

# ANÁLISE NUMÉRICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE VERGALHÕES DE CONSTRUÇÃO<sup>1</sup>

*Fábio Eduardo Baggio<sup>2</sup>  
Luís Mauro Moura<sup>3</sup>  
Ricardo Diego Torres<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Apresenta-se um modelo numérico para a obtenção das curvas de resfriamento do vergalhão durante o processo de tratamento térmico para análise do processo de fabricação de vergalhões de construção civil. A obtenção das curvas de resfriamento em conjunto com os diagramas do tipo Tempo-Temperatura-Transformação (TTT), permitirão estabelecer correlações com a microestrutura final do vergalhão.

**Palavras-chave:** Tratamento térmico; Thermex; Tempcore; Laminação de barras.

## NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TREATMENT PROCESS OF CONSTRUCTION STEEL BARS

## **Abstract**

The purpose of this work is to present a numerical model used to obtain the cooling rate of the steel bars. Using the cooling rates and the Time Temperature Transformation (TTT) diagrams concomitantly the microstructure formation and their influence on the final mechanical properties of the steel bars can be determined.

**Key words:** Steel thermal treatment; Thermex; Tempcore; Steel bars.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Eng. Mecânico e aluno de mestrado do programa de pós-graduação em Eng. Mecânica da PUCPR.*

<sup>3</sup> *Doutor e Professor do programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da PUCPR*

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas de resfriamento controlado em processos de laminação tem como objetivo a redução no custo de produção de barras de aço para construção civil. Atualmente, a maioria das usinas siderúrgicas utiliza esta tecnologia em seu processo produtivo.

Até a década de 1970 havia uma forte tendência que perdurou por muitos anos no mercado europeu voltada à qualidade e desempenho no processo de fabricação de aço destinado à construção civil. As principais características solicitadas eram referentes aos patamares de tensão de escoamento, soldabilidade e ductilidade superior as dos materiais disponíveis no mercado da época. Simon, Economopoulos e Nilles,<sup>(1)</sup> verificaram que com o aumento da resistência dos vergalhões observa-se a conseqüente redução da quantidade aplicada de aço destinado às construções reduzindo o custo final das estruturas.

Os sistemas de resfriamento controlados de vergalhões consistem no tratamento térmico da barra de aço após o último passe no conjunto de laminação. A barra (Figura 1), passa através de um sistema de resfriamento em água, ocorrendo um tratamento térmico superficial, sendo submetido a um resfriamento brusco sobretudo em sua superfície, sofrendo transformação de austenita para martensita, enquanto o seu centro permanece austenítico. Após passar pelo jato de água a temperatura do núcleo ainda alta e a temperatura superficial é equalizada resfriando até a temperatura ambiente – revenimento. As transformações metalúrgicas associadas ao fenômeno de transferência de calor resultam em propriedades mecânicas que por sua vez podem variar em função dos parâmetros de processo utilizados. Estes englobam diversos fatores, desde a especificação do tipo de aço a ser utilizado, velocidade de laminação, parâmetros geométricos, temperatura de chegada da barra no leito de resfriamento, entre outros.

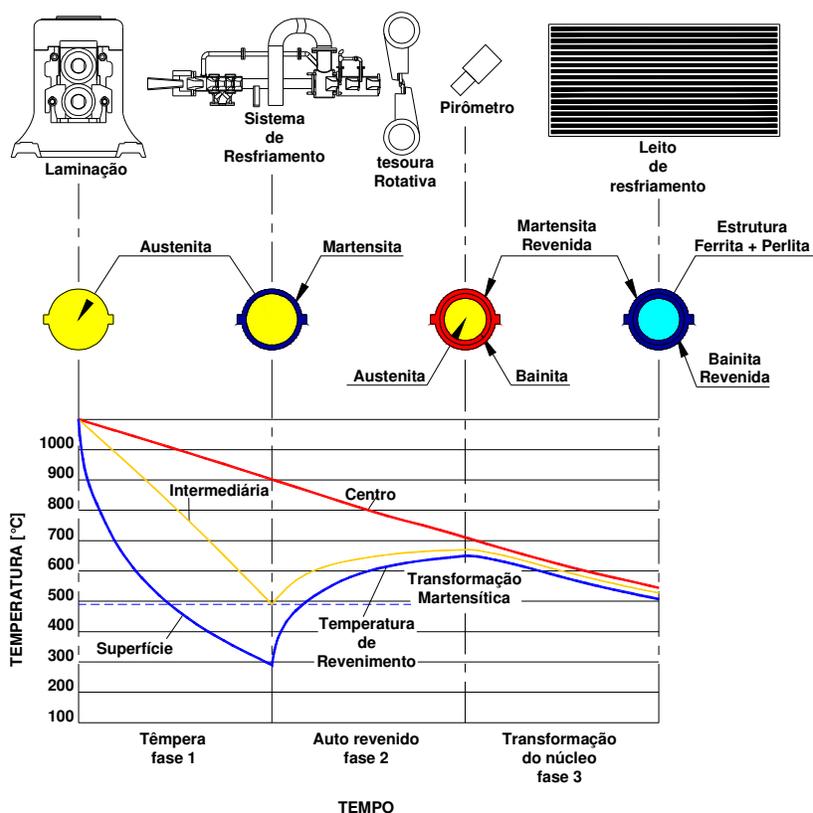
Através dos diagramas de Transformação Isotérmica ou curva Temperatura Tempo Transformação (TTT), uma vez determinada as curvas de resfriamento do material, pode-se identificar as transformações metalúrgicas que os aços sofrem ao serem resfriados a partir de uma temperatura inicial ao qual o material está completamente austenitizado. Para resfriamentos lentos, a exemplo de normalização, aonde as barras chegam ao leito diretamente após o último passe de laminação, observa-se a formação de uma estrutura ferrita + perlita no material, ao longo de toda a seção da barra.

