

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO AUSTENO-FERRÍTICO SAF 2205 PROCESSADO POR LAMINAÇÃO A FRIO, CALANDRAGEM E CISALHAMENTO¹

Alice Gameiro Leone²
Elaine Carballo Siqueira Corrêa³
Mailson Santos de Queiroz⁴
Maria Teresa Paulino Aguiar⁵
Wellington Lopes³

Resumo

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis depende de diversos parâmetros, dentre os quais, o histórico de processamento termomecânico aplicado aos mesmos. Considerando isso, este trabalho avaliou o comportamento mecânico e a resistência à corrosão do aço inoxidável austeno-ferrítico SAF 2205 submetido a diferentes ciclos de processamentos termomecânicos mediante a combinação de solicitação mecânica por laminação, calandragem e cisalhamento (deformação efetiva acumulada de 0,72) e tratamento térmico de recozimento. Após a pré-deformação em laminação a frio, o material foi calandrado para em seguida, ser tratado termicamente antes do ensaio de cisalhamento. Os resultados mecânicos detectados após o cisalhamento indicaram a redução da resistência mecânica quando comparado com o estado inicial e a ausência de pontos sob corrosão intergranular ou por pites quando investigados por técnicas de microscopia óptica e de varredura mesmo após o nível elevado de deformação plástica.

Palavras-chave: Aço austeno-ferrítico SAF 2205; Corrosão; Comportamento mecânico.

STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR AND CORROSION RESISTANCE OF DUPLEX STAINLESS STEEL SAF 2205 PROCESSED BY COLD ROLLING, CALENDERING AND SHEAR

Abstract

The corrosion resistance of stainless steels depends on the several variables such as the thermomechanical processing conditions applied to it. Considering this approach, this work evaluated the mechanical behavior and the corrosion resistance of SAF 2205 stainless steel submitted to the different thermomechanical processes under mechanical efforts by rolling, calendaring and shear (effective accumulated of 0.72) and annealing. After the prestrain by cold rolling, the material was calendered e heat treated before the shear testing. The mechanical tests results, detected after the shearing, indicated the mechanical strength reduction when compared with the initial state, and the absence of intergranular or pitting corrosion by optical and scanning electron (SEM) microscopy techniques, even so after the high plastic deformation used in this work.

Key words: Stainless austenitic-ferritic SAF 2205; Corrosion; Mechanical behavior.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduanda em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil; alicegl@terra.com.br.

³ Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil.

⁴ Mestrando em Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil.

⁵ Professor, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, UFMG, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeno-ferríticos (duplex) se caracterizam por possuírem uma microestrutura bifásica, composta por ferrita (com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, CCC) e austenita (com estrutura cristalina cúbica de faces centrada, CFC) em proporções similares. Esses materiais conseguem conciliar resistência mecânica e à corrosão superiores às observadas pelos aços ferríticos e austeníticos. Tais propriedades estão relacionadas à composição química do material, principalmente devido aos altos teores de Cr, Ni e Mo bem como ao baixo teor de carbono presente em sua composição⁽¹⁾ e à própria estrutura bifásica dessa classe de aços. No entanto para determinar estas propriedades, torna-se necessária a avaliação de outras variáveis como as respostas apresentadas para mudanças estruturais decorrentes do modo de deformação.

Contudo, embora a ação corrosiva dependa do estabelecimento da ação química entre o material e o meio em que este se encontra, esta interação é influenciada por diversas variáveis, como as características físico-químicas do ambiente e a geometria e o histórico de solicitação (mecânica e térmica, por exemplo) impostos ao metal. Neste caso, várias pesquisas são conduzidas com o objetivo de identificar as condições necessárias à aceleração e à redução do processo de degradação do material pela ação do fenômeno corrosivo.^(2,3)

Desta forma, para uma condição de serviço em que o desgaste corrosivo constitui um item de controle classificado como crítico, a escolha de um material que seja capaz de atender às exigências de resistência à corrosão assim como outras necessidades associadas à aplicação específica do mesmo (resistência mecânica e à fadiga, por exemplo) deve considerar a ação de um grupo extenso de variáveis.

