

ANÁLISE DO EFEITO DE DISTÚRBIOS DE TEMPERATURA, ESPESSURA DA TIRA E VELOCIDADE DO CILINDRO DE TRABALHO UTILIZANDO UM MODELO TERMOMICROESTRUTURAL NA LAMINAÇÃO A QUENTE ¹

Marcelo Lucas P. Machado ²

José Denti Filho ³

José Fagundes Junior⁴

Resumo

Utilizando dados industriais e um modelo termomicroestrutural desenvolvido em linguagem de programação, foram feitas análises de sensibilidade por meio de simulações, de maneira a observar alterações comportamentais provocadas por variações na espessura, na temperatura de entrada do aço e na velocidade do cilindro de trabalho numa cadeia de laminação. Com isto, foram analisados os efeitos destes distúrbios nas propriedades do aço, tais como, tensão de escoamento média, tamanho de grão e temperatura de laminação em cada cadeira e a influência nas demais cadeiras. O modelo mostrou que um aumento na espessura de entrada aumenta a tensão de escoamento e aumenta a temperatura de laminação em todas as cadeiras, podendo provocar recristalização dinâmica e metadinâmica nos passes seguintes. O aumento na temperatura de entrada do material reduz significativamente a tensão de escoamento e aumenta o tamanho de grão e estes efeitos são transferidos também para os passes seguintes. O acompanhamento do tamanho de grão ao longo das cadeiras de laminação mostrou ser um bom identificador para se determinar o fim da recristalização dinâmica.

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

¹ 60° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Belo Horizonte (MG), 25 a 28 de Julho de 2005.

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc. Professor da Coordenadoria de Metalurgia e Materiais do CEFET-ES, Vitória-ES, Aluno de Doutorado em Automação PPGEE / UFES E-Mail: marcelolucas@cefetes.br.

³ Engenheiro Eletricista, D.Sc. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES, Vitória-ES, E-Mail: j.denti@ele.ufes.br.

⁴ 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.

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, a tensão de escoamento média (TEM) foi baseada na equação de Misaka para o aço C-Mn [1,2,3,4] e foram feitas correções para aços carbono, nióbio e microligados. Foram consideradas as deformações acumuladas entre passes de modo a incorporar o efeito das recristalizações estáticas, dinâmicas e metadinâmicas [2,5,6]. O modelo também permite prever o tamanho de grão da ferrita após passar pela mesa de resfriamento. A TEM calculada pelo modelo microestrutural é utilizada na equação de Sims para obter a carga de laminação.

Foi desenvolvido um modelo térmico, onde as equações que tratam das trocas térmicas do aço durante: a deformação 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 [3,7]. Com isto, pode-se determinar as temperaturas de entrada e saída do aço em cada cadeira de laminação.

Este modelo térmico foi inserido no modelo microestrutural, de maneira que, a força de laminação necessária ao modelo térmico é calculada pelo modelo microestrutural e a temperatura de laminação necessária para o modelo microestrutural é calculada pelo modelo térmico. Para isto, o modelo microestrutural e térmico juntos, agora chamado de modelo termomicroestrutural, fazem interações para se chegar aos valores desejados estabilizados.

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. O fluxograma do modelo térmico está mostrado na Figura 1.

Para calcular o diâmetro final da ferrita é necessário que se forneça a taxa de resfriamento após a última 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 2.

3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o modelo termomicroestrutural, foi possível fazer simulações por meio de alterações provocadas na espessura da tira, na temperatura de entrada do material e na velocidade do cilindro de trabalho para cada cadeira. Este trabalho utilizou dados Industriais de um aço laminado a quente, cuja composição química está mostrada na Tabela 1.

Foram admitidos distúrbios na segunda cadeira de laminação (F2) de dez por cento para mais e para menos em relação ao resultado nominal dado pelo modelo e analisado o efeito destas alterações nas propriedades do aço, como TEM, tamanho de grão e temperatura de laminação.

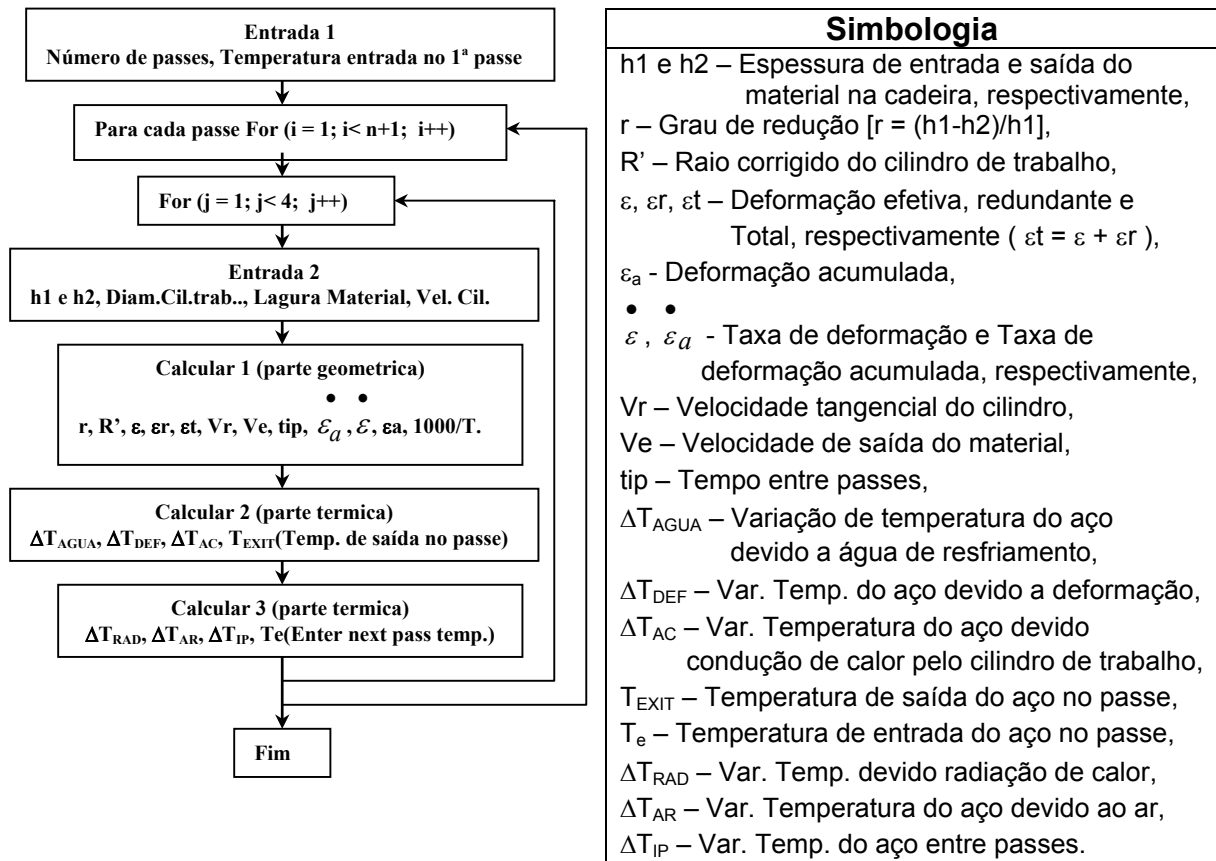


Figura 1. Fluxograma do modelo Térmico

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 na Espessura da Entrada do Material

Observe na Figura 3 que a TEM cresce com o aumento na espessura de entrada do material, o que esta de acordo com a Equação 1 de Misaka [1,2,3] que mostra a relação direta com a deformação e com a taxa de deformação do material.

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

TEM_{MK} - Tensão de escoamento média de Misaka para aços C-Mn.

Nota-se na Figura 4 um aumento na temperatura de laminação com o aumento na espessura de entrada do material, pois irá provocar aquecimento do material devido a maior deformação plástica.

O tamanho de grão final da austenita obtido é o tamanho de grão inicial ou de entrada na cadeia F3. Portanto é influenciado pela temperatura entre passe conforme as Equações 2 e 3, dadas para a recristalização dinâmica como é o caso.

