resulting in a thermal gradient, in addition to a slow cooling in the core of the structures. These temperature changes give rise to thermal stresses, which if not foreseen and prevented can cause damage to the constructions, when they exceed the capacity of resistance of the concrete. Thermal stresses take into account the phenomenon of the intrinsic creep in the concrete: there is variation of the modulus of elasticity over time with the change of temperature. There are a few techniques to try to minimize this problem, such as building in layers, launching concrete at lower temperatures, use of cements with low heat of hydration, and more. An effective way of preventing thermal problems in mass concrete is the numerical simulation, being possible with the mechanism, predict the most critical regions and analyze the probability of structural damage. In view of the context, this work shows numerical thermal simulations using the Finite Element Method - FEM, through the ANSYS program for mass concrete structures built in layers. With the numerical results, the analytical tensions arising from the temperature changes of the bodies are analyzed. It seeks to expose some of the most favorable conditions in the construction process, identifying possible cracking sites, through numerical and analytical analysis, contributing to the dissemination of these studies and showing to the community in interest, constructive methods and methods of analysis that can induce safer construction.

**Keywords:** Thermomechanical stress, Temperature, Mass Concrete, Finite Element Method, Problems coupled.

## 1 Introdução

Os efeitos termomecânicos em concreto massa podem desencadear problemas não desejáveis em estruturas compostas com esse material.

A principal atenção voltada ao concreto massa deve-se a uma geração de calor interna, no processo de hidratação do cimento, o qual é chamado de calor de hidratação. Com isso, forma-se um gradiente de temperatura que gera tensões internas, podendo induzir o surgimento de fissuras e causar danos as estruturas [1].

Fissuras em estruturas de concreto massa são indesejáveis, pois afetam a permeabilidade, a durabilidade, aparência e suas tensões internas. As fissuras ocorrem, normalmente, quando as tensões de tração desenvolvidas excedem a resistência à tração do concreto. No entanto, a maior alteração de volume em concreto massa é resultado da modificação da temperatura, principalmente, pela geração do calor de hidratação. O controle dessa temperatura é importante para que fissuras sejam evitadas [2].

A simulação numérica surge como um artifício para se prever e prevenir eventuais danos que poderiam surgir nas construções. Uma das formas de se evitar danos em estruturas de concreto massa é a construção em camadas, junto com outros métodos que evitam a elevação de temperatura no concreto.

O Método dos Elementos Finitos - MEF, é amplamente utilizado, pelo uso de programas computacionais. Com ele, é possível visualizar a evolução da temperatura e, conseqüentemente, as tensões oriundas destas. Mas para isso é preciso ter conhecimento prévio da estrutura, da forma de construção, dos materiais empregados, das propriedades dos materiais, assim como, o calor de hidratação do concreto estudado.

Este trabalho mostra uma análise termomecânica em concreto massa por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o ANSYS, verificando as possibilidades de construção para redução dos efeitos indesejáveis. Será verificado a construção em camadas e o intervalo de tempo de lançamento destas, verificando as temperaturas desenvolvidas internamente nos corpos e as tensões geradas a partir do resfriamento destes.

Este trabalho também busca colaborar com pesquisas na área tais como [3,4,5,6,7,8,9,10]; assim como o Grupo de Dinâmica e Fluido Estrutura da UnB (GDFE), tem se consagrado nesses últimos anos a várias pesquisas relacionadas com essa temática [1,11,12,13,14,15].

## **2 Concreto massa**

O estudo da evolução do concreto nas primeiras idades está se tornando cada vez mais importante, pois a liberação do calor de hidratação e a retração do concreto, logo nas primeiras horas, podem gerar fissuras, aumentando a permeabilidade da estrutura e induzindo problemas de durabilidade e funcionalidade das mesmas [16].

As duas principais causas de mudança de volume no concreto massa são a geração e dissipação de calor do cimento e ciclos periódicos da temperatura ambiente. Conseqüentemente, as medidas para a redução da variação do volume em concreto massa inclui a redução de calor gerado na hidratação do cimento e a redução da temperatura de lançamento do concreto. A tensão de tração pode ser reduzida se a temperatura inicial do concreto ficar abaixo da temperatura de estabilização do concreto, no entanto, isto é possível em locais de clima quente [17].

