

# ANÁLISE DE VARIAÇÕES NA TENSÃO NA TIRA ENTRE AS ÚLTIMAS CADEIRAS E NO GAP E EFEITOS NAS PROPRIEDADES E ESPESSURA DO AÇO POR MODELAMENTO MATEMÁTICO<sup>1</sup>

Marcelo Lucas P. Machado<sup>2</sup>

José Denti Filho<sup>3</sup>

José Fagundes Junior<sup>4</sup>

## Resumo

Utilizando dados industriais e um modelo termomicroestrutural desenvolvido em linguagem de programação, foram feitas análises de sensibilidade por meio de alterações provocadas na tensão na tira entre cadeiras e na abertura entre cilindros entre de trabalho, que será chamado de gap ao longo do trabalho. Desta maneira foram analisadas as influências destas variações nas propriedades do aço, bem como espessura de saída, tensão média de escoamento, tamanho de grão e temperatura de laminação. O modelo termomicroestrutural faz interações para se chegar a valores de: raio corrigido do cilindro de trabalho, temperaturas de entrada e saída em cada cadeira, força de laminação, tensão média de escoamento, tamanho de grão da austenita e ferrita, fração de recristalização estática e dinâmica, entre outras. Para cada distúrbio foram feitas variações de no máximo dez por cento para mais e para menos em relação ao resultado nominal. O efeito destes distúrbios foi analisado na cadeira de laminação em questão e também a sua influência nas demais cadeiras. O modelo mostrou que um aumento na abertura entre cilindros da cadeira anterior aumenta a tensão de escoamento e, portanto a carga de laminação. Este distúrbio aumenta a espessura de saída, a temperatura de laminação em todas as cadeiras e pode provocar recristalização dinâmica e metadinâmica nos passes seguintes. Por outro lado, o aumento no gap da própria cadeira reduz a tensão de escoamento e a temperatura e conseqüentemente acarreta num aumento da espessura de saída. O modelo mostra o efeito do aumento da tensão entre cadeiras principalmente na redução da carga de laminação e sua influência na espessura de saída.

**Palavras-chave:** Laminação de tiras a quente; Modelo termomicroestrutural; Modelo microestrutural; Modelo térmico.

## ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE STRIP TENSION BETWEEN THE LAST STANDS AND IN THE GAP AND IT'S EFFECT IN THE STEEL PROPERTIES AND EXIT THICKNESS BY MATHEMATICAL MODELLING

### Abstract

Using a Hot Strip Mill industrial data and a thermomicrostructural model in a computational program, a sensibility analysis has been made by means of changing the strip tension between stand and in the work roll gap. With this, the effect of these disturbances on the steel properties has been analyzed, such as, the mean flow stress and grain size and exit thickness. The thermomicrostructural model makes interactions to find the values of: flattened work roll radius, entry and exit temperatures in each stand, roll force, mean flow stress, austenite and ferrite grain size, static and dynamic fractional recrystallization, among others. For each disturbance, variations of in the maximum ten percent for more and less had been made in relation to the nominal result. The effect of these disturbances was analyzed in the specific stand and its influence in others stands was analyzed too. The model showed that an increase in the gap of the previous stand increases the mean flow stress, therefore the roll force. This disturbance increases the exit thickness, the strip temperature in all the stands and can cause dynamic and metadynamic recrystallization in the following passes. On the other hand, the increase in the gap in the stand that had been analyzed reduces the mean flow stress and the strip temperature and consequently causes an increase in the exit thickness. The model mainly shows to the effect of the increase of the strip tension in the reduction of the roll force and its influence in the exit thickness.

**Key words:** Hot strip mill; Thermomicrostructural model; Microstructural model; Thermal model.

<sup>1</sup> 43º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba (PR), 17 a 20 de Outubro de 2006.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, D.Sc. Professor da Coordenadoria de Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, Vitória-ES, E-Mail: [marcelolucas@cefetes.br](mailto:marcelolucas@cefetes.br).

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista, D.Sc. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, Vitória-ES, E-Mail: [j.denti@ele.ufes.br](mailto:j.denti@ele.ufes.br).

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Especialista de Laminação de Tiras a Quente da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST-Arcelor Brasil, Vitória-ES, E-Mail: [fagundes@cst.com.br](mailto:fagundes@cst.com.br).