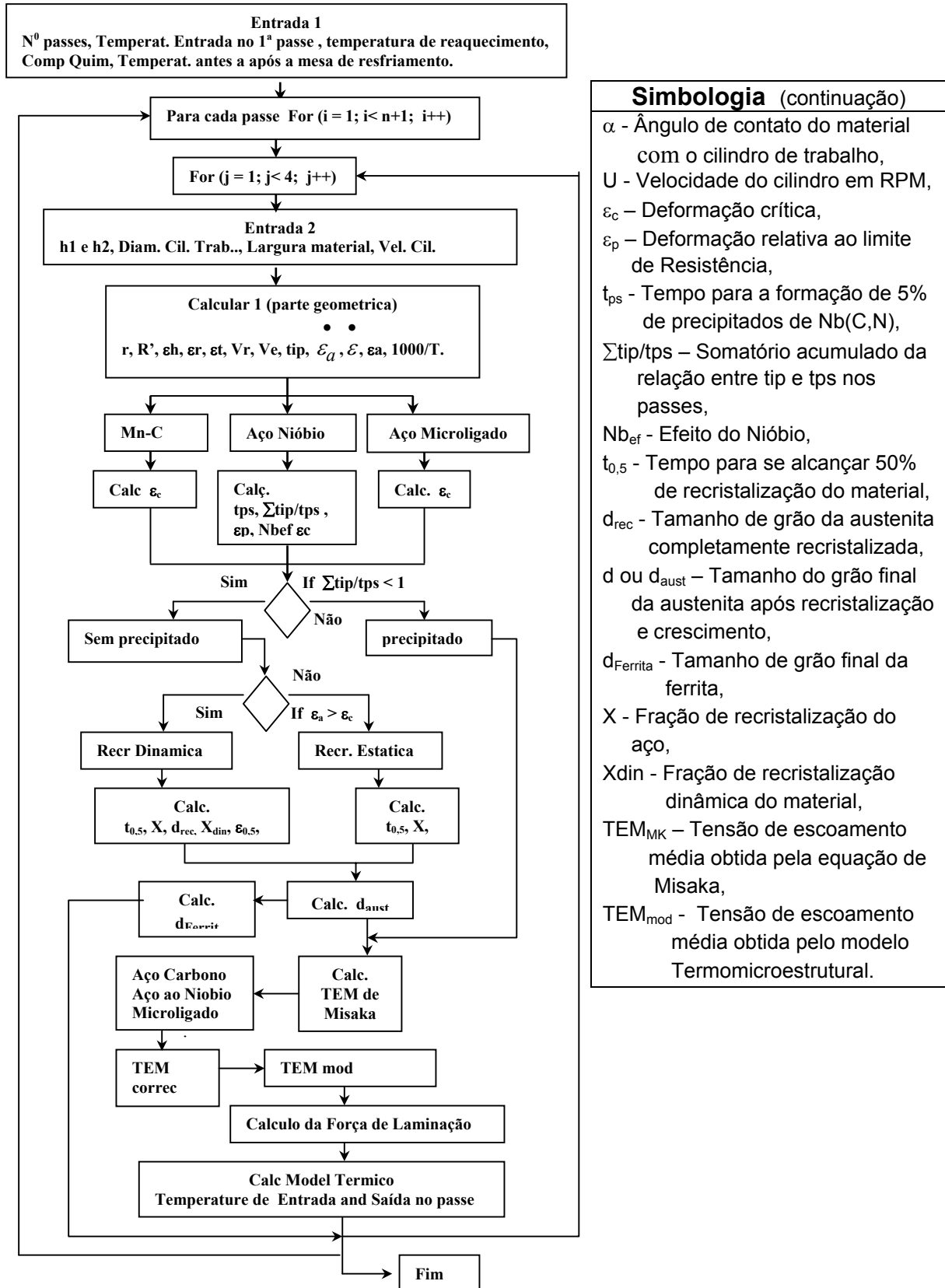


Figura 2. Fluxograma do modelo Termomicroestrutural

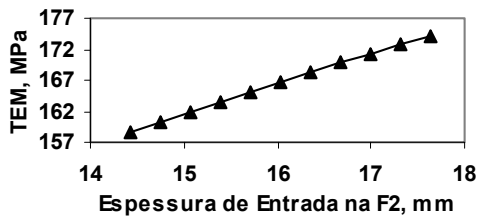


Figura 3. Efeito da variação na espessura de entrada na TEM.

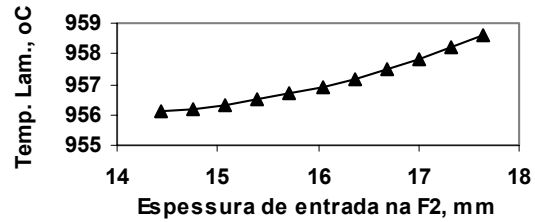


Figura 4. Efeito da variação na espessura de entrada na temperatura de laminação.

$$d_{rec} = 2,6 \cdot 10^4 \cdot \left[\dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{300000}{R \cdot T}\right) \right]^{-0,23} \quad (3.2) \quad \left| \quad d^7 = d_{rec}^7 + 8,2 \cdot 10^{25} \cdot (t_{ip} - 2,65 \cdot t_{0,5}) \cdot \exp\left(-\frac{400000}{R \cdot T}\right) \quad (3) \right.$$

onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação, d_{rec} é o tamanho de grão recristalizado, R a constante universal dos gases ideais, T a temperatura, t_{ip} o tempo entre passes e d o tamanho de grão final ou de entrada na próxima cadeia.

O aumento na espessura certamente irá aumentar a taxa de deformação no passe que por sua vez irá diminuir o tamanho de grão, como pode ser visto na Equação 2. Devido a estes efeitos concorrentes observa-se na Figura 5, um pequeno aumento no tamanho de grão.

O aumento na espessura de entrada na cadeia F2 significa o mesmo aumento na espessura de saída da cadeia F1. Isto provoca uma diminuição na TEM em F1 como mostrado na Figura 6, pois reduz a deformação e a taxa de deformação, e um aumento na TEM na cadeia F2 devido ao aumento destas mesmas variáveis. Este aumento de espessura provocou maior recristalização dinâmica e metadinâmica entre as cadeiras F2 e F3, ocasionando uma redução na TEM nos passes seguintes.

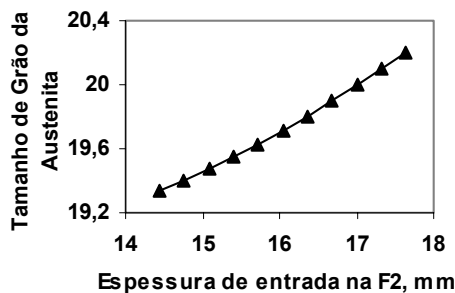


Figura 5. Efeito da variação na espessura de entrada no tamanho de grão do material em μm .

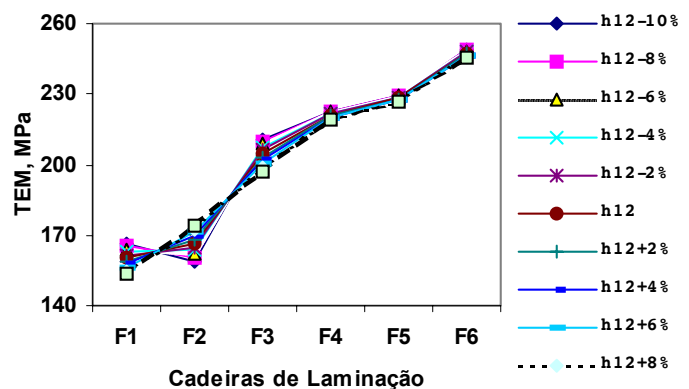


Figura 6. Efeito da variação na espessura de entrada (h12) na TEM em todas as cadeiras.

3.2. Efeito da temperatura de entrada do material na segunda cadeira

Observe na Figura 7 que a TEM diminui com o aumento na temperatura de entrada do material, o que está de acordo com a Equação 3, de Misaka que mostra a relação inversa com a temperatura de laminação.

Nota-se na Figura 8 uma relação quase direta do aumento na temperatura de laminação com o aumento na temperatura de entrada do material, pois adotamos a temperatura de laminação como dada pela média entre a temperatura de entrada e saída no passe.

Observe-se na Figura 9 que quanto maior a temperatura maior é o tamanho de grão e que neste caso o tamanho de grão é bem sensível ao efeito da temperatura, o que está de acordo com as Equações 2 e 3.

A Figura 10 mostra que o efeito do distúrbio em F2 se propaga para as demais cadeiras.

A mudança de comportamento na cadeira F5 para temperaturas mais baixas (Te2-10%, Te2-8%, Te2-6%) é devido a não haver recristalização dinâmica entre os passes F4 e F5 o que influencia na fração de recristalização, acarretando em acúmulo de deformação residual no mesmo, proporcionando um aumento mais acentuado na TEM, como pode ser visto na Tabela 3.2. A mudança de comportamento na cadeira F6 para temperaturas mais altas (Te2+10%) é devido também a haver somente neste caso recristalização dinâmica entre os passes F5 e F6.

Tabela 2. Efeito da variação na temperatura de entrada na fração de recristalização.

Efeito na cadeira F5						
	Te2-10%	Te2- 8%	Te2- 6%	Te2	Te2+8%	Te2+10%
X	0,903	0,920	0,936	1,0	1,0	1,0

A Figura 11 mostra que o distúrbio em F2 pode provocar mudanças na microestrutura do material nas cadeiras seguintes. Observe que na cadeira onde ocorre um crescimento acentuado no tamanho de grão, seguido de rápida diminuição é devido a não ocorrência de recristalização dinâmica no passe, veja na Tabela 3.

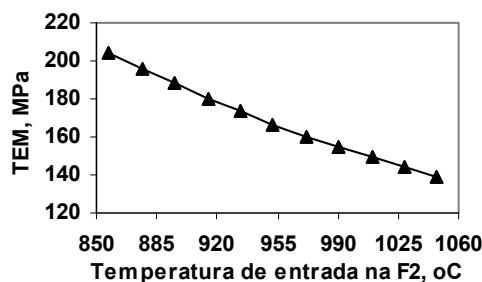


Figura 7. Efeito da variação da temperatura de entrada na TEM.

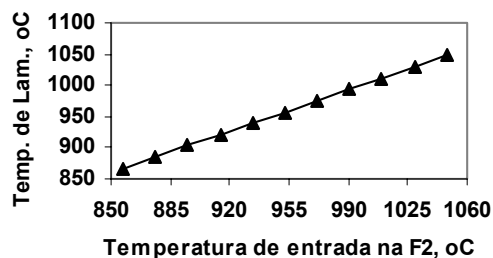


Figura 8. Efeito da variação da temperatura de entrada na temperatura de laminação.

Observe na Figura 12 que o aumento na temperatura de entrada aumenta a temperatura de laminação em todas as cadeiras seguintes, sendo que o seu efeito reduz gradativamente para as cadeiras mais distantes de F2. Nota-se também que a temperatura de laminação é bastante sensível à temperatura de entrada na cadeira F2.

3.3. Efeito da variação na velocidade do cilindro de trabalho

A Figura 13 mostra que a TEM cresce com o aumento da velocidade do cilindro, o que está de acordo com a Equação 1, de Misaka que mostra a relação direta com taxa de deformação do material, que por sua vez tem uma relação direta com a velocidade do cilindro de trabalho conforme a Equação 4 [2,3,4].

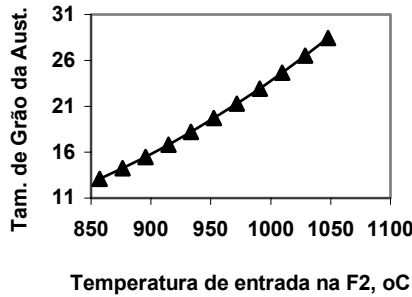


Figura 9. Efeito da variação da temperatura de entrada no tamanho de grão.

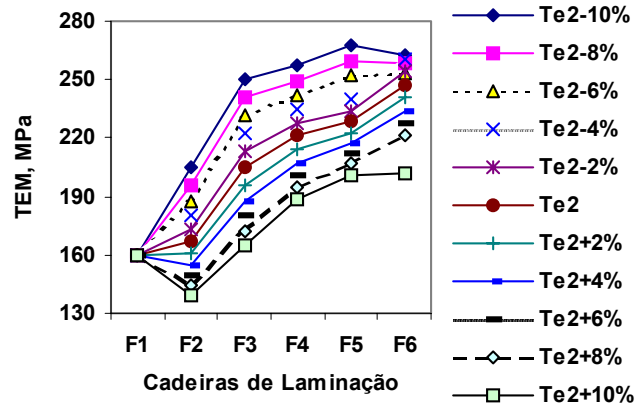


Figura 10. Efeito da variação na temperatura de entrada (Te2) na TEM em todas as cadeiras.

Tabela 3. Efeito da variação na temperatura de entrada em F2 na fração de recristalização dinâmica X_{din}.

Cadeira	Fração de recristalização dinâmica X _{din}				
	Te2-10%	Te2-6%	Te2	Te2+8%	Te2+10%
F1	0,272	0,272	0,272	0,272	0,272
F2	0,003	0,034	0,144	0,381	0,447
F3	0	0	0,04	0,149	0,184
F4	0	0	0	0	0,061
F5	0	0	0	0	0
F6	0	0	0	0	0

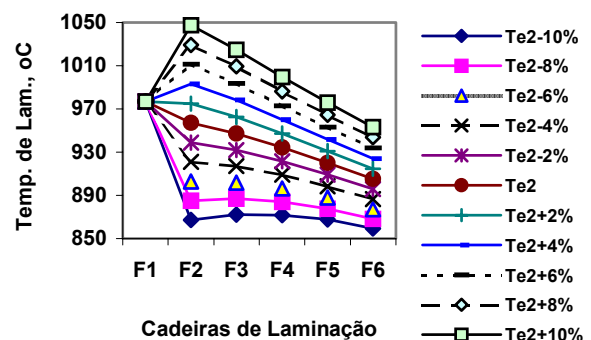
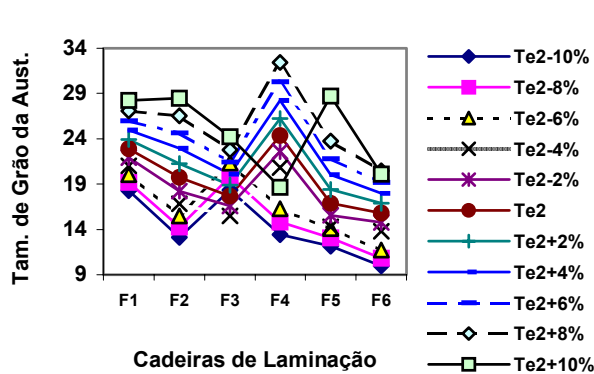


Figura 11. Efeito da variação na temperatura de entrada (Te2) no tamanho de grão nas demais cadeiras. **Figura 12.** Efeito da variação na temperatura de entrada (Te2) na temperatura de laminação.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\pi\sqrt{3}U}{45.\alpha} \ln\left(\frac{h1}{h2}\right) \quad (4)$$

A Figura 14 mostra que temperatura de laminação cresce com o aumento na velocidade do cilindro de trabalho, devido ao fato de que com o aumento na TEM aumenta a produção de calor por deformação plástica. Este aumento foi pouco significativo.

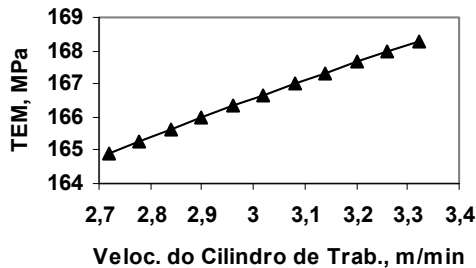


Figura 13. Efeito da variação na velocidade do cilindro de trabalho na TEM.

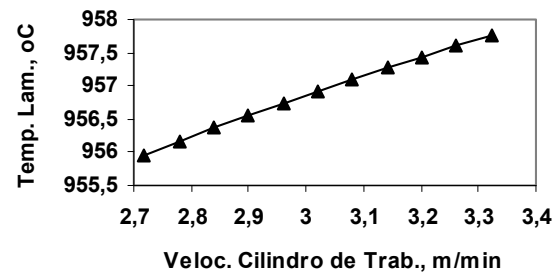


Figura 14. Efeito da variação na velocidade do cilindro de trabalho na temperatura de laminação.