No entanto, [18] afirma que o risco de fissuração térmica nas idades iniciais não deve ser baseado exclusivamente no critério da temperatura, a menos que os efeitos de outros parâmetros, tais como os valores de retração e as crescentes propriedades em idade iniciais do concreto estejam devidamente incorporadas ao prever o valor das tensões. Uma incorporação de melhores modelos de comportamento a evolução rigidez e deformação, assim como a análise da fluência é necessária.

As fissuras no concreto massa são prejudiciais e são causadas principalmente por tensões de tração desenvolvidas em resposta à retração térmica em combinação com restrição de mudança de volume do concreto. O gradiente de temperatura pode ser reduzido proporcionando a diminuição do pico da temperatura do concreto e utilizando um concreto com baixas propriedades de retração térmica. A temperatura máxima é dependente da temperatura de lançamento do concreto, do calor de hidratação e da perda ou ganho de calor pelo ambiente.

Para a análise térmica também é necessário ter o conhecimento das propriedades térmicas do concreto para entender o seu comportamento. O estudo da massa e do calor específico, da condutividade e da difusividade térmica são importantes para o desenvolvimento de gradientes de temperatura, deformações térmicas, empenamento e fissuração nas primeiras idades do concreto. Bem como, para o conhecimento dos estados tensionais do concreto faz-se inicialmente um estudo dos processos de tração, compressão e deformação do concreto, buscando, dessa forma, perceber a influência da temperatura nesses estágios de tensão, uma vez que a hidratação do cimento, e outros efeitos térmicos associados, podem acelerar esses processos físicos e mecânicos e ajudar no surgimento de patologias [1].

Outra propriedade que requer atenção nos estudos de concreto massa é a fluência. Devido ao seu comportamento, esta é, talvez, a propriedade mais importante, e também a mais complexa, para o entendimento e os cálculos de tensões. O concreto, quando submetido a solicitações de longa duração, sofre uma deformação imediata, seguida de uma deformação lenta, devido ao efeito de fluência (creep), que se desenvolve ao longo do tempo. Deste modo, mesmo sob tensões constantes, as deformações ocorridas no concreto aumentam no decorrer do tempo [19].

Assim, o comportamento do concreto massa, suas temperaturas e tensões, dependem da correta definição e análise de suas propriedades e métodos de cálculo. É necessário utilizar um concreto de baixo calor de hidratação,

baixa temperatura de lançamento e a construção em camadas é um forte aliado à redução de temperaturas.

### 3 Fundamentação Teórica

Os problemas termomecânicos em concreto massa são regidos pela equação do calor, que depende das condições iniciais e de contorno impostas, das restrições do elemento, na verificação das tensões, além da análise da fluência do concreto. Assim, os itens que seguem representam as formulações de análise.

#### 3.1 Equação do calor

A equação apresentada a seguir é baseada em [3,20,21,22].

A Equação do balanço energético do fluxo de calor em um corpo é dada pela equação 1.

$$k\nabla T^2 + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo  $q$  o calor gerado,  $k$  a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura,  $\rho$  é a massa específica e  $c$  o calor específico do concreto.

#### 3.2 Condições Iniciais (CI) e de Contorno (CC):

As Condições Iniciais (CI) e de Contorno (CC) influenciam diretamente nos resultados obtidos. Nos problemas termomecânicos, que trabalham de forma acoplada, tem-se as CC para as análises térmicas e as CC para as análises mecânicas. Enquanto as CI representam as temperaturas impostas no início da análise. Dessa forma, matematicamente, temos:

- Temperatura inicial (CI):

$$T(x, y, z, t = 0) = f(x, y, z)$$

- Temperatura prescrita no contorno (CC) - condição de Dirichlet:

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \quad x, y, z \text{ em } \Gamma_t$$

- Fluxo prescrito no contorno - condição de Neumann:

$$k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_n(x, y, z, t) \quad x, y, z \text{ em } \Gamma_q$$

#### 3.3 Cálculo das Tensões no Concreto Massa

As tensões são calculadas segundo [8,23,24,25,26,27].

