

SIMULAÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS EMPREGANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Tarique da Silveira Cavalcante, tarique@ifce.edu.br¹

André Luiz de Souza Araújo, andre@ifce.edu.br¹

Pedro Pedrosa Rebouças Filho, pedrosa@ifce.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Av. Treze de Maio, 2081 - Benfica - Fortaleza/CE, +55 (85) 3307-3666,

Resumo. *Tratamentos térmicos são práticas muito comuns e de grande importância para a indústria metal-mecânica em geral. Através do aquecimento e resfriamento controlados, modificam de maneira muito significativa as propriedades mecânicas de inúmeras ligas metálicas comerciais, particularmente dos aços, os quais ocupam posição de destaque entre todos os materiais utilizados pelo homem. Nos últimos anos, tem crescido o interesse pelo desenvolvimento de aplicações numéricas capazes de simular os fenômenos e transformações que ocorrem durante estes tratamentos, de modo que se possam prever as alterações microestruturais e conseqüentes propriedades mecânicas do material tratado. O objetivo deste trabalho é desenvolver um programa computacional que simule a etapa de resfriamento do tratamento térmico de aços para construção mecânica. Este programa calcula o campo de temperatura no interior de blocos prismáticos, resolvendo a equação de condução de calor através do Método dos Volumes Finitos. A partir da curva de resfriamento de um ponto qualquer do interior do bloco e das curvas TRC (Transformação por Resfriamento Contínuo) do aço, pode-se determinar a microestrutura formada. Os resultados obtidos da simulação foram validados mediante comparação com soluções analíticas e com um experimento em que um corpo de prova de aço ABNT 1030 foi normalizado e posteriormente submetido à análise metalográfica.*

Palavras-chave: *simulação, método dos volumes finitos, tratamentos térmicos, condução de calor.*

Abstract. *Heat treatments are very common practices and of great importance for the metalworking industry. It modify very significantly the mechanical properties of several commercial alloys, particularly steels, which occupy an outstanding position among all materials used today, through controlled heating and cooling. In recent years, the interest in developing numerical applications able to simulate the phenomena and transformations that occur during these treatments has been growing, so that they can predict the microstructural changes and the resulting mechanical properties of the treated material. The objective of this paper is to develop a computer program that simulates the step of cooling the heat treatment of steels for mechanical construction. This program calculates the temperature field inside prismatic blocks, solving the equation of heat conduction through the Finite Volume Method. From the cooling curve of any point inside the block and curves CRT (Continuous Cooling Transformation) of steel, one can determine the microstructure formed. The results of the simulation were validated by comparison with analytical solutions and with an experiment in which a test specimen of ABNT 1030 steel was normalized and subsequently subjected to metallographic analysis*

Keywords: *simulation, finite volume method, heat treatments, heat conduction.*

1. INTRODUÇÃO

O espantoso desenvolvimento sofrido pelos computadores digitais nas últimas décadas permitiu o surgimento de máquinas de grande capacidade de processamento e de custo relativamente baixo, possibilitando a aplicação de técnicas numéricas para a solução dos mais diversos e complexos problemas de engenharia. Em um mercado de trabalho cada vez mais competitivo, em que a tecnologia evolui de forma acelerada, as ferramentas de simulação estão entre as técnicas de análise mais sofisticadas, exigindo do profissional alto nível de conhecimento e uma sólida base teórica.

Em princípio, o pesquisador ou engenheiro dispõem de três recursos para resolver um problema na área de tecnologia Maliska (2004):

- **Experimentação em laboratório:** apesar da vantagem de tratar com a configuração real do problema, é geralmente bastante onerosa e muitas vezes, impossível de ser realizada (tomem-se como exemplo estudos relacionados a reservatórios de petróleo);

- **Métodos analíticos:** envolvem a solução analítica de um modelo matemático representativo do processo ou fenômeno em estudo. Apresentam severas restrições quanto à complexidade do modelo empregado, de modo que as hipóteses simplificativas adotadas terminam por afastar demasiadamente o modelo da realidade;
- **Métodos numéricos:** permitem a solução de modelos extremamente complexos, não apresentando restrições quanto à geometria ou condições de contorno. São de custo muitas vezes menor do que aquele associado a um experimento em laboratório, permitindo a obtenção de resultados de forma muito rápida.

