

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA  
SIMULAÇÃO DO CICLO DE  
RECOZIMENTO CONTÍNUO NA  
GLEEBLE”

Autor: Ricardo Machado Cabral

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares (UFMG)

Março/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Ricardo Machado Cabral

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE  
CALOR NA SIMULAÇÃO DO CICLO DE RECOZIMENTO  
CONTÍNUO NA GLEEBLE

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-  
graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da  
Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

À minha esposa, Déborah,  
e meus filhos Daniel  
e Bruno

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho, e em particular:

- ◆ ao professor Roberto Parreiras Tavares pela atenção, disponibilidade e orientação;
- ◆ ao colega Túlio Magno Fuzessy de Mello pela orientação e dedicação durante a execução dos ensaios e elaboração da dissertação;
- ◆ aos colegas Geraldo Timótheo da Rocha e Eduardo Avelar Tonelli, pelo apoio gerencial dado a este projeto;
- ◆ aos amigos do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Usiminas pelo incentivo e pelas sugestões. Especialmente aos engenheiros Leonardo Camilo dos Reis, Wilton Pacheco de Araújo e Marcelo Moreira Furst Gonçalves pelas discussões técnicas e sugestões, e aos técnicos Jorge Antônio Ferreira Siqueira, Luiz Carlos Mendes Metzker pela colaboração no desenvolver do trabalho;
- ◆ ao Júlio, Edilson, José de Lima, José Lima Filho e à equipe do Setor de Desenvolvimento Mecânico que se dedicaram para que todas as necessidades do estudo fossem atendidas;
- ◆ à Usiminas e UFMG pela oportunidade de desenvolver essa dissertação;
- ◆ aos meus pais, que me são exemplo de vida;
- ◆ aos meus amigos pela compreensão, apoio e incentivo.

## RESUMO

A utilização de equipamentos de laboratório visando simulação de processos industriais para o desenvolvimento de estudos científicos é usual e necessária em função dos custos envolvidos e de problemas operacionais em experiências em escala industrial. Porém, para que estes trabalhos apresentem resultados significativos, é necessário que as condições reais de processo possam ser simuladas no equipamento. A Gleeble é um simulador termomecânico que vem sendo utilizado com muita frequência 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; (iii) e as propriedades mecânicas do material são alteradas.

No presente estudo, foi efetuada a caracterização da situação atual dos ensaios de recozimento contínuo na Gleeble utilizando amostras com 0,77mm e 2,03mm de espessura, 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 na região de trabalho da amostra está sendo influenciada pelo resfriamento das garras, durante encharque e superenvelhecimento, e pela pressão do gás de atomização, durante o resfriamento rápido. A região em que a temperatura pode ser considerada homogênea, com variação máxima de 10°C em relação aos valores visados durante a simulação, possui uma área de 14mm x 10mm em amostras com 0,77mm de espessura e de 12mm x 8mm para amostras com 2,03mm espessura. 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 (durante o

resfriamento rápido), possibilitando criar uma correlação entre o coeficiente convectivo e a pressão de impacto desse jato de água.

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

## ABSTRACT

The application of laboratory scale equipment for the simulation of industrial processes in scientific studies is usual and necessary as a result of the high costs and operational problems involved in industrial scale experiments. However, in order to produce adequate results, the real process conditions must be closely simulated by the equipment. The Gleeble is a thermo-mechanical simulator which has been frequently used for the simulation of continuous annealing cycles in research works. However, it has been verified that the samples subjected to thermal cycles during soaking, fast cooling and overaging 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.

In the present study, the characterization of the current situation of the assays of continuous annealing in the Gleeble was realized using samples with 0,77mm and 2,03mm thickness. 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, during the soaking and overaging phases of the cycle, and by the pressure of the atomization gas, during the fast cooling phase. The area of the sample where the temperature can be considered homogeneous, with a maximum variation of 10°C in relation to the desired temperatures during the simulation, is of 14mm x 10mm in samples with 0,77mm of thickness and 12mm x 8mm for samples with 2,03mm thickness. 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:** Continous annealing, Gleeble, Simulation.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. O Processo de Recozimento Contínuo .....	4
3.1.1. Parâmetros Envolvidos no Processo .....	8
3.1.2. Resultados Obtidos com a Alteração de Parâmetros do Processo .....	11
3.2. Simulação do Processo .....	14
3.2.1. A Gleeble .....	14
3.2.2. Simulação do Recozimento Contínuo .....	17
3.3. Controle do Sistema de Resfriamento Rápido .....	20
3.3.1. O Resfriamento por Atomização.....	20
3.3.2. O Resfriamento Rápido na Gleeble.....	37
4. METODOLOGIA .....	39
4.1. Processo Geral.....	39
4.2. Levantamentos e Ajustes Iniciais .....	41
4.2.1. Avaliação da Distribuição da Água de Atomização .....	43
4.2.2. Avaliação do Gás de Atomização .....	49
4.2.3. Determinação da Força de Impacto da Água.....	49
4.2.4. Substituição dos Bicos de Atomização .....	53
4.3. Ensaios .....	54
4.4. Análise Estatística .....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	60
5.1. Levantamento das Curvas de Resfriamento.....	60
5.1.1. Cálculo do Coeficiente Convectivo .....	65
5.1.2. Levantamento das Curvas da Força de Impacto da Água .....	71
5.1.3. Levantamento das Curvas de Resfriamento para Amostra Longa.....	76
5.1.4. Levantamento de Temperatura em 15 Pontos da Amostra.....	78
5.2. Estudo Estatístico para Correlações de Parâmetros .....	82

5.2.1. Correlação entre Coeficiente Convectivo Médio e $P_{ar}$ .....	83
5.2.2. Correlação entre Taxa de Resfriamento e $P_{ar}$ .....	84
5.2.3. Correlação entre Coeficiente Convectivo Médio e IP.....	86
6. CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
FIGURA 3.1 - Ciclos esquemáticos de processamento de aços acalmados ao alumínio nos recozimentos em caixa e contínuo <sup>(2)</sup> .....	6
FIGURA 3.2 - Taxas de resfriamento primário associadas aos diferentes métodos de resfriamento utilizados em linhas de recozimento contínuo <sup>(5)</sup> .....	8
FIGURA 3.3 - Esboço da linha de recozimento contínuo da Usiminas <sup>(6)</sup> .....	9
FIGURA 3.4 - Ciclo térmico típico de recozimento contínuo com apresentação dos fenômenos que ocorrem em cada etapa <sup>(7)</sup> .....	10
FIGURA 3.5 - Curva do perfil térmico do recozimento contínuo obtida em alternativa tecnológica encontrada no mercado <sup>(8)</sup> .....	14
FIGURA 3.6 - Principais componentes da Máquina Gleeble <sup>(9)</sup> .....	15
FIGURA 3.7 - Câmara de vácuo da Máquina Gleeble <sup>(1)</sup> .....	17
FIGURA 3.8 - Exemplo de amostra para simulação na Máquina Gleeble <sup>(1)</sup> .....	18
FIGURA 3.9 - Exemplo de ciclos térmicos de recozimento contínuo <sup>(1)</sup> .....	19
FIGURA 3.10 - Ilustração esquemática da amostra utilizada para as simulações dos ciclos térmicos na Gleeble, enfatizando as posições dos termopares (Tc1, Tc2 e Tc3) e dos corpos-de-prova para ensaios de tração posteriores <sup>(2)</sup> .....	20
FIGURA 3.11 - Alguns tipos de bicos de atomização (A – Jato fino; B – Cone cheio; C – Cone oco; D – Jato em leque) <sup>(12)</sup> .....	21
FIGURA 3.12 - Curva típica de ebulição para a água representando a relação entre o fluxo de calor e o excesso de temperatura em uma superfície de chapa aquecida ( $\Delta T_{\text{excesso}} = T_{\text{superfície}} - T_{\text{saturação}}$ ) <sup>(11)</sup> .....	23
FIGURA 3.13 - Desenho esquemático mostrando um jato de água e seu fluxo padrão na superfície da amostra <sup>(14)</sup> .....	24
FIGURA 3.14 - Efeito da vazão de água no fluxo de calor na ebulição ( $T_{\text{H}_2\text{O}} = 13^\circ\text{C}$ , distância do bico à amostra = 157mm e $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ ) <sup>(14)</sup> .....	25
FIGURA 3.15 - Efeito da temperatura de água no fluxo de calor na ebulição (Vazão = 1,26 l/s, distância do bico à amostra = 157mm e $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ ) <sup>(14)</sup> .....	25
FIGURA 3.16 - Efeito da distância do bico à amostra no fluxo de calor na ebulição ( $T_{\text{H}_2\text{O}} = 13^\circ\text{C}$ , Vazão = 1,26 l/s e $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ ) <sup>(14)</sup> .....	26
FIGURA 3.17 - Efeito do diâmetro do bico no fluxo de calor na ebulição ( $T_{\text{H}_2\text{O}} = 13^\circ\text{C}$ , Vazão = 1,26 l/s e distância do bico à amostra = 157mm) <sup>(14)</sup> .....	27
FIGURA 3.18 - Curva da densidade de ataque da água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas <sup>(13)</sup> .....	28

FIGURA 3.19 - Curva de distribuição do diâmetro das gotas de água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas <sup>(13)</sup> .....	28
FIGURA 3.20 - Curva de distribuição da velocidade das gotas de água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas <sup>(13)</sup> .....	29
FIGURA 3.21 - Curva do coeficiente de transferência de calor em função da temperatura superficial para vazão de água de 10 e 3kg/h e pressão de ar de 0,2 e 0,5MPa, respectivamente <sup>(13)</sup> .....	30
FIGURA 3.22 - Curva do coeficiente de transferência de calor em função da densidade de ataque para têmpera por evaporação, por spray de água e por atomização de água <sup>(13)</sup> .....	30
FIGURA 3.23 - Coeficiente de transferência de calor em uma área sob jato atomizado, usando bicos com mesma vazão de água e padrões idênticos de spray, porém com mudança nos tamanhos e velocidade das gotas <sup>(15)</sup> .....	31
FIGURA 3.24 - Distribuição dos parâmetros ao longo da área sob o spray <sup>(15)</sup> .....	32
FIGURA 3.25 - Ilustração esquemática do equipamento desenvolvido para levantamento do perfil térmico de um corpo-de-prova aquecido após passar por um jato de água <sup>(17)</sup> .....	35
FIGURA 3.26 - Ilustração esquemática do equipamento desenvolvido para levantamento do perfil de força após um corpo-de-prova passar por um jato de água <sup>(17)</sup> .....	36
FIGURA 3.27 - Curva da distribuição da Pressão de Impacto em função da posição relativa de medição no corpo-de-prova <sup>(17)</sup> .....	36
FIGURA 3.28 - Apresentação da variação da IP com a pressão do “spray” <sup>(17)</sup> .....	37
FIGURA 4.1 - Ciclo do Recozimento Contínuo utilizado no estudo.....	40
FIGURA 4.2 - Desenho isométrico do sistema de atomização de água da Gleeble. ....	41
FIGURA 4.3 - Detalhe de montagem dos bicos de atomização de água da Gleeble. ....	42
FIGURA 4.4 - Gráfico com variação da vazão de água em função da leitura. ....	43
FIGURA 4.5 - Dispositivo para coleta e armazenamento da água atomizada destacando algumas células individuais. ....	44
FIGURA 4.6 - Vazão de água por ponto e posição de coleta, em função da pressão de atomização do ar (19psi e 42psi) para uma vazão de água constante no bico. ....	45
FIGURA 4.7 - Posicionamento dos termopares na amostra para verificação da diferença de temperatura entre os pontos.....	45
FIGURA 4.8 - Gráfico com variação da temperatura para seção longitudinal. Gráfico inferior amplia a região de resfriamento acelerado. ....	46

FIGURA 4.9 - Vazão de água por ponto e posição de coleta, em função da pressão de atomização do ar (19psi e 42psi) para uma vazão de água constante no bico, para a nova situação.....	47
FIGURA 4.10 - Gráfico com variação da temperatura para seção longitudinal para a nova situação. Gráfico inferior amplia a região de resfriamento acelerado. ....	48
FIGURA 4.11 - 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).....	51
FIGURA 4.12 - Desenho esquemático das posições do equipamento para levantamento de força em toda a área da amostra.....	52
FIGURA 4.13 - Foto dos bicos montados no suporte de fixação e dutos. ....	54
FIGURA 4.14 - Desenhos esquemáticos com indicação da localização dos termopares, das áreas de trabalho e de mapeamento térmico. ....	55
FIGURA 4.15 - Desenho esquemático com seqüência dos ensaios executados.....	57
FIGURA 4.16 - Desenho com locação dos pontos de medição de temperatura (Tc) e ponto correlato na medição de FI e IP. ....	58
FIGURA 4.17 - Desenho indicando a localização dos termopares na amostra.....	58
FIGURA 4.18 - Fotografia da amostra com os 15 termopares montados.....	59
FIGURA 5.1 - Curvas de temperaturas obtidas com $P_{ar}= 11\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ).....	61
FIGURA 5.2 - Curvas de temperaturas obtidas com $P_{ar}= 17\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ).....	61
FIGURA 5.3 - Curvas de temperaturas obtidas com $P_{ar}= 19\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ).....	61
FIGURA 5.4 - Curvas de temperatura obtidas com $P_{ar}= 31\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	62
FIGURA 5.5 - Curvas de temperatura obtidas com $P_{ar}= 37\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	62
FIGURA 5.6 - Curvas de temperatura obtidas com $P_{ar}= 42\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	62
FIGURA 5.7 - Curvas de temperaturas obtidas com bicos novos. ....	64
FIGURA 5.8 - Curvas de temperaturas obtidas com bicos novos para tempo reduzido durante superenvelhecimento. ....	64
FIGURA 5.9 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 11\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ). ....	69
FIGURA 5.10 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 17\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ). ....	69
FIGURA 5.11 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 19\text{psi}$ ( $e= 0,77\text{mm}$ ). ....	69
FIGURA 5.12 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 31\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	70
FIGURA 5.13 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 37\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	70
FIGURA 5.14 - Variação de h em função de T para a $P_{ar}= 42\text{psi}$ ( $e= 2,03\text{mm}$ ). ....	70
FIGURA 5.15 - Exemplo de gráfico obtido com levantamento de FI (nesse caso $P_{ar}= 31\text{psi}$ , na posição de medição 20mm, ponto 7).....	72

FIGURA 5.16 - Exemplo de levantamento da curva de tendência e obtenção de FI ( $P_{ar}= 31\text{psi}$ , na posição de medição 20mm, ponto 7).....	72
FIGURA 5.17 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 31\text{psi}$ ).....	74
FIGURA 5.18 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 37\text{psi}$ ).....	74
FIGURA 5.19 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 42\text{psi}$ ).....	74
FIGURA 5.20 - Apresentação gráfica dos resultados obtidos na tabela V.8 ( $P_{ar}=31\text{psi}$ ).....	75
FIGURA 5.21 - Curvas de temperaturas obtidas com amostra de 200mm de comprimento e 0,77mm de espessura. ....	76
FIGURA 5.22 - Curvas de temperaturas obtidas com amostra de 200mm de comprimento e 2,03mm de espessura, com tempo de superenvelhecimento reduzido. ....	77
FIGURA 5.23 - Exemplo de levantamento de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante o encharque para amostra com 0,77m de espessura. ....	78
FIGURA 5.24 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante encharque para $e=0,77\text{mm}$ . ....	79
FIGURA 5.25 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante resfriamento rápido para $e=0,77\text{mm}$ . ....	79
FIGURA 5.26 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante superenvelhecimento para $e=0,77\text{mm}$ . ....	79
FIGURA 5.27 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante encharque para $e=2,03\text{mm}$ . ....	80
FIGURA 5.28 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante resfriamento rápido para $e=2,03\text{mm}$ . ....	80
FIGURA 5.29 - Variação de T ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante superenvelhecimento para $e=2,03\text{mm}$ . ....	80
FIGURA 5.30 - Gráfico com indicação da localização dos pontos utilizados na correlação $h_{soma} \times P_{ar}$ . ....	83
FIGURA 5.31 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação $h_{soma} \times P_{ar}$ -removendo ponto extremo. ....	84
FIGURA 5.32 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação Taxa de Resfriamento $\times P_{ar}$ para amostra com 0,77mm de espessura. ....	85
FIGURA 5.33 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação Taxa de Resfriamento $\times P_{ar}$ para amostra com 2,03mm de espessura. ....	86
FIGURA 5.34 - Gráfico com indicação da localização dos pontos utilizados na correlação $h_{soma} \times \text{IP}$ . ....	86
FIGURA 5.35 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na $h_{soma} \times \text{IP}$ para amostra com 2,03mm de espessura. ....	87
FIGURA 5.36 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na $h_{soma} \times \text{IP}$ para amostra com 2,03mm de espessura. ....	88

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
TABELA III.1 - Sumário da história de implantação do recozimento contínuo <sup>(3)</sup> .....	5
TABELA III.2 - Qualidades de aços produzidas nos recozimentos em caixa e contínuo <sup>(4)</sup> .....	6
TABELA IV.1 - Identificação do material utilizado na confecção das amostras.....	40
TABELA IV.2 - Diferença de temperatura entre termopares fixados a 40mm do centro da amostra no sentido longitudinal. ....	47
TABELA IV.3 - Diferença de temperatura entre termopares fixados a 40mm do centro da amostra no sentido longitudinal para a nova situação.....	48
TABELA IV.4 - Área de medição de cada sensor de força.....	52
TABELA IV.5 - Relação entre a vazão de água e a pressão de atomização.....	56
TABELA V.1 - Relação obtida entre $P_{ar}$ e taxa de resfriamento para amostra com espessura de 0,77mm e 2,03mm.....	60
TABELA V.2 - Equações relativas às curvas de resfriamento para Tc1, Tc2 e Tc3.....	65
TABELA V.3 - Planilha parcial de cálculo de h, nesse caso para Tc1 e $P_{ar}= 11\text{psi}$ .....	68
TABELA V.4 - Exemplo de resultados obtidos no levantamento de FI (nesse caso $P_{ar}= 31\text{psi}$ , na posição de medição 20mm).....	71
TABELA V.5 - Exemplo de planilha com dois levantamentos de FI para cada posição, para $P_{ar}= 31\text{psi}$ . ....	73
TABELA V.6 - Exemplo de planilha com os valores médios de FI para cada posição, para $P_{ar}= 31\text{psi}$ . ....	73
TABELA V.7 - Exemplo de planilha com os valores médios de IP para cada posição, para $P_{ar}= 31\text{psi}$ . ....	73
TABELA V.8 - Planilha contendo valores de IP para cada ponto de T monitorado, em função de $P_{ar}$ . ....	75
TABELA V.9 - Dados para correlação de IP com h. ....	82

## 1. INTRODUÇÃO

No processo siderúrgico, após a laminação a frio, o aço se encontra consideravelmente encruado. A deformação plástica imposta na laminação a frio introduz defeitos que levam a uma drástica deterioração de suas propriedades mecânicas. Ocorrem, por exemplo, o aumento do limite de escoamento e de resistência, a perda da ductilidade e a diminuição do alongamento percentual, tornando-o inadequado para as aplicações usuais. Para que os aços estejam aptos para o processo de conformação, faz-se necessária a realização de um tratamento térmico de recozimento, cujo propósito é de promover um rearranjo estrutural com o objetivo final de produzir no material as propriedades adequadas para as etapas subseqüentes.

No processo de recozimento em linha contínua, 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. Essa simulação deve reproduzir as condições reais de processo, para que os resultados obtidos sejam representativos. Simuladores como a Gleeble vêm sendo utilizados há três décadas, em diversos países, 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 reais, obtidas em escala industrial. Além de provocar a perda freqüente de ensaios, quando os valores obtidos são muito diferentes do real, esta alteração foge ao interesse da simulação,

introduzindo um novo dado ao estudo e alterando as propriedades mecânicas do material.

Dessa forma, o presente estudo tem por objetivo 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 possibilitar correlacionar parâmetros de controle de processo às variáveis de transferência de calor. Como o processo de resfriamento rápido utilizado na Gleeble é composto de bicos atomizadores que usam água e gás na atomização, atuou-se nos diversos parâmetros do processo que agem alterando a taxa de resfriamento, como a montagem e distribuição dos bicos de atomização, distribuição da água, ajuste da pressão da água e do gás, dentre outros, para o ajuste do processo. Além do resfriamento rápido primário, foram avaliadas as demais etapas do ciclo térmico de recozimento quanto às condições indesejadas de simulação. Deve-se destacar que a amostra tratada termicamente na Gleeble é usada tanto para análise metalográfica quanto para ensaios de tração, quando são retirados três corpos-de-prova que devem apresentar as mesmas propriedades. Sendo assim, especial atenção foi dada quanto à determinação da área do material que apresenta condições homogêneas de simulação do processo.

## 2. OBJETIVOS

- Caracterizar a situação atual dos ensaios de simulação do ciclo de recozimento contínuo na Gleeble.
- Identificar as áreas da amostra que atendem às condições de simulação do ciclo para a extração de corpos-de-prova para ensaios mecânicos e metalográficos.
- Determinar as condições adequadas de ensaio para a obtenção de taxas de resfriamento preestabelecidas.
- Correlacionar a pressão de impacto provocada pela força do jato de água de atomização com o coeficiente convectivo.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para melhor entendimento deste estudo, a revisão bibliográfica será apresentada abordando três aspectos específicos:

- o processo de recozimento contínuo;
- a simulação do processo de recozimento contínuo;
- o controle do sistema de resfriamento rápido.

#### **3.1. O Processo de Recozimento Contínuo**

Um material, após a laminação a frio, em função da deformação acumulada, possui alta resistência e baixa ductilidade (capacidade de absorver deformação plástica), caracterizados pelo aumento do limite de escoamento e redução do alongamento<sup>(1)</sup>.

O recozimento, aplicado após a laminação a frio, visa:

- eliminar a deformação acumulada no material;
- baixar a resistência e elevar a ductilidade do material;
- gerar um tamanho de grão adequado;
- criar uma textura cristalográfica adequada à aplicação.

A primeira idéia de recozimento contínuo surgiu em 1936 quando foi proposto um processo alternativo de recozimento, com etapas de aquecimento, encharque, resfriamento rápido e superenvelhecimento, esta última com o objetivo de reduzir o teor de carbono em solução sólida em aços baixo carbono. Mais tarde, em 1959, foi sugerido que as características de conformabilidade dos produtos processados através deste novo método seriam melhoradas com o aumento da temperatura de bobinamento, devido ao crescimento de carbonetos na etapa de laminação a quente. Contudo, a primeira linha de recozimento contínuo em escala industrial só foi instalada em 1972, na usina de Kimitsu

(NSC - Japão), produzindo inicialmente aços de qualidade comercial e de alta resistência com estrutura bainítica. A utilização deste processo vem crescendo rapidamente, impulsionada pela diversificação dos produtos de alta resistência (IF, BH, ARBL, bifásico), e dos processos e tecnologias que incluem altas temperaturas de recozimento, diferentes taxas de resfriamento e controle do superenvelhecimento, dentre outros. Na tabela III.1 sumariza-se parte desta história<sup>(2)</sup>.

TABELA III.1 - Sumário da história de implantação do recozimento contínuo<sup>(3)</sup>.

Ano	Fatos e Produtos
1936	Proposta de recozimento contínuo para aço baixo carbono (Hague & Brace)
1959	Altas temperaturas de bobinamento na laminação a quente (Blickwede)
1969	Etapas de resfriamento rápido e superenvelhecimento (Blickwede)
1972	Primeira linha industrial (NSC)
1975	Aços bifásicos
1980	Aços UBC-IF e de alta resistência (estampagem profunda)
1982	Aços com envelhecimento controlado (BH) (estampagem profunda)
1990	Aços de alta resistência (TRIP)

Na figura 3.1 e tabela III.2 são esquematizadas as diferenças básicas entre os recozimentos em caixa e contínuo, do ponto de vista operacional e das principais qualidades produzidas. De um modo geral, as altas velocidades no processamento contínuo conferem ao aço uma granulação ferrítica muito fina e equiaxial, uma menor ductilidade e uma textura cristalográfica não muito favorável à estampagem (ambas afetadas pela distribuição de carbonetos), além de provocar uma maior tendência ao surgimento do fenômeno de envelhecimento por deformação (relacionado com o teor de carbono em solução)<sup>(2)</sup>.

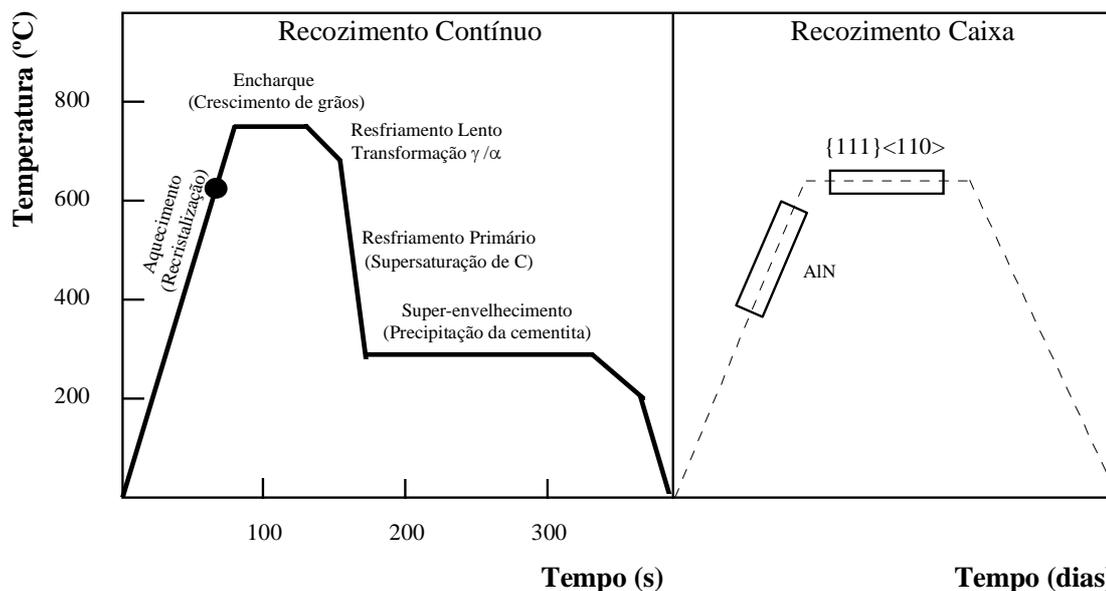


FIGURA 3.1 - Ciclos esquemáticos de processamento de aços acalmados ao alumínio nos recozimentos em caixa e contínuo<sup>(2)</sup>.

TABELA III.2 - Qualidades de aços produzidas nos recozimentos em caixa e contínuo<sup>(4)</sup>.

Produto	Qualidade	Recozimento em Caixa	Recozimento Contínuo
Aços para Estampagem	CQ, DQ, DDQ		Baixo custo de produção
	Estampagem extra profunda EDDQ (IF)	Colamento devido às altas temperaturas de recozimento	Possibilidade de altas temperaturas de recozimento
	Super EDDQ	Colamento devido às altas temperaturas de recozimento	Possibilidade de altas temperaturas de recozimento
Aços de Alta Resistência	Qualidade comercial (precipitação) 350~590 MPa	Maior quantidade de elementos de ligas	Grãos finos devido aos curtos tempos envolvidos
	Estampagem - DQ (AA-P) 340~440 MPa	Maior quantidade de elementos de ligas	
	Estampagem - DQ/BH (AA-P) 340~390 MPa	Faixa estreita de carbono Baixo valor de BH	Controle do carbono solúvel Valores suficientes de BH
	Estampagem DQ/BH (UBC-P) 340~390 MPa	Limitação na dissolução de carbonetos. Baixa temperatura	Valores suficientes de BH
	Estampagem profunda DDQ (IF-P) 340~440 MPa	Colamento devido às altas temperaturas de recozimento	Possibilidade de altas temperaturas de recozimento
	Bifásico 490~1370MPa	Resfriamento lento inibe a formação de martensita. Reduzido pela adição de ligas.	Possibilidade de altas taxas de resfriamento
	TRIP 590~980 MPa	Limitações impostas pelas baixas taxas de resfriamento	Induz a formação de bainita, gera austenita retida

No recozimento contínuo destacam-se as seções de aquecimento e encharque, resfriamento primário, superenvelhecimento e resfriamento secundário, intrínsecas do processo (figura 3.1). Os estágios de aquecimento e encharque, normalmente realizados acima da temperatura A1 (dissolução da cementita), são destinados à recristalização e crescimento de grãos. Na etapa seguinte, a aceleração do resfriamento é responsável por manter o carbono em solução sólida, aumentando o seu grau de super-saturação na matriz ferrítica. O superenvelhecimento presta-se à precipitação do carbono dissolvido durante as etapas anteriores. Fazem parte ainda de uma instalação industrial o pré-tratamento (limpeza eletrolítica), o encruamento e o acabamento da tira, reduzindo-se assim a quantidade de processos intermediários, com reflexos diretos no tempo e custo de produção<sup>(2)</sup> quando comparado com o recozimento em caixa.

Além das vantagens mencionadas acima, pode-se ainda relacionar o melhor controle da planicidade e limpeza superficial da tira, propriedades mecânicas mais uniformes, menor tempo de processo, baixo custo de produção no recozimento e aumento da gama de produtos devido às temperaturas de encharque mais elevadas e maiores taxas de resfriamento<sup>(2)</sup>.

As modernas linhas contínuas diferem essencialmente no método de resfriamento a partir da temperatura de recozimento. Na figura 3.2 são apresentados os diferentes meios de resfriamento usados e a taxa de resfriamento associada a cada processo<sup>(5)</sup>. No resfriamento com jatos de gás (“Gas Jet Cooling” – GJC), no qual uma mistura nitrogênio-hidrogênio é passada por intermédio de jatos incidindo sobre a chapa de aço, as taxas de resfriamento são da ordem de 5 a 30°C/s. Uma variação desta tecnologia, denominada “High Gas Jet Cooling” – HGJC, permite que sejam obtidas taxas da ordem de 30 a 70°C/s. Visando a obtenção de taxas de resfriamento mais elevadas e, assim, o aumento da capacidade de produção de aços de alta resistência, foi desenvolvido o sistema de jatos mistos, água e gás (“Gas-Water Spray Cooling”), no qual as taxas de resfriamento variam de 80 a 300°C/s. O método de resfriamento pela imersão em água quente pode atingir taxas de resfriamento entre 25 e 150°C/s, ao passo que a imersão diretamente em água fria alcança taxas acima de 1000°C/s. O sistema de resfriamento por cilindros refrigerados com água fria atinge taxas mais baixas, entre 80 e 150°C/s<sup>(6)</sup>.

