

# ELABORAÇÃO DE REGRAS QUALITATIVAS VISANDO CONTROLE DE PROPRIEDADE MECÂNICA, MICROESTRUTURA, CARGA DE LAMINAÇÃO E ESPESSURA NA LAMINAÇÃO A QUENTE <sup>1</sup>

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

José Denti Filho <sup>3</sup>

José Fagundes Junior<sup>4</sup>

## Resumo

Este estudo utiliza dados industriais de uma laminação de tiras a quente e um modelo termomicroestrutural que leva em consideração o efeito da tensão na tira entre cadeiras, a abertura dos cilindros de trabalho (gap) e os efeitos da recristalização estática, dinâmica e metadinâmica, da tensão de escoamento média, da carga de laminação, da espessura de saída da tira e das temperaturas de entrada do aço em cada cadeira de laminação. Distúrbios operacionais no modelo termomicroestrutural são introduzidos através da tensão na tira entre cadeiras e na abertura do cilindro de trabalho e os resultados nas propriedades de aço são analisados. Foi elaborado um grupo de regras qualitativas para estabelecer quais ações a serem realizadas quando da ocorrência de distúrbios, sempre objetivando recuperar a espessura de saída da tira e melhorar as propriedades do aço. O modelo mostra que o aumento na abertura do cilindro de trabalho na cadeira anterior aumenta a tensão de escoamento média do aço, e conseqüentemente a carga de laminação. Além disso, o aumento no gap na atual cadeira provoca uma redução na tensão de escoamento média e na temperatura de laminação, resultando num aumento na espessura de saída da tira. Correções utilizando aumentos na tensão na tira entre cadeiras reduzem a carga de laminação e a espessura de saída do material.

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

## ELABORATION OF QUALITATIVE RULES AIMING THE CONTROL OF MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE, ROLL FORCES AND STEEL THICKNESS DURING A HOT STRIP MILL

### Abstract

This study uses Hot Strip Mill industrial data and a thermomicrostructural model which takes into account the effect of the strip tension and the work roll gap and the static, dynamic and metadynamic recrystallization to calculate the austenite grain size, mean flow stress that occurs in the steel and also the roll force, exit strip thickness and steel entry temperatures in each stand. Operational disturbances in the thermomicrostructural model are introduced in the strip tension and in the work roll gap and its effect in the steel properties are analyzed. A group of qualitative rules are elaborated to show which actions should be taken if the disturbances occur, aiming to recover the strip thickness and improve steel properties. The model shows that by increasing the gap of the previous stand there is an increase in the mean flow stress, and consequently the roll force. In addition, by increasing the gap within the each stand there is a reduction in the mean flow stress and the strip temperature, and thus results in an increase in the exit strip thickness, and the corrections by increasing the entry or exit strip tension causes a reduction in work roll force and exit strip thickness.

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

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, D.Sc. Professor e Coordenador do curso de Engenharia Metalúrgica 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, Vitória-ES, E-Mail: [fagundes@cst.com.br](mailto:fagundes@cst.com.br).

## 1 INTRODUÇÃO

O controle automático das propriedades mecânicas na laminação de tiras a quente contribui para a redução de custo devido a menor necessidade de adicionar elementos de liga no refino dos aços e também na redução de tratamentos térmicos posteriores aos quais, objetivam melhorar as propriedades mecânicas do aço. Além disso, um controle microstructural computacional reduz o número de amostragem e conseqüentemente aumentará a produtividade do laminador de tiras a quente.

Neste modelo, foram consideradas as deformações acumuladas entre passes de modo a incorporar o efeito das recristalizações estáticas, dinâmicas e metadinâmicas.<sup>(1-7)</sup> O modelo calcula o tamanho de grão da austenita para cada cadeira e também permite prever o tamanho de grão da ferrita após passar pela mesa de resfriamento e calcula as trocas térmicas devido aos efeitos da deformação plástica do aço sendo laminado, condução de calor pelos cilindros de trabalho, perda de calor por: radiação, convecção para o ar atmosférico e para a água.<sup>(3,7,8)</sup> A espessura de saída da tira e a temperatura de laminação podem ser calculadas para cada cadeira. A tensão de escoamento média do aço calculada pelo modelo termomicroestrutural é utilizado na equação de Sims para se determinar a carga de laminação.