O emprego de técnicas numéricas há muito deixou os limites dos centros acadêmicos, passando a ser definitivamente incorporado pelo setor industrial Maliska (2004); de Souza Araújo (2004). As aplicações se estendem desde a simulação de injeção de peças plásticas até a prospecção de petróleo, estando os programas de simulação entre as ferramentas de análise mais sofisticadas disponíveis aos profissionais de tecnologia, exigindo mão-de-obra altamente qualificada a fim de que possam ser utilizadas de forma correta e adequada.

Uma classe importante de processos industriais são os chamados tratamentos térmicos. Consistem basicamente em operações controladas de aquecimento, permanência em uma dada temperatura e resfriamento de componentes ou peças, visando modificar as propriedades mecânicas do material ou aliviar tensões residuais através da indução de alterações microestruturais específicas, Silva e Mei (2006). Tais procedimentos são muito corriqueiros e importantes para a indústria metal-mecânica em geral, sendo aplicados em diversas ligas comerciais, especialmente em aços e ferros fundidos Callister (2002). Entretanto, a realização de tratamentos térmicos ainda está em grande parte baseada em procedimentos experimentais bastante simplificados e altamente dependentes do conhecimento empírico de técnicos especializados, Oliveira *et al.* (2004), o que é particularmente verdadeiro para a indústria mecânica do Estado do Ceará.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de modelos fenomenológicos capazes de descrever os diversos processos e transformações que ocorrem durante um tratamento térmico despertou o interesse em sua simulação computacional, sendo esta atualmente uma área que tem atraído a atenção de metalurgistas, engenheiros, técnicos e fabricantes de ligas metálicas, ASM (1991); Kang *et al.* (2004). Uma ferramenta computacional que resolva esses modelos, simulando assim as transformações microestruturais decorrentes de um determinado tratamento térmico, é de grande importância, pois possibilitaria a previsão das propriedades mecânicas resultantes do tratamento, auxiliando na determinação de seus parâmetros, como tempo de aquecimento, velocidade e meio de resfriamento. Seria útil ainda na seleção de materiais para uma determinada aplicação, na medida em que permitiria que se comparassem as respostas de diferentes materiais a um dado tratamento.

Tratamentos térmicos envolvem o acoplamento de três processos físicos complexos: térmico, transformação de fases e mecânico Oliveira *et al.* (2004). O primeiro está relacionado à determinação da distribuição de temperatura da peça, resultante da condução de calor através da mesma, sujeita a condições de contorno de trocas térmicas por convecção e radiação. Este é o passo inicial para a simulação de todo o processo: a partir do campo de temperatura determinam-se as transformações de fase e destas, a microestrutura e as propriedades, ASM (1991); Pacheco *et al.* (2007).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um programa computacional capaz de simular a etapa de resfriamento do tratamento térmico de uma peça de aço-carbono prismática.

São objetivos específicos do estudo:

- Simular a etapa de resfriamento do tratamento de normalização de um aço-carbono para construção mecânica;
- Desenvolver um programa computacional em C++ capaz de resolver a equação de condução de calor tridimensional em regime transiente para geometrias cartesianas. Como condições de contorno são consideradas perdas de calor por convecção. O programa, aproveitando-se de recursos da orientação a objetos, Eckel (2000); Stroustrup (2000), foi estruturado de modo a facilitar a codificação e a inclusão de futuros aperfeiçoamentos do modelo;
- Obter a curva de resfriamento de um ponto específico da peça tratada a partir do campo de temperatura;
- Determinar a microestrutura resultante a partir da curva de resfriamento e das curvas TRC do aço;

2. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Um tratamento térmico consiste no aquecimento do material até uma temperatura específica, manutenção dessa temperatura durante um intervalo de tempo determinado, seguindo-se de resfriamento em meio adequado, com a finalidade de induzir transformações de fases particulares e com isso, modificar suas propriedades mecânicas ou aliviar tensões residuais. Através de tratamentos térmicos é possível alterar dureza, resistência mecânica, propriedades elétricas e magnéticas, além de melhorar ductilidade, resistência ao desgaste, à corrosão e ao calor, usinabilidade e propriedades de corte Chiaverini (1982).

Inúmeras ligas metálicas comerciais são submetidas a tratamentos térmicos, sendo que as ferrosas (aços e ferros fundidos) caracterizam-se por responder muito fortemente a esses procedimentos, sofrendo acentuadas modificações de comportamento mecânico. Praticamente toda peça fabricada com esses materiais é submetida a algum tipo de tratamento térmico. Callister (2002); Silva e Mei (2006).

2.1 Transformações de Fase no Estado Sólido dos Aços

Uma microestrutura corresponde a um arranjo particular de fases. Diferentes tratamentos térmicos produzem diferentes transformações de fases, formando, portanto microestruturas distintas, o que resulta em combinações particulares de propriedades mecânicas.

Aços-carbono resfriados muito lentamente (em condições próximas às de equilíbrio) formam microestruturas que podem ser previstas com o auxílio do diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.

Os tratamentos térmicos envolvem resfriamentos muito mais rápidos do que os exigidos para se caracterizarem condições de equilíbrio. Em outras palavras, o diagrama de fases ferro-carbeto de ferro não pode ser empregado para se determinar qual microestrutura será obtida de um dado tratamento. Neste caso, utilizam-se as curvas TTT (tempo-temperatura-transformação) ou TRC (transformação por resfriamento contínuo).

As curvas TTT são utilizadas para tratamentos isotérmicos, nos quais a peça é resfriada até determinada temperatura, a qual é mantida durante intervalo de tempo apropriado, após o que se completa o resfriamento até a temperatura ambiente. As TRC são empregadas quando o resfriamento desde a temperatura de tratamento até a ambiente ocorre de modo contínuo, situação mais comum observada na prática Chiaverini (1982).

3. MODELO MATEMÁTICO

O resfriamento de uma peça submetida a um tratamento térmico envolve três processos distintos: térmico, transformações de fases resultantes e mecânico, Oliveira *et al.* (2004); Pacheco *et al.* (2007). O modelo matemático adotado neste estudo considera unicamente o primeiro processo, mais precisamente a etapa de resfriamento das peças tratadas. As hipóteses simplificativas assumidas são descritas a seguir:

- Todas as propriedades termofísicas, como condutividade térmica, calor específico e densidade, foram consideradas independentes da temperatura.
- Foram consideradas apenas perdas de calor por convecção natural, desprezando-se os efeitos da radiação. Admitiu-se que a peça resfria exposta ao ar quiescente (tratamento térmico de normalização).
- A transformação de fase austenita para ferrita e cementita é exotérmica Oliveira *et al.* (2004). Entretanto, não foi considerada a liberação de calor latente durante o resfriamento.
- O coeficiente de convecção (h) é admitido constante durante todo o resfriamento, adotando-se um valor médio determinado a partir de correlações para convecção natural encontradas na literatura.

3.1 Equação de Condução de Calor

O modelo matemático consiste fundamentalmente da difusão 3-D de calor, em regime transiente, sem geração de energia. Em coordenadas cartesianas (x, y, z) tem-se Incropera e DeWitt (2004),

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde T é a temperatura, t é o tempo, k , a condutividade térmica do material, ρ é sua densidade e c_p é o calor específico.

Como condição inicial, admite-se que a peça está a uma temperatura uniforme apropriada, correspondente àquela necessária para se garantir que sua estrutura interna seja totalmente austenítica. Esta temperatura depende da composição química do aço analisado. Como condição de contorno adotaram-se convecção e superfície isolada (base de apoio da peça).

4. METODOLOGIA NUMÉRICA

Os problemas de interesse prático em engenharia, normalmente, apresentam modelos matemáticos complexos, para os quais não se dispõem de soluções analíticas. Tais modelos podem ser solucionados através de técnicas numéricas.

Qualquer método numérico encontra a solução do modelo matemático transformando as equações diferenciais em expressões algébricas, gerando assim um sistema de equações lineares que envolve a incógnita de interesse, como por exemplo um campo de temperatura ou de velocidade. Ao contrário da solução analítica, que é contínua no tempo e no espaço, a solução numérica se aplica apenas a um conjunto discreto de pontos e de instantes de tempo.

As coordenadas dessas posições são obtidas pela divisão do domínio de cálculo em elementos ou volumes através de uma estrutura chamada malha. A solução é calculada para os centros ou vértices destes volumes. Quanto mais pontos forem utilizados, mais precisa será a solução e maior também será o esforço computacional, em termos de processamento e de memória, necessário para obtê-la.

O que diferencia cada método numérico é o processo de obtenção das equações algébricas a partir das equações diferenciais do modelo matemático. No Método dos Volumes Finitos as expressões algébricas são obtidas através da realização de balanço de propriedades (como energia, quantidade de movimento e massa) em um volume de controle apropriado. Outra possibilidade é integrar as equações conservativas do modelo sobre um volume de controle, procedimento adotado neste estudo.

