

ESTUDO DA TENSÃO MÉDIA DE ESCOAMENTO DE AÇOS LAMINADOS EM TIRAS A QUENTE¹

Altair Lúcio de Souza²
Geraldo Arruda Maia³
Paulo Roberto Cetlin⁴

Resumo

Foram avaliadas as resistências à deformação nos passes de laminação de tiras a quente de dois grupos de aços (grupo 1: C-Mn e grupo 2: ultra baixo carbono ligado ao Si) através do cálculo da tensão média de escoamento a partir de dados industriais obtidos nos laminadores da Usiminas em Ipatinga, utilizando-se os métodos de *Sims*, *Misaka* e *Shida*. Para a avaliação do efeito dos elementos de liga, os grupos foram divididos em três subgrupos com a alteração dos teores de elementos químicos chaves de cada grupo. Os resultados permitiram a identificação da ocorrência de fenômenos metalúrgicos que afetaram diretamente a resistência à deformação a quente como o aumento da tensão média de escoamento na etapa de acabamento com a elevação dos teores de C e Mn para os aços do grupo 1 e a queda da tensão média de escoamento na etapa de desbaste com o aumento do teor de Si para os aços do grupo 2. Foi possível também observar que, para o aço do grupo 1 com alto teor de Mn e os aços do grupo 2, faz-se necessário a introdução de coeficientes para correção dos modelos estudados quando aplicados no processo industrial para previsão da tensão média de escoamento.

Palavras-chave: Laminação de tiras a quente; Tensão média de escoamento; Modelo matemático.

INVESTIGATION OF MEAN FLOW STRESS OF STEEL IN HOT STRIP MILL

Abstract

The deformation resistances during the hot strip mill process of two groups of steels (group 1: C-Mn and group 2: Ultra Low Carbon Si-alloying) were investigated through the calculation of the mean flow stress starting from industrial data obtained in the rolling mills of Usiminas, using the methods of *Sims*, *Misaka* and *Shida*. For evaluation of the effect of the league elements, the groups were divided in three subgroups with alteration of the level of chemical elements keys of each group. The results allowed the identification of the phenomena metallurgists' occurrence that have affected the resistance directly to the hot deformation as the increase of mean flow stress in the stage of finish mill with the elevation of the level of C and Mn for the steels of the group 1 and the fall of the mean flow stress in the roughcast stage with the increase of the level of Si for the steels of the group 2. It was possible also be noted that for the steel of the group 1 with high level of Mn and the steels of the group 2, it has done necessary the introduction of coefficients for correction of the studied models when applied in the industrial process for forecast of the mean flow stress.

Key words: Hot strip mill; Mean flow stress; Mathematical modeling.

¹ Contribuição Técnica ao 47º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos; Belo Horizonte, MG, 26 a 29 de outubro de 2010.

² Mestre, Engenheiro Metalúrgico, CQE.; Gerência de Laminação a Quente - Usina 1, Usiminas

³ Engenheiro Metalúrgico, CQE/MBA; Superintendente da Laminação a Quente - Usina 1, Usiminas

⁴ Doutor, Engenheiro Mecânico; Professor da Universidade Federal de Minas Gerais

1 INTRODUÇÃO

A análise de dados industriais representa uma alternativa muito útil que permite obter conclusões importantes para a otimização do processo de laminação.^(1,2) Esse método tem duas vantagens principais:

- exige baixos custos experimentais, que se resumem à coleta de dados; E
- não exige fator de transposição ou aderência a partir de dados de ensaios mecânicos em laboratório.

Em laminadores de tiras a quente, os aços podem apresentar várias modificações microestruturais que vão influir diretamente nas cargas de laminação. A não previsão de aumento ou queda nas cargas de laminação devido a essas modificações pode implicar em variações de coroas, formas e dimensões indesejáveis no produto^(1,2) ou alterações imprevistas no fluxo de massa, resultando em folgas e tensionamento excessivo da tira entre cadeiras, prejudicando a estabilidade operacional.

