

# AValiação das Condições de Transferência de Calor na Simulação do Ciclo de Recozimento Contínuo na Gleeble<sup>1</sup>

Ricardo Machado Cabral<sup>2</sup>  
Túlio Magno Fuzessy de Melo<sup>3</sup>  
Roberto Parreiras Tavares<sup>4</sup>

## Resumo

A Gleeble é um simulador termomecânico que vem sendo utilizado para a simulação de ciclos de recozimento contínuo em trabalhos de pesquisa. Entretanto, tem-se verificado que as amostras sujeitas aos ciclos térmicos, durante as etapas de encharque, resfriamento rápido e superenvelhecimento, têm apresentado variações de temperatura ao longo de sua área, prejudicando o seu melhor aproveitamento para estudos de pesquisa, pois: (i) os resultados fogem das condições visadas; (ii) é introduzido um novo dado na simulação; e (iii) as propriedades mecânicas do material são alteradas. Foi então efetuada a caracterização da situação atual dos ensaios de recozimento contínuo na Gleeble utilizando amostras com 150 x 50 x 0,77mm, sendo determinadas as condições adequadas de ensaio para obtenção das taxas de resfriamento desejadas e identificadas as áreas da amostra que atendem às condições de simulação. Concluiu-se que a variação da temperatura da amostra é influenciada pelo resfriamento das garras de fixação da amostra e pela pressão do gás de atomização. A região em que a temperatura apresenta variação máxima de 10°C em relação aos valores visados durante a simulação, possui uma área de 14 x 10mm. Para ampliar essa área, deve-se: (i) trabalhar com amostras com comprimento superior a 200mm; e (ii) trabalhar com menores valores para pressão de atomização do ar. Durante esse estudo foram desenvolvidos alguns equipamentos, dentre os quais aquele que permitiu medir a força de impacto do jato de água de atomização, possibilitando criar uma correlação entre o coeficiente convectivo e a pressão de impacto desse jato.

**Palavras-chave:** Recozimento contínuo; Gleeble; Simulação.

## EVALUATION OF THE HEAT TRANSFER CONDITIONS IN THE SIMULATION OF CONTINUOUS ANNEALING CYCLES IN THE GLEEBLE

### Abstract

The Gleeble is a thermo-mechanical simulator which has been used for the simulation of continuous annealing cycles in research works. However, it has been verified that the samples subjected to thermal cycles show temperature variations along the testing area, which impairs their use for research studies because: (i) the results do not correspond to the desired conditions; (ii) a new variable is introduced into the simulation and (iii) the mechanical properties of the material are changed. It was made the characterization of the current situation of the assays of continuous annealing in the Gleeble was realized using samples with 150 x 50 x 0,77mm. Also, the adequate test conditions for the simulation of the desired cooling rates were determined and the temperature distribution over the sample was evaluated. It was concluded that the temperature variation over the sample is influenced by the cooling of the jaws and by the pressure of the atomization gas. The area of the sample where the temperature reach a maximum variation of 10°C in relation to the desired temperatures during the simulation, is of 14 x 10mm. To extend this area, one must use: (i) longer samples (200mm length); and (ii) lower air pressure for atomization. Along the study several devices were developed, including the one which measured the impact force of the atomization water during fast cooling, allowing the correlation between the convection coefficient and the impact pressure of the water jet.

**Key words:** Continuous annealing; Gleeble; Simulation.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

<sup>3</sup> *Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, Dr.-Ing., Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.*

<sup>4</sup> *Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG; Belo Horizonte, MG.*

# 1 INTRODUÇÃO

No processo de recozimento contínuo, a tira de aço é submetida a um tratamento térmico composto de: aquecimento, encharque, resfriamento lento, resfriamento rápido primário, superenvelhecimento, resfriamento rápido secundário e resfriamento brusco com água. O controle dos parâmetros envolvidos no processo é de suma importância para a garantia da qualidade do produto final. Dentre estes parâmetros, o controle da temperatura nas diversas etapas auxilia na obtenção das propriedades mecânicas desejadas.

Para o desenvolvimento de estudos de pesquisa geralmente utiliza-se a simulação do processo em escala laboratorial. Equipamentos como a Gleeble vêm sendo utilizados há três décadas simulando o processo, tanto no desenvolvimento de produtos quanto na otimização de processos. Esse equipamento possui diversas vantagens, como o sistema de aquecimento por corrente elétrica e a capacidade de simulação de diversos ciclos térmicos com ou sem aplicação de esforços mecânicos.

Entretanto, tem-se verificado durante a simulação que a curva de resfriamento rápido primário vem apresentando taxas não constantes e diferentes das obtidas em escala industrial. Além de provocar a perda freqüente de ensaios, esta alteração foge ao interesse da simulação, introduzindo um novo dado ao estudo e alterando as propriedades mecânicas do material.