Foi elaborado um grupo de regras qualitativas utilizando simulações no modelo de modo a se determinar quais ações devem ser executadas quando da ocorrência de distúrbios na espessura da tira, e/ou temperatura de entrada e/ou tensão de escoamento média do material. Desta forma, o modelo apresenta as correções que devem ser feitas nas variáveis manipuladas, as quais são: distância entre cilindros de trabalho (gap) e tensão na tira entre cadeiras, sempre objetivando a recuperação da espessura de saída da tira, melhoria da propriedades mecânicas do material e redução na carga de laminação.

## 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. Veja o fluxograma na Figura 1.

## 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o modelo termomicroestrutural, foi possível fazerem simulações por meio de alterações no gap e na tensão na tira entre cadeiras. Foram utilizados dados industriais cuja composição química esta mostrada na Tabela 1.

Foram feitas alterações em relação aos valores nominais utilizados pelo modelo de mais ou menos 10% no gap e de mais ou menos 100% na tensão na tira entre cadeiras. Foram analisados os efeitos destas alterações em: carga de laminação, temperatura de laminação, espessura de saída da tira e tamanho de grão da austenita.

**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

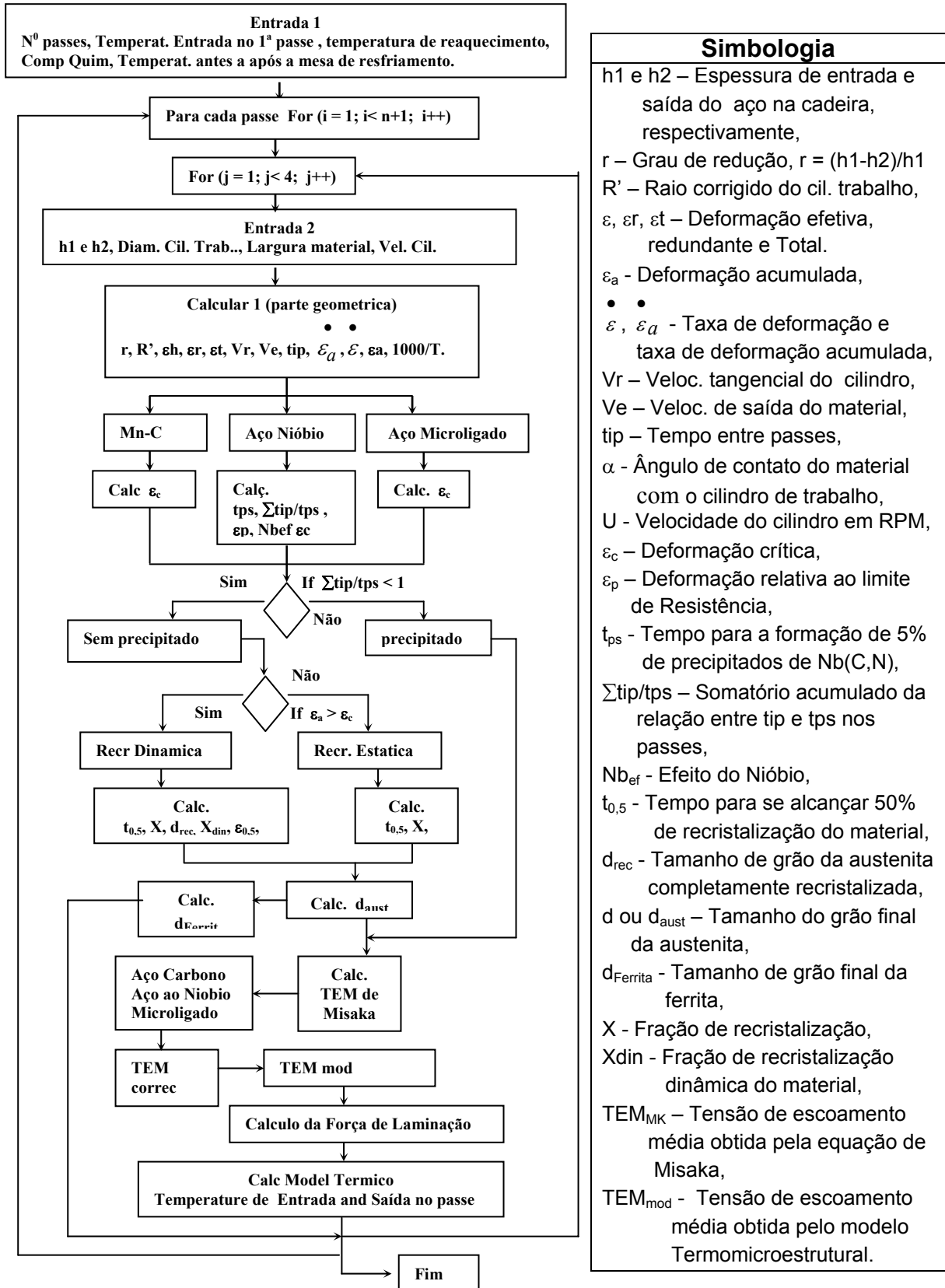


Figura 1. Fluxograma do modelo termomicroestrutural

### 3.1 Efeito de Distúrbios no GAP da Cadeira Anterior e sua Influência na Cadeira a Frente

A tensão de escoamento média (TEM) da tira na cadeira atual, aumenta com o aumento do gap da cadeira anterior,<sup>(7)</sup> isto é devido ao efeito do gap aumentar a deformação e taxa de deformação na cadeira à frente, a qual, esta de acordo com a equação (1) que mostra uma relação direta da TEM com a deformação e taxa de deformação do material.

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

TEM<sub>MK</sub> - Tensão de escoamento média de Misaka para aços C-Mn.

O aumento na espessura de entrada da tira na cadeira de laminação atual devido ao aumento no gap da cadeira anterior, corresponde ao mesmo aumento na espessura de saída da tira na cadeira anterior. Isto causa uma diminuição na TEM da tira na cadeira anterior<sup>(7)</sup> pela redução da deformação e taxa de deformação e aumento na TEM na cadeira seguinte devido ao aumento destas mesmas variáveis.

Aumento no gap da cadeira anterior aumentará a temperatura de laminação na cadeira seguinte. Isto é devido à liberação de calor pelo material por causa da maior deformação plástica.<sup>(7)</sup>

O tamanho de grão final da austenita é o tamanho de grão inicial que entra na cadeira a frente. Portanto, ela é influenciada pela temperatura entre passes, como mostrado nas equações (2) e (3) dadas para recristalização dinâmica e Metadinâmica.<sup>(7)</sup> Consequentemente, devido ao aumento de temperatura com o aumento na espessura de entrada da tira, há uma tendência de crescimento do grão da austenita.

Por outro lado, aumentos na espessura de saída da cadeira anterior certamente aumentarão a taxa de deformação na cadeira a frente, que por sua vez reduzirá o tamanho de grão do material, como pode ser visto na equação (2).

É sabido que aumentos no gap da cadeira anterior proporcionam maior espessura de entrada da tira na cadeira a frente, consequentemente a espessura de saída da tira nesta cadeira também será maior. Isto é devido a maior carga de laminação por causa da maior espessura de entrada da tira, fazendo com que a cadeira se distenda mais conforme o seu módulo de rigidez, resultando numa maior espessura de saída. Isto esta de acordo com a equação (4)

$$d_{rec} = 2,6 \cdot 10^4 \left[ \dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R.T}\right) \right]^{-0,23} \quad (2)$$

$$d^7 = d_{rec}^7 + 8,2 \cdot 10^{25} \cdot (t_{ip} - 2,65 \cdot t_{0,5}) \exp\left(-\frac{400000}{R.T}\right) \quad (3)$$

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

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

Onde, P<sub>Mod</sub> é a carga de laminação, (ton.), Elm é o módulo de rigidez da cadeira de laminação, (ton./mm) e g é o gap dos cilindros de trabalho, (mm).

Da mesma forma, o aumento no gap da cadeira anterior, aumentará a carga de laminação na cadeira seguinte devido a maior resistência à deformação durante a laminação. Ao mesmo tempo, a carga de laminação na cadeira anterior reduz devido

a estes mesmos fatores. A equação (5) baseada no modelo de Sims mostra esta relação.

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

Onde, Q é o fator geométrico da equação de Sims e w a largura da tira, mm.

### 3.2 Efeito de Distúrbios no GAP da Cadeira Atual

A TEM diminui com o aumento do gap na cadeira de laminação, que por sua vez, resulta num aumento da espessura de saída da tira, reduzindo assim, a deformação e taxa de deformação. Isto está de acordo com a equação de Misaka (equação 1)

Quanto maior o gap, menor é a carga de laminação devido a menor resistência a deformação do material durante a laminação, e conseqüentemente, menor será a temperatura de laminação. Ao mesmo tempo a temperatura e a carga de laminação na cadeira seguinte aumentarão devido a maior espessura de entrada da tira.

O tamanho de grão da austenita é fortemente influenciado pela temperatura entre passes, veja nas equações (2) e (3). Portanto, com a diminuição da temperatura por causa do aumento do gap, haverá uma tendência de menor crescimento no tamanho de grão da austenita.

Por outro lado, o aumento no gap, certamente reduzirá a taxa de deformação na cadeira considerada, que por sua vez, implicará num aumento no tamanho de grão da austenita. A equação (2) mostra estes efeitos.

### 3.3 Efeito dos Distúrbios Aplicação da Tensão na Tira entre Cadeiras

Quanto maior a tensão a frente ou a ré na tira entre cadeiras, menor é a carga de laminação, principalmente devido a redução da resistência a deformação do material ( $K_{def}$ ), veja equações (6) e (7). Conseqüentemente ocorrerá redução na espessura de saída do material, pois a cadeira irá se distender menos (equação 4)

$$K_{def} = TEM_{Mod} - \left( \frac{\tau_1 + \tau_2}{\alpha} \right) \cdot \phi n \quad (6)$$

$$P = K_{def} \cdot W \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)} \cdot Q \quad (7)$$

Onde,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são as tensões a ré e a frente na tira, respectivamente.  $\alpha$  e  $\phi n$  são os ângulos de contato e neutro do cilindro de trabalho com o material sendo deformado, respectivamente.

The strip temperature will reduce slightly and can cause a slight increase in the MFS because of the reducing in work roll force.

Como o tamanho de grão da austenita é influenciado pela temperatura entre passes, portanto, com a diminuição da temperatura da tira, o tamanho de grão tende a diminuir também.

## 4 REGRAS QUALITATIVAS VISANDO CONTROLE DO PROCESSO

Utilizando as simulações feitas para todas as cadeiras de laminação, foram elaborados conjuntos de regras qualitativas que determinam quais as ações a serem tomadas diante de distúrbios na espessura e/ou temperatura de entrada e/ou tensão de escoamento média, e as alterações provocadas na espessura de saída da tira, TEM, tamanho de grão da austenita e carga de laminação. Esta última é a variável de observação imediata de distúrbio por ser uma variável facilmente medida. Estas

ações objetivam recuperar a espessura de saída, melhorar as propriedades mecânicas e reduzir a carga de laminação.

Estas regras qualitativas poderão servir de suporte para controle do processo de laminação a quente.

Foram feitas tabelas para cada cadeira de laminação onde se estabeleceu como ruídos/distúrbios a espessura de entrada ( $h_1$ ), temperatura de entrada ( $T_e$ ) e tensão de escoamento média do material (TEM). Como conseqüências destas alterações, ocorrem mudanças na espessura de saída ( $h_2$ ), tamanho de grão ( $d$ ) do material, TEM e carga de laminação ( $P$ ). Esta última é a variável de observação/medida, como mostrado nas Tabelas 2A e 2B mostram.

A TEM só é considerado distúrbio quando sua variação ocorre isoladamente, sem que haja variações na espessura e/ou temperatura de entrada. Caso contrário a TEM será considerado como conseqüência das variações de espessura e temperatura de entrada do material.