A tensão média de escoamento (TME) pode ser prevista utilizando-se as equações matemáticas como as desenvolvidas por Misaka ou Shida.⁽¹⁾ Como estas equações foram estabelecidas para aços C-Mn, faz-se necessário introduzir termos multiplicadores relativos à influência dos diferentes elementos de liga, quando aplicada ao processo industrial. Por outro lado, é possível calcular uma referência da TME obtida no processo, utilizando-se a equação de Sims e os valores como a força real de laminação, as espessuras inicial e final e o raio do cilindro de trabalho.⁽¹⁻⁸⁾

Esse estudo visou analisar o comportamento da tensão média de escoamento nos passes de laminação para diferentes tipos de aços a partir de dados industriais comparando a TME obtida por diferentes modelos (*Sims*, *Misaka* e *Shida*) e verificando os efeitos do acúmulo de deformação, amaciamento dinâmico e elementos de liga na resistência à deformação a quente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Curva Tensão Média de Escoamento em Função da Temperatura

A análise da TME como função do inverso da temperatura absoluta, para cada passe, permite a visualização da ocorrência de mecanismos tais como:

- ocorrência de amaciamento estático completo durante o tempo interpasse;
- ocorrência de amaciamento incompleto durante o tempo interpasse, levando a um acúmulo de deformações;
- ocorrência da recristalização dinâmica resultando em um amaciamento que ocorre simultaneamente à deformação, causando quedas imprevistas da TME; e
- transformação de fase nos passes de laminação.⁽³⁻⁹⁾

O método proposto por Boratto et al.^(1,2,6) utilizando ensaios de torção a quente com resfriamento contínuo foi posteriormente utilizado para interpretar processos industriais por vários autores.⁽¹⁾

A Figura 1 mostra um exemplo dos comportamentos citados para uma seqüência hipotética de cinco passes. Observa-se que cada declive ou aclave característico é associado a recristalização estática, acúmulo de deformações e recristalização dinâmica seguida por metadinâmica. Esse método permite a visualização metalúrgica de um processo qualquer de conformação mecânica de múltiplos passes.^(1,4,10)

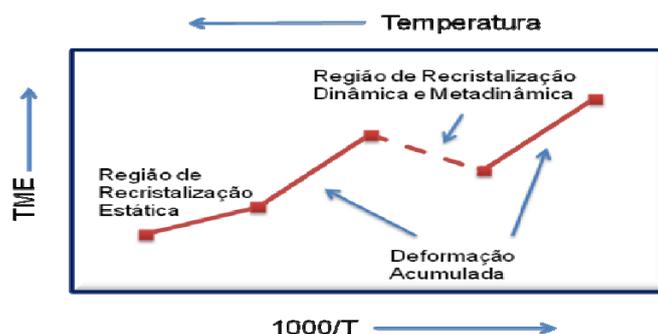


Figura 1. A evolução da TME em função do inverso da temperatura absoluta.⁽¹⁾

2.2 Cálculo da Tensão Média de Escoamento

Um melhor acerto na predição da força de laminação depende significativamente do acerto na descrição das propriedades físicas dos metais. Na laminação a frio é suficiente incluir o efeito da deformação do metal na sua resistência à deformação. Já na laminação a quente, a resistência à deformação é função da deformação (ϵ), da taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$), da temperatura (T), do histórico da deformação e da estrutura metalúrgica do metal, tornando-se ainda mais complexas quando os processos de restauração dinâmica atuam.

Funções tal como $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$ são mais comumente usadas em programas que simulam os processos de deformação a quente. Elas descrevem a tensão de escoamento na maioria dos materiais em tiras a quente e chapas grossas gerando resultados razoáveis⁽¹¹⁾. A seguir serão apresentados alguns métodos desenvolvidos para cálculo da tensão média de escoamento a quente.

2.2.1 Equação de Shida

Através de ensaios mecânicos, Shida testou aproximadamente 200 amostras de baixo, médio e alto carbono e desenvolveu uma equação que descreve a resistência à deformação a quente em função da temperatura, da deformação, da taxa de deformação e do teor de carbono, contando com avaliação do comportamento nas regiões da austenita, bifásica e da ferrita.⁽¹¹⁾

$$TME = \sigma_f \left[1,3 \cdot (5 \cdot \epsilon)^{(0,41 - 0,07[C])} - 1,5 \cdot \epsilon \right] \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^m \quad (1)$$

Onde [C] é a porcentagem de carbono, σ_f e m são coeficientes calculados em função da temperatura e porcentagem de carbono.