Apresenta-se a seguir a dedução dos coeficientes referentes ao problema de condução bidimensional transiente.

4.1 Obtenção dos Coeficientes para o Problema Bidimensional

O problema de condução bidimensional de calor em regime transiente é governado pela equação,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

em que ρ é a densidade, c_p o calor específico e k a condutividade térmica do material.

Considere-se o volume de controle cujo centro é o ponto P mostrado na figura 1.

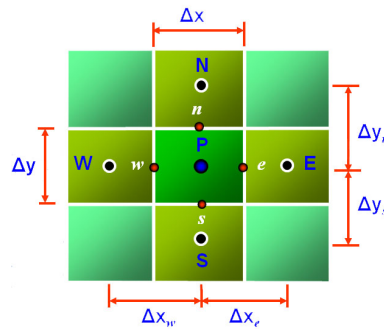


Figura 1. Volume de controle para o problema bidimensional.

Integrando-se a equação 2 no volume de controle centrado em P e no tempo entre os instantes t e $t + \Delta t$, e admitindo-se o integrando como a média representativa dentro do volume, obtém-se Maliska (2004),

$$\rho \Delta x \Delta y T_P^{t+\Delta t} - \rho \Delta x \Delta y T_P^t = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k \Delta y}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{k \Delta y}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right] + \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k \Delta x}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \frac{k \Delta x}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s \right]$$

Para se avaliar as integrais do lado direito da equação 3, adotou-se a formulação totalmente implícita Maliska (2004): o valor do integrando no instante $t + \Delta t$ é considerado representativo de todo o intervalo $[t; t + \Delta t]$. Empregando-se ainda a convenção de não usar sobrescrito para nível de tempo $t + \Delta t$ e usar sobrescrito 'o' para o nível anterior, obtém-se,

$$\rho \Delta x \Delta y T_P^{t+\Delta t} - \rho \Delta x \Delta y T_P^t = \frac{k \Delta t \Delta y}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{k \Delta t \Delta y}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w + \frac{k \Delta t \Delta x}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n - \frac{k \Delta t \Delta x}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s$$

Empregando-se diferenças centrais Maliska (2004), as derivadas da temperatura em relação a x e y nas faces n , s , w , e da equação anterior, são escritas como (ver figura 1),

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_n = \frac{T_N - T_P}{\Delta y_n} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s = \frac{T_P - T_S}{\Delta y_s} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e = \frac{T_E - T_P}{\Delta x_e} \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w = \frac{T_P - T_W}{\Delta x_w} \quad (6)$$

Substituindo as equações 3 a 6 na equação 3 obtém-se:

$$\frac{M_P T_P - M_P T_P^o}{\Delta t} = \frac{k \Delta y}{c_p} \frac{T_E}{\Delta x_e} + \frac{k \Delta y}{c_p} \frac{T_W}{\Delta x_w} + \frac{k \Delta x}{c_p} \frac{T_N}{\Delta y_n} + \frac{k \Delta x}{c_p} \frac{T_S}{\Delta y_s} - \left[\frac{k \Delta y}{c_p \Delta x_e} + \frac{k \Delta y}{c_p \Delta x_w} + \frac{k \Delta x}{c_p \Delta y_n} + \frac{k \Delta x}{c_p \Delta y_s} \right] T_P \quad (7)$$

em que,

$$M_P = \rho \Delta x \Delta y \quad (8)$$

Finalmente, a equação 7 pode ser reescrita como,

$$A_p T_P = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + B_P \quad (9)$$

onde,

$$A_e = \frac{k \Delta y}{c_p \Delta x_e} \quad (10)$$

$$A_w = \frac{k \Delta y}{c_p \Delta x_w} \quad (11)$$

$$A_n = \frac{k \Delta x}{c_p \Delta y_n} \quad (12)$$

$$A_s = \frac{k \Delta x}{c_p \Delta y_s} \quad (13)$$

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + \frac{M_P}{\Delta t} \quad (14)$$

$$B_p = M_P T_P^o \quad (15)$$

em que B_P é o termo independente.

Os coeficientes para o caso tridimensional são obtidos de maneira análoga, realizando-se uma integração adicional ao longo do eixo z. Na figura 2 é apresentado o volume de controle empregado.