Conforme representado na Figura 1, durante a fase 1 verifica-se um tratamento térmico de têmpera na camada superficial da barra, cujo constituinte resultante é a martensita, enquanto que o núcleo, apesar do seu resfriamento, ainda se mantém com a estrutura austenítica.

Ao terminar essa fase, paralisa-se a formação de martensita da superfície e inicia-se a fase 2, quando a camada temperada passa a ser reaquecida através da transferência de calor entre núcleo e superfície, que ainda apresenta temperaturas relativamente elevadas. Desta forma, a camada temperada da barra começa a sofrer um tratamento de auto-revenido, que irá transformar toda a martensita formada, em um constituinte conhecido como martensita revenida ou perlita fina. Esse novo constituinte da camada superficial não apresenta a fragilidade da martensita, porém atinge altos limites de alongamento e de resistência.

A quantidade de martensita transformada cresce do centro para a extremidade da barra. Simon, Economopoulos e Nilles,<sup>(1)</sup> e Economopoulos et al.,<sup>(2)</sup> em seus trabalhos afirmam que quando a barra deixa o sistema de resfriamento,

surge um gradiente de temperaturas ao longo da sua seção transversal, e o calor proveniente do centro aquece a camada temperada superficialmente, ocorrendo o denominado auto-revenimento. Por último, no leito de resfriamento, a região central da barra, até então no estado austenítico, conduz calor à superfície, fazendo com que a temperatura na região central reduza gradativamente até a temperatura ambiente.



**Figura 1.** Curvas de variação de temperatura da barra para diferentes posições de raio durante processo de tratamento térmico superficial.<sup>(3)</sup>

Rodrigues *et al.*,<sup>(4)</sup> verificaram a existência da interdependência entre estes parâmetros, sendo que a temperatura de revenimento é a variável de controle de processo, uma vez que esta tem uma influência direta nas propriedades mecânicas do aço. Os mesmos apresentam dados referentes ao aumento da resistência mecânica com o decréscimo da temperatura de revenimento, ou aumento da taxa de vazão de água durante o resfriamento das barras de aço, cujas composições químicas podem assumir diferentes padrões. Ainda observou-se a flexibilidade do processo na fabricação das barras com diâmetros variando entre 16 e 28 mm. Economopoulos *et al.*,<sup>(2)</sup> verificaram que há uma queda na ductilidade da martensita revenida, à medida que a temperatura de revenimento decresce, porém, sem comprometer o material por trincamento superficial.

A fase 3 (Figura 1), tem início quando a temperatura da superfície praticamente se iguala à do núcleo até que a temperatura da barra atinja cerca de 100°C ou menos, quando se completa o resfriamento do vergalhão. Nesta fase, já com a barra tendo sido dividida pela tesoura instalada após o sistema de tratamento e descarregada no leito, completa-se o revenido da camada superficial temperada e

o núcleo da barra acaba de se transformar, passando a ser constituído por uma estrutura de perlita + ferrita, de granulação fina.