2.2.2 Equação de Misaka

Misaka e Yoshimoto desenvolveram um modelo que calcula a tensão média de escoamento (TME) em aços C-Mn durante a laminação de tiras à quente. Esta equação considera somente recristalização estática e leva em consideração o teor de carbono, a deformação homogênea e a taxa de deformação. Esta equação é escrita da seguinte forma:^(1,3)

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

2.2.3 Equação de Sims

É possível obter a TME a partir de dados de processo, utilizando-se a equação de Sims e os valores como a força de laminação, as espessuras inicial e final e o raio do cilindro de trabalho.^(1,3-7)

$$TME = \frac{P}{W \cdot Q_p \cdot \sqrt{R' \cdot (h_1 - h_2)}} \quad (3)$$

Onde P é a força medida de laminação, W a largura do material, Q_p o fator geométrico e R' o raio deformado ou raio do cilindro na presença de deformação e h₁ e h₂ são as espessuras de entrada e saída no passe.

R' e Q_p são calculados da seguinte forma:

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{Cc \cdot P}{W \cdot (h_1 - h_2)} \right) \quad (4)$$

$$Q_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1-r}{r}} \left\{ \pi \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{r}{1-r}} \right) - \sqrt{\frac{R'}{h_2}} \ln \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^2 (1-r) \right] \right\} - \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

Onde Cc é coeficiente referente ao tipo de cilindro de laminação, r é a redução no passe, e h_n a espessura no ângulo neutro calculada pela seguinte equação:

$$h_n = R' \left(1 - \cos \left\{ \sqrt{\frac{h_2}{R'}} \tan \left(\frac{\pi}{8} \sqrt{\frac{h_2}{R'}} \right) \ln(1-r) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{r}{1-r}} \right) \right\} \right) + h_2 \quad (6)$$

3 METODOLOGIA

A Linha de Tiras a Quente da Usiminas é constituída por:

- três fornos de reaquecimento;
- dois laminadores desbastadores quádruplos-reversíveis (R1 e R2);
- um conjunto de laminadores contínuos de acabamento com seis cadeiras (trem acabador);
- uma mesa de resfriamento;
- e duas bobinadeiras.

A Figura 2 apresenta o fluxo de produção da Linha de Tiras a Quente.

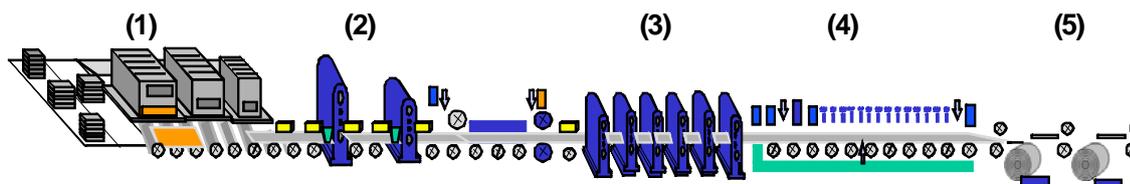


Figura 2. Fluxo de produção da Linha de Tiras a Quente da Usiminas.

Para a realização deste trabalho foram coletados dados completos sobre o sistema de passes empregado, incluindo-se a composição química do material processado, temperatura e força aplicada em cada passe de laminação da Linha de Tiras a Quente. Os materiais estudados foram processados com oito passes no Desbaste sendo cinco no R1 (R11 a R15) e três no R2 (R21 a R23) e seis passes no Trem Acabador (F1 a F6).

Foram selecionados dois grupos de aços processados: grupo 1, aço C-Mn; grupo 2, aço ultra baixo carbono ligado ao Si. Os grupos de aço foram subdivididos em três subgrupos A, B e C através da variação dos elementos de liga chaves dentro de cada grupo. As dimensões finais do produto, espessura e largura, foram as mesmas para os três subgrupos. A Tabela 1 apresenta a faixa de composição química destes aços.