Temos que a matriz deformação,  $[\Delta\varepsilon]$ , é dada em função da matriz de fluência,  $[J]$ , pela matriz de variação de tensões térmicas,  $[\Delta\sigma]$ , Equação 2:

$$[\Delta\varepsilon] = [J][\Delta\sigma] \quad (2)$$

#### 3.4 Modelo de Predição de Fluência

Bureau Reclamation – USBR [28]: é utilizada uma expressão logarítmica que aproxima o comportamento normal de fluência com precisão para o período de um ano. A função  $J$  é dada pela Equação 3:

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + \phi(z) \log(t - \tau + 1) \quad (3)$$

Sendo  $a$  e  $b$  coeficientes de ajuste e  $a$  função de fluência, dada em função do módulo de elasticidade  $E$  (MPa), e do coeficiente de fluência  $\phi$  ( $1/10^{-6}$  MPa), em  $1/10^{-6}$  MPa.

## 4 Metodologia

A solução das tensões térmicas deste trabalho é obtida por um método híbrido, em que parte da solução é extraída pelo MEF e parte é calculada analiticamente, como mostra o esquema da Figura 1. Após as modelagens térmicas efetuadas, foram extraídos dos programas as temperaturas em cada intervalo de tempo correspondente para alguns pontos, os quais foram utilizados para obtenção analítica das tensões.

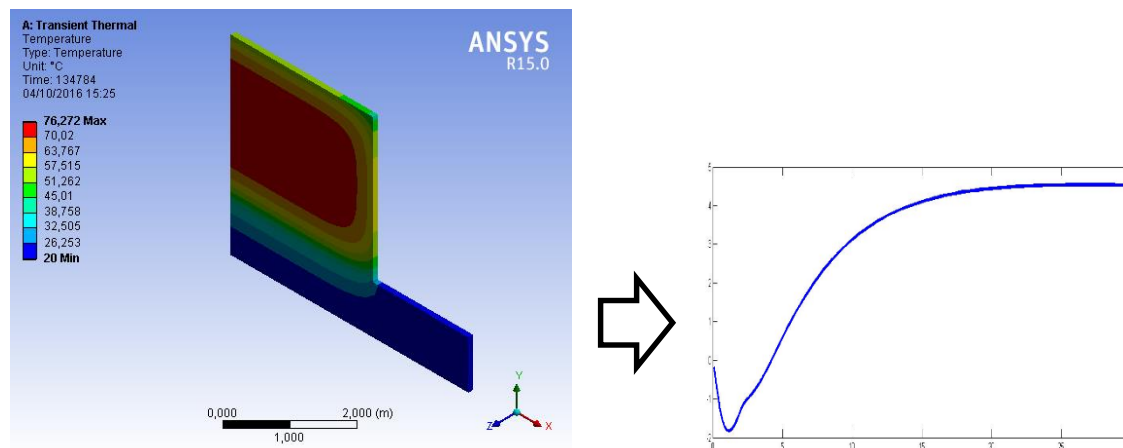


Figura 1 - Método de solução do problema.

Essas tensões foram calculadas pelas fórmulas analíticas implementadas em códigos computacionais no *MATLAB*, para resolução das matrizes e geração da curva de tensões térmicas.

## 5 Resultados

Para verificação e validação das tensões de fluência, foram feitas análises no muro mostrado na Figura 2 a, com número e altura de camadas diferentes. Neste trabalho, foram verificados os pontos centrais na segunda camada, outros resultados mais completos podem ser visualizados em [1]. A modelagem foi feita com o ANSYS WORKBENCH, que utilizou o elemento SOLID90, por default. Para a região do muro, a malha foi refinada com elementos de 0,05 m.

Como propriedades dos materiais foram adotados os valores exibidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades térmicas utilizadas para o muro.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica ( $\rho$ )	2393,0	Kg/m <sup>3</sup>
Calor específico (c)	898,5	J/kg°C
Conductividade térmica (k)	2,6	W/m°C
Coefficiente de convecção da fundação – $h_2$	5,0	W/m <sup>2</sup> °C
Coefficiente de convecção do muro – $h_1$	3,1	W/m <sup>2</sup> °C
Temperatura ambiente e temperatura inicial do concreto	20	°C
Temperatura adiabática do concreto ( $T_{ad}$ )	$T_{ad} = 59,44 \cdot \frac{t^{2,831}}{13,62^{2,831} + t^{2,831}}$	°C

Para a análise de tensões, foram utilizados os dados descritos na Tabela 2, de acordo com o método USBR.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas para o muro.

Propriedade	USBR
Módulo de elasticidade - E (MPa)	$E = 29420 \frac{t^{2,0007}}{0,375^{2,007} + t^{2,0007}}$
Parâmetros da curva de fluência	a = 14,36 b = 30,32

Para a altura foi simulado a construção em camadas, a fim de verificar a influência nas temperaturas e tensões. Foram estudados dois casos, conforme mostra a Figura 2 a, no Caso 1 a estrutura foi construída com três camadas, cada uma com 1,0 m de altura; e no Caso 2 o muro foi construído em dez camadas de 0,3 m cada. Dessa forma, a altura total da estrutura foi a mesma nos dois estudos, 3,0 m, representado por H. A largura da estrutura foi considerada de 3,0 m e o comprimento, 5,0 m, XM e XF, respectivamente.

As camadas foram lançadas com intervalos de 12 h, 24 h e 48 h, representados por  $\Delta t_{lanc}$ , Figura 2 b. A Figura 2 c, mostra as temperaturas no ponto central da segunda camada para os dois casos, num intervalo de tempo de 30 dias, e a Figura 2 d, mostra as tensões geradas com as variações térmicas no respectivos intervalos de tempo. A segunda camada foi escolhida por representar a camada central do primeiro caso e, conseqüentemente, pode ser comparada com o segundo caso.

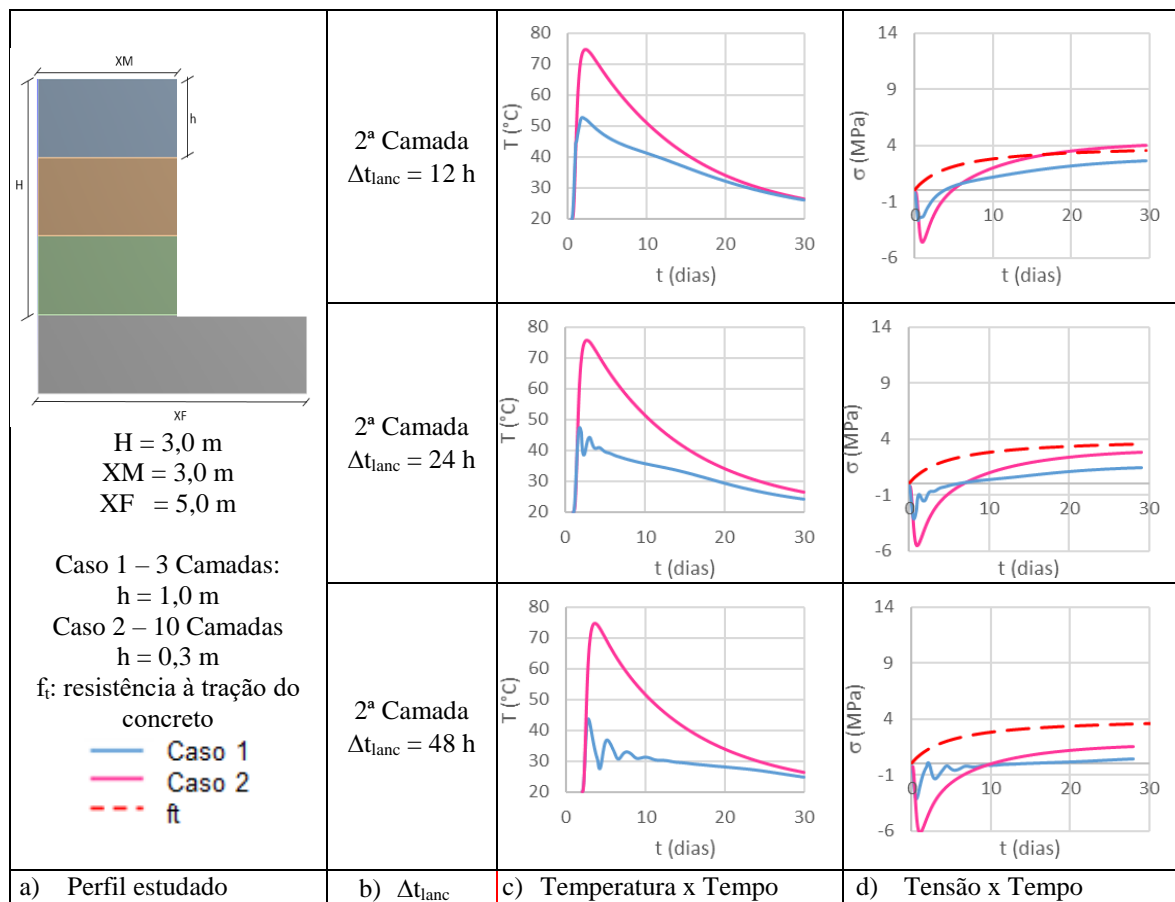


Figura 2 – Variações de temperaturas e tensões para duas geometrias com alturas de camadas diferentes.