Aumento da velocidade do cilindro diminui o tempo entre passes reduzindo o tamanho de grão. Por outro lado, o aumento da velocidade do cilindro aumenta a taxa de deformação do material diminuindo o tamanho de grão. O aumento da velocidade do cilindro aumenta a temperatura de laminação que por sua vez aumenta o tamanho de grão (Equações 2, 3 e 4). Estes efeitos concorrentes fazem com que a variação na velocidade do cilindro de trabalho tenha pouca influência no tamanho de grão do material. Veja na Figura 14.

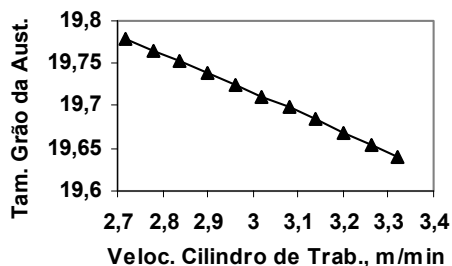


Figura 14. Efeito da variação na velocidade do cilindro de trabalho no tamanho de grão do material.

3 CONCLUSÕES

A variação na espessura de entrada do material aumenta a TEM e conseqüentemente a força de laminação no passe. O efeito no tamanho de grão foi pouco significativo.

O aumento na espessura de entrada do material aumenta a temperatura de laminação em todas as cadeiras, este efeito reduz gradativamente cadeiras mais distantes.

O aumento de espessura do material pode provocar aumento na recristalização dinâmica entre passes, proporcionando uma redução na TEM nos passes seguintes. O aumento na temperatura de entrada do material reduz significativamente a TEM e conseqüentemente a força de laminação. Este efeito também é transferido para as demais cadeiras de laminação.

A redução na temperatura de entrada pode interromper a fração de recristalização dinâmica e acarretar um aumento na TEM do material.

O acompanhamento do tamanho de grão da austenita ao longo das cadeiras de laminação mostrou ser um bom identificador para se determinar o fim da recristalização dinâmica, pois neste caso o seu tamanho de grão cresce significativamente para depois diminuir.

O aumento na velocidade do cilindro de trabalho aumenta a TEM e a temperatura de laminação, mas foi pouco significativo.

Com o modelo Termomicroestrutural, pode-se obter muitas variáveis de processo e metalúrgicas que 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 e também ao apoio no trabalho de Doutorado de MLPM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 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.

ANALYSIS THE EFFECT OF TEMPERARUTE, THICKNESS AND WORK ROLL SPEED DISTURBANCES BY USING A THERMOMICROSTRUCTURAL MODEL IN A HOT STRIP MILL¹

Marcelo Lucas P. Machado²
José Denti Filho³
José Fagundes jr.⁴

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 thickness, steel temperature and work roll speed in the stand. With this, the effect of these disturbances on the properties of the steel has been analyzed, such as, the mean flow stress, grain size and hot strip temperature in each stand and the influence on the others stands. The model showed that an increase on entry thickness increases the mean flow stress and increases the hot strip temperature at any of the stands, this can promote dynamic and metadynamic recrystallization in the next passes. The increase on entry temperature of the material reduces significantly the mean flow stress and increases the grain size and these effects are also transferred to the next passes. Accompanying the austenite grain size from each stand was a good way to identify the final of the dynamic recrystallization.

Key-words: Hot Strip Mill; Thermomicrostructural model; Microstructural model; Thermic model.

¹ 60° Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Belo Horizonte (MG), 25 a 28 de Julho de 2005.

² Metallurgical Engineer, M.Sc. Prof. of Coordenadoria of the Metallurgical and Materials at CEFET-ES, Vitória-ES, Doctorate Student of the Automactic Control - PPGEE/UFES

³ E-Mail: marcelolucas@cefetes.br.

⁴ Electrical Engineer, D.Sc. Adjoint Professor of Department of Electrical Engineering at UFES, Vitória-ES, E-Mail: j.denti@ele.ufes.br.

⁵ Metallurgical Engineer, M.Sc. Process Engineer of the Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST, Vitória-ES, E-Mail: fagundes@cst.com.br.