

# INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PROCESSO DA LAMINAÇÃO DE BARRA CHATA DE 1 5/8" X 5/16" PRODUZIDA NO AÇO SAE 5160 NO FENÔMENO DE EMPENO<sup>1</sup>

Jéveson Batista dos Santos<sup>2</sup>  
Rosan Fernandes Lima<sup>3</sup>  
André Barros Cota<sup>4</sup>

## Resumo

Neste trabalho analisou-se os fatores que influenciam na geração do empeno da barra chata 1 5/8" x 5/16" produzida no aço SAE 5160 empregada na produção de estruturas metálicas para construção civil. O empeno causa inúmeros problemas operacionais durante o processo de laminação, além de ser um fator limitante para atender os requisitos de qualidade demandada pelo mercado. A metodologia experimental envolveu a caracterização do produto e do processo, com a determinação da composição química, variação da dureza, microestrutura e perfil de resfriamento, seguida da análise do diagrama de transformação no resfriamento contínuo do aço SAE 5160. As ações realizadas no teste em escala industrial que permitiu a obtenção de bons resultados eliminando o empeno da barra chata laminada.

**Palavras-chave:** Empeno; Barra chata; SAE 5160.

## INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF ROLLING MILL PROCESS OF FLAT BAR OF 1 5/8 " X 5/16 " PRODUCED IN STEEL SAE 5160 IN THE PHENOMENON OF WARPING

### Abstract

This work analyzed the factors that influence in the generation of the warping in the flat bar 1 5/8" x 5/16" produced in steel SAE 5160 and used in the production of metallic structures for civil construction. Warping causes various operational problems during the rolling mill process, besides being a limitation to meet the quality requirements of the customers. The experimental procedure involved the characterizations of the product and of the process, with the determination of the chemical composition, variation of the hardness, of the microstructures and of the cooling profile, followed by the analysis of the diagram of continuous cooling transformation of steel SAE 5160. The actions carried out in the industrial tests which lead to good results in eliminating the warping in the flat bar.

**Key words:** Warping; Flat bar; SAE 5160.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP

<sup>2</sup> Gerente de Área de Metalurgia da ArcelorMittal Cariacica

<sup>3</sup> Supervisor do Laboratório Físico da ArcelorMittal Cariacica

<sup>4</sup> Professor Associado III, DEFIS/REDEMAT/UFOP

## 1 INTRODUÇÃO

Na laminação podem-se classificar os defeitos em estruturais, superficiais e de forma. Entre os defeitos de forma mais comuns são ondulação e empeno. Este último defeito de forma caracteriza-se por um desvio lateral de retilidade da barra que se origina no processo de produção e que, quando não é passível de recuperação via endireitadeira, leva ao sucateamento ou mesmo à reclamação de clientes quando não detectado pela inspeção.

Neste trabalho pesquisou-se a ocorrência do fenômeno de empeno na barra chata SAE 5160 produzida no laminador da Linha Leve da ArcelorMittal Cariacica com o intuito de definir as melhores condições operacionais de laminação, a fim de que seja eliminado este defeito que não se manifesta com o aço SAE 1070.

### 1.1 Revisão Bibliográfica

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados no intuito de prever a estrutura final do material e, conseqüentemente, as suas propriedades mecânicas. Estes estudos levam em consideração diversas etapas do processo de laminação, iniciando-se no forno de reaquecimento, trem de laminação e, por fim, o leito de resfriamento, sendo este último de grande importância, pois grande parte dos produtos laminados a quente são resfriados em barras retas sobre leitos de resfriamento.<sup>(1)</sup>

Nesta última etapa do processo, os modelos matemáticos levam em consideração comprimento das zonas de resfriamento, os diagramas de resfriamento contínuo dos aços e o processo de transferência de calor no intuito de prever a microestrutura do produto laminado.<sup>(1,2)</sup>

O processo de transferência de calor durante o resfriamento do produto laminado ocorre a partir de sua superfície através dos fenômenos de convecção, radiação e condução.

O resfriamento não é, geralmente, homogêneo ao longo da seção e comprimento do produto.

