

# Formulação numérica para simulação de sistemas de pós-resfriamento em estruturas de concreto massa

Igor A. Fraga<sup>1</sup>, Ana B. C. G. Silva<sup>1</sup>, Eduardo M. R. Fairbairn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Engenharia Civil (PEC), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) Centro de Tecnologia - Av. Horácio Macedo, 2030 - Bloco I-116 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-450 ifraga@coc.ufrj.br, anabeatrizgonzaga@coc.ufrj.br, eduardo@coc.ufrj.br*

**Abstract.** Due to the high costs and safety requirements of construction and infrastructure works, thermal cracking of young concrete has been a concern of the engineering community since the first applications of mass concrete. The heat generation during hydration and the consequent increase in the temperature of the concrete are very important, not only because they can generate thermal gradients in space and time, responsible for the appearance of high initial stresses, but also because deleterious phenomena such as the formation of delayed ettringite formation (DEF) have been shown to be associated with the existence of thermal fields in the early ages of cementitious material. In this way, many actions can be taken to minimize the appearance of undesired stresses, such as: (i) decrease in construction speed; (ii) reducing the casting temperature of the concrete; (iii) lowering the temperature using a post-cooling system; (iv) choice of a low heat hydration composition. This work will discuss the numerical implementation of a concrete post-cooling model, in which the temperature of the concrete during hydration is reduced by the circulation of water or air in pipes embedded in the formwork (postcooling systems). Numerical modeling of the post-cooling of concrete allows significant savings in the construction of large structures. Thus, developing a predictive cracking model, which incorporates concrete cooling in the early ages, is extremely important to minimize the appearance of stresses that exceed the resistive capacity of the element and future pathologies. In this work, a numerical formulation is presented for a simulation model of the cooling system with tubes in mass concrete structures, on a mesoscopic scale, to be implemented and coupled in a DAMTHE finite element model, developed in FORTRAN programming language, by PEC / COPPE / UFRJ.

**Keywords:** post-cooling, numerical formulation, mass concrete, cooling pipes

## 1 Introdução

De acordo com RILEM [1], “estruturas de concreto massa são estruturas nas quais os efeitos da hidratação dos materiais cimentícios nas primeiras idades, como a geração de calor e a retração autógena, podem levar à fissuração”. Considerando o patamar de percolação como o exato momento em que o concreto se torna sólido, o concreto na idade avançada pode ser definido como o período após esse patamar, quando as propriedades do material estão mudando rapidamente sob a influência da hidratação.

Como a reação de hidratação é exotérmica e a condutividade térmica do concreto é relativamente baixa, ela normalmente suporta aumentos de temperatura que têm especial relevância em estruturas de concreto massivo. Dois tipos de gradientes térmicos relevantes podem ser identificados no concreto de massa: (i) um é relativo ao tempo, ou seja, um dado ponto da estrutura tem sua temperatura variando ao longo do tempo; (ii) outro é um gradiente espacial que corresponde à diferença de temperatura, num dado instante, entre dois pontos diferentes da estrutura. Considerando a dilatação térmica do concreto e as restrições estruturais às deformações livres, ambos os gradientes acima mencionados podem ser responsáveis pela geração e evolução de esforços e tensões nos elementos de concreto. Se tais deformações atingirem um determinado limite, podem ocorrer fissuras térmicas indesejáveis.

A geração de calor e consequente elevação da temperatura do concreto são muito importantes, não apenas porque podem gerar gradientes térmicos no espaço e no tempo, mas também porque fenômenos deletérios como a formação de etringita retardada (DEF) têm se provado associados à existência de campos térmicos nas primeiras idades que atingem temperaturas da ordem de 65 °C. O conjunto das questões mencionadas sustenta adequadamente a alegação de que o aumento da temperatura devido à hidratação é uma questão muito importante no que

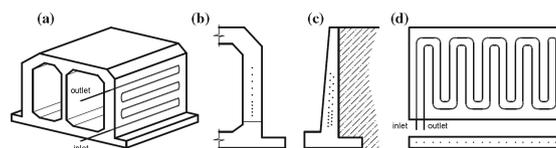


Figura 1. Exemplos de estruturas com sistemas de pós-resfriamento.

diz respeito à durabilidade da estrutura.