Este estudo tem por objetivos caracterizar a situação atual dos ensaios de simulação do ciclo de recozimento contínuo na Gleeble, determinar as condições adequadas de ensaio para a obtenção das taxas de resfriamento desejadas e correlacionar parâmetros de controle de processo às variáveis de transferência de calor.<sup>(1)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para os diversos tipos de aços processados na linha de recozimento contínuo, os parâmetros do ciclo variam em largas faixas. Contudo, para a realização deste estudo, os parâmetros utilizados nas simulações foram fixados tomando como base um ciclo de recozimento típico de uma linha industrial, como apresentado na Figura 1.

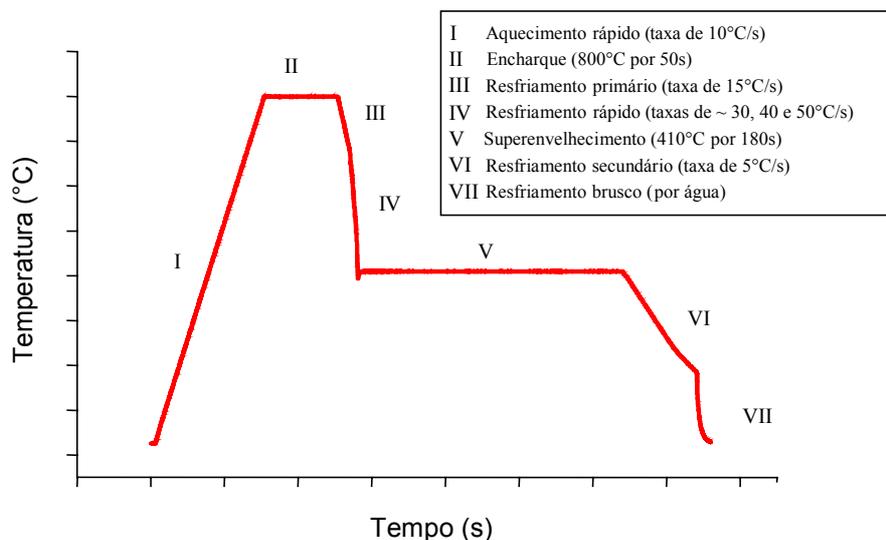


Figura 1 - Ciclo de Recozimento Contínuo utilizado no estudo.

O processo de resfriamento utilizado na Gleeble utiliza bicos atomizadores que usam água e gás na atomização. Como foi demonstrado que pequena variação da vazão influencia fortemente na taxa de resfriamento,<sup>(2)</sup> neste estudo fixou-se a vazão de água fixa para todos os ensaios. A pressão do ar de atomização ( $P_{ar}$ ) ficou, assim, responsável pela obtenção da taxa de resfriamento desejada.

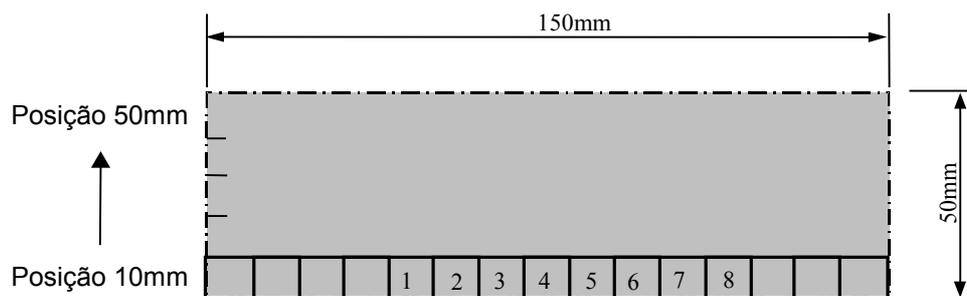
Para os ensaios na Gleeble, foram confeccionadas amostras retiradas de chapas de aço *Interticial Free* provenientes de bobinas da linha industrial, na condição de laminadas a frio, com dimensões de 150 x 50 x 0,77mm.

Para o presente estudo foram desenvolvidos dois dispositivos que permitiram o levantamento de variáveis relacionadas à transferência de calor durante os resfriamentos. O primeiro equipamento é um dispositivo para avaliação da distribuição da água de atomização, composto de células de seção quadrada, montadas em um suporte que permite a remoção individual de cada célula e a fixação de todo o conjunto durante o ensaio, conforme mostrado na Figura 2.