Verificou-se ainda que o acúmulo das discordâncias aumenta a diferença de potencial eletroquímico nas vizinhanças da matriz do material, ocasionando o início da corrosão puntiforme (*pitting*).^(4,5) Contudo, os efeitos da presença da martensita α' na degradação do material por agentes corrosivos ainda são pouco compreendidos.⁽⁶⁾

Considerando-se agora a combinação dos esforços mecânicos, como identificado nos processos de conformação mecânica, nota-se que a previsão teórica da resistência à corrosão é divergente. Uma destas teorias afirma que o aumento da quantidade de deformação plástica a frio tende a reduzir a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis por aumentar a quantidade de imperfeições na estrutura cristalina do material, constituindo assim, locais disponíveis para a nucleação de pontos de corrosão, além de auxiliar a transformação de fase durante o trabalho mecânico.

A combinação de diferentes modos de esforços mecânicos aplicados sobre o material vai influenciar no comportamento mecânico do mesmo e também sobre sua resistência à corrosão. Segundo estudos,⁽⁶⁾ observa-se a tendência de redução da resistência à corrosão de materiais sujeitos à ação de solicitações mecânicas pelo fato desta condição favorecer o aumento da quantidade de imperfeições na estrutura cristalina dos aços inoxidáveis, favorecendo assim, a nucleação de pontos de corrosão.

Diante do exposto este trabalho apresenta as respostas mecânicas e de resistência à corrosão exibidas pelo aço austeno-ferrítico SAF 2205 após a imposição da combinação dos esforços mecânicos de laminação (laminação a frio), calandragem e cisalhamento com a adoção de tratamento térmico de recozimento anterior ao ensaio de cisalhamento planar simples.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço inoxidável austeno-ferrítico SAF 2205 com 1,80 mm de espessura inicial. Essas chapas foram recebidas na condição de laminadas a frio no ambiente siderúrgico e posteriormente, laminadas a frio em laboratório para posterior deformação plástica, veja descrição nos subitens 2.2 e 2.7. A composição química deste material (% em peso) foi de: 0,026 de C; 1,854 de Mn; 0,374 de Si; 22,673 de Cr; 5,319 de Ni; 3,024 de Mo e 1,408 ppm de N.

2.2 Laminação a frio

Com o objetivo de permitir a realização do ensaio de cisalhamento planar simples foi necessário reduzir a espessura e a dureza inicial das chapas do aço SAF 2205 para permitir a acomodação deste material no dispositivo de ensaio (subitem 2.6). Deste modo, as chapas foram deformadas em laminação e por calandragem para a redução da espessura de 1,80 mm para 0,93 mm após essas duas operações e em seguida, tratadas termicamente (subitem 2.4). Neste caso, a deformação em laminação a frio das chapas do aço SAE 2205 foi conduzida na mesma direção da laminação original das chapas com a utilização de um laminador Fröhling com uso de cilindros de laminação com 200mm de diâmetro e velocidade ajustada para 6,25 mm/min, sendo a deformação efetiva de 0,50, calculada de acordo com a Equação 1.⁽⁷⁾

$$\varepsilon_{\text{efet}} = 1,15 \cdot \ln(t_0/t_f) \quad (1)$$

Sendo t_0 a espessura inicial (mm) e t_f a espessura final.

2.3 Calandragem

A calandragem do aço austeno ferrítico foi realizada em uma calandra mecânica Imac com uso de cilindros com 120 mm de diâmetro. Neste caso, as amostras calandradas foram aquelas pré-deformadas em laminação a frio. A deformação efetiva nesta etapa de processamento foi de 0,22 e acumulada de 0,72 (0,50 de deformação efetiva em laminação a frio).

2.4 Tratamento Térmico

Após a laminação e a calandragem, as amostras do aço austeno-ferrítico foram tratadas termicamente a 1.000°C durante 20 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno. Apesar de o tratamento térmico ter contribuído para a redução da densidade de discordância desenvolvida durante as etapas anteriores de deformação a frio (laminação e calandragem) essa operação foi necessária para permitir o “agarramento” deste material pelas presilhas do dispositivo utilizado para o ensaio de cisalhamento e assim, simulou uma condição de tratamento térmico posterior a uma etapa de conformação a frio em ambiente industrial.