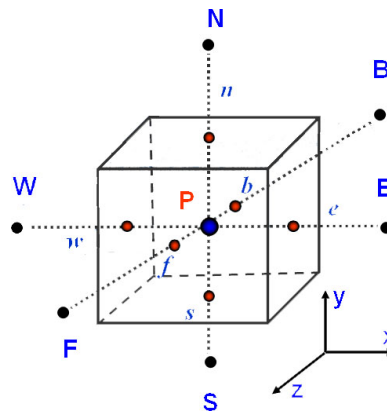


Figura 2. Volume de controle para o caso tridimensional.

A equação discretizada para o volume de controle centrado em P do caso 3D assume a forma,

$$A_p T_P = A_e T_E + A_w T_W + A_n T_N + A_s T_S + A_f T_F + A_b T_B + B_P \quad (16)$$

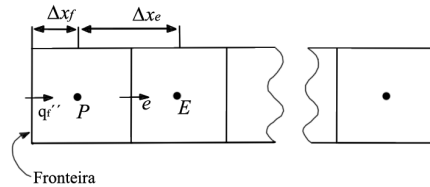


Figura 3. Fluxo de calor na fronteira Maliska (2004).

4.2 Condições de Contorno

As equações 9 e 16 se aplicam aos volumes de controle internos. Os volumes de controle que se localizam ao longo das fronteiras do domínio de cálculo têm suas equações obtidas através de um balanço de energia, no qual se inclui o termo q_f'' que representa o fluxo de calor na fronteira. Considere-se por exemplo, um problema unidimensional e o volume de controle centrado em P mostrado na figura 3.

A equação para este volume é a seguinte,

$$\frac{M_P T_P - M_P^o T_P^o}{\Delta t} = \frac{q_f''}{c_p} - \frac{k}{c_p \Delta x} \Big|_e (T_P - T_E) \quad (17)$$

O valor do termo q_f'' é determinado pelas condições de contorno, as quais podem ser,

- **Temperatura prescrita:** a temperatura na fronteira (T_f) é conhecida e o fluxo de calor é dado por

$$q_f'' = k_f \frac{T_f - T_P}{\Delta x_f} \quad (18)$$

- **Fluxo prescrito:** o valor de q_f'' é conhecido, e substituído diretamente na equação;
- **Convecção:** nessa situação o calor que chega por convecção é igualado ao calor por condução para dentro do volume Maliska (2004), logo:

$$q_f'' = h(T_\infty - T_f) = k_f \frac{T_f - T_P}{\Delta x_f} \quad (19)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Isolando e substituindo T_f temos,

$$q_f'' = \frac{h}{1 + \frac{h \Delta x_f}{k_f}} (T_\infty - T_P) \quad (20)$$

5. RESULTADOS

Neste capítulo é descrito o código computacional desenvolvido. Em seguida apresentam-se os resultados de dois problemas de soluções analíticas conhecidas, um bidimensional e outro tridimensional, utilizadas para a validação do programa. Finalmente, a simulação de um tratamento térmico de normalização é apresentada e comparada com a análise metalográfica de um corpo de prova de aço ABNT 1020 submetido a este tratamento. Para todos os resultados foram realizados estudos de refino de malha e de intervalo de tempo.

5.1 Código Computacional

O programa desenvolvido para implementação da solução numérica do problema proposto foi escrito em C++. Aproveitando-se de recursos da orientação a objetos, o programa foi estruturado de modo a facilitar a codificação e a inclusão de futuros aperfeiçoamentos do modelo.

5.2 Validação do Código Numérico

Um problema de condução de calor bidimensional e outro tridimensional, cujas soluções analíticas são conhecidas, foram utilizados para validar o código desenvolvido.

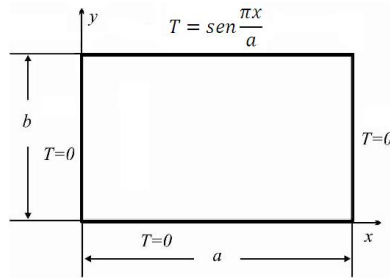


Figura 4. Condução bidimensional e condições de contorno

5.2.1 Problema Bidimensional

O problema escolhido corresponde à condução de calor em regime permanente em uma placa com as condições de contorno mostrada na figura 4.