**Figura 2** - Dispositivo para coleta e armazenamento da água atomizada destacando algumas células individuais.

Visando obter uma correlação entre a pressão de impacto (IP) do jato de água na amostra e o coeficiente convectivo ( $h$ ), como relatado na literatura para altas pressões,<sup>(3)</sup> foi desenvolvido um segundo equipamento para mapear o perfil da força de impacto (FI) e, assim, da IP gerada. Este equipamento é composto por *strain gages* montados em um sistema de alavancas e um sistema de aquisição e tratamento de dados. Como o comprimento da amostra utilizada é de 150mm, foram confeccionadas 15 peças com seção de 10 x 10mm que, posicionadas lado a lado, permitem o levantamento de FI em uma faixa da amostra com 10mm de largura. Deslocando o equipamento 10mm a cada leitura torna-se possível o levantamento, após cinco leituras, de toda a área da amostra, como mostrado na Figura 3.



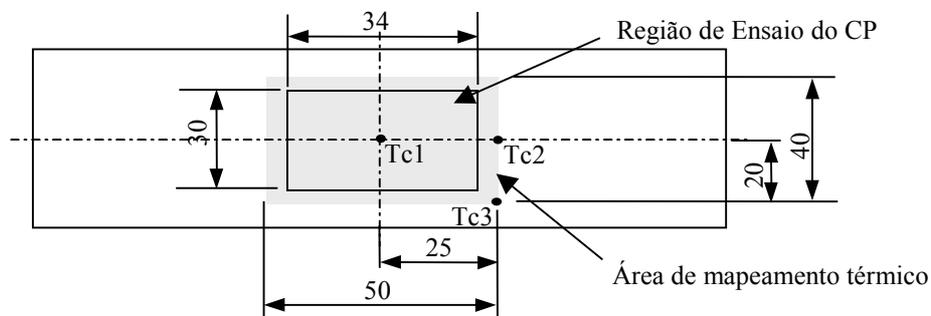
**Figura 3** - Posições do equipamento para levantamento de força de impacto.

Os sinais obtidos foram tratados e enviados a um software desenvolvido em LabVIEW 7.1<sup>®</sup>, responsável por processar, apresentar e armazenar os dados lidos. Na Figura 4 podem ser vistas fotos com detalhes do equipamento desenvolvido. Para o levantamento do perfil de FI dos bicos de atomização, o equipamento foi calibrado utilizando pesos-padrão.



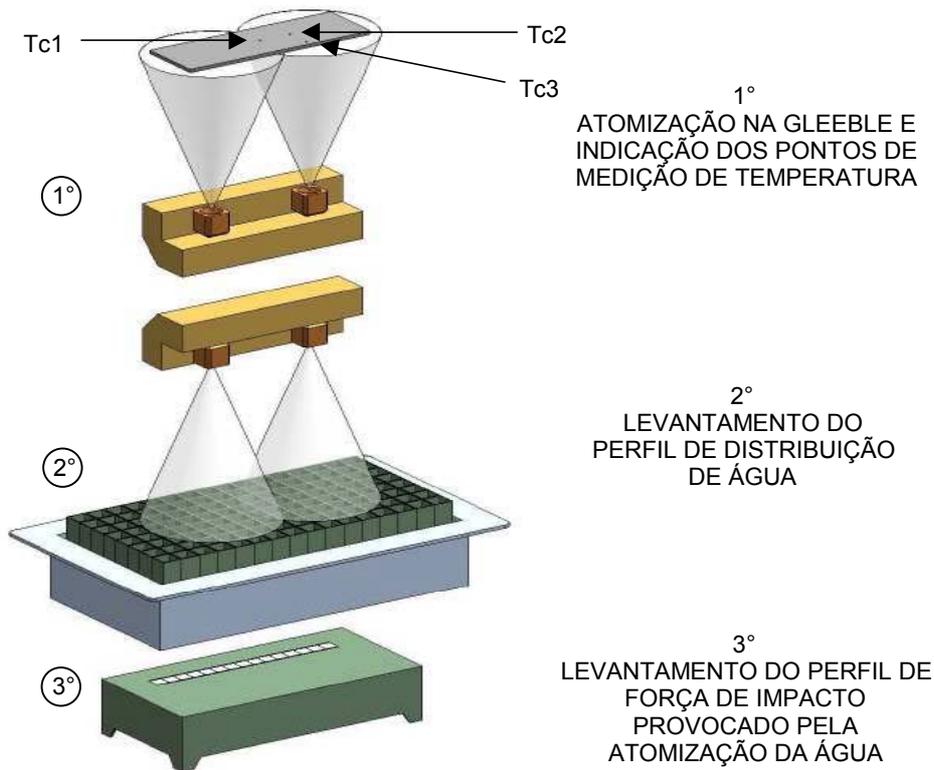
**Figura 4** - Fotos da fixação dos *strain gages* nas alavancas (a), montagem das alavancas na base (b), alimentação com fios e fixação geral (c), e montagem completa do equipamento (d).

Foram efetuados diversos ensaios, com três termopares soldados na região utilizada para extração do corpo-de-prova sendo que o termopar de controle Tc1, soldado no centro da amostra, segue o programa inserido no equipamento e os termopares Tc2 e Tc3, fixados conforme apresentado na figura 5, definem a área de mapeamento térmico. A amostra foi dividida em quatro partes consideradas simétricas termicamente.