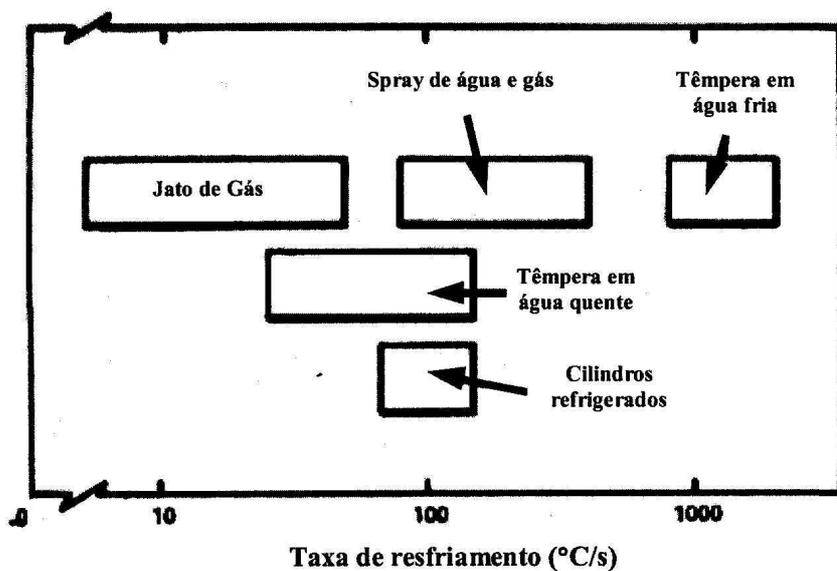


FIGURA 3.2 - Taxas de resfriamento primário associadas aos diferentes métodos de resfriamento utilizados em linhas de recozimento contínuo<sup>(5)</sup>.

### 3.1.1. Parâmetros Envolvidos no Processo

A linha de recozimento contínuo da Usiminas possui um resfriamento primário do tipo HGJC, que permite atingir taxas de resfriamento entre 30 e 70°C/s. A taxa de resfriamento é função da velocidade de processamento da tira no resfriamento rápido que, por sua vez, depende da espessura da tira. Quanto menor a espessura, maior é a velocidade, menor o tempo de permanência no resfriamento rápido e maior a taxa de resfriamento. Vários equipamentos estão acoplados a esta linha (figura 3.3), sendo os principais a seção de limpeza eletrolítica e o laminador de encruamento. A seção de recozimento é composta por vários fornos e cada um define uma etapa do recozimento (aquecimento, encharque, resfriamento lento primário, resfriamento rápido, superenvelhecimento e resfriamento lento secundário)<sup>(6)</sup>.

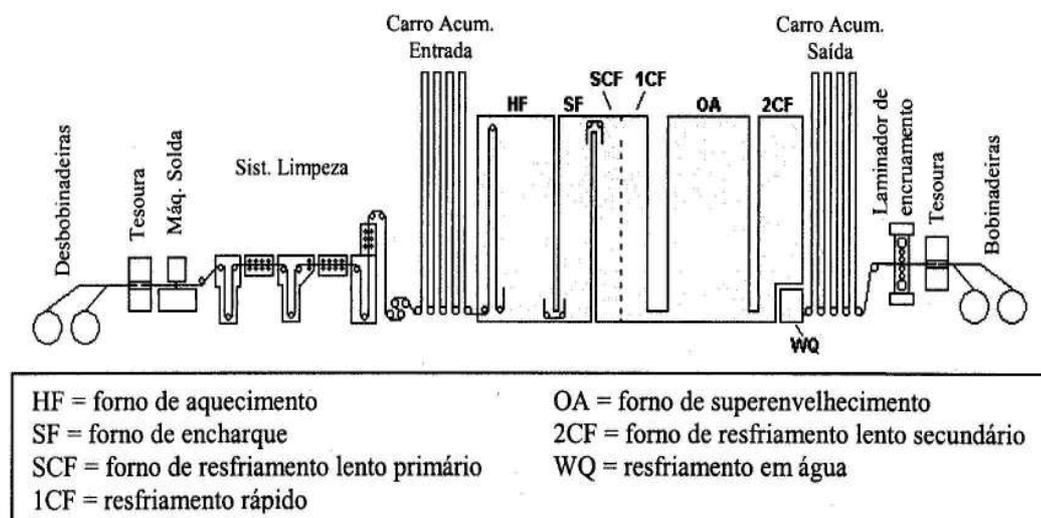


FIGURA 3.3 - Esboço da linha de recozimento contínuo da Usiminas<sup>(6)</sup>.

É importante ressaltar as principais vantagens do “Continuous Annealing and Processing Line” - CAPL, como sendo econômico no que tange ao custo inicial, requer espaço mínimo para a instalação e trabalho, produzindo produtos melhores, além da economia em elementos de liga, e contribuindo para economia de energia<sup>(6)</sup>.

Cada uma das etapas, em um ciclo de recozimento contínuo, deve ser avaliada, isoladamente, destacando-se as influências das temperaturas, taxas e tempos a que o material é submetido durante todo o processamento<sup>(7)</sup>.

Na figura 3.4 são mostradas as etapas do ciclo térmico típico de recozimento contínuo, destacando-se os fenômenos ocorridos durante cada etapa isolada<sup>(7)</sup>.

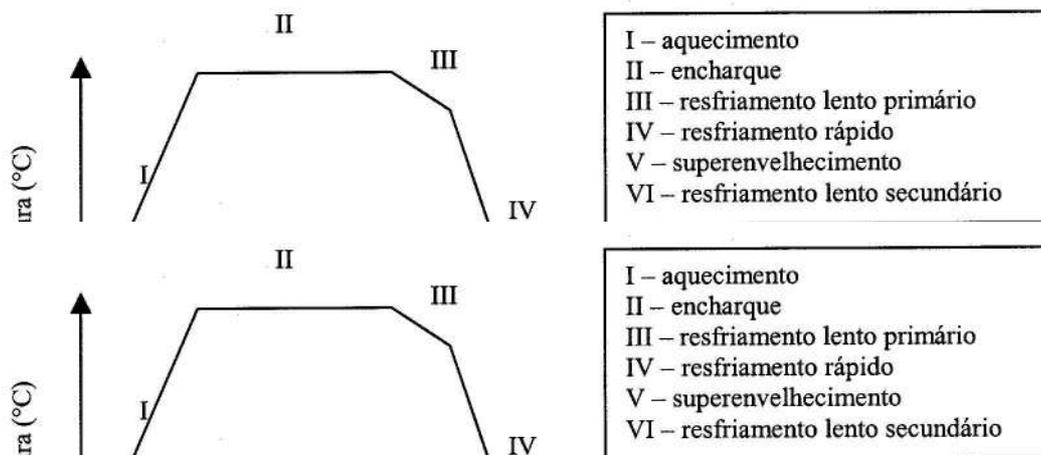


FIGURA 3.4 - Ciclo térmico típico de recozimento contínuo com apresentação dos fenômenos que ocorrem em cada etapa<sup>(7)</sup>.

### Aquecimento

Nesta etapa a tira entra à temperatura ambiente e, através do aquecimento promovido por tubos radiantes, atinge a temperatura de encharque (730°C à 820°C), que varia conforme a composição química e a aplicação do material.

### Encharque

Nesta fase ocorre o crescimento dos grãos. A temperatura e o tempo de encharque são os parâmetros mais importantes na definição do tamanho do grão recristalizado. O tempo necessário nesta operação é maior que 40 segundos. A temperatura da tira pode variar, dependendo do ciclo, de 730 a 820°C, sendo mantida por meio de resistências elétricas.

### Resfriamento Primário ou Lento

O resfriamento lento é muito importante no processo, pois este é o estágio em que ocorre uma transformação de grãos austeníticos, formados durante o encharque, em grãos ferríticos, exceto para os aços IF, que só têm ferrita. Este tipo de grão é melhor para os aços destinados à estampagem. Além disto, visa-se obter também uma quantidade uniforme de carbono em solução na ferrita. A taxa de resfriamento obtida é

inferior a  $7^{\circ}\text{C/s}$  a partir do fim do encharque até  $670^{\circ}\text{C}$ .

#### Resfriamento Rápido Primário

Consiste em resfriar a tira rapidamente de cerca de  $670^{\circ}\text{C}$  até por volta de  $400^{\circ}\text{C}$  a uma velocidade em torno de  $50^{\circ}\text{C/s}$ . Nesta condição consegue-se uma menor quantidade de carbono em solução sólida no aço, tendo assim melhores valores de propriedades mecânicas.

#### Superenvelhecimento

É um tratamento térmico dado à tira para retardar o fenômeno de envelhecimento por deformação no aço laminado a frio. Este processo é a etapa seguinte ao resfriamento rápido primário. Ele consiste em submeter a tira a uma determinada temperatura e tempo, para o controle adequado da quantidade e forma dos precipitados de carbono na estrutura do aço laminado a frio. O tempo e a temperatura variam com o material processado. Na maioria dos ciclos a temperatura é cerca de  $400^{\circ}\text{C}$  e o tempo maior que 150 segundos.

#### Resfriamento Rápido Secundário

Tem a finalidade de resfriar rapidamente a tira a partir da temperatura final de encharque até  $160^{\circ}\text{C}$  (para algumas qualidades até  $210^{\circ}\text{C}$ ).

#### Resfriamento Brusco com Água

Tem a finalidade de resfriar bruscamente a tira por meio de spray de água e imersão da mesma até a temperatura abaixo de  $45^{\circ}\text{C}$ . Após esta etapa a tira é submetida ao processo de encruamento<sup>(7)</sup>.

### **3.1.2. Resultados Obtidos com a Alteração de Parâmetros do Processo**

Visando conhecer a influência dos parâmetros envolvidos no processo de recozimento contínuo, diversos estudos foram feitos. Foram avaliadas alterações da composição química, temperatura, taxas de resfriamento, etc. São mencionados à frente, alguns destes estudos para se ter uma noção da importância do controle das variáveis no

produto final. É importante destacar que para a simulação do processo nestes estudos foi utilizada a Gleeble.

Barbosa<sup>(2)</sup> em estudo com aços com características de "bake hardenability" (BH) mostrou a influência do teor de carbono e dos parâmetros operacionais de recozimento contínuo (temperaturas de recozimento e de início de resfriamento primário e taxa de resfriamento) nas propriedades mecânicas, características de conformabilidade e sensibilidade ao envelhecimento de aços acalmados ao alumínio com envelhecimento controlado. As variações, tanto de composição química quanto das condições operacionais simuladas neste trabalho, foram determinadas pela similaridade com os produtos e processos em escala industrial. Os aços com diferentes teores de carbono foram submetidos a ciclos térmicos de recozimento contínuo em uma máquina de ensaio Gleeble. Os resultados mostram alterações no valor de BH, nas características de conformabilidade, além de maior susceptibilidade ao envelhecimento natural. Embora a diminuição do teor de carbono tenha promovido um aumento do valor de BH, provocou também prejuízos às características de conformabilidade, além de uma maior susceptibilidade ao envelhecimento natural. Com relação às variáveis operacionais, o aumento da temperatura de recozimento contribuiu para diminuir a sensibilidade ao envelhecimento natural e o limite de escoamento, apesar de piorar o efeito de BH e diminuir a resistência mecânica. Dos parâmetros de processo avaliados, o que exerceu menor influência nas propriedades dos materiais foi a temperatura de início de resfriamento primário. Já a redução da taxa de resfriamento promoveu aumento no valor BH, apesar de aumentar a susceptibilidade ao envelhecimento natural e piorar os valores de alongamento<sup>(2)</sup>.

Barrado<sup>(1)</sup> estudou a influência da temperatura de encharque, temperatura de início de resfriamento rápido e temperatura de superenvelhecimento sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço "Dual Phase" 980 obtendo como resultados alterações no limite de escoamento em função da temperatura de recozimento, alterações do limite de resistência, influenciado pela temperatura de encharque e superenvelhecimento, e observou que a deformação total é influenciada pela temperatura de encharque, de início do resfriamento rápido e de superenvelhecimento. As amostras do material foram retiradas na linha industrial, após a saída do laminador de tiras a frio, para serem

submetidas à simulação do ciclo de recozimento na Gleeble<sup>(1)</sup>.

Rocha<sup>(6)</sup> estudou a influência de variáveis de recozimento contínuo na morfologia dos constituintes bifásicos laminados a frio da classe de limite de resistência de 600MPa e em suas propriedades mecânicas. As principais variáveis analisadas foram a temperatura de encharque, a temperatura de têmpera e a velocidade de processamento. Os resultados foram apresentados em função das alterações no limite de escoamento, limite de resistência e ductilidade. Neste estudo é destacado o perfeito controle dos parâmetros do processo de recozimento contínuo durante a simulação na Gleeble<sup>(6)</sup>.

Em estudo<sup>(8)</sup> em que o processo de recozimento contínuo possui taxa de resfriamento muito superior à utilizada na Usiminas (HGJC), é mostrada alternativa tecnológica já disponível no mercado para se aumentar a taxa de resfriamento rápido. Essa tecnologia utiliza uma névoa de água que oxida a superfície da tira. Tem como desvantagem a necessidade de se efetuar um pós-tratamento de decapagem da tira com posterior "flashing" de niquelamento para proteção da superfície ativada. Como principal vantagem, permite a obtenção de taxas de resfriamento rápido muito mais elevadas, que possibilitam a obtenção de aços de mais alta resistência mecânica, sem a necessidade de se "carregar" muito na sua composição química para aumentar sua temperabilidade<sup>(8)</sup>.

Destaque deve ser dado à curva de resfriamento rápido (figura 3.5) que ultrapassa o início do patamar de superenvelhecimento, ocorrendo a necessidade de aquecimento rápido. Essa condição, aqui desejada, apresenta similaridade com alguns resultados obtidos na Gleeble<sup>(8)</sup>.

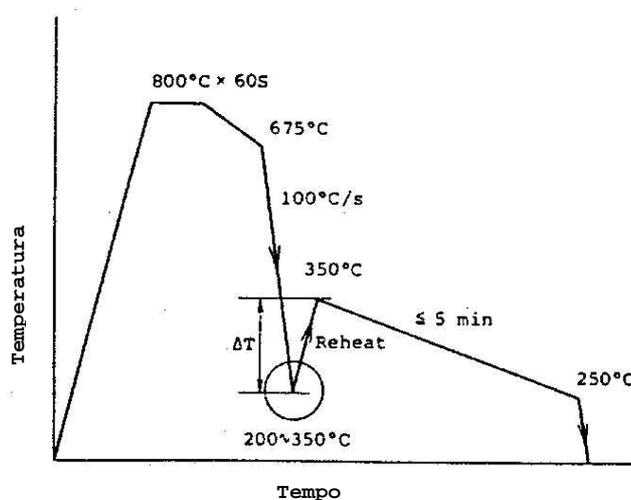


FIGURA 3.5 - Curva do perfil térmico do recozimento contínuo obtida em alternativa tecnológica encontrada no mercado<sup>(8)</sup>.

## 3.2. Simulação do Processo

### 3.2.1. A Gleeble

A utilização de simuladores termomecânicos permite obter condições próximas às condições de processos reais e este tipo de recurso tem sido utilizado em vários trabalhos de pesquisa. Entre os vários tipos de simuladores destaca-se a Máquina Gleeble, que é um sistema integrado de ensaios termomecânicos, com controle térmico e mecânico computadorizados<sup>(1)</sup>.

O sistema térmico promove o aquecimento da amostra por efeito Joule, permitindo o emprego de taxas de aquecimento de até 1000°C/s e, também, a manutenção de temperaturas estáveis. As garras possuem alta condutividade térmica e são refrigeradas a água, permitindo assim altas taxas de resfriamento. Os sistemas de resfriamento são diversificados, permitindo taxas desde 1°C/min, até mais de 1000°C/s. O controle da temperatura pode ser feito por meio de termopares ou por pirômetro de infravermelho, permitindo, dessa forma, a simulação de ciclos de aquecimento/resfriamento complexos<sup>(9)</sup>.

Na figura 3.6 são mostrados os principais componentes da Máquina Gleeble. O sistema mecânico da Gleeble consiste de um sistema servo-hidráulico em “loop” fechado, com capacidade de 10 toneladas em tração/compressão. A velocidade de deslocamento pode chegar a até 1000mm/s, simulando assim altas taxas de deformação. O controle fechado, via sinal de deslocamento, carga ou deformação por extensômetro, garante a precisão e a repetibilidade dos ensaios<sup>(9)</sup>.

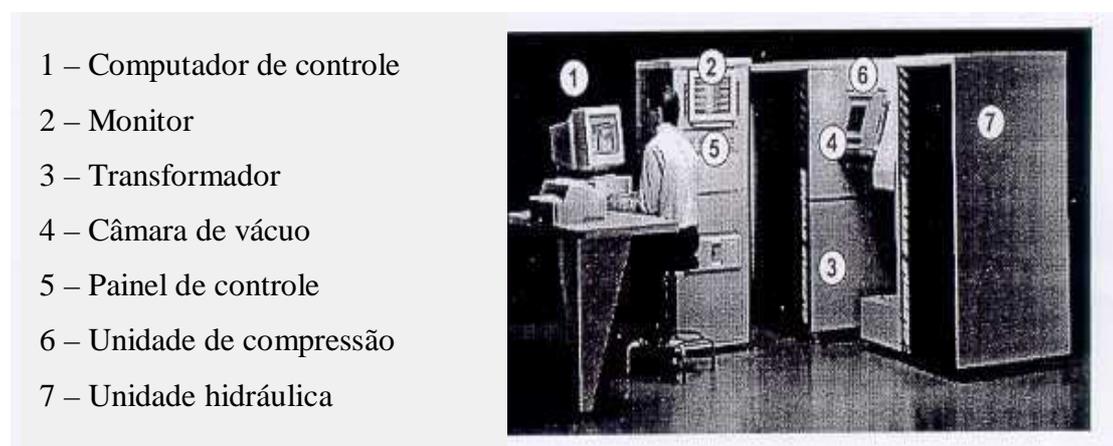


FIGURA 3.6 - Principais componentes da Máquina Gleeble<sup>(9)</sup>.

O sistema é composto por microcomputador externo e um processador interno, com capacidade de atuação simultânea ou independente, aumentando dessa forma a flexibilidade dos ensaios e da análise dos resultados<sup>(9)</sup>.

O sistema de controle digital fornece os sinais necessários para controlar as variáveis térmicas e mecânicas de ensaio, simultaneamente, por meio dos sistemas de “loop” fechado, térmico e mecânico<sup>(9)</sup>.

A Máquina Gleeble possui as seguintes aplicações<sup>(9)</sup>:

Simulação de processos de:

- lingotamento contínuo;

- laminação a quente;
- ciclos térmicos em soldagem;
- recozimento contínuo;
- tratamentos térmicos.

Ensaio mecânicos de:

- fadiga térmica/termomecânica;
- tração a quente/morno;
- tensão-deformação;
- fluência;
- compressão.

Estudos básicos de materiais:

- difusão;
- encruamento;
- relaxação de tensões;
- recristalização;
- cinética de precipitação;
- transformação de fases;
- propriedades físicas a altas temperaturas;
- fusão e solidificação;
- trincamento a quente;
- ductilidade a quente<sup>(9)</sup>.

### 3.2.2. Simulação do Recozimento Contínuo

A Gleeble reproduz, sobre uma amostra, dentro de uma câmara de vácuo ou não, a evolução de temperatura de uma tira passando pelos diversos fornos de uma linha de recozimento contínuo. Através do sinal de um termopar acoplado à amostra, o computador controla a temperatura da mesma. O aquecimento da amostra é feito pela passagem de corrente elétrica, podendo assim ser rápido e homogêneo. O resfriamento controlado pode ser lento ou rápido, dependendo do meio utilizado (gás, ar, mistura ar/água)<sup>(1)</sup>.

Na figura 3.7 é mostrado um desenho esquemático da câmara de vácuo, onde se vêem o termopar, a amostra presa nas garras e os bicos de resfriamento<sup>(1)</sup>.

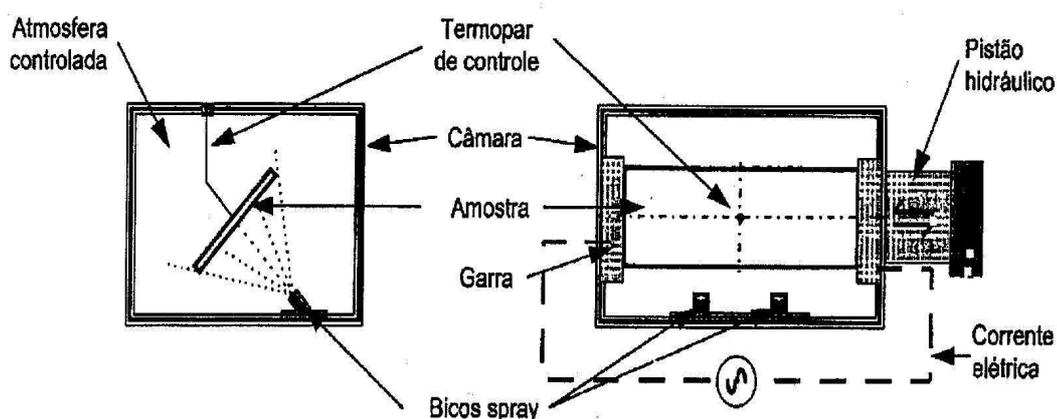


FIGURA 3.7 - Câmara de vácuo da Máquina Gleeble<sup>(1)</sup>.

Na figura 3.8 é mostrado um exemplo de esquema de amostra utilizada na simulação do processo de recozimento contínuo, bem como os locais de retiradas dos corpos-de-prova para os ensaios posteriores<sup>(1)</sup>. A largura da amostra é fixa e limitada pela garra enquanto o comprimento deverá ser o mais longo possível (até 260mm – limitado pelas dimensões da câmara), podendo variar, já que não existe uma norma específica para este ensaio<sup>(9)</sup>. Deve-se ressaltar que a retirada dos corpos-de-prova para ensaio de tração e

para metalografia é feita, segundo o fabricante, em uma região onde há homogeneidade das condições de processo simuladas com uma variação máxima de  $\pm 10^{\circ}\text{C}^{(1)}$ .

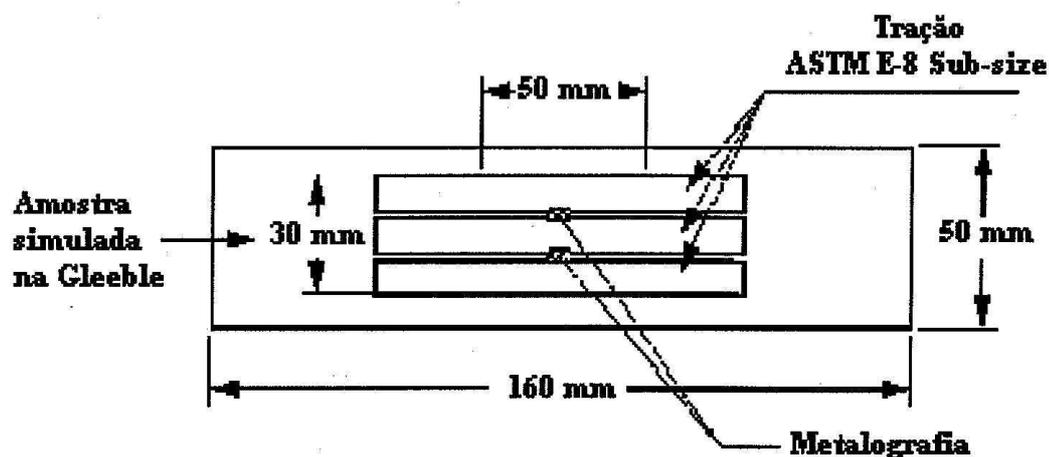


FIGURA 3.8 - Exemplo de amostra para simulação na Máquina Gleeble<sup>(1)</sup>.

Na figura 3.9 é mostrado um exemplo de ciclo comum em linhas de recozimento contínuo, como no CAPL da Usiminas, simulado na Máquina Gleeble. Também são mostrados os perfis térmicos relativos a três termopares (TC1, TC2 e TC3), colocados em pontos distintos, dentro da região de distribuição homogênea de temperatura na amostra (levantamento feito pelo fabricante da Gleeble). Observa-se a coincidência dos três perfis de temperatura, confirmando a homogeneidade térmica dentro da região útil da amostra<sup>(1)</sup>.

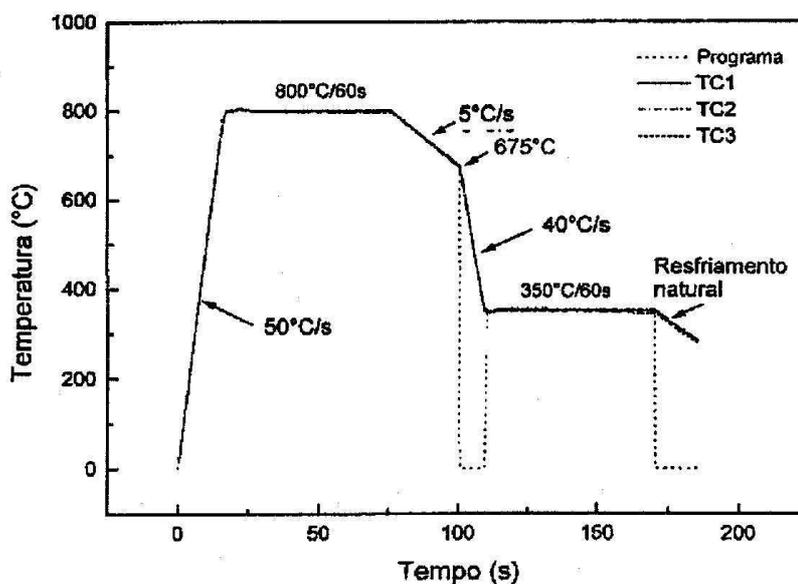


FIGURA 3.9 – Exemplo de ciclos térmicos de recozimento contínuo<sup>(1)</sup>.

Inicialmente é efetuada a soldagem do termopar de controle na amostra e sua montagem nas garras, dentro da câmara de ensaio<sup>(9)</sup>. Logo após, é feita a selagem da câmara com argônio, de forma a proteger a amostra contra oxidação. Tanto no aquecimento (por efeito Joule, com a passagem de corrente fornecida por uma fonte de potência de 150kVA), quanto no resfriamento, o controle é feito por um módulo térmico que atua segundo uma curva de temperatura previamente programada. Durante a preparação e o ajuste do ciclo, antes do teste, podem ser soldados à amostra três termopares “tipo K” (Chromel/Alumel – temperatura máxima de 1370°C), para verificar parcialmente a uniformidade térmica na área útil da amostra (onde serão retirados os corpos-de-prova) e se o ciclo térmico está sendo atingido na região desejada (figura 3.10). Uma vez ajustado o ciclo visado, todo o monitoramento passa a ser feito continuamente através do termopar central (Tc1)<sup>(2)</sup>.

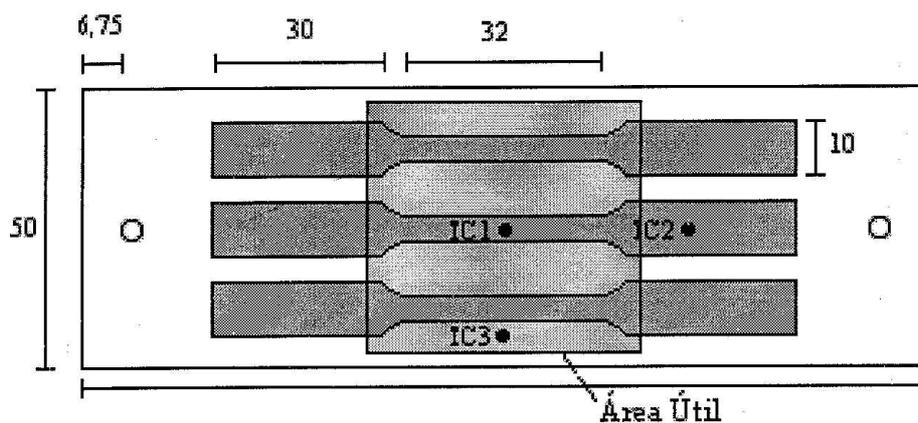


FIGURA 3.10 - Ilustração esquemática da amostra utilizada para as simulações dos ciclos térmicos na Gleeble, enfatizando as posições dos termopares (Tc1, Tc2 e Tc3) e dos corpos-de-prova para ensaios de tração posteriores<sup>(2)</sup>.

Em estudo realizado anteriormente<sup>(10)</sup>, foram apresentados recursos da Gleeble e as variações da temperatura no sentido radial e longitudinal para corpos-de-prova cilíndricos, com comprimentos e diâmetros variados, utilizando as garras opcionais que o aparelho disponibiliza para o usuário, durante o processo de aquecimento e resfriamento. Destaca-se neste estudo o levantamento térmico do corpo-de-prova ao longo de seu comprimento durante o processo de aquecimento e a diferença e correções necessárias para minimizá-las, quando é efetuado um resfriamento natural. Para melhor compreensão dos fundamentos de transferência de calor durante o aquecimento e resfriamento da amostra na Gleeble, Chen faz uma análise das equações que governam a condução de calor, entretanto, todo o estudo se fixa ao uso de amostras cilíndricas<sup>(10)</sup>.

### 3.3. Controle do Sistema de Resfriamento Rápido

#### 3.3.1. O Resfriamento por Atomização

Para a troca de calor e obtenção de melhores coeficientes em processos convectivos, ou seja, troca de calor por movimento aleatório molecular e por movimento global

(macroscópico), podem ser utilizados jatos de gás (bicos de atomização). Estes jatos são tipicamente descarregados em ambientes em repouso a partir de um bico arredondado ou de uma fenda. Normalmente, o jato é turbulento e, na saída do bico, é caracterizado por um perfil de velocidade uniforme<sup>(11)</sup>. Os bicos de atomização podem possuir diversos formatos, apresentar diferentes padrões de pulverização e utilizar diferentes tipos de fluidos para a obtenção do desempenho desejado, conforme mostrado nos exemplos da figura 3.11<sup>(12)</sup>.

