

# MODELAMENTO DA CINÉTICA DE RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA DE AÇOS LIVRES DE INTERSTICIAIS E SUA APLICAÇÃO AO CASO DA LAMINAÇÃO A QUENTE<sup>1</sup>

Roney Eduardo Lino<sup>2</sup>  
Ronaldo Barbosa<sup>3</sup>

## Resumo

A recristalização dinâmica (RXD), que ocorre durante a laminação a quente, é um mecanismo metalúrgico que contribui consideravelmente para o refino de grão. Análise de derivadas primeira e segunda de curvas tensão-deformação mostra claras evidências do início e da taxa máxima de RXD, podendo a mesma ser acompanhada durante a deformação. Esse trabalho tem por objetivo investigar a cinética de RXD de aços livres de intersticiais durante a conformação a quente e sua participação no processo de laminação. Resultados indicam que em condições de laminação de desbaste, em condições de processo similares às da linha industrial, uma considerável fração recristalizada pode ser obtida em cada passe de laminação. Já na laminação de acabamento, em condições típicas, as frações recristalizadas não excedem a 3%. Isso ocorre, pois, mesmo com o acúmulo de passes durante o processo de laminação, a queda da temperatura e o aumento da taxa de deformação dificultam a cinética RXD.

**Palavras-chave:** Aço livre de intersticiais; Recristalização dinâmica; Laminação a quente; Ensaio de torção a quente.

## MODELLING OF DYNAMIC RECRYSTALLISATION KINETICS OF IF STEELS AND ITS APPLICATION IN HOT ROLLING PROCESS

### Abstract

Dynamic recrystallization (DRX) during hot rolling it is an important metallurgical mechanism to obtain grain refinement. First and second derivate analysis of stress strain curves shows the critical strains for initiation of DRX and the point of maximum softening allowing the kinetics to be followed fully. The aim of this work is to investigate the kinetics of DRX of interstitials free steels during hot deformation and its participation in hot rolling process. Results show that in roughing conditions, a notable fraction recrystallised can be obtained on each step. However in the finishing rolling, on typical conditions, the fractions recrystallised do not exceed 3%. This seems to be so because the decrease of temperature and the increase of strain rate at the finish stages make difficult the kinetics of DRX to occur.

**Key words:** Interstitial free steel; Recrystallization; Hot rolling; Hot torsion.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM, Técnico em Instrumentação, Estudante do Curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG

<sup>3</sup> Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Mestre, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

## 1 INTRODUÇÃO

Recristalização dinâmica é um processo de amaciamento que ocorre durante deformação de materiais com baixas energias de falha de empilhamento, tais como a austenita. Uma vez disparada, a recristalização dinâmica ocorre através de reação de nucleação e crescimento, de modo similar à recristalização estática, mais conhecida. A importância tecnológica da recristalização dinâmica se revela no refino de grão da austenita e, por consequência, no refino de grão ferrítico, com amplamente demonstrado em simulações de processos de laminação de tubos sem costura<sup>(1)</sup> e de tiras a quente<sup>(2)</sup>. Recristalização dinâmica também determina os valores de carga de laminação e quedas súbitas nessas cargas de cadeira a cadeira, principalmente no caso de tiras a quente têm sido atribuídas à ocorrência desse tipo de amaciamento.<sup>(2)</sup>

Não obstante sua clara importância tecnológica, o estudo da cinética de recristalização dinâmica tem iludido esforços dos melhores pesquisadores por razões conhecidas. Primeiramente, torna-se sempre difícil a preservação de microestruturas decorrentes desse tipo de recristalização através de resfriamentos rápidos, seja porque essas microestruturas se transformam no resfriamento, seja porque os tempos requeridos para resfriamento, por mais curtos, tendem a permitir alguma transformação antes que a microestrutura seja de fato revelada. Dessa forma, até os dias de hoje, uma medição da cinética de recristalização por vias indiretas, através de mudanças na taxa de encruamento, parece ser o método mais simples e promissor.