Portanto, a fase de construção e o período subsequente devem ser analisados com precisão. Se a tendência à fissuração for detectada, muitas ações podem ser adotadas para minimizar as tensões precoces, tais como: (i) a diminuição da velocidade de construção, permitindo maior dispersão de calor; (ii) reduzindo a temperatura de lançamento do concreto; (iii) diminuir a temperatura do concreto pela circulação de água ou ar em tubulações embutidas nas fôrmas (sistemas de pós-resfriamento); e (iv) a escolha de uma composição de material que dê menores taxas de calor de hidratação.

Devido aos altos custos e requisitos de segurança das obras de construção e infraestrutura, a fissuração térmica do concreto jovem tem sido uma preocupação da comunidade de engenharia desde as primeiras aplicações do concreto massivo. A evolução do conhecimento sobre o assunto levou ao desenvolvimento de teorias que consideram a reação de hidratação como exotérmica e termicamente ativada. Isto significa que, com relação à geração de calor específica, há um efeito de segunda ordem, uma vez que a taxa de calor gerada por uma massa unitária, em um determinado ponto e em um dado momento, depende da extensão da reação, que varia em função do histórico térmico no ponto considerado. Além disso, as propriedades do material e fenômenos relacionados à evolução da hidratação, como força, módulo de Young, retração autógena e fluência, variarão de acordo com a extensão da reação.

Tais teorias levaram a modelos numéricos sofisticados que, juntamente com a evolução do hardware e software, permitiram o desenvolvimento de modelos de simulação muito complexos que se aproximaram da realidade em termos de geometria e modelos fenomenológicos considerados [2].

Este trabalho discutirá a implementação numérica de um modelo de pós-resfriamento do concreto, no qual a temperatura do concreto durante a hidratação é reduzida pela circulação de água ou ar em tubulações embutidas nas fôrmas, chamados de sistemas de *post-cooling*.

A modelagem numérica do pós-resfriamento do concreto permite uma economia significativa na construção estruturas de grande porte. Desta forma, desenvolver um modelo preditivo de fissuração, que incorpore a refrigeração do concreto nas idades iniciais é de extrema importância para minimizar o aparecimento de tensões que superem a capacidade resistiva do elemento e de futuras patologias.

Neste trabalho, é apresentada uma formulação numérica para um modelo de simulação do sistema de resfriamento com tubos em estruturas de concreto massa, em escala mesoscópica, à ser implementado e acoplado em um modelo de elementos finitos DAMTHE, desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN, pelo PEC/COPPE/UFRJ.

## 2 Sistemas de *post-cooling*

O pós-resfriamento do concreto com tubos embutidos (*post-cooling*) tem sido aplicado desde a década de 1930 [3]. O objetivo é controlar a temperatura interna do concreto dentro dos limites especificados em projeto por meio da circulação ativa de água (ou outro fluido de resfriamento) ou ar através dos tubos embutidos no material, para mitigar o risco do aparecimento fissuras de origem térmicas. Geralmente é orientado para a redução das temperaturas de pico do concreto durante o período de hidratação, minimizando assim as variações volumétricas associadas às variações de temperatura correspondentes. O projeto de sistemas de pós-resfriamento compreende a otimização das propriedades da tubulação (layout geométrico, transferência de calor, vazão de fluido, temperaturas de entrada / saída) para atingir a redução de temperatura de pico desejada com o mínimo de consumo de energia possível.

Exemplos de estruturas e seus *layouts* de tubulação típicos correspondentes podem ser vistos na figura 1 [4]. A técnica é bastante eficaz, mas tem custos consideráveis de projeto, aquisição de materiais, instalação e operação eficazes. Por esse motivo, sua área de aplicação geralmente se limita a estruturas maiores, como barragens que requerem resfriamento interno antes do preenchimento / vedação da junta [5]; o sistema de resfriamento pode ser acionado nos primeiros dias após a concretagem, permitindo o controle térmico do concreto. Outras aplicações de pós-resfriamento incluem, mas não estão limitadas a, produção de segmentos de concreto para túneis imersos, muros de contenção e lajes [6] [7] [8], que hoje em dia são comumente analisados e projetados usando software dedicado de análise de elementos finitos (FEA).

