

MODELAGEM MATEMÁTICA DA TENSÃO MÉDIA EQUIVALENTE (TME) DURANTE A LAMINAÇÃO A QUENTE DO AÇO ASTM F - 1586

Resumo: A correlação entre os mecanismos de encruamento e recristalização do aço inoxidável austenítico alto nitrogênio ASTM F-1586 foi estudado por meio de testes experimentais de torção a quente com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo, simulando um processo de laminação a quente industrial controlado. Inicialmente os corpos de prova foram submetidos a 17 passes de deformações de 0,20 e 0,30, respectivamente, com taxa de deformação de $1,0 \text{ s}^{-1}$, num intervalo de temperatura entre 900 e 1250 °C, com tempo entre passe variando entre 5,0, 10, 20, 40 e 80 s, condições similares às do processamento industrial. Os resultados mostram que há uma relação entre os níveis de tensão média equivalente (TME) e as condições de processamento, tais como temperatura, deformação, taxa de deformação e tempo entre passe, além do nível de encruamento com o grau de acúmulo de tensão ($\Delta\sigma$) que inibe a recristalização e promove intensa recuperação no material. Neste trabalho uso-se os programas “Lab Fit – ajuste de curvas” e o MATLAB R216a para modelagem matemática e proposta de uma função constitutiva da TME por regressão não linear múltiplas que descreva o comportamento termomecânico do material em função das variáveis de processamento. Com base nessas evidências a simulação física do processamento termomecânico controlado permite um domínio de refino de grão com melhores propriedades mecânicas e extrapolações às condições mais complexas.

Palavras-chave: Aço inoxidável, Torção a quente, Tensão média equivalente, recristalização, MATLAB.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos a mais de meio século estão sendo usados como materiais em implantes para fixação de fraturas ou mesmo substituição temporária, Nabarro (2008). Entretanto, alguns aspectos, tais como baixa resistência na condição de recozido e a susceptibilidade a corrosão localizada (pites de corrosão) limitam suas aplicações em comparação as ligas de titânio que são as mais recomendadas e com preços muito elevados no mercado mundial, Giordani (2005). Estudos recentes mostram que a classe de aços inoxidáveis austeníticos alto nitrogênio ASTM F-1586 (especificação ISO 5832-9), combinam alta resistência mecânica e resistência a corrosão localizada, mesmo nas condições recozidos, comum nos processos de conformação das próteses ortopédicas, Silva (2012). Desta forma essa classe de materiais se apresenta com alternativo à confecção de próteses com carregamentos severos e aplicações permanentes.

Durante o processo de manufatura dessas peças os aços passam por processos mecânicos de conformação a quente, onde alguns fenômenos são marcantes, tais como endurecimento por deformação a quente, ou mesmo fenômenos de amaciamento dinâmicos que são responsáveis por mudanças cruciais no aspecto mecânico-microestrutural da peça, Silva (2012). Uma alternativa para estudar a interação entre estes mecanismos nos intervalos entre passes é a realização em escala de laboratório de seqüências de deformações replicando o processo industrial, Bay (1993). Esses ensaios com múltiplas deformações em resfriamento contínuo permitem investigar a interação entre estes fenômenos metalúrgicos através da análise das curvas de escoamento plástico e também, avaliar o efeito dos parâmetros de processamento na temperatura de não recristalização (T_{nr}), Medina (1995).

Estudos na literatura têm reportado a competição entre os fenômenos que ocorrem durante e após a deformação a quente no sentido de aprimorar os processamentos termomecânicos de ligas metálicas, analisando a evolução da curva de escoamento plástico em conjunto com observações microestruturais determinando-se o mecanismo de amaciamento dominante em cada etapa de processamento, Gomes (2009). Permitindo assim, determinar os eventos característicos da laminação a quente e projetar seqüências de passes de deformações que otimizem o processamento termomecânico industrial.

A literatura reporta que Boratto (1988) desenvolveu um estudo do comportamento da curva da tensão média equivalente (TME) em função da temperatura nos ensaios com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo, simulando processos industriais de laminação a quente. Este tipo de análise permite avaliar as mudanças

microestruturais junto aos fenômenos metalúrgicos estáticos e dinâmicos. Com base no modelo TME, Maccagno et al (1994) propuseram uma síntese da laminação a quente controlada: (i) Laminação controlada por recristalização estática (SRX) e metadinâmica (MDRX), com amaciamento completo entre passes de deformação acima da T_{nr} ; (ii) Laminação a quente controlada por recristalização dinâmica (DRX), processo abaixo da T_{nr} , com presença da recuperação dinâmica (DRV) e acúmulo de tensão. Onde o principal modelo descrito na literatura da TME em função da temperatura é descrito por Laasraoui (1991), Eq. 1:

$$TME(MPa) = A + \frac{B}{T(K)} \quad (1)$$

Onde σ (MPa) é a tensão média equivalente (TME) e A e B são constantes de ajustes empíricos.

Neste trabalho faz-se a modelagem matemática da tensão média equivalente (TME) em função dos parâmetros que governam o comportamento termomecânico do material durante os múltiplos passes de deformação, simulando fisicamente o processamento termomecânico do aço ASTM F-1586 através de ensaios de torção a quente em condições similares às industriais, propondo uma função constitutiva-evolutiva da TME, permitindo assim, o domínio de refino de grão com melhores propriedades e extrapolações às condições mais complexas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material em estudado foi o aço inoxidável austenítico ASTM F-1586, produzido pela Villares Metals S/A na forma de barras laminadas na condição recozido, cuja composição encontra-se na Tab (1). Este material é à base de Cr-Ni-Mn-Mo-Nb com adição de N, cuja fabricação inclui o processo de fusão à vácuo e refusão por escoria eletrocondutora que garantem um bom controle de composição, elevada homogeneidade e alto grau de limpeza.

Tabela 1 Composição química do aço ASTM F-1586 (%massa).

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	N	Cu	Nb	Fe
0,035	0,37	4,04	10,6	20,3	2,47	0,001	0,022	0,36	0,06	0,29	bal.

As simulações físicas foram conduzidas numa máquina de torção a quente computadorizada, controlando os esforços mecânicos e os ciclos térmicos. Para a realização desses ensaios, os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de 1250 °C com taxa de 5,5 °C/s e mantidos por 300 s. Em seguida foram submetidos a sucessivos passes de deformação de 0,20 e de 0,30 com taxa de deformação constante de 1,0 s⁻¹, enquanto eram resfriados continuamente com taxa de resfriamento controlada. Foram impostas taxas de resfriamento tais que sempre a temperatura decrescia 20 °C em cada intervalo de deformações ($\alpha_{resf} = 20 \text{ °C}/t_p$), aplicados 17 passes de deformação no intervalo de temperatura entre 1250 e 900 °C com tempo entre passes (t_p) variando de 5 a 80 s. Alguns ensaios foram interrompidos em diferentes níveis de deformação e resfriados bruscamente em água para microanálise por MEV/EDS.

A partir dos dados experimentais da curva de escoamento plástico determinou-se e a tensão média equivalente (TME) por integração numérica da área sobre a curva em cada uma das deformações impostas utilizando-se a Eq. 2, Boratto (1988):

$$TME = \frac{1}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \int_{\varepsilon_a}^{\varepsilon_b} \sigma_{eq} d\varepsilon_{eq} \quad (2)$$

Onde TME é tensão média equivalente, σ_{eq} é a tensão equivalente, $(\varepsilon_b - \varepsilon_a)$ é a deformação equivalente em cada passe de interesse.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Curvas de escoamento plástico com múltiplas deformações sob resfriamento

As Figuras 1(a) e 1(b) mostram os resultados experimentais obtidos nos ensaios com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo. Vê-se que a tensão aumenta com a evolução da sequência de deformações, sendo que esse aumento é mais acentuado em temperaturas mais baixas. De forma geral, vê-se que na região de alta T as curvas de escoamento são arredondadas e bem delineadas com os primeiros passes apresentando níveis de tensão maiores que os indicados pela tendência crescente que representa o efeito da queda de temperatura, especialmente em tempos entre passes maiores.

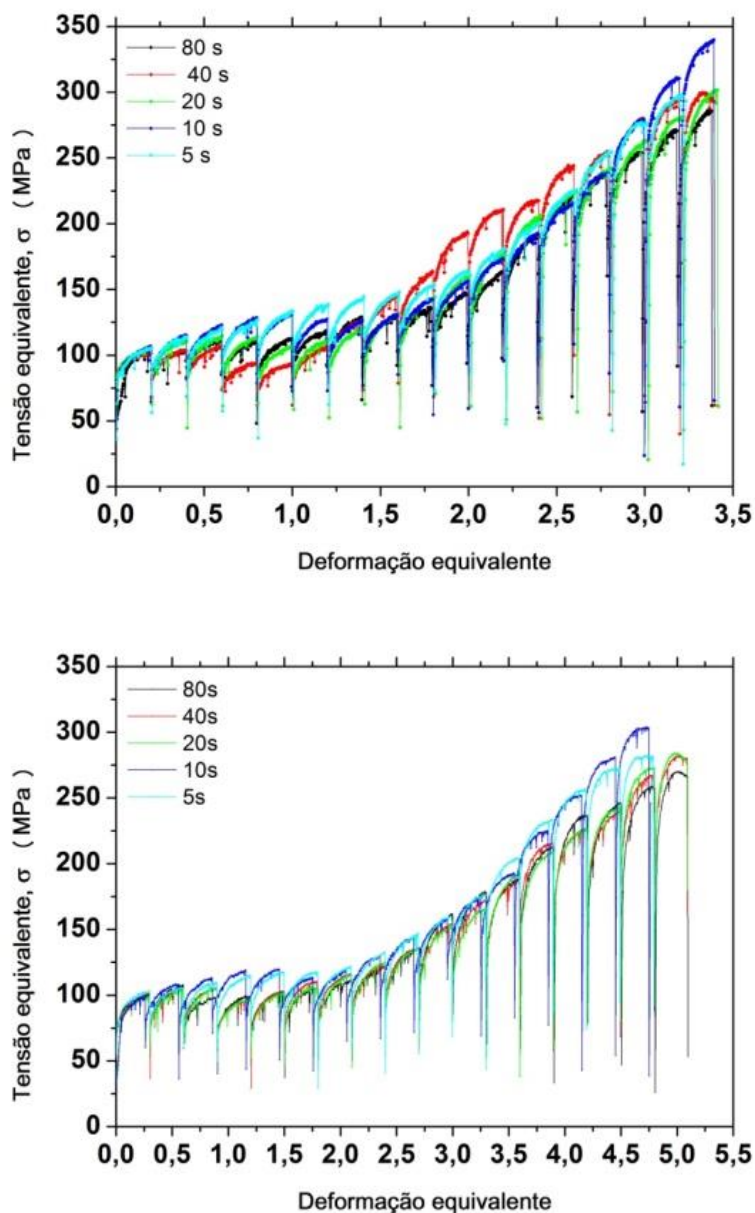


Figura 1 Curvas de escoamento plástico dos ensaios de torção a quente com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo: (a) $\epsilon = 0,2$ e (b) $\epsilon = 0,3$.

3.2 Curvas da tensão média equivalente (TME)

As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam a evolução da TME em função do inverso da temperatura ($1/T$), onde nitidamente as curvas podem ser separadas em duas regiões distintas. Vê-se que na região de alta temperatura o valor da TME de algumas das primeiras deformações desvia do comportamento linear esperado. Note que ao reduzir a temperatura há um aumento acentuado na TME. Este aumento gera uma mudança na inclinação da curva TME vs. $1/T$, demarcando duas regiões distintas, indicando a temperatura de não recristalização (T_{nr}), Bay (1993). A maior inclinação é uma evidência de que além do aumento da resistência com redução na temperatura, tem-se a atuação simultânea de mais um mecanismo de endurecimento, onde a T_{nr} representa a temperatura a partir da qual a recristalização não mais se completa no intervalo de tempo entre passes de deformação.