A equação diferencial que governa esse problema é a seguinte,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \tag{21}$$

Sua solução analítica é dada por,

$$T(x, y) = \frac{\sinh\left(\frac{\pi y}{a}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi b}{a}\right)} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \tag{22}$$

onde *a* é a largura e *b* é o comprimento da placa.

Para a simulação, uma malha com 20 x 20 volumes foi utilizada, e os resultados são apresentados a seguir. O campo de temperatura da placa, numérica e analítico, é mostrado na figura 5. Observa-se uma excelente concordância entre os resultados.

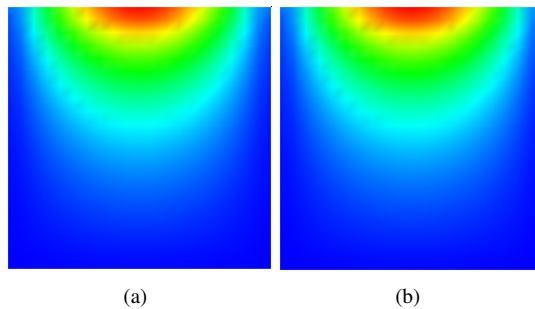


Figura 5. Campo de temperatura da placa em regime permanente: a) solução analítica b) solução numérica (malha de 20 x 20 volumes).

A distribuição de temperatura ao longo do eixo $y = 0,9b$, referente às soluções numérica e analítica, é apresentada na figura 6. Uma vez mais, obteve-se excelente concordância entre os resultados.

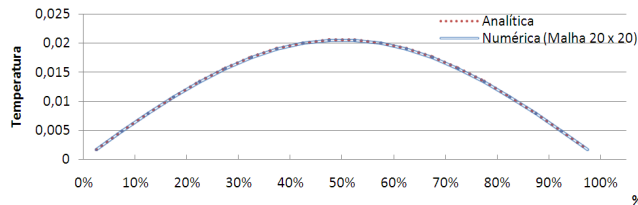


Figura 6. Distribuição de temperatura ao longo do eixo, em $y = 0,9b$

5.2.2 Problema Tridimensional

Foi escolhido para comparação o problema de condução de calor tridimensional e transiente em um paralelepípedo retangular sujeito a condições de contorno de convecção em todas as faces (mesmo coeficiente de convecção, *h*), conforme é mostrado na figura seguinte.

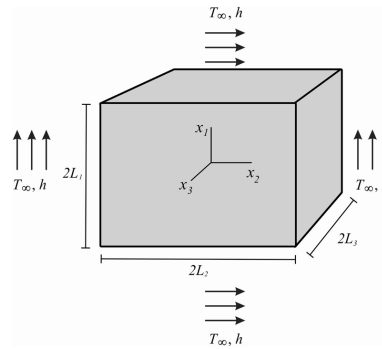


Figura 7. Geometria e condições de contorno do problema 3D para validação do código numérico

A solução analítica deste problema é dada pela equação Incropera e DeWitt (2004),

$$\frac{T(x_1, x_2, x_3) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = P(x_1, t) \cdot P(x_2, t) \cdot P(x_3, t) \quad (23)$$

onde,

$$P(x_i, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) \cos(\zeta_n x^*) \quad (24)$$

Na equação acima, tem-se,

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (25)$$

$$x^* = \frac{x_i}{L_i} \quad (26)$$

$$c_n = \frac{4 \text{sen} \zeta_n}{2 \zeta_n + \text{sen}(2 \zeta_n)} \quad (27)$$

$$\zeta_n \text{tg} \zeta_n = Bi \quad (28)$$

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (29)$$

As equações 25 e 29 definem, respectivamente, o número de Fourier e o número de Biot. Os dados do problema foram os seguintes:

- **Dimensões do paralelepípedo:** $L_1 = L_2 = L_3 = 0,1 \text{ m}$;
- **Condutividade térmica:** $k = 60,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$;
- **Calor específico:** $c_p = 434 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;
- **Massa específica:** $\rho = 7854 \text{ kg/m}^3$;
- **Temperatura inicial:** $T_0 = 800 \text{ K}$;
- **Coefficiente de transferência de calor por convecção:** $h = 50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- **Temperatura do fluido (ar):** $T_\infty = 300 \text{ K}$.