Nestas tabelas também são mostradas as correções a serem feitas nas variáveis manipuladas que são o gap ( $g$ ), tensão a ré ( $\tau_1$ ) e tensão a frente ( $\tau_2$ ). Em seguida, após serem feitas as correções, são apresentadas as conseqüências na espessura de saída e carga de laminação em uma tabela e tamanho de grão e TEM em outra tabela para cada cadeira de laminação. Desta forma, cada linha da tabela que contem todas estas informações representa uma condição de distúrbio/ruído (CD).

As informações nas tabelas são qualitativas, de maneira que, quando uma variável aumenta de valor aparece o símbolo ( $\uparrow$ ), quando diminui o símbolo é ( $\downarrow$ ). Caso não haja alteração na variável o símbolo então será (=). Após efetuadas as correções nas variáveis manipuladas as tabelas mostram como resultado as conseqüências em  $h_2$ ,  $P$ , TEM e  $d$ . Quando o resultado destas conseqüências são concorrentes, a variável que produziu maior influência é a que determina o resultado final e o símbolo aparecerá sublinhado na forma ( $\underline{\uparrow}$ ) ou ( $\underline{\downarrow}$ ) se o resultado for aumentar ou reduzir, respectivamente.

As correções nas variáveis manipuladas são feitas com o objetivo principal de recuperar a espessura de saída do material e observar o comportamento das propriedades mecânicas e microestruturais do material.

Nota-se na Tabela 2A que quando a carga de laminação aumenta devido somente ao aumento na TEM, acarretando um aumento na espessura de saída, condição de distúrbio 7 (CD 7), caso queira-se reduzir o gap para recuperação da espessura, a carga, a TEM e o tamanho de grão irão aumentar ainda mais. Por outro lado, caso aumente a tensão à frente, a TEM poderá sofrer um ligeiro acréscimo, mas a carga de laminação, espessura de saída e o tamanho de grão da austenita irão reduzir. Evidentemente, que a correção pelo gap produz efeito mais significativo na espessura de saída, do que correção na tensão entre cadeiras.

Observa-se que correções pelo gap visando a mesma recuperação de espessura de saída produzem efeito contrário na carga de laminação em relação às correções na tensão na tira entre cadeiras. Com isto, podem-se definir as prioridades e tolerâncias que se deseja obter com relação às propriedades mecânicas do material, no caso a TEM, microestrutura, no caso tamanho de grão e espessura de saída da tira e também como parâmetro operacional, a carga de laminação.

Como na maioria das indústrias tem-se somente como variável medida, sem ajuda de modelos, a carga de laminação, pode-se fazer uma síntese de todas estas observações de modo a utilizar somente como identificador de distúrbio a carga de laminação. Desta forma, podemos utilizar a Tabela 3 como representativa para o efeito dos distúrbios em todas as cadeiras de laminação.

A Tabela 3 mostra que um aumento na carga de laminação, tende a aumentar a espessura de saída e a TEM do material e reduzir o tamanho de grão da austenita. Portanto, haverá uma melhoria nas propriedades do aço, mas haverá perda dimensional. No caso onde é necessário aumentar a TEM ainda mais, reduzir ainda mais o tamanho de grão da austenita, reduzir a carga de laminação e reduzir a espessura de saída da tira, será necessário aumentar a tensão entre cadeiras de laminação.

No caso em que se necessita de recuperações na espessura de saída da tira mais significativas com o intuito de reduzi-la, a diminuição no gap será necessário e como resultado, a carga de laminação e a TEM irão aumentar e o tamanho de grão irá reduzir.

**Tabela 2A.** Análise qualitativa das conseqüências dos distúrbios de espessura e temperatura de entrada e TEM do material na espessura de saída e carga de laminação, e as correções feitas nas variáveis manipuladas para correção na espessura de saída.

DC	Distúrbios			Var Med	Resultado		Var. Manipuladas Correções em:			Conseqüências em h2 e P, após correções em g, $\tau_1$ e $\tau_2$					
	h1	Te	TEM	P	h2	d	g	$\tau_1$	$\tau_2$	h2			P		
										g	$\tau_1$	$\tau_2$	g	$\tau_1$	$\tau_2$
1	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓
2	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓
4	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
5	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓
6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
7	=	=	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓
8	=	=	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
9	↑	=	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓
10	↓	=	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
11	=	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
12	=	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓

**Tabela 2B.** Análise qualitativa das conseqüências dos distúrbios de espessura e temperatura de entrada e TEM do material no tamanho de grão e TEM e as correções feitas nas variáveis manipuladas para correção na espessura de saída.