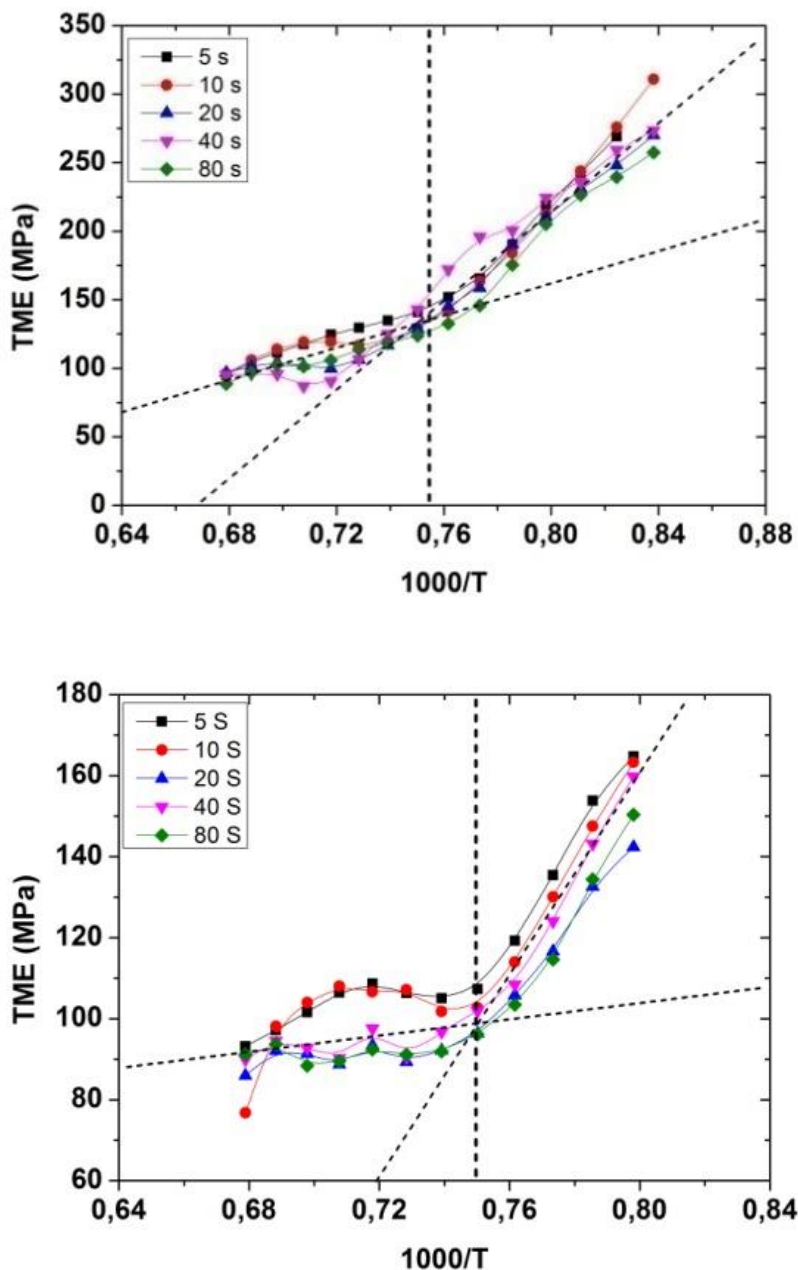


Figura 2 Dependência da tensão média equivalente (TME) com o inverso da temperatura ($1/T$) indicando a temperatura de não recristalização (T_{nr}): (a) $\epsilon = 0,2$ e (b) $\epsilon = 0,3$.

Os ensaios com múltiplas deformações em resfriamento contínuo indicam a existência de uma temperatura de transição ($T_{nr} \sim 1100$ °C) entre uma região de completa recristalização entre passes em altas temperaturas (acima da T_{nr}) e uma região de recristalização parcial em temperaturas menores, Fig's 2(a) e 2(b), que corresponde a uma região de intensa recuperação e possivelmente precipitação induzida, Fig(3). Na região I (alta T) existe uma elevação no nível de tensão, principalmente nos primeiros passes quando o tempo entre passe é maior que 30 s, devido à redução na temperatura com encruamento pronunciado dificultando a ação dos mecanismos termicamente ativados.

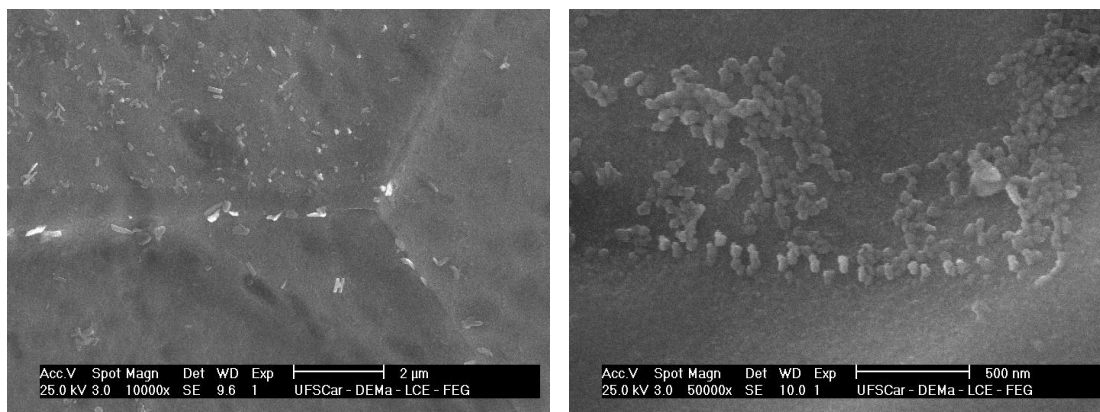


Figura 3 MEV dos precipitados induzidos por deformação nos contornos do aço ASTM F-1586 nos ensaios com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo: (a) $\varepsilon = 0,2$ e (b) $\varepsilon = 0,3$.

Na região II, abaixo da T_{nr} , nota-se um aumento acentuado na TME, como consequência da redução na temperatura e recuperação intensa provocando um acúmulo de tensão ($\Delta\sigma$) com efeito significativo do tempo entre passe (t_p) e retardo na recristalização por efeito de precipitados induzidos por deformação que obstruem a mobilidade dos contornos de grãos o que justifica a mudança de inclinação e flutuações nos valores na TME, Mousave (2011). Então à medida que a temperatura diminui, o fenômeno da recristalização reduz e o efeito da precipitação aumenta até alcançar o estágio de coalescimento levando a uma redução no nível de tensão.

3.3 Dependência da TME acumulada em função das condições de deformação

A Figura (4) mostra a dependência da temperatura de não recristalização (T_{nr}) com o tempo entre passe (t_p) e a quantidade de deformação imposta. Vê-se que para tempo entre passe curto há um acréscimo na T_{nr} até aproximadamente 40 s. Em seguida a T_{nr} diminui conforme o tempo entre passes aumenta. Também, pode-se ver que a T_{nr} aumenta sutilmente com a quantidade de deformação imposta. Os resultados mostram que há uma relação entre os níveis de tensão média equivalente (TME) e as condições de processamento, tais como temperatura, deformação, taxa de deformação e tempo entre passe, além do nível de encruamento com o grau de acúmulo de tensão ($\Delta\sigma$) que inibe a recristalização e promove intensa recuperação no material.

Tabela 2 Dados obtidos das curvas de escoamento plástico dos ensaios com múltiplas deformações sob resfriamento contínuo.