Tabela 1. Faixa de composição química dos aços estudados (% em peso)

	%C	%Mn	%Si
Grupo 1: C-Mn	A:0,03 B:0,16 C:0,16	A:0,27 B:0,39 C:2,06	-
Grupo 2: UBC ao Si	A:0,004 B:0,004 C:0,004	A:0,53 B:0,61 C:0,50	A:0,81 B:1,10 C:1,81

Foi desenvolvida uma planilha em *Excel* para efetuar os cálculos das tensões médias de escoamento, a partir dos dados de processo, utilizando-se as equações de *Shida*, *Misaka* e *Sims* (equações 1, 2 e 3), sendo que a TME calculada pela equação de *Sims*, obtida através da força real de laminação, foi considerada como a de referência, ou seja, tensão média de escoamento real do material no passe.

A partir dessa massa de dados foram confeccionados dois tipos de gráficos: o primeiro através do relacionamento da TME de referência, *Sims*, para cada subgrupo em cada passe para verificação da influência do efeito do acúmulo de deformação, dos processos de amaciamento dinâmica e de elementos de liga na resistência a deformação a quente e, no segundo, através do relacionamento da TME calculada pelas equações 1, 2 e 3 em cada passe para obter uma comparação dos modelos de *Misaka* e *Shida* em relação ao valor de referência.

3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resultados do Grupo 1 – Aço C-Mn

É mostrado na Figura 3 a evolução da TME de referência nos passes de laminação para os três subgrupos A, B e C, conforme indicado na Tabela 1:

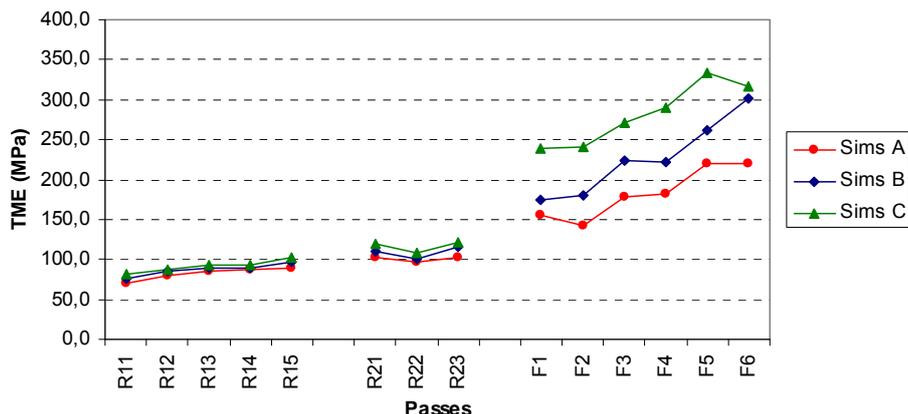


Figura 3. Resultados de TME de referência obtidos pelo método de *Sims* em cada passe para os subgrupos A, B e C.

Pode-se observar que as tensões média de escoamento obtidas para os três subgrupos nos passes do Desbaste apresentaram valores muito próximos entre si indicando que, nesta etapa, devido aos materiais se encontrarem totalmente na região austenítica e em temperaturas mais elevadas, os elementos de liga não interferiram de forma significativa na resistência à deformação a quente. Outra observação nesta etapa é que há uma pequena variação do valor da TME do primeiro passe R11 para o último passe R23 devido a elevada temperatura e maiores tempos entre passes favorecerem a ocorrência de completa recristalização estática. Já no Trem Acabador há uma grande variação da TME do primeiro passe F1 para o último passe F6, devido a laminação ocorrer em menores temperaturas, menores tempos entre passes e maiores taxas de deformação. Tais condições favorecem o aparecimento dos mecanismos de encruamento, amaciamento dinâmico, e formação de precipitados, afetando diretamente a resistência a deformação a quente. Nesta etapa ficou evidente a influência dos elementos de liga através da diferença da TME entre os três aços A, B e C de modo que, com o aumento dos teores de C e Mn, ocorreu o aumento da resistência à deformação a quente nos passes.