DC	Distúrbios			Var Med	Resultado		Var. Manipuladas Correções em:			Conseqüências em TEM e d, após correções em g, $\tau_1$ e $\tau_2$					
	h1	Te	TEM	P	h2	d	g	$\tau_1$	$\tau_2$	TEM			d		
										g	$\tau_1$	$\tau_2$	g	$\tau_1$	$\tau_2$
1	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
2	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
4	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
5	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
7	=	=	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
8	=	=	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
9	↑	=	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓
10	↓	=	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓
11	=	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
12	=	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓

Outro importante fator a ser observado, é que um aumento na tensão a ré acarretará também uma redução na carga de laminação da cadeira anterior, que por sua vez, reduzirá a espessura de saída da tira desta cadeira e o seu tamanho de grão. A diminuição da espessura de saída da cadeira anterior diminuirá a carga de laminação na cadeira a frente, que por sua vez, reduzirá a espessura de saída da tira e o tamanho de grão da austenita (Tabela 3). Portanto, as correções nas variáveis manipuladas devem ser feitas de maneira a se objetivar uma melhoria do produto, com as melhores dimensões de espessura, melhores propriedades mecânicas e de microestrutura.

Por exemplo, caso se deseje refinar mais o grão da austenita para melhorar as propriedades mecânicas do material e não se queira mexer no gap. Deve-se então aumentar a tensão na tira entre cadeiras, o que acarretará num aumento na TEM e numa diminuição carga de laminação.

Com estas bases de regras, podem ser desenvolver algum tipo de programação não convencional (soft comuting) objetivando o controle automático do processo onde inclui as propriedades e microestrutura do material.

**Tabela 3.** Resultado da análise qualitativa das conseqüências de alterações na carga de laminação, e as correções feitas nas variáveis manipuladas para acerto de espessura de saída e carga de laminação, na laminação a quente.

Var Med	Resultado			Var. Manipuladas Correções em:			Conseqüências em h2 e P, após correções em g, $\tau_1$ e $\tau_2$											
							h2			P			TEM			d		
	P	h2	TEM	d	g	$\tau_1$	$\tau_2$	g	$\tau_1$	$\tau_2$	g	$\tau_1$	$\tau_2$	g	$\tau_1$	$\tau_2$		
↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↓
↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑

### 3 CONCLUSÕES

Correções no gap objetivando recuperar a espessura de saída da tira, produzem efeito contrário na carga de laminação e no tamanho de grão da austenita, caso utilize a tensão entre cadeiras para recuperar a espessura da tira.

Correções pelo aumento na tensão entre cadeiras causam uma redução na carga de laminação e espessura de saída da tira.

É possível determinar prioridades e tolerâncias de maneira a melhorar as propriedades mecânicas, microestrutura, espessura da tira e carga de laminação do aço, na laminação de tiras a quente, utilizando o modelo termomicroestrutural.

Estas regras qualitativas servem de base para desenvolver algum tipo de programação, tal como “soft computing”, que inclui controle não convencional, objetivando um melhor controle do processo envolvendo propriedades mecânicas e microestrutura do aço.

O modelo termomicroestrutural calcula muitas variáveis metalúrgicas e operacionais, que podem ajudar o especialista a resolver problemas e melhorar a qualidade final do produto devido ao melhor entendimento do processo que o modelo pode proporcionar.

### 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. 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Machado M.L.P.,. Modelo termomicroestrutural para determinação de variáveis operacionais e metalúrgicas para utilização em simulação e/ou controle na laminação a quente de aços carbono e microligados, Tese de Doutorado, **Universidade Federal do Espírito Santo - UFES**, Vitória, ES, Brasil, 2005.
- 8 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.
- 9 Machado M.L.P. Denti Filho J., Fagundes Jr. A Thermomicrostructural model to simulation disturbances in a hot strip mill and its effect in steel properties, roll force and exit strip thickness, **Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005**, Guarapari, ES, Brazil, 2005