

EFEITO DAS CONDIÇÕES DE PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO NA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316 L

R. P. Ferreira¹, G. S. Reis¹, C. C. F. Nascimento¹, E. S. Silva².

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)
Av. Getulio Vargas, n. 04 – Monte Castelo – São Luis – MA, CEP: 65030-005

² Unidade de Ensino Superior Dom Bosco (UNDB)
Av. Colares Moreira, 443, Renascença – São Luis – MA, CEP: 65075-970
E-mail para correspondência: rafael.ferreira@ifma.edu.br

RESUMO

Os ensaios de torção a quente são utilizados na prática para simular um processo de conformação a quente na indústria. Neste contexto, este trabalho fez um estudo do comportamento plástico do aço inoxidável austenítico AISI 316 L, analisando a forma das curvas de escoamento plástico de acordo com as condições de processamento do aço na indústria. Durante os ciclos térmicos usados na deformação a quente os aços inoxidáveis austeníticos são submetidos a variações microestruturais que influenciam em suas propriedades finais. Essas modificações são fatores determinantes para alterações nas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Nesse contexto, foram feitos ensaios de polarização potenciodinâmica para verificar a influência dos parâmetros do processamento termomecânico na susceptibilidade à corrosão do material. A análise indicou que as amostras recristalizadas apresentam maior resistência à corrosão em relação às amostras deformadas antes da recristalização se completar, e em relação à amostra inicial.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico 316L; amaciamento dinâmico; corrosão

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis combinam boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e boa soldabilidade, características requeridas em diversas aplicações na indústria química, petroquímica e energética (1). Existem basicamente quatro tipos de microestruturas características a partir da composição básica Fe-Cr-Ni: martensítica, ferrítica, austenítica e dúplex (2). Destaca-se a série AISI 300, com a família dos aços austeníticos: AISI 304, 316, 321 e 347 com inúmeras aplicações.

O aço AISI 316 L, um exemplo de aço inoxidável austenítico, apresenta alta resistência à corrosão, boa ductilidade e excelente soldabilidade numa ampla faixa de temperatura (3). Essa liga quando usada na planta industrial passa por processos específicos de conformação a quente sob processamento termomecânico, tais como, laminação e forjamento, para a confecção de tubos, chapas, válvulas, equipamentos hospitalares, dentre outras aplicações, nas quais são submetidas à atmosferas corrosivas. Falhas nessas conexões e equipamento acarretariam em danos ambientais, danos à saúde pública e grandes prejuízos econômicos, sendo a corrosão e as solicitações mecânicas os principais fatores dessas falhas.

As estatísticas mostram que 20% do aço produzido no mundo destina-se a reposição de partes de equipamentos, peças ou instalações corroídas, também são estimados que o custo anual devido a corrosão fique entre 1,5 a 3,5% do PIB nos países industrializados e no Brasil o custo anual da corrosão é estimado em 8 bilhões de dólares (4). A fabricação de componentes mais resistentes à corrosão implica numa enorme economia mundial, porém o aumento desta propriedade está ligado diretamente com sua microestrutura que tem relação direta com seu processamento.

A simulação física do processamento termomecânico é capaz de prever os parâmetros de deformação que serão usados na indústria, obtendo microestruturas que apresentam boas propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão. Essa antecipação garante uma economia no processo, pois dispensam produtos finais com propriedades não condizentes com as especificações, além de toda simulação ser feita em laboratórios, reduzindo os custos da realização em planta industrial.

Diante deste contexto, este trabalho realizou uma simulação física do processo de conformação mecânica a quente através de ensaios de torção a quente, onde os

principais parâmetros do processamento: a temperatura, a deformação, a taxa de deformação foram variados de acordo com as condições industriais. Foram levantadas as curvas de escoamento plástico para determinar a relação tensão equivalente x deformação equivalente observando a influência das variáveis que envolvem o processo na susceptibilidade à corrosão do produto final por meio de medidas eletroquímicas de polarização potenciodinâmica. Para tanto, foi utilizado um aço inoxidável austenítico AISI 316L fazendo uma avaliação microestrutural por microscopia óptica e eletrônica de varredura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi um aço inoxidável austenítico AISI 316L com baixo teor de Carbono e Molibdênio, apresentando teores de Manganês relativamente alto. O material foi adquirido na forma de barras laminadas com diâmetro de $\frac{3}{4}$ ", solubilizado a 1030 °C por um tempo de 60 minutos e resfriado em água, segundo especificação da empresa Alphasteel, com tamanho médio de grão inicial de 47 μm . A Tabela 1 mostra a composição química em massa do aço AISI 316L, segundo certificado de qualidade do produto fornecido pelo fabricante.

Tabela 1 Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 316L (% massa)

Aço inoxidável austenítico AISI 316L (% massa)								
Elemento	Cr	Ni	Mo	N	Mn	P	C	Fe
	16,60	12,00	2,11	0,078	1,40	0,039	0,025	bal.

Nos ensaios de torção a quente isotérmico contínuo, os corpos de prova cilíndricos ($L=11\text{mm}$; $\phi=8,0\text{mm}$) foram aquecidos a temperatura de solubilização de 1200°C em forno de radiação infravermelho acoplado a máquina de torção a quente G-III, permanecendo por 300s para homogeneização dos microconstituintes, em seguida, resfriados até a temperatura de deformação a uma taxa de 3,3°C/s, que variou entre 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C. Nessas temperaturas eles permaneceram por 30s para eliminar gradiente de temperatura e em seguida deformados nas taxas de deformação de 0,1; 0,5; 1,0 e 5,0 s^{-1} até a deformação de 4,0. Imediatamente após a deformação, os corpos de prova foram temperados em água para análises metalúrgicas.

O cálculo dos valores de tensão e deformação equivalentes (σ_{eq} ; ε_{eq}), deu-se através das relações de Von Mises, baseada no método de Fields e Backofen (5), onde as curvas são dependentes do torque (M) e do ângulo de rotação (θ), segundo Eqs A e B:

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3} (3 + m + n) \quad (A)$$

$$\varepsilon_{eq} = \left[\frac{R}{\sqrt{3}L} \right] \theta \quad (B)$$

onde R é o raio e L o comprimento da parte útil do corpo de prova. Os coeficientes n e m estão relacionados com as sensibilidades às taxas de encruamento e de deformação.

A análise microestrutural foi realizada por microscopia óptica (MO), com ataque eletroquímico com ácido nítrico (HNO₃) a 65% com densidade de corrente de 1A/cm² e tempo variável. O tamanho médio dos grãos foi mensurado segundo a norma ASTM E112 (6), utilizando dez imagens por amostra. Os detalhes da competição dos fenômenos DRV-DRX foram realizados no microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde foram realizadas as análises de EDS para identificação das fases presentes e cálculos termoquímico via Factsage 5.6.

Para os ensaios de polarização potenciodinâmica foram utilizadas amostras com área de aproximadamente 1 cm², soldadas num fio condutor rígido de 1,5 mm² e posteriormente embutidas em resina epóxi. As amostras foram lixadas mecanicamente com lixa d'água de #180, a #1200, essas amostras foram utilizadas como eletrodo de trabalho. Para a realização dos ensaios de corrosão por medidas eletroquímicas de polarização potenciodinâmica utilizou-se um potenciostato da AUTOLAB/AUT86425, gerenciado pelo software NOVA da Metrohm Autolab B. V. versão 1.11.0. As amostras foram submetidas à solução de cloreto de sódio (NaCl) na concentração de 3,5% à temperatura ambiente, 25 °C. Para a medição da quantidade de NaCl a ser diluída foi utilizada uma balança de resolução centesimal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Interpretação da deformação isotérmica contínua a partir das curvas de escoamento plástico

As curvas de escoamento plástico obtidas nos ensaios de torção a quente estão apresentadas na Figura 1, as mesmas têm o comportamento típico apresentado por materiais metálicos que recristalizam dinamicamente quando submetidos a um processamento termomecânico.

Logo após o escoamento há uma região de aumento na tensão o que caracteriza a atuação do mecanismo de endurecimento por encruamento e recuperação dinâmica, apresentando uma alteração na curvatura conforme o material é submetido à deformação. Com a continuidade do processamento, a tensão atinge um valor crítico (σ_c e ϵ_c), onde ocorre o início da recristalização dinâmica, com a continuidade da deformação, a tensão chega a um valor máximo que corresponde à tensão de pico (σ_p).

Em seguida, após o valor máximo de tensão ser atingido ocorre a última característica da curva que é dada por uma região de amaciamento com um aumento contínuo da deformação apresentando uma redução no nível de tensão para um valor intermediário, que podem ou não chegar, dependendo das condições de processamento, num estado estacionário, onde se obtém a tensão de estado estacionário (σ_{ss}). Vê-se na primeira parte das curvas que há uma redução do nível de tensão com aumento da temperatura e diminuição na taxa de deformação.

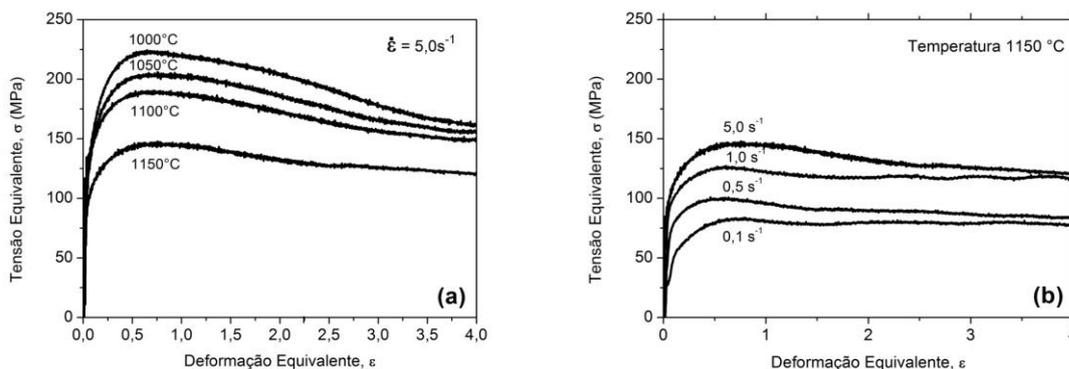


Figura 1 Curvas de escoamento plástico: (a) com taxa de deformação constante de $5,0 \text{ s}^{-1}$ e (b) com temperatura constante de $1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

As formas das curvas de escoamento plástico do aço AISI 316L mudam conforme os parâmetros termomecânicos. Nota-se que esta mudança é mais visível na região de amaciamento dinâmico após o pico de tensão com dois tipos de curvas:

- (i) Curvas sob alta taxa de deformação e baixa temperatura, apresentam níveis de tensão elevadas, altos níveis de encruamento, deformações de pico menores e retardo na cinética de amaciamento dinâmico por recuperação.
- (ii) Curvas sob baixa taxa de deformação e alta temperatura, exibem baixo nível de tensão, curvaturas acentuadas, deformação de pico maiores e cinética de amaciamento dinâmico por DRX acelerado.

3.2 Corrosão eletroquímica após processamento termomecânico

A Figura 2 mostra as curvas de polarização potenciodinâmicas das amostras processadas na temperatura de 1150 °C nas taxas de deformação de 0,1 s⁻¹; 0,5 s⁻¹; 1,0 s⁻¹ e 5,0 s⁻¹ e na condição solubilizada. Esta etapa tem por finalidade verificar o efeito de todas as taxas de deformação para uma mesma temperatura sobre a susceptibilidade à corrosão do material, já que todas as amostras se encontram recristalizadas com grãos livres de deformação, onde o tamanho médio dos grãos foram comparados nestas condições após os ensaios termomecânicos.

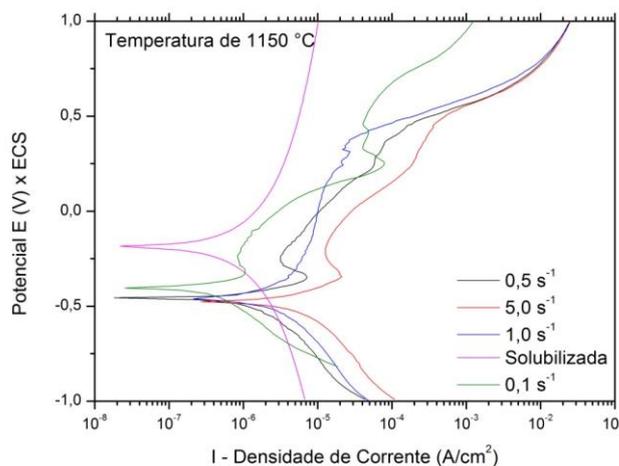


Figura 2 Curvas de polarização potenciodinâmica para a temperatura de 1150 °C para todas as taxas de deformações e amostra solubilizada.

Nota-se na Figura 2 que as curvas de polarização potenciodinâmicas são típicas de aços inoxidáveis analisados em sistemas eletrolíticos utilizando solução de 3,5% de NaCl, possuindo uma região catódica e uma região anódica com curvas

que apresentam trecho passivo e transpassivo (quebra da camada passiva) bem definidos, com exceção da amostra solubilizada que não teve sua camada passiva quebrada para a faixa de potencial analisada. Também nota-se pouca variação no potencial de corrosão para as amostras deformadas, apenas a amostra solubilizada apresentando um valor acima da média, os dados mais detalhadas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros avaliados dos testes eletroquímicos.

Amostra	E_{corr} (mV)	E_{pite} (mV)	Tamanho de grão	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)
Solubilizada	-189,34	-	64 μm	0,048
0,1 s⁻¹	-397,71	714,37	13,43 μm	0,109
0,5 s⁻¹	-463,27	465,61	11,85 μm	0,260
1,0 s⁻¹	-465,84	389,20	10,57 μm	0,409
5,0 s⁻¹	-478,49	462,29	7,35 μm	0,893

A Figura 3 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica das amostras como recebidas e processadas na taxa de deformação de 5,0 s⁻¹ nas temperaturas de 1000 °C, 1050°C, 1100 °C e 1150 °C. Este procedimento foi utilizado para verificar a influência do tamanho do grão sobre a susceptibilidade à corrosão do material nestas condições.

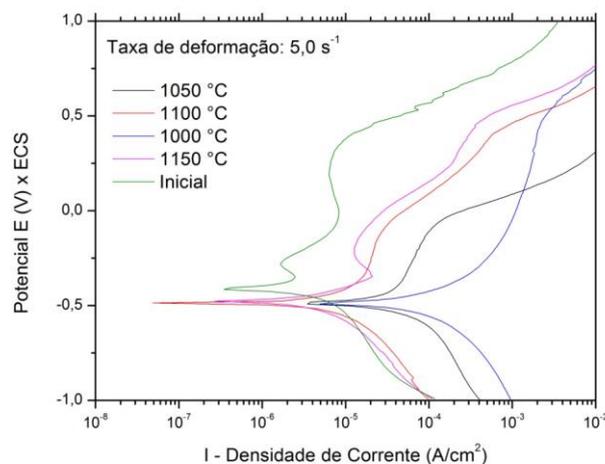


Figura 3 Curvas de polarização potenciodinâmica para a temperatura de 1150 °C para todas as taxas de deformações e amostra como recebida.

Nota-se na Figura 3 uma ampla faixa de passividade nas amostras, em aproximadamente -0,5 V a 0,5 V. Adicionalmente, nesta faixa de potenciais as curvas das temperaturas de 1150 °C e 1100 °C não se distinguem e praticamente se sobrepõem. Os potenciais de corrosão são bem próximos para todas as temperaturas com apenas a amostra como recebida (inicial) apresentando um valor mais elevado. Os potenciais de pites apresentam valores elevados acima de 400 mV, apenas a amostra processada na temperatura de 1050 °C e taxa de deformação de 5,0 s⁻¹ apresenta um valor negativo, a Tabela 3 mostra os valores obtidos nas curvas de polarização potenciodinâmicas.

A Tabela 3 mostra os tamanhos de grão das amostras inicial e processadas com taxa de deformação de 5,0 s⁻¹ para comparação com a susceptibilidade à corrosão.

Tabela 3 Parâmetros avaliados dos testes eletroquímicos.

Amostra	E_{corr} (mV)	E_{pite} (mV)	Tamanho de grão	i_{corr} (µA/cm²)
Inicial	-407,00	404,69	35 µm	0,577
1000 °C	-488,57	501,30	5,47 µm	15,100
1050 °C	-485,39	-31,53	5,85 µm	8,611
1100 °C	-485,23	415,00	7,22 µm	1,873
1150 °C	-478,16	470,64	7,35 µm	1,039

Os ensaios de polarização potenciodinâmica apresentou os valores de potencial de corrosão (**E_{corr}**), potencial de pite (**E_{pite}**) e corrente de corrosão (**i_{corr}**) para as condições com temperatura constante e variação da taxa de deformação, com taxa de deformação constante e variação na temperatura e por último, Z constante (taxa de deformação e temperatura) e variação na deformação para analisar a influência dessas variáveis na susceptibilidade à corrosão do aço inoxidável austenítico AISI 316 L.

A Figura 2 mostrou que o aumento da taxa de deformação levou a uma maior na susceptibilidade a corrosão do material. O valor do potencial de corrosão teve um leve aumento com a diminuição da taxa de deformação. Enquanto a densidade de corrente de corrosão sofreu um aumento com o aumento da taxa de deformação, ambos os comportamentos caracterizam o aumento na susceptibilidade a corrosão. Segundo a Tabela 2 e 3, a amostra processada na taxa de deformação de 5,0 s⁻¹

apresenta maior susceptibilidade à corrosão, com maior densidade de corrente de corrosão, apresentando 0,893 e devido ao seu menor tamanho de grão com 7,35 μm . Esse fato está relacionado com a diminuição do tamanho médio de grão, segundo resultados encontrados por Li, He, Yu e Zhang (7) diminui a resistência a corrosão intergranular no aço AISI 316 L.

Em relação ao potencial de pite, teve seu valor elevado com a diminuição da taxa de deformação, apenas uma inconsistência ocorreu entre os valores para a taxa de deformação de $5,0 \text{ s}^{-1}$ que mostrou potencial de pite maior que a taxa de deformação de $1,0 \text{ s}^{-1}$. Na Figura 2 observa-se que a amostra solubilizada, possui maior resistência à corrosão, apresentando maior potencial de corrosão, maior potencial de pite e menor densidade de corrente de corrosão, o que foi atribuído ao seu maior tamanho de grão em relação às amostras que foram processadas.

A Figura 3 mostrou que o aumento na temperatura levou a uma maior resistência a corrosão do material. O valor do potencial de corrosão teve um aumento pouco significativo com a elevação da temperatura. Enquanto a densidade de corrente de corrosão sofreu uma redução com o aumento da temperatura, ambos os comportamentos caracterizam o aumento na resistência a corrosão. Segundo a Tabela 2 e 3, que as amostras deformadas apresentam praticamente o mesmo potencial de corrosão $-0,48 \text{ V}$ em média, porém a amostra com maior susceptibilidade a corrosão é a processada na temperatura de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, pois apresenta maior densidade de corrente de corrosão devido a seu menor tamanho médio de grão de $5,47 \mu\text{m}$.

Apesar da susceptibilidade à corrosão estar sendo influenciada em maior parte pelo tamanho de grão, outras variáveis estão incluídas no processo. Observou-se também a presença de precipitados nos contornos de grãos, possivelmente carboneto de cromo (Cr_{23}C_6), como mostra a Figura 4 (b) no EDS feita na amostra. A Figura 4 apresenta o diagrama de equilíbrio realizado pelo software Facstage das amostras como recebidas, onde reforça a tese da presença dos carbonetos de cromo, apresentando uma pequena porcentagem em massa de carbonetos do tipo M_{23}C_6 em temperaturas próximas de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