O campo de temperatura numérico referente a um plano central do paralelepípedo, para o instante $t = 300 \text{ s}$, é apresentado na figura 8. Observa-se que a solução obtida foi totalmente simétrica. O erro máximo em relação à solução analítica foi de aproximadamente 4%. Deve-se ressaltar que a solução analítica foi calculada utilizando-se apenas os quatro primeiros termos da série infinita que a define (equação 24).

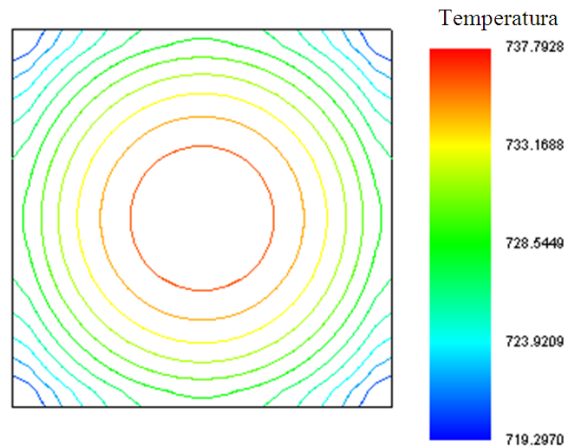


Figura 8. Campo de temperatura em plano central do paralelepípedo em $t = 300$ s (solução numérica, malha de $25 \times 25 \times 25$ volumes).

5.3 Simulação de Tratamento Térmico de Normalização

Apresentam-se finalmente os resultados referentes à simulação de tratamento térmico de normalização. Para validação e comparação, um bloco de aço carbono ABNT 1030 com dimensões $50 \times 48 \times 48$ mm foi submetido a este tratamento e a posterior análise metalográfica.

O bloco foi aquecido inicialmente até 910°C e mantido a esta temperatura durante uma hora em um forno Nabertherm L3/S, com o objetivo de se obter uma estrutura totalmente austenítica Soares (1980).

Em seguida o corpo de prova foi removido do forno e depositado sobre uma placa de material refratário, resfriando lentamente em contato com o ar quiescente a aproximadamente 25°C .

Os valores das propriedades do aço adotados para a simulação estão discriminados na tabela 5.1.

Tabela 1. Valores das propriedades do aço ABNT 1030 utilizadas na simulação do tratamento de normalização

Propriedades	Valor
Condutividade Térmica	$60,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Calor específico	$434 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
Densidade	7854 kg/m^3

Na simulação, foram consideradas apenas perdas de calor por convecção, admitindo-se h constante, avaliadas para temperatura de 460°C (média entre a temperatura inicial e final do bloco). A face em contato com o material refratário foi considerada isolada.

Foi realizado um estudo de refino de malha e do incremento de tempo (Δt) empregado pelo código. Uma malha de $25 \times 25 \times 12$ (7500) volumes e $\Delta t = 100$ s se mostraram suficientes para garantir uma solução independente da malha e do intervalo de tempo. Na figura 9 é ilustrado o campo de temperatura em um plano central perpendicular à face isolada.

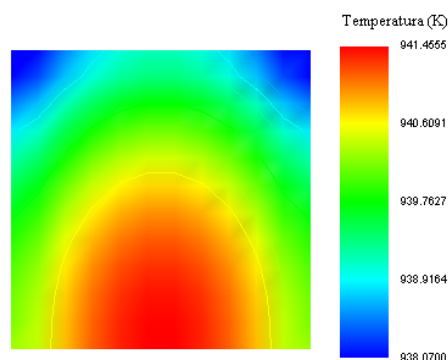


Figura 9. Campo de temperatura do plano central do corpo de prova em $t = 3000$ s.

Na figura 10 é apresentada a curva de resfriamento do centro do bloco e as curvas TRC do aço ABNT 1030. De

acordo com este resultado, forma-se ferrita e perlita nessa região da peça.

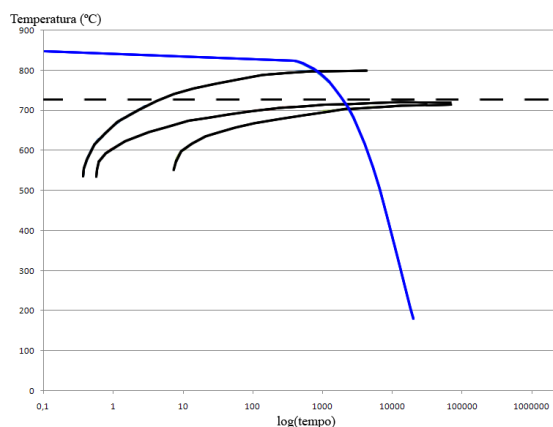


Figura 10. Curva de resfriamento do centro do bloco de aço e curvas TRC do aço 1030.