Nesse aspecto, avanços foram introduzidos por Ryan e McQueen<sup>(3)</sup> quando propuseram uma maneira de se medir o valor de uma deformação crítica necessária para se dar início ao processo de amaciamento por recristalização dinâmica. Poliak e Jonas<sup>(4)</sup> mostraram claramente que essa deformação poderia ser medida mesmo nos casos onde um pico de tensões não estivesse presente. Mais recentemente, Stewart et al.<sup>(5)</sup> mostraram que não só essa deformação crítica podia ser medida mas também a deformação onde ocorre máximo amaciamento pós-pico poderia ser medida e que, além disso, com essas medições seria possível acompanhar quantitativamente a cinética de recristalização dinâmica.

O presente trabalho aplica a metodologia descrita acima para medir a cinética de recristalização dinâmica ocorrendo em um aço livre de intersticiais com uma estabilização de Ti.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química utilizada no presente trabalho foi de aço livre de Intersticiais estabilizado com adição de Ti, com teores de C e N da ordem de ppm. Detalhes da composição são dados abaixo, conforme se vê na Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição química da liga utilizada na presente pesquisa. Todos os números são em percentagem do peso, exceto onde mencionado explicitamente.

C (ppm)	Mn	Si	P	S	Al	Ti	N (ppm)
28	0,15	0,01	0,013	0,009	0,058	0,083	38

A liga escolhida, na verdade, é um aço que possui baixíssimo teor de C com adição de 0,083% de Ti. Este se encontra aqui adicionado com o propósito de se reter crescimento de grão da austenita no re-aquecimento e retirar C e N de solução

sólida no resfriamento durante o processo de conformação. Como se sabe,<sup>(6)</sup> o Ti forma precipitados de N e C, retirando esses elementos de solução sólida.

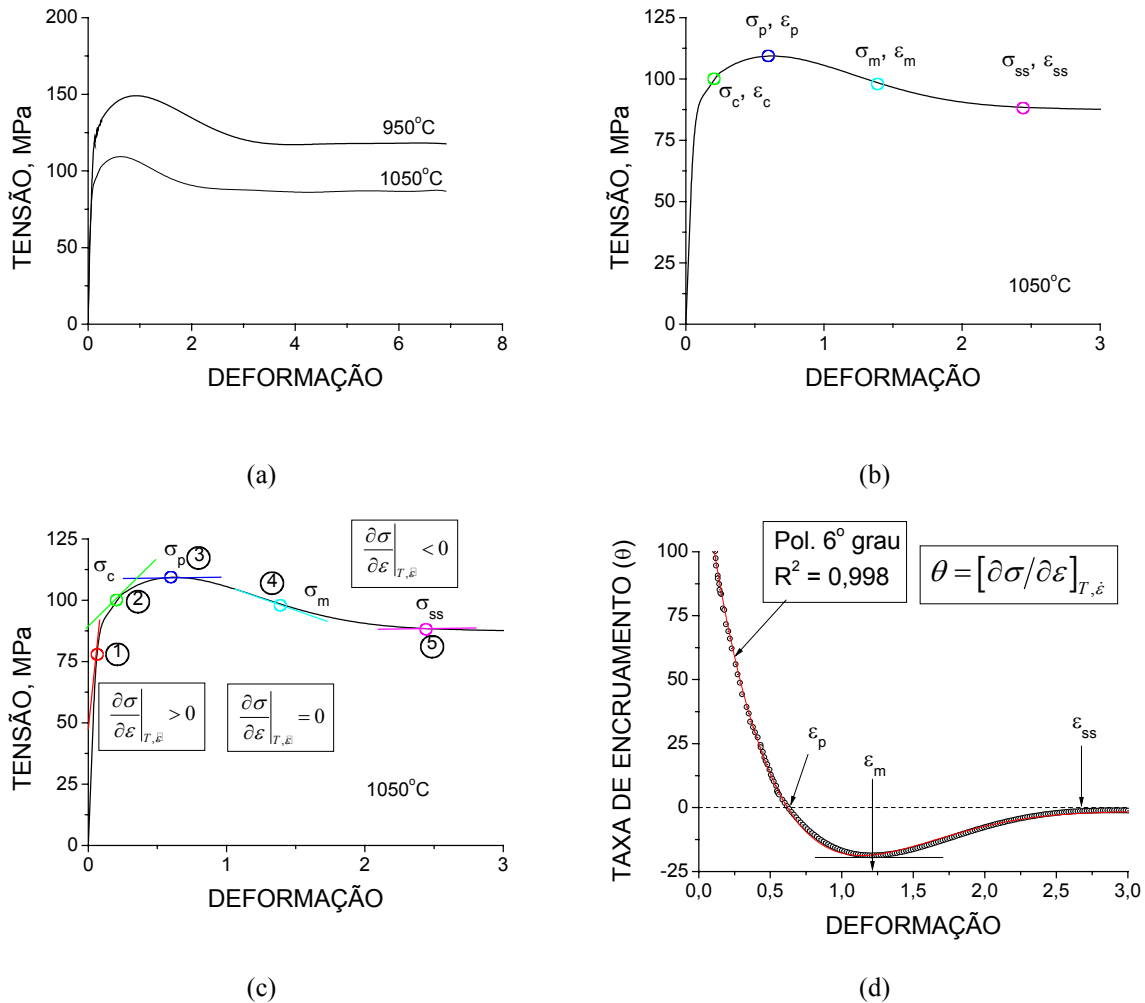
O estudo da cinética de recristalização dinâmica foi conduzido fazendo-se uso de ensaios mecânicos de torção. Esta técnica foi utilizada porque permite aplicação de deformações elevadas sem a ruptura, como na tração, ou sem barrilamento, como na compressão. Esta característica foi particularmente importante aqui porque se pretendeu acompanhar neste trabalho a cinética de recristalização dinâmica na sua totalidade e, como será visto, deformações equivalentes da ordem de 4 foram necessárias para garantir completa recristalização durante processo de deformação. Amostras com formato cilíndrico, medindo na sua parte útil 16 mm de comprimento e 6,2 mm de diâmetro foram usadas nos ensaios de torção a quente. Estes consistiram, primeiramente, do aquecimento das amostras até uma temperatura de encharque de 1.200°C, permanecendo a amostra nesta temperatura pelo período de 15 min. As amostras foram então resfriadas à taxa 1°C/s até que a temperatura de ensaio fosse atingida, sendo essas 1.100°C, 1.050°C, 1.000°C e 950°C. Os corpos de prova foram então mantidos à temperatura de ensaio por um período de 180 s com o propósito de se homogeneizar a temperatura interna e retirar qualquer gradiente advindo do resfriamento. Os experimentos foram então conduzidos deformando-se essas amostras à taxa de deformação constante de 0,1 s<sup>-1</sup>, 1 s<sup>-1</sup>, 3 s<sup>-1</sup> e 10 s<sup>-1</sup>.

Os ensaios foram realizados em máquina de ensaios MTS equipada com uma unidade de torção com torque máximo de 250 Nm. O equipamento é comandado por uma interface digital e os dados de torque e posição angular são adquiridos durante ensaio e armazenados para pós-processamento, sendo então convertidos em valores de tensão e de deformação equivalente, usando-se o procedimento de Fields e Backofen.<sup>(7)</sup> As amostras ficaram, durante todo o ensaio, imersas em gás Argônio com o propósito de se evitar oxidação superficial bem como decarbonetação e desnitretação.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **Forma das curvas tensão-deformação e avaliação de pontos críticos**

A Figura 1a mostra resultados obtidos dos ensaios realizados. Nota-se que as curvas apresentam formatos similares, isto é, todas mostram um pico de tensões seguido por amaciamento dinâmico com queda de tensões e por um estado “estacionário” em que essas tensões permanecem independentes da deformação.



**Figura 1.** a) Curvas tensão-deformação para amostras ensaiadas, b e c) Pontos críticos de curva tensão-deformação necessários à descrição da cinética de recristalização dinâmica, d) descrição da metodologia utilizada na medição desses pontos críticos.

As Figuras 1b e 1c mostram os pontos críticos relevantes à descrição da cinética de recristalização dinâmica. Inicialmente a tensão cresce com a deformação até que um ponto crítico para início de recristalização dinâmica é atingido em  $\epsilon_c$ . Até este ponto, a taxa de encruamento decresce em função da ocorrência de recuperação dinâmica apenas. A partir dessa deformação crítica, entretanto, a taxa de encruamento acelera seu decréscimo atingindo um valor nulo na deformação de pico, conforme se vê na Figura 1c. Deformação após  $\epsilon_p$  leva a decréscimo da tensão até que um estado estacionário de tensões é atingido em  $\epsilon_{ss}$ . A partir desse ponto, o nível da tensão não mais depende da deformação aplicada.

O amaciamento por recristalização dinâmica, como se vê, se inicia em  $\epsilon_c$  e se estende até 100% de amaciamento quando  $\epsilon_{ss}$  é atingido. A recristalização dinâmica, como característica de reações de nucleação e crescimento, apresenta um período de taxas lentas de transformação no início e no final de transformação. A taxa máxima de transformação se dá então em  $\epsilon_m$ , que pode ser obtido conforme se mostra na Figura 1d. Uma vez obtidos essas quatro quantidades, quais sejam,  $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_p$ ,  $\epsilon_m$  e  $\epsilon_{ss}$ , a cinética de recristalização pode ser calculada, como será visto.

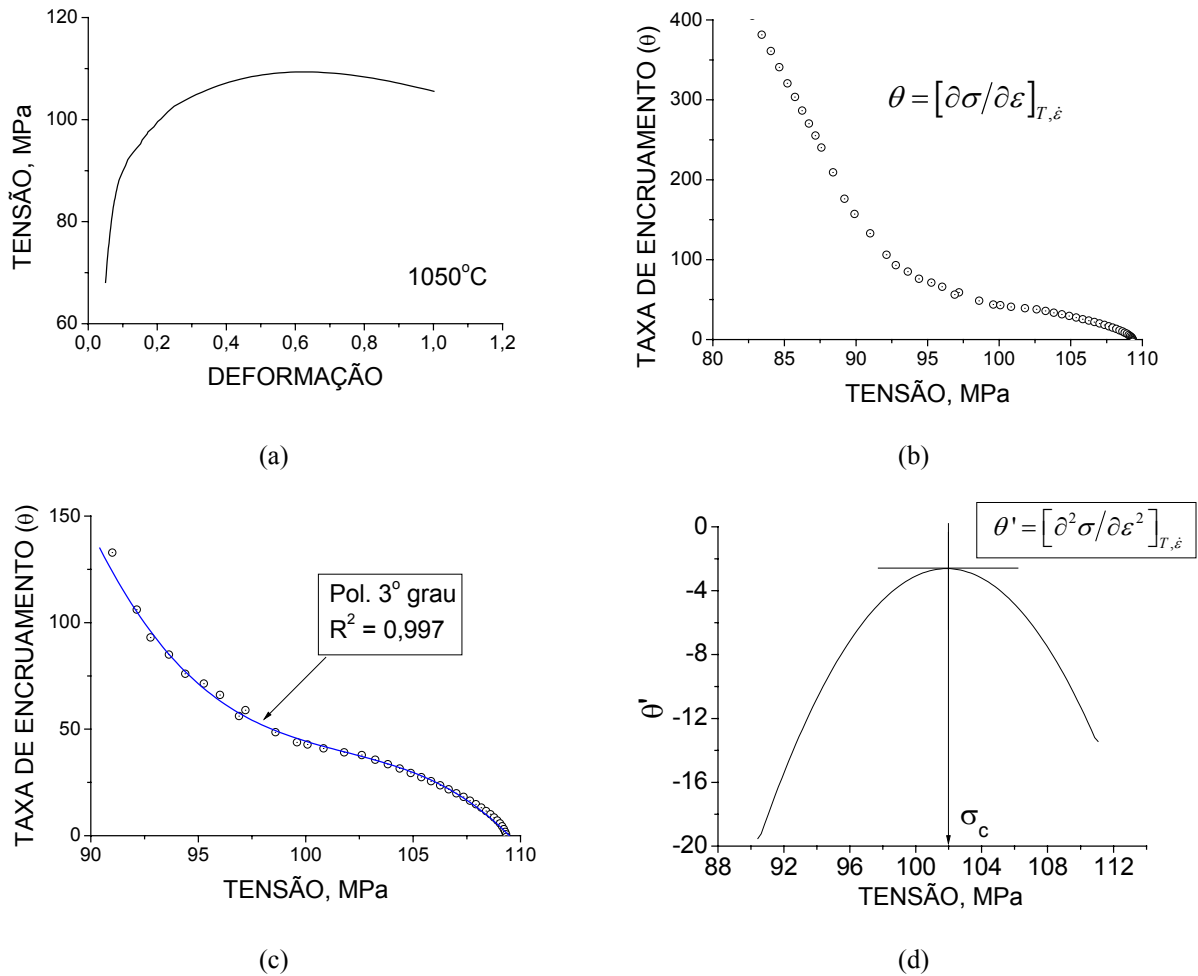
## Medição da deformação crítica para início de recristalização dinâmica

De todas as deformações recém listadas,  $\varepsilon_c$ , a deformação crítica para início de recristalização dinâmica é a de mais difícil medição. A Figura 2 mostra como essa medição pode ser feita diretamente de curvas tensão-deformação.

A Figura 2a mostra uma ampliação da curva tensão-deformação na área de interesse próxima de onde se inicia a recristalização dinâmica. Sabe-se que o valor de  $\varepsilon_c$  se encontra entre 50% e 80% de  $\varepsilon_p$ , sendo que a deformação de pico não é difícil de se obter. Neste caso,  $\varepsilon_p \sim 0,60$ . Logo  $\varepsilon_c$  estará entre 0,30 e 0,48. Traça-se então um gráfico conforme se mostra na Figura 2b, isto é, da taxa de encruamento versus a tensão aplicada durante a deformação. A taxa de encruamento reflete a maneira como deslocamentos são inseridas na subestrutura através da deformação e a maneira como essas deslocamentos são eliminadas dessa mesma subestrutura. Inicialmente, essa retirada se dá pelo mecanismo de recuperação dinâmica, isto é, pela eliminação de deslocamentos em eventos individuais, sem movimentos de contornos de novos grãos. Esses mecanismos provocam uma variação da curva taxa de encruamento versus tensão como se mostra na Figura 2b até um valor de tensão próximo de 100 MPa. A partir daí, essa taxa se eleva negativamente atingindo um valor nulo a tensões pouco acima de 100 MPa. Essa “aceleração” na taxa de encruamento é causada pela mudança no mecanismo de retirada de deslocamentos da subestrutura devido ao início da eliminação dessas em eventos coletivos, ou seja, pelo movimento de contornos de novos grãos.

O ponto exato em que essa mudança ocorre não é claramente visível da Figura 2b e por isso faz-se necessário primeiro ampliá-la na região de interesse, conforme se mostra na Figura 2c, e depois derivar essa curva, mais uma vez, em função da deformação, conforme se mostra na Figura 2d. O valor da deformação crítica para início da recristalização dinâmica pode ser obtido do máximo da curva da Figura 2d.

Uma vez medidas as deformações pertinentes ao processo de recristalização dinâmica diretamente de curvas tensão-deformação, a cinética de recristalização pode ser calculada mediante uso da equação de Avrami, conforme se mostra abaixo.



**Figura 2.** a) ampliação de curva tensão deformação na região de início de recristalização dinâmica, b) Dependência da taxa de encruamento com a tensão durante deformação na região ampliada, c) Ajuste polinomial de parte da curva mostrada em (b) com a finalidade de se medir o valor de  $\varepsilon_c$ , d) Medição de  $\varepsilon_c$  a partir de gráfico da derivada da taxa de encruamento em função da tensão aplicada.

### Cinética de recristalização dinâmica

A cinética de recristalização dinâmica pode ser acompanhada a partir da Eq. de Avrami modificada, ou seja,

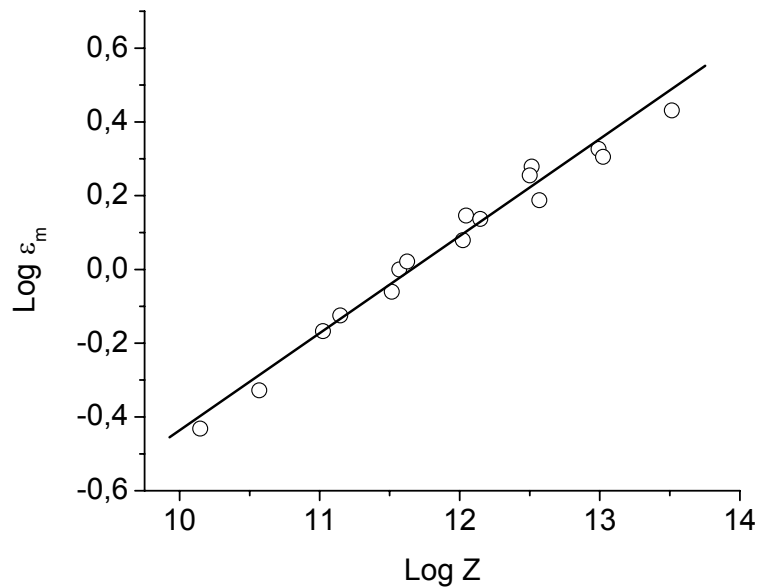
$$X = 1 - \exp \left[ -0,693 \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_m - \varepsilon_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Aqui, as deformações são as definidas anteriormente e, uma vez conhecidos esses valores a dada temperatura e taxa de deformação, a cinética de recristalização pode ser calculada.

Segundo *Jonas et al.*,<sup>(5)</sup> uma aproximação razoável poderia ser feita considerando a deformação onde ocorre a taxa máxima de amaciamento  $\varepsilon_m$  como equivalente à deformação para que ocorra 50% de recristalização dinâmica. Com isso,  $\varepsilon_m$  em uma dada temperatura e taxa de deformação poderia ser estimada como uma função de Z, o parâmetro de Zener-Hollomon, da seguinte forma:

$$\varepsilon_m = A_m Z^{q_m} = A_m \left[ \dot{\varepsilon} \exp(Q_{def} / RT) \right]^{q_m} \quad (2)$$

Onde  $A_m$  é uma constante,  $Q_{def}$  é a energia de ativação associada à deformação a quente,  $R$  a constante dos gases,  $T$  a temperatura absoluta e  $q_m$  o expoente de Zener-Hollomon. Em trabalhos recentemente publicados,<sup>(9)</sup> os valores de  $Q_{def}$  foram calculados a partir das tensões de pico das curvas tensão-deformação versus o inverso da temperatura absoluta de teste, sendo  $272 \text{ kJ mol}^{-1}$  para a liga utilizada. A Figura 3 mostra o gráfico de  $\log \varepsilon_m$  em função de  $\log Z$ . Percebe-se que a regressão linear representa bem os pontos experimentais. Os valores encontrados para  $A_m$  e  $q_m$  para essa liga foram de  $9,4 \times 10^{-4} \text{ s}$  e  $0,26$  respectivamente.



**Figura 3.** Valores experimentais e regressão linear mostrando a relação  $\log \varepsilon_m$  em função de  $\log Z$ .

Da mesma forma, as deformações  $\varepsilon_c$  e  $\varepsilon_p$  podem ser obtidas em função de  $Z$  utilizando equação 2. Dessa forma, conhecida a energia de ativação da liga, a cinética de DRX calculada a partir da equação de Avrami pode ser obtida em função das condições de deformação, isto é, temperatura e taxa de deformação.

### Aplicação à laminação a quente

Uma possível utilização das equações que descrevem a cinética de recristalização dinâmica em função de  $Z$  é no caso da laminação de tiras a quente. Na etapa de desbaste, por exemplo, se uma placa é reduzida de uma espessura de 200 mm para 20 mm de esboço, tem-se uma deformação equivalente total de 2,66. Se se considerar uma temperatura média de deformação de  $1.200^\circ\text{C}$  no primeiro passe de desbaste, uma taxa de deformação de  $1 \text{ s}^{-1}$  e ainda que o processo possa ser realizado em 5 passes com deformações iguais de 0,53 a recristalização dinâmica total em cada passe seria de aproximadamente 68%, caso houvesse completa recristalização estática entre esses passes no desbaste.