Alves Filho<sup>(3)</sup> estudou e obteve dados experimentais a respeito da microestrutura final de um vergalhão de construção após passar pelo equipamento denominado thermex, onde acontece o tratamento térmico do vergalhão. Ele realizou uma análise experimental de amostras de vergalhões de diferentes bitolas sob diferentes condições de operação, de modo a identificar como se comportam em meio à variação de parâmetros do processo, tais como: temperatura da barra, velocidade de laminação, pressão de água, e demais parâmetros relevantes. Na Figura 2 observa-se resultados típicos obtidos por este autor. O aspecto macrográfico da seção de um vergalhão representado na Figura 2 mostra nitidamente a camada junto à superfície (mais escura), cujo constituinte é a martensita revenida ou perlita fina e o núcleo (mais claro), constituído por perlita + ferrita.



**Figura 2.** Corte em seção transversal de vergalhão com tratamento térmico superficial. Visualização das regiões afetadas através da transferência de calor.<sup>(3)</sup>

Em continuidade ao trabalho apresentado por Alves Filho<sup>(3)</sup> apresenta-se neste trabalho um modelo de simulação numérica elaborado para a obtenção das curvas de resfriamento do vergalhão durante o processo de tratamento térmico. A obtenção destas curvas em conjunto com os diagramas do tipo tempo-temperatura-transformação (TTT) permitirá estimar qual a microestrutura do vergalhão. Este modelo numérico foi elaborado pelo método de volumes finitos, utilizando a linguagem FORTRAN. Apresentam-se os resultados de resfriamentos obtidos em função de parâmetros dimensionais e das taxas de resfriamento.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de simular a transferência de calor no processo foi estabelecido um modelo matemático para o problema a fim de se obter uma formulação passível de solução pelo método de volumes finitos.

A equação da difusão de calor considerando um termo advectivo correspondente ao deslocamento da barra de aço através do volume de controle, Fig. 3 é expressa como,

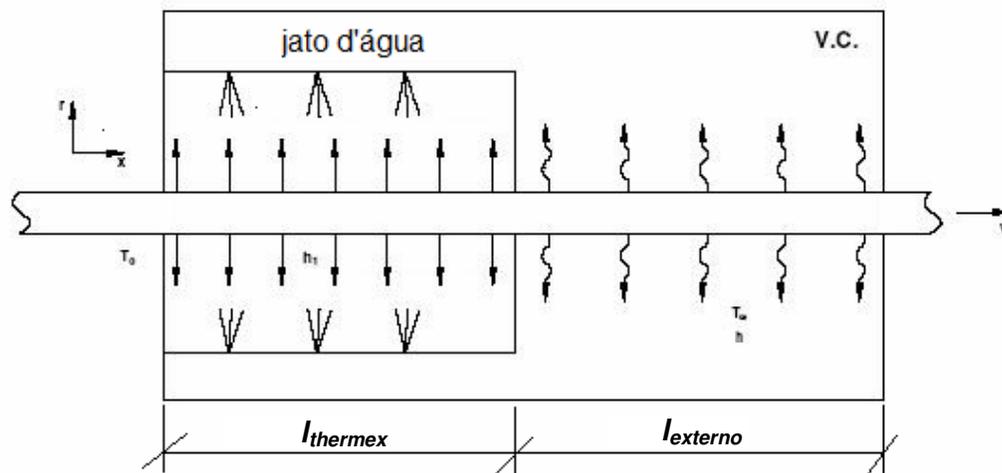
$$\nabla^2 T = V\rho c_p \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Ou para coordenadas cilíndricas,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho V c_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica do aço,  $\rho$  a massa específica e  $c_p$  o calor específico do aço.

A Figura 3 apresenta a geometria cilíndrica considerada para a formulação. A parte referente ao Thermex, onde a barra está envolta no jato da água é referente a dimensão  $l_{thermex}$ , e este efeito convectivo por mudança de fase é considerado através do coeficiente de convecção,  $h_1$ . Após sair do Thermex a barra permanece ainda por uma distância,  $l_{externo}$ , trocando calor com o ar com um coeficiente de convecção,  $h$ . A barra entra no Thermex a uma temperatura,  $T_0$ , e velocidade constante,  $V$ .