ε	t_p (s)	T_{nr} (°C)	$\Delta\sigma$ (MPa)	ε	t_p (s)	T_{nr} (°C)	$\Delta\sigma$ (MPa)
0,20	5,0	1035	139	0,30	5,0	1075	135
	10	1065	121		10	1087	115
	20	1089	111		20	1105	105
	40	1107	104		40	1115	103
	80	1075	91		80	1085	87

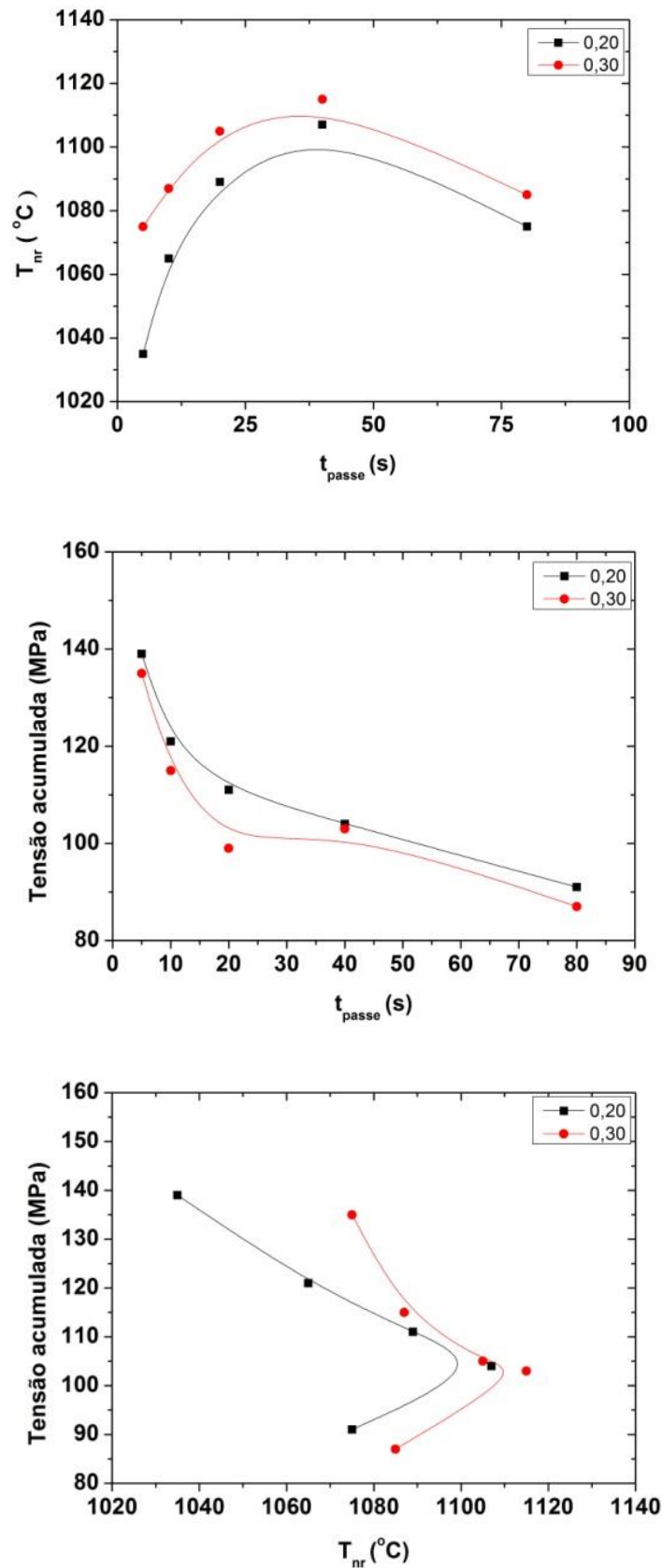


Figura 4 Dependência da temperatura de não-recristalização (T_{nr}) com o tempo entre passe (t_p) e da tensão acumulada ($\Delta\sigma$) com aT_{nr} e o tempo entre passe (t_p): (a) T_{nr} vs. t_{passe} , (b) $\Delta\sigma$ vs. t_{passe} e (c) $\Delta\sigma$ vs. T_{nr} .