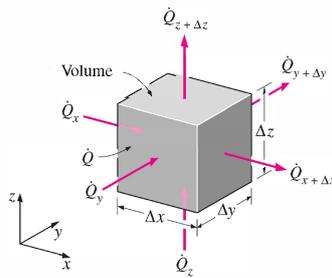


Figura 2. Balanço Energético de um elemento. [9]

### 3 Transferência de calor

A transferência de calor lida com sistemas que não possuem equilíbrio térmico e, portanto, é um fenômeno sem equilíbrio. Portanto, o estudo da transferência de calor não pode ser baseado apenas nos princípios da termodinâmica. [9] No entanto, as leis da termodinâmica estabelecem a estrutura para a ciência da transferência de calor. A *primeira lei* exige que a taxa de transferência de energia para um sistema seja igual à taxa de aumento da energia desse sistema. A *segunda lei* exige que o calor seja transferido na direção da diminuição da temperatura.

Um processo de transferência de calor pode ser estudado experimentalmente (testando e fazendo medições) ou analiticamente (por análise e/ou cálculos). A abordagem experimental tem a vantagem de lidarmos com o sistema físico real, e a quantidade desejada é determinada por medição, dentro dos limites do erro experimental. No entanto, essa abordagem é cara, demorada e muitas vezes impraticável. Além disso, o sistema que estamos analisando pode até não existir. Por exemplo, o plano de concretagem de um vertedouro de uma barragem de concreto massa deve ser determinado antes que o elemento seja realmente construído com base nas dimensões e especificações fornecidas, à fim de evitar o aparecimento de fissuras devido à liberação de calor no processo de hidratação do cimento. A abordagem analítica (incluindo a abordagem numérica e computacional) tem a vantagem de ser rápida e barato, entretanto os resultados obtidos estão sujeitos à precisão das premissas e concepções feitas na análise. Nos estudos de transferência de calor, conforme descrito por CENGEL [9] muitas vezes é alcançado um bom resultado, reduzindo consideravelmente as variáveis do problemas e permitindo a verificação dos resultados experimentalmente.

Resultados muito precisos para problemas práticos significativos podem ser obtidos com relativamente pouco esforço, usando um modelo matemático adequado e realista. A preparação de tais modelos requer um conhecimento adequado dos fenômenos naturais envolvidos e das leis relevantes, além de um bom julgamento. Um modelo irrealista dará resultados imprecisos e, portanto, inaceitáveis. Em linhas gerais, um projetista que trabalha em um problema de engenharia geralmente se encontra em posição de fazer uma escolha entre um modelo extremamente preciso, porém complexo e de alto custo computacional, e um modelo simples, mas não tão preciso.

Modelos muito precisos e complexos, podem comprometer sua utilização se forem demorados para resolver. No mínimo, o modelo deve refletir os recursos essenciais do problema físico que representa. Existem muitos problemas significativos no mundo real que podem ser analisados com um modelo simplificado, considerando que os resultados obtidos em uma análise são tão precisos quanto as premissas e suposições feitas na simplificação do problema. Portanto, o resultado obtido não deve ser aplicado a situações nas quais as premissas originais não se sustentam. Desta forma, qualquer solução para um problema deve ser interpretada dentro do contexto de sua formulação.