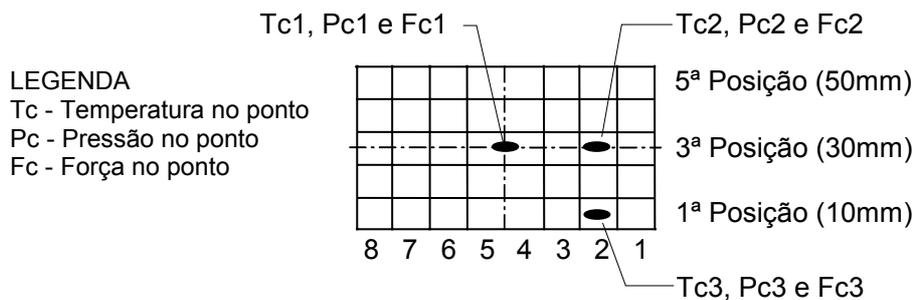
**Figura 5** - Desenho esquemático (unidade em mm) com indicação da localização dos termopares, das áreas de trabalho e de mapeamento térmico.

O ciclo foi monitorado e avaliado desde a temperatura ambiente até o fim do processo. Na Figura 6 é apresentada uma seqüência dos ensaios executados.



**Figura 6** - Desenho esquemático com seqüência dos ensaios executados.

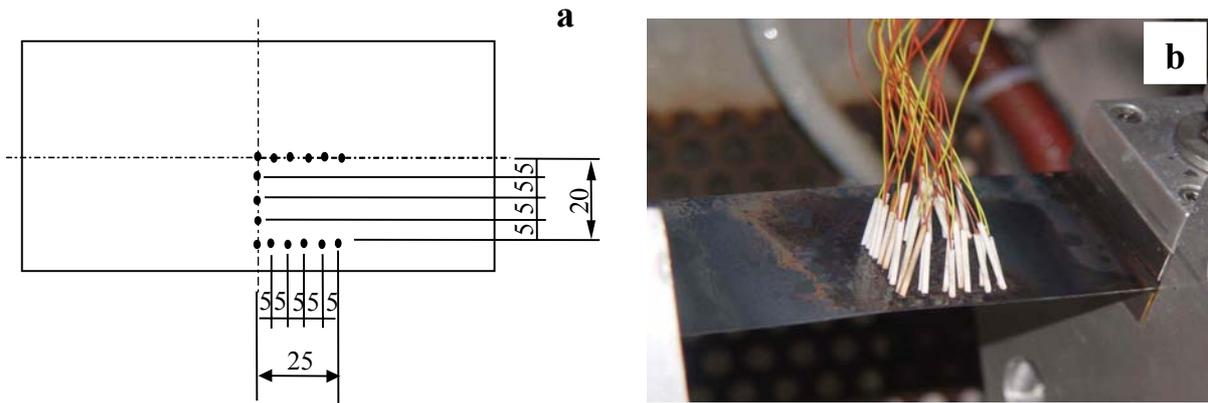
Na Figura 7 pode-se ver quais as células de medição de força de impacto e pressão de impacto no ponto podem ser correlacionadas com os pontos de medição de temperatura.



**Figura 7** - Localização dos pontos de correlação Tc, Pc e Fc.

Como a variação da temperatura na amostra também é provocada pela refrigeração da garra, foram efetuados ensaios com amostras com 200mm de comprimento.

Foram feitos ainda, levantamentos do perfil térmico da amostra para se conhecer como ele varia na região de trabalho e qual a área a ser considerada adequada para avaliações metalúrgicas. Para isso foram fixados 15 termopares nas amostras, conforme apresentado na Figura 8. Os três termopares utilizados nos ensaios anteriores (Tc1, Tc2 e Tc3) foram mantidos ligados à Gleeble e os demais foram conectados a um sistema de aquisição de dados auxiliar.