Nota-se na Figura 2 c as temperaturas alcançadas pelo ponto central da segunda camada nos caso 1 – altura da camada de 1,0 m e caso 2 – altura da camada de 0,3 m. Com a alteração da altura da camada, a máxima temperatura reduz significativamente, assim como, quanto maior o intervalo de lançamento das camadas – 12 h, 24 h ou 48 h – menor as máximas temperaturas atingidas.

Verifica-se para a camada de 1,0 m que houve pouca diferença entres os valores máximos, todos em torno de 75°C, nem no perfil térmico, independente do intervalo de lançamento. Isso pode ser explicado devido a

espessura grande da camada. Para a espessura da camada de 0,3 m, as maiores temperaturas, assim como o perfil térmico, foram reduzindo conforme maior o tempo de espera da construção. Para intervalos de lançamento de 12 h, obteve-se máxima de aproximadamente 52°C, valor reduzido para 49°C com intervalos de 24 h e 43°C em 48 h. Observam-se também ondulações no início da curva de temperatura, isso se explica porque quando o concreto está resfriando, uma camada com temperatura maior é sobreposta e eleva novamente a temperatura da camada anterior.

As temperaturas obtidas refletem nos valores das tensões obtidas. Para espessura da camada de 0,3 m nos casos estudados, as tensões não alcançaram a tensão de ruptura do concreto,  $f_t$ , em nenhuma situação. Para a camada de 1,0 m, com intervalo de lançamento do concreto de 12h, as tensões foram maiores que  $f_t$ , logo haveria fissuração do concreto. Com intervalo de lançamento do concreto de 24 h, há uma tendência à fissuração, embora não haja problemas no período de 30 dias. A única situação em que não haveria problemas é o caso em que o intervalo de lançamento das camadas é 24 h.

Dessa forma, pode-se afirmar que a redução da espessura das camadas influencia diretamente na redução da temperatura interna do concreto, bem como o aumento do intervalo de lançamento das camadas. Com a redução da temperatura e o comportamento do resfriamento, são minimizadas também as chances de fissuração do concreto. Portanto, é importante realizar a análise termomecânica de estruturas volumosas de concreto antes da construção.

## 6 Conclusões

De forma geral, para as simulações de construção em camadas efetuadas verificou-se que:

- As CC e CI são extremamente decisivas nos resultados finais.
- A malha e o incremento do tempo têm influência direta nos resultados.
- Quanto mais espessa a camada, maior a temperatura atingida e, conseqüentemente, maiores as tensões de tração e compressão.
- Para um intervalo de lançamento das camadas de 12 h a camada não tem tempo para resfriar antes do lançamento da camada posterior, diferente do que acontece quando o intervalo de lançamento é de 24 h, em que as camadas começam a resfriar e, quando a seguinte é lançada, a temperatura aumenta novamente.

### Agradecimentos.

Agradecemos ao apoio da CNPq, da UNIVASF e da UnB pelo desenvolvimento desse trabalho.

## Referências

- [1] Coelho, N. A.; *Métodos Analíticos e Numéricos para o Estudo dos Efeitos Termomecânicos no Concreto Massa Orientados às Barragens de Gravidade*. Tese de doutorado. Universidade de Brasília – UnB. Brasília: 2016.
- [2] Townsend, C. L.; *Control of Cracking in Mass Concrete Structures*. Monografia de Engenharia. The United States: Bureau of Reclamation, 1981.
- [3] Azenha, M. A. D.; *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since Its Early Ages*. 379 f. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto: 2009.
- [4] Calmon, J. L.; Murcia, J.; Botassi, S. S.; Gambale, E. A.; Silva, C. J.. *Modelo numérico para determinação do campo de temperaturas e tensões em barragens usando o método dos elementos finitos*. Estudo de caso na barragem de cana brava - estado de Goiás - Brasil. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis - SC. Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004.
- [5] De Schutter, G.. *Finite element simulation of thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based material laws*. Computers and Structures, 2002.
- [6] Fairbairn, E. M. R.; Silvano, M. M.; Filho, R. D. T.; Alves, J. L. D.; Ebecken, N. F. F.; *Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms*. Rio de Janeiro. Elsevier: 2003.
- [7] Funahashi Júnior, E. I.; Kuperman, S. C.; Vicente, G. R.; Forni, E. S.; Lima, E. C.. *Simulação de tensões térmicas da sala de radioterapia do hospital das clínicas de Ribeirão Preto-SP*. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza: Ibracon, 2010.
- [8] Gambale, E. A.; Carmo, J. B. M.. *Análise de Temperatura do Concreto Utilizado nas Estruturas da 3ª Ponte do Lago Sul de Brasília-DF*. In: Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília: 2002.