Observou-se o efeito do resfriamento não homogêneo durante a produção de vergalhão pelo processo *thermex*, no qual detectou uma diferença nas propriedades mecânicas (alongamento, limite de resistência e limite de escoamento) nas extremidades das barras, oriunda da diferença de temperatura, onde as pontas das barras são mais frias em relação ao restante do produto.<sup>(3)</sup>

Efeito semelhante também foi observado em outros estudos que durante o processo de resfriamento de tubos, em leito de resfriamento e após o processo de têmpera, uma distribuição heterogênea da temperatura ao longo do produto era capaz de gerar tensões residuais que, se excederem o limite de escoamento, ocasionarão deformações plásticas (empenamento).<sup>(4,5)</sup>

As tensões residuais podem ser de origem térmica e de transformações de fase. As tensões de origem térmica são tensões que surgem numa peça devido a gradientes de temperatura, que podem levar à deformação plástica inesperada ou fratura.<sup>(6,7)</sup> As tensões provenientes das transformações de fases produzem variações de volume tanto mais sensíveis quanto mais drásticas as condições de resfriamento e mais complexas as formas das peças.<sup>(7)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODO

### 2.1 Materiais

Os aços utilizados no estudo foram o SAE 5160 e SAE 1070 laminados na bitola de barra chata de 1 5/8" x 5/16" (largura de 41,28 mm e espessura de 7,94mm), cuja composição química típica está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1** – Composição química típica dos aços SAE 5160 e SAE 1070 produzidos na ArcelorMittal Cariacica (% em peso)

Aço		C	Mn	Si	P	S	Nb	Cr
5160	Mín	0,560	0,750	0,150	-	-	0,030	<b>0,700</b>
	Máx	0,640	1,000	0,300	0,030	0,030	0,040	<b>0,900</b>
1070	Mín	0,650	0,600	0,150			---	---
	Máx	<b>0,750</b>	<b>0,900</b>	<b>0,350</b>	<b>0,030</b>	<b>0,035</b>	---	---

A grande diferença de composição química existente entre os aços SAE 5160 e SAE 1070 refere-se à presença de elementos de liga, de enorme influência no comportamento do aço que são o manganês, cromo e nióbio.

### 2.2 Métodos

#### 2.2.1 Medição da temperatura das barras no leito de resfriamento

A temperatura de desenformamento dos tarugos está compreendida entre 950°C e 1010°C, permitindo uma condição adequada de laminação, não afetando as condições de agarre dos tarugos nos passes de laminação e evitando também uma elevada troca de calor por radiação das barras no leito.

A medição da temperatura das barras na chegada do leito de resfriamento para construção da curva de resfriamento foi realizada por pirômetro portátil da marca Raytek com emissividade de  $\epsilon = 0,84$  em que a faixa de temperatura da barra na chegada do leito está entre 790°C e 850°C.

#### 2.2.2 Medição da dureza Brinell

O comprimento do tarugo empregado na produção da barra chata de 1 5/8" x 5/16" foi de 5,50 m produzindo uma barra de 289 m, que foi cortada na tesoura divisora em 6 barras de 48m para que cada barra fosse acondicionada no leito de resfriamento de comprimento de 60 m.

Amostras de 300 mm de comprimento foram retiradas de forma aleatória para se avaliar a distribuição da dureza e a microestrutura ao longo dos 289m da barra chata laminada tanto para o aço SAE 5160, que apresentou empeno, quanto para o aço SAE 1070, no qual não houve o surgimento de tal defeito.

Foram coletadas 24 amostras da barra chata de 1 5/8" x 5/16" oriundas de 3 tarugos de cada aço (SAE 5160 e SAE 1070) totalizando 72 amostras por tipo de aço.

Em cada amostra foi realizada a medição da dureza Brinell (187,5 kgf de carga e diâmetro da esfera de 2,5 mm) em cinco pontos ao longo da largura da barra, gerando um valor médio para cada amostra estudada, com o intuito de

monitorar o efeito da história térmica nos resultados de dureza, utilizando-se o durômetro da marca Industécnica, modelo Microtest.