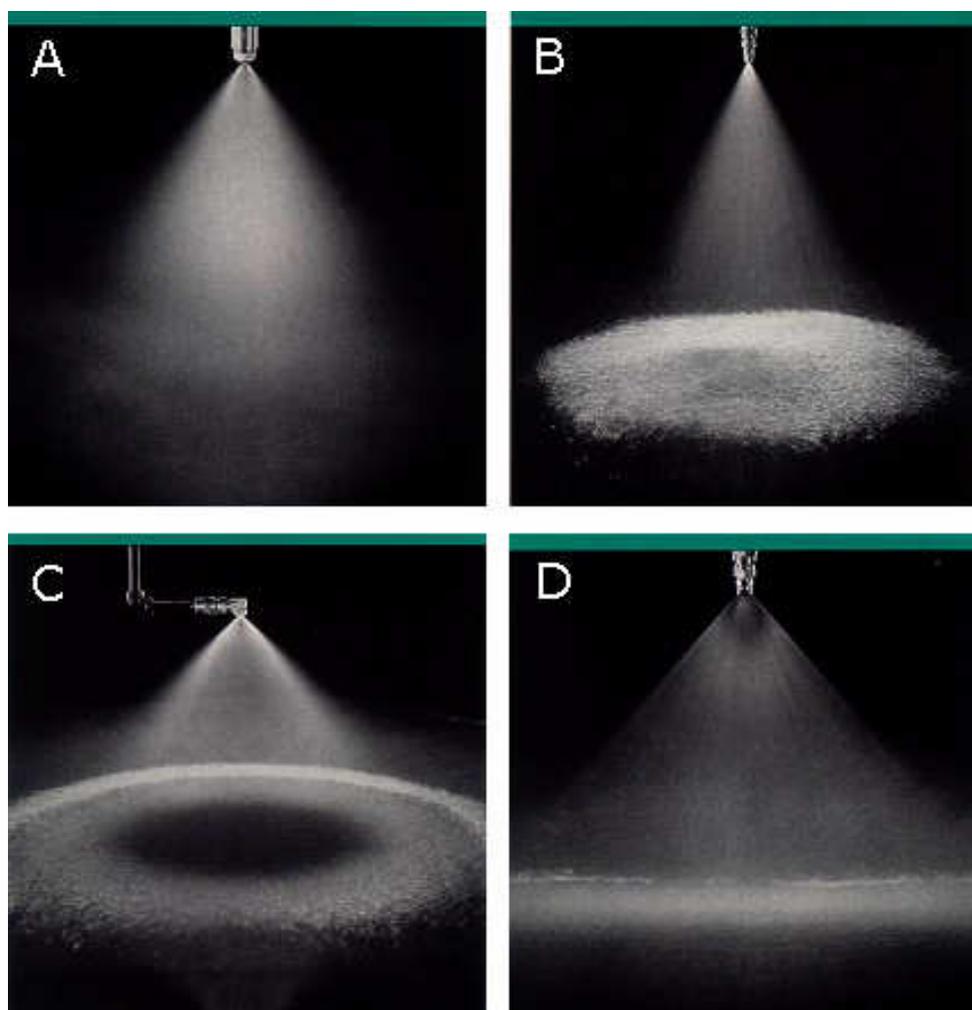


FIGURA 3.11 - Alguns tipos de bicos de atomização (A – Jato fino; B – Cone cheio; C – Cone oco; D – Jato em leque)<sup>(12)</sup>.

Um estudo comparativo entre o resfriamento de chapas aquecidas quando se utiliza água aplicada por jato e por atomização com ar comprimido destaca que o máximo coeficiente de transferência de calor obtido foi de  $3000\text{W/m}^2\text{K}$  e teve como limite o ponto de Leidenfrost<sup>(13)</sup>.

O ponto de Leidenfrost é alcançado quando a temperatura da chapa quente encontra-se muito acima da temperatura de ebulição do fluido, provocando a vaporização quase instantânea do mesmo e formando um colchão de vapor, dificultando o contato do jato com a placa e, com isso, diminuindo o fluxo de calor transferido para a gota. A espessura da camada de vapor, apesar de ser pequena, aproximadamente  $0,2\text{mm}$ , é suficiente para diminuir drasticamente o fluxo de calor para a gota.

A redução da temperatura de uma chapa aquecida associada com o controle de resfriamento através da evaporação da água envolve o processo de transferência de calor de uma chapa que possui temperatura superficial muito mais elevada que a da ebulição da água. A relação entre fluxo de calor ou coeficiente de transferência de calor e a temperatura superficial é usualmente representada usando a curva de evaporação apresentada na figura 3.12, com destaque para a influência da temperatura de Leidenfrost no fluxo de calor<sup>(14)</sup>.

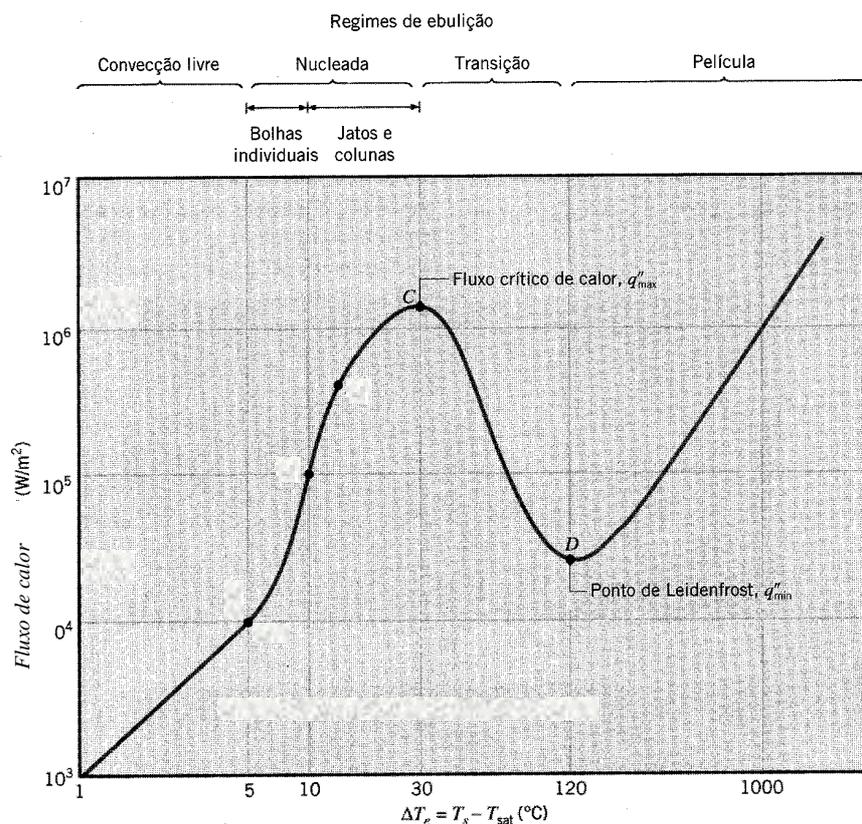


FIGURA 3.12 - Curva típica de ebulição para a água representando a relação entre o fluxo de calor e o excesso de temperatura em uma superfície de chapa aquecida ( $\Delta T_{excesso} = T_{superfície} - T_{saturação}$ )<sup>(11)</sup>.

A transferência de calor na ebulição é um processo muito complicado e tem sido estudado durante muitos anos por numerosos pesquisadores<sup>(14)</sup>. Muitos fatores podem influenciar o perfil e a magnitude da curva de evaporação e estão relacionados com a interação entre a água e a superfície do produto que está sendo resfriado, incluindo a temperatura, qualidade, fluxo e pressão da água, tipo e tamanho do bico de atomização, morfologia, tipo e temperatura do material a ser resfriado<sup>(14)</sup>.

Um dos mais importantes parâmetros envolvidos na extração do calor é o “momentum” da corrente d’água quando em contato com a superfície. Para uma determinada configuração do bico de atomização, a especificação da pressão ou fluxo de água determinará a velocidade do jato e o “momentum”. Muitos estudos têm examinado o efeito destes parâmetros na transferência de calor com água em evaporação. Usualmente aumentam a velocidade do jato, o fluxo ou a pressão da água, resultando em um aumento da magnitude da transferência de calor na evaporação a uma dada temperatura

e também a um aumento da temperatura de Leidenfrost. Entretanto, se a pressão de impacto do jato ou a velocidade for muito elevada, pode rechaçar a água da superfície e consequentemente reduzir a transferência de calor<sup>(14)</sup>.

Verificou-se que a atomização pode criar duas regiões durante o resfriamento: a área de impacto direto do jato (região 1) e a área ao redor (região 2), onde a água flui horizontalmente em consequência da força do spray, como mostrado esquematicamente na figura 3.13. O fluxo de calor na região 1 é muito maior que o da região 2 devido ao alto “momentum” da água nessa região<sup>(14)</sup>.

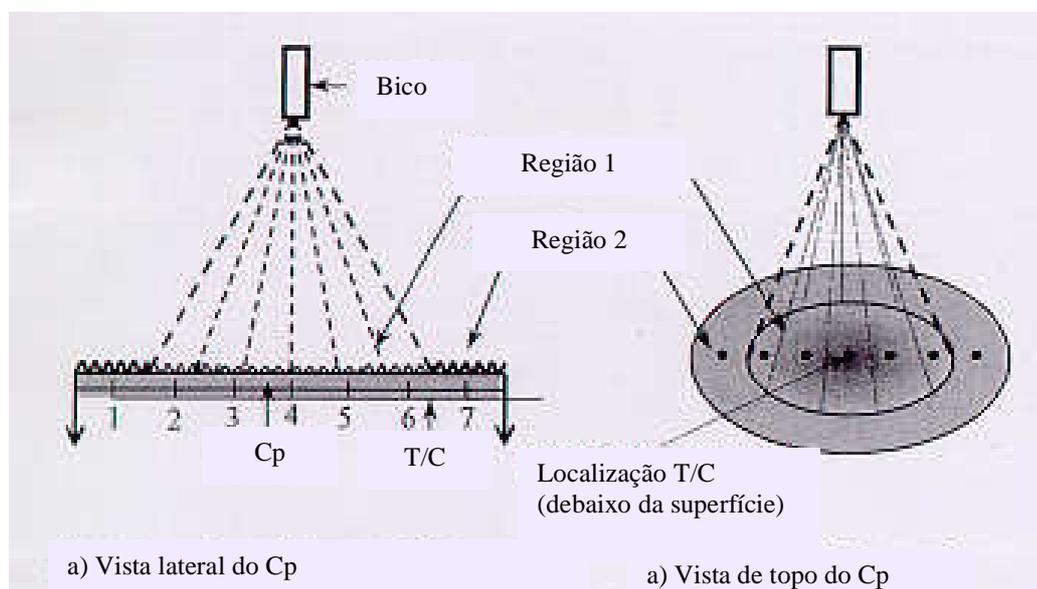


FIGURA 3.13 - Desenho esquemático mostrando um jato de água e seu fluxo padrão na superfície da amostra<sup>(14)</sup>.

O efeito da variação da vazão de água na transferência de calor na ebulição pode ser observado na figura 3.14. Quando a vazão aumenta de 0,63 l/s para 3,15 l/s o fluxo de calor aumenta de  $5 \times 10^6 \text{ W/m}^2$  para  $8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ . Outro fenômeno importante é que o filme de evaporação fica evidente quando a vazão de água é baixa. A temperatura de Leidenfrost irá aumentar se a vazão de água aumentar também, desde que o “momentum” da água de impacto seja grande o suficiente para penetrar no filme de vapor. A temperatura de Leidenfrost aumenta de  $\sim 520^\circ\text{C}$  para uma vazão de 0,63 l/s para  $\sim 580^\circ\text{C}$  para vazão de 1,89 l/s na região 1<sup>(14)</sup>.

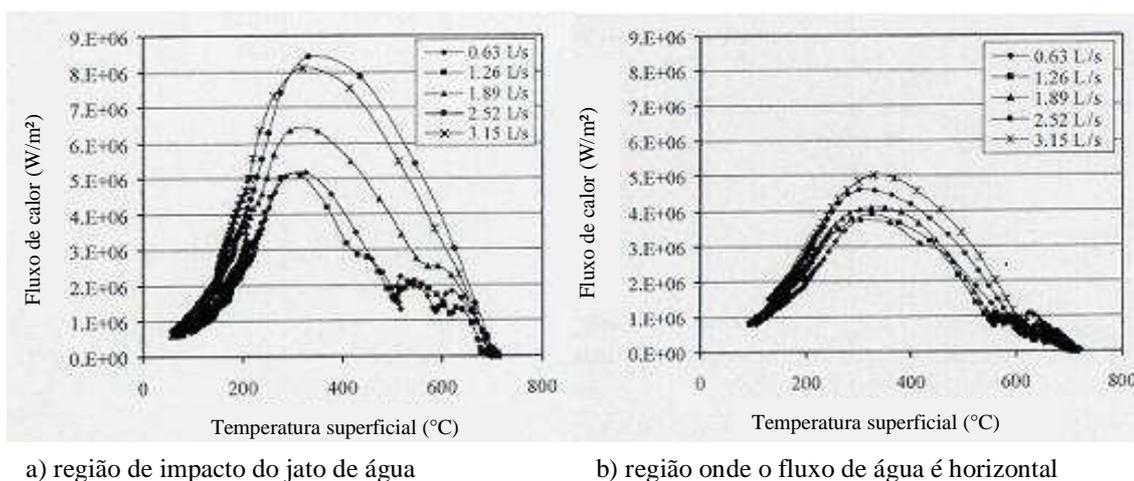


FIGURA 3.14 - Efeito da vazão de água no fluxo de calor na ebulição ( $T_{H_2O} = 13^\circ\text{C}$ , distância do bico à amostra = 157mm e  $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ )<sup>(14)</sup>.

Outro importante fator que tem influência no fluxo de calor durante a têmpera em água é a temperatura da água<sup>(14)</sup>. Muitos estudos apresentaram a faixa de temperatura da água como estando entre 10 e 100°C. A capacidade de resfriamento da água é fortemente afetada pela sua temperatura quando esta se encontra superior a 30°C. Na figura 3.15 é apresentado o efeito da temperatura da água no fluxo de calor na ebulição nas regiões 1 e 2, citadas anteriormente. Quando a temperatura da água aumenta, o fluxo de calor e a temperatura de Leidenfrost diminuem. Temperaturas inferiores a 20°C apresentam pouco efeito na transferência de calor durante a têmpera em água<sup>(14)</sup>.

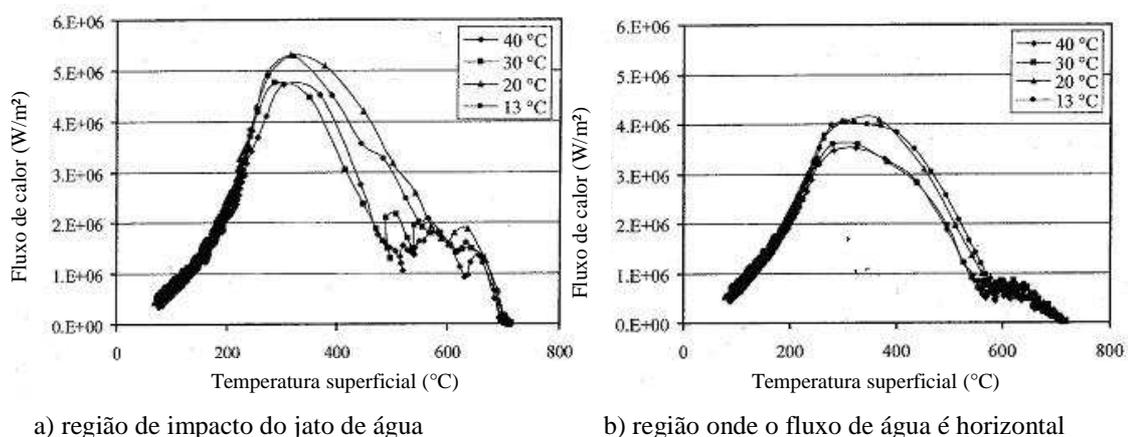


FIGURA 3.15 - Efeito da temperatura de água no fluxo de calor na ebulição (Vazão = 1,26 l/s, distância do bico à amostra = 157mm e  $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ )<sup>(14)</sup>.

Como mostrado na figura 3.16, três diferentes distâncias do bico de atomização à superfície da amostra foram testadas<sup>(12)</sup>. Esta alteração provocou dois efeitos: quando a distância é reduzida, a região de impacto do jato (região 1), obviamente, também reduz; a redução da distância provoca um maior rechaço da água e dessa maneira o fluxo de calor na região 1 diminui. O fluxo de calor para o bico a 157mm da amostra é maior que o a 119 e que o a 81mm<sup>(14)</sup>.

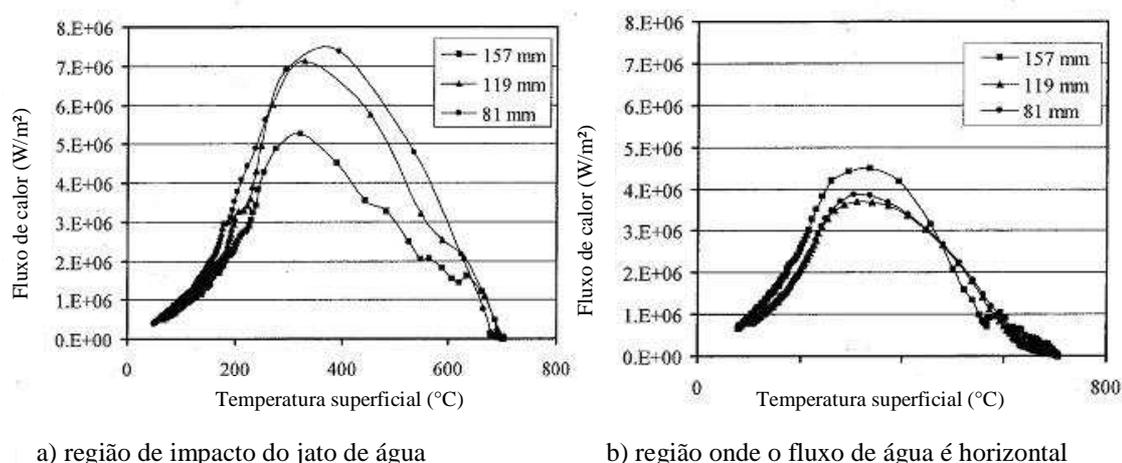


FIGURA 3.16 - Efeito da distância do bico à amostra no fluxo de calor na ebulição ( $T_{H_2O} = 13^\circ\text{C}$ , Vazão = 1,26 l/s e  $D_{\text{Bico}} = 12,7\text{mm}$ )<sup>(14)</sup>.

Foram feitos experimentos utilizando dois bicos de diâmetros diferentes<sup>(12)</sup>. Um dos efeitos da utilização desses bicos é a mudança da área de impacto do jato de água. Considerando que a mesma vazão de água foi usada em ambos os casos, o fluxo de água por unidade de área será diferente para cada bico. O efeito do diâmetro do bico é mostrado claramente na figura 3.17, sendo que o de menor diâmetro apresenta valores mais elevados de fluxo de calor. O ponto de Leidenfrost também é influenciado pelo diâmetro do bico e ele é menor para o bico maior<sup>(14)</sup>.

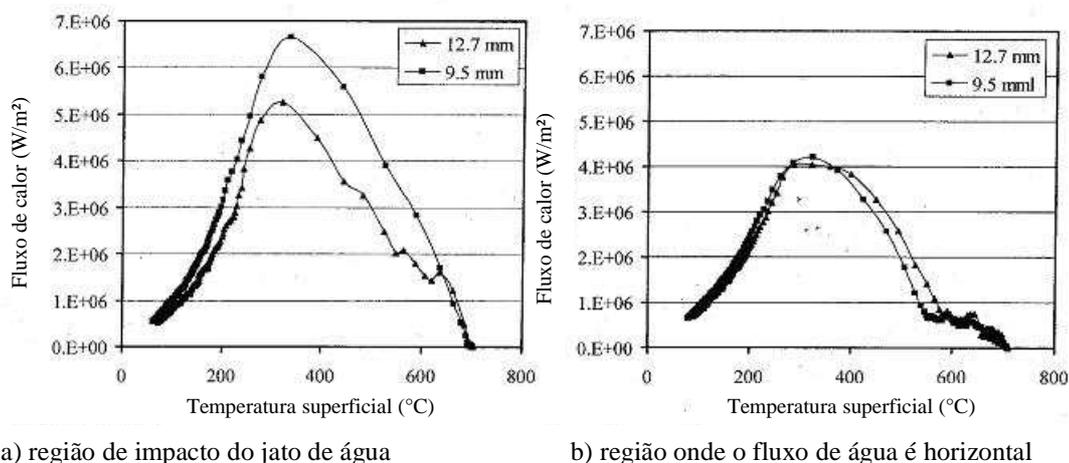


FIGURA 3.17 - Efeito do diâmetro do bico no fluxo de calor na ebulição ( $T_{H_2O} = 13^\circ\text{C}$ , Vazão = 1,26 l/s e distância do bico à amostra = 157mm)<sup>(14)</sup>.

Em estudo desenvolvido por Pushmann<sup>(13)</sup> foram investigadas as influências da densidade de ataque (distribuição da água atomizada), características do spray, diâmetro da gota atomizada, pressão do ar de atomização, velocidade da gota e, novamente, temperatura da superfície na transferência de calor<sup>(13)</sup>.

Por intermédio de ensaios de ataque de jato de água verificou-se, em um plano colocado a 200mm do bico de atomização, que a densidade de ataque está relacionada com a distância do ponto de medição ao eixo central do bico de atomização. Utilizando uma vazão constante de água (7kg/h), variou-se a pressão do ar de atomização de 0,2MPa até 0,5MPa, gerando curvas isobáricas que são apresentadas na figura 3.18. O resultado obtido indica que a maior densidade de ataque é obtida no centro do spray e, para uma vazão de água constante, esta densidade decresce com o aumento da pressão do ar de atomização<sup>(13)</sup>.

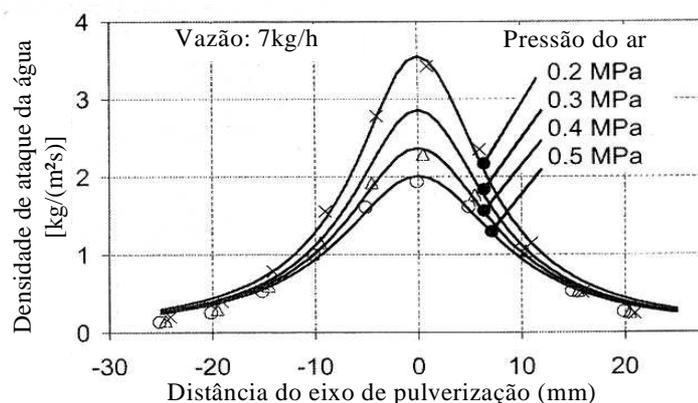


FIGURA 3.18 - Curva da densidade de ataque da água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas<sup>(13)</sup>.

O gráfico apresentado na figura 3.19 mostra a distribuição do tamanho das gotas atomizadas para vazão de água constante de 7kg/h e pressões de ar entre 0,2, 0,3 e 0,4MPa. As maiores gotas foram medidas na região central, no eixo de atomização<sup>(13)</sup>.

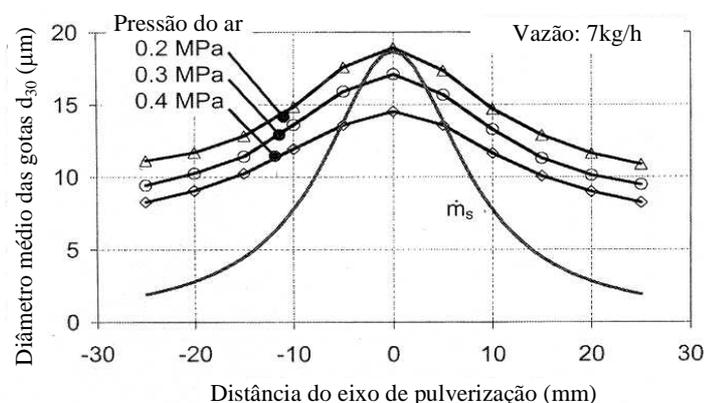


FIGURA 3.19 - Curva de distribuição do diâmetro das gotas de água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas<sup>(13)</sup>.

Para determinação da velocidade das gotas atomizadas foi mantida constante a vazão de água através do bico (7kg/h) para uma pressão do ar de atomização de 0,2, 0,3 e 0,4MPa, sendo que as maiores velocidades foram obtidas no centro do spray para 0,2MPa, 0,3MPa e 0,4MPa  $v=24\text{m/s}$ ,  $28\text{m/s}$  e  $31\text{m/s}$  respectivamente. Para uma vazão

de água constante, a velocidade das gotas aumenta com o aumento da pressão (figura 3.20)<sup>(13)</sup>.

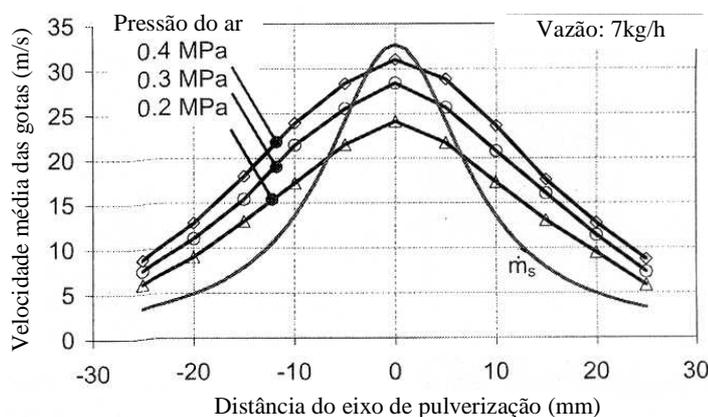


FIGURA 3.20 - Curva de distribuição da velocidade das gotas de água em um plano colocado a 200mm do bico de atomização para pressões de ar definidas<sup>(13)</sup>.

A transferência de calor utilizando spray de atomização é a soma das transferências de calor provocada pelo ar de atomização e pelas gotas atomizadas. Como apresentado na figura 3.21, o coeficiente de transferência de calor depende da pressão de atomização e da vazão de água. Para ambos os níveis apresentados (pressão 0,2 e 0,5MPa e vazão de água de 10 e 3kg/h, respectivamente), o coeficiente de transferência de calor independe da temperatura da superfície se esta se encontra acima da temperatura de Leidenfrost, que é de aproximadamente 300°C<sup>(13)</sup>.

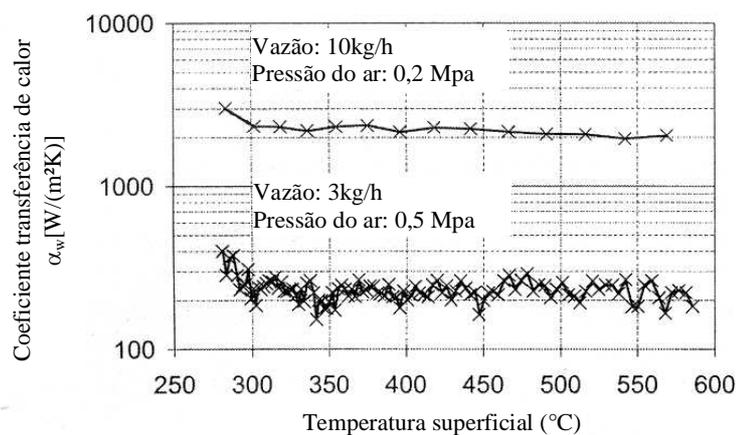


FIGURA 3.21 - Curva do coeficiente de transferência de calor em função da temperatura superficial para vazão de água de 10 e 3kg/h e pressão de ar de 0,2 e 0,5MPa, respectivamente<sup>(13)</sup>.

Na figura 3.22 é apresentada a curva do coeficiente de transferência de calor dependendo da densidade de ataque para têmpera por evaporação, têmpera por spray de água e têmpera por água atomizada. A densidade de ataque exerce uma grande influência no coeficiente de transferência de calor<sup>(13)</sup>.

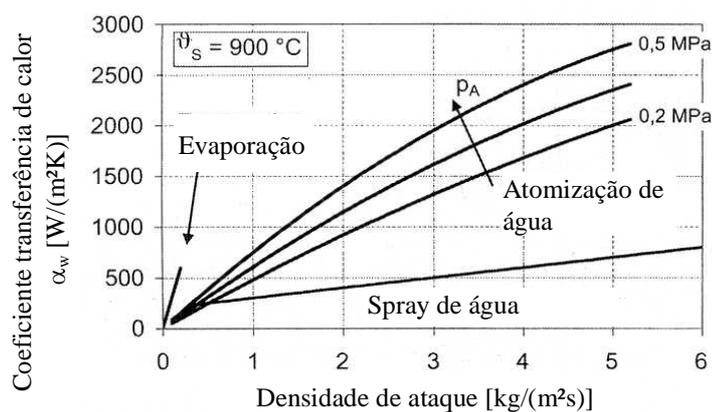


FIGURA 3.22 - Curva do coeficiente de transferência de calor em função da densidade de ataque para têmpera por evaporação, por spray de água e por atomização de água<sup>(13)</sup>.

Uma maneira de mostrar que a transferência de calor não é somente influenciada pela vazão de água é apresentada a seguir<sup>(15)</sup>. Um bico de atomização com 80° foi montado a 300mm de uma placa aquecida à temperatura inicial de 1100°C. A vazão de água foi fixada em 10 l/min para dois ensaios. No primeiro, a vazão de ar foi de 30m<sup>3</sup>/h e no segundo de 15m<sup>3</sup>/h. A mudança destes parâmetros provocou alterações no tamanho e velocidade das gotas. O resultado dos ensaios é apresentado na figura 3.23 onde existem duas curvas de coeficiente de transferência de calor (experiência 1 e 2). Pode ser verificado que a intensidade de resfriamento é significativamente diferente mesmo com a manutenção da vazão de água. O valor médio para o coeficiente convectivo no ensaio 1 é de 860W/m<sup>2</sup>K e para o ensaio 2 de 510W/m<sup>2</sup>K, com uma diferença de aproximadamente 40%<sup>(15)</sup>.

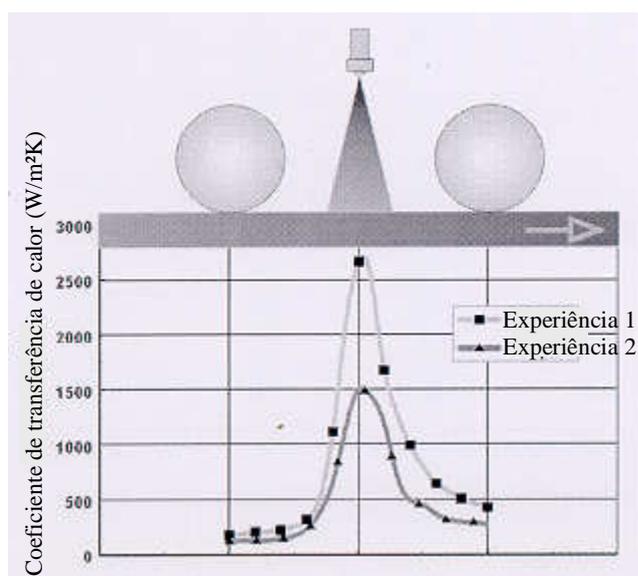


FIGURA 3.23 - Coeficiente de transferência de calor em uma área sob jato atomizado, usando bicos com mesma vazão de água e padrões idênticos de spray, porém com mudança nos tamanhos e velocidade das gotas<sup>(15)</sup>.

Na figura 3.24 são apresentadas as medições de três parâmetros durante uma atomização. Os dados foram obtidos para idênticas pressões de atomização. O parâmetro avaliado com mais frequência é a distribuição do líquido<sup>(15)</sup>.

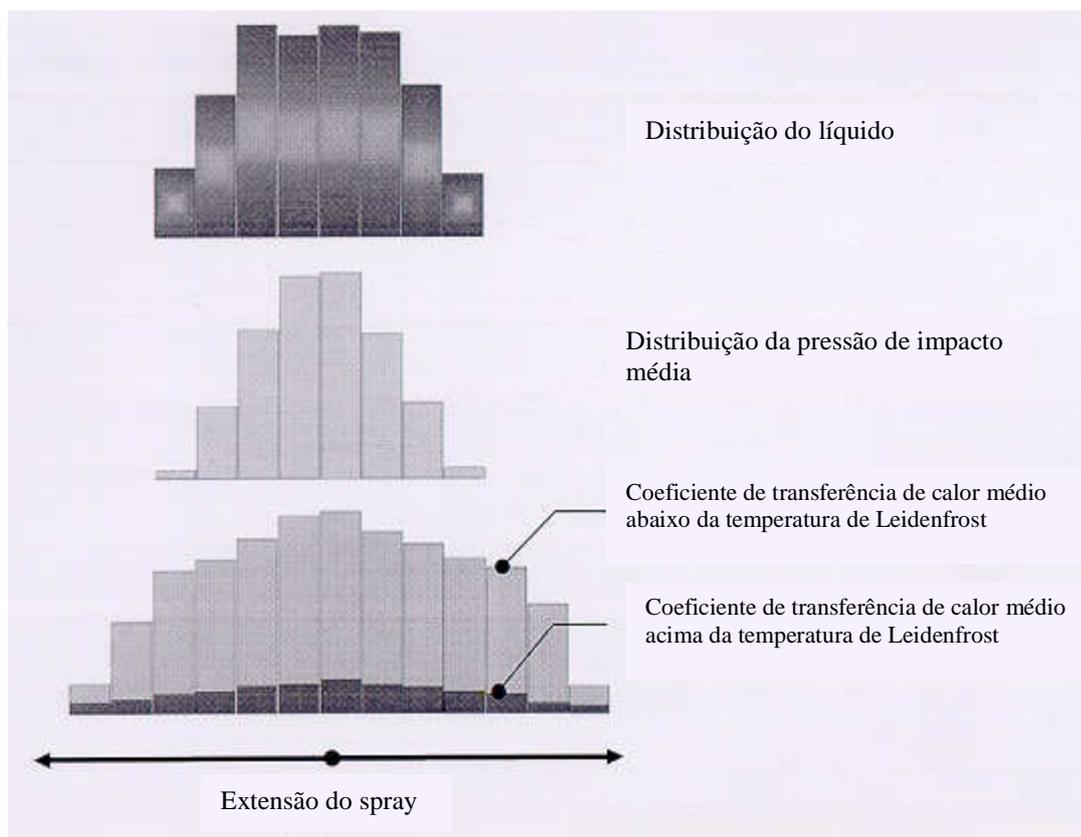


FIGURA 3.24 - Distribuição dos parâmetros ao longo da área sob o spray<sup>(15)</sup>.

Grandes esforços são despendidos no projeto para obtenção de bicos com intensidade de resfriamento constante ao longo da área atomizada. Medições da distribuição do coeficiente de transferência de calor mostram que mesmo uma distribuição igual do líquido não garante um coeficiente constante. Grupos de pesquisadores têm procurado correlacionar a pressão de impacto (IP) com o coeficiente convectivo, o que também é um caminho difícil. Como pode ser visto na figura 3.24, a distribuição real do coeficiente de transferência de calor é muito mais ampla que a distribuição da IP<sup>(15)</sup>.

A função de um atomizador é a de provocar a desintegração de um líquido em gotas confinadas a uma gama de tamanhos específicos e com uma distribuição controlada no espaço<sup>(14)</sup>. O princípio fundamental da desintegração de um líquido consiste em aumentar a sua área superficial até que esta se torne instável e se desintegre. A quantidade de energia teoricamente necessária é o aumento da energia superficial

somada a energia necessária para vencer as forças viscosas, mas na prática, esta é apenas uma fração da energia necessária. O processo pelo qual se produzem gotas a partir de uma corrente de líquido depende da natureza do fluxo no atomizador, isto é, se o fluxo é laminar ou turbulento, de que modo a energia é transferida ao líquido e as propriedades da atmosfera ambiente. Todavia, o mecanismo básico não é afetado por estas variáveis e consiste essencialmente na quebra de fios instáveis de líquido em fiadas de gotas. A teoria diz que uma coluna livre de líquido é instável se o seu comprimento for maior que o seu perímetro e que, para um líquido não viscoso, o comprimento de onda da perturbação que crescerá mais rapidamente em amplitude é 4,5 vezes o diâmetro. Um fio uniforme quebrar-se-á numa série de gotas de mesmo diâmetro, separadas uma das outras por uma ou mais gotas satélites. Porém, devido ao carácter heterogêneo do processo de atomização, produzem-se fios não uniformes e isto origina uma larga gama de tamanho de gotas<sup>(16)</sup>.

Para fornecer-se uma grande quantidade de energia para desintegração do jato líquido utilizam-se atomizadores de dois fluidos, quando uma corrente de gás a alta velocidade esbarra num jato ou filme líquido, formando, dessa maneira, uma maior área superficial. A gama de caudais que se pode usar é larga, porque se pode controlar independentemente a alimentação de líquido e a energia para atomização. Quando o gás esbarra com um jato líquido, a dimensão média das gotas é dada aproximadamente por<sup>(16)</sup>:

$$d_s = \frac{5,85}{u_r} * \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} + 0,060 * \left( \frac{\mu}{\sqrt{\sigma\rho}} \right)^{0,45} * \left( \frac{1000}{j} \right)^{1,5} \quad (3.1)$$

onde:

$d_s$  é o diâmetro médio em superfície (cm);

$j$  é o quociente entre os caudais volumétricos de gás e líquido, à pressão

atmosférica;

$u_r$  é a velocidade do gás relativa ao líquido (cm/s);

$\mu$  é a viscosidade do líquido (Poise);

$\rho$  é a massa específica do líquido (g/cm<sup>3</sup>);

$\sigma$  é a tensão superficial (dina/cm)<sup>(16)</sup>.

Consegue-se uma atomização mais eficiente espalhando o líquido como um filme antes do impacto<sup>(14)</sup>.

Apesar do grau de dificuldade, concluiu-se em outro estudo<sup>(17)</sup> que é possível se obter uma correlação entre o coeficiente convectivo de transferência de calor de um sistema de atomização com: a pressão de água, distância do bico de atomização à placa, tipo e inclinação do bico de atomização. Para a obtenção desta correlação foi criada a variável pressão de impacto (IP). Foram desenvolvidos dois dispositivos para o desenvolvimento deste estudo<sup>(17)</sup>.

O primeiro constou de um sistema composto por um carro de transporte do corpo-de-prova, motor de passo, sistema de controle de pressão da água, sistema para controle do ângulo e altura do bico, e corpo-de-prova aquecido (figura 3.25). Durante os ensaios, um termopar inserido no corpo-de-prova efetuou o levantamento da temperatura durante a passagem sob o jato de água, e o perfil térmico foi registrado em um sistema de aquisição de dados<sup>(17)</sup>.

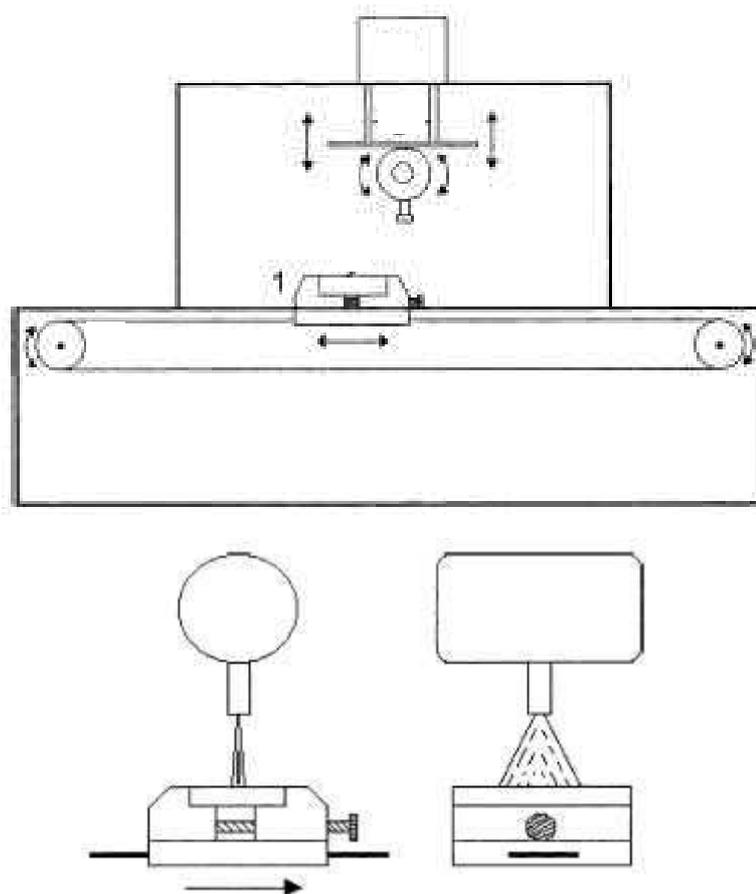


FIGURA 3.25 - Ilustração esquemática do equipamento desenvolvido para levantamento do perfil térmico de um corpo-de-prova aquecido após passar por um jato de água<sup>(17)</sup>.

Um segundo dispositivo foi desenvolvido e era composto de uma célula de carga, com área de contato conhecida, montada em um sistema de movimentação (figura 3.26). Ao passar sob o jato de água, a força de impacto da água gera uma força e esta é medida pela célula de carga. A movimentação da célula ao longo da área de ataque do jato permitiu traçar um perfil da força do jato (figura 3.27). A força registrada dividida pela área (conhecida) determina a IP. Foram efetuados ensaios para cinco pressões de atomização, cinco posições do bico em relação à placa (altura do spray) e para um ângulo do spray constante<sup>(17)</sup>.

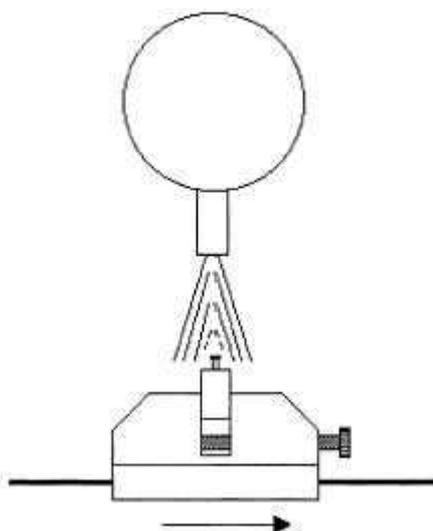


FIGURA 3.26 - Ilustração esquemática do equipamento desenvolvido para levantamento do perfil de força após um corpo-de-prova passar por um jato de água<sup>(17)</sup>.

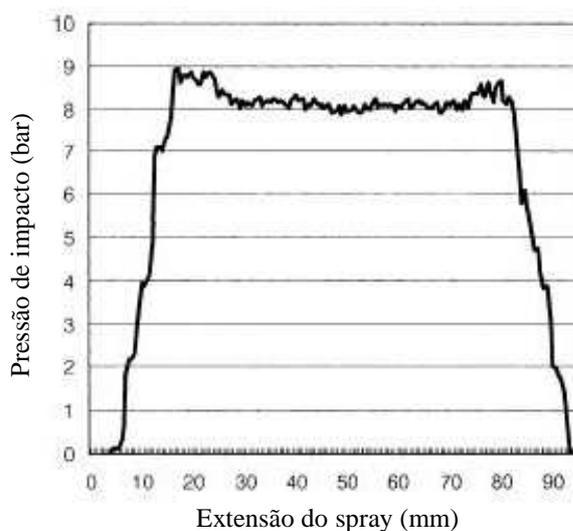


FIGURA 3.27 - Curva da distribuição da Pressão de Impacto em função da posição relativa de medição no corpo-de-prova<sup>(17)</sup>.

Para uma elevação da pressão do spray e uma redução da altura do bico, a IP correspondente aumenta. A variação da IP é mostrada na figura 3.28 para alturas do bico de 100, 120, 140, 160 e 180mm<sup>(17)</sup>.

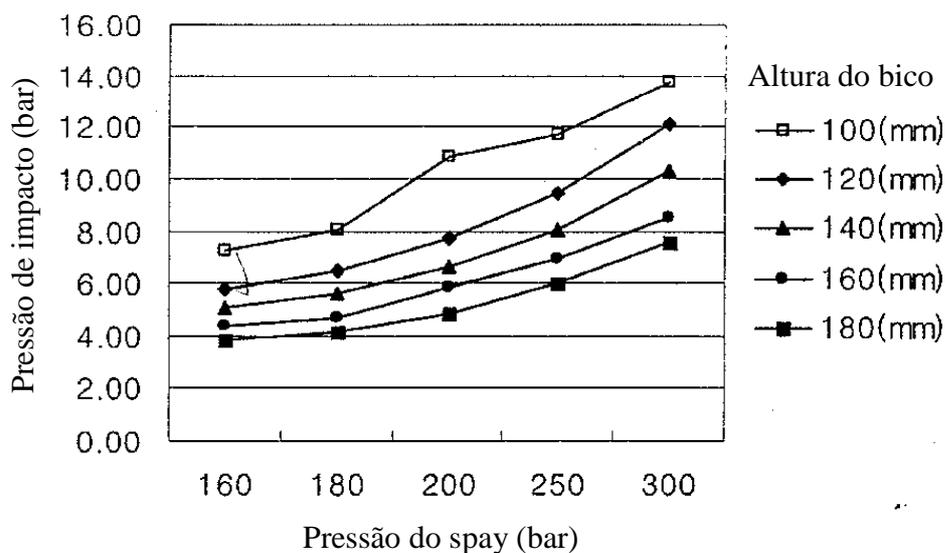


FIGURA 3.28 - Apresentação da variação da IP com a pressão do “spray”<sup>(17)</sup>.

Utilizando método de diferenças finitas, os testes experimentais foram comparados com o modelo numérico, e, por atribuição de valores para o “h” (coeficiente convectivo) foi gerada a equação abaixo<sup>(17)</sup>.

$$h = (4,4265 \cdot IP + 7,3670) \times 10^4 \quad (3.2)$$

onde:

h é o coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>°C);

IP é a pressão de impacto do jato de água (bar).

Dessa maneira, pode-se obter o coeficiente convectivo através do conhecimento da pressão de impacto<sup>(17)</sup>.

### 3.3.2. O Resfriamento Rápido na Gleeble

O sistema utilizado na Gleeble para simular o resfriamento rápido do processo de recozimento contínuo é composto de dois cilindros de água, uma linha de nitrogênio,

válvulas solenóides, dois bicos de atomização e termopar para acompanhamento e controle da temperatura. Durante o processo, o termopar de controle se encontra soldado em uma das faces da amostra e os bicos de atomização atuam na face oposta, provocando o resfriamento rápido<sup>(9)</sup>.

O ciclo desejado é inserido no sistema e é efetuada uma simulação para execução de ajustes. A amostra após alcançar a temperatura inicial do resfriamento rápido é exposta a jatos de água/gás e a temperatura superficial determina o tempo de manutenção do jato. Após o fechamento das válvulas solenóides, responsáveis pela liberação da passagem da água/gás, o sistema de aquecimento por efeito Joule é acionado, mantendo a temperatura da amostra constante e iniciando a fase de superenvelhecimento<sup>(9)</sup>.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão discutidos os aspectos relativos aos materiais e ensaios utilizados para se conhecer e avaliar o processo de simulação do recozimento contínuo na Gleeble e possibilitar propor melhorias para o mesmo.

### 4.1. Processo Geral

A Gleeble vem sendo utilizada para a simulação do processo de recozimento contínuo refazendo ciclos térmicos com taxas de resfriamento rápido de até 40°C/s em amostras com espessura de 0,7mm até 2,0mm. Para essas condições e para os diversos tipos de aços processados na linha de recozimento contínuo da Usiminas, os parâmetros do ciclo variam em largas faixas. Contudo, para a realização deste estudo, os parâmetros utilizados nas simulações realizadas foram fixados, tomando como base um ciclo de recozimento típico da linha industrial da USIMINAS. Dessa forma, o ciclo de recozimento foi assim definido:

- aquecimento inicial das amostras, a uma taxa de 10°C/s, até alcançar a temperatura de 800°C;
- manutenção do amostra à *temperatura de encharque* por 50s;
- “resfriamento lento” a uma taxa de 15°C/s, até atingir a temperatura de início do “resfriamento primário ou acelerado” (675°C);
- “resfriamento acelerado” a taxas de resfriamento próximas a 30°C/s, 40°C/s e 50°C/s. Estas taxas de resfriamento médias visadas foram obtidas dividindo-se a diferença entre as temperaturas de início de “resfriamento primário” e de início do “superenvelhecimento” pelo intervalo de tempo correspondente;
- “superenvelhecimento”, mantendo-se a temperatura e o tempo de tratamento constantes a 410°C e 180s, respectivamente;

– “resfriamento lento” com ar, a uma taxa de  $5^{\circ}\text{C/s}$ , até a temperatura de  $165^{\circ}\text{C}$ , seguindo-se o resfriamento com água até a temperatura ambiente.

Todos estes parâmetros de processamento em escala piloto estão resumidamente esquematizados na figura 4.1.

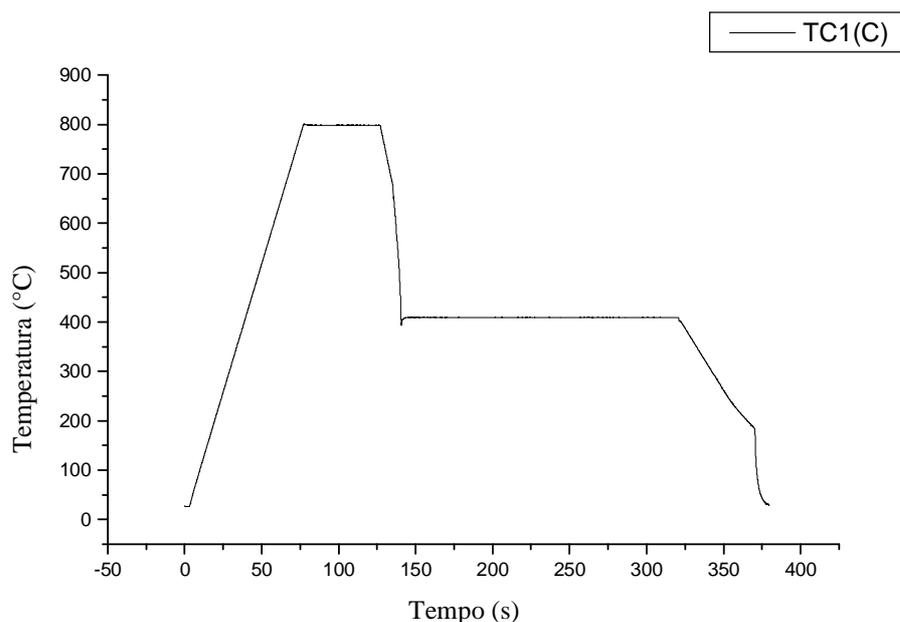


FIGURA 4.1 - Ciclo do Recozimento Contínuo utilizado no estudo.

Para a realização dos trabalhos experimentais na Gleeble foram confeccionadas amostras retiradas de chapas de aço “IF” (não revestido) provenientes de bobinas da linha industrial, na condição de como laminadas a frio. Conforme mostrado na tabela IV.1, foram usadas duas espessuras distintas, representando os limites inferior e superior dos materiais tratados usualmente na Gleeble.

TABELA IV.1 - Identificação do material utilizado na confecção das amostras.

MATERIAL	DIMENSÕES	ESPESSURA	IDENTIFICAÇÃO USIMINAS
IF	150mm x 50mm	0,77mm	BF08298605
IF	150mm x 50mm	2,03mm	BF08332629

## 4.2. Levantamentos e Ajustes Iniciais

A princípio, o maior problema verificado na simulação do ciclo de recozimento contínuo estava relacionado com a variação da temperatura da amostra durante o resfriamento acelerado na Gleeble. Para melhor conhecimento de como ele é feito, é apresentado na figura 4.2 um isométrico do seu sistema de atomização de água, e na figura 4.3 um croqui com detalhe de montagem dos bicos de atomização.

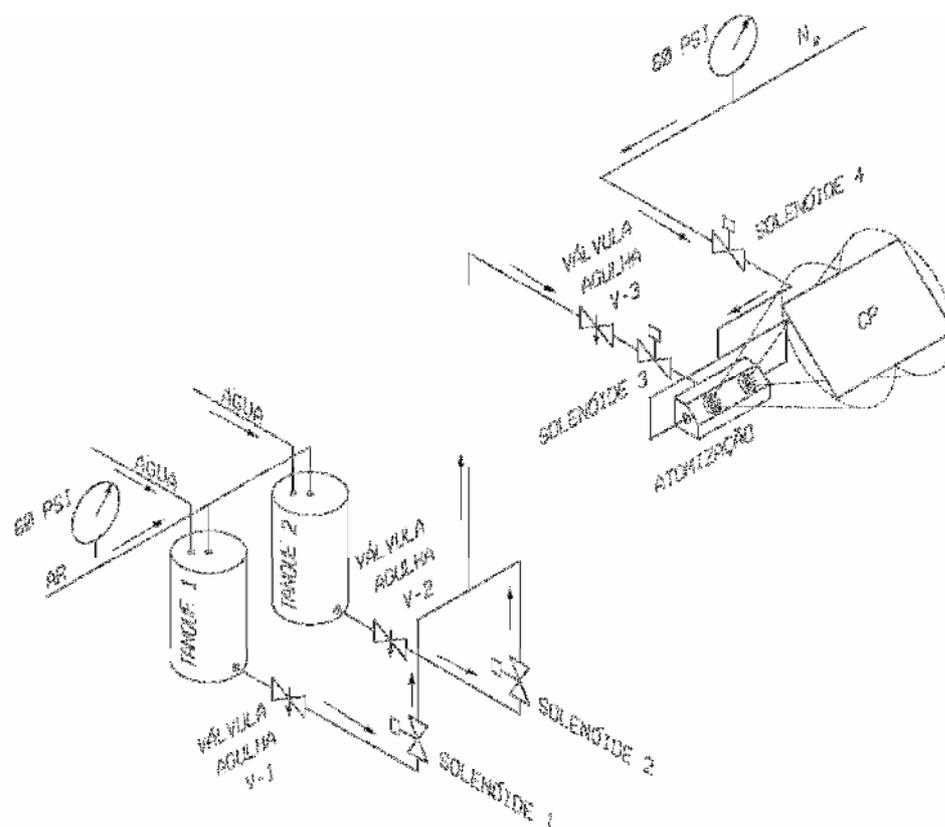


FIGURA 4.2 - Desenho isométrico do sistema de atomização de água da Gleeble.

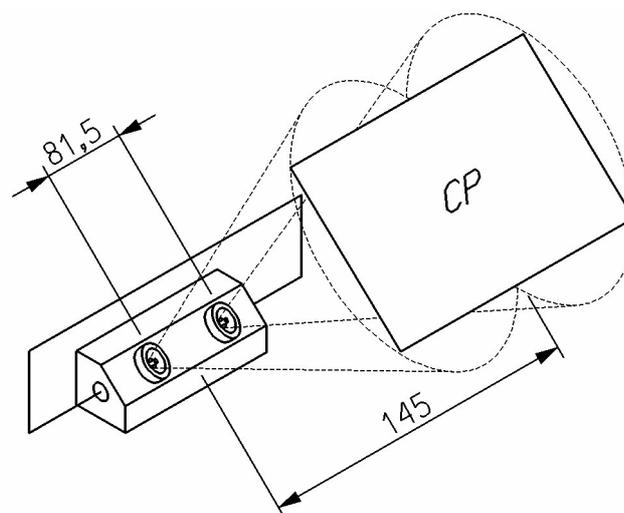


FIGURA 4.3 - Detalhe de montagem dos bicos de atomização de água da Gleeble.

Inicialmente foi dado foco à alimentação de água do sistema de atomização. Ele é composto por dois tanques cilíndricos com volume de 1,2 litros cada, possuindo na saída válvulas agulha para controle de vazão (V1 e V2) e duas solenóides que são acionadas individualmente pelo painel de controle para obtenção de maior ou menor vazão de água, quando apenas uma solenóide é acionada. Mais adiante, uma válvula solenóide e uma controladora de vazão (V3), tipo agulha, dão ajustes mais precisos à alimentação dos bicos. A pressão do sistema é controlada e mantida constante (usualmente 60psi) através de um compressor de ar que alimenta os dois cilindros.

Foi feito um levantamento para verificação da variação da vazão em função do nível de água dentro desses tanques. As válvulas V1 e V2, localizadas mais próximas aos cilindros, foram mantidas totalmente abertas e o controle de vazão foi feito pela válvula V3. Foi fixada uma posição de abertura dessa válvula e medido o volume de água durante intervalos de tempo próximos a 10s até o esvaziamento dos tanques. De cada leitura foi calculada a vazão média obtendo-se os resultados apresentados na figura 4.4.

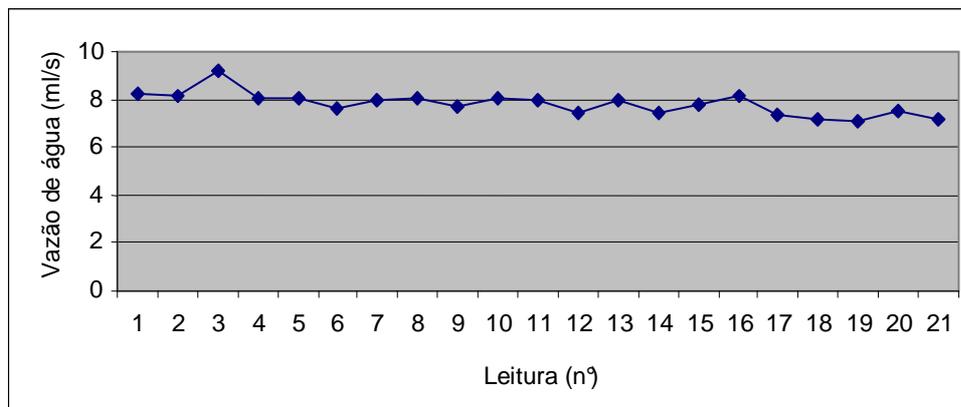


FIGURA 4.4 - Gráfico com variação da vazão de água em função da leitura.

Pode se observar no gráfico que existe uma leve tendência à redução da vazão com a redução do nível de água nos tanques. Definiu-se então que todos os ensaios na Gleeble serão iniciados com os tanques de água totalmente cheios.

Como não existe um sistema de leitura para verificação da vazão de água e ela influencia fortemente na taxa de resfriamento, definiu-se que esta seria determinada e fixada para todos os ensaios utilizando-se o valor obtido durante os ensaios mais críticos, ou seja, com amostras de 2mm de espessura e taxas de resfriamento próximas a 50°C/s.

Para a obtenção de uma parte dos levantamentos de dados foram utilizados alguns equipamentos desenvolvidos nesse estudo, de maneira a facilitar o conhecimento das variáveis envolvidas no processo. São eles: (i) dispositivo para conhecimento da distribuição da água de atomização; (ii) dispositivo para levantamento do perfil da pressão de impacto da água atomizada na amostra. Foram também adquiridos novos bicos de atomização visando uma homogeneização da névoa.

#### 4.2.1. Avaliação da Distribuição da Água de Atomização

Para conhecimento da dispersão da água de atomização foi desenvolvido um equipamento para coleta da água do jato de atomização, com formato tipo “colmeia”. É

composto de células de seção quadrada (15mm x 15mm), retificadas externamente (para permitir ajuste lado a lado, reduzir a espessura de parede e igualar a seção da área de coleta), montadas em um suporte que permite a remoção individual de cada célula e a fixação de todo o conjunto durante o ensaio (figura 4.5). Para o levantamento do volume de água coletado em cada célula foram utilizados medidores com escala de 0,1ml.



FIGURA 4.5 - Dispositivo para coleta e armazenamento da água atomizada destacando algumas células individuais.

Inicialmente foi feito um mapeamento da distribuição de água durante o resfriamento acelerado para registrar as reais condições da simulação na Gleeble.

O dispositivo, montado em um suporte, foi colocado sob os bicos de atomização, mantendo os mesmos parâmetros do processo encontrados durante a simulação, inclusive a distância dos bicos à amostra (145mm), e foram efetuadas diversas coletas. Essa avaliação inicial possibilitou verificar uma distribuição de água com tendência a acúmulo em um dos lados da amostra, como mostram os exemplos de resultados da figura 4.6.

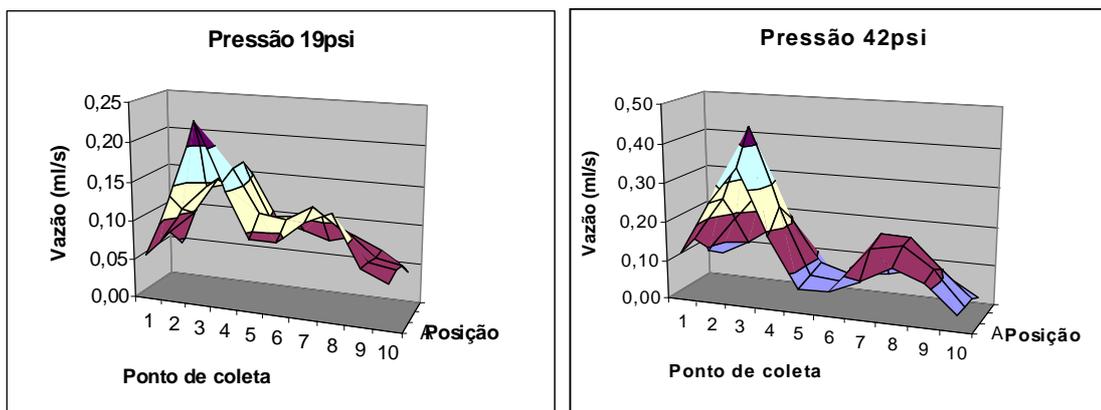


FIGURA 4.6 - Vazão de água por ponto e posição de coleta, em função da pressão de atomização do ar (19psi e 42psi) para uma vazão de água constante no bico.

Como essa diferença na distribuição da água pode gerar uma variação da temperatura entre as seções da amostra durante os ensaios, foi necessária uma ação corretiva que minimizasse essa diferença.

Antes, porém, para a confirmação da influência desse parâmetro sobre a homogeneidade térmica na amostra, foram feitas simulações do ciclo de recozimento na Gleeble com dois termopares fixados próximos ao ponto considerado de maior vazão de água (Tc2 e Tc3), além do termopar de controle da Gleeble (Tc1) colocado no centro da amostra. Tc2 e Tc3 foram fixados na linha longitudinal a 40mm de Tc1 (figura 4.7), posições que representaram as regiões com maior acúmulo de água durante os ensaios. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.8.

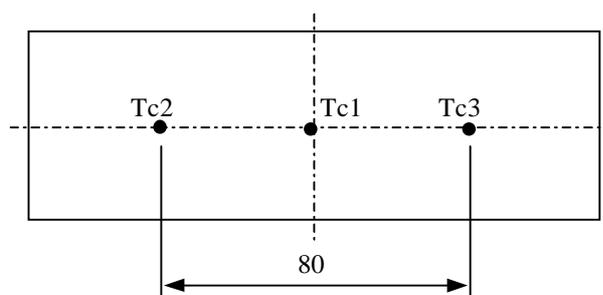


FIGURA 4.7 - Posicionamento dos termopares na amostra para verificação da diferença de temperatura entre os pontos.

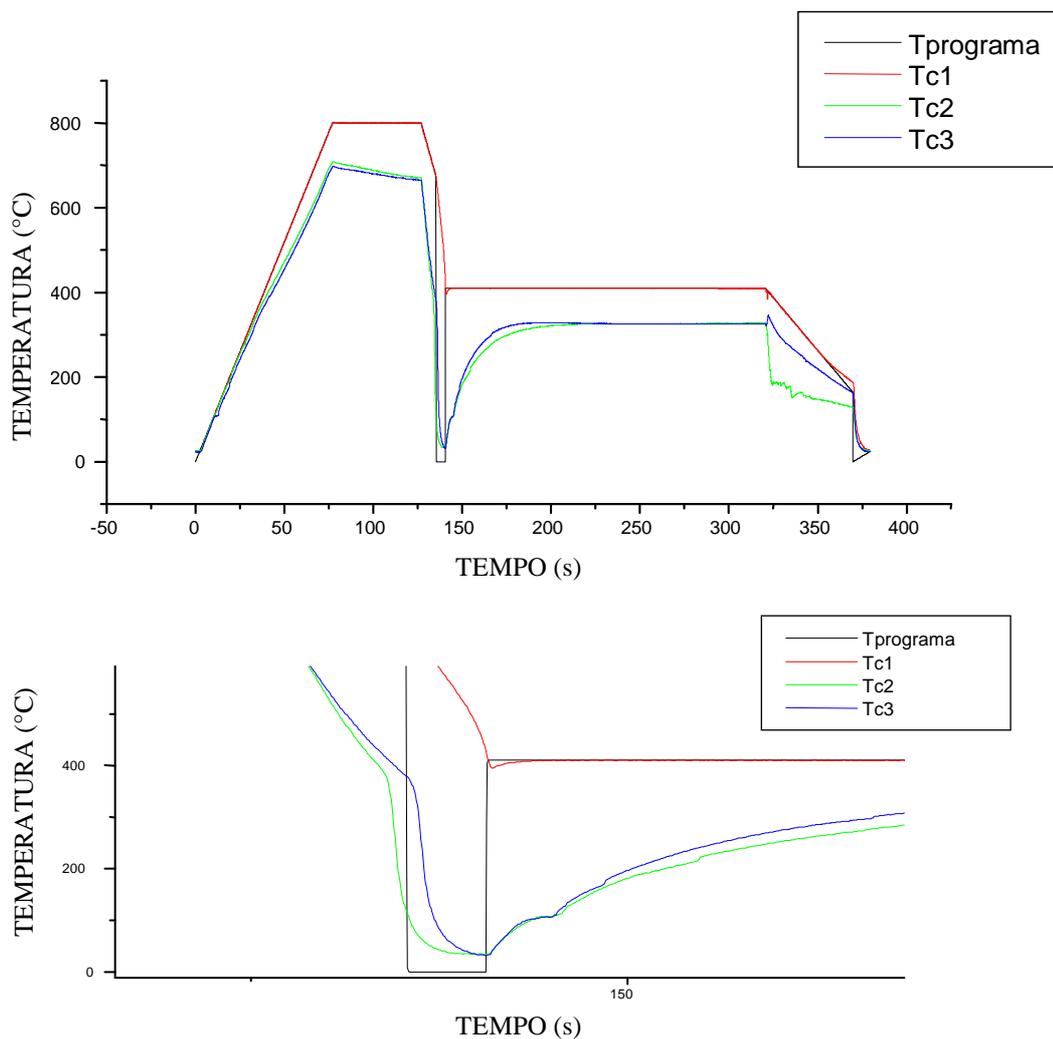


FIGURA 4.8 - Gráfico com variação da temperatura para seção longitudinal. Gráfico inferior amplia a região de resfriamento acelerado.

Pode-se observar que o resfriamento começa no Tc2 para posteriormente ser iniciado no Tc3. Desse gráfico foram extraídos dados que são apresentados na Tabela IV.2 com destaque para a variação da diferença de Tc2 e Tc3 em tempos fixos de leitura, localizados na região de resfriamento acelerado.

TABELA IV.2 - Diferença de temperatura entre termopares fixados a 40mm do centro da amostra no sentido longitudinal.

TERMOPAR	TEMPO DA LEITURA (s)				
	131,2	132,2	133,2	134,2	135,2
Tc2 (°C)	484	445	410	360	133
Tc3 (°C)	504	470	438	410	383
Tc3 – Tc2 (°C)	20	25	28	50	250

Após essa avaliação, verificou-se que a alimentação de água para o conjunto de bicos de atomização era feita em apenas um de seus lados, provocando uma pressão mais elevada na extremidade oposta. Foi efetuado o deslocamento dessa alimentação para uma região central ao conjunto, sendo posteriormente efetuadas novas coletas de água, cuja distribuição é apresentada na figura 4.9.

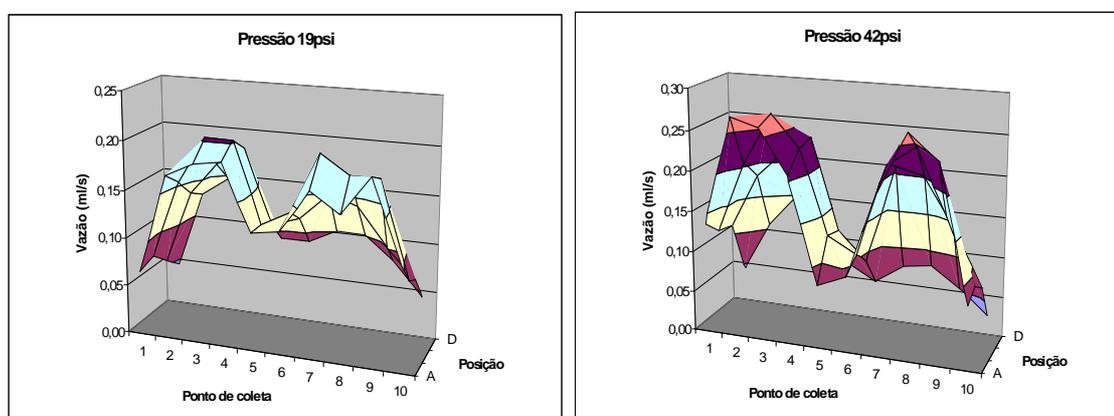


FIGURA 4.9 - Vazão de água por ponto e posição de coleta, em função da pressão de atomização do ar (19psi e 42psi) para uma vazão de água constante no bico, para a nova situação.

Para verificação da melhoria obtida foram feitos novos ensaios na Gleeble, sendo apresentados na figura 4.10 o gráfico com a variação da temperatura e na tabela IV.3 os resultados de Tc2 e Tc3 medidos nos mesmos instantes do ensaio anterior.

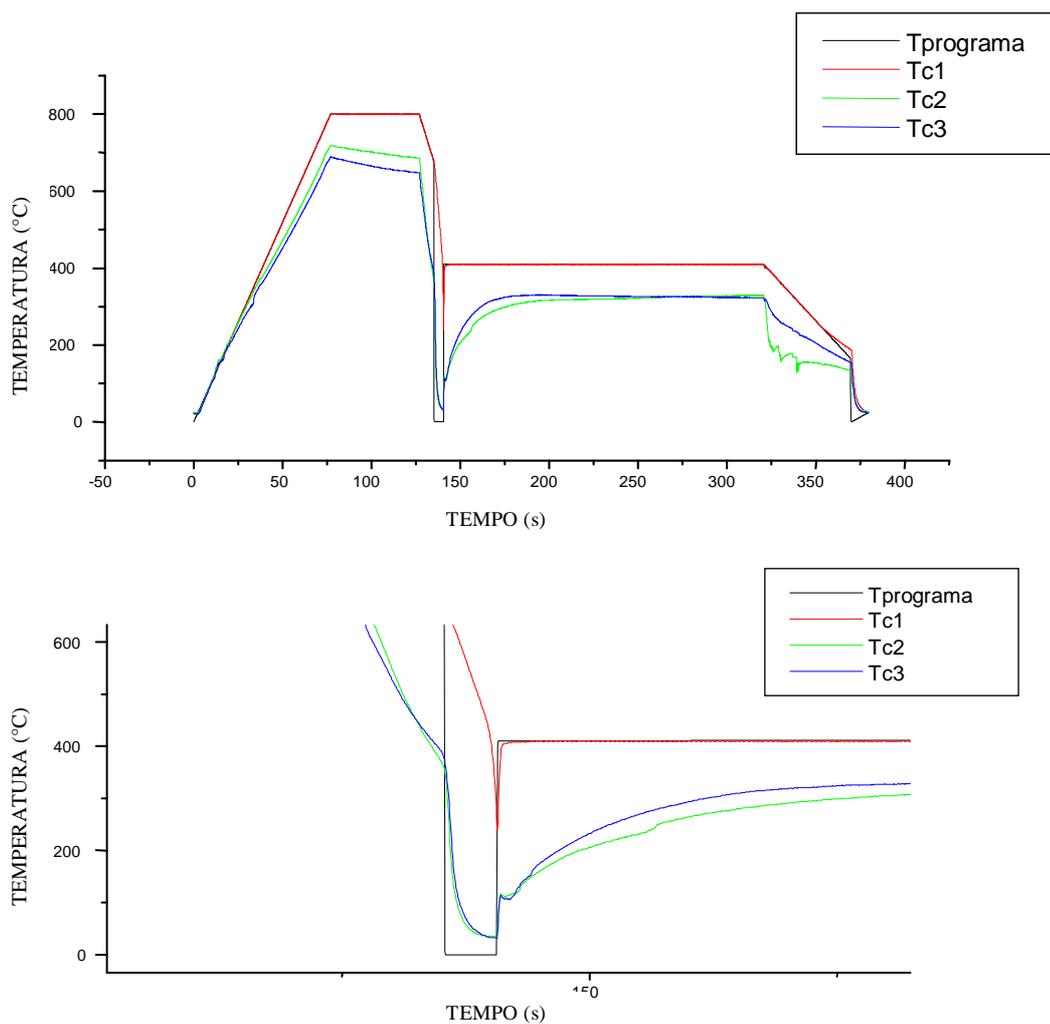


FIGURA 4.10 - Gráfico com variação da temperatura para seção longitudinal para a nova situação. Gráfico inferior amplia a região de resfriamento acelerado.

TABELA IV.3 - Diferença de temperatura entre termopares fixados a 40mm do centro da amostra no sentido longitudinal para a nova situação.

TERMOPAR	TEMPO DA LEITURA (s)				
	131,2	132,2	133,2	134,2	135,2
Tc2 (°C)	498	461	426	395	365
Tc3 (°C)	488	459	433	410	385
Tc3 - Tc2 (°C)	-10	-2	7	15	20

Verifica-se que o resfriamento iniciou-se simultaneamente nos dois pontos de medição e, que durante o processo, a diferença de temperatura reduziu sensivelmente quando comparados os resultados com os da situação anterior.

#### **4.2.2. Avaliação do Gás de Atomização**

Após ajustes da vazão de água no processo, foi dado foco ao comportamento do gás de atomização, que inicialmente era nitrogênio. O gás de alimentação do sistema passa por uma válvula reguladora de pressão, com indicação de leitura por um manômetro tipo “bourdon”, e por uma solenóide, indo posteriormente para o bico de atomização.

Observou-se durante os ensaios que apesar da pressão de atomização ser fixada em 60psi, logo após a abertura da válvula ela reduzia instantaneamente até valores próximos a 26psi. Estes valores sofriam ainda influência do período do dia em que era feito o ensaio e da sua duração. Para minimizar esse problema, foi instalado um compressor de ar que permitiu a execução de ensaios com pressões mais estáveis e superiores às obtidas anteriormente.

De posse dessas informações, foi definido que a vazão de água seria constante, optando-se por utilizar o manômetro de indicação da pressão de atomização como dispositivo de controle da taxa de resfriamento. Posteriormente, tentou se obter uma correlação entre as pressões de atomização e as taxas de resfriamento alcançadas.

#### **4.2.3. Determinação da Força de Impacto da Água**

Visando obter uma correlação entre a pressão de impacto (IP) da água e o coeficiente convectivo (h), assim como foi relatado na Literatura para altas pressões<sup>(17)</sup>, foi desenvolvido um equipamento para mapear o perfil da força de impacto (FI), e, conseqüentemente, a IP gerada pelo jato de água de atomização sobre a amostra. Este equipamento é composto por “strain gages”, um sistema multiplicador de forças e um sistema de aquisição e tratamento de dados.

Inicialmente, utilizando-se uma célula de carga com 10kgf de capacidade e com sensor de 100mm<sup>2</sup> e 200mm<sup>2</sup> de área de medição, foi feito um levantamento para

conhecimento da ordem de grandeza da força provocada pelo jato de atomização nos ensaios na Gleeble. Verificou-se que em condições extremas de atomização (maior área, pressão e vazão de água) o valor era baixo e se situava abaixo de 200gf. Como a área a ser mapeada pelo equipamento era a da amostra (50mm x 150mm) e sendo a força muito pequena, o equipamento necessitou de um dispositivo para amplificar a força e que pudesse ser colocado lado a lado, permitindo o levantamento de FI em toda a área da amostra em um menor número de etapas. Uma diferença desse equipamento para o utilizado em estudo mencionado anteriormente<sup>(17)</sup> é a existência do fluxo de água horizontal sobre a amostra, que representa a situação real do processo de resfriamento por atomização.

Foram confeccionadas diversas peças em formato de alavancas que, dimensionadas para suportar uma carga máxima de 100gf com flecha de até 3mm, têm a função de apresentar sensibilidade e ampliar a leitura de FI, sem sofrer deformação plástica.

Essas peças foram confeccionadas em aço de alta resistência e em cada uma foi colado um “strain-gage” com resistência de 120 ohms. A utilização de “strain-gage” torna-se ideal para a medição de deformações em razão da sua característica de linearidade, ou seja, a variação de força é diretamente proporcional à sua deformação.

Como a maior dimensão da amostra é o comprimento (15cm), foram confeccionadas 15 peças, com área da seção de medição de 100mm<sup>2</sup> (área aproximada), que, posicionadas lado a lado, permitiram o levantamento de FI em toda uma faixa da amostra com 1cm de largura. Com o deslocamento de 10mm a cada leitura torna-se possível o levantamento, após cinco leituras, de toda a área da amostra (largura de 50mm).

As peças foram ajustadas e fixadas lado a lado a uma base suporte por meio de grampos. Após montagem, foram feitas as ligações elétricas de maneira a dar proteção e rigidez à montagem, dificultando o rompimento dos fios durante o manuseio.

Para cada sensor, foi montada uma ponte de Wheatstone, um amplificador de sinais e filtros para minimizar a presença de ruídos elétricos. Os sinais foram obtidos através de um sistema de aquisição de dados e enviados a um software desenvolvido em LabVIEW 7.1, responsável por processar, apresentar e armazenar os dados lidos. Para a

proteção das conexões contra a umidade proveniente da atomização foi feita a aplicação de uma camada de silicone na região de risco (conectores). Para ajuste da altura do dispositivo à distância existente entre bico de atomização e amostra na Gleeble, foi feito um suporte desmontável. Na figura 4.11 podem ser vistas fotos com detalhes do equipamento desenvolvido.



FIGURA 4.11 - 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).

Para o levantamento do perfil de FI dos bicos de atomização, o equipamento foi calibrado utilizando pesos-padrão na faixa de 1gf a 25gf. Os pesos foram colocados sobre cada ponto de medição e foi efetuada a leitura de tensão (mV), sendo geradas as retas e retiradas as equações que as representam. Como era de se esperar, apesar de apresentarem o mesmo perfil construtivo, cada ponto gerou uma equação diferente e

estas foram inseridas no programa (LabVIEW) para posterior execução das leituras das cargas reais a que cada ponto estava sendo solicitado.

Na figura 4.12 é mostrado como foi efetuado o mapeamento de FI em toda a área da amostra, deslocando o equipamento 10mm a cada levantamento de força, e executando cinco deslocamentos no total.

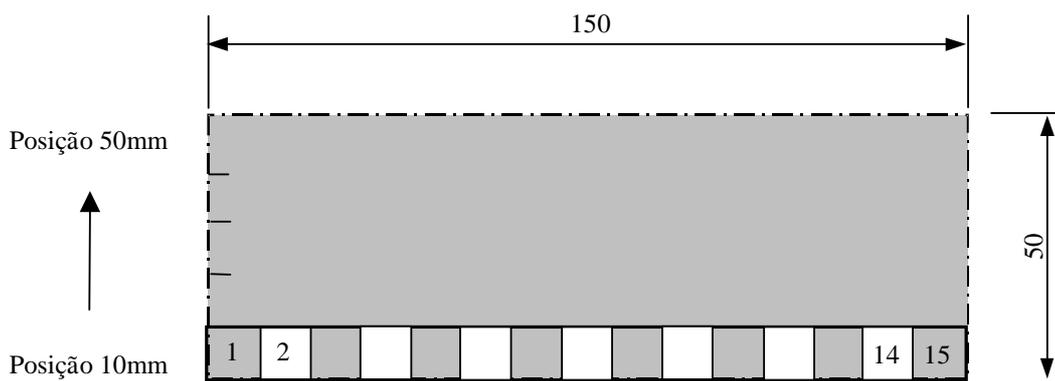


FIGURA 4.12 - Desenho esquemático das posições do equipamento para levantamento de força em toda a área da amostra.

Após os ensaios iniciais, devido à problemas com ruídos nos sinais de leitura, o circuito eletrônico desenvolvido foi substituído por uma placa com 8 canais e o levantamento passou a ser feito na região central, sendo então utilizados 8 sensores dos 15 existentes, e o conjunto passou a ser montado com sua linha de centro coincidindo com a da amostra. É importante lembrar que com essa forma utilizada a área de mapeamento ainda é bem superior à área de trabalho do corpo-de-prova.

Para determinação da IP é apresentada na tabela IV.4 a área de medição de cada um dos oito sensores.

TABELA IV.4 - Área de medição de cada sensor de força.

SENSOR	1	2	3	4	5	6	7	8
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	94,26	97,80	97,40	96,73	97,42	97,70	96,82	96,18

#### 4.2.4. Substituição dos Bicos de Atomização

Ainda na fase de preparação dos equipamentos a serem utilizados durante os ensaios foram especificados, segundo orientação de fabricante de sistemas de atomização, três conjuntos de bicos de atomização (modelos A, B e C) com dois bicos cada um. Os bicos foram especificados visando a substituição dos atuais para a obtenção de um cone de atomização cheio, com distribuição de água homogênea e vazões de água que atendessem às necessidades de todas as faixas de resfriamento simuladas.

Antes de serem utilizados na Gleeble, os bicos foram montados em uma bancada com condições de simular os parâmetros de atomização ( $P_{ar}$ ,  $P_{H_2O}$  e vazão). Foram efetuados ensaios qualitativos variando estes parâmetros e a distância entre os bicos para verificação da forma de distribuição da água, área de ação dos bicos (seção de atomização quando os bicos são montados à distância máxima permitida na Gleeble) e vazão de água na região da amostra, nesse caso, sendo utilizado o equipamento para avaliar a distribuição de água de atomização.

Para a montagem dos novos bicos na Gleeble foi construído um suporte que possibilitou a execução de deslocamentos para ajuste da distância entre os bicos (figura 4.13).

Apesar do número elevado de ensaios, os resultados apresentados inicialmente não foram satisfatórios. A forma de distribuição da água, de uma maneira geral, não era homogênea e variava com as pressões utilizadas.

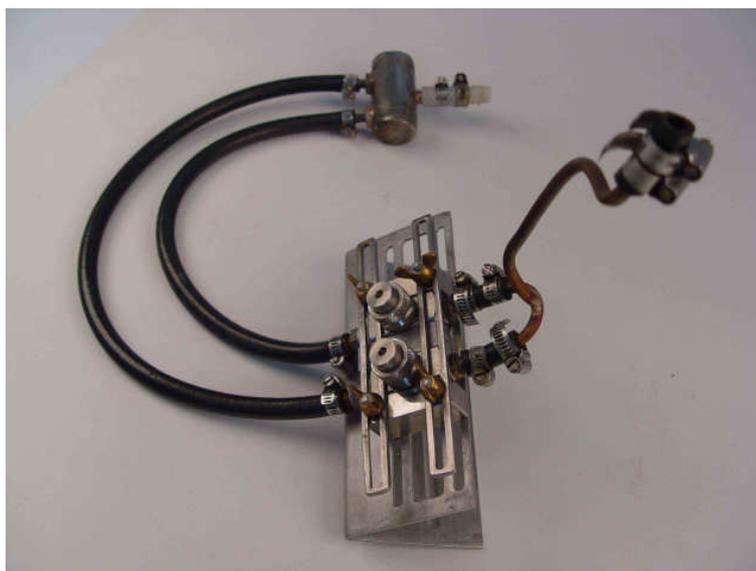


FIGURA 4.13 - Foto dos bicos montados no suporte de fixação e dutos.

### 4.3. Ensaios

Foram efetuados diversos ensaios na Gleeble, sendo definido que em cada um, quando não mencionado o contrário, seriam soldados três termopares (limite máximo de termopares permitido pela Gleeble) na região utilizada para extração do corpo-de-prova. O termopar de controle Tc1 (segue o programa inserido no equipamento) foi soldado no centro da amostra, o segundo termopar (Tc2) foi soldado a 25mm de Tc1, na linha longitudinal da amostra, e o terceiro termopar (Tc3), 20mm abaixo de Tc2. A amostra foi dividida em quatro partes consideradas simétricas termicamente. Por segurança, a área abrangida pelos termopares (mapeamento térmico) foi superior à de ensaio dos corpos-de-prova extraídos da amostra (figura 4.14). Os termopares foram soldados na face oposta à de incidência do jato de água.

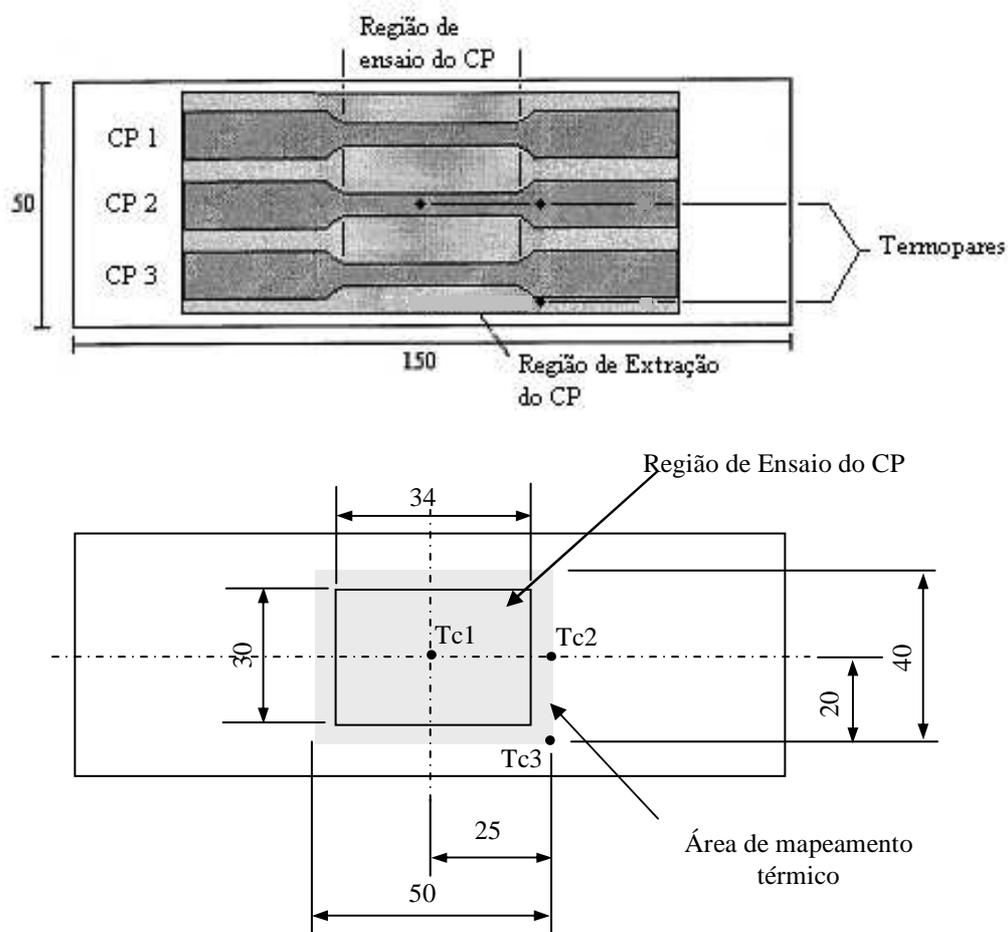


FIGURA 4.14 - Desenhos esquemáticos com indicação da localização dos termopares, das áreas de trabalho e de mapeamento térmico.

Os ensaios procuraram definir parâmetros que poderiam ser utilizados posteriormente para controle do processo na Gleeble. A vazão de água foi fixada em 0,7l/min, valor medido durante ensaio para obtenção da maior taxa de resfriamento acelerado ( $\sim 50^{\circ}\text{C/s}$ ) para a amostra de maior espessura (2mm), conforme mencionado anteriormente.

Utilizando pressões definidas, foram efetuadas coletas de água de atomização por um período de aproximadamente 20s e verificou-se que a vazão varia muito pouco com a pressão de atomização do ar, podendo ser considerada constante (tabela IV.5).

TABELA IV.5 - Relação entre a vazão de água e a pressão de atomização.

Pressão de Atomização (psi)	11	17	19	31	37	42
Vazão (l/min)	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69

Como o recozimento contínuo segue uma curva de variação térmica, a amostra foi avaliada desde a temperatura ambiente até o fim de processo. Os principais parâmetros envolvidos foram acompanhados e procurou-se reduzir ao máximo a variação dos mesmos durante os ensaios. Dessa maneira, parâmetros como pressão do cilindro de água, nível de água dentro dos cilindros, abertura do registro de controle da vazão de água receberam atenção especial e procuraram ser mantidos inalterados, variando-se somente a pressão do ar de atomização.

No total, foram realizados os seguintes ensaios:

a) Gleeble:

- 150 ciclos completos simulando o processo de recozimento contínuo.

b) Distribuição da água atomizada:

- 60 ensaios.

c) Levantamento do perfil de pressão:

- 60 ensaios.

Após a definição dos ajustes para a obtenção de valores de taxas de resfriamento na faixa desejada, foram feitos levantamentos da distribuição de água e da força da água de atomização para cada um deles.

Na figura 4.15 é apresentada uma seqüência de como foram efetuados os ensaios e na figura 4.16 pode-se ver quais as células de medição de FI e IP podem ser correlacionadas com os pontos de medição de temperatura Tc1, Tc2 e Tc3.

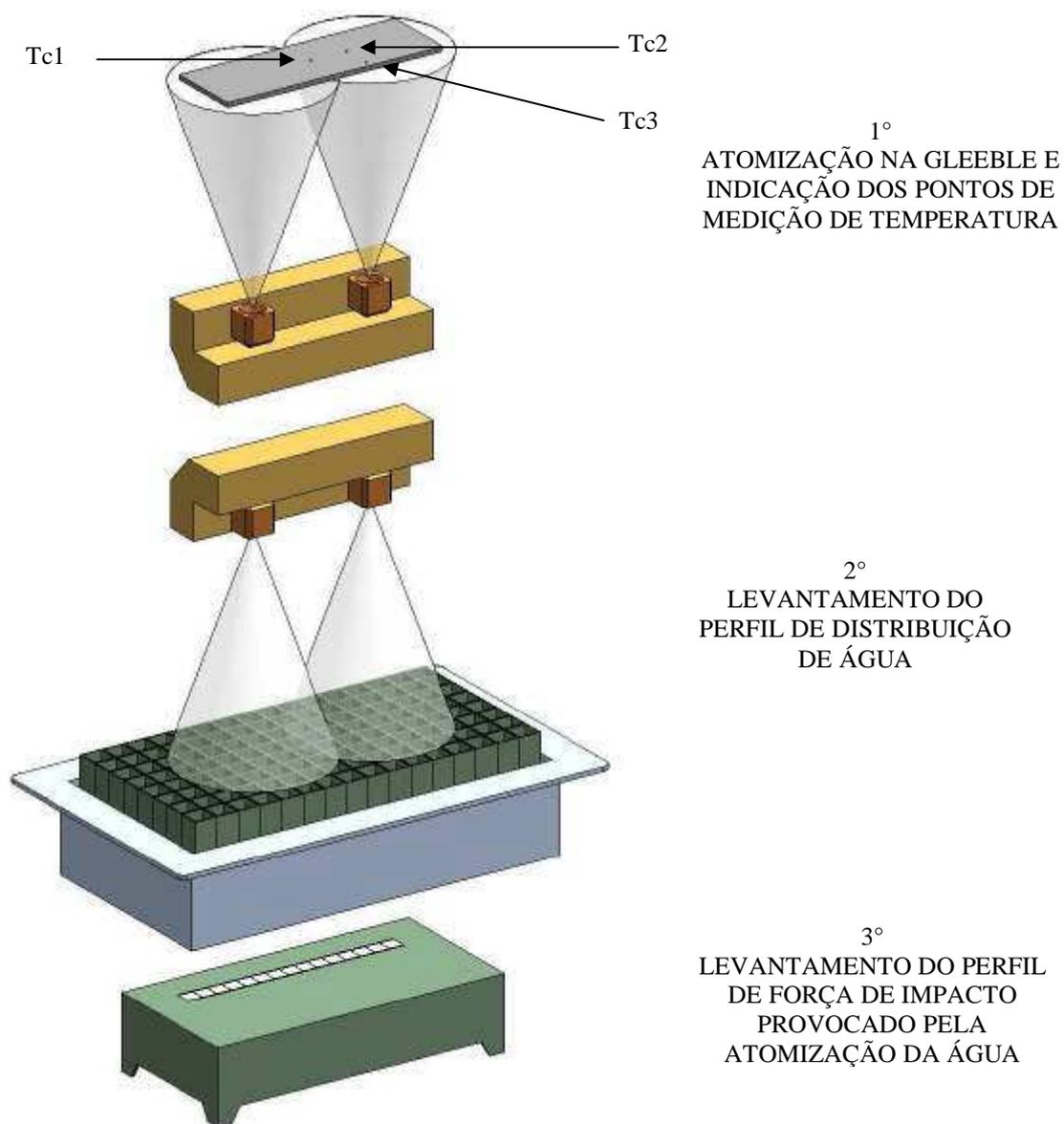


FIGURA 4.15 - Desenho esquemático com seqüência dos ensaios executados.