#### 3.1 Equação geral da condução de calor

Considerando um elemento retangular de dimensões  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$ , conforme figura 2 e assumindo a massa específica do material como  $\rho$  e o calor específico como  $C$  é possível escrever o balanço energético em um determinado elemento durante um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ :

$$\begin{bmatrix} \text{taxa de} \\ \text{transferência} \\ \text{de calor em} \\ x, y \text{ e } z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{taxa de} \\ \text{transferência} \\ \text{de calor em} \\ x + \Delta x, y + \Delta y \text{ e} \\ z + \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{taxa de geração} \\ \text{de calor} \\ \text{do elemento} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{taxa de troca} \\ \text{de energia} \\ \text{do elemento} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ou

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{Q}_{elemento} = \frac{\Delta E_{elemento}}{\Delta t} \quad (2)$$

onde o volume do elemento  $V_{elemento} = \Delta x \Delta y \Delta z$ , a quantidade de calor trocado  $Q = mC\Delta T$  a taxa de troca de energia do elemento pode ser expressa por:

$$\Delta E_{elemento} = E_{t+\Delta t} - E_t = mC(T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (3)$$

considerando que a massa específica é expressa por  $\rho = \frac{m_{elemento}}{V_{elemento}}$ , pode-se reescrever a equação 3:

$$\Delta E_{elemento} = mC(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho C V_{elemento} (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (4)$$

A taxa de condução de calor através de um meio em uma determinada direção é proporcional à diferença de temperatura no meio e à área normal à direção da transferência de calor, e inversamente proporcional à distância naquela direção. Desta forma, pode-se expressar de forma diferencial através da lei de Fourier de condução de calor para condução de calor unidimensional ( $W$ ):

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do material,  $dT/dx$  é o gradiente de temperatura. De uma forma geral, é possível escrever a equação da condução do calor como:

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

onde  $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$  é operador Laplaciano,  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$  e  $\dot{q}$  o calor gerado no volume.

### 3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é complexa, principalmente por envolver movimento de fluidos e condução de calor. O movimento do fluido aumenta a transferência de calor, pois coloca em contato partes mais quentes e frias, iniciando taxas mais altas de condução em um número maior de locais no fluido. Portanto, a taxa de transferência de calor através de um fluido é muito maior por convecção do que por condução. De fato, quanto maior a velocidade do fluido, maior a taxa de transferência de calor. [9]

Resultados experimentais demonstram que a transferência de calor por convecção depende fortemente das propriedades do fluido, como a viscosidade  $\mu$ , condutividade térmica  $\lambda$ , densidade  $\rho$  e calor específico  $C_p$ , bem como da velocidade do fluido  $\nu$ . Além disso, depende da geometria e da rugosidade da superfície de contato, além do tipo de fluxo de fluido, laminar ou turbulento.

Apesar da complexidade da convecção, a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e é expressa pela lei de resfriamento de Newton como:

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

ou

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Onde  $h$  é coeficiente de transferência de calor por convecção,  $A_s$  a área da superfície de troca de calor,  $T_s$  a temperatura da superfície e  $T_\infty$  a temperatura do fluido anterior à troca com a superfície de troca.

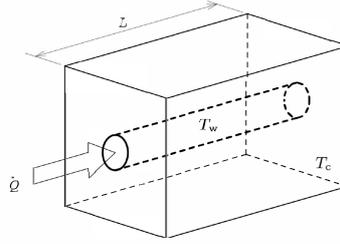


Figura 3. Volume arbitrário.

## 4 Formulação numérica

### 4.1 Um elemento

Considerando um volume arbitrário, constituído de dois materiais distintos: concreto e água, conforme figura 3. Assumindo  $m_c$ ,  $V_c$  e  $\rho_c$  como a massa, volume e densidade referente ao concreto, e  $m_w$ ,  $V_w$  e  $\rho_w$  como a massa, volume e densidade referente à água, e aplicando 4, obtém-se:

$$\Delta E_c = m_c C_c (T_c^{t+\Delta t} - T_c^t) = \rho_c C_c V_c (T_c^{t+\Delta t} - T_c^t) \quad (9)$$

$$\Delta E_w = m_w C_w (T_w^{t+\Delta t} - T_w^t) = \rho_w C_w V_w (T_w^{t+\Delta t} - T_w^t) \quad (10)$$

Assumindo então a premissa do balanço energético da 1ª Lei da termodinâmica, na qual:

$$\begin{bmatrix} \text{taxa de} \\ \text{transferência} \\ \text{de calor recebida} \\ \text{por um corpo} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{taxa de} \\ \text{transferência} \\ \text{de calor} \\ \text{rejeitada em um corpo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{taxa de troca} \\ \text{de energia} \\ \text{do corpo} \end{bmatrix} \quad (11)$$

tem-se, pelas equações 9 e 10:

$$\Delta E_c = \rho_c C_c V_c (T_c^{t+\Delta t} - T_c^t) = E_{c, \text{recebida}} - E_{c, \text{rejeitada}} \quad (12)$$

$$\Delta E_w = \rho_w C_w V_w (T_w^{t+\Delta t} - T_w^t) = E_{w, \text{recebida}} - E_{w, \text{rejeitada}} \quad (13)$$

Analisando separadamente o volume concreto/água em uma simplificação adiabática, é possível assumir que a variação energética dos dois corpos do volume é igual ( $\Delta E_c = \Delta E_w$ ). Além disso, aplicando a 2ª Lei da termodinâmica, na qual a energia é transferida na direção da menor temperatura, tem-se que  $E_{c, \text{rejeitada}} = E_{w, \text{recebida}}$  ou vice-versa, à depender do gradiente térmico. Desta forma:

$$\rho_c C_c V_c (T_c^{t+\Delta t} - T_c^t) = \rho_w C_w V_w (T_w^{t+\Delta t} - T_w^t) \quad (14)$$

Considerando que a troca de energia entre os sistema se dá por convecção, na interação entre fluido e sólido, através da equação 8 é definido:

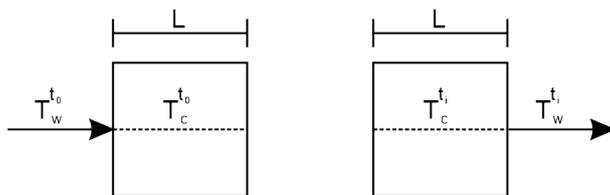
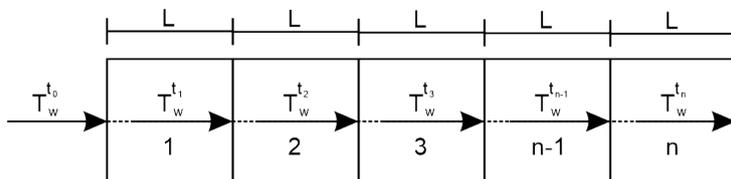
$$E_{conv} = \dot{Q}_{conv} \Delta t = h A_s (T_c^t - T_w^t) \Delta t \quad (15)$$

Compatibilizando os balanços energéticos:

$$E_c = E_w = E_{conv} \therefore h A_s (T_c^t - T_w^t) x \Delta t = \rho_c C_c V_c (T_c^{t+\Delta t} - T_c^t) = \rho_w C_w V_w (T_w^{t+\Delta t} - T_w^t) \quad (16)$$

Adaptando a formulação teórica visando a implementação de uma uma solução numérica para o pós-resfriamento de estruturas de concreto e considerando um volume arbitrário, conforme figura 3. Considerando que o resfriamento se dará por um sistema de tubo + fluido refrigerante, geometricamente simplificado como um único material, de temperatura  $T_w$ , perímetro do tubo  $P$ , comprimento  $L$ , e as temperaturas de lançamento do concreto  $T_c^{t_0}$  e  $T_w^{t_0}$  a de entrada do fluido, ambas prescritas:

$$h P L (T_c^{t_0} - T_w^{t_0}) (t_i - t_0) = \rho_c C_c V_c (T_c^{t_i} - T_c^{t_0}) = \rho_w C_w V_w (T_w^{t_i} - T_w^{t_0}) \quad (17)$$


 Figura 4. Volume arbitrário nos instantes  $t_0$  e  $t_i$ .

 Figura 5.  $n$  elementos

Além disso, é considerado o tempo  $t_0$  o instante no qual o fluido entra no elemento, e  $t_i$  o instante no qual o fluido sai do elemento, determinados em função da velocidade de escoamento do fluido e como método de simplificação da interação fluido-sólido, caracterizado pelo tempo de troca que entre o ambos, definido pelo tempo de permanência de um determinado volume de controle de fluido dentro do sólido, conforme equação 18 e figura 4.

$$\delta t = t_i - t_o = \frac{L}{v} \quad (18)$$

Onde,  $v$  é a velocidade de escoamento do fluido e  $L$  o comprimento do elemento (volume de controle). Por fim, é possível obter as seguinte informações de temperatura para os volumes de concreto e fluido:

$$T_w^{t_i} = \frac{\rho_c C_c V_c (T_c^{t_i} - T_c^{t_0})}{\rho_w C_w V_w} + T_w^{t_0} \quad (19)$$

$$T_c^{t_i} = \frac{hPL(T_c^{t_0} - T_w^{t_0})\frac{L}{v}}{\rho_c C_c V_c} + T_c^{t_0} \quad (20)$$

A análise da interação entre diversos elementos será dada sempre com a entrada da temperatura do fluido igual à temperatura de saída do elemento anterior, conforme figura 5.

## 5 Exemplo

### 5.1 Caso 1 - Simplificação do tubo e fluido

O exemplo adotado para aplicação da formulação proposta foi constituído por um corpo de concreto, adiabático e hidratado, resfriado por água através de um tubo inserido no eixo do volume, composto por um único volume, representando o tubo e o fluido, com temperaturas iniciais de água e concreto prescritas, conforme figura 6 e propriedades listadas na tabela 1.

Inicialmente foi considerado o volume inteiro, em equilíbrio térmico, ou seja  $T_{c1}^{t_0} = T_{w1}^{t_0} = T_{cn}^{t_0} = T_{wn}^{t_0} = 30^\circ C$ .

Posteriormente foi implementado a formulação interativa, considerando a temperatura de entrada do fluido refrigerante constante a  $10^\circ C$  no elemento 1 ( $T_{w1}^t = 10^\circ C$ ) conforme equações 20 e 19 afim de simular a mudança de temperatura em ambos os materiais para cada passo de tempo.

A fim de validar o modelo e verificar os resultados obtidos foram simuladas as mesmas condições do problema no software comercial de elementos finitos *DIANA FEA*.

Além disso, neste caso, foi desconsiderada a taxa de troca por condução térmica entre os elementos e os volumes de concreto e tubo de resfriamento em ambas as direções, a fim de validar o modelo nas suas premissas iniciais e seus impactos no resultado, considerando que futuramente este modelo será implementado em um programa de elemento finitos e para uma escala mesoscópica na qual essa discretização poderá ser eventualmente desconsiderada, considerando que a interação de troca por condução será dada de acordo com a equação 6 e solucionada através do operador Laplaciano. No caso 2, será considerado a taxa de troca por condutividade térmica no sentido radial ( $x$  e  $y$ ).

Tabela 1. Propriedades dos materiais: concreto e tubo refrigerante.

	Concreto	Tubo + água
$L$ (m)		10
$L'$ (m)		2
$a$ (m)		0,2
$b$ (m)		0,2
$\delta t$ (s)		2
$m$ (kg/m <sup>3</sup> )	2430	1000
$C_p$ (J/kg.°C)	908	4184
$\lambda$ (W/m.°C)	1,52	0,61
$v$ (m/s)	-	1
$\phi$ (m)	-	0,09
$h$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	-	60

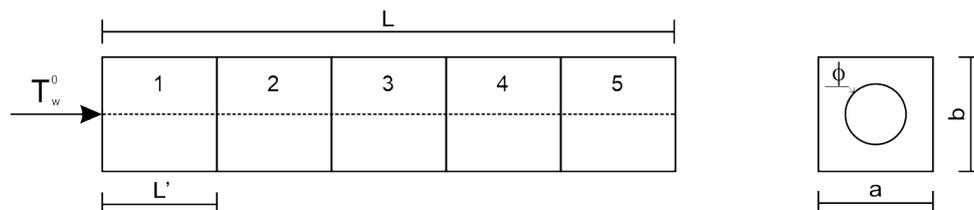


Figura 6. Exemplo - Vistas longitudinal e transversal

O gráfico 7 apresenta os resultados das temperaturas obtidas pelo modelo proposto, comparados com os dados de temperatura obtidos pelo *DIANA FEA* no elemento de saída do volume para ambos os materiais: concreto e tubo refrigerante (tubo+água). É possível verificar que ambos os resultados apresentam comportamento semelhante.