### 2.2.3 Análise metalográfica e medição da microdureza

Para realizar a análise metalográfica e medição da microdureza Vickers foram retiradas 8 amostras de 20 mm das amostras iniciais de 300mm, que apresentaram maior variação de dureza, com objetivo de analisar a microestrutura. Estas amostras de 20 mm foram identificadas pelas letras A, B, C, D, E, F, G e H e ao longo de cada amostra foram realizadas três medições de microdureza Vickers com carga de 100 gf.

As amostras foram preparadas por lixamento e polimento padrão e atacadas com nital 2%, para a caracterização microestrutural, na seção transversal, por microscopia ótica.

### 2.2.4 Ensaio de dilatométrica para obtenção do diagrama de transformação no resfriamento contínuo para o aço SAE 5160

A análise dilatométrica foi realizada em um dilatômetro de têmpera Adamel-Lhomargy LK 02 (Cetec/Redemat), utilizando amostras cilíndricas com 2 mm de diâmetro e 12 mm de comprimento, cuja composição química é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2** – Composição química das amostras para dilatométrica (% em peso)

Corrida	C	Mn	Si	P	S	Nb	Cr
75336	0,58	0,77	0,17	0,019	0,019	0,033	0,72

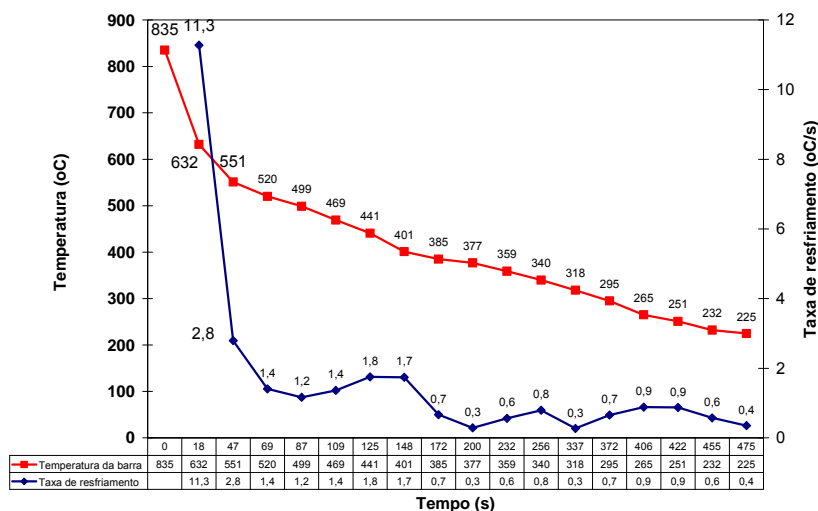
Os corpos de prova foram aquecidos em dilatômetro a 6°C/s até a temperatura de austenitização de 900°C, mantidos nesta temperatura por 3 minutos e resfriados com taxas constantes de 1,0°C/s; 1,5°C/s; 2°C/s; 3°C/s; 4°C/s; 6°C/s; 8°C/s e 12°C/s.

O ambiente de aquecimento foi em baixo vácuo e o de resfriamento com vazão de Hélio. As amostras provenientes dos ensaios de dilatométrica foram analisadas no microscópio ótico após ataque com reativo nital e em seguida realizado o ensaio de microdureza com microdurômetro Leitz, visando avaliar presença dos microconstituintes na estrutura do material.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Medição de Temperatura da Barra Chata no Leito de Resfriamento

Para avaliar a taxa de resfriamento à qual a barra chata 1 5/8" x 5/16" é normalmente submetida durante o processo de laminação, realizou-se a medição da temperatura da barra na chegada no leito de resfriamento até a mesa de rolos. Na Figura 1 é apresentado os valores da temperatura e taxa de resfriamento em função do tempo. O sistema de empilhamento das barras no leito consistiu na colocação de apenas uma barra por pente no leito.