**Figura 3.** Volume de controle para simulação numérica.

Admitindo a condição de simetria da barra adota-se para a posição onde  $r=0$  a seguinte condição de contorno:

$$(I) \text{ em } r = 0 \rightarrow q = -k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=0} = 0 \quad (3)$$

Para as condições de contorno da superfície da barra considera-se a troca de calor por convecção na superfície, onde existem dois coeficientes de convecção,

uma para as condições dentro do thermex, e outra para as condições fora do thermex como demonstrados nas equações a seguir:

$$(II) \text{ em } r = R \rightarrow \begin{cases} q = -k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} = h_{thermex} (T_s - T_\infty), \rightarrow p / x \leq l_{thermex} \\ q = -k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} = h_{ar} (T_s - T_\infty) \rightarrow p / l_{thermex} < x < L \end{cases} \quad (4)$$

Na entrada da barra considera-se uma temperatura conhecida, utilizando a mesma temperatura de saída do forno de aquecimento do processo, sendo assim as condições de contorno na entrada da barra seguem a seguinte equação:

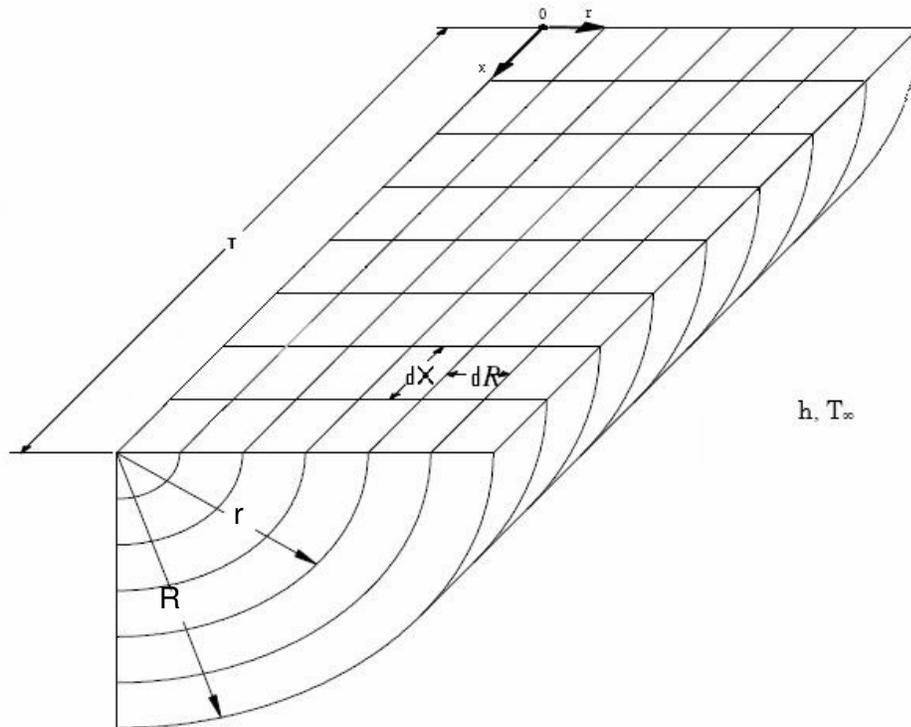
$$(III) \text{ em } x = 0 \rightarrow T_w = T_{conhecido} \quad (5)$$

Seguindo o mesmo raciocínio das condições de contorno da superfície, na ponta da barra considera-se a seguinte condição de contorno:

$$(IV) \text{ em } x = L \rightarrow q = -k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h_{ar} (T_e - T_\infty) \quad (6)$$

Para a formulação proposta, não foi levada em consideração a transferência de calor por radiação. Sob este aspecto, o coeficiente de convecção deve ser um termo que englobe este efeito.

A discretização pelo método de volume de controle foi aplicada à Eq. 2 para uma geometria cilíndrica representada na Figura 4.



**Figura 4.** Representação do modelo numérico. Volumes finitos.

Aplicando o método dos volumes finitos a Eq. 2 torna-se:

$$\frac{k_w}{\delta x_w \delta x_p} (T_w - T_p) + \frac{k_e}{\delta x_e \delta x_p} (T_e - T_p) + \frac{k_s r}{r \delta r_s \delta r_p} (T_s - T_p) + \frac{k_n}{r \delta r_n \delta r_p} (T_n - T_p) (r_p + \delta r_p) + V \rho c_p \frac{(T_w - T_p)}{\delta x_w} = 0 \quad (7)$$

Sendo  $r$  correspondente ao centro do volume e  $r$  a face do volume.

Para a resolução da matriz do modelo matemático, utilizou-se do método TDMA,<sup>(5)</sup> por ser um método simples de ser utilizado e que apresenta um resultado satisfatório para o problema.

### 3 RESULTADOS

Para poder gerar casos mais próximos do real pesquisou-se na literatura quais poderiam ser os valores utilizados para  $k$ ,  $c_p$ ,  $h$ ,  $V$  e  $\rho$ . Unterwiser, Boyer e Cubbs<sup>(6)</sup> apresentaram valores medidos do coeficiente de condutividade térmica,  $k$ . Foi proposta uma função para representar esta propriedade na faixa de temperatura de trabalho:

$$k = A + B1 \cdot Temp + B2 \cdot Temp^2 \quad (8)$$

Para temperatura igual ou abaixo de 800 °C, utiliza-se:

$$A = 51.78061$$

$$B1 = -0.01232$$

$$B2 = -2.43506 \cdot 10^{-5}$$

E para as demais temperaturas utilize-se:

$$A = 34.2$$

$$B1 = -0.02325$$

$$B2 = 1.625 \cdot 10^{-5}$$

Cujas funções são representadas graficamente na Figura 5.