É mostrado na Figura 4 uma comparação entre os resultados de TME obtidos pelos métodos de *Sims*, *Misaka* e *Shida* em cada passe de laminação para os três subgrupos.

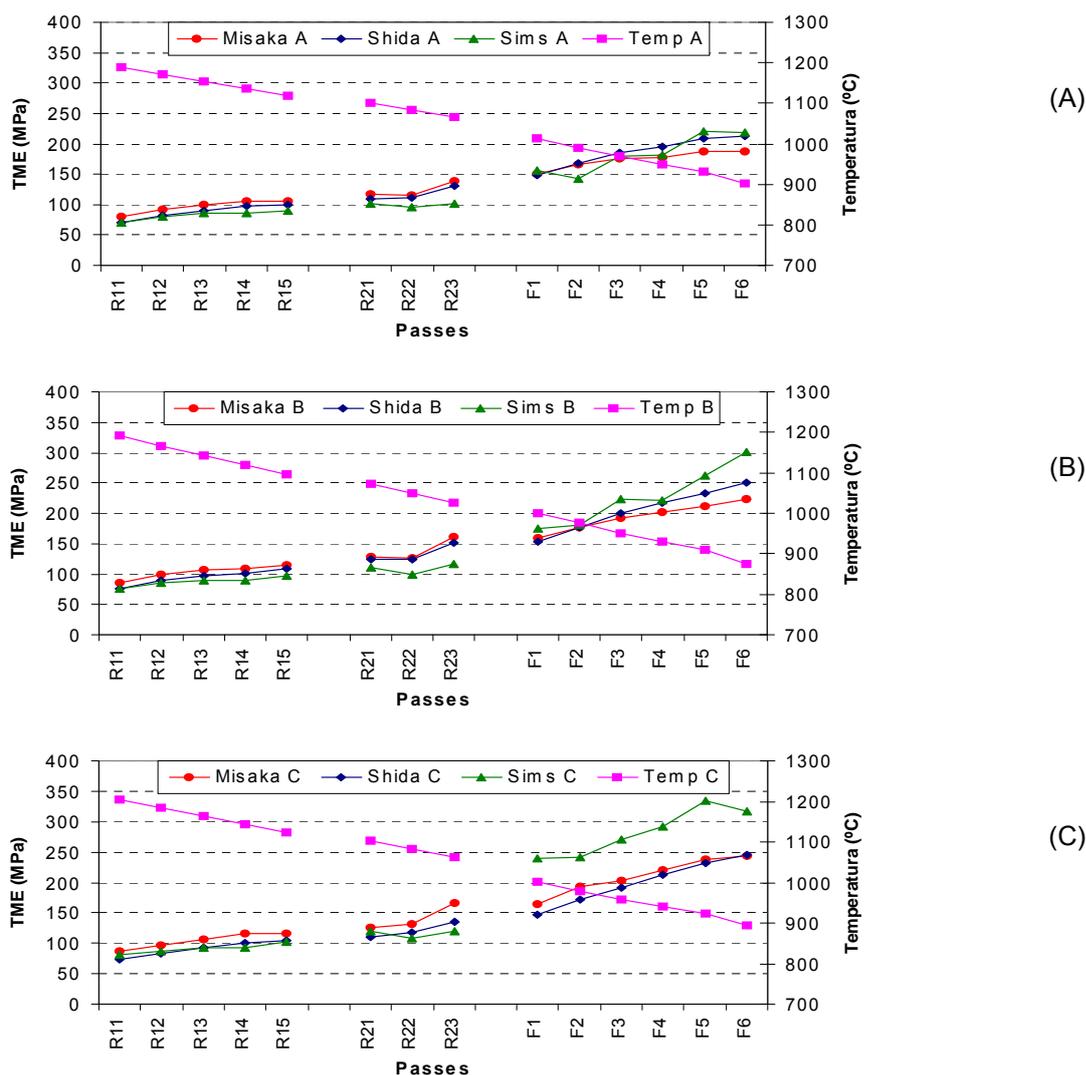


Figura 4. Comparação entre os valores de TME obtidos pelos métodos de *Sims*, *Misaka* e *Shida* para os subgrupos A, B e C.