2.5 Caracterização Mecânica e Microestrutural

As chapas do aço austeno-ferrítico no estado como recebido foram caracterizadas mecânica e microestruturalmente. As propriedades mecânicas nesta condição foram avaliadas a partir de um ensaio de tração em uma máquina de ensaios universais Instron 5582 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 2 e extensômetro mecânico com 25mm de abertura, com uso de corpos de prova de acordo com a norma ASTM E-8, sendo o ensaio conduzido sob taxa de deformação inicial de 0,001/s.

Para a caracterização microestrutural as amostras do aço SAF 2205 foram embutidas a frio com uso de resina acrílica auto-polimerizante e posteriormente, lixadas na seguinte sequência de lixas: 120#, 240#, 320#, 600#, 1200# e 2400#. Em seguida, as amostras foram polidas utilizando pasta de diamante de granulometria igual 9 μm e 3 μm e uso do reativo químico *Behara II* por imersão durante 20 segundos. A observação das fases presentes foi feita mediante o uso do microscópio óptico *Kontrol* e do microscópio de varredura por feixe de elétrons *Superscan SSX 550* da *Shimadzu*.

2.6 Ensaio de Cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados com uso de dispositivo montado à máquina de ensaios universais Instron 5582, sendo a deformação efetiva nesse modo de deformação igual a 0,45 e calculada de acordo com o critério de von Mises. Todos os ensaios foram conduzidos sob taxa de deformação de 0,001/s.

2.7 Rotas de Processamento

Considerando as condições de processamento descritas anteriormente cinco rotas de processamento termomecânico foram criadas para o estudo do comportamento mecânico e da resistência à corrosão do aço SAF 2205, como apresentado:

Rota 1: chapas no estado como recebido; Rota 2: chapas laminadas, Rota 3: chapas laminadas/calandradas, Rota 4: chapas laminadas/calandradas/tratadas termicamente a 1.000°C durante 20 minutos e Rota 5: chapas laminadas/calandradas/tratadas termicamente a 1.000°C durante 20 minutos/cisalhadas.

3. RESULTADOS e DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Mecânica e Microestrutural

A Figura 1 apresenta a curva de fluxo do aço SAF 2205 no estado como recebido após a condução do ensaio de tração uniaxial enquanto a Tabela 1 exibe o resumo das propriedades mecânicas desse material na mesma condição.

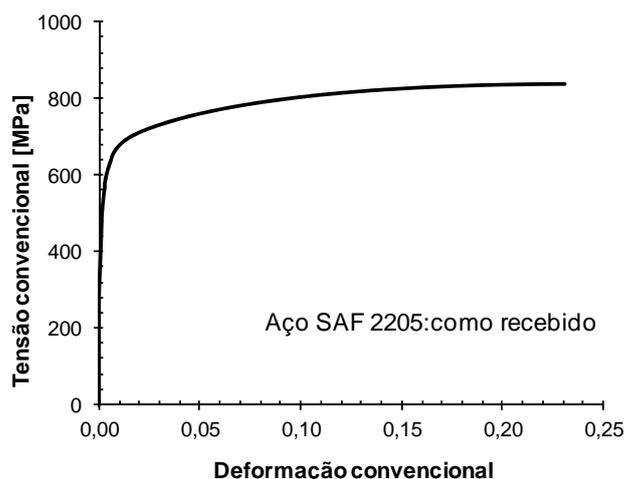


Figura 1. Curva de fluxo do aço SAF 2205 no estado como recebido.

Com relação aos aspectos microestruturais, a Figura 2 apresenta a fotomicrografia do aço SAF 2205 no estado como recebido, com a presença de ferrita (α) e de austenita (γ).

Tabela 1. Resumo das propriedades mecânicas do aço SAF 2205

Tensão limite de resistência à tração (MPa)	Tensão limite de escoamento (MPa)	Alongamento uniforme (%)	Alongamento não-uniforme (%)	Alongamento total (%)
834	620	22,7	12,5	35,2

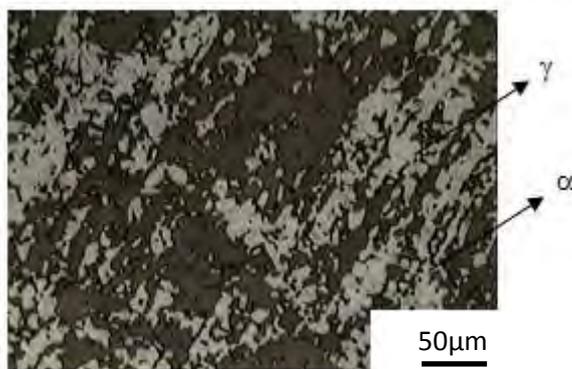


Figura 2. Fotomicrografia aço austeno-ferrítico no estado como recebido – microscopia óptica, reativo Behara II.