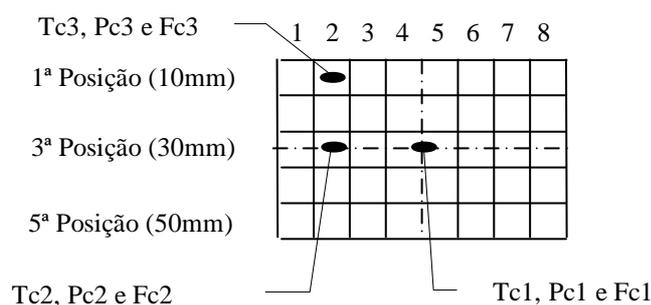


FIGURA 4.16 - Desenho com locação dos pontos de medição de temperatura (Tc) e ponto correlato na medição de FI e IP.

Em função da variação da temperatura provocada pelo refrigeração da garra, foram efetuados ensaios com amostras com 200mm de comprimento para se verificar o comportamento da temperatura na amostra nas regiões de encharque e superenvelhecimento.

Após todos os ajustes, foram feitos levantamentos do perfil térmico da amostra (comprimento padrão 150mm) 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 às amostras de 0,77mm e 2,03mm de espessura, localizados com 5mm de distância entre si, conforme apresentado nas figuras 4.17 e 4.18. 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 (com taxa de aquisição de 3 leituras por segundo).

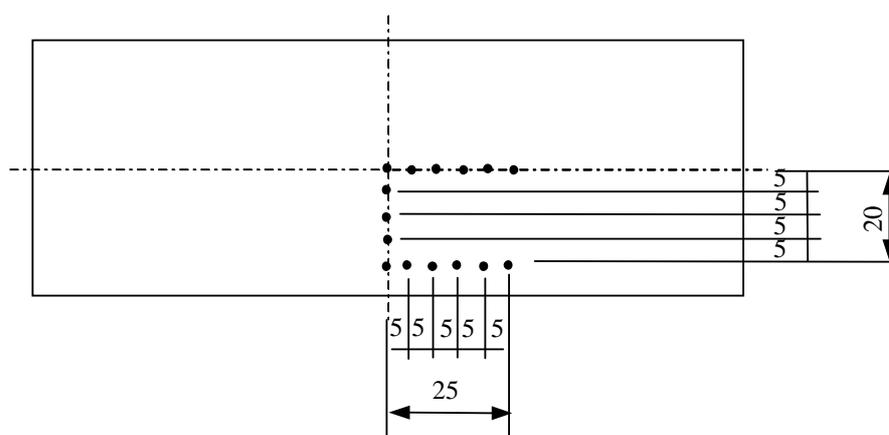


FIGURA 4.17 - Desenho indicando a localização dos termopares na amostra.

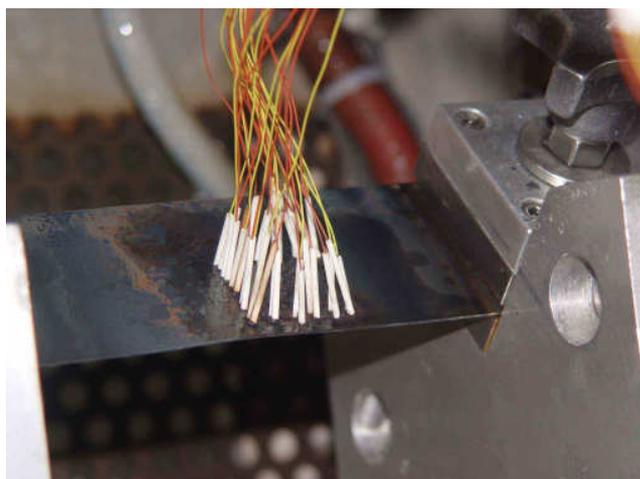


FIGURA 4.18 - Fotografia da amostra com os 15 termopares montados.

#### **4.4. Análise Estatística**

Para avaliação da influência dos parâmetros envolvidos nas etapas do processo foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos. Foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA) para verificar a influência estatisticamente significativa e correlação entre fatores como  $P_{ar}$  e IP sobre h e taxa de resfriamento.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Levantamento das Curvas de Resfriamento

Após fixados os parâmetros pressão e vazão da água de atomização, foram efetuados ensaios utilizando os bicos de atomização antigos, obtendo-se diversas curvas de resfriamento para o termopar de controle. Dessas, foram selecionadas as apresentadas na tabela V.1 com indicação da relação: espessura da amostra x pressão do ar de atomização x taxa de resfriamento obtida.

TABELA V.1 - Relação obtida entre  $P_{ar}$  e taxa de resfriamento para amostra com espessura de 0,77mm e 2,03mm.

Espessura da amostra	Pressão do ar de atomização (psi)	Taxa de resfriamento obtida para Tc1 (°C/s)
0,77mm	11	30
	17	43
	19	51
2,03mm	31	27
	37	44
	42	54

Nas figuras 5.1 a 5.6 são apresentadas as curvas obtidas durante simulação do ciclo de recozimento contínuo para os três termopares (Tc1, Tc2 e Tc3), para as taxas de resfriamento acelerado apresentadas na tabela V.1.

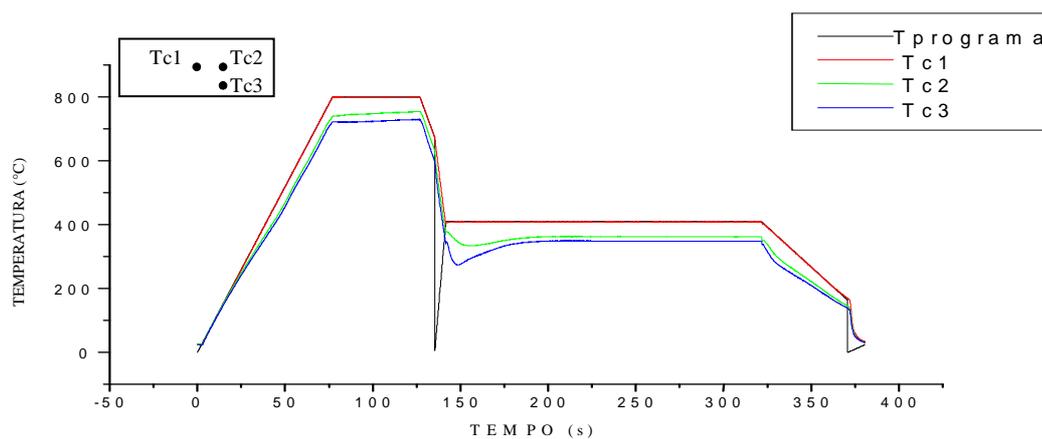


FIGURA 5.1 - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}= 11\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

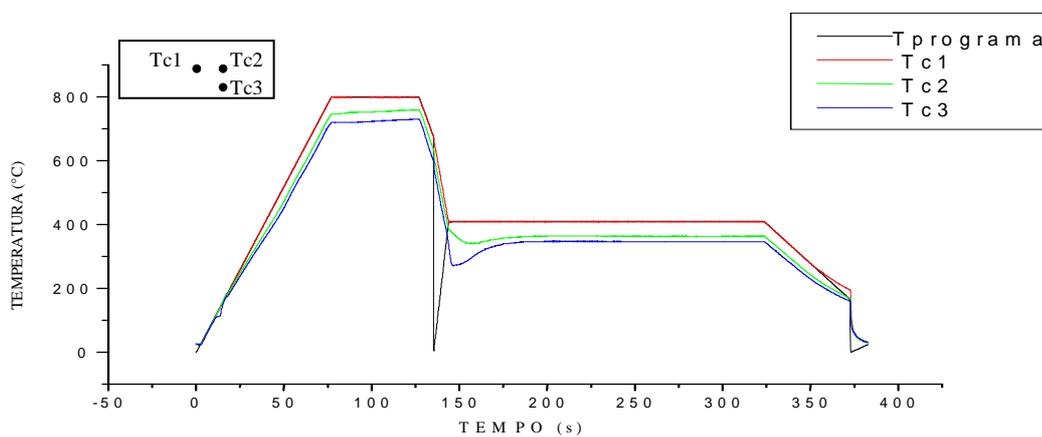


FIGURA 5.2 - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}= 17\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

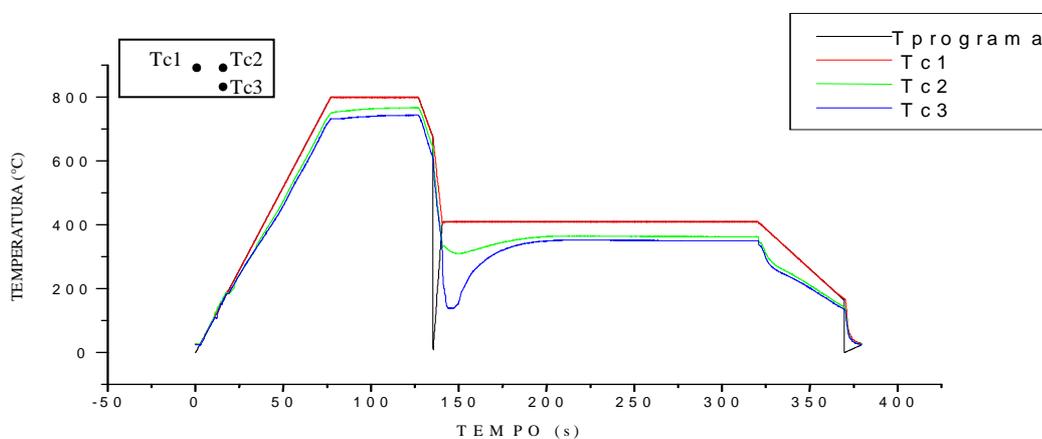


FIGURA 5.3 - Curvas de temperaturas obtidas com  $P_{ar}= 19\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

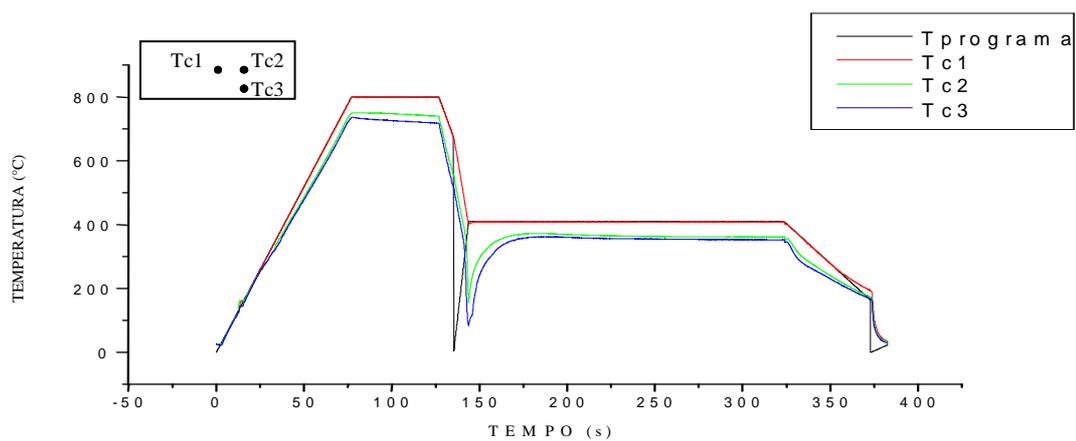


FIGURA 5.4 - Curvas de temperatura obtidas com  $P_{ar} = 31 \text{ psi}$  ( $e = 2,03 \text{ mm}$ ).

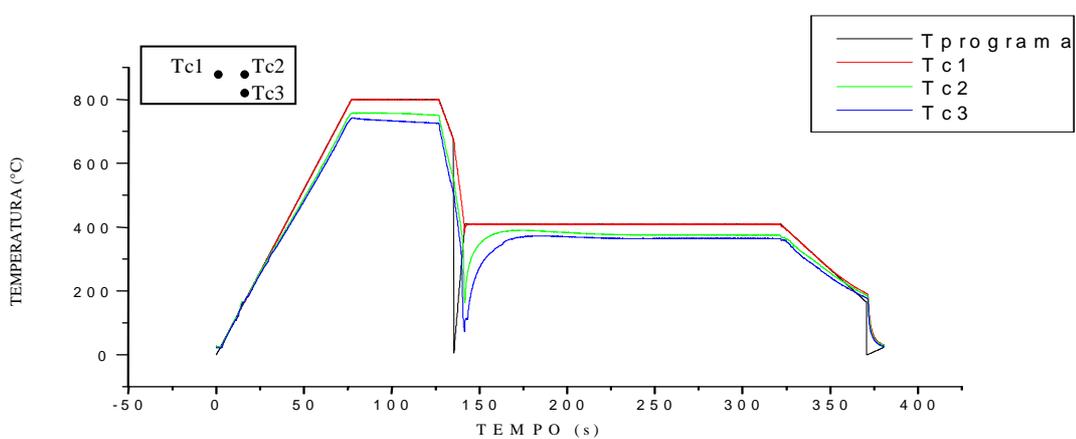


FIGURA 5.5 - Curvas de temperatura obtidas com  $P_{ar} = 37 \text{ psi}$  ( $e = 2,03 \text{ mm}$ ).

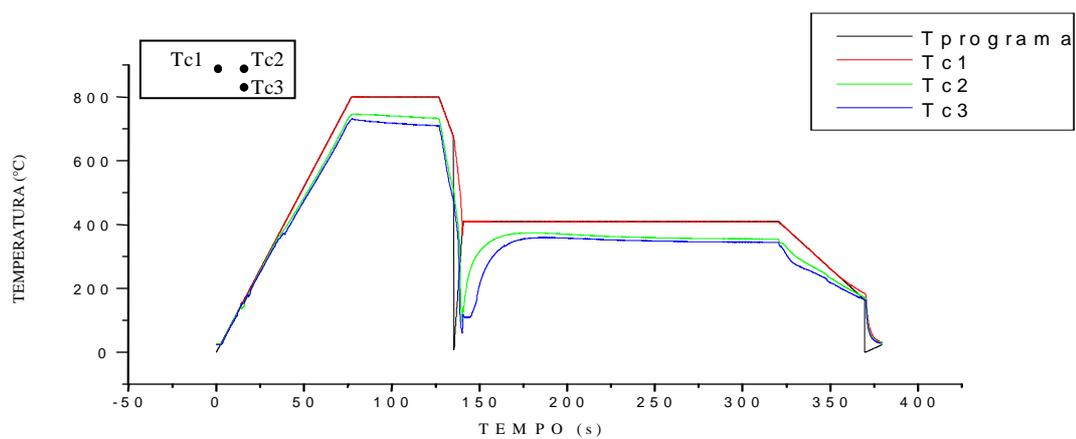


FIGURA 5.6 - Curvas de temperatura obtidas com  $P_{ar} = 42 \text{ psi}$  ( $e = 2,03 \text{ mm}$ ).

Nas figuras 5.1 a 5.6 pode se verificar que, durante o encharque e o superenvelhecimento, existe significativa diferença de temperatura entre Tc1 e Tc2 e Tc3. Para amostras com 0,77mm de espessura, no encharque e superenvelhecimento essa diferença chega a 78°C e 63°C, respectivamente, e para amostras de 2,03mm de espessura a diferença chega a 89°C (encharque) e 56°C (superenvelhecimento). Essa diferença nas temperaturas é provocada principalmente pela refrigeração das garras que prendem as amostras. No caso das amostras de 0,77mm de espessura verifica-se que a diferença decresce com o tempo (encharque) e nas amostras de 2,03mm ela aumenta. Essa tendência pode ser justificada pela existência de uma maior seção de troca de calor para as amostras de maior espessura, e, conseqüentemente, maior fluxo de calor por condução para as garras.

Avaliando as curvas, verifica-se que à medida que a  $P_{ar}$  vai se elevando para se obter maiores taxas de resfriamento, aumentam tanto os vales de temperatura obtidos após o resfriamento acelerado quanto a diferença entre Tc1, Tc2 e Tc3.

Após o levantamento dessas curvas, foram montados na Gleeble os pares de bicos novos. Esses bicos apresentaram melhores resultados para a obtenção de taxas de resfriamento mais elevadas, porém as curvas de resfriamento apresentaram vales mais acentuados, com manutenção da temperatura na faixa inferior da curva por um período mais longo que o obtido com os bicos antigos. Foram efetuados ensaios com os três pares de bicos, sendo que o modelo A apresentou maior vazão de água e maior área de ação do jato que a dos outros modelos. Todos os modelos apresentaram formato de dispersão da água diretamente relacionado com  $P_{ar}$  e, dependendo da combinação de ajustes, formato geométrico de dispersão em forma diferente da ideal, que seria circular e com distribuição homogênea. Verificou-se também que, após o fechamento das válvulas solenóides que controlam a passagem de ar e de água para os bicos, ocorria a formação de jato contínuo de água sobre a região dos termopares Tc2 e Tc3, reduzindo sensivelmente a temperatura nesses pontos de medição (figura 5.7). Foram efetuadas diversas modificações do sistema, tornando-o mais rígido, igualando comprimentos e mudando a configuração dos dutos e do distribuidor, mas nenhuma delas apresentou resultados que permitissem efetuar ensaios com Tc2 e Tc3 mais estáveis. Além disso, verificou-se que durante o resfriamento rápido secundário, após o superenvelhecimento,

quando o resfriamento da amostra é feito apenas pelo jato de ar, ocorre oscilação da temperatura da amostra nas regiões Tc2 e Tc3 (figura 5.8). Como os bicos novos não apresentaram os resultados desejados optou-se pela utilização dos antigos.

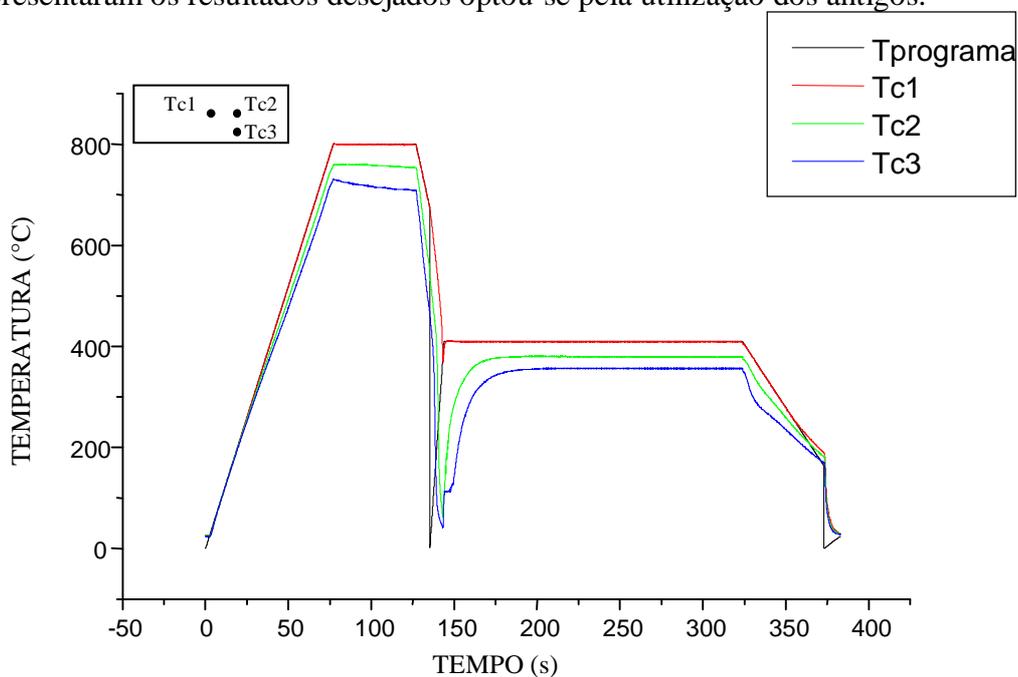


FIGURA 5.7 - Curvas de temperaturas obtidas com bicos novos.

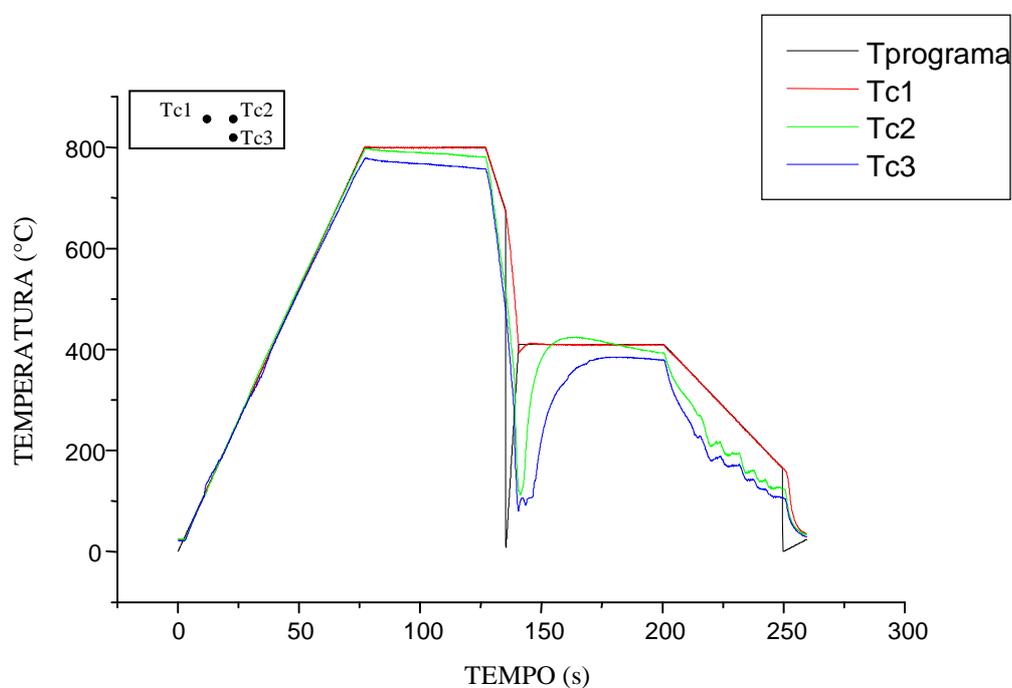


FIGURA 5.8 - Curvas de temperaturas obtidas com bicos novos para tempo reduzido durante superenvelhecimento.

### 5.1.1. Cálculo do Coeficiente Convectivo

De cada gráfico apresentado nas figuras 5.1 a 5.6, foram retiradas as curvas de resfriamento acelerado para os três pontos de medição (Tc1, Tc2 e Tc3), sendo geradas as curvas de tendência (em função do tempo de leitura) e o valor de  $R^2$ , como apresentado na tabela V.2.

TABELA V.2 - Equações relativas às curvas de resfriamento para Tc1, Tc2 e Tc3.

Espessura amostra (mm)	$P_{ar}$ (psi)	Termopar de referência	EQUAÇÃO*	$R^2$
0,77	11	Tc1	$Tc1 = 0,229x^2 - 94,497x + 9266,8$	0,9996
		Tc2	$Tc2 = 0,581x^2 - 172,43x + 14476$	0,9992
		Tc3	$Tc3 = 0,2072x^2 - 86,447x + 8490,4$	0,9969
	17	Tc1	$Tc1 = 0,3879x^2 - 150,57x + 13948$	0,9999
		Tc2	$Tc2 = 1,4892x^2 - 451,89x + 34507$	0,9989
		Tc3	$Tc3 = 1,4473x^2 - 440,27x + 33670$	0,999
	19	Tc1	$Tc1 = 0,3575x^2 - 1,4975x + 14396$	0,9997
		Tc2	$Tc2 = 3,4686x^2 - 1013,1x + 74207$	0,9982
		Tc3	$Tc3 = 3,8692x^2 - 1117,8x + 81014$	0,9971
2,03	31	Tc1	$Tc1 = -0,1881x^2 + 19,901x + 1427$	0,9999
		Tc2	$Tc2 = -0,03x^2 - 36,648x + 4967,3$	0,9991
		Tc3	$Tc3 = -0,1425x^2 + 9,583x + 1829,5$	0,9994
	37	Tc1	$Tc1 = -0,6911x^2 + 146,87x - 6546,9$	0,9991
		Tc2	$Tc2 = -0,3402x^2 + 56,539x - 869,68$	0,9992
		Tc3	$Tc3 = -1,2539x^2 + 301,97x - 17395$	0,999
	42	Tc1	$Tc1 = 0,3879x^2 - 150,57x + 13948$	0,9965
		Tc2	$Tc2 = 1,4892x^2 - 451,89x + 34507$	0,9993
		Tc3	$Tc3 = 1,4473x^2 - 440,27x + 33670$	0,9988

\* x é a leitura do tempo (s) durante a simulação do ciclo térmico e T é obtido em °C.

As equações das curvas de temperatura em função do tempo, para os três termopares, foram lançadas em planilhas para cada  $P_{ar}$  e delas foi retirado o valor do coeficiente convectivo para cada intervalo de leitura de tempo (0,05 segundos). Para esse cálculo, o calor específico e a densidade entraram como equação em função da temperatura<sup>(16)</sup>.

$$C = 347,3 + 1,585 T - 0,004414 T^2 + 0,00000502 T^3 \quad (5.1)$$

$$\rho = 7878,39 - 0,3887 T \quad (5.2)$$

Onde:  $C$  é o calor específico (J/kg K);

$T$  é a temperatura do material (°C);

$\rho$  é a densidade do material (kg/m<sup>3</sup>).

O método utilizado foi o da Capacidade Concentrada<sup>(9)</sup>, seguindo a equação 5.3:

$$h = \frac{\rho V C}{t \cdot A s} \cdot \ln \frac{\theta_i}{\theta} \quad (5.3)$$

onde:  $h$  é o coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>K);

$V$  é o volume da amostra (m<sup>3</sup>);

$t$  é o tempo medido entre os intervalos de leitura (s);

$A_s$  é a área superficial da amostra exposta ao resfriamento rápido (m<sup>2</sup>);

$\theta_i$  é a diferença de temperatura entre a amostra e o fluido (K);

$\theta$  é a diferença de temperatura entre a amostra em um determinado tempo  $t$  e o fluido (K).

Após o cálculo de  $h$ , foi verificado se a condição para a utilização desse método estava atendida, sendo calculado o Número de Biot<sup>(9)</sup> (equação 5.4). Para esse cálculo foi utilizado o valor médio de  $h$  (cálculo mais conservativo) e o resultado obtido foi bem inferior a 0,1, satisfazendo a condição de uso da equação.

$$\boxed{Bi = \frac{hl}{k}} \quad (5.4)$$

onde:  $Bi$  é o número de Biot (adimensional);

$l$  é a espessura da amostra (m);

$k$  é a condutividade térmica do material da amostra (W/mk).

Parte dos resultados obtidos na planilha de pressão ( $P_{ar} = 11 \text{ psi}$ ) para  $Tc1$  é apresentada na tabela V.3.



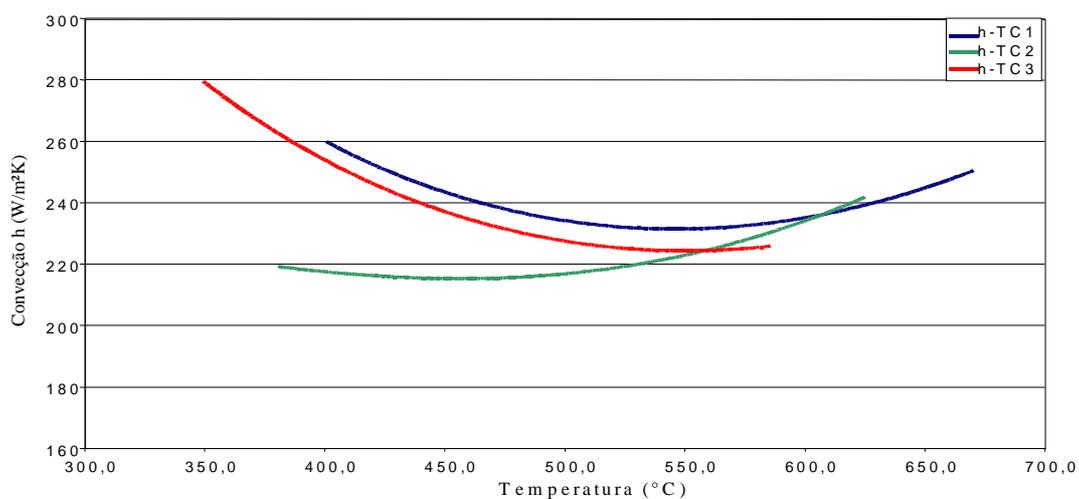


FIGURA 5.9 - Variação de h em função de T para a  $P_{ar}= 11\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

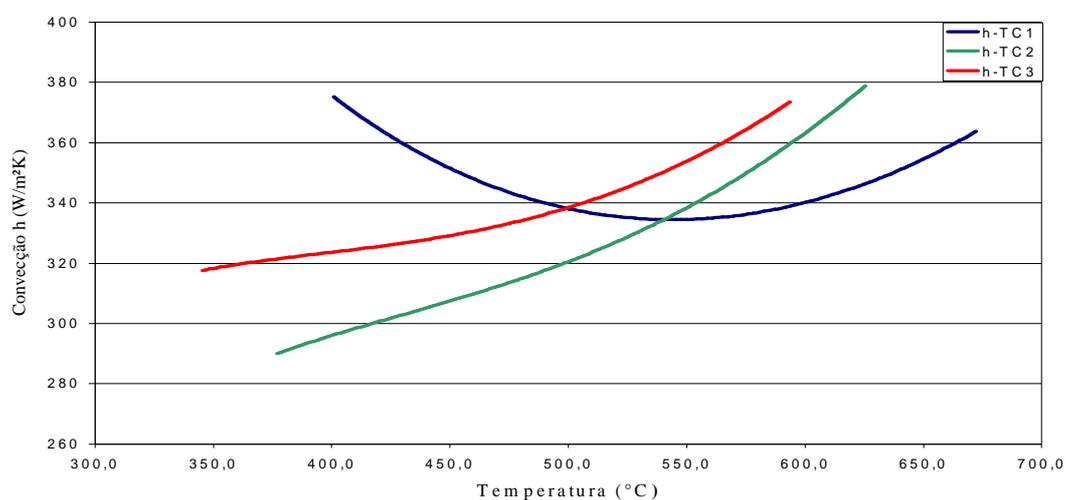


FIGURA 5.10 - Variação de h em função de T para a  $P_{ar}= 17\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

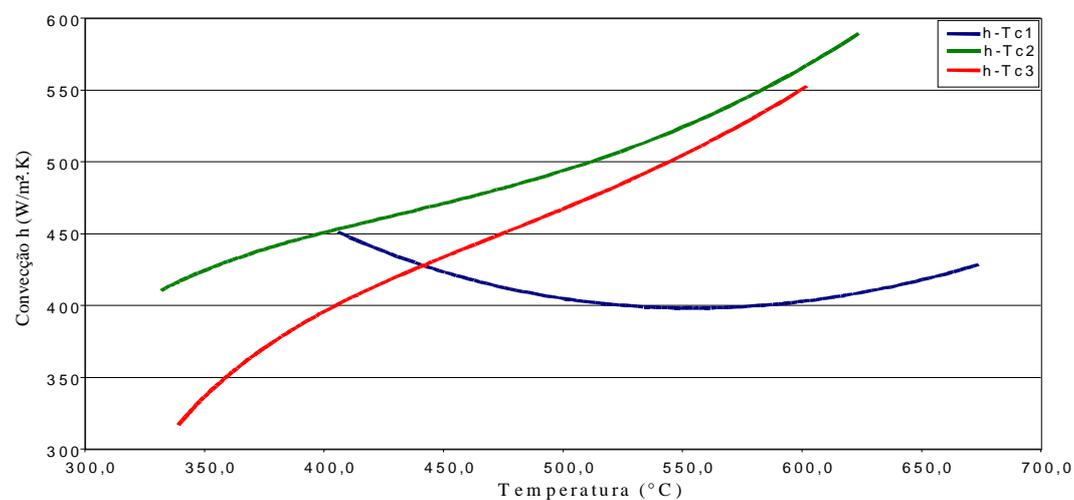


FIGURA 5.11 - Variação de h em função de T para a  $P_{ar}= 19\text{psi}$  ( $e= 0,77\text{mm}$ ).