Pode-se verificar que no Desbaste os métodos de *Misaka* e *Shida* obtiveram resultados bem próximos entre si e próximos aos valores de TME de referência (método de *Sims*), para os três subgrupos e, no Trem Acabador, os métodos de *Shida* e *Misaka* também apresentaram valores próximos entre si e distanciaram dos valores de referência somente para o subgrupo C que apresenta alto teor de Mn e, neste caso, há necessidade de utilização de outros modelos ou coeficientes de correção destas equações para previsão da TME nesta etapa para este tipo de aço quando aplicado em processo industrial.

3.2 Resultados do Grupo 2 – Aço Ultra Baixo Carbono Ligado ao Si

É mostrado na Figura 5 a comparação da TME de referência nos passes de laminação para os três subgrupos A, B e C, conforme indicado na Tabela 1.

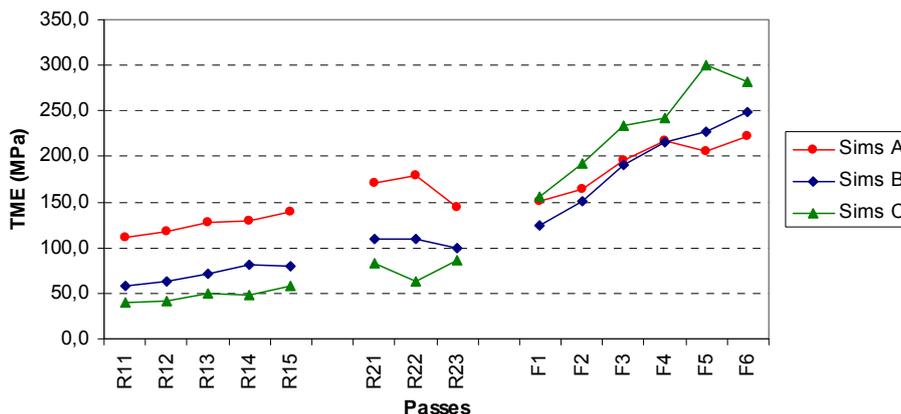


Figura 5. Resultados de TME de referência obtidos pelo método de *Sims* em cada passe para os subgrupos A, B e C.

Os aços ultra baixo carbono ligados ao Si apresentam temperatura de início de transformação de fase (Ar3) mais elevadas em relação a maioria dos aços processados em tiras a quente. Dos aços produzidos pela Usiminas, este é o único em que a transformação de fase se completa antes do último passe do Trem Acabador. Todos os outros tipos de aço são processados na fase austenítica.

Pode-se verificar na Figura 5 que os aços do grupo 2, diferentemente do primeiro grupo, apresentaram valores de TME diferentes entre os subgrupos no Desbaste. Isto se explica devido aos aços B e C, que apresentam valores mais elevados de Si (1,10% e 1,81%, respectivamente), terem sido laminados na região intercrítica nesta etapa, o que proporcionou a diminuição da TME em relação ao aço A, que se encontrava na fase austenítica. A diminuição da TME é explicada devido existir na região intercrítica a presença da ferrita que apresenta menor resistência à deformação que a austenita.

Entre o último passe do Desbaste e primeiro passe do Trem Acabador ocorreu uma elevação da TME para os aços B e C indicando que a transformação de fase se completa e assim estes aços são processados totalmente na fase ferrítica no Trem Acabador e o aumento da TME nesta etapa é devido à queda de temperatura e encruamento da ferrita. O aço A apresentou a TME nos primeiros passes do Trem Acabador próxima aos valores do Desbaste devido nesta etapa este aço encontrar-se austenítico atingindo a região intercrítica nas primeiras cadeiras do Trem Acabador, causando a queda da TME mesmo com a queda de temperatura.

É mostrado na Figura 6 uma comparação entre os resultados de TME obtidos pelos métodos de *Sims*, *Misaka* e *Shida* em cada passe de laminação para os três subgrupos.