3.2 Rotas de Processamento x Comportamento Mecânico e Resistência à Corrosão

A Figura 3 exibe a curva de fluxo do aço SAF 2205 com a deformação efetiva acumulada desde o estado como recebido, sendo isso identificado pelo ensaio de tração, até o final do cisalhamento como uma das etapas da rota de processamento laminação/calandragem/tratamento térmico/cisalhamento.

A deformação efetiva acumulada aplicada ao aço SAF 2205 foi igual a 1,17, embora o gráfico apresente, para efeito de escala, o término da deformação total de 1,00.

Como previsto, o tratamento térmico conduzido após as operações a frio de laminação e de calandragem reduziu a resistência mecânica do aço austeno-ferrítico

sendo isso observado pela avaliação indireta do posicionamento das curvas de fluxo desse material no estado como recebido e após a condução das rotas de processamento. A Figura 3 revela ainda, também de modo indireto, que a taxa de encruamento do aço SAF 2205 manteve-se elevada durante o ensaio de cisalhamento.

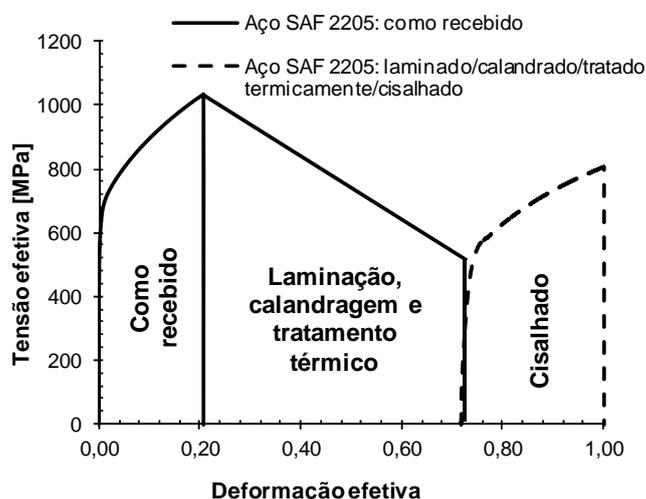


Figura 3. Curvas de fluxo do aço SAF 2205 após a rota de processamento laminação ($\epsilon = 0,50$), calandragem ($\epsilon = 0,22$), tratamento térmico (1.000°C, 20min) e cisalhamento ($\epsilon = 0,45$).

Avaliando-se agora os aspectos microestruturais e a investigação da ocorrência de regiões sob corrosão intergranular e por pites, a Figura 4 revela, como esperado, que as mesmas fases foram observadas percebendo-se apenas a orientação dos grãos de ferrita e de austenita, sem a indicação de pontos sob corrosão.



Figura 4. Fotomicrografia aço austeno-ferrítico laminado ($\epsilon = 0,50$) – microscopia óptica, reativo Behara II.

Após a calandragem notou-se apenas o aumento da tendência de orientação dos grãos (Figura 5), mas também a ausência do desenvolvimento de pontos de corrosão intergranular ou por pites para uma deformação efetiva acumulada conduzida em laboratório de 0,72 (laminação e calandragem) mediante a observação por microscopia óptica e de varredura, sendo essa última não exibida por conter sujeira identificada pela espectroscopia de raios-X dispersos em energia (EDS).

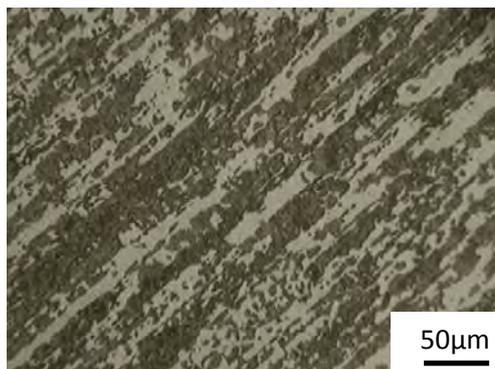


Figura 5. Fotomicