



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS GRADIENTES TÉRMICOS EM PROCESSOS DE RESFRIAMENTO DE BOBINAS DE DIFERENTES MATERIAIS EMPREGANDO MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS 2D E 3D.

Pedro Magalhães Sobrinho

Newton Coutinho Filho

UNESP- Universidade Estadual Paulista, Departamento de Energia, Guaratinguetá, SP, Brasil, 12516-410, E-mail: sobrinho@feg.unesp.br

Resumo. Neste estudo analisa-se o emprego de modelos bi-dimensionais e tri-dimensionais de elementos finitos, destinados à análise transiente de um processo de resfriamento térmico, onde considera-se que a resistência térmica externa entre a superfície e o meio envolvente é maior que a resistência térmica interna do sistema, tal que a primeira controla o processo de transmissão de calor. Para isto, utiliza-se como objeto de estudo uma bobina metálica devidamente instrumentada, para, fornecer os resultados do processo térmico de resfriamento em análise. Com base nos resultados experimentais, emprega-se um modelo simplificado visando a obtenção do coeficiente de película do processo. Na obtenção dos modelos de elementos finitos desenvolvidos para a bobina, realiza-se um estudo teórico comparativo do comportamento do gradiente de temperatura em processos de resfriamento considerando diferentes materiais. Esta comparação permite avaliar, não só o gradiente de temperatura, mas também colabora, no relacionado, às dificuldades para o desenvolvimento de modelos não unidimensionais e o tempo de processamento para obtenção de resultados.

Palavras-chave: *elementos finitos, resfriamento, transferência de calor.*

1. INTRODUÇÃO

Estudos destinados à otimização de processos onde o componente está sujeito a severas condições térmicas são avaliados aplicando-se uma análise térmica transiente. Entretanto, este método requer uma análise trabalhosa, que nem sempre se torna necessária. Este estudo visa dar continuidade a um trabalho desenvolvido por Magalhães Sobrinho et al. (2001), o qual, é destinado à redução do tempo de resfriamento de bobinas de alumínio em um determinado processo de laminação, buscando encontrar uma otimização no processo de produção.

O conjunto estudado é composto de um carretel no qual é enrolada a chapa metálica. As dimensões da bobina considerada no estudo são: diâmetro externo (d_{eB}) = 1,7 (m); diâmetro interno (d_{iB}) = $546,1 \times 10^{-3}$ (m); comprimento (L_B) = 1,6 (m). As características do carretel, são diâmetro externo (d_{eC}) = $546,1 \times 10^{-3}$ (m); diâmetro interno (d_{iC}) = 508×10^{-3} (m); espessura (e_C) = $19,05 \times 10^{-3}$ (m); comprimento (L_C) = 2,050 (m);

As características dos materiais utilizados no estudo proposto são apresentados na Tabela 1.

2. ANÁLISE TEÓRICA

Quando estuda-se problemas que envolvem a condução térmica em regime permanente, admite-se que, para essa condição ser alcançada, transcorre algum tempo depois de iniciado o processo de transmissão de calor. Nesse tempo transcorrido, que pode ser de vital importância para a análise do

processo, quanto ao equilíbrio da temperatura entre o interior e a superfície externa do sólido estudado, pode-se aplicar técnicas de formulação que exigem métodos analíticos ou até métodos numéricos de solução e convergência com alto grau de dificuldade.

Tabela 1: Características dos materiais utilizados para o estudo, segundo American Society for Metals (1979, 1984), na faixa de temperatura de estudo, entre 40 a 380 (°C),