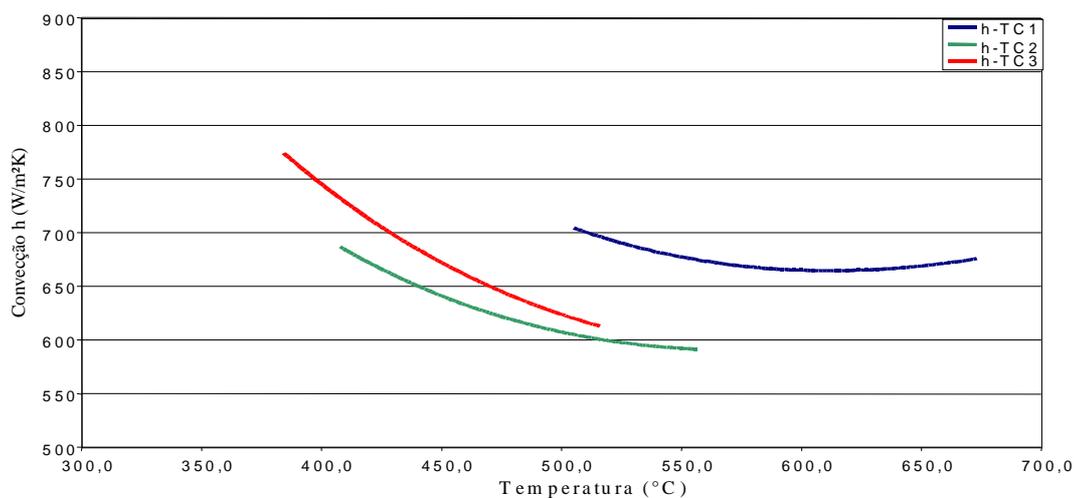


FIGURA 5.12 - Variação de  $h$  em função de  $T$  para a  $P_{ar}= 31psi$  ( $e= 2,03mm$ ).

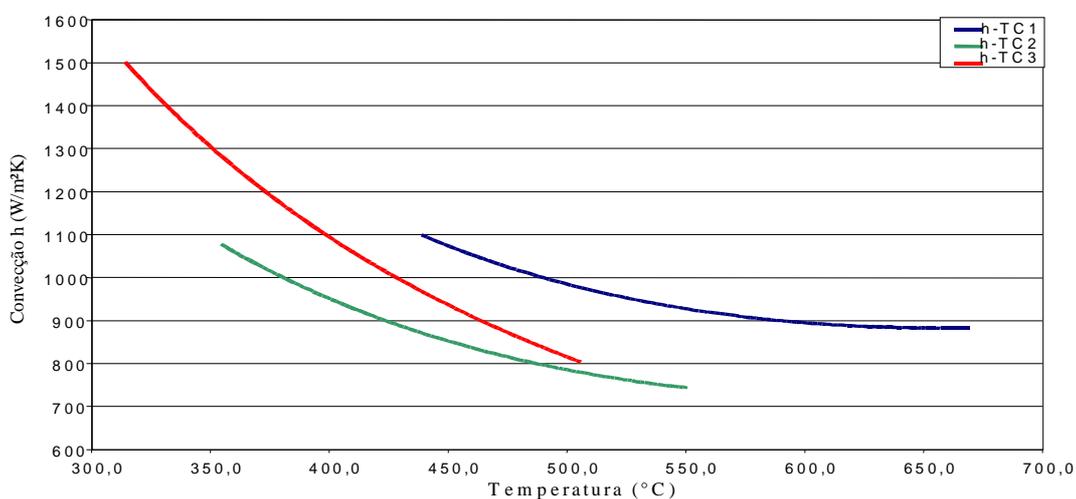


FIGURA 5.13 - Variação de  $h$  em função de  $T$  para a  $P_{ar}= 37psi$  ( $e= 2,03mm$ ).

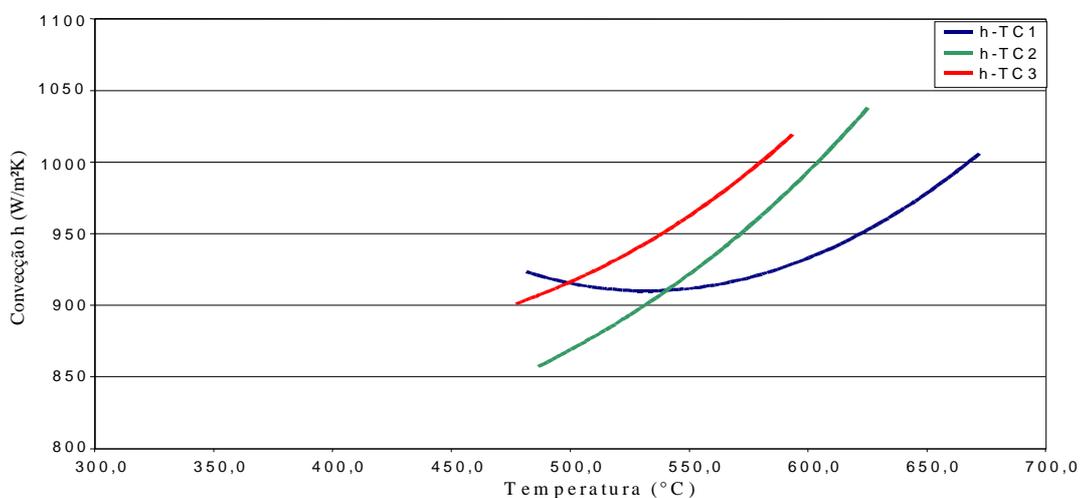


FIGURA 5.14 - Variação de  $h$  em função de  $T$  para a  $P_{ar}= 42psi$  ( $e= 2,03mm$ ).

Após obter a variação do coeficiente convectivo em função de  $P_{ar}$  para cada termopar ( $Tc1$ ,  $Tc2$  e  $Tc3$ ), foi calculado o valor médio dividindo-se a somatória de  $h$  pelo número de elementos levantados.

### 5.1.2. Levantamento das Curvas da Força de Impacto da Água

Utilizando-se os parâmetros usados para obter as taxas de resfriamento selecionadas (tabela V.1 pressão do ar de atomização de 11, 17, 19, 31, 37 e 42psi), foram efetuados ensaios para levantamento da força de impacto dos jatos de água.

Foram criadas planilhas em função de  $P_{ar}$  e levantadas as curvas para cada um dos oito pontos de medição (ver exemplo na figura 5.15). Na tabela V.4 é mostrado parcialmente o arquivo com levantamento de FI para  $P_{ar}= 31$ psi.

TABELA V.4 - Exemplo de resultados obtidos no levantamento de FI (nesse caso  $P_{ar}= 31$ psi, na posição de medição 20mm).

Data e hora	FORÇA DE IMPACTO (gf)							
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
								
24/01/2007 09:47	0,32	0,02	0,04	0,03	0,13	0,14	0,22	0,12
24/01/2007 09:47	4,38	4,09	2,97	1,64	2,34	2,00	2,53	3,87
24/01/2007 09:47	4,65	3,63	2,89	2,21	3,17	2,29	3,11	4,27
24/01/2007 09:47	4,70	3,83	2,86	2,44	3,20	2,52	3,21	5,11
24/01/2007 09:47	4,92	4,56	3,37	2,26	3,02	2,57	3,60	5,14
24/01/2007 09:47	3,83	3,36	2,87	2,03	2,58	2,48	3,49	4,84
24/01/2007 09:47	3,55	3,20	2,95	1,91	2,11	2,91	3,98	4,21
24/01/2007 09:47	4,84	3,44	2,74	1,42	1,72	2,32	2,27	3,09
24/01/2007 09:47	4,44	3,11	2,46	1,22	1,54	1,72	2,44	3,18
24/01/2007 09:47	4,10	3,42	2,91	1,63	1,13	1,60	2,55	3,29
24/01/2007 09:47	4,91	3,40	2,60	1,57	1,02	1,78	2,47	2,80
24/01/2007 09:47	3,48	2,30	2,07	1,49	1,49	2,66	3,20	4,42
24/01/2007 09:47	3,45	2,62	2,33	1,82	1,07	1,49	2,53	3,22
24/01/2007 09:47	3,16	3,35	2,87	1,55	1,28	1,65	2,89	4,11
24/01/2007 09:47	4,21	3,47	2,71	1,52	1,38	1,71	1,84	2,46
24/01/2007 09:47	3,78	2,33	1,96	1,56	2,03	2,36	2,80	3,37
24/01/2007 09:47	2,23	2,05	1,77	1,64	1,65	2,27	2,22	2,73
24/01/2007 09:47	1,96	1,64	1,45	1,43	1,54	1,84	2,71	2,75
24/01/2007 09:47	2,44	2,45	2,01	1,42	1,47	1,26	2,38	3,54
24/01/2007 09:47	2,22	3,13	2,91	1,75	2,20	1,84	2,78	4,32
24/01/2007 09:47	2,25	3,30	3,07	1,39	1,77	1,93	2,14	2,84
								

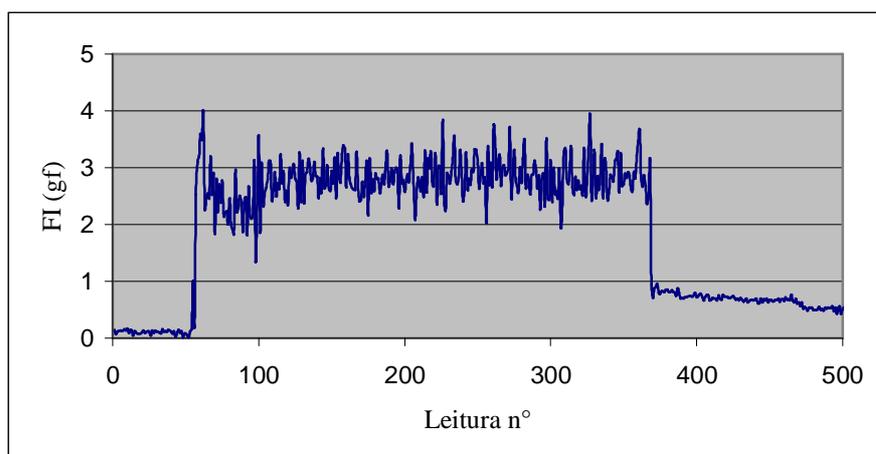


FIGURA 5.15 - Exemplo de gráfico obtido com levantamento de FI (nesse caso  $P_{ar}= 31\text{psi}$ , na posição de medição 20mm, ponto 7).

Como a alavanca onde está montado o strain-gage funciona como uma mola oferecendo uma resistência inicial diferenciada, foi selecionada de cada curva uma região em que os valores de FI tendessem para uma reta horizontal, indicando estabilização parcial da força, e com os resultados obtidos foi confeccionado um novo gráfico para se extrair a equação que determina FI no intervalo de tempo selecionado. Na figura 5.16 pode ser visto um exemplo de levantamento de curva de tendência e obtenção de FI.

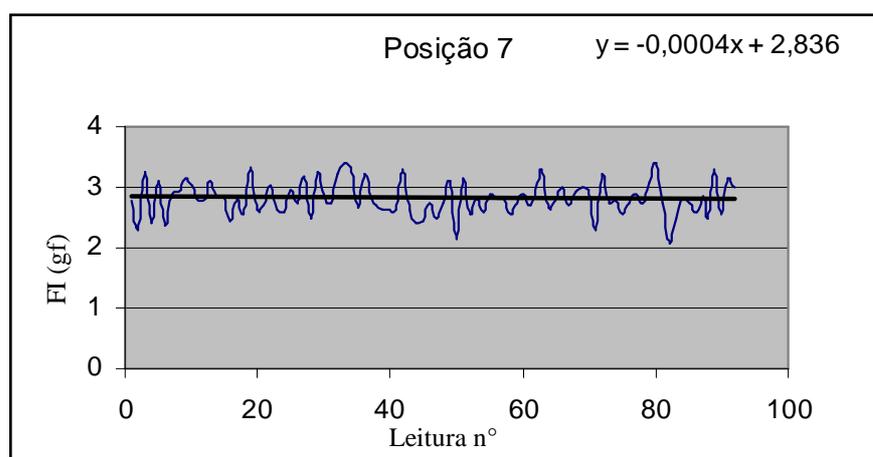


FIGURA 5.16 - Exemplo de levantamento da curva de tendência e obtenção de FI ( $P_{ar}= 31\text{psi}$ , na posição de medição 20mm, ponto 7).

Para cada ponto de medição (F1 a F8), foram efetuados dois levantamentos para posteriormente ser extraída a média dos resultados obtidos. Nas tabelas V.5 (dois levantamentos por ponto), V.6 (média de cada ponto) e V.7 (valor médio de IP obtido pela divisão de FI médio pela área de cada ponto) são apresentados exemplos de levantamento para  $P_{ar} = 31\text{psi}$ . Com o valor de IP definido e para se ter noção do seu comportamento com a variação de  $P_{ar}$ , são apresentadas nas figuras 5.17, 5.18 e 5.19 os gráficos obtidos para uma  $P_{ar}$ , crescente, de 31psi, 37psi e 42psi, respectivamente.

TABELA V.5 - Exemplo de planilha com dois levantamentos de FI para cada posição, para  $P_{ar} = 31\text{psi}$ .

Seção	F1 (gf)	F2 (gf)	F3 (gf)	F4 (gf)	F5 (gf)	F6 (gf)	F7 (gf)	F8 (gf)
10A	2,48	2,15	1,96	1,41	1,52	1,65	2,10	2,37
10B	2,29	1,85	1,86	1,29	1,33	1,45	2,08	2,18
20A	3,33	2,71	2,52	1,68	1,58	1,98	2,84	3,27
20B	3,14	2,67	2,42	1,73	1,60	1,93	2,90	3,10
30A	3,71	3,40	2,98	1,91	1,56	1,92	3,18	3,65
30B	3,75	3,30	2,71	1,79	1,62	2,12	3,38	3,67
40A	3,86	3,31	2,66	1,42	1,44	2,06	3,32	3,80
40B	3,72	2,87	2,34	1,58	1,25	1,53	2,81	3,30
50A	3,13	2,43	2,24	1,29	1,21	1,78	2,75	2,98
50B	2,82	2,54	2,17	1,40	1,30	1,82	2,67	2,98

TABELA V.6 - Exemplo de planilha com os valores médios de FI para cada posição, para  $P_{ar} = 31\text{psi}$ .

Seção	F1 (gf)	F2 (gf)	F3 (gf)	F4 (gf)	F5 (gf)	F6 (gf)	F7 (gf)	F8 (gf)
10	2,39	2,00	1,91	1,35	1,42	1,55	2,09	2,27
20	3,23	2,69	2,47	1,71	1,59	1,96	2,87	3,18
30	3,73	3,35	2,84	1,85	1,59	2,02	3,28	3,66
40	3,79	3,09	2,50	1,50	1,35	1,80	3,07	3,55
50	2,97	2,48	2,21	1,34	1,26	1,80	2,71	2,98

TABELA V.7 - Exemplo de planilha com os valores médios de IP para cada posição, para  $P_{ar} = 31\text{psi}$ .

Seção	IP no ponto de medição (gf/mm <sup>2</sup> )							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
10	0,025	0,020	0,020	0,014	0,015	0,016	0,022	0,024
20	0,034	0,028	0,025	0,018	0,016	0,020	0,030	0,033
30	0,040	0,034	0,029	0,019	0,016	0,021	0,034	0,038
40	0,040	0,032	0,026	0,016	0,014	0,018	0,032	0,037
50	0,032	0,025	0,023	0,014	0,013	0,018	0,028	0,031

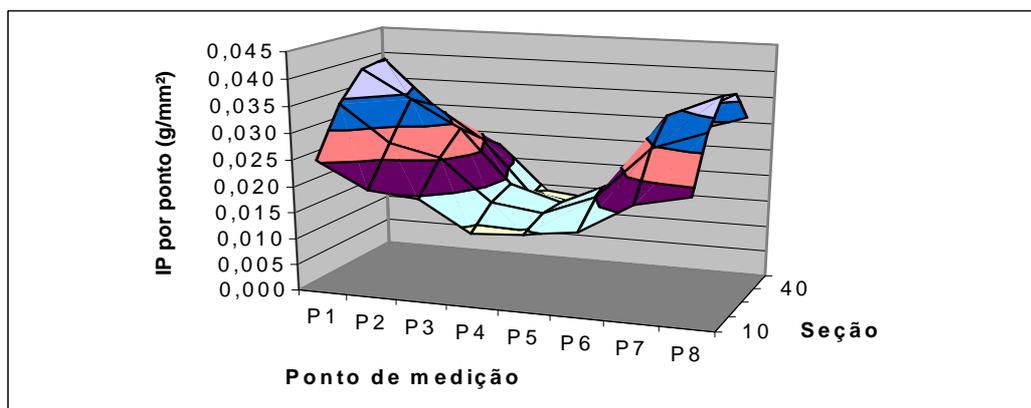


FIGURA 5.17 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 31\text{psi}$ )

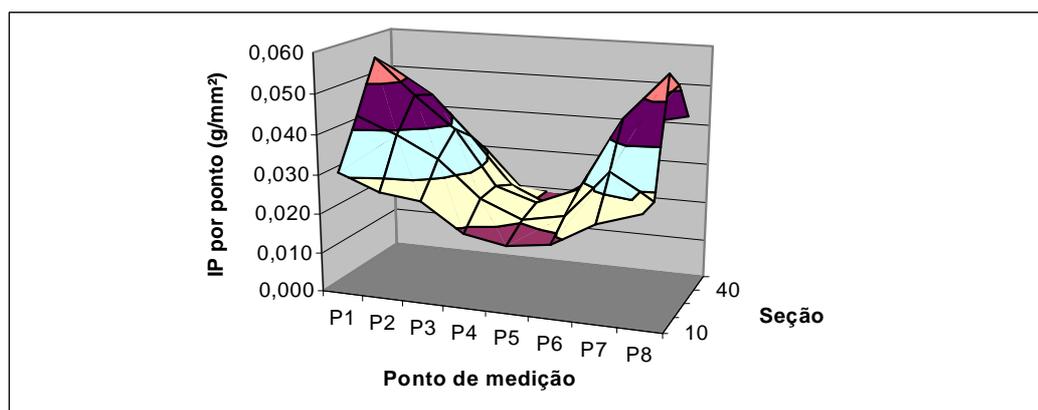


FIGURA 5.18 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 37\text{psi}$ )

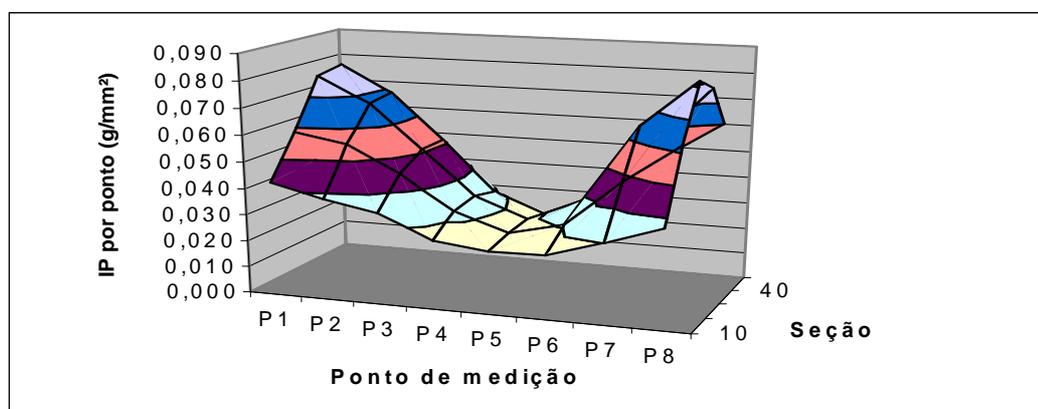


FIGURA 5.19 - Variação de IP na seção da amostra. ( $P_{ar}= 42\text{psi}$ )

Dos resultados obtidos para cada pressão, foram retirados os dados referentes aos de localização dos pontos de medição de temperatura Tc1, Tc2 e Tc3 (conforme apresentado anteriormente na figura 4.16, onde Pc1 corresponde ao Tc1, Pc2 ao Tc2 e Pc3 ao Tc3), gerando a tabela V.8. A partir desses dados foi criado o gráfico apresentado na figura 5.20, que mostra a variação de IP com a  $P_{ar}$ .

TABELA V.8 - Planilha contendo valores de IP para cada ponto de T 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
31	0,018	0,034	0,020
37	0,024	0,047	0,027
42	0,031	0,067	0,038

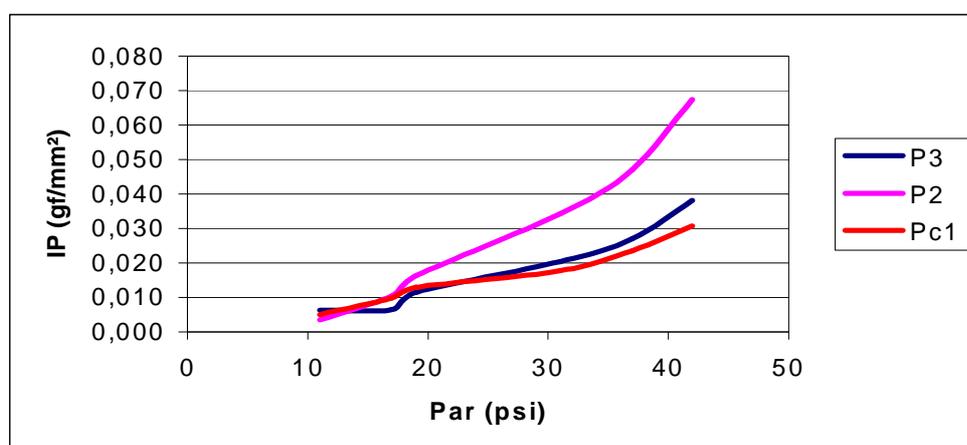


FIGURA 5.20 - Apresentação gráfica dos resultados obtidos na tabela V.8 ( $P_{ar}=31$ psi).

Analisando os perfis de IP para cada pressão e os perfis de distribuição de água (figura 4.9), verifica-se que a elevação de  $P_{ar}$  faz com que ocorra maior IP e concentração de água na região localizada próxima ao eixo dos bicos de atomização onde está localizado o termopar Tc2, e um pouco mais distante o Tc3. Ocorre, então,

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  $P_{ar}$ .

### 5.1.3. Levantamento das Curvas de Resfriamento para Amostra Longa

Em função da diferença de temperatura entre Tc1 e Tc2 e Tc3 no encharque e superenvelhecimento, indicando influência da proximidade da garra na temperatura desses pontos, foram realizados ensaios na Gleeble com amostras de 200mm de comprimento e espessuras de 0,77mm e 2,03mm. Alguns resultados são apresentados nas figuras 5.21 e 5.22.

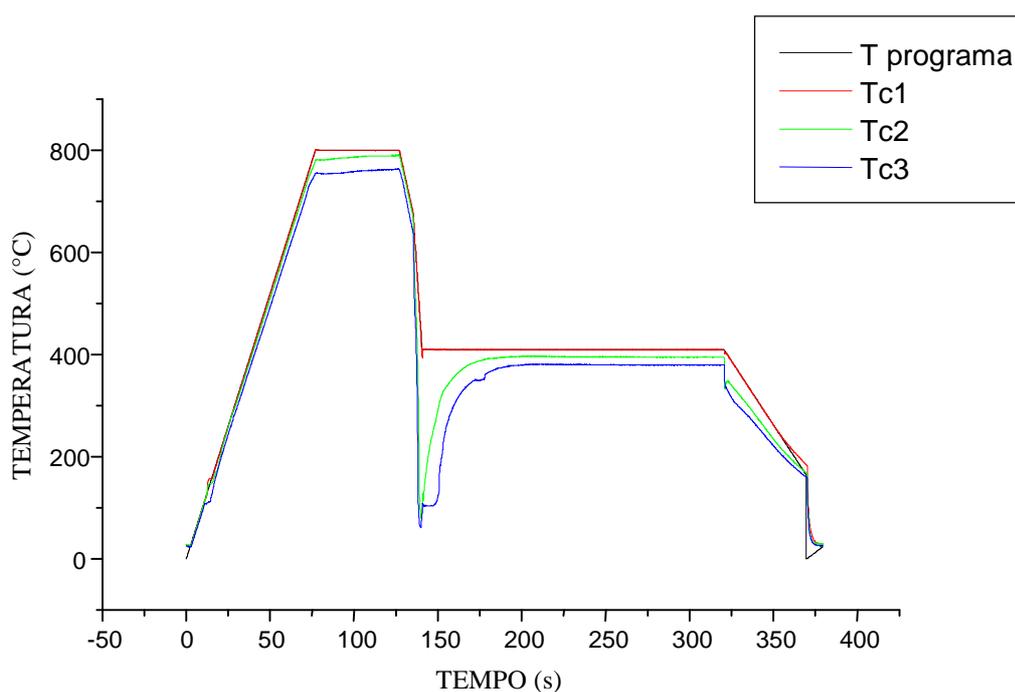


FIGURA 5.21 - Curvas de temperaturas obtidas com amostra de 200mm de comprimento e 0,77mm de espessura.

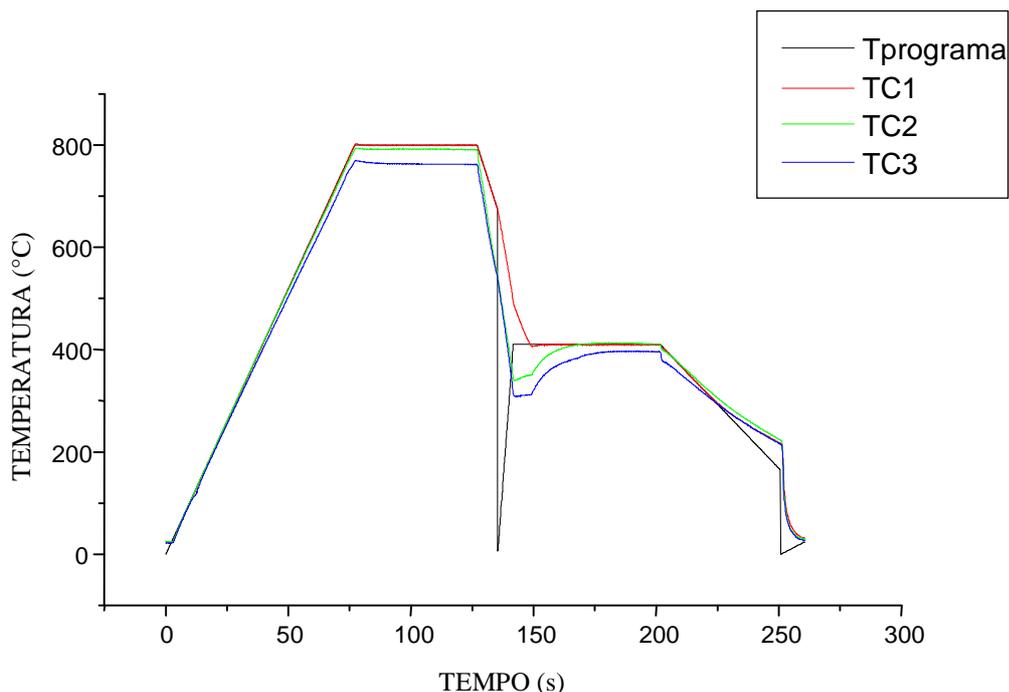


FIGURA 5.22 - Curvas de temperaturas obtidas com amostra de 200mm de comprimento e 2,03mm de espessura, com tempo de superenvelhecimento reduzido.

Verificou-se nos ensaios uma redução sensível da diferença de temperatura entre Tc1, Tc2 e Tc3 nos pontos de encharque e superenvelhecimento, em relação aos resultados obtidos para amostras com comprimento de 150mm.

Nas amostras de 150mm x 0,77mm, a diferença entre Tc2 e Tc3 alcançava valores de 78°C (encharque) e 63°C (superenvelhecimento), enquanto para amostras de 150mm x 2,03mm essa diferença chegava a 89°C (encharque) e 56°C (superenvelhecimento). Na amostra com 200mm, essa diferença foi reduzida para 33°C e 24°C (amostra de 0,77mm) e para 38°C e 11°C (amostra de 2,03mm) para encharque e superenvelhecimento, respectivamente.