**Figura 8** - Desenho esquemático (a) e montagem dos termopares na amostra (b). (unidade em mm)

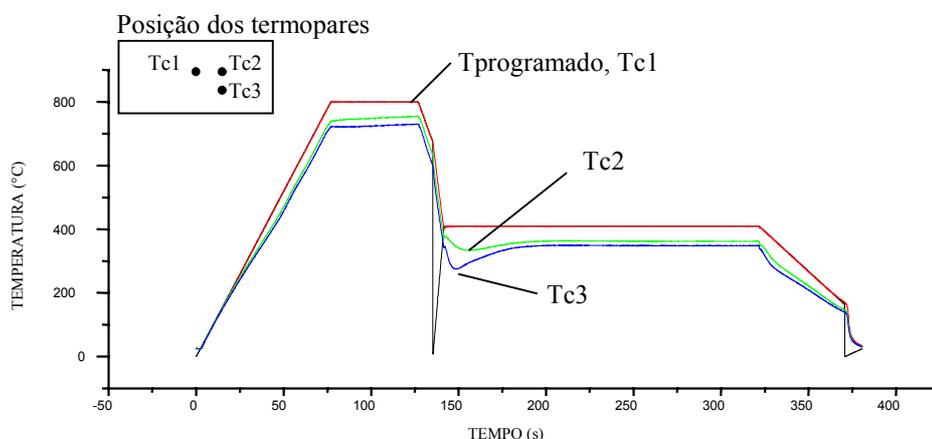
Para a avaliação da influência dos parâmetros envolvidos nas etapas do processo foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos visando verificar a correlação entre fatores como a pressão do ar de atomização ( $P_{ar}$ ) e a IP sobre  $h$  e taxa de resfriamento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

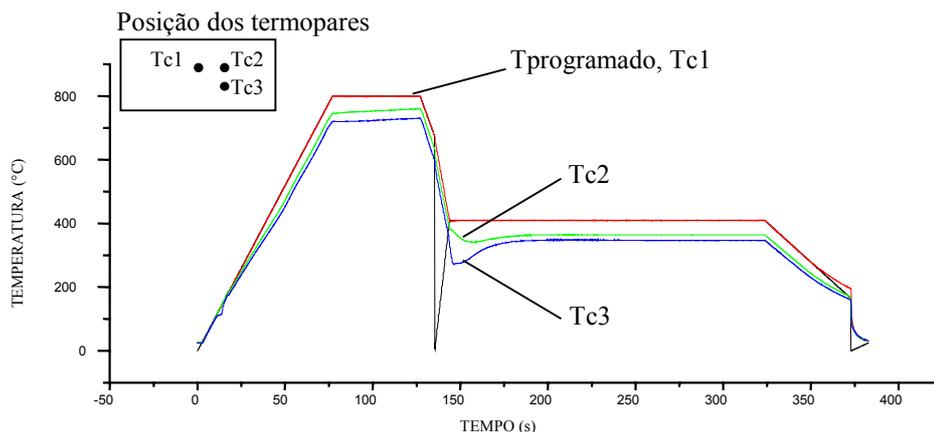
Após fixados os parâmetros pressão e vazão da água de atomização, foram efetuados ensaios, obtendo-se diversas curvas de resfriamento para o termopar de controle. Dessas, foram selecionadas as apresentadas na Tabela 1, com indicação da relação  $P_{ar}$  em função taxa de resfriamento obtida. Nas Figuras 9, 10 e 11 são apresentadas as curvas obtidas para as taxas de resfriamento acelerado para os três termopares (Tc1, Tc2 e Tc3) e a curva de temperatura programada, sendo que esta coincide com a de Tc1.

**Tabela 1** - Relação obtida entre  $P_{ar}$  e taxa de resfriamento.

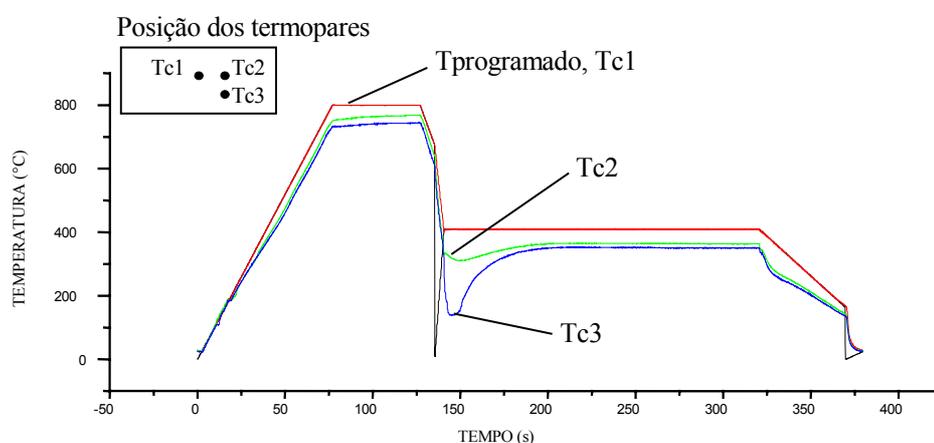
Pressão do ar de atomização (psi)	Taxa de resfriamento obtida para Tc1 (°C/s)
11	30
17	43
19	51



**Figura 9** - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}$  de 11psi.



**Figura 10** - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}$  de 17psi.



**Figura 11** - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}$  de 19psi.

Nas Figuras 9, 10 e 11 verifica-se que existe significativa diferença de temperatura entre Tc1, Tc2 e Tc3, durante o encharque e o superenvelhecimento, chegando a 78°C e 63°C, respectivamente. Essa diferença, provocada principalmente pela refrigeração das garras que prendem as amostras, decresce com o tempo. Verifica-se, também, que à medida que se aumenta  $P_{ar}$ , aumentam os vales de temperatura obtidos após o resfriamento acelerado, ou seja, as diferenças entre Tc1, Tc2 e Tc3.