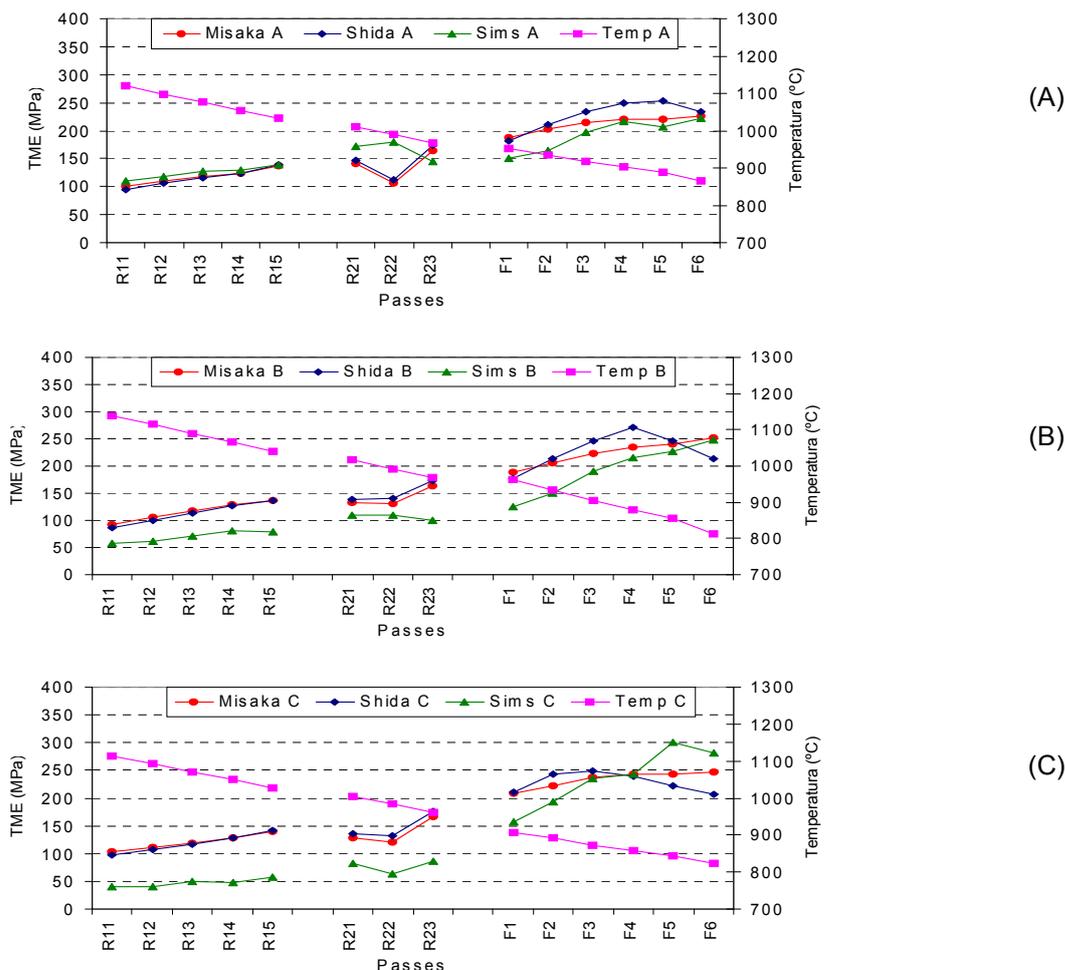


Figura 6. Comparação entre os valores de TME obtidos pelos métodos de *Sims*, *Misaka* e *Shida*.

Como as equações de *Shida* e *Misaka* não consideram o teor de Si para o cálculo da TME, os valores obtidos por estas duas equações para os aços do grupo 2 correspondem a de um aço baixo carbono sem elementos de liga.