## 5.2 Caso 2 - Discretização do tubo e fluido

No caso 2, o mesmo exemplo foi aplicado, nas mesmas condições expostas no caso 1. Afim de verificar a influência da condutividade térmica no sentido radial na troca de calor dentro de um mesmo elemento de concreto, considerando o gradiente térmico gerado entre a superfície de troca do tubo com a parede adiabática, foi introduzido o termo de condutividade nas equações 19 e 20. Além disso, para melhor aplicação dos conceitos de termodinâmica, discretizou-se o tubo e o fluido como volumes separados, considerando a troca convectiva do fluido com o tubo, e a troca por condução entre o tubo e a parede adiabática através do concreto. A espessura do tubo considerada foi de 2mm e constituído de alumínio, com massa específica  $m_\phi = 2697\text{kg/m}^3$  e calor específico  $C_p = 900\text{J/kg.}^\circ\text{C}$ .

CENGEL [9] sugere que aproximações podem ser realizadas para problemas de transferências de calor por condutividade em duas dimensões, através da equação:

$$Q = S\lambda(T_\phi - T_c) \quad (21)$$

Onde  $S$  é o fator de forma de condução ( $\frac{2\pi L}{\ln(1,08(a/\phi))}$ ) e  $T_\phi$  a temperatura do tubo. Desta forma é

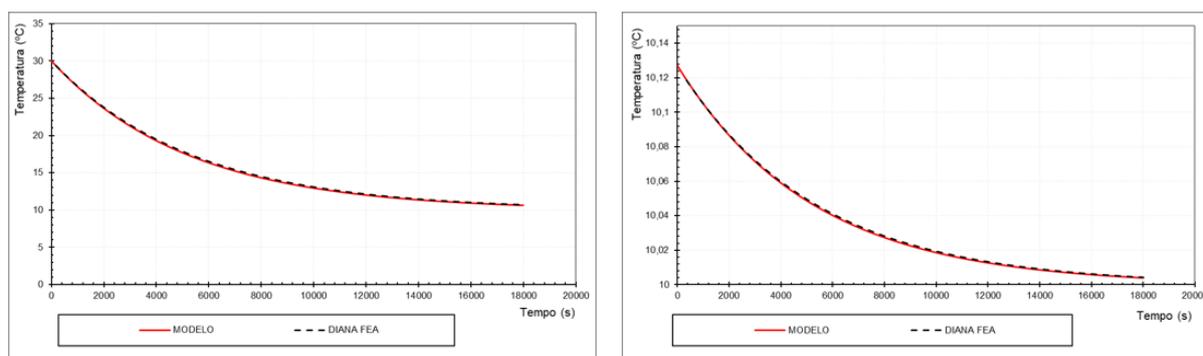


Figura 7. Resultado das temperaturas obtidas para o último elemento do modelo para concreto e tubo refrigerante.