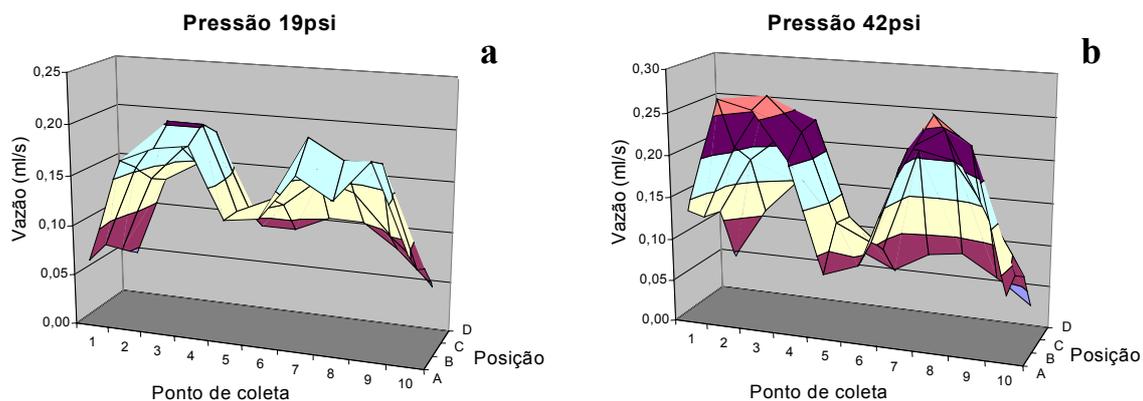
De cada gráfico apresentado nas Figuras 9, 10 e 11 foram retiradas as equações das curvas de tendência de resfriamento acelerado, em função do tempo de leitura, para os três pontos de medição (Tc1, Tc2 e Tc3). A partir dessas equações foi determinado o valor do coeficiente convectivo ( $h$ ) para cada intervalo de tempo de leitura (0,05s). Para esse cálculo, o calor específico e a densidade entraram como funções da temperatura.<sup>(4)</sup> O método utilizado para cálculo de  $h$  foi o da capacidade concentrada,<sup>(5)</sup> sendo posteriormente verificada a condição para sua utilização através do cálculo do Número de Biot,<sup>(5)</sup> cujo resultado apresentado foi inferior a 0,1, para valor médio de  $h$  (cálculo mais conservativo), satisfazendo a condição de uso da equação.

Utilizando-se os parâmetros usados na obtenção das taxas de resfriamento selecionadas, mostrados na Tabela 1, foram efetuados ensaios para levantamento de FI e calculados os valores médios. Divididos pela área de cada ponto de medição, eles geraram um valor de IP para cada ponto. Dos resultados obtidos para cada pressão, foram retirados os dados referentes aos de localização dos pontos de medição de temperatura Tc1, Tc2 e Tc3, correspondendo respectivamente a Pc1, Pc2 e Pc3, como mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2** - Valores de IP para cada ponto de Tc monitorado, em função de  $P_{ar}$ .

$P_{ar}$ (psi)	Pc1 (gf/mm <sup>2</sup> )	Pc2 (gf/mm <sup>2</sup> )	Pc3 (gf/mm <sup>2</sup> )
11	0,005	0,003	0,006
17	0,010	0,010	0,006
19	0,013	0,016	0,011

Para o ensaio de distribuição da água de atomização foram utilizadas pressões de atomização extremas, gerando os gráficos apresentados na Figura 12. Pode-se observar que o aumento do valor de  $P_{ar}$  provoca aumento da diferença entre os valores obtidos nos picos e nos vales. Verifica-se que os picos ocorrem nos pontos onde estão montados os termopares Tc2 e Tc3, e o vale se encontra onde está montado o termopar Tc1.



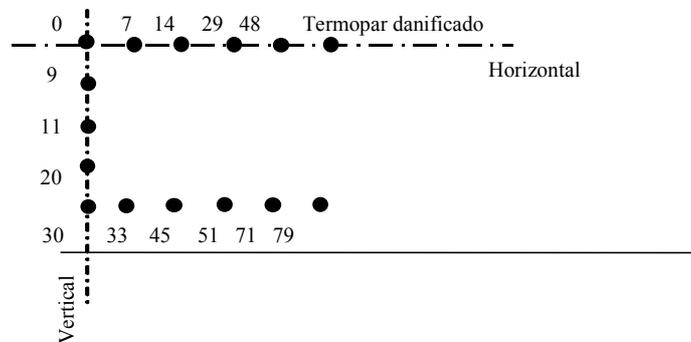
**Figura 12** - Vazão de água por ponto e posição de coleta, em função da pressão de atomização do ar, 19psi (a) e 42psi (b), para vazão de água constante.