Também o calor específico,  $c_p$ , é representado por uma função do tipo:

$$c_p = A + B1 \cdot Temp + B2 \cdot Temp^2 \quad (9)$$

Sendo para temperaturas menores que 675 °C, utiliza-se:

$$A = 483,9243$$

$$B1 = 0.04455$$

$$B2 = 7,23086 \cdot 10^{-4}$$

Para temperaturas maiores ou iguais a 675 °C e menores ou iguais a 775 °C, utiliza-se:

$$A = -111595,5$$

$$B1 = 310,76$$

$$B2 = -0,2136$$

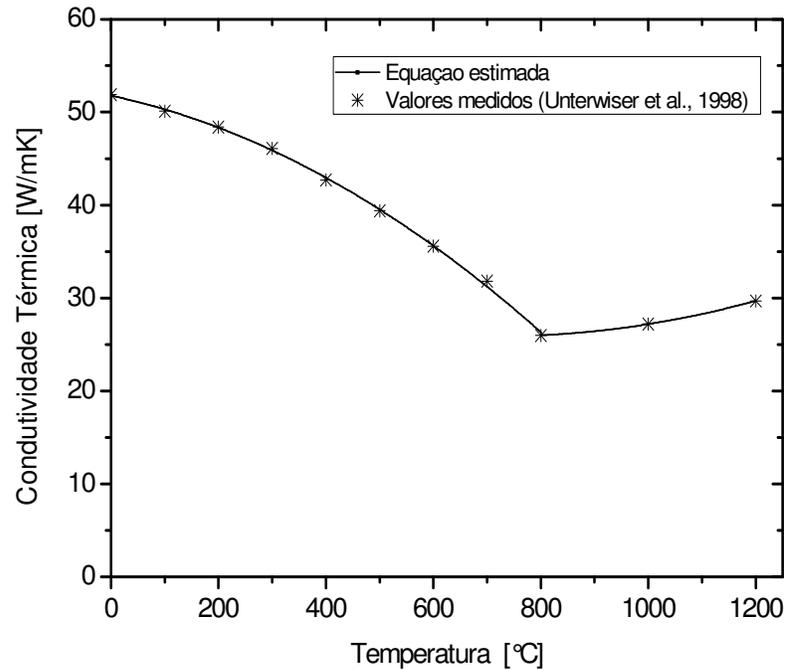
Para temperaturas maiores que 775 °C, utiliza-se:

$$A = 1756$$

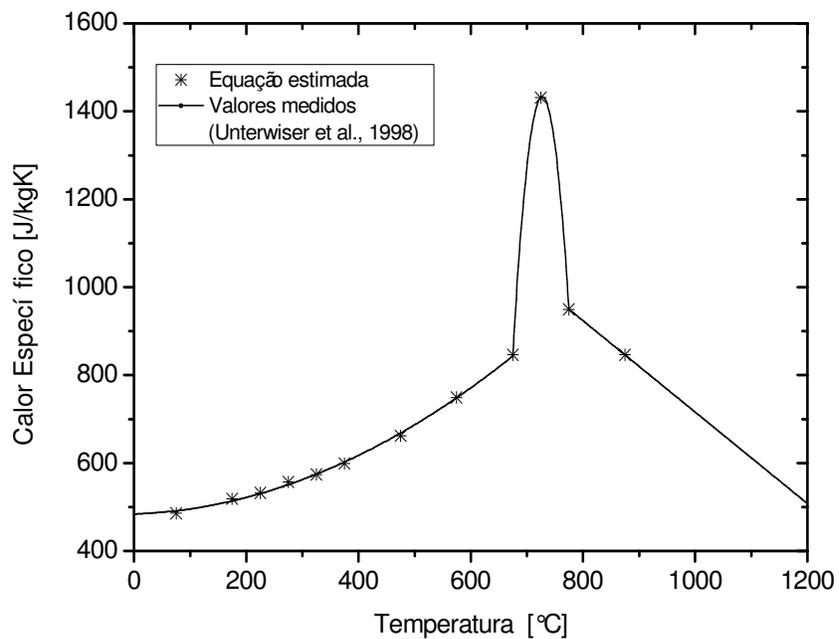
$$B1 = -1,04$$

$$B2 = 0$$

Sendo este comportamento representado na Figura 6.