Uma outra possível aplicação das equações de cinética de recristalização dinâmica seria já na etapa de acabamento de tiras a quente. A Tabela 2 mostra uma seqüência de passes utilizada por *Jonas et al.*<sup>(8)</sup> na etapa de acabamento:

**Tabela 2:** Sequência típica da laminação de tiras a quente no trem de laminação acabador.

Passo	T, °C	$\dot{\epsilon}$ , s <sup>-1</sup>	$\epsilon$	$\epsilon$ acumulada	X <sub>din</sub>
1	1023	13,3	0,6	0,6	0,00
2	992	22,2	0,5	1,1	0,02
3	958	33,1	0,41	1,51	0,02
4	943	45,6	0,33	1,84	0,03
5	931	65,2	0,3	2,14	0,03
6	916	74,8	0,22	2,36	0,03
7	900	74,7	0,13	2,49	0,03

A laminação é realizada em 7 passes com temperaturas e deformações decrescentes nos passes. As taxas de deformação, por outro lado, são crescentes variando quase uma ordem de grandeza do início ao final da laminação. Os símbolos significam  $\epsilon$ , a deformação verdadeira no passe,  $\dot{\epsilon}$ , a taxa de deformação no passe e X<sub>din</sub> a fração recristalizada dinamicamente.

Os valores de deformação, taxa de deformação e temperatura são similares aos utilizados na linha industrial. Como as temperaturas de laminação são relativamente baixas, considerando desprezível a fração recristalizada estaticamente entre os passes, supôs-se que esta seria acumulada passe a passe, ou seja, igual a deformação naquele passe somada às deformações aplicadas nos passes anteriores. Na última coluna da tabela pode-se ver que os valores das frações recristalizadas dinamicamente, no caso deste aço, não excederiam a 3%. Isso ocorre pois, mesmo com o acúmulo de passes durante o processo de laminação, a queda da temperatura e o aumento da taxa de deformação dificulta a cinética de recristalização dinâmica para essa sequência de passes.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o caso do amaciamento dinâmico que ocorre por recristalização quando deformação aplicada excede um valor crítico. A liga utilizada foi um aço livre de Intesticiais com microadição de Ti. Algumas conclusões podem ser retiradas deste estudo. São elas:

- a) A cinética de recristalização dinâmica pode ser avaliada diretamente de curvas tensão-deformação, como se demonstra no estudo;
- b) Na laminação de desbaste, em condições de processo similares às da linha industrial, uma considerável fração de recristalização dinâmica pode ser obtida em cada passe de laminação;
- c) Na laminação de acabamento, em condições típicas, as frações recristalizadas não excedem a 3%. Isso ocorre pois, mesmo com o acúmulo de passes durante o processo de laminação, a queda da temperatura e o aumento da taxa de deformação dificulta a cinética de recristalização dinâmica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro e este projeto.



## REFERÊNCIAS

- 1 L.N. PUSSEGODA E J.J. JONAS, Comparison of dynamic recrystallization and conventional controlled rolling schedules by laboratory simulation. **ISIJ International**, v31, p. 278-288, 1991
- 2 F. SICILIANO JR, K. MINAMI, T.M. MACCAGNO, J.J. JONAS. Mathematical modeling of the mean flow stress and grain size during the hot strip rolling of C-Mn steels. **ISIJ International**, v36, n12, p. 1500-1506, 1998
- 3 H.J. McQUEEN E N.D. RYAN, Constitutive analysis in hot working. **Materials Science and Engineering A**, v322, p. 43-63, 2002
- 4 J.J. JONAS E E.I. POLIAK, The critical strain for dynamic recrystallization in rolling mills. **Materials Science Forum**, v426-432, p. 57-66, 2003
- 5 G.R. STEWART, A.M. ELWAZRI, S. YUE E J.J. JONAS, Modelling of dynamic recrystallization kinetics in austenitic stainless and hypereutectoid steels. **Materials Science and Technology**, v22, n5, p. 519-524, 2006
- 6 A. NAJAFI-ZADEH, S. YUE e J.J. JONAS. Influence of hot strip rolling parameters on austenite recrystallization in interstitial free steels, **ISIJ International**, v32, n2, p. 213-221, 1992
- 7 W.A. BACKOFEN E D.S. FIELDS, Determination of strain-hardening characteristics by torsion testing. **American Society for Testing and Materials**, v57, p1259-1272, 1957
- 8 K. MINAMI, F. SICILIANO JR, T.M. MACCAGNO, J.J. JONAS. Mathematical modeling of the mean flow stress during the hot strip rolling of Nb steels. **ISIJ International**, v36, n12, p. 1507-1515, 1996
- 9 R. LINO, R. BARBOSA. Prediction of the activation energy for hot deformation of interstitials free austenite. **15th Rolling Conference of IAS**. Buenos Aires – Argentina. 2004