**Figura 1** – Curva de resfriamento para barra chata 1 5/8" x 5/16".

Notou-se uma elevada taxa de resfriamento assim que a barra chegou ao leito de resfriamento (11,3°C/s), o que pôde ser visto através de uma queda brusca de temperatura de 835°C para 632°C em apenas 18 segundos. Observou-se também que a barra foi submetida a uma elevada taxa de resfriamento até 47 segundos (2,8°C/s), período em que já ocorreu o empeno na barra chata. Após este tempo a taxa de resfriamento tornou-se menor e sofreu menor variação.

A barra chata 1 5/8" x 5/16" SAE 1070 também sofreu as mesmas condições de resfriamento e, no entanto, não apresentou o fenômeno de empeno.

As barras chegaram ao leito de forma retilínea, no entanto, à medida que ocorreu o resfriamento, houve o surgimento do empeno. Na Figura 2 é apresentado o empeno presente na barra chata antes da utilização das alterações propostas. Os valores de empeno encontrados na barra chata variaram de 40 mm a 65 mm, sendo que o valor aceitável pelos clientes é de 30 mm.



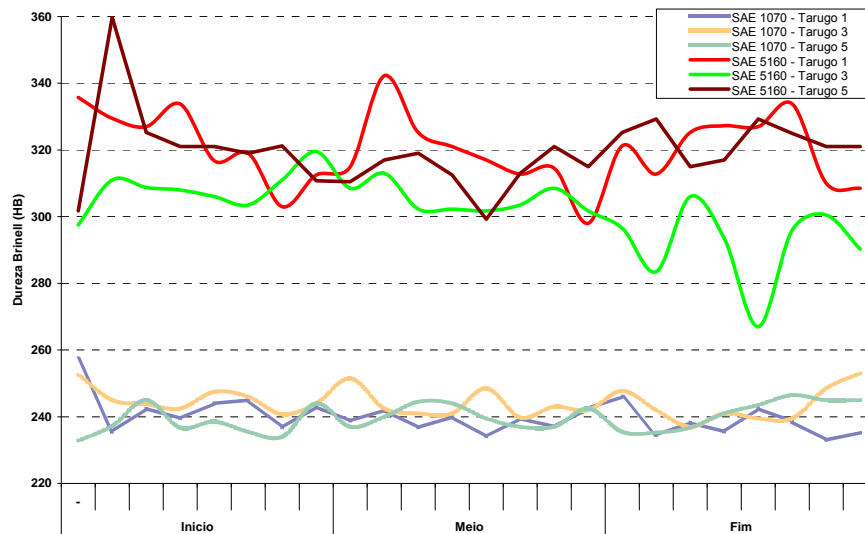
**Figura 2** – Empeno na barra chata 1 5/8" x 5/16" do aço SAE 5160.

### 3.2 Medição da Dureza Brinell

Notou-se na Figura 3 que os valores de dureza para o aço SAE 1070 oscilaram entre 233HB a 258HB com uma amplitude de 25 HB e para o aço SAE 5160 os valores de dureza oscilaram entre 267 HB a 360 HB com uma



amplitude de 93 HB, apresentando, portanto, uma elevada dispersão dos dados e valores bem maiores de dureza comparados ao aço SAE 1070.

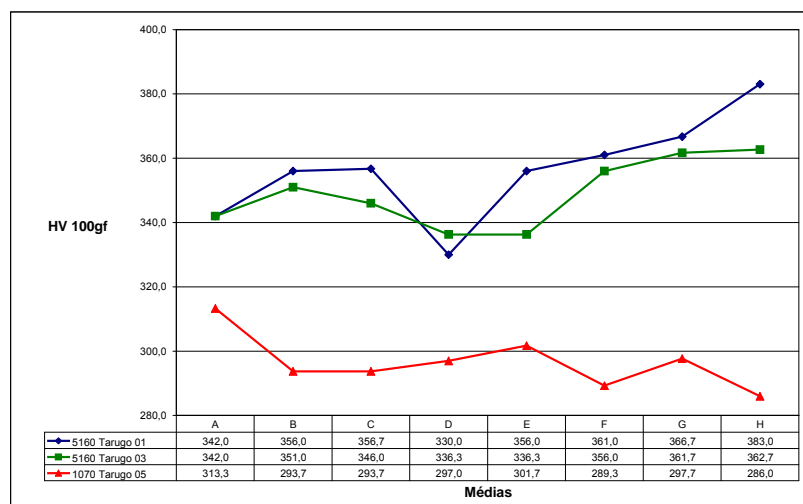


*Posição de retiradas de amostras ao longo dos 289 metros de barra*

**Figura 3** – Variação de dureza para os aços SAE 5160 e SAE 1070.

### 3.3 Medição da Microdureza dos Aços SAE 5160 e SAE 1070

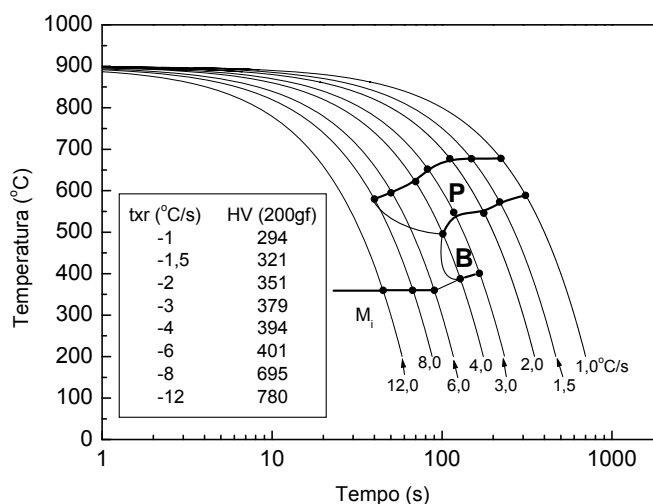
Observou-se na Figura 4 que a microdureza Vickers das amostras do aço SAE 5160 de 336 a 383 e apresentou uma maior dispersão enquanto que o aço SAE 1070 microdureza Vickers variando de 286 a 313.



**Figura 4** - Variação de dureza das amostras dos aços SAE 5160 e SAE 1070.

### 3.4 Diagrama de Transformação no Resfriamento Contínuo para o aço SAE 5160

Elaborou-se o diagrama de transformação no resfriamento contínuo do aço SAE 5160 empregado na produção da barra chata, com intuito de identificar as taxas de resfriamento e microestruturas formadas, conforme Figura 5.



**Figura 5** – Diagrama Transformação no Resfriamento Contínuo do aço SAE 5160.

Na Tabela 3 é apresentada a microestruturas obtidas em função das taxas de resfriamento e os respectivos valores de microdureza Vickers, no qual pode-se destacar:

- para taxas de resfriamento abaixo de 1,5°C/s, observou-se apenas a ocorrência de perlita;
- para taxa de 2,0°C/s, observou-se a ocorrência de perlita e martensita;
- para as taxas de 3,0°C/s e 4,0°C/s, observaram-se uma mescla de estrutura com aparecimento de perlita, martensita e bainita; e
- para taxas de 6,0°C/s a 12,0°C/s, observou-se uma diminuição da quantidade de perlita e aumento da quantidade de martensita.

**Tabela 3** - Análise metalográfica e medição da microdureza aço SAE 5160

Amostra	Taxa de resfriamento (°C/s)	Estrutura (%)				Microdureza Vickers - 50gf			Microdureza (Vickers) - 200gf
		Ferrita	Perlita	Bainita	Martensita	Perlita	Ferrita	Martensita	
A	1	1	99	-	-	306	-	-	294
B	1,5	1	99	-	-	340	-	-	321
C	2,0	1	97	-	2	353	-	623	351
D	3,0	-	75	10	5	313	-	739	379
E	4,0	-	53	16	31	306	-	739	394
F	6,0	-	35	-	65	340	-	655	401
G	8,0	-	20	-	80	340	-	965	695
H	12,0	-	5	-	95	509	-	825	780

### 3.5 Modificação no Processo Industrial

A proposta de redução da taxa de resfriamento em escala industrial, visando à obtenção de barras sem empeno, baseou-se nos aspectos metalúrgicos e operacionais mais relevantes.

A partir das análises das microestruturas e do correspondente diagrama TRC do aço SAE 5160, observou-se que taxas de resfriamento abaixo de 1,5°C/s resultaram em uma microestrutura perlítica e que acima de 2,0°C/s levaram ao aparecimento de microestruturas aciculares, como martensita e bainita, o que é fortemente prejudicial para o produto devido à geração de tensões residuais, como

indicada pela alta dureza Vickers detectadas nas amostras de barra chata (Figura 6).

Outro ponto a ser considerado é a influência da espessura final do produto, pois quanto menor a espessura, maior a taxa de resfriamento o que aumenta a possibilidade de surgimento de estruturas aciculares.

Destaca-se também, a elevada temperabilidade do aço SAE 5160, o que permitiu a obtenção de estrutura martensítica sem a presença de meios severos de resfriamento, indicada pela presença de elementos químicos como o carbono, cromo e manganês.

Finalmente, as condições do leito de resfriamento tipo *Walking beam*, utilizado durante a laminação da barra chata 1 5/8" x 5/16", que permite elevada troca de calor por radiação, condução e convecção ocasionando elevada taxa de resfriamento, conforme observado na Figura 1, no qual foi encontrada elevada taxa de resfriamento de 11,3°C/s. Na Figura 6 pode-se observar visualmente a diferença de temperatura ao longo da barra pela presença de manchas escuras, o que indica a presença de diferentes taxas de resfriamento.



**Figura 6** – Manchas escuras ao longo da barra devido as diferentes taxas de resfriamento.

Após a avaliação destes aspectos, decidiu-se pela realização de um teste em escala industrial que consistiu em produzir na aciaria, corridas com os teores dos principais elementos químicos, que influenciam na temperabilidade do aço (carbono, manganês e cromo), próximos a especificação mínima. No processo de laminação decidiu-se pela proteção e cobertura do leito de resfriamento seguido da adequação da colocação das barras nos pentes do leito de resfriamento.

Foram produzidas 44 corridas com os teores dos elementos químicos, carbono, manganês e cromo próximos à faixa mínima da norma. No processo de laminação implementou-se a proteção lateral do leito a fim de evitar as fortes correntes de ar oriundas das aberturas laterais dos galpões, conforme apresentada na Figura 7.





**Figura 7** – Proteção das laterais do leito realizada com chapas de alumínio.

Dando prosseguimento ao teste em escala industrial com o intuito de se obter uma microestrutura perlítica mais grosseira, bem como minimizar o gradiente de temperatura na barra chata, elaborou-se a construção de uma cobertura, ao longo do leito, de 54 m de comprimento, 2.750 mm de largura, e 350 mm de distância entre as placas de cobertura e o leito de resfriamento. Para definir as dimensões das placas de cobertura foram consideradas as limitações da estrutura do leito para suportar as placas, bem como a retenção de calor propiciada pelo novo dispositivo, haja vista que este tipo de leito não foi preparado para trabalhar com uma cobertura sobre o mesmo.

Na Figura 8 é apresentado às placas de cobertura na posição vertical (em descanso) quando não estão sendo utilizadas durante a laminação da barra chata.



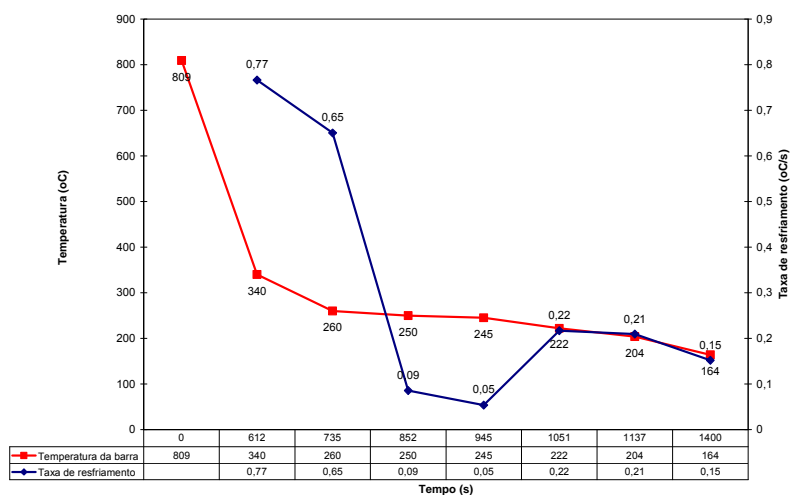
**Figura 8** – Placas de cobertura do leito.

Realizada a proteção do leito, efetuou-se o novo método proposto de adequação das barras, que consistiu em colocar duas barras sobrepostas em um mesmo pente visando agrupar as barras no leito, aumentando a “espessura” da barra chata passando de 5/16” (7,94 mm) para 5/8” (15,88 mm), aumentando, portanto, o “percurso” da transferência de calor e, conseqüentemente, reduzindo-se a taxa de resfriamento das barra.

Para verificar a influência do sistema de empilhamento de duas barras, novo sistema de cobertura do leito na face superior e das laterais, realizou-se a medição da temperatura da barra na chegada no leito até a mesa de rolos, conforme apresentado na Figura 9.

Ao efetuar a comparação das curvas de resfriamento apresentadas na Figura 1 (sem alterações no sistema do leito) e Figura 9 (após a implementação das alterações), observou-se:

- no novo sistema, após a implementação das alterações, a barra foi submetida a uma taxa de resfriamento de  $0,77^{\circ}\text{C/s}$  ao atingir a temperatura de  $340^{\circ}\text{C}$ . Portanto, a nova taxa de resfriamento encontrou-se dentro das condições apresentadas no diagrama TRC (Figura 5), com taxa inferior a  $1,5^{\circ}\text{C/s}$ , indicando uma microestrutura perlítica;
- na mesma temperatura da condição acima, no antigo sistema a barra sofre uma taxa de resfriamento média de  $1,93^{\circ}\text{C/s}$  (temperatura inicial da barra de  $835^{\circ}\text{C}$  e tempo de 256 segundos), portanto próxima a taxa de resfriamento de  $2,0^{\circ}\text{C/s}$ , no qual nota-se o surgimento de martensita, conforme diagrama TRC (Figura 5). Vale destacar que a barra foi submetida a elevadas taxas de resfriamento de  $11,3^{\circ}\text{C/s}$  e  $2,8^{\circ}\text{C/s}$  logo no início do processo de resfriamento no leito, o que contribui para o surgimento do empeno.

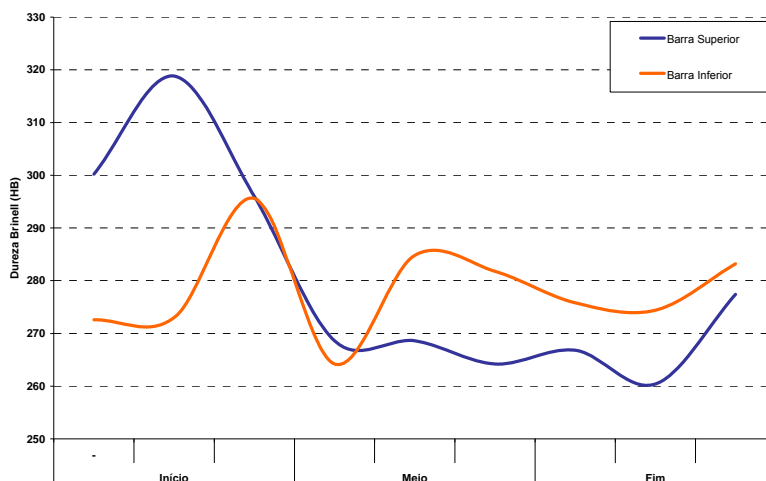


**Figura 9** - Curva de resfriamento para barra chata  $1\ 5/8'' \times 5/16''$  após as alterações no leito de resfriamento e empilhando-se duas barras por pente.

### 3.6 Dureza da Barra Chata após as Mudanças no Leito de Resfriamento e na Composição Química

Na Figura 10 é apresentado os valores de dureza Brinell da barra chata  $1\ 5/8'' \times 5/16''$  medida em amostras retiradas da barra chata, resfriadas na condição de empilhamento de 2 barras por pente, cobertura do leito de resfriamento (lateral e superior) e alteração da composição química para faixa mínima.

Notou-se na Figura 10 que os valores médios de dureza oscilaram entre 260HB a 319HB com amplitude de 59 HB. Observou-se, também, que os maiores valores dureza localizaram-se no início da barra. Isto se deve ao fato do desalinhamento na extremidade das barras que submetem a barra superior a uma elevada taxa de resfriamento que foi resolvido com as alterações nos parâmetros de laminação. No restante da barra observou-se que os valores de dureza oscilaram entre 260 HB e 285 HB com amplitude 25 HB como é apresentado na Figura 10.



*Posição de retiradas de amostras ao longo dos 289 metros de barra*

**Figura 10** – Variação de dureza para o aço SAE 5160 após o teste em escala industrial.

## 4 CONCLUSÃO

- A origem fundamental do empeno na barra chata 1 5/8" x 5/16" produzida no aço SAE 5160 foi oriunda de tensão residual provocada pela transformação de fase até a obtenção da martensita.
- Devido à elevada temperabilidade do aço SAE 5160 tornou-se necessário utilizar baixas taxas de resfriamento, a fim de obter microestruturas sem a presença de constituintes aciculares. As mudanças impostas no leito de resfriamento, como a cobertura lateral e superior e o empilhamento de duas barras por pente, resultaram em taxa de resfriamento de 0,77° C/s e em um produto sem o defeito de empeno. Para minimizar a forte influência da composição química na temperabilidade do aço SAE 5160, devido à presença dos elementos químicos, como carbono, manganês e cromo, propôs-se trabalhar com a faixa destes elementos próxima dos valores mínimos especificados pela norma.
- Foi obtido um produto com menor dureza e menor variabilidade desta propriedade.
- Após a realização do teste com as proteções laterais, cobertura do leito e empilhamento de duas barras por pente houve a redução significativa do índice de sucateamento da barra chata devido ao empeno de 6,50% para 1,10%.
- O novo sistema de empilhamento de duas barras foi aplicado para outras bitolas de barra chata (2" x 1/4", 1 3/4" x 1/4", 2 x 5/16"), que também apresentaram ótimos resultados de redução no índice de sucateamento.
- O sistema de cobertura superior e lateral foi aplicado às demais bitolas de barra chata produzidas no aço SAE 5160 (86 bitolas), permitindo a redução do índice de sucateamento por empeno de 72,6% passando de 2,56% para 0,70%.

## REFERÊNCIAS

- 1 ANELLI, E., Application of Mathematical Modelling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars, ISIJ, v. 32, N<sup>o</sup> 3, p. 440-449, 1992.
- 2 PADILHA, A.F; SICILIANO J.R. Encruamento, Recristalização, Crescimento de grão e Textura, São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 2005, 232 p.
- 3 ALVES FILHO, Cláudio Henrique Macedo. Análise da Influência da Taxa de Resfriamento no Gradiente Microestrutural de Barras Laminadas a Quente Tratadas Termicamente. 2004. 128 folhas. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná, 2004.
- 4 DAMASCENO, Jorge. Modelagem Física, em Escala Real, do Processo de Resfriamento de Tubos em um Leito Contínuo. 2004. 61 folhas. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- 5 PEIXOTO, R.G; ANDRADE, R.M. Metodologia para Análise de Tensões em Tubos de Aço no Processo Resfriamento em um Leito Contínuo. In: 60<sup>o</sup> Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005, Belo Horizonte, Brasil. Anais, 2005.
- 6 KRAUSS, G. Steels: Heat Treatment and Processing Principles. 2<sup>st</sup> ed., Colorado, ASM International, 1990, 496p.
- 7 CALLISTER, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Quinta Edição, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2002, 578 p.