**Figura 5.** Variação da condutividade térmica com a temperatura para aços de baixo carbono. (Unterwiser *et al.*, 1998).



**Figura 6.** Variação do calor específico com a temperatura para aços de baixo carbono.<sup>(6)</sup>

Os valores de  $h$  foram baseados em valores utilizados para *jet cooling* para as condições de contorno dentro do Thermex e *air-vapor cooling* para as condições de contorno fora do Thermex. Os valores de  $h$  para as condições de contorno dentro do Thermex foram definidos para valores que variam entre  $1 \cdot 10^4 W/m^2 K$  e  $5 \cdot 10^4 W/m^2 K$ , já para as condições de contorno fora do Thermex foi adotado  $10 W/m^2 K$ .

Foram simuladas condições de bitola de baseando-se nos experimentos realizados por Alves Filho,<sup>(2)</sup> que utilizou vergalhões com bitolas de  $10mm$  e  $12mm$ , sendo assim optou-se por realizar as simulações na bitola de  $10mm$ . O comprimento da barra foi definido em  $10m$ . O comprimento do Thermex foi definido em  $2m$ .

O valor de  $V$  utilizado para as simulações foi  $4m/s$ , e o valor utilizado para  $\rho$  foi de  $7779,49 kg/m^3$ .

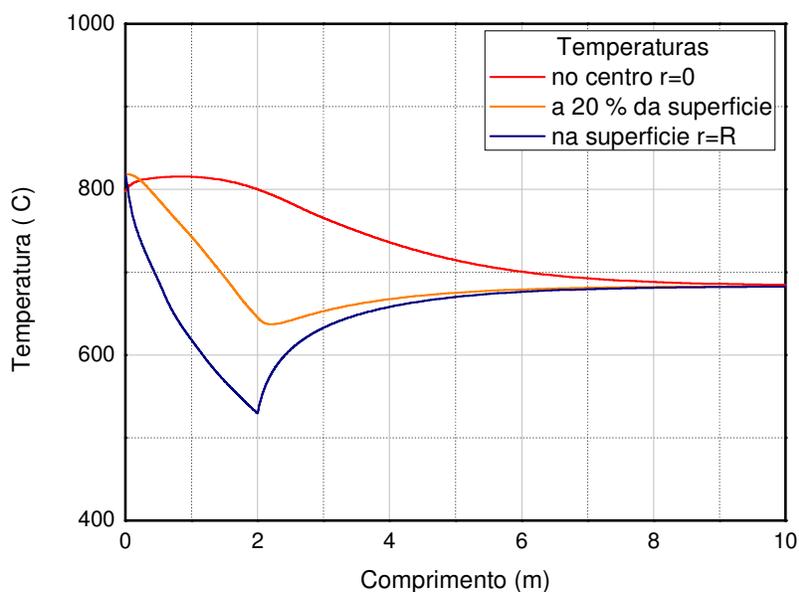
As temperaturas de entrada e saída foram definidas como  $1000^\circ C$  e  $30^\circ C$  respectivamente.

Apresentam-se na seqüência duas simulações variando apenas o coeficiente de convecção dentro do Thermex.

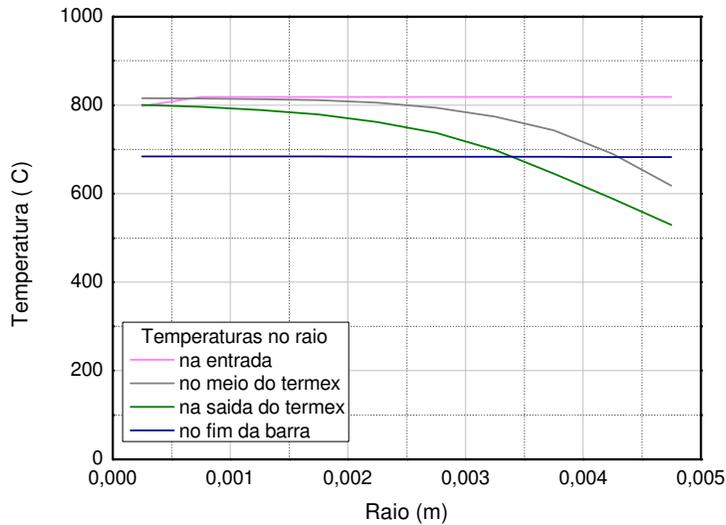
## Caso 1

Para o primeiro caso utilizou-se um coeficiente de convecção dentro do Thermex igual à  $1 \cdot 10^4 W/m^2 K$ , sendo assim pode-se observar que como a temperatura da superfície resfria pouco, a temperatura de equalização da barra no leito de resfriamento fica ligeiramente abaixo de  $700^\circ C$ .