- [9] Klemczak, B.; Knoppik, A. W.K.. *Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models*. Engineering Structures, February: 2015. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.031.
- [10] Léger, P., Seydou, S. *Seasonal Thermal Displacements of Gravity Dams Located in Northern Regions*. Journal of Performance of Constructed Facilities v. 23: 2009. p. 166-174.
- [11] Almeida, G.; Coelho, N.; Alkmim, N.. *Comparative analysis of a transient heat flow and thermal stresses by analytical and numerical methods*. In: VII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering Grécia: 2017
- [12] Coelho, N. A.; Silva, D. A.; Pedroso, L. J.; *Efeito térmico provocado pelo calor de hidratação em barragem de gravidade construída em camadas*. In: XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília: 2016.
- [13] Gomes, F. M. P.; Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.. *Uma solução analítico-numérica para a difusividade do calor em um cilindro com e sem geração de calor*. In: XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília: 2016.
- [14] Batista, R. N.; Coelho, N. A.; *Aplicação do método das diferenças finitas no estudo térmico de elementos de concreto*. In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto – Ibracon, Foz do Iguaçu: 2018.
- [15] Coelho, N. A.; Pedroso, L. J.; *The analysis of construction techniques and thermal tensions in gravity dams*. In: Third International Dam World Conference , Foz do Iguaçu: 2018.
- [16] Aurich, M., *Simulação Computacional do Comportamento do Concreto nas Primeiras Idades*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI, USP, 2008.
- [17] American Concrete Institute. *Cement and Concrete Terminology*. ACI 116R. Farmington Hills, 2005.
- [18] Amin, M. N.; Kim, J.; Lee, Y.; Kim., J.. *Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device*. Cement and Concrete Research. Elsevier: 2009. Doi:10.1016/j.cemconres.2008.12.008.
- [19] Aurich, M., *Simulação Computacional do Comportamento do Concreto nas Primeiras Idades*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI, USP, 2008.
- [20] Rao, S. S.; *The Finite Element Method in Engineering*. 3ª ed. United States of America: Butterworth-Heinemann: 1999.
- [21] Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [22] Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J.; *Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática*. 4ª Ed. MCGRAW-HILL: 2012.
- [23] Gomes, F. M. P.; *Concreto nas primeiras idades: propriedades e modelagem termomecânica simplificada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. Goiânia: 2011.
- [24] Gambale, e. a.; Luz, m. p.; Santana, w. g.; Barbin, A. S.. *Estudo do Plano de Lançamento do Concreto a Partir de Análises Bidirecionais Térmicas e Tensionais da Estrutura da Ogiva do Vertedouro Principal da Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011a.
- [25] Gambale, e. a.; Luz, m. p.; Santana, w. g.; Barbin, A. S.. *Estudos Bidirecionais Térmicos e Tensionais como Forma de Orientar Condições Executivas em Estruturas de Tubos de Sucção Aplicados à Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011b.
- [26] Gambale, e. a.; Luz, m. p.; Santana, w. g.; Barbin, A. S.. *Análise de plano de lançamento de concreto a partir de estudo térmico bidirecional da estrutura stay column da Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011c.
- [27] Gambale, e. a.; Luz, m. p.; Santana, w. g.; Barbin, A. S.. *Estudos Bidirecionais Térmicos e Tensionais em Viga Munhão Aplicados à Usina Hidroelétrica de Santo Antônio*. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Brasília: Florianópolis: 2011d.
- [28] United States Department of The Interior Bureau of Reclamation. *Concrete Manual: Part 2*. 9 ed. U.S. Departamento of the interior. 1992.