A metalografia do plano em questão confirmou o resultado da simulação, conforme demonstrado na figura 11. A curva azul representa a temperatura do centro da peça ao longo do tempo. Percebe-se que a curva azul é posta sobre um gráfico TRC do referido material. Através de análise trivial, Callister (2002), é possível estimar a formação das microestruturas ferrita e perlita. Assim, apesar do modelo adotado ser bastante simplificado, o programa desenvolvido conseguiu prever de forma bastante satisfatória o resultado do tratamento.

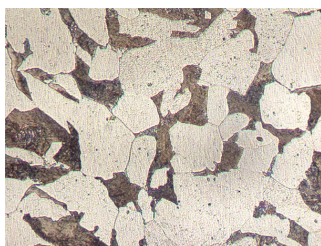


Figura 11. Micrografia do centro do bloco de aço 1030 normalizado. Microestrutura ferrita e perlita (aumento 500x).

A curva de resfriamento calculada do centro do bloco corresponde a um tratamento térmico de recozimento pleno. É importante ressaltar entretanto que a velocidade de resfriamento obtida pela simulação foi mais lenta do que a real, em virtude de ter sido desprezada a perda de calor por radiação. Além disso, como condição de contorno, empregou-se um valor médio do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), estimado a $460^{\circ}C$, durante todo o processo. Os valores de h , na verdade, são muito mais elevados no início do resfriamento, decrescendo à medida que a temperatura da peça diminui.

6. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um programa em C++ orientado a objeto capaz de resolver a equação da condução de calor tridimensional, em regime transiente, para geometrias cartesianas simples (prismas retangulares). Foi possível simular a etapa de resfriamento do tratamento de normalização de um aço para construção mecânica ABNT 1030. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e o programa conseguiu prever adequadamente a microestrutura formada no centro de um pequeno bloco deste material. Para tanto, utilizaram-se as curvas TRC deste aço e a curva de resfriamento calculada.

Os resultados dessa simulação foram confirmados através de metalografia, a qual demonstrou a formação de ferrita e perlita no interior da peça tratada. Como contribuições para trabalhos futuros, sugere-se o aprimoramento do modelo físico, com a inclusão de perdas de calor por radiação e avaliação do coeficiente instantâneo de transferência de calor por convecção (h) em cada ponto da superfície da peça. Outra importante extensão seria a habilidade de tratar geometrias complexas mediante o uso de coordenadas generalizadas.

7. REFERÊNCIAS

- ASM, 1991. "Metals handbook". Vol. 4, p. 2173.
 Callister, W.D., 2002. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*. LTC, Rio de Janeiro.
 Chiaverini, V., 1982. *Aços e Ferros Fundidos*. Associação Brasileira de Metais,, São Paulo.

- de Souza Araújo, A.L., 2004. *Solução de Escoamentos de Fronteira Livre Usando Malhas Não-Estruturadas e Método dos Volumes Finitos Baseado em Elementos Finitos*. tese, UFPB.
- Eckel, B., 2000. "Thinking in c++". p. 535.
- Incropera, F.P. e DeWitt, D.P., 2004. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. LTC, Rio de Janeiro.
- Kang, J., Rong, Y. e Wang, W., 2004. "Numerical simulation of heat transfer in loaded heat treatment furnaces." pp. 545–553.
- Maliska, C.R., 2004. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. LTC, Rio de Janeiro, 2nd edition.
- Oliveira, W.P., Souza, L.F.G., Pacheco, P.M.C.L. e Savi, M.A., 2004. "Análise experimental e numérica do processo de têmpera em cilindros de aço: Avaliação de um modelo constitutivo multi-fases". *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*.
- Pacheco, P.M.C.L., Savi, M.A. e Oliveira, W.P., 2007. "Modelling of quenching process in steel cylinders". *Mechanics of Solids*.
- Silva, A.L.C. e Mei, P.R., 2006. *Aços e Ligas Especiais*. Edgard Blucher, São Paulo.
- Soares, P., 1980. *Aços: Características e Tratamentos*. Livroluz, Porto, 3rd edition.
- Stroustrup, B., 2000. "A linguagem de programação c++".

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.