Apresenta-se na Figura 7 a temperatura em função do comprimento da barra. Na Fig. 8 apresenta-se o perfil de temperatura em função do raio.



**Figura 7.** Curvas de temperatura em função do comprimento da barra, onde  $h = 1 \cdot 10^4 W/m^2 K$

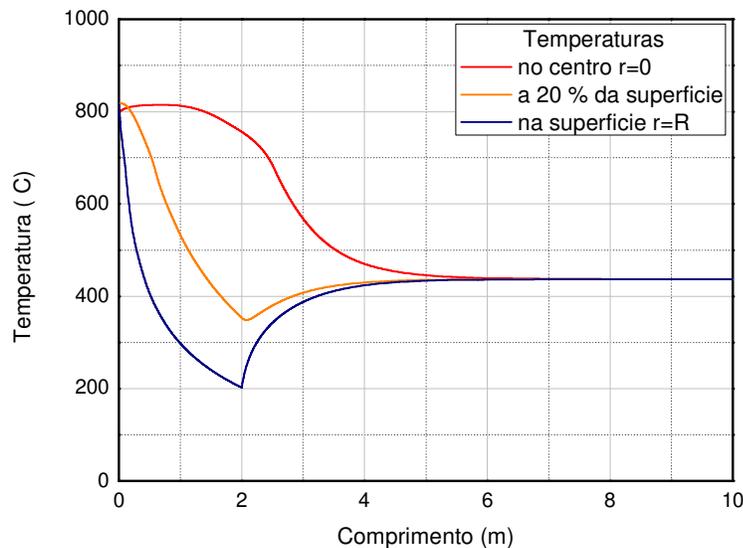


**Figura 8.** Curvas de temperatura em função do raio da barra, onde  $h = 1 \cdot 10^4 W / m^2 K$

## Caso 2

Para a segunda análise foi utilizado um coeficiente de convecção dentro do Thermex igual à  $5 \cdot 10^4 W / m^2 K$ . Este coeficiente fez com que as curvas de temperatura se aproximassem do comportamento de alguns experimentos realizados com relação à temperatura da superfície do vergalhão onde foram comparados dois processos parecidos, sendo um deles o Thermex e o outro o Tempcore em função do tempo, estes experimentos foram demonstrados por Tamm.<sup>(7)</sup>

Como no caso anterior foram realizadas também duas maneiras de representar as curvas de resfriamento cujos gráficos estão representados nas Figuras 9 e 10.



**Figura 9.** Curvas de temperatura em função do comprimento da barra, onde  $h = 5 \cdot 10^4 W / m^2 K$ .

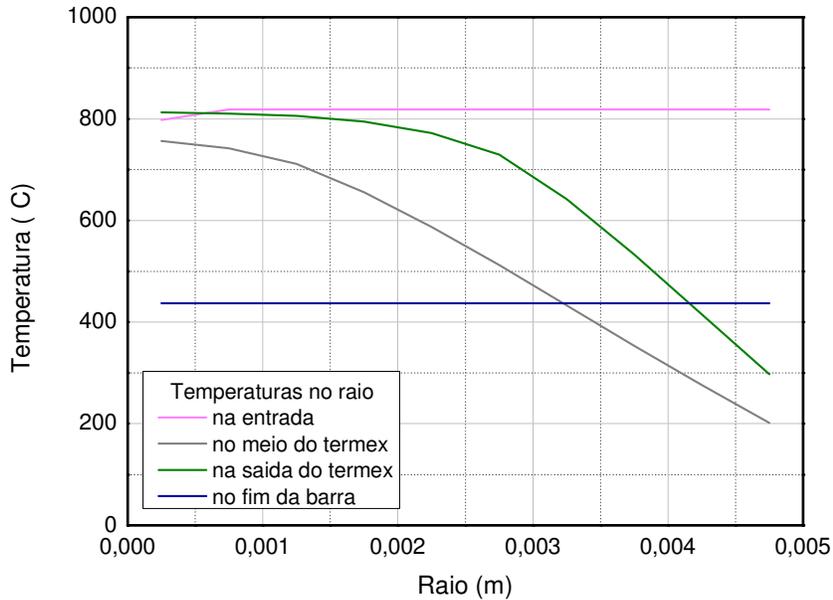


Figura 10. Curvas de temperatura em função do raio da barra,  $h = 5 \cdot 10^4 W / m^2 K$

#### 4 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho apresentam valores concordantes com os encontrados na literatura, sobretudo àqueles apresentados por Tamm,<sup>(7)</sup> conforme demonstra a Figura 11. Resultados para validação completa do modelo não são disponíveis na literatura.