As curvas da Figura 12, juntamente com os valores de IP para cada posição, indicam que a elevação de  $P_{ar}$  faz com que ocorra maior IP e maior concentração de água na região da linha de centro dos bicos de atomização, onde está localizado o termopar Tc2, e um pouco mais distante o Tc3. Verifica-se que ocorre uma maior troca de calor nesses pontos, justificando uma maior queda de temperatura em Tc2 e Tc3 durante o resfriamento acelerado à medida que se eleva  $P_{ar}$ .

Os ensaios com amostra de 200mm mostraram redução sensível da diferença de temperatura entre Tc1, Tc2 e Tc3. Nas amostras com 150mm, a diferença era de 78°C e 63°C enquanto nas amostras com 200mm, essa diferença foi reduzida para 33°C e 24°C para encharque e superenvelhecimento, respectivamente.

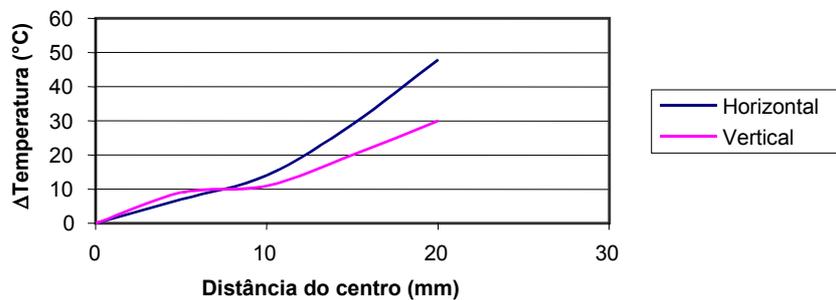
O levantamento do perfil de temperatura utilizando-se 15 termopares determinou qual é a variação da temperatura ao longo da região de trabalho do corpo-de-prova. Para melhor visualizar o resultado, foi considerado que o ponto central (Tc1) se

encontra na temperatura desejada, e os demais pontos são apresentados como a diferença entre o valor medido e o Tc1 (desejado). Dessa maneira, utilizando o gráfico obtido é possível determinar a área da amostra para a qual a variação de temperatura se encontra em uma faixa desejada. Na Figura 13 são mostrados todos os pontos de medição durante o encharque.

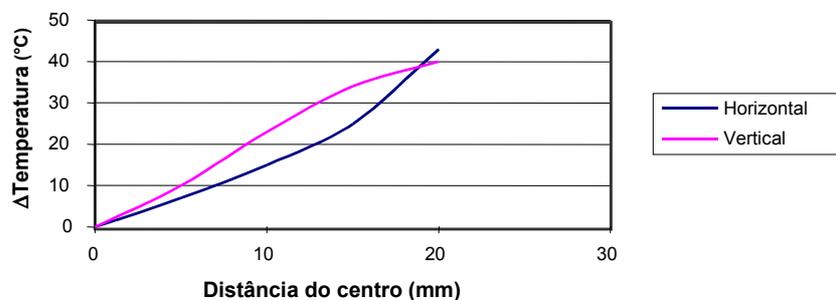


**Figura 13** - Pontos de levantamento de temperatura durante o encharque.

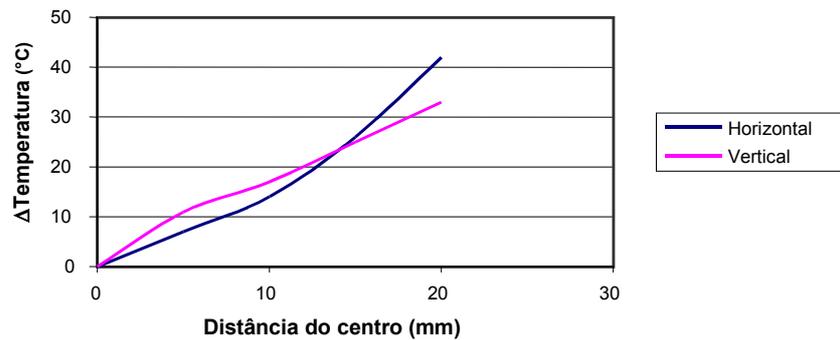
Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentados os resultados obtidos somente para as linhas horizontal (central) e vertical, permitindo, a partir do ponto central, obter a maior área da amostra que apresenta a variação de temperatura máxima desejada para as etapas avaliadas do processo.



**Figura 14** - Variação da temperatura (°C) durante o encharque.



**Figura 15** - Variação da temperatura (°C) durante resfriamento rápido.



**Figura 16** - Variação da temperatura (°C) durante superenvelhecimento.

Para a análise estatística foram usados os valores do coeficiente convectivo médio para cada ponto de leitura de temperatura. A Tabela 3 apresenta os valores de FI para os pontos alinhados com Tc1, Tc2 e Tc3, conforme mostrado na Figura 7.

