



DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE NÃO-RECRISTALIZAÇÃO DE AÇOS MICROLIGADOS USANDO DADOS DA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS*

Antonio Augusto Gorni¹
Marcos Roberto Soares da Silva²

Resumo

A Temperatura de Não-Recristalização (T_{nr}) é um parâmetro fundamental para a definição dos limites de temperatura a serem adotados nas fases de esboçamento, espera e acabamento da laminação controlada de chapas grossas feitas com aços microligados. Sua determinação experimental normalmente requer a execução de ensaios laboratoriais de torção a quente mas, a princípio, também é possível que a T_{nr} seja determinada a partir da evolução dos valores de tensão de escoamento média e temperatura obtidos durante a laminação de chapas grossas. O objetivo deste trabalho consistiu em verificar a viabilidade desta abordagem sob as condições específicas da usina de Cubatão da Usiminas. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar o real potencial desta técnica, propor alterações na metodologia disponível na literatura e constatar suas limitações.

Palavras-chave: Laminação de Chapas Grossas; Aços Microligados; Temperatura de Não-Recristalização, Austenita

DETERMINATION OF NON-RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE OF MICROALLOYED STEELS USING INDUSTRIAL DATA FROM PLATE ROLLING

Abstract

The Non-Recrystallization Temperature (T_{nr}) is a fundamental parameter to define the temperature limits to be adopted in the roughing, holding and finishing stages of the controlled rolling of microalloyed steel plates. Normally this temperature is experimentally determined using hot torsion laboratory tests but, eventually, it can be calculated from mean hot strength and temperature data got from industrial plate rolling. The aim of this work was to verify the feasibility of this approach under the specific operational conditions of the Cubatão works of Usiminas. The results got allowed to evaluate the effective potential of this procedure, as well to propose some modifications in the test methodology available in the literature and to find out its limitations.

Keywords: Plate Rolling; Microalloyed Steels; Non-Recrystallization Temperature; Austenite

¹ Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M.Eng, D.Eng, Especialista na Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Usiminas, Cubatão SP, Brasil.

² Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, MBA, CQE, Gerente de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Usiminas, Cubatão SP, Brasil.

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O método experimental de Boratto e outros [1] para a determinação de temperaturas críticas para a definição de processos de laminação controlada de aços microligados já se encontra consagrado há muito tempo. Ele basicamente consiste da simulação do processo em questão através de ensaio de torção a quente com múltiplos passes, sendo posteriormente feita a análise da evolução da tensão de escoamento média ao longo do valor inverso da temperatura absoluta, conforme mostrado na figura 1.

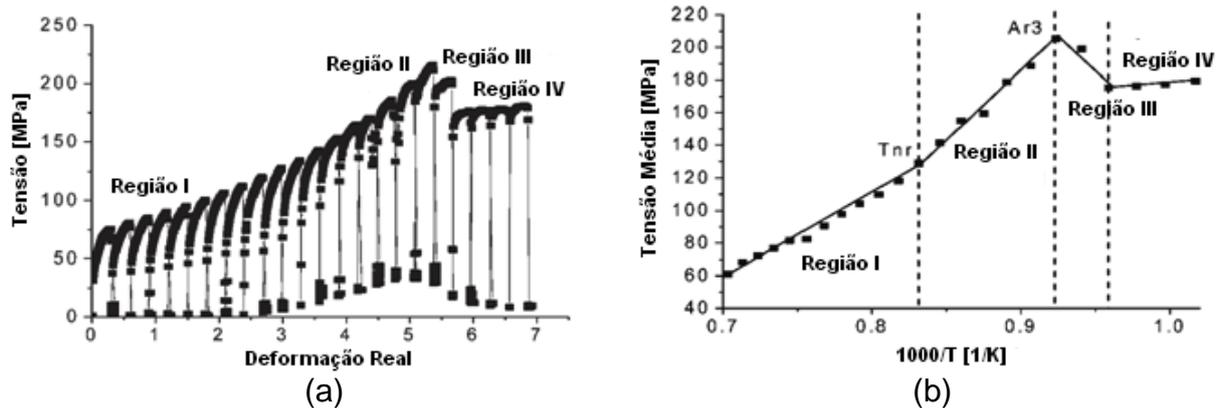


Figura 1: (a) Curvas tensão versus deformação obtidas a partir de ensaio de deformação com passes múltiplos em aço microligado (0,02% C, 1,50% Mn, 0,26% Si, 0,043% Al, 0,020% Ti e 0,018% N). (b) Tensão de escoamento média versus inverso da temperatura absoluta calculada a partir dos dados mostrados na figura 2(a) [2].

O ensaio mostrado na figura 2(a) corresponde a uma simulação de laminação de chapas grossas com 23 passes, onde o tempo entre eles foi fixado em 20 segundos sob uma taxa de resfriamento constante de 1°C/s; note-se ainda que o grau e taxa de deformação também foram constantes em todos os passes. Sob tais condições pode-se observar que a tensão de escoamento aumentou à medida que a temperatura diminuiu, primeiramente de forma ligeira (Região I) e depois de forma mais acentuada (Região II). A seguir, sob temperaturas menores, ocorreu queda nessa tensão (Região III), seguida de novo aumento nesse parâmetro (Região IV). Esta evolução ficou ainda mais clara na figura 2(b), onde foram plotados os valores de tensão de escoamento média versus o inverso da temperatura absoluta. Foi constatado que o comportamento de cada uma dessas regiões decorre das transformações metalúrgicas que ocorrem no material que está sendo deformado:

- Região I: corresponde à deformação sob altas temperaturas, onde a austenita recristaliza completamente entre passes e não há acumulação de encruamento. A tensão de escoamento média aumenta exclusivamente em função da queda de temperatura, o que explica sua taxa de elevação relativamente modesta;
- Região II: ocorre aumento na declividade da reta, indicando o acúmulo de discordâncias no material. Ou seja: a recristalização já não é completa entre passes, fazendo com que o material apresente deformação residual no momento da aplicação do passe seguinte;

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



- . Região III: A queda na resistência à deformação ocorre na temperatura em que se inicia a transformação de austenita a ferrita (Ar_3), uma vez que esta última fase é menos dura que a austenita que lhe deu origem quando ambas se encontram sob temperaturas semelhantes. A laminação intercrítica se inicia abaixo dessa temperatura;
- . Região IV: a resistência a quente volta a aumentar à medida que a temperatura cai ainda mais, indicando que a ferrita e a austenita remanescente estão sendo laminadas a morno. Essa região inclui a temperatura Ar_1 , a qual pode ser determinada através de um procedimento mais refinado de ajuste de curvas [1].

Em tese, o procedimento proposto por Boratto e outros [1] pode ser executado usando-se qualquer ensaio de conformação a quente, desde que as condições de deformação e a taxa de resfriamento sejam mantidas constantes – e, naturalmente, desde que o material possua ductilidade suficiente para suportar a deformação total que será aplicada a ele. Portanto, é possível pensar em determinar T_{nr} , Ar_3 e Ar_1 usando-se dados provenientes de processos industriais de laminação a quente. Essa abordagem é atraente já que, em tese, permitiria obter esses parâmetros praticamente sem custo e esforço. Neste caso a tensão de escoamento média pode ser calculada a partir da carga de laminação, sendo a temperatura obtida, por exemplo, através de pirômetros. Com efeito, Maccagno e outros [3], Bodnar e outros [4] e Pereira [5] determinaram, com diferentes graus de sucesso, T_{nr} e Ar_3 a partir de dados industriais da laminação de chapas grossas.

Por outro lado, essa determinação a partir de resultados industriais possui uma série de inconvenientes. O primeiro dele é o fato de não ser possível manter fixos os valores de grau e velocidade de deformação por passe, bem como a taxa de resfriamento e intervalos entre passes ao longo de todo o processo de laminação. Essas variações afetarão os valores obtidos de resistência média à deformação e influenciarão sua evolução, podendo eventualmente falsear os valores obtidos para as temperaturas críticas. Minami e outros [6] propuseram uma fórmula para tentar suprimir o efeito das variações de grau e taxa de deformação entre os diferentes passes, “padronizando” os valores de tensão de escoamento média obtidos a partir da carga de laminação (σ) conforme valores constantes de grau ($\epsilon = 0,4$) e taxa ($\dot{\epsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$) de deformação, usando os coeficientes da equação de Misaka, a qual pode ser vista abaixo:

$$\bar{\sigma}_{Corr} = \bar{\sigma} \left(\frac{0,4}{\epsilon} \right)^{0.21} \left(\frac{5,0}{\dot{\epsilon}} \right)^{0.13} \quad (1)$$

Mas ainda há outros problemas que podem falsear a determinação das temperaturas críticas a partir de dados industriais. Um deles é a possível transição no regime de atrito no arco de contato, o qual passa de agarramento para deslizamento à medida que a temperatura cai. Geralmente o cálculo da tensão de escoamento média a partir das cargas de laminação é feita por versões inversas dos modelos de Sims [3,5] ou Alexander-Ford [4], os quais só consideram atrito por agarramento. Dessa forma, à medida que o coeficiente de atrito diminuir juntamente com a temperatura, eles apresentarão tendência a subestimar o valor da tensão de escoamento média [7]. Outro problema está associado à coleta dos valores de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



temperatura. No início da laminação o esboço é muito curto, o que suprime ou reduz muito o intervalo de tempo em que ele fica exposto aos pirômetros, impedindo a medição de sua temperatura ou afetando muito sua precisão. Além disso, os gradientes de temperatura entre superfície e núcleo do esboço podem ser muito altos. Uma possível solução para esse problema é a adoção de um valor médio de temperatura calculado a partir de um modelo matemático previamente desenvolvido que leve em conta tanto o perfil de temperaturas da placa no momento de seu desenformamento, bem como a evolução de temperaturas através de toda espessura do esboço no decorrer de toda a laminação.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram usados neste trabalho dados de processo obtidos a partir de uma série de experimentos feitos durante o desenvolvimento inicial do processo de laminação de normalização de chapas grossas [8]. A composição química do aço estudado foi 0,11% C, 1,17% Mn, 0,27% Si, 0,054% Al, 0,016% Nb, 0,013% Ni e 0,049% N. Sua T_{nr} nominal, calculada pela fórmula proposta por Boratto [1], era igual a 883°C, enquanto que sua Ar_3 , calculada pela fórmula de Ouchi [9], era igual a 787°C. O material foi fornecido na forma de placas lingotadas continuamente com 210 mm de espessura, as quais foram processadas no Laminador de Chapas Grossas da então Cosipa (hoje usina de Cubatão da Usiminas) até uma espessura de 19,50 mm, sendo utilizadas três temperaturas nominais de acabamento: 900°C, 830°C e 750°C.

Entre os dados de processo então coletados encontravam-se abertura entre cilindros, temperatura do esboço na entrada e saída do laminador, intervalo de tempo entre passes, velocidade periférica dos cilindros e carga de laminação. Os valores de tensão de escoamento média foram calculados conforme a metodologia proposta por Maccagno e outros [3] e que também foi adotada por Pereira [5], a qual se baseia no modelo inverso de Sims. Os valores assim calculados foram corrigidos conforme a equação (1) [6]. Foram então gerados gráficos de tensão de escoamento média em função do inverso da temperatura absoluta, os quais foram então analisados para se determinar os valores de T_{nr} , Ar_3 e Ar_1 , quando possível.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

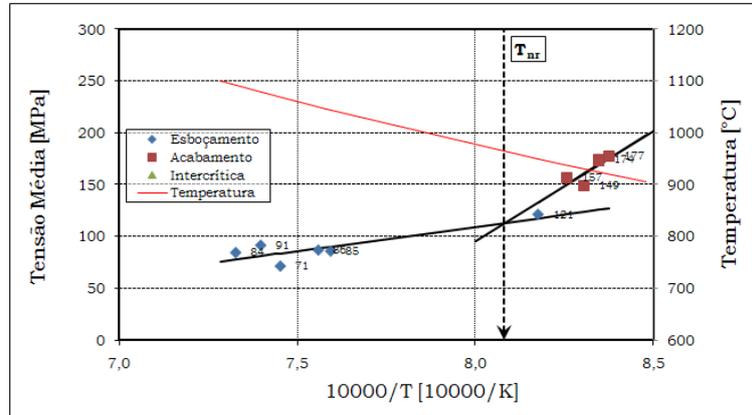
A figura 3 mostra a evolução dos valores de tensão de escoamento média em função do inverso da temperatura absoluta ao longo de cada esquema de passe monitorado, bem como o valor de T_{nr} determinado em cada caso. Em tese ocorreu laminação intercrítica parcial em apenas um caso, quando a temperatura de acabamento (750°C) foi menor do que a Ar_3 (786°C), mas a quantidade de dados foi insuficiente para a determinação dessa última temperatura usando os dados industriais.

Vale notar que nem todos os pontos experimentais puderam ser plotados nesses gráficos, particularmente no caso dos primeiros passes de esboçamento, uma vez que os valores de temperatura eram inexistentes ou errôneos em função dos problemas já mencionados na Introdução deste trabalho. Ressalte-se ainda que o primeiro ponto da fase de acabamento foi incluído na reta correspondente à fase de

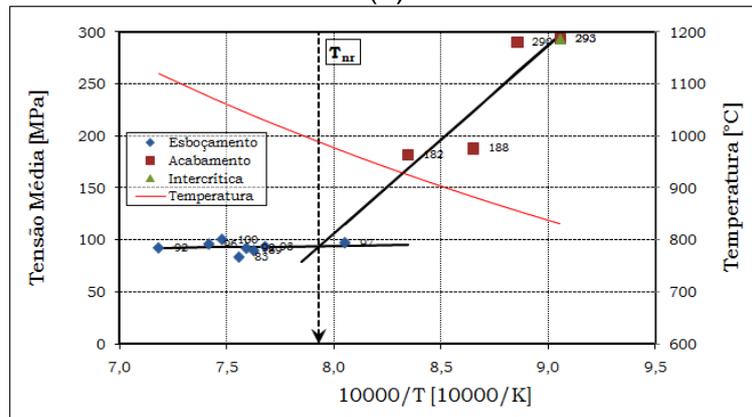
* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



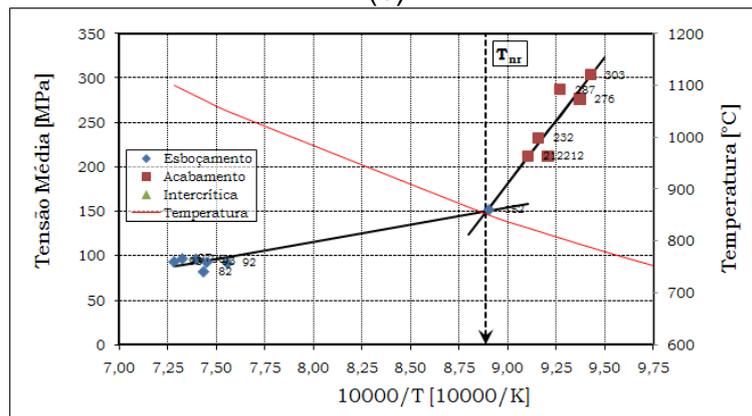
esboçamento, já que nesse ponto do processo o material ainda se encontra totalmente livre de encruamento. De fato, os resultados obtidos a partir de um modelo de evolução microestrutural [10] indicam os esboços não só passaram por recristalização total durante a fase de espera, como também sofreram algum crescimento de grão, conforme mostrado na figura 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 2: Evoluções da tensão de escoamento média em função do inverso da temperatura absoluta relativas às laminações controladas analisadas neste trabalho, sob temperaturas de acabamento iguais a (a) 900°C; (b) 830°C e (c) 750°C.

Os resultados da tabela 1 indicam que o valor da T_{nr} calculado a partir dos dados industriais ficou relativamente próximo do calculado pela fórmula de Boratto (883°C) apenas para o caso em que a temperatura de acabamento foi igual a 750°C –

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



852°C, correspondendo a uma diferença de 3,5%. Nos outros dois casos os valores foram superiores ao calculado por Boratto e as diferenças observadas foram bem mais significativas, chegando num dos casos a superar os 100°C. E, o que é mais estranho ainda, os valores de T_{nr} correspondentes às temperaturas de acabamento de 900°C e 830°C foram superiores ao calculado pela fórmula de Boratto. Na prática, os valores experimentalmente obtidos de T_{nr} foram aproximadamente proporcionais às temperaturas de início da fase de acabamento. Isso decorreu da condição geométrica das retas traçadas no gráfico: enquanto que a reta correspondente à fase de esboçamento apresenta declividade muito pequena, a reta da fase de acabamento é bem mais inclinada, fazendo com que a intersecção entre as duas ocorra à pequena distância da temperatura em que foi iniciada a fase de acabamento.

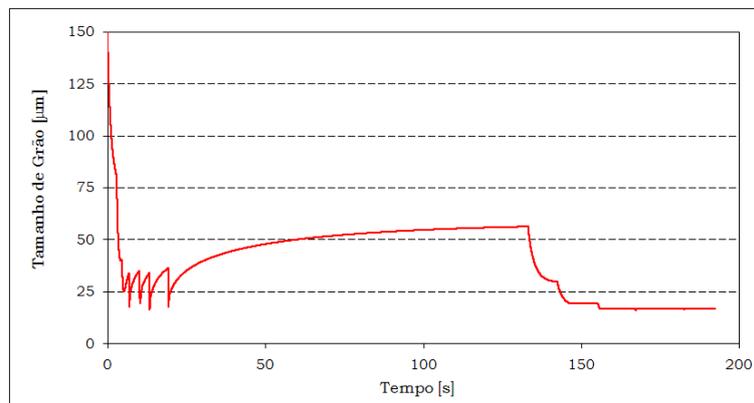


Figura 3: Evolução calculada do tamanho de grão austenítico correspondente ao processo de laminação controlada com temperatura de acabamento igual a 830°C e que apresentou a menor temperatura correspondente ao final da fase de esboçamento: 1029°C.

Tabela 1: Dados das laminações controladas efetuadas com o aço estudado neste trabalho: temperatura de acabamento, temperatura do último passe da fase de esboçamento, temperatura do primeiro passe da fase de acabamento e T_{nr} calculada conforme os gráficos da figura 2.

T_{Acab} [°C]	T_{FimEsb} [°C]	$T_{InicAcab}$ [°C]	T_{nr} [°C]
900	1044	946	964
830	1029	976	988
750	1050	850	852

Essa situação parece indicar que a significativa dependência do valor de T_{nr} em função da temperatura de início da fase de acabamento decorre do amplo intervalo de temperaturas correspondente à fase de espera. Uma vez que não há laminação durante essa fase do processo, naturalmente não existem os correspondentes dados de tensão de escoamento média a serem incluídos na análise. Tal fato, sem dúvida, afeta a determinação da T_{nr} , já que esta se situa justamente nessa faixa de temperaturas onde ocorre a carência de dados de tensão de escoamento média.

Por esse motivo, é sintomático que o esquema de laminação controlada mostrado no trabalho de Maccagno e outros [3] não possuía fase de espera – e, portanto, não ficou sujeito a essa carência de dados. Por outro lado, tal esquema não é conveniente do ponto de vista tecnológico, já que a laminação durante a fase de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



espera, onde a recristalização da austenita é incipiente, prejudica a homogeneidade microestrutural e pode afetar a tenacidade do material. Por sua vez, Bodnar e outros [4] preferiram adotar laminação laboratorial sem período de espera para determinar a T_{nr} , evitando assim obter produtos com grandes dimensões e tenacidade potencialmente comprometida.

Já no estudo de Pereira [5] sobre a laminação controlada de chapas grossas para tubos API X70, feitas com aço microligado ao NbTiV, os valores calculados de T_{nr} e Ar_3 a partir das equações de Boratto [1] e Ouchi [9] foram iguais a, respectivamente, 1036°C e 769°C. Por sua vez, os valores médios de T_{nr} e Ar_3 determinados a partir dos dados industriais de laminação foram iguais a, respectivamente, 861°C e 780°C. Enquanto que os valores de Ar_3 obtidos pelas duas abordagens apresentaram boa concordância, em função da pequena diferença de 11°C (1,4%) entre eles, a discrepância entre os valores de T_{nr} foi muito maior, atingindo 175°C. A razão para essa grande diferença aparentemente foi a mesma constatada no presente trabalho: o intervalo de temperaturas correspondente à fase da espera na laminação das chapas de aço ao NbTiV foi da ordem de 150°C a 220°C, fazendo com que a temperatura T_{nr} se aproximasse indevidamente da temperatura em que foi iniciada a fase de acabamento da laminação controlada. Mais uma vez isso ocorreu devido à carência de dados num ponto crucial do processo.

Outro aspecto a ser considerado é que na laminação industrial a evolução da fração de recristalização da austenita entre passes não é tão bem-comportada quanto no ensaio original proposto por Boratto [1], onde todos os parâmetros de cada deformação são idênticos, exceto a temperatura, que cai continuamente. Dessa forma, tem-se desde recristalização plena entre passes da austenita durante o esboçamento até recristalização nula durante o acabamento, passando pela faixa intermediária onde ela é incipiente. Já o esquema de passes na laminação industrial de chapas grossas é definido de forma a acomodar várias restrições tecnológicas, o que muitas vezes impõe condições de processo não-ideais do ponto de vista metalúrgico. Por exemplo, geralmente os primeiros passes de esboçamento na laminação industrial de chapas grossas são leves demais, fato que ocorre em função da restrição às condições de mordida do esboço pelos cilindros ou pela execução do alargamento do esboço, ocasião em que sua largura se torna muito grande.

A figura 4 mostra as frações de recristalização entre passes calculadas pelo modelo matemático de evolução microestrutural já citado [10] para as três condições de laminação controlada aqui analisadas. Como se pode observar, nem sempre houve recristalização total entre passes durante toda a fase de esboçamento, pelas razões já citadas. E, em termos da fase de acabamento, nem sempre ocorreu supressão total da recristalização entre passes nos casos aqui analisados. A exceção foi o caso em que a temperatura de acabamento foi igual a 750°C, onde a precipitação de NbCN sempre ocorreu antes do início da recristalização. Para a temperatura de acabamento de 830°C a recristalização só foi suprimida pela precipitação de NbCN nos dois últimos passes de acabamento, enquanto que ela ocorreu de forma parcial para os demais. Finalmente, não se constatou supressão total da recristalização da austenita em nenhum passe da fase de acabamento no caso da temperatura de acabamento de 900°C. Essas evoluções atípicas de cinética de recristalização entre passes certamente se refletem no valor da tensão de escoamento média, podendo

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



afetar a evolução desse parâmetro ao longo da laminação e a precisão dos valores de T_{nr} e Ar_3 que são calculados a partir dela.

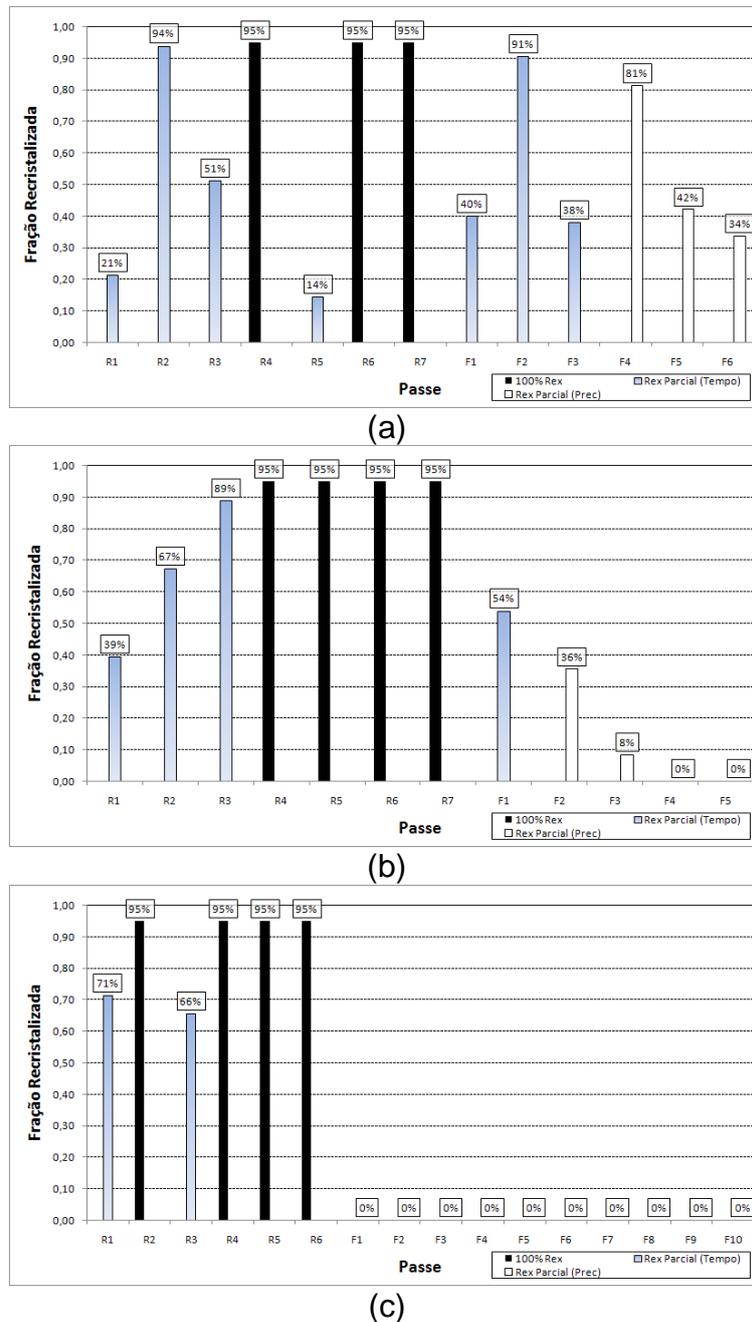


Figura 4: Evolução calculada da cinética de recristalização entre passes relativas às laminações controladas analisadas neste trabalho, sob temperaturas de acabamento iguais a (a) 900°C; (b) 830°C e (c) 750°C.

4 CONCLUSÃO

Seria muito oportuno e prático determinar as temperaturas críticas (T_{nr} , Ar_3 e Ar_1) para o processo de laminação controlada de aços microligados diretamente dos dados obtidos rotineiramente no processo industrial. Contudo, a necessidade de se impor um período de espera entre as fases de esboçamento e acabamento desse processo obviamente impede a geração de dados numa faixa crucial de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



temperaturas para a determinação da T_{nr} . Isso praticamente inviabiliza a determinação precisa desse parâmetro através dessa abordagem. Naturalmente seria possível efetuar a laminação controlada sem a fase de espera, o que melhoraria a precisão dos valores de T_{nr} determinados a partir dos dados industriais, mas a tenacidade do produto poderia ficar comprometida em função da pior homogeneidade microestrutural. A metodologia aqui descrita para determinação de T_{nr} poderia eventualmente ser aplicada a um laminador laboratorial, mas os experimentos seriam bem mais trabalhosos e os resultados menos precisos em relação à abordagem original via ensaios de torção.

Já a determinação de Ar_3 e Ar_1 parece ser conseguida sem maiores problemas. Neste caso, naturalmente, devem ser alcançadas as faixas de temperatura onde elas se encontram. Além disso, é recomendável que o laminador disponha de um sistema de coleta de dados que determine, com a máxima consistência possível, a espessura e temperatura do esboço ao longo de todo o esquema de passes, bem como a conversão adequada da carga de laminação em tensão de escoamento média.

REFERÊNCIAS

- 1 Boratto F, Barbosa R, Yue S, Jonas JJ Effect of Chemical Composition on Critical Temperatures of Microalloyed Steels. In: Iron and Steel Institute of Japan. Proceedings of the Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals - THERMEC '88; 1988. Tokyo, Japan. ISIJ, 383-390.
- 2 Vervynckt S, Verkeben K, Lopez B, Jonas JJ. Modern HSLA Steels and Role of Non-Recrystallisation Temperature. International Materials Reviews. 2012; 57(4):187-207.
- 3 Maccagno TM, Jonas JJ, Yue S, McCrady BJ, Slobodian R, Deeks D. Determination of Recrystallization Stop Temperature from Rolling Mill Logs and Comparison with Laboratory Simulation Results. ISIJ International. 1994; 34(11):917-922.
- 4 Bodnar RL, Adebajo RO, Hansen SS. Determination of T_R and Ar_3 Temperatures from Roll Force Measurements. In: Iron and Steel Society. Proceedings of the 37th Mechanical Working and Steel Processing; 1996. Ontario, Canada. Pittsburgh, ISS, 743-757.
- 5 Plaut RL, Gorni AA, Nakashima, JT, Pereira MM, Silveira JHD. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço API X70 Produzido por Laminação Controlada. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2009, 6(1):7-12.
- 6 Minami K, Siciliano Jr F, Maccagno TM, Jonas JJ. Mathematical Modeling of Mean Flow Stress During the Hot Strip Rolling of Nb Steels. ISIJ International. 1996; 36(12): 1507-1515.
- 7 Gorni AA, Silva MRS. Metallurgically Consistent Determination of Steel Hot Strength Using Process Data from Hot Strip Mill Rolling. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Proceedings of the 50th Rolling Seminar – Processes, Rolled and Coated Products; 2013. Ouro Preto, Brazil. São Paulo, ABM, 8 p.
- 8 Gorni AA, Cavalcanti CG, Reis JSS, Silveira JHD. Produção de Chapas Grossas Normalizadas Diretamente do Calor de Laminação. In: Associação Brasileira de

* Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.



Metalurgia e Materiais. Anais do 34º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos; 1997. Belo Horizonte, Brasil. São Paulo, ABM, 479-497.

- 9 Ouchi C, Okita, T. The Effect of Hot Rolling Condition and Chemical Composition on the Onset Temperature of Gamma-Alpha Transformation After Hot Rolling. Transactions of the ISIJ. 1982; 22(3):214-222.
- 10 Gorni AA. Cálculo da Temperatura de Não-Recristalização para Aços Microligados, em Função da Interação entre a Precipitação e Recristalização da Austenita. Revista Escola de Minas. 1999; 52(1): 21-25.

* *Contribuição técnica ao 51º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 28 a 31 de outubro de 2014, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.*