Na Figura 4(a) vê-se que o comportamento da T_{nr} com o tempo entre passe (t_p) apresentou duas tendências: (i) T_{nr} ascendente para t_p curto; e (ii) T_{nr} decrescente para t_p longo. A primeira região evidência um retardo significativo na recristalização, provavelmente devido à precipitação induzida por deformação. Na segunda região, para tempo entre passes maiores que 40 s, a T_{nr} alcança um valor máximo sugerindo que a partir deste ponto o efeito da precipitação sobre a recristalização torna-se menos efetivo, devido ao coalescimento e dissolução dos mesmos que diminui o encruamento do material, reduzindo sua eficiência em ancorar os contornos de grãos durante a recristalização, aumentando assim a extensa da recristalização e a T_{nr} diminui. Quanto à deformação vê-se uma sensível mudança na T_{nr} , principalmente para tempo entre passe longo, acelerando a dissolução dos precipitados à medida que o tempo entre passe aumenta.

Este aumento de resistência mecânica sob múltiplas deformações a quente em resfriamento contínuo gerado pelo aumento no encruamento e por precipitação induzida por deformação é da ordem de $\Delta\sigma \sim 60$ MPa para esse aço, em média, valor este superior ao aumento causado pelo efeito de N bem aços microligados como reportado na literatura, Medina (1995), por exemplo. Assim a partir dessa dependência a melhor relação constitutiva- evolutiva obtida via MATLAB R216ada TME em função das condições de processamento através de regressão não-linear múltiplas foi:

$$TME(MPa) = -202,89 + \frac{464000}{T} + 1,45 \times 10^{-12} \cdot \epsilon^{0,39} \cdot \dot{\epsilon}^{0,98} \cdot (\Delta\sigma)^{0,42} \cdot t_p^{-0,06} \exp\left(-\frac{591000}{RT}\right) \quad (3)$$

Nesta modelagem matemática usou-se o ajuste de múltiplas variáveis Lab - Fit para estimar o valor da energia de ativação para a deformação a quente (Q_{def}) sob múltiplas deformações, a partir da relação $\ln t_p$ vs. $1000/T_{nr}$, encontrando um valor médio de 591 kJ/mol. Este valor está próximo ao valor reportado na literatura para os ensaios de deformação a quente isotérmico contínuo 587 kJ/mol, Silva (2012). Com base nessas evidências a simulação física do processamento termomecânico controlado permite um domínio de refino de grãos com melhores propriedades mecânicas e extrapolações as condições mais complexas e severas.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios com múltiplas deformações mostram que o nível de tensão depende da temperatura e a inclinação da TME vs. $1/T$ apresenta dois diferentes comportamentos quando a temperatura diminui, com transição em torno de 1100 °C, temperatura de não recristalização (T_{nr}). Em temperaturas abaixo da T_{nr} , ocorre a precipitação induzida por deformação durante certo tempo inibindo a recristalização e promovendo acúmulo de deformação passo a passo, responsável pela formação de grãos alongados.

- A influência do tempo entre passe (t_p) na T_{nr} apresenta dois comportamentos distintos. Quando o tempo entre passe é curto ($t_p < 40$ s), a recristalização é retardada com maior influência dos precipitados e a T_{nr} aumenta. Para $t_p > 40$ s, o coalescimento e dissolução dos precipitados provocam redução na T_{nr} .

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração técnica-científica do Grupo de engenharia Mecânica do CEUMA e do Grupos de pesquisa em Materiais do IFMA, no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e pelo apoio financeiro da FAPEMA.