**Tabela 3** - Dados para correlação de IP com  $h$ .

$P_{ar}$ (psi)	Posição	FI (gf)	$A^*$ (mm <sup>2</sup> )	IP (gf/mm <sup>2</sup> )	$h_{médio}$ (W/m <sup>2</sup> K)
11	Tc1	0,490	97,071	0,00504	239,62
	Tc2	0,332	97,805	0,00339	221,13
	Tc3	0,614	97,805	0,00628	237,26
17	Tc1	0,993	97,071	0,01023	346,37
	Tc2	1,016	97,805	0,01039	322,49
	Tc3	0,626	97,805	0,00640	335,06
19	Tc1	1,248	97,071	0,01286	412,74
	Tc2	1,584	97,805	0,01620	481,45
	Tc3	1,123	97,805	0,01148	430,78

\*  $A$  é a área de medição de FI para o ponto correspondente a Tc1, Tc2 e Tc3.

De posse desses resultados foi feita análise de regressão e avaliada a correlação entre as variáveis de processo obtendo-se as seguintes equações:

- Coeficiente Convectivo Médio e  $P_{ar}$  ( $r = 0,98$ ):

$$h_{médio} = -38,87 + 24,02.P_{ar} \quad (1)$$

-  $P_{ar}$  e Taxa de Resfriamento ( $r = 0,98$ ):

$$P_{ar} = (Taxa \text{ de Resfriamento} - 4,63) / 2,32 \quad (2)$$

- Correlação entre Coeficiente Convectivo Médio e IP ( $r = 0,93$ ):

$$h_{médio} = 145,41 + 20885,2.IP \quad (3)$$

Nessas equações, as unidades são:  $P_{ar}$  em psi; taxa de resfriamento em °C/s;  $h_{médio}$  em W/m<sup>2</sup>K; e IP em gf/mm<sup>2</sup>.

## 4 CONCLUSÕES

A simulação do ciclo de recozimento contínuo na Gleeble apresenta variações de temperatura na região de trabalho da amostra, que são influenciadas: (i) nas etapas de encharque e superenvelhecimento, pelo resfriamento das garras que fixam a amostra, e (ii) durante a etapa de resfriamento rápido, pela pressão do ar de atomização ( $P_{ar}$ ). A variação de temperatura não é constante ao longo do tempo, iniciando-se com valores mais elevados para decrescer posteriormente. Na etapa de resfriamento acelerado, nos valores mínimos de temperatura, a variação pode alcançar até 300°C, aumentando com a elevação da  $P_{ar}$ .

Utilizando-se amostras de 150mm de comprimento, a simulação do ciclo apresenta uma variação máxima de  $\pm 10^\circ\text{C}$  em uma área de 14 x 10mm na região central da amostra.

Pode-se correlacionar o coeficiente convectivo médio ( $h_{m\u00e9dio}$ ) em função de  $P_{ar}$ ,  $P_{ar}$  em função da taxa de resfriamento e  $h_{m\u00e9dio}$  em função da pressão de impacto do jato de água na amostra, para baixas pressões de impacto na faixa de 0,01gf/mm<sup>2</sup> a 0,10gf/mm<sup>2</sup>.

Para melhorar a homogeneidade da temperatura na região de trabalho, ou seja, reduzir as diferenças de temperatura entre o ponto central da amostra ( $T_{c1}$ ) e os localizados na extremidade da região de trabalho ( $T_{c2}$  e  $T_{c3}$ ), deve-se: (i) substituir os bicos por outros com distribuição de água mais homogênea e trabalhar com menores valores para pressão de atomização do ar, porém com sistema de medição e controle de vazão, melhorando a etapa de resfriamento rápido; e (ii) trabalhar com amostras de maior comprimento, melhorando as etapas de encharque e superenvelhecimento.

## REFERÊNCIAS

- 1 CABRAL, R. M. **Avaliação das condições de transferência de calor na simulação do ciclo de recozimento contínuo na Gleeble**. 2007. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
- 2 PUSHMANN, F.; SPECHT, E. **Atomized spray quenching as an alternative quenching method for defined adjustment of heat transfer**. *Steel Research*, n. 4, p. 283-288, 2004.
- 3 CHOI, J. W.; CHOI, J. W. **Convective heat transfer coefficient for high pressure water jet**. *ISIJ International*, vol 42, n. 3, p. 283-289, 2002.
- 4 MIZIKAR, E. A. **Mathematical heat transfer model for solidification of continuously cast steel** - Trans. AIME, 239; p. 1747-1753, 1967.
- 5 INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003. capítulo 5, p. 170-173.