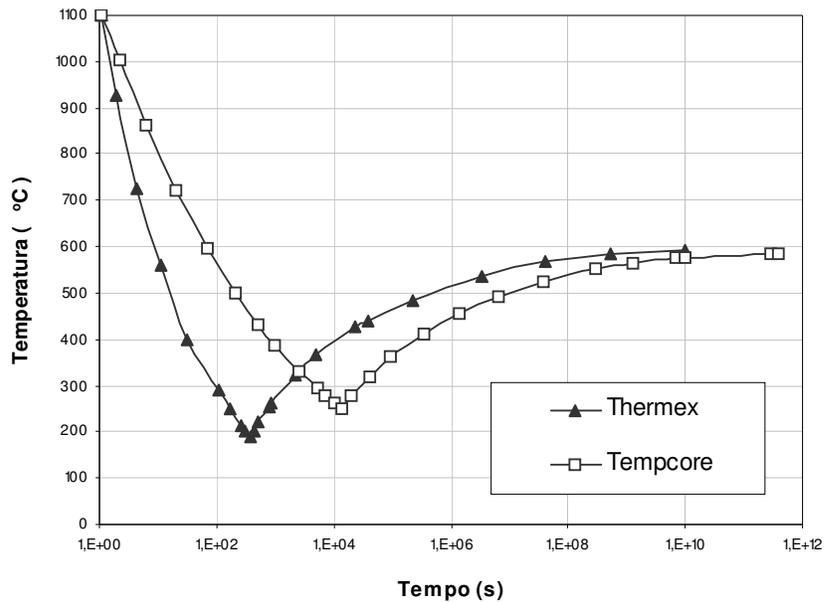


Figura 11. Comparativo entre os sistemas Thermex e Tempcore – temperaturas superficiais.<sup>(7)</sup>

Obeve-se também comportamento do processo de resfriamento como previsto por Alves Filho.<sup>(2)</sup>

## 5 CONCLUSÃO

Apresentaram-se neste trabalho um modelo para simulação do tratamento térmico de barras laminadas, encontradas sobretudo no processo de fabricação de vergalhões de construção civil. A possibilidade de analisar este processo numericamente permite estabelecer simulações de maneira a se analisar parâmetros de processo sem realizar medidas experimentais, muito dispendiosas para este caso. Em função deste problema ser fortemente advectivo e possuir uma relação de aspecto em relação a geometria muito diferente da unidade a solução é custosa do ponto de vista computacional necessitando muita memória em função do grande número de volumes necessários (próximo a 1.000.000 de volumes) tempo de processamento (próximo a uma semana para um computador Core 2 Duo) e de difícil convergência (em função do número de iterações realizadas). Pretende-se a partir deste modelo desenvolvido estabelecer correlações entre espessura de martessita no vergalhão com parâmetros de processo e dimensionais. A partir disto pode-se também estabelecer correlações para as propriedades mecânicas da barra.

## REFERÊNCIAS

- 1 SIMON, P., ECONOMOPOULOS, M. NILLES, P., Tempcore: A new Process for the production of High-Quality Reinforcing Bars, Iron and Steel Engineering, 1984, p. 53-57.
- 2 ECONOMOPOULOS, M.; RESPEN, Y.; LESSEL, G.; STEFFES, G., Application of TEMPCORE Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Reinforcing Bars, CRM, 1975, Vol. 45, p. 01-17.
- 3 ALVES FILHO, CLAUDIO HENRIQUE MACEDO. Análise da influência da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente. Curitiba, Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - Mestrado em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004. 128 p..
- 4 RODRIGUES, P.C., CELTIN, P.R., SILVA, A.P., AGUILAR, M.T.P., Perfil de Temperaturas em Barras de Aço para Construção Civil Fabricadas Pelo Processo Tempcore. Congresso Anual ABM, 1992, 47º, Vol.04, p. 505-521.
- 5 MALISKA, CLOVIS R.. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- 6 UNTERWEISER, P.M., BOYER, H.E., KUBBS, J.J., Heat Treater's Guide – Standard Practices and Procedures for Steel. American Society for Metals ASM Handbook, 1998.
- 7 TAMM, H., "Manual Técnico Thermex – HSE", Hennigsdorfer Stahl Engineering, 2003, 28p.