Na etapa do Desbaste estas equações apresentaram valores muito próximos entre si e próximos aos valores de referência para o aço A que se encontra na região austenítica, e superestimaram os valores de TME para os aços B e C que se encontram na região intercrítica. Nesta etapa ficou evidente a diminuição da TME com o aumento do teor de Si. No Trem Acabador *Misaka* e *Shida* mostraram tendências diferentes para a evolução da TME nos passes de F1 a F6. A equação de *Shida* indicou uma queda da TME para os últimos passes o que não ocorreu com a equação de *Misaka*, devido o método de *Shida* prever a queda da TME quando se lamina na região intercrítica, conforme apresentado no item 2.2.1, e, como se trata de aço ultra baixo carbono, é esperado que a transformação de fase se inicie próximo à 900°C, no entanto, devido a ação do Si esta transformação ocorreu em temperaturas mais elevadas.

Nenhum dos métodos, *Shida* ou *Misaka* conseguiram prever o comportamento destes aços nos passes de laminação comparando-se aos valores de referência no Trem Acabador. As maiores aproximações foram obtidas pela equação de *Misaka* para os aços A e B nos últimos passes e pelas duas equações na F3 e F4 para o aço C, também mostrando a necessidade de utilização de outros

modelos ou coeficientes de correção destas equações para previsão da TME nesta etapa, para este tipo de aço, quando aplicado em processo industrial.

4 CONCLUSÃO

Apesar das equações de *Shida* e *Misaka* terem sido desenvolvidas a partir da análise de aços C-Mn, elas não cobrem todos as faixas de variação desses elementos, como pode ser verificado para o aço com alto teor de Mn do grupo 1.

Para os aços do grupo 2 ficou claro o efeito do teor de Si na resistência a deformação a quente, principalmente no Desbaste. A visualização de informações deste tipo pode ajudar na decisão de melhores práticas operacionais ou até mesmo na configuração de composições químicas adequadas dos aços para a otimização do processo.

O método apresentado nesse trabalho pode ser aplicado para outros tipos de aço para o entendimento da evolução da TME nos passes de laminação e acompanhamento dos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o processamento no tiras a quente, bem como a sua influência nas cargas de laminação e nas propriedades mecânicas do produto final.

REFERÊNCIAS

- 1 PADILHA, A. F., SICILIANO Jr., F., Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura, ed. ABM Livros, 2005, p.13-161.
- 2 SICILIANO Jr, F., JONAS J. J., Previsão de cargas em laminação de tiras a quente. Metalurgia & Materiais, fevereiro 1997, p. 95-97.
- 3 JONAS, J. J., The critical strain for dynamic recrystallization in rolling mills. Materials Science Forum, v. 426-432, 2003, p. 57-66.
- 4 JONAS, J. J., The hot strip mill as an experimental tool. ISIJ International, V. 40, n. 8, March 2000, p. 731-738.
- 5 GORNI, A. A., VALLIN, P. S. S., Efeito da recristalização dinâmica na resistência a deformação de aços processados no laminador de tiras a quente, Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM, 40, Outubro 2003, p. 480-487.
- 6 SICILIANO Jr, F., Modelamento matemático durante a laminação de tiras a quente – o uso do laminador como ferramenta experimental, Seminário de Laminação – ABM, 37, Setembro 2000, p. 449-457.
- 7 SARMENTO, E. C., EVANS, J. F., Efeito da deformação acumulada e da recristalização dinâmica na resistência a deformação de aços alta resistência baixa liga durante a laminação de tiras a quente. Congresso Anual da ABM, 26, Setembro 1991, p. 617-627.
- 8 JONAS, J. J., Recovery, recrystallization and precipitation under hot working conditions, Nancy, V. 3, 1976, p. 997-1002.
- 9 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, 2005, Tese (Doutorado), Universidade Federal do Espírito Santo.
- 10 POLIAK, E. I., JONAS, J. J., Initiation of dynamic recrystallization in Constant strain rate hot deformation, ISIJ International, v. 43, n. 5, p. 684-691.
- 11 LENARD J. G., PIETRZYK M., CSER L. Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products, ed. ELSEVIER, 1999, p.61-86.
- 12 CUPERTINO K. F., MACHADO M. L. P., Implementação de um modelo matemático para correções na equação da tensão de escoamento média de Misaka em aços C-Mn na laminação de tiras a quente, Congresso Anual da ABM, 23 a 27, Julho 2007, p. 2883-2891.