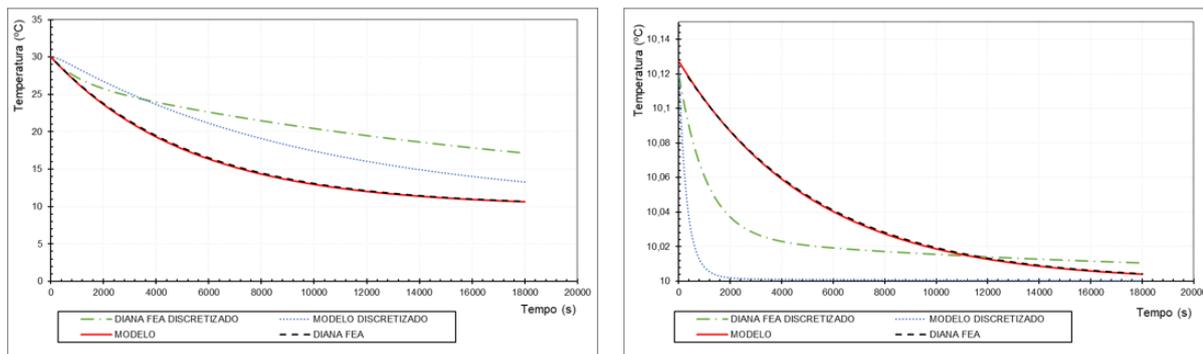


Figura 8. Resultado das temperaturas obtidas para o último elemento do modelo para concreto e fluido refrigerante (água).

possível reescrever as equações 19 e 20:

$$T_w^{t_i} = \frac{\rho_\phi C_\phi V_\phi (T_\phi^{t_i} - T_\phi^{t_0})}{\rho_w C_w V_w} + T_w^{t_0} \tag{22}$$

$$T_\phi^{t_i} = \frac{hPL(T_\phi^{t_0} - T_w^{t_0})\frac{L}{v} + S\lambda_c(T_c^{t_0} - T_\phi^{t_0})(t_i - t_0)}{\rho_\phi C_\phi V_\phi} + T_\phi^{t_0} \tag{23}$$

$$T_c^{t_i} = \frac{S\lambda_c(T_\phi^{t_0} - T_c^{t_0})(t_i - t_0)}{\rho_c C_c V_c} + T_c^{t_0} \tag{24}$$

É possível verificar que ocorre uma variação no comportamento da curva na comparação entre o modelo e o DIANA FEA devido a discretização dos elementos, conforme o gráfico 8.

## 6 Conclusão

Os resultados das temperaturas obtidas pelo modelo proposto, comparados com os dados de temperatura obtidos pelo DIANA FEA para ambos os materiais apresentam comportamento semelhante quando analisados sem discretização.

Entretanto, considerando que o modelo será aplicado para estruturas de concreto massa, com volume significativamente superior aos volumes discretizados no caso 2, entende-se que as variações apresentadas, por serem de pequena grandeza, serão desprezíveis no modelo macro, que utilizará as interações em elementos finitos para solução das equações de calor.

Futuramente, a formulação será implementada e validada no programa de elementos finitos DAMTHE (PEC/COPPE/UFRJ), juntamente com um modelo de hidratação e análise de fissuração de estruturas de concreto massa.

O modelo permitirá a redução significativa do tempo de processamento computacional dos modelos em escala macro, viabilizando desta forma a análise de estruturas em menor tempo.

## Referências

[1] RILEM, 2018. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS*. Springer International Publishing.

[2] Fairbairn, E. M. R., Silvano, M. M., Koenders, E. A. B., Ribeiro, F. L. B., & Toledo-Filho, R. D., 2012. Thermo-chemo-mechanical cracking assessment for early-age mass concrete structures. *Concrete International*, vol. 34, pp. 30–35.

[3] ACI, A. C. I., 2005a. *Guide to mass concrete*. ACI Manual of Concrete Practice.

[4] Sfikas, I. P., Ingham, J., & Baber, J., 2016. Msimulating thermal behaviour of concrete by fea: state-of-the-art review. vol. .

[5] ICOLD, 1990. Bulletin 76, conventional methods in dam construction. vol. .

[6] Baber, J., Salet, T. A. M., & Lundberg, J. K., 1998. esund tunnel control of early age cracking. vol. .

- [7] Kim, J. K., Kim, K. H., & Yang, J. K., 2001. Thermal analysis of hydration heat in concrete structures with pipe cooling system. vol. .
- [8] Lunniss, R. & Baber, J., 2013. Immersed tunnels. vol. .
- [9] CENGEL, Y. A., 2002. *Heat transfer: a practical approach*. McGraw-Hill.