Material	condutividade térmica (W/mK) (k)	calor específico (J/kgK) (Cp)	massa específica (kg/m ³) (ρ)
Bobina			
Alumínio ASTM 3004	$148,395+(8,311 \times 10^{-2})T$ $-(1,147 \times 10^{-4}) T^2$	892	2707
Cobre	$567,196-1,13139T+0,00255688$ T^2 $-2,48541 \times 10^{-6} T^3$ $+8,40759 \times 10^{-10} T^4$	$117,349+1,75159T$ $-0,0037953T^2$ $+3,52161 \times 10^{-6} T^3$ $-1,13852 \times 10^{-9} T^4$	8933
Aço AISI 1010	$77,8171-0,0415713T-$ $2,15584 \times 10^{-5} T^2+$ $1,6598 \times 10^{-8} T^3$	$883,285-5,07933T^2$ $-2,62541 \times 10^{-5} T^3$ $+1,29702 \times 10^{-8} T^4$	7832
Carretel			
Aço Centrifugado	43	473	7800

Em grande parte das situações onde o fluxo de calor transitório está sendo considerado, pode-se aplicar a análise do Número de Biot, para a orientação e definição da formulação do problema de transmissão de calor por condução num material.

Em problemas onde o fluxo de calor em regime transitório envolve variações periódicas tanto de temperatura como de fluxo de calor, a análise térmica pode ser feita através de técnicas numéricas; a configuração geométrica não é simétrica e as condições de contorno variam com o tempo.

Apesar de não existir qualquer material que possua uma condutibilidade térmica infinita, muitos problemas de fluxo de calor transitório podem ser resolvidos, com precisão aceitável, ao se admitir que a resistência interna à transmissão de calor por condução do sistema é tão pequena que a temperatura dentro do sólido é praticamente uniforme em qualquer instante. Essa simplificação se justifica quando a resistência térmica externa entre a superfície do sistema e o meio envolvente é tão grande, comparada à resistência térmica interna do sistema, que a primeira controla o processo de transmissão de calor.

Uma medida da importância relativa da resistência térmica dentro de um corpo sólido é a razão entre as resistências interna e externa. Essa razão pode ser escrita na forma de um parâmetro adimensional denominado Número de Biot.

$$B_i = \frac{\bar{h}V}{k} \text{ ou } \frac{\bar{h}V}{kA_S} \quad (1)$$

onde:

A_S = área (m²), \bar{h} = coeficiente de película (W/m² °C), k = condutividade térmica (W/m K) e V = volume (m³).

Em corpos cuja geometria é definida e se assemelha a uma placa, um cilindro ou uma esfera, o erro introduzido ao se admitir que a temperatura em qualquer instante é uniforme será inferior a 5%, quando a resistência interna for inferior a 10% da resistência superficial externa, isto é, quando $B_i < 0,1$.

A equação que descreve o comportamento do sistema exposto à flutuações periódicas de temperatura, para um intervalo de tempo $d\theta$, é a seguinte:

$$\frac{dT(\theta)}{d\theta} + \frac{\bar{h}A_S}{C_p\rho V}T(\theta) = \frac{\bar{h}A_S}{C_p\rho V}T_\infty(\theta) \quad (2)$$

A solução completa para a Eq. (2), do tipo linear não-homogênea, consiste da soma da solução particular e da complementar, onde as condições de contorno e as condições iniciais devem ser aplicadas.

Esta formulação pode ser aplicada onde o Número de Biot, que aparece na constante de tempo do sistema, for menor que 0,1 (Arpaci, 1966). A constante de tempo do sistema é dada por:

$$\text{Constante de Tempo do Sistema} = \frac{C_p\rho V}{\bar{h}A_S} = \frac{\theta}{Bi Fo} \quad (3)$$

Quando o Número de Biot é maior que 0,1, a análise do comportamento do sistema utilizando a formulação concentrada introduz um erro maior que 5%, geralmente não aceitável. Portanto, a análise transiente deverá ser feita observando-se a particularidade de cada sistema. Quanto às variações das negligências de termos representativos, a precisão dos resultados dependerá dessas considerações.

No estudo em questão, inicia-se a avaliação das características do sistema com a determinação da quantidade de calor armazenada no conjunto carretel – bobina. Com base nos resultados apresentados por Magalhães Sobrinho et al. (2001), pode-se afirmar que qualquer valor do coeficiente de película inferior a 40,34 (W/m² °C) para a superfície da bobina, satisfaz a condição do estudo do modelo por análise concentrada.

Para este modelo, têm-se trocas de calor representadas pela Eq. (2), cuja solução resulta em :

$$\bar{h} = \frac{-\rho C_p V}{A\zeta} \left(\ln \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \right) \quad (4)$$

onde: T_0 = temperatura inicial , ζ = tempo de resfriamento

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O banco de ensaio foi adaptado de forma a se conseguir determinar o comportamento térmico durante o processo de resfriamento considerando a situação em que o conjunto carretel/bobina está disposto de maneira que o fluxo é perpendicular ao eixo longitudinal do conjunto. O banco de ensaio desenvolvido, constitui-se de: Ventilador centrífugo; Medidor de vazão; Bocal removível; Bobina de teste .

Foram empregados e calibrados os seguintes instrumentos para a obtenção dos resultados experimentais: Anemômetro - utilizado para medição de velocidade em diferentes pontos do bocal; Termopares do tipo Cobre-Constantan – utilizados para obtenção das temperaturas na bobina; Sistema automático de aquisição de dados de temperatura.

Para a tomada de temperatura do conjunto carretel/bobina, durante o processo de resfriamento, foram instalados termopares em 5 pontos distribuídos ao longo do conjunto de acordo com disposição apresentada na Fig. (1).

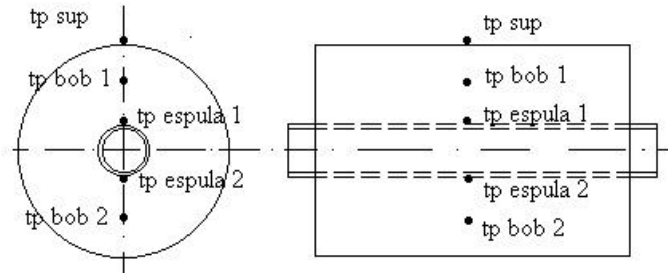


Figura 1. Pontos de tomada de temperatura na bobina (tp = posição do termopar)

A partir dos resultados obtidos, utilizando a Eq. (4), que supõe modelo concentrado, encontrou-se um coeficiente de película $h = 53,1 \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C)}$, com $m_{\text{ar}} = 24,6 \text{ (m}^3\text{/s)}$.

4. MODELAGEM PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Como é de conhecimento, a primeira lei de termodinâmica estabelece que a energia térmica é conservativa. Desta maneira, para um volume de controle diferencial tem-se:

$$Q = \rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L)T \right\} + (L)^T (q) \quad (5)$$

onde:

ρ = Densidade, c = Calor específico, T = Temperatura, t = tempo,

$$(L) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} = \text{vetor operador}, \quad (v) = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \text{vetor velocidade de massa de calor}$$

(q) = vetor fluxo de calor, Q = razão de calor gerada por volume de controle

Isto só pode ser possível se os termos $(L)T$ e $(L)^T$ forem interpretados como ∇T e $\nabla \cdot (q)$, respectivamente, onde ∇ representa o operador gradiente e $\nabla \cdot$ representa o operador divergente.

Sendo, a lei de Fourier usada para relacionar o vetor fluxo de calor e o gradiente térmico, tem-se:

$$(q) = -[D](L)T \quad (6)$$

onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix} = \text{matriz de condutividade} \quad (7)$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = condutividade no elemento nas direções x , y e z , respectivamente.

Combinando as Eq(s). (5) e (6), tem-se:

$$\rho c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right\} + (L)^T \{ [D] (L) T \} + Q \quad (8)$$

Expandindo a Eq. (8), tem-se todos os efeitos considerados no sistema cartesiano dado por:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Três tipos de condição de contorno podem ser avaliadas; (a) quando considera-se temperaturas específicas atuando sobre a superfície, (b) fluxos de calor específicos atuando sobre a superfície e finalmente, (c) superfícies de convecção específicas atuando sobre a superfície considerada, onde:

$$(q)^T (\eta) = - h_f (T_B - T) \quad (10)$$

onde:

h_f = Coeficiente de película avaliado por $\frac{(T_B + T_S)}{2}$, a não ser que seja específico para o elemento,
 T_B = Temperatura do fluido adjacente, T_S = Temperatura na superfície do modelo
 (η) = vetor unitário direcional

Desenvolvendo e combinando as equações (6) e (10) tem-se:

$$\int_{vol} \left(\rho c \delta T \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) T \right\} + (L)^T \delta T \{ [D] (L) T \} \right) d(vol) = \int_{S_2} \delta T q d(S_2) + \int_{S_3} \delta T h_f (T_B - T) d(S_3) + \int_{vol} \delta T Q d(vol) \quad (11)$$

onde :

vol = volume do elemento, δT = temperatura virtual admissível, S_2 = superfície onde atua o fluxo de calor, S_3 = superfície de convecção

Como estabelecido, T foi admitido para variar com o tempo. Esta dependência é dada por:

$$T = (N)^T \{ T_e \} \quad (12)$$

onde:

$T = T(x,y,z,t)$ = temperatura, $(N) = \{ N(x,y,z) \}$ = função forma do elemento, $\{ T_e \} = \{ T_e(t) \}$ = vetor nodal de temperatura

Assim tem-se:

$$\dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} = \{ N \}^T \{ \dot{T}_e \} \quad (13)$$

tendo δT da mesma forma de T:

$$\delta T = \{\delta T\}^T \{N\} \quad (14)$$

$$\{L\}T = [B]\{T_e\}, \text{ onde } [B] = \{L\}\{N\}^T \quad (15)$$

Desta maneira a equação (11) poderá ser reescrita considerando a variável T, tal como:

$$\begin{aligned} & \int_{\text{vol}} \left(\rho c \{\delta T\}^T \{N\} \{N\}^T \{\dot{T}_e\} \right) d(\text{vol}) + \int_{\text{vol}} \left(\rho c \{\delta \dot{T}_e\}^T \{N\} \{v\}^T [B] \{\dot{T}_e\} \right) d(\text{vol}) + \\ & \int_{\text{vol}} \{\delta T_e\}^T [B]^T [D] [B] \{T_e\} d(\text{vol}) \\ & = \int_{S_2} \{\delta T_e\}^T \{N\} q d(S_2) + \int_{S_3} \{\delta T_e\}^T \{N\} h_f (T_B - \{N\}^T \{T_e\}) d(S_3) + \int_{\text{vol}} \{\delta T_e\}^T \{N\} Q d(\text{vol}) \end{aligned} \quad (16)$$

Para simplificar, considera-se condições bidimensionais, em casos de aletas bidimensionais, salvaguardando as condições de contorno já comentadas. Assim, a equação diferencial é dada por:

$$K_{xx} t \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + K_{yy} t \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} - 2hT + 2hT_f = 0 \quad (17)$$

onde t= espessura, T = temperatura do material e T_f= temperatura do fluido ao redor

Em corpos bidimensionais de seção constante, muito extensos, sujeitos às mesmas condições de contorno, tem-se que, ao longo do comprimento do corpo o gradiente de temperatura na direção z é zero e a equação diferencial será:

$$K_{xx} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + K_{yy} \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + Q = 0 \quad (18)$$

Onde, Q é uma fonte interna ou sumidouro. Esta fonte ou sumidouro deve existir ao longo de toda a direção Z para a troca de calor ser bidimensional.

As diferenças entre a transferência de calor em um corpo extenso e uma aleta bidimensional são as condições de contorno, que consistem em temperaturas determinadas, transferência de calor por convecção e fluxos de calor na superfície, conforme apresentado anteriormente.

Desta maneira tem-se, as equações que determinarão, nos estudos em questão, o comportamento do gradiente da temperatura, dos modelos de elementos finitos bi e tridimensionais.

Também considera-se estudos anteriormente realizados por Mavey (1971), onde são estudados a transferência de calor em bobinas de metal em chapa, por Vedula et al (1998), que são comparados os resultados empregando a integral de Duhamel para determinação da distribuição da temperatura transiente em um cilindro, com resultados obtidos empregando o método de elementos finitos, recomendando-se a aplicação desse método devido à sua versatilidade, e o estudo realizado por Lemembre e Petit (1998), onde é avaliado o comportamento térmico no interior de um cilindro quando sujeito a aquecimento lateral e resfriamento pelo topo, ressaltado o ponto de saturação para diversos números de Rayleigh estudados, optou-se por aplicar a metodologia de elementos finitos por ser uma ferramenta bastante versátil e confiável, já que permite estabelecer uma melhor diretriz para a otimização do processo

Assim, emprega-se o software de elementos finitos ANSYS, são desenvolvidos modelos visando encontrar as soluções numéricas correspondentes aos problemas propostos. Na análise térmica

utiliza-se um modelo transiente com as hipóteses consideradas anteriormente, bem como os materiais mencionados.

No modelo bidimensional emprega-se elementos planos isoparamétricos de 4 nós com um grau de liberdade e temperatura em cada nó, com capacidade de condução térmica, resultando em 42 elementos na malha. Para o caso do modelo tridimensional, emprega-se elementos tridimensionais de 20 nós com um grau de liberdade e temperatura em cada nó totalizando 1030 elementos na malha. O estudo bidimensional, representa meio conjunto carretel/bobina, sendo que esta análise foi dividida em duas etapas, a primeira considerando um fluxo de ar perpendicular ao eixo da bobina, com o coeficiente de película ($53,1 \text{ (W/m}^2 \text{ °C)}$), encontrado através do método analítico considerado. O resultado obtido para esse modelo é apresentado na Fig. (2).

Na segunda, visa-se otimizar os recursos existentes na planta industrial e reduzir o tempo de resfriamento do conjunto carretel – bobina, analisou-se uma nova condição de insuflamento de ar, paralelo ao eixo do conjunto carretel/bobina, o que demonstrou ser mais eficiente conforme demonstrado por Magalhães Sobrinho et al. (2001).

Considera-se a mesma malha bidimensional, empregou-se um novo sentido de fluxo de ar, conforme apresentado na Fig. (3).

Para a malha desenvolvida para o estudo tridimensional, emprega-se também mesmo sentido, como apresentado na Fig. (4).

Analisando os resultados fornecidos pelos modelos de elementos finitos desenvolvidos no estudo, identifica-se que não ocorrerão divergências entre os obtidos pelo modelo bidimensional e o tridimensional, em nenhum dos materiais estudados, resultados estes apresentados na Fig. (5).

Entretanto, a grande diferença entre os modelos desenvolvidos está na dificuldade da elaboração do modelo no que refere-se à aplicação das condições de contorno e do refino da malha, e também no tempo exigido para o processo, que no caso do modelo tridimensional é 500 vezes maior, quando utiliza-se um microcomputador do tipo Pentium 133 MHz.

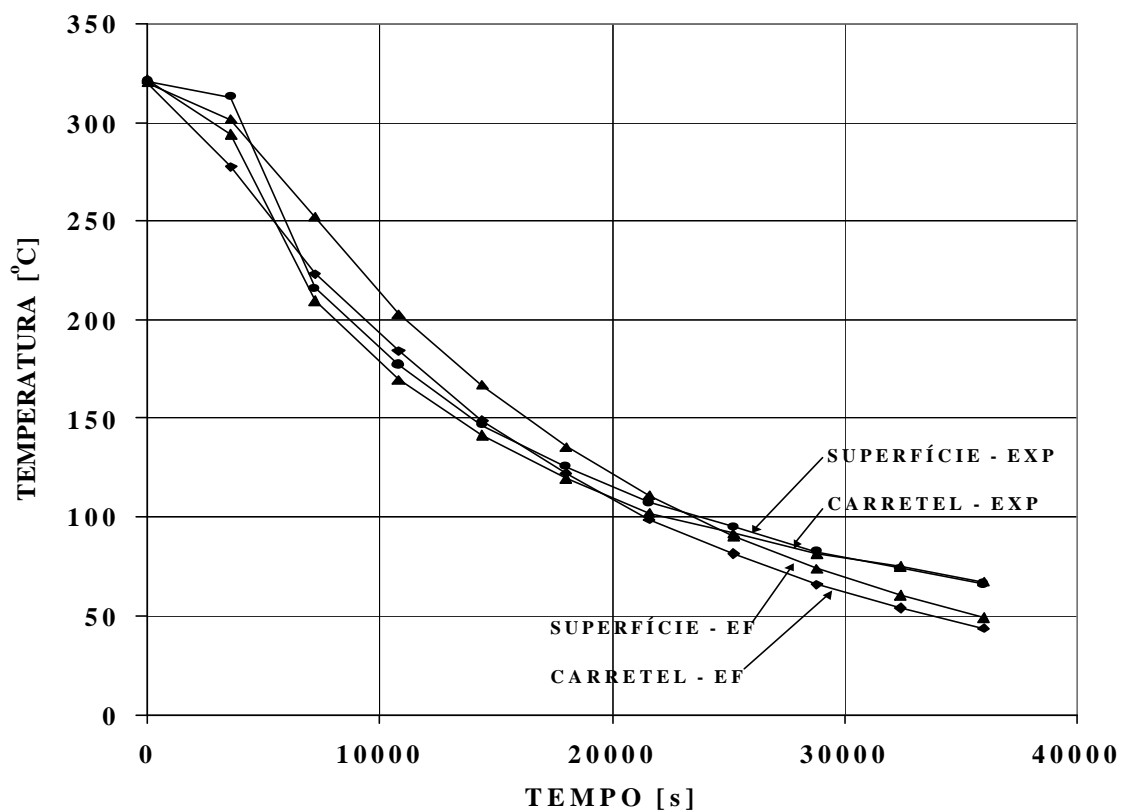


Figura 2. Comparação dos resultados obtidos por modelagem de elementos finitos e resultados experimentais.

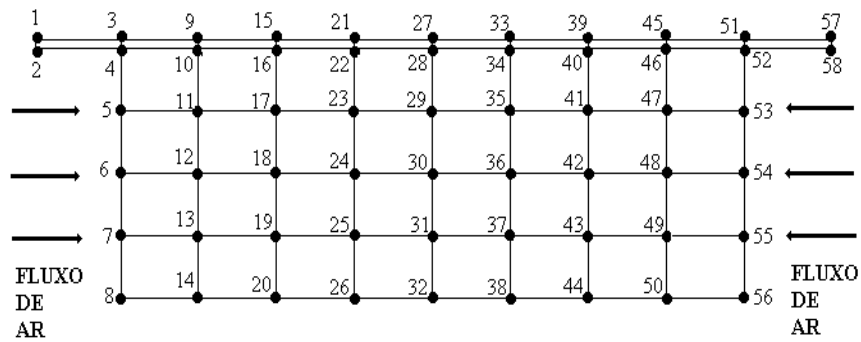


Figura 3. Malha de elementos finitos, bidimensional, para análise do comportamento térmico do conjunto carretel – bobina com fluxo lateral.

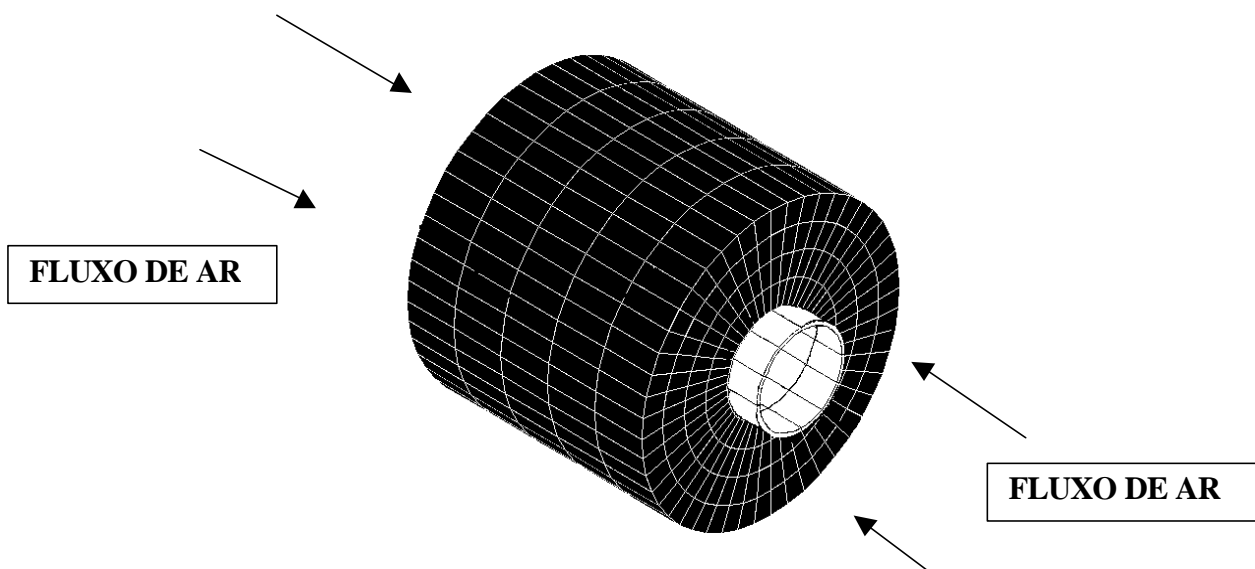


Figura 4. Malha de elementos finitos, tridimensional, para análise do comportamento térmico do conjunto carretel – bobina com fluxo lateral.

5 . CONCLUSÃO

A aplicação do método de elementos finitos considerando as condições impostas, demonstrou ser eficaz e com considerável representatividade, conforme observado na Fig. (2).

O emprego de modelos tridimensionais, conforme comentado no corpo do artigo, demanda cuidados devido a dificuldades relacionadas às condições de contorno, podendo ocorrer erros na sua aplicação. Neste estudo fica claro que, um modelo bi-dimensional atende perfeitamente as necessidades da análise do comportamento do gradiente de temperatura no interior das bobinas constituídas pelos materiais estudados.

Quanto à comparação do tempo de resfriamento para bobinas de diferentes materiais nota-se que devido às propriedades de condução do cobre, a temperatura na superfície, no meio e no interior da bobina é praticamente a mesma, o que não ocorre no alumínio e principalmente no aço. Esta observação permite concluir que em processos de resfriamento envolvendo a liga de aço e de alumínio são necessários cuidados destinados a homogeneização da temperatura em toda a bobina.