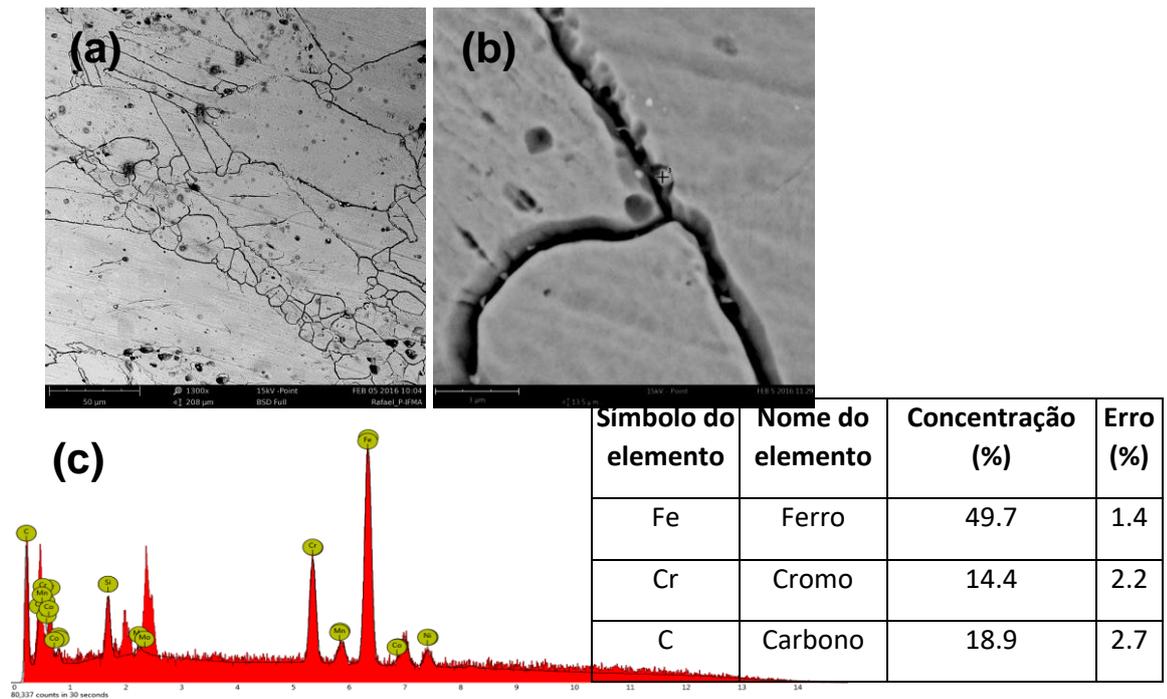


Figura 4 (a) Análise microestrutural por MEV do aço AISI 316L na condição de 1000 °C, com taxa de 5,0s⁻¹ e $\epsilon = 1,0$ e (b) e (c) EDS realizado em precipitado encontrado no contorno de grão.

4 CONCLUSÃO

O comportamento da deformação a quente do aço inoxidável austenítico AISI 316 L foi estudado no intervalo de temperatura entre 1000 °C a 1150 °C com taxa de deformação variando entre 0,1 a 5,0 s⁻¹ por teste de torção a quente isotérmico contínuo. As seguintes conclusões podem ser extraídas com respeito às curvas, microestrutura e ensaios de corrosão têm-se:

1. O comportamento das curvas de escoamento plástico exibe uma elevada sensibilidade às condições impostas no processamento termomecânico, como a temperatura, taxa de deformação e a tensão. Os aumentos no nível de tensão com a diminuição na temperatura e aumento da taxa de deformação são característicos.
2. As técnicas eletroquímicas de corrosão mostraram que a taxa de corrosão aumenta com o acréscimo de Z, comprovando que em amostras recristalizadas, o tamanho médio dos grãos é determinante na resistência à corrosão. As amostras recristalizadas apresentaram, de maneira geral, uma maior resistência à corrosão

em relação às amostras não recristalizadas, pois estas apresentavam bandas de deformação e uma microestrutura heterogênea.

3. Para rotas de processamento termomecânico, recomenda-se a utilização das condições com taxa de deformação de 0,1 s⁻¹ na temperatura de 1150 °C, pois dentre as amostras processadas foi a que apresentou a menor susceptibilidade à corrosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Baddoo N.R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. **Journal of Constructional Steel Research** . v. 64 (2008) 1199–1206.
- 2 K.H. Lo, C.H. Shek, J.K.L. Lai. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering R**. v. 65 (2009) 39–104.
- 3 Byun T.S., Hashimoto N., Farrell K. Temperature dependence of strain hardening and plastic instability behaviors in austenitic stainless steels. **Acta Materialia**. V. 52 (2004) 3889–3899.
- 4 Dai Q. X., Wang A.D., Cheng X.N., Luo X.M.. Stacking fault energy of cryogenic austenitic steels. **Chinese Physics**. V. 11. No. 6, Junho, 2002.
- 5 Fields. D.S and Backofen. W.A. Determination of Strain Hardening Characteristics by Torsion Testing. **Proc. Amer. Soc. Test.Mater**.v.57.p1263,1957.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, 2013.
- 7 Li, S.-X., He, Y.-N., Yu, S.-R., & Zhang, P. Y. Evaluation of the effect of grain size on chromium carbide precipitation and intergranular corrosion of 316L stainless steel. **Corrosion Science**,v. 66, 211–216. 2013.

ABSTRACT

The torsion tests hot are used in practice to simulate a hot forming process in industry. In this context, this work did a study of the plastic behavior of austenitic stainless steel AISI 316L, analyzing the shape of the plastic flow curves according to the processing conditions in the steel industry. During the thermal cycles used in the hot deformation austenitic stainless steels are subject to microstructural variations that influence their final properties. These changes are key factors to changes in mechanical properties and corrosion resistance. In this context, they were made potentiodynamic polarization tests to check the influence of thermomechanical processing parameters in the susceptibility to corrosion of the material. The analysis

showed that the recrystallized samples have higher corrosion resistance compared to samples deformed before the recrystallization is complete, and for the initial sample.

Keywords: austenitic stainless steel 316L; dynamic softening; corrosion.