Também foram efetuados alguns ensaios com a máquina controlando a temperatura de Tc1 durante o resfriamento acelerado. Verificou-se uma melhoria na obtenção da taxa de resfriamento e uma redução na diferença de temperatura entre Tc1, Tc2 e Tc3. Porém, deve-se destacar que o controle somente funciona quando a taxa de resfriamento é pouco superior à programada, fazendo com que a máquina tente compensar essa diferença liberando potência.

#### 5.1.4. Levantamento de Temperatura em 15 Pontos da Amostra

O levantamento do perfil de temperatura utilizando-se 15 termopares para as amostras de 0,77 e 2,03mm 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 com temperatura igual a zero, ou seja, 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 na faixa desejada .

Na figura 5.23 são mostrados todos os pontos de medição para amostra com 0,77mm de espessura durante o encharque. No ensaio realizado o último termopar, referente ao ponto Tc2, soltou durante o levantamento.

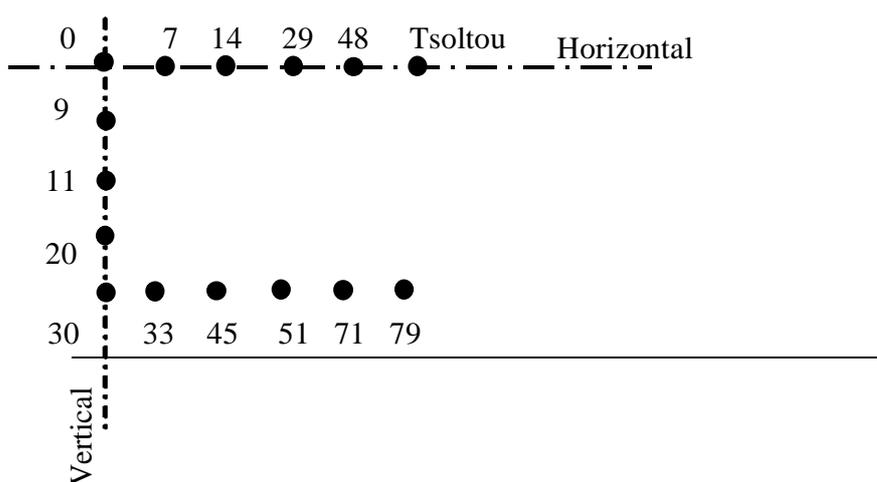


FIGURA 5.23 - Exemplo de levantamento de temperatura (°C) durante o encharque para amostra com 0,77m de espessura.

Como os valores obtidos na linha horizontal inferior ficaram elevados, eles não serão mostrados, sendo apresentados nas figuras 5.24 a 5.26 os resultados obtidos para ensaios com amostra de 0,77mm, e nas figuras de 5.27 a 5.29 os ensaios com amostras de 2,03mm de espessura, somente para os pontos localizados nas linhas vertical e horizontal. A localização dos pontos de medição nesses gráficos segue a nomenclatura utilizada na figura 5.23 para as linhas horizontal e vertical.

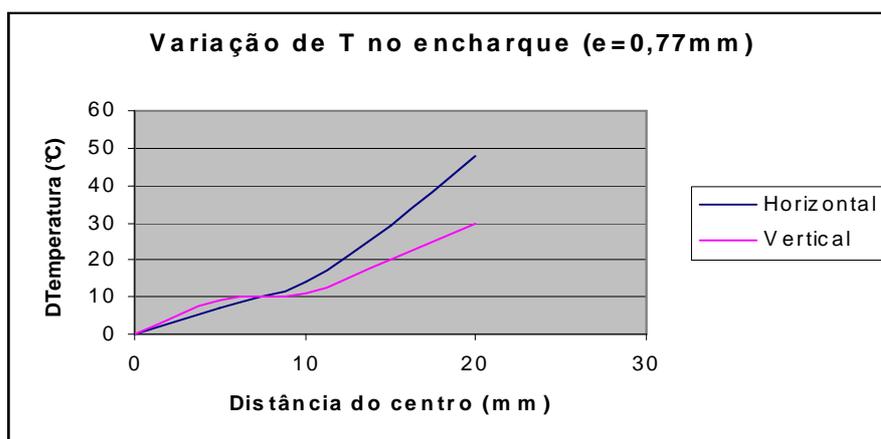


FIGURA 5.24 - Variação de T (°C) durante encharque para e=0,77mm.

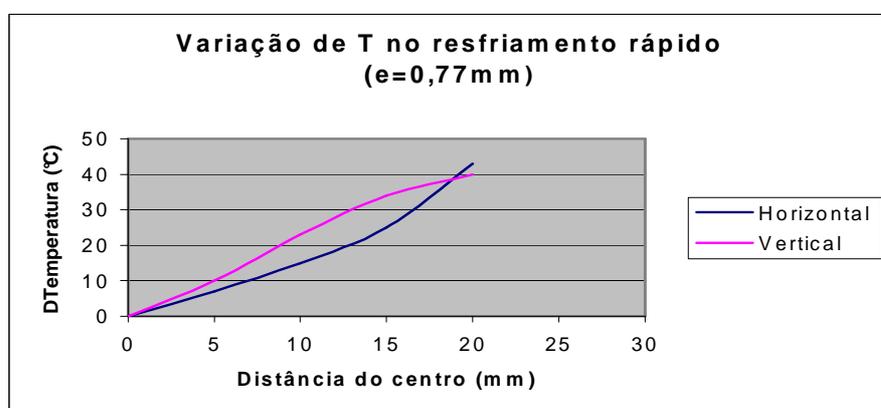


FIGURA 5.25 - Variação de T(°C) durante resfriamento rápido para e=0,77mm.

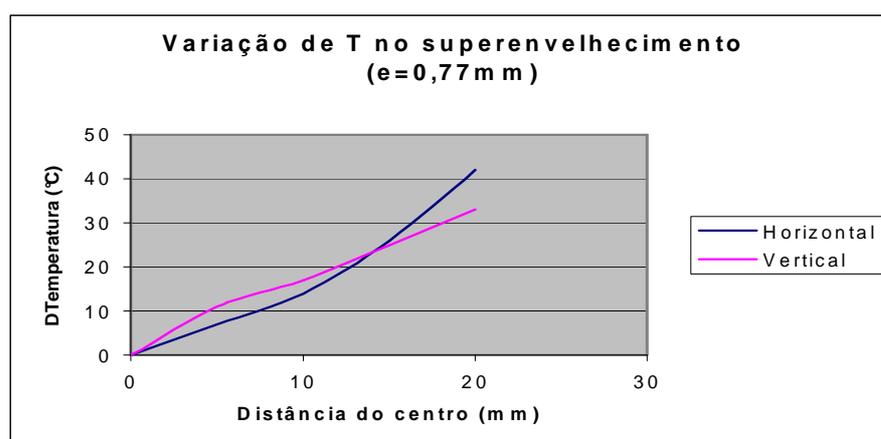


FIGURA 5.26 - Variação de T(°C) durante superenvelhecimento para e=0,77mm.

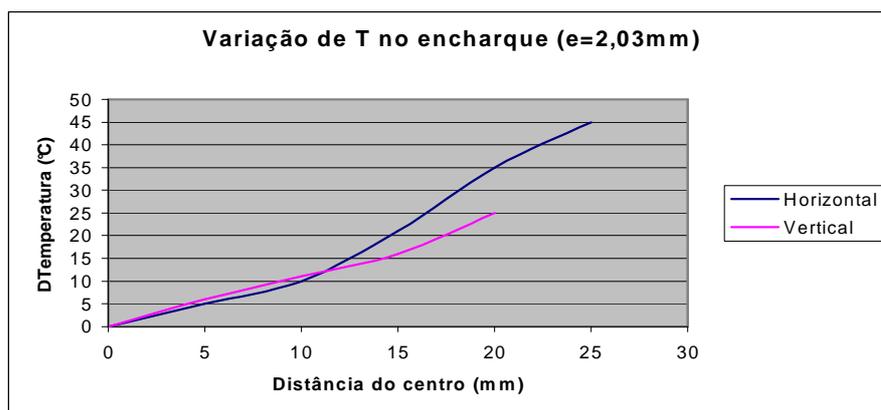


FIGURA 5.27 - Variação de T(°C) durante encharque para e=2,03mm.

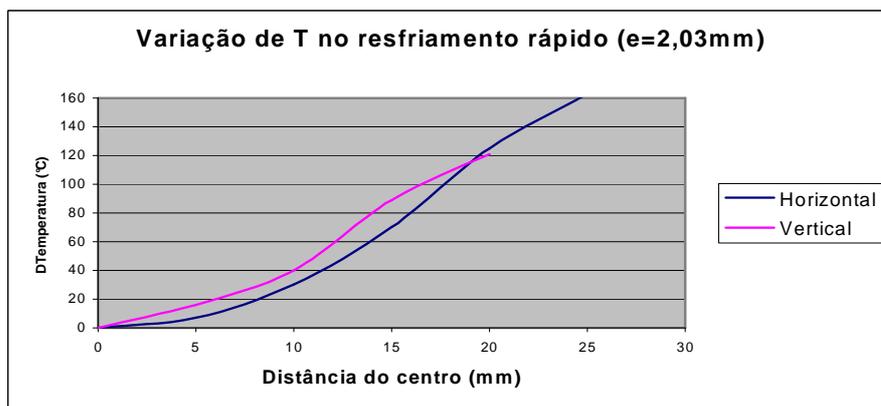


FIGURA 5.28 - Variação de T(°C) durante resfriamento rápido para e=2,03mm.

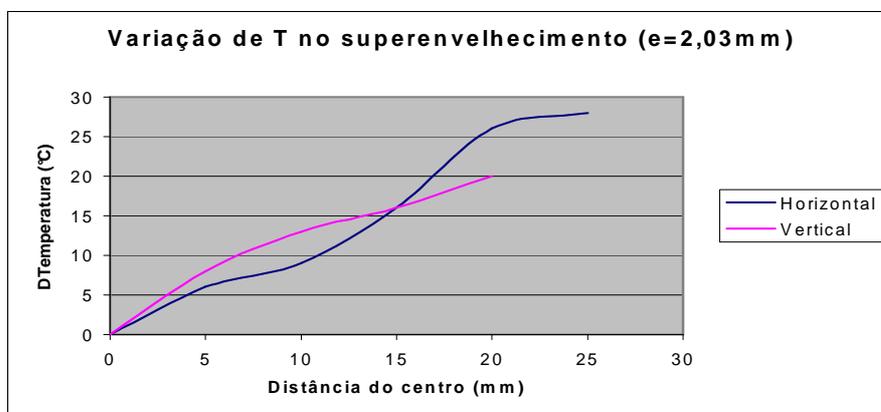


FIGURA 5.29 - Variação de T(°C) durante superenvelhecimento para e=2,03mm.

Verifica-se para a amostra de 0,77mm de espessura que a área que apresenta uma variação de temperatura de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  (nesse caso uma variação de 10 graus abaixo do valor desejado) é de 14mm x 10mm. Essa área está limitada pela etapa de resfriamento acelerado. Caso ocorra melhoria dessa etapa, a área seria ampliada para 16mm x 10mm.

Para a amostra de 2,03mm de espessura, verifica-se que a área que apresenta uma variação de temperatura de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  (também nesse caso uma variação de 10 graus abaixo do valor desejado) é de 12mm x 8mm. Essa área tabelada está limitada pela etapa de resfriamento acelerado. Caso ocorra melhoria dessa etapa a área seria ampliada para 20mm x 14mm.

## 5.2. Estudo Estatístico para Correlações de Parâmetros

Para correlacionar a FI e, conseqüentemente IP, com h, foram usados os valores do coeficiente convectivo médio para cada ponto de leitura de temperatura. Como são muitos dados e para facilitar a análise, foram inseridos na tabela V.9 somente os valores de FI para os pontos alinhados com Tc1, Tc2 e Tc3 (ver figura 4.16).

TABELA V.9 - Dados para correlação de IP com h.

Espessura da amostra	P <sub>ar</sub> (psi)	Posição	FI (gf)	A (mm <sup>2</sup> )	IP (gf/mm <sup>2</sup> )	$\Sigma h/n = h_{\text{soma}}^*$ (W/m <sup>2</sup> K)
0,77mm	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
2,03mm	31	Tc1	1,721	97,071	0,01772	709,13
		Tc2	3,354	97,805	0,03429	651,05
		Tc3	1,999	97,805	0,02044	718,38
	37	Tc1	2,289	97,071	0,02358	977,21
		Tc2	4,593	97,805	0,04696	866,89
		Tc3	2,642	97,805	0,02701	1076,75
	42	Tc1	2,975	97,071	0,03064	934,81
		Tc2	6,596	97,805	0,06744	932,36
		Tc3	3,730	97,805	0,03814	949,87

\* n é o número de termos de h.

De posse desses resultados e utilizando o software Statgraphics plus 5.1 para análise de variância, foi avaliada a correlação entre as variáveis de processo. Para que a correlação

entre as variáveis analisadas seja considerada significativa é desejável que o resultado obtido para o coeficiente de correlação (R) seja superior a 0,9 e para  $R^2$  (coeficiente de determinação) seja próximo ou superior a 90%, sendo  $R^2$  uma medida da percentagem da variabilidade total que é explicada pelo fator em estudo.

### 5.2.1. Correlação entre Coeficiente Convectivo Médio e $P_{ar}$

Utilizando regressão simples para modelo linear, obteve-se para as variáveis  $h_{soma}$  e  $P_{ar}$  um valor de R igual a 0,97409 e  $R^2$  igual a 94,8851%. A equação obtida correlacionando essas duas variáveis é:

$$h_{soma} = -54,577 + 25,1078 * P_{ar}$$

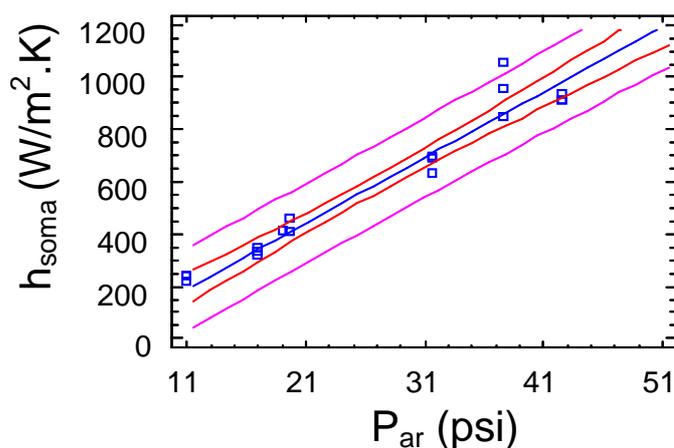


FIGURA 5.30 - Gráfico com indicação da localização dos pontos utilizados na correlação  $h_{soma}$  x  $P_{ar}$ .

Apesar de ter apresentado um resultado de correlação  $h_{soma}$  x  $P_{ar}$  forte, verifica-se que existe um ponto experimental fora da faixa de controle. Foi efetuada a remoção deste ponto, que poderia não estar correto, e efetuada nova análise de variância obtendo-se os seguintes valores:

$$R = 0,987604$$

$$R^2 = 97,5361\%$$

A nova equação obtida foi:

$$h_{\text{soma}} = -38,8716 + 24,0263 \cdot P_{\text{ar}}$$

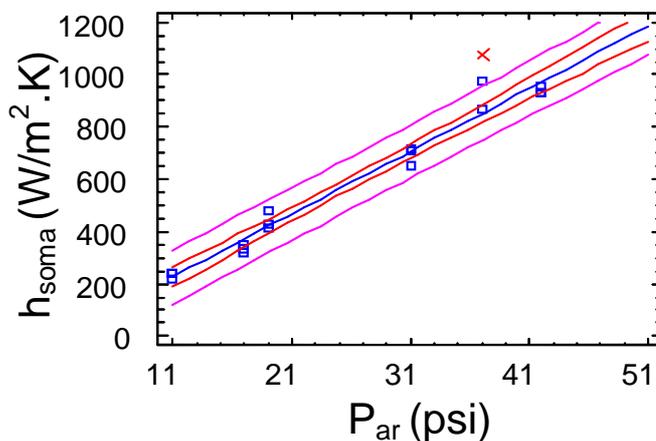


FIGURA 5.31 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação  $h_{\text{soma}}$  x  $P_{\text{ar}}$ .removendo ponto extremo.

O resultado da correlação melhorou com a remoção do ponto extremo.

### 5.2.2. Correlação entre Taxa de Resfriamento e $P_{\text{ar}}$

Para uma correlação entre Taxa de Resfriamento e  $P_{\text{ar}}$  fez-se necessário separar as análises por espessura de amostra. Dessa maneira foram efetuadas duas correlações: a primeira com amostra de espessura de 0,77mm e a segunda com espessura de 2,03mm.

Para melhorar as análises foram inseridos, também, dados de outras curvas de resfriamento obtidas durante os ensaios na Gleeble.

Utilizando regressão simples para modelo linear, obtiveram-se para espessura de 0,77mm os valores:

$$R = 0,987731 \text{ e}$$

$$R^2 = 97,5613\%$$

A equação obtida foi:

$$\text{Taxa Resfriamento} = 4,63382 + 2,32109 \cdot P_{\text{ar}} \text{ ou}$$

$$P_{ar} = (\text{Taxa Resfriamento} - 4,63382) / 2,32109$$

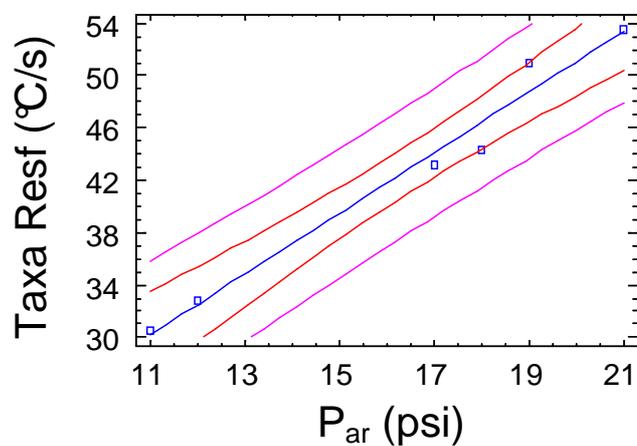


FIGURA 5.32 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação Taxa de Resfriamento x P<sub>ar</sub> para amostra com 0,77mm de espessura.

Para a espessura de 2,03mm os resultados foram:

$$R = 0,983205 \text{ e}$$

$$R^2 = 96,6692\%$$

A equação obtida foi:

$$\text{Taxa Resfriamento} = -35,5885 + 2,13077 * P_{ar} \text{ ou}$$

$$P_{ar} = (\text{Taxa Resfriamento} - 35,5885) / 2,13077$$

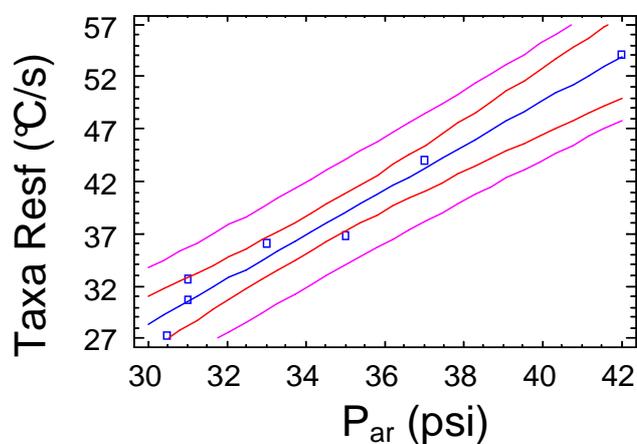


FIGURA 5.33 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na correlação Taxa de Resfriamento x P<sub>ar</sub> para amostra com 2,03mm de espessura.

### 5.2.3. Correlação entre Coeficiente Convectivo Médio e IP

Utilizando regressão simples para modelo linear, obteve-se para as variáveis  $h_{soma}$  e IP:

$$R = 0,779824$$

$$R^2 = 60,8125 \% \text{ (equação: } h_{soma} = 305,423 + 13760,3 \cdot IP \text{)}$$

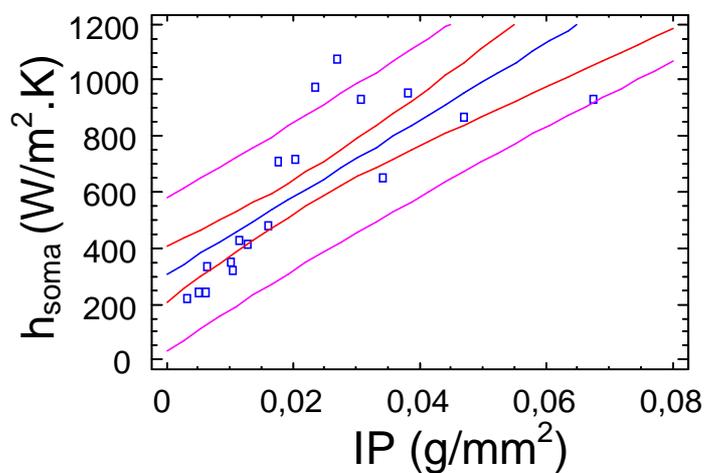


FIGURA 5.34 - Gráfico com indicação da localização dos pontos utilizados na correlação  $h_{soma}$  x IP.

Como a correlação não ficou satisfatória foram efetuadas novas análises para a relação  $h_{\text{soma}}$  x IP em função da espessura da amostra. Para a espessura de 0,77mm os valores obtidos foram:

$$R = 0,934754$$

$$R^2 = 87,3765\%$$

A equação obtida foi:

$$h_{\text{soma}} = 145,417 + 20885,2 \cdot \text{IP}$$

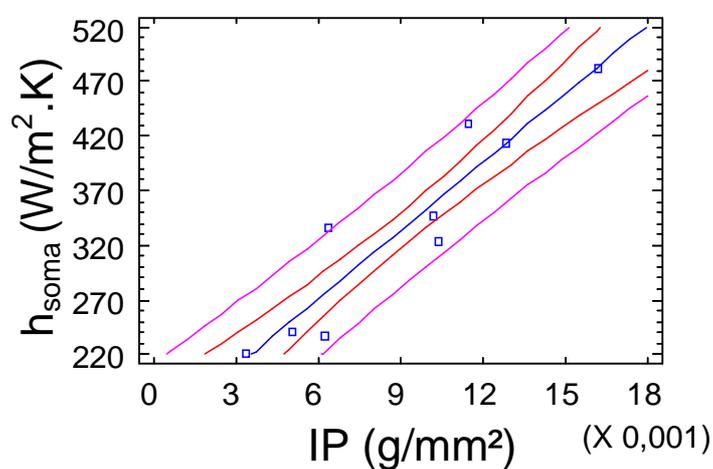


FIGURA 5.35 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na  $h_{\text{soma}}$  x IP para amostra com 2,03mm de espessura.

Para espessura de 2,03mm obteve-se a equação  $h_{\text{soma}} = 793,991 + 2189,68 \cdot \text{IP}$ , com  $R = 0,235907$  e  $R^2 = 5,56523\%$

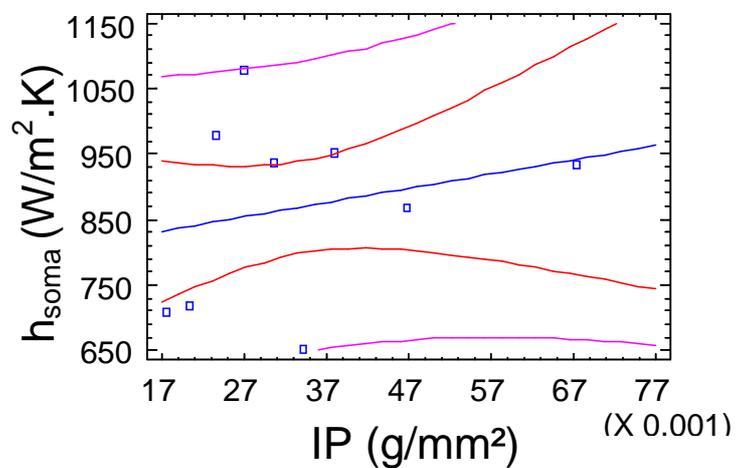


FIGURA 5.36 - Gráfico com indicação da localização dos pontos na  $h_{soma}$  x IP para amostra com 2,03mm de espessura.

Os resultados indicam que apenas para a espessura de 0,77mm existe uma correlação forte entre o coeficiente convectivo e IP.

## 6. CONCLUSÕES

- A simulação de ciclo de recozimento contínuo na Gleeble não está apresentando homogeneidade de temperatura na região de trabalho da amostra. A temperatura é influenciada: (i) nas etapas de encharque e superenvelhecimento pelo resfriamento das garras que fixam a amostra; (ii) e durante a etapa de resfriamento rápido, pela pressão do ar de atomização. Para amostras com 0,77mm de espessura a variação é de 78°C (encharque) e 63°C (superenvelhecimento) e para amostra com espessura de 2,03mm é de 89°C (encharque) e 56°C (superenvelhecimento). A variação de temperatura não é constante e inicia-se nestas etapas com valores mais elevados, decrescendo paulatinamente para amostras de menor espessura. Funciona de maneira inversa para as amostras de maior espessura em função da maior área para condução de calor para a garra. Já na etapa de resfriamento acelerado, durante o pico negativo, a variação pode alcançar até 300°C e cresce com a elevação da pressão do ar de atomização .

- Utilizando amostras de 150mm de comprimento a simulação do ciclo apresenta na região central da amostra uma variação máxima de  $\pm 10^\circ\text{C}$  em uma área de 14mm x 10mm e de 12mm x 8mm para espessuras de amostra de 0,77mm e 2,03mm, respectivamente.

- Para se obter a pressão do ar de atomização ( $P_{\text{ar}}$ ) em função da taxa de resfriamento acelerado desejada pode-se utilizar valores obtidos na equação:

$$P_{\text{ar}} = (\text{Taxa Resfriamento} - 4,63382) / 2,32109 \text{ (amostra 0,77mm de espessura)}$$

$$P_{\text{ar}} = (\text{Taxa Resfriamento} - 35,5885) / 2,13077 \text{ (amostra 2,03mm de espessura)}$$

onde a unidade da taxa de resfriamento é  $^\circ\text{C/s}$  e de  $P_{\text{ar}}$  é psi.

- Pode-se correlacionar o coeficiente convectivo com baixas pressões de impacto (0,01g/mm<sup>2</sup> a 0,10g/mm<sup>2</sup>) da água atomizada sobre a amostra (0,77mm de espessura) utilizando a equação:

$$h_{\text{soma}} = 145,417 + 20885,2 * \text{IP}$$

onde a unidade de  $h_{\text{soma}}$  é  $\text{W/m}^2\text{K}$  e de IP é  $\text{gf/mm}^2$ .

- Pode-se correlacionar o coeficiente convectivo com a pressão de atomização de ar para cada espessura de amostra utilizando-se a equação:

$$h_{\text{soma}} = -38,8716 + 24,0263 \cdot P_{\text{ar}}.$$

- Para melhorar a homogeneidade da temperatura na região de trabalho, ou seja, reduzir as diferenças de temperatura entre os pontos centrais da amostra ( $T_{c1}$ ) e os localizados na extremidade da região de trabalho ( $T_{c2}$  e  $T_{c3}$ ), deve-se: (i) trabalhar com menores valores para pressão de atomização do ar, porém com sistema de medição e controle de vazão (melhoria na etapa de resfriamento rápido); (ii) e trabalhar com amostras de maior comprimento (melhoria nas etapas de encharque e superenvelhecimento).

- Melhores resultados de simulação podem ser obtidos executando o ensaio com o controle de temperatura da máquina funcionando durante o resfriamento acelerado, desde que  $P_{\text{ar}}$  seja um pouco superior à indicada pela correlação de  $P_{\text{ar}} \times \text{Taxa de Resfriamento}$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARRADO, F. S. *Efeito de Parâmetros de Recozimento Contínuo sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço “Dual Phase” 980*. Ouro Preto: UFOP, 2003. 104p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).
2. BARBOSA, A. H. A. *Análise da Influência do Teor de Carbono e de Parâmetros de Processo do Recozimento Contínuo na Obtenção de Aços com Características de Endurecimento após a Cura da Pintura*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. 139p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica)
3. ABE, H., SATOH, S., “Progress of Continuous Annealing Technology for Cold Rolled Sheet Steels and Associated Product Development”, Kawasaki Steel Technical Report, nº22, may 1990, p.48-56.
4. C.A.P.L. TECHNOLOGY. Nippon Steel Corporation, sept 1995.
5. MOULD, P. R. Overview of Continuous-Annealing Technology for Steel Sheet Products, Metallurgy of Continuous-Annealing Sheet Steel, Conference Proceedings, AIME, 1982, p.3-31.
6. ROCHA, R. O. *Influência de Variáveis de Recozimento Contínuo na Morfologia dos Constituintes de Aços Bifásicos Laminados a Frio da Classe Limite de Resistência de 600 MPa*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2004. 141p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).
7. Manual de operação do CAPL.
8. PRADHAN, R. GUPTA, I. Developments in the Annealing of Sheet Steels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM - TMS FERROUS METALLURGY COMMITTEE, 1991, Cincinnati, Ohio.
9. Manual da Gleeble. *Gleeble Systems and Applications*; Ed December 1998. New York: Dynamic Systems Inc. 1 volume.
10. CHEN, W. Control of Thermal Gradient and Cooling Rate in Gleeble Specimens. Dynamic Systems Inc. October 1995. 16p.
11. 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. 698p.
12. SPRAYING SYSTEMS CO. *Engenharia de Desenvolvimento e Produção de Bicos de Pulverização e Acessórios*. USA. 1994. (Catálogo 55)
13. PUSHMANN, F. SPECHT, E. Atomized Spray Quenching as an Alternative Quenching Method for Defined Adjustment of Heat Transfer. *Steel Research*. No 4, p283-288, 2004.
14. LI, D. WELLS, M.A. Effect of Water Flow Rate, Water Temperature, Nozzle Size and Nozzle Stand-off Distance on the Boiling Water Heat Transfer of AISI 316 Stainless Steel Plate. *Canadian Metallurgical Quarterly*. Vol 4. No 1, p59-67, 2005.

15. HORSKY, J. RAUDENSKY, M. TSENG, A. A. Heat Transfer Study of Secondary Cooling in Continuous Casting. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF STEELMAKING, 3, março 2005. *Iron and steel technology*.
16. COULSON, J.M. RICHARDSON,J.F. Secagem. In: COULSON, J.M. RICHARDSON,J.F. *Tecnologia Química; operações unitárias*. 2 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1977. Vol II, capítulo 15, p.674-682.
17. CHOI, J. W. CHOI, J. W. Convective Heat Transfer Coefficient for High Pressure Water Jet. *ISIJ International*, vol 42, No. 3, p 283-289, 2002.
18. MIZIKAR, E. A. Mathematical heat transfer model for solidification of continuously cast steel – Trans. AIME, 239; p 1747-1753. Novembro 1967.