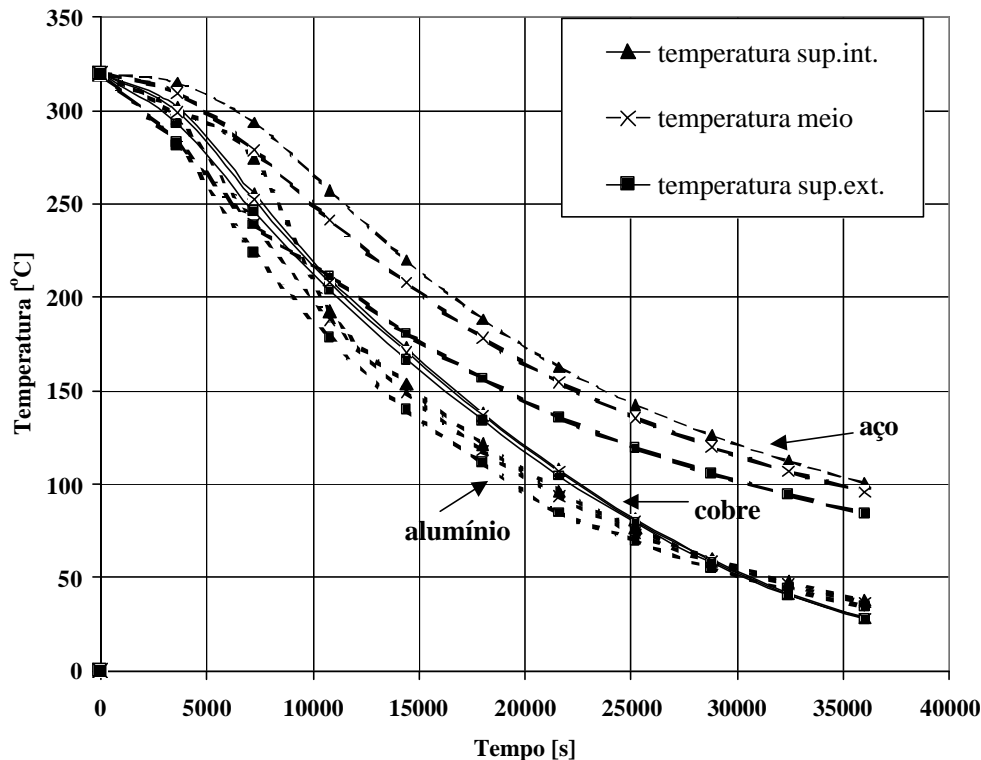


Figura 5. Resultados comparativos do tempo de resfriamento de bobina geometricamente semelhantes e diferentes materiais.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Metals, 1979, "Properties an Nonferrous Alloys and Pure Metals", Metals Handbook, 9 ed., vol.2.
- American Society for Metals, 1984, "Aluminum-Properties and Physical Metallurgy" , Metals Park, Ohio.
- Arpaci, V.S., 1966, "Conduction Heat Transfer", Addison Willey Publishing, Massachusetts.
- Lembre, A. and, Petit, J.P., 1998, "Laminar natural convection in a laterally heated and upper cooled vertical cylindral enclosure", Int J. Heat Transfer, vol. 41, no.16, pp 2437-2454.
- Magalhães Sobrinho, P., Magalhães Filho, P., Carvalho Jr., J.A. (2001), "Time Reduction in a Forced Convection Thermal Process Using Simplified Transient Analysis", International Communications in Heat Mass Transfer, vol.28, n6(01), pp 867-876.
- Mavey, G.E, 1971, "Heat transfer in coiled strip", Alcan International Ltd Baundry Laboratory Progress, Report n. BP PH 14/71, November.
- Vedula, V.R., Segall A.E., Ragarajan S.K., 1998 "Transient analysis of internally heated tubular components with exponential thermal loading and external convection", Technical Note, Int. J. Heat Transfer, vol.41, pp 3675-3678.

7. DIREITOS AUTORAIS.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALISY OF BEHAVIOR OF THERMALS GRADIENT IN THE COOLING PROCESS OF RELL OF DIFFERENT MATERIALS APPLYING 2D AND 3D FINITE ELEMENTS MODELS .

Pedro Magalhães Sobrinho

Newton Coutinho Filho

UNESP- Paulista State University, Energy Department, Guaratinguetá, SP, Brazil, 12516-410, E-mail: sobrinho@feg.unesp.br

***Abstract.** This study investigates the utilization of two-dimensional and three-dimensional finite elements in the transient analysis of a thermal cooling process. In such process the thermal resistance between the surface and the surroundings is high compared to the system internal thermal resistance, so that the first controls the heat transfer process.*

To conduct the study, a metal reel, with appropriate internal instrumentation, was utilised to provide experimental results for the thermal process. Based on experimental data, a simplified model for the determination of the process film coefficient was used. A comparative theoretical study on the temperature gradient behavior in the cooling process was also performed considering different materials as aluminium, copper and steel. the development of the two-and three dimensional analyses had the intention of not only evaluating the temperature gradient but also showing the difficulties associated with the development of more complex models and the process time needed to achieve results.

Keywords. *finite elements, cooling, heat transfer.*