6 REFERÊNCIAS

- Bai, D.Q., Yue, S., Sun, W.P., Jonas, J.J., Effect Deformation Paramaters on the No-Recrystallization Temperature in Nb-Beating Steels. Metallurgical Transactions A. 24A (1993) 2151-2159.
- Boratto, F., Barbosa, R., Yue, S. Jonas, J.J. Proc. Int. Conf. Physical Metallurgy of Thermomechanical Processing of Steels and Other Metals Thermec 88, ISIJ International, Tokyo, (1988) p.383.
- Giordani, E.J. Evidence of strain-induced precipitation on a Nb- and N- Bearing austenitic stainless steel biomaterial. Materials Science Forum 500-501 (2005) 179-186.
- Gomes, M., Rancel, L. Fernandez, B.J., Medina, S.F. Evolution of austenite static recrystallization and grain size during hot rolling of a V- microalloyed steel. Mater. Sci. Eng. A 501 (2009) 188 - 196.
- Laasraoui, A.; Jonas, J.J. Prediction of temperature distribution, flow stress and microstructure during the multipass hot rolling of steel plate and strip. ISIJ International, v. 31, p. 95-105, 1991.
- Maccagno, T.M., e Jonas, J.J. Correcting for the effects of static and metadynamic recrystallization during the laboratory simulation of rod rolling. ISIJ Internacional. v. 34, p. 607, 1994.
- Medina, S.F. The Influence of Niobium on the Static Recrystallization of Hot Deformed Austenite and on Strain Induced Precipitation Kinetics. Scripta Metallurgica Materialia 32 n1 (1995) 43-48.
- Mousavi, S.H., Yue, S. The necessity of dynamic precipitation for the occurrence of no-recrystallization temperature in Nb-microalloyed steel. Mater. Sci. Eng. A 528 (2011) 803–807.
- Navarro, M., Michiardi, A., Castano, O., Planell, J.A. Biomaterials in Orthopaedics. Journal of the Royal Society Interface 5 (2008) 1137-1158.
- Silva, E.S., Sousa, R.C., Jorge Jr., A.M., Balancin, O. Hot deformation behavior of an Nb- and N- bearing austenitic stainless steel biomaterial. Mater. Sci. Eng. A 543 (2012) 69-75.
- Sousa, R.C., Silva, E.S., Jorge Jr., A.M. Cabrera, J.M., Balancin, O. Dynamic recovery and dynamic recrystallization competition on a Nb- and N-bearing austenitic stainless steel biomaterial: Influence of strain rate and temperature. Mater. Sci. Eng. A 582 (2012) 96 -107.

7 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

MATHEMATICAL MODELING OF THE EQUIVALENT MEAN STRESS (EMS) DURING THE HOT ROLLING OF THE STEEL ASTM F-1586

¹Silva, T. C. S., tayna.ss30@gmail.com

^{1,2}Silva, E. S., edenshenco@yahoo.com.br

¹Jesus, L.J.M., luisjorged25@hotmail.com

¹Cutrim, R. M., rmcutrim@hotmail.com

¹Campos, C. N. clarianne.campos@gmail.com

^{1,2,3}Universidade UNICEUMA, Renascença Campus, Josué Montelo Street, 1, Renascença, São Luis - MA, CEP: 65075-120. São Luis, MA, Brazil.

³Graduate Program in Materials Engineering (PPGEM), Federal Institute of Education, Science and Technology of Maranhão - IFMA., Av. Getulio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP 65030-005, São Luis, MA, Brazil.

ABSTRACT

The correlation between the hardening and recrystallization mechanisms of the high nitrogen austenitic stainless steel ASTM F-1586 was studied by means of experimental tests of hot twisting with multiple strains under continuous cooling simulating a controlled industrial hot rolling process. Initially the specimens were submitted to 17 strains passes of 0.20 and 0.30, respectively, with strain rate of 1.0 s^{-1} , in a temperature range between 900 and 1250 °C, with time between varying pass between 5.0, 10, 20, 40 and 80 s, conditions similar to industrial processing. The results show that there is a relationship between the equivalent mean stress (EMS) levels and the processing conditions, such as temperature, strain, strain rate and time between pass, in addition to the level of hardening with the degree of stress accumulation ($\Delta\sigma$) that inhibits recrystallization and promotes intense recovery in the material. In this work, the "Lab Fit - curves adjustment" programs and MATLAB R216a are used for mathematical modeling and proposed a EMS constitutive function by multiple nonlinear regression that describes the thermomechanical behavior of the material as a function of the processing variables. Based on these evidences the physical simulation of controlled thermomechanical processing allows a grain refining domain with better mechanical properties and extrapolations to the more complex conditions.

Keywords: Stainless steel, Hot Torsion, Equivalent mean strain, Recrystallization, MATLAB