## 1 INTRODUÇÃO

O controle das propriedades mecânicas na laminação de tiras a quente contribui para a redução de custos devido a menor necessidade de adição de elementos de liga no processo de refino do aço e redução de tratamentos térmicos posteriores com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas. Além disso, um controle microestrutural computacional reduz o número de amostragens e conseqüentemente aumentará a produtividade da laminação. Neste modelo, foram consideradas as deformações acumuladas entre passes de modo a incorporar o efeito das recristalizações estáticas, dinâmicas e metadinâmicas.<sup>(1-9)</sup> O modelo também permite prever o tamanho de grão da ferrita após passar pela mesa de resfriamento e as trocas térmicas devido à deformação do aço no laminador, a condução de calor pelo cilindro de trabalho, as perdas de calor por radiação, por convecção para o ar atmosférico e pela água.<sup>(5,10)</sup> Desta forma, determina-se as temperaturas de entrada e saída em cada cadeira de laminação. A tensão de escoamento média (TEM) calculada pelo modelo termomicroestrutural é utilizada na equação de Sims para obter a carga de laminação. Os valores da carga e das temperaturas de laminação, calculadas pelo modelo termomicroestrutural, podem ser comparados com os obtidos pelas células de carga de cada cadeira do laminador e, com isto, controles automáticos visando não só recuperações de espessura de saída, mas de propriedades mecânicas e microestrutura poderão ser implementados. O modelo também poderá ser utilizado em simulações *off line* e elaboração de *set up*.

## 2 FLUXOGRAMA DO MODELO TERMOMICROESTRUTURAL

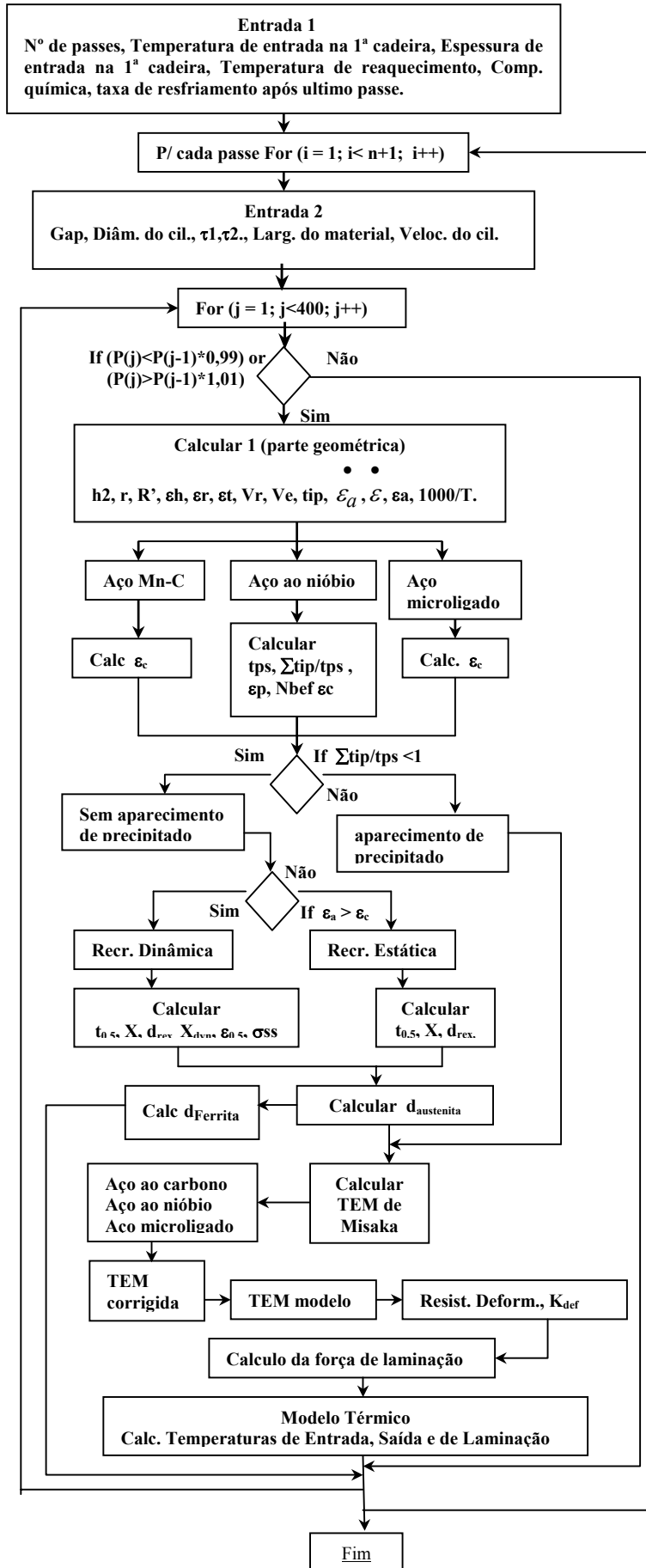
O modelo termomicroestrutural não exige que se utilize a carga real de laminação como dado de entrada, pois neste caso ele faz interações para se chegar ao valor final estabilizado do raio corrigido do cilindro de trabalho e das demais variáveis necessárias ao processo. Desta forma, o modelo necessita somente da temperatura de entrada na primeira cadeira e o mesmo calcula todas as demais temperaturas até a temperatura final após o último passe.

Para calcular o diâmetro final da ferrita é necessário que se forneça a taxa de resfriamento após a ultima cadeira de laminação, ou as temperaturas medida nos pirômetros antes e após a mesa de resfriamento como foi o caso deste trabalho. O fluxograma do modelo Termomicroestrutural está mostrado na Figura 1.

## 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o modelo termomicroestrutural, foi possível fazer simulações por meio de alterações provocadas na abertura entre cilindros de trabalho, neste trabalho chamado de gap, nas tensões à frente e a ré na tira em relação à cadeira de laminação. Este trabalho utilizou dados Industriais de um aço laminado a quente, cuja composição química está mostrada na Tabela 1.

Foram admitidos distúrbios na penúltima e última cadeira de laminação (F5 e F6) de dez por cento para mais e para menos para o gap e de cem por cento para mais e para menos na tensão entre estas cadeiras, em relação ao resultado nominal dado pelo modelo. Foi analisado o efeito destas alterações nas propriedades do aço, como TEM, carga de laminação, temperatura de laminação, espessura de saída da tira e tamanho de grão.



<b>Simbologia</b>	
h1 e h2	– Espessura de entrada e saída do aço na cadeira, respectivamente,
r	– Grau de redução, $r = (h1-h2)/h1$
R'	– Raio corrigido do cil. trabalho,
$\epsilon$ , $\epsilon_r$ , $\epsilon_t$	– Deformação efetiva, redundante e Total.
$\epsilon_a$	– Deformação acumulada,
• •	
$\dot{\epsilon}$ , $\dot{\epsilon}_a$	– Taxa de deformação e taxa de deformação acumulada,
Vr	– Veloc. tangencial do cilindro,
Ve	– Veloc. de saída do material,
tip	– Tempo entre passes,
$\alpha$	– Ângulo de contato do material com o cilindro de trabalho,
U	– Velocidade do cilindro em RPM,
$\epsilon_c$	– Deformação crítica,
$\epsilon_p$	– Deformação relativa ao limite de Resistência,
$t_{ps}$	– Tempo para a formação de 5% de precipitados de Nb(C,N),
$\sum tip/tps$	– Somatório acumulado da relação entre tip e tps nos passes,
Nbef	– Efeito do Nióbio,
$t_{0,5}$	– Tempo para se alcançar 50% de recristalização do material,
$d_{rec}$	– Tamanho de grão da austenita completamente recristalizada,
d ou $d_{aust}$	– Tamanho do grão final da austenita,
$d_{Ferrita}$	– Tamanho de grão final da ferrita,
X	– Fração de recristalização,
$X_{din}$	– Fração de recristalização dinâmica do material,
$TEM_{MK}$	– Tensão de escoamento média obtida pela equação de Misaka,
$TEM_{mod}$	– Tensão de escoamento média obtida pelo modelo Termomicroestrutural.

**Figura 1.** Fluxograma do modelo Termomicroestrutural

**Tabela 1.** Composição química do aço C-Mn utilizado no modelo termomicroestrutural.

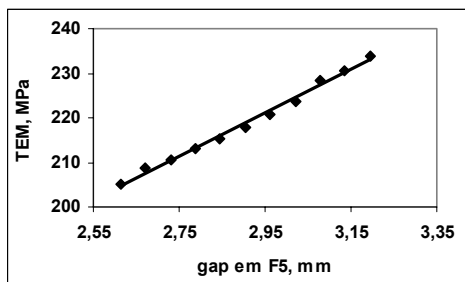
Composição química do aço C-Mn utilizado								
%C	%Mn	%Si	%Nb	%Ti	%Cr	%Mo	%N	%V
0,1311	0,52	0,0066	0,0	0,002	0,011	0,0	0,004	0,001

### 3.1 Efeito da Variação do GAP na Penúltima Cadeira e sua Influência na Última

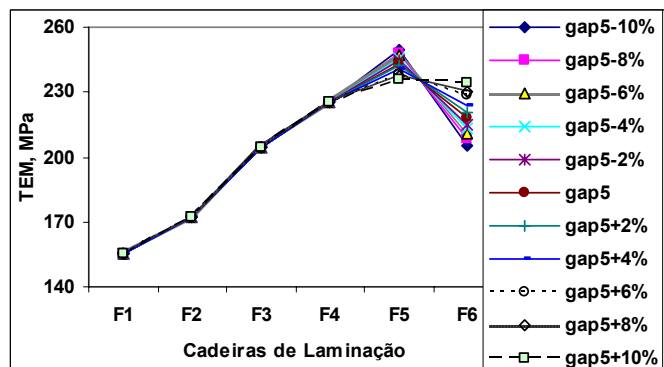
Observe na Figura 2 que a TEM na última cadeira de laminação (F6) cresce com o aumento no gap da penúltima cadeira (F5), pois aumenta a deformação e a taxa de deformação, o que está de acordo com a equação 1<sup>(1-6)</sup> que mostra a relação direta com a deformação e com a taxa de deformação do material.

$$TEM_{MK} = 1,15 \exp \left[ 0,126 - 1,75[C] + 0,594[C]^2 + \frac{2851 + 2968[C] - 1120[C]^2}{T} \right] \cdot \varepsilon^{0,21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0,13} \quad (1)$$

O aumento na espessura de entrada na cadeira F6 devido ao aumento do gap em F5, significa o mesmo aumento na espessura de saída da cadeira F5. Isto provoca uma diminuição na TEM em F5 como mostrado na Figura 3, pois reduz a deformação e a taxa de deformação e um aumento na TEM na cadeira F6 devido ao aumento destas mesmas variáveis.



**Figura 2.** Efeito da variação no gap em F5 na TEM do material em F6.



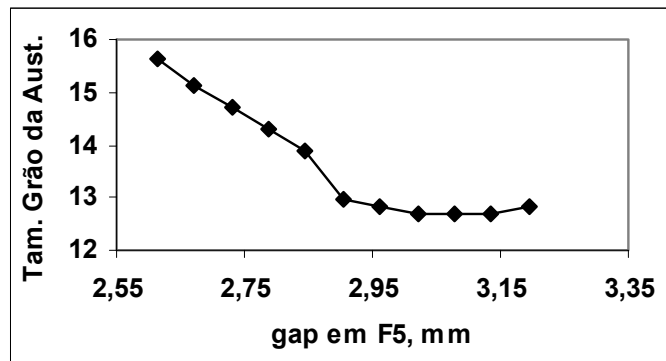
**Figura 3.** Efeito da variação no gap em F5 na TEM do material em todas as cadeiras.

O tamanho de grão final da austenita obtido é o tamanho de grão inicial ou de entrada na cadeira seguinte. Portanto é influenciado pela temperatura entre passe e pela deformação no passe, conforme as equações 2 e 3, dadas para a recristalização estática como é o caso. Portanto, devido ao aumento de temperatura por causa do aumento na espessura de entrada do material, há uma tendência de crescimento do grão da austenita. Por outro lado, O aumento na espessura de entrada em F6 certamente irá aumentar a deformação no passe que por sua vez irá diminuir o tamanho de grão do material, como pode ser visto na equação 2. Devido a estes efeitos concorrentes observa-se na Figura 4, uma diminuição no tamanho de grão da austenita.

$$d_{rec} = 343 \cdot d_0^{0,4} \cdot \varepsilon^{-0,5} \cdot \exp\left(-\frac{45000}{R \cdot T}\right) \quad (2) \quad \left| \quad d^2 = d_{rec}^2 + 4,0 \cdot 10^7 \cdot (\text{tip} - 4,32 \cdot t_{0,5}) \cdot \exp\left(-\frac{113000}{R \cdot T}\right) \quad (3)\right.$$

Onde, R a constante universal dos gases ideais, T a temperatura.

A Tabela 2 mostra que não houve recristalização dinâmica com as variações no gap da penúltima cadeira.



**Figura 4.** Efeito da variação no gap em F5 no tamanho de grão do material após F6, µm.

**Tabela 2.** Resultados do índice de recristalização dinâmica em todas as cadeiras de laminação devido a alterações no gap da quinta cadeira de laminação (F5)

	Recristalização dinâmica - X <sub>din</sub>										
	gap1-10%	gap1-8%	gap1-6%	gap1-4%	gap1-2%	gap1	gap1+2%	gap1+4%	gap1+6%	gap1+8%	gap1+10%
F1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
F2	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Observe na Figura 5 que quanto maior o gap em F5, portanto, maior a espessura de entrada em F6, maior é a espessura de saída do material no laminador. Isto é devido ao aumento da carga de laminação provocada pelo aumento da espessura de entrada, fazendo com que o laminador se distenda mais, resultando no aumento da espessura de saída do material. Isto está de acordo com a equação 4.

$$h_2 = \frac{P_{Mod}}{Elm} + g \quad (4)$$

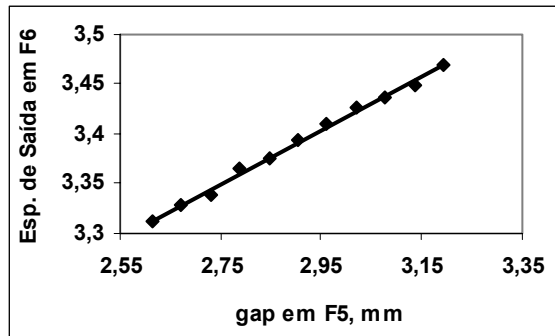
Onde,  $P_{Mod}$  é a carga de laminação obtida pelo modelo, (ton.),  $Elm$  é o módulo de rigidez do laminador, (ton./mm) e  $g$  é o gap dos cilindros de trabalho, (mm).

Nota-se na Figura 6 que a partir da F6 o aumento na espessura de saída devido ao aumento no gap em F5 foi pouco significativo.

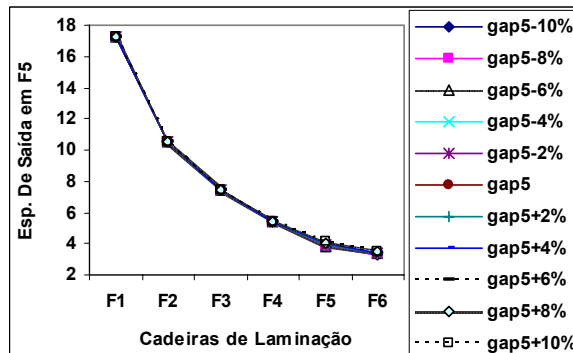
Como pode ser visto na Figura 7, quanto maior o gap em F5, conseqüentemente maior é a espessura de entrada do material em F6, maior é a carga de laminação em F6, devido a maior resistência à passagem do material no laminador. A equação 5 baseada no modelo de Sims mostra esta relação. Por outro lado, a carga de laminação em F5 é reduzida, como pode ser visto na Figura 8.

$$P = TEM_{Mod} \cdot W \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)} \cdot Q \quad (5)$$

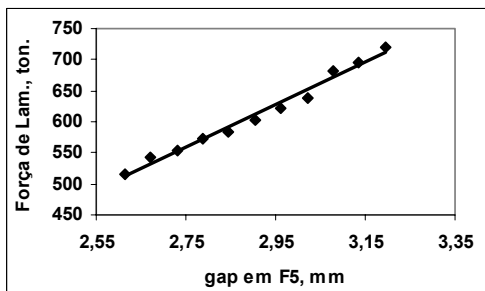
Onde,  $P_{Mod}$  é a força aplicada ao cilindro de trabalho, (ton.) e  $Q$  o fator geométrico que é dado pela equação de Sims.



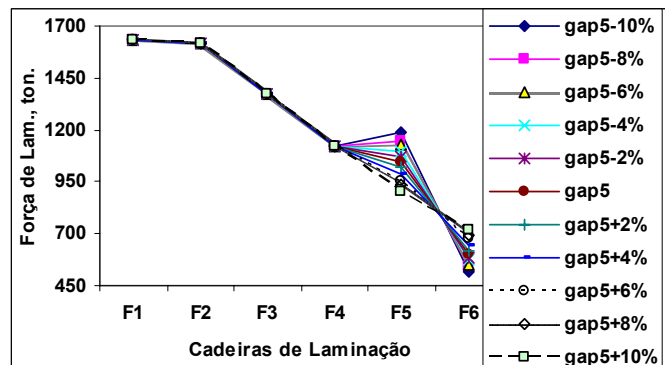
**Figura 5.** Efeito da variação no gap em F5 na espessura de saída em F6, mm



**Figura 6.** Efeito da variação no gap em F5 na espessura de saída do material em todas as cadeiras, mm.



**Figura 7.** Efeito da variação no gap em F5 na carga de laminação em F6, ton.



**Figura 8.** Efeito da variação no gap em F5 na carga de laminação em todas as cadeiras.

### 3.2. Efeito da Variação na Abertura entre os Cilindros de Trabalho (GAP) na Última Cadeira de Laminação (F6)

Observe na Figura 9 que a TEM decresce com o aumento no gap em F6, devido ao aumento na espessura de saída do material, reduzindo assim a deformação e a taxa de deformação. Isto está de acordo com a equação 1, de Misaka. Observe também na Figura 10 que o aumento no gap em F6 provocou uma redução da TEM neste passe.

Observe nas Figuras 11, 12 e 13 que quanto maior o gap, maior é a espessura de saída do material no laminador e menor é a carga de laminação, devido a menor resistência à passagem do material no laminador.

Estas variações no gap não provocaram o aparecimento de recristalização dinâmica a partir de F6, veja Tabela 3.

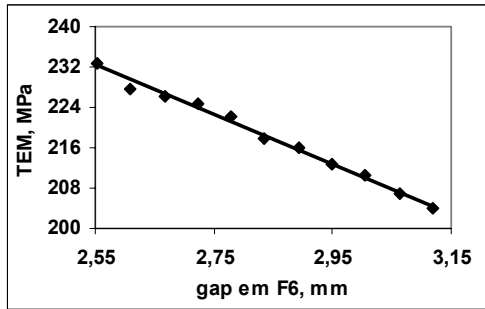


Figura 9. Efeito da variação no gap em F6 na TEM

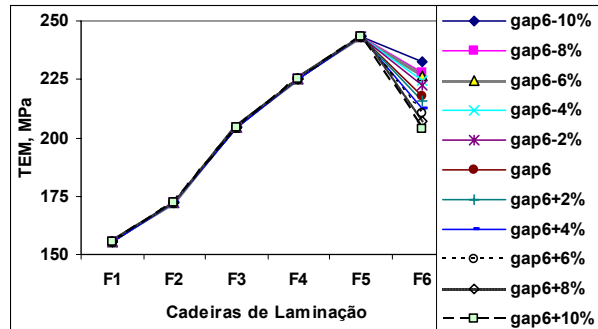


Figura 10. Efeito da variação no gap em F6 na na TEM em todas as cadeiras.

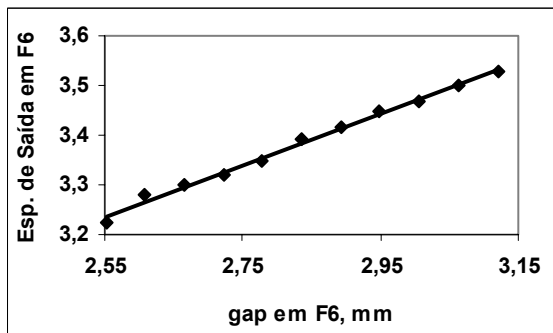


Figura 11. Efeito da variação do gap em F6 na espessura de saída da tira

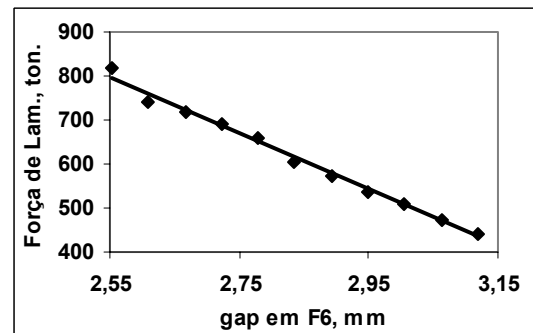


Figura 12. Efeito da variação do gap em F6 na carga de laminação em F6

Tabela 3. Resultados do índice de recristalização dinâmica em todas as cadeiras de laminação devido a alterações no gap da última cadeira de laminação (F6)

	Recristalização dinâmica - Xdin										
	gap2-10%	gap2-8%	gap2-6%	gap2-4%	gap2-2%	gap2	gap2+2%	gap2+4%	gap2+6%	gap2+8%	gap2+10%
F1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
F2	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135
F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

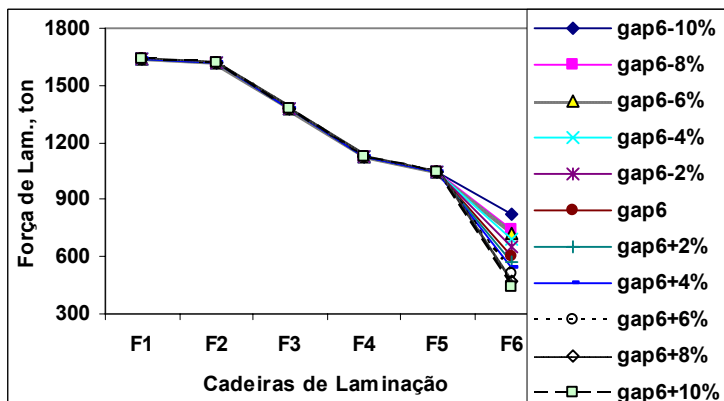


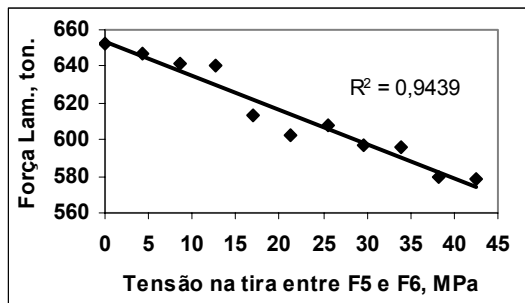
Figura 13. Efeito da variação no gap em F6 na carga de laminação em todas as cadeiras.

### 3.3 Efeito da Variação na Tensão a Ré (Utilizando o Looper) no Material em Relação à Última Cadeira

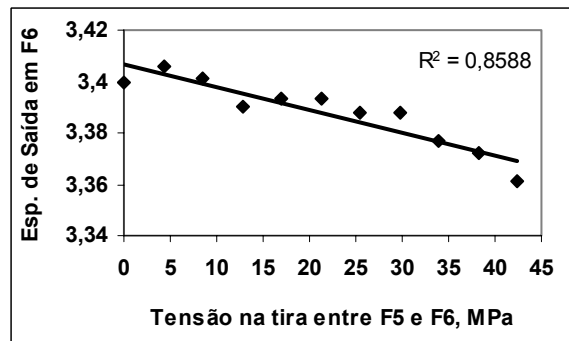
Como pode ser visto na Figura 14, quanto maior a tensão a ré do material, menor é a carga de laminação, devido principalmente à redução na resistência à deformação do material, equações 6 e 7.<sup>(3,4)</sup> Além disso, irá provocar uma redução na espessura de saída devido a menor resistência à passagem do material no laminador, Figura 15.

$$K_{\text{def}} = \text{TEM}_{\text{Mod}} - \left( \frac{\tau_1 + \tau_2}{\alpha} \right) \cdot \phi n \quad (6) \quad P = K_{\text{def}} \cdot W \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)} \cdot Q \quad (7)$$

Onde,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são a tensão a ré e a frente na tira em relação à cadeira de laminação, respectivamente.  $\alpha$  e  $\phi n$  são o ângulo de contato e o ângulo neutro do cilindro de trabalho com o material sendo laminado, respectivamente.



**Figura 14.** Efeito da variação da tensão a ré na tira em relação a F6 na carga de laminação.



**Figura 15.** Efeito da variação da tensão a ré na tira em relação a F6 na espessura de saída do material.

## 4 CONCLUSÕES

O aumento no gap da cadeira anterior aumenta a TEM e conseqüentemente a carga de laminação no passe. Este aumento no gap aumenta a temperatura de laminação em todas as cadeiras e também pode provocar aumento na recristalização dinâmica entre passes, proporcionando uma redução na TEM nos passes seguintes.

O aumento no gap da própria cadeira reduz a TEM, a carga e a temperatura de laminação e aumenta a espessura de saída no passe. Este aumento de espessura de saída ocasiona um aumento na carga de laminação na cadeira seguinte.

O aumento da tensão entre cadeiras na tira utilizando o looper provoca redução na carga de laminação e espessura de saída do material das cadeiras adjacentes.

Com o modelo Termomicroestrutural é possível analisar muitas variáveis de processo e metalúrgicas as quais podem auxiliar o engenheiro no entendimento do mesmo, na solução de problemas e na melhoria de qualidade do produto final.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) na colaboração com dados técnicos, ao desenvolvimento e divulgação deste trabalho.



## REFERÊNCIAS

- 1 MISAKA, Y. YOSHIMOTO Y., Formularization of mean resistance to deformation of plain carbon steels at elevated temperature, **Journal of The Japan Soc. Tec. Plasticity**, 8(79), 1967-8, 414-422.
- 2 DENTI Filho J., MACHADO M.L.P., Modelo microestrutural para controle de tamanho de grão, cálculo de tensão de escoamento média e força de laminação a quente de aços carbono e ligas, **XV Congresso Brasileiro de automática**, Gramado, RS, Brazil, 2004.
- 3 MACHADO M.L.P., DENTI Filho J., FAGUNDES Jr. J. Development of qualitative rules for simulation disturbances and actions in a hot strip mill by using a thermomicrostructural model, **IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS 2006)**, Montreal, Canada, 2006.
- 4 MACHADO, M. L. P., DENTI FILHO, J., FAGUNDES JR., J. A thermomicrostructural model for simulation disturbances in a hot strip mill and its effect in steel properties, roll force and exit strip thickness. In: **XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2005**, Guarapari, ES, 2005.
- 5 MACHADO M.L.P. DENTI Filho J., FAGUNDES Jr. J. Simulation of operational disturbance in a hot strip mill using a thermomicrostructural model, **IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS 2005)**, Cancun, Mexico, 2005.
- 6 MACHADO M.L.P. DENTI Filho J., FAGUNDES Jr. Análise do efeito de distúrbios de temperatura, espessura da tira e velocidade do cilindro de trabalho utilizando um modelo termomicroestrutural na laminação a quente, **60° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**, Belo Horizonte, 2005.
- 7 MACCAGNO, T.M. JONAS, J.J. YUE, S. MCCRADY, B.J. SLOBODIAN R. & DEEKS, D. Determination of recrystallization stop temperature from rolling mill logs and comparison with laboratory simulation results, **ISIJ International**, 34(12), 1996, 917-922.
- 8 SICILIANO, F. MINAMI, K. MACCAGNO T.M. & JONAS, J.J. Mathematical modeling of the mean flow stress, fractional softening and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels, **ISIJ International**, 36(12), 1996, 1500 -1506.
- 9 SICILIANO, F. JONAS, J.J. Mathematical modeling of hot strip rolling of microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 31A, 2000, 511-530.
- 10 PLAUT., R.L. SIMIELLI, E.A. & FILHO, O.O. Laminação dos aços – Tópicos avançados, **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais(ABM)**, São Paulo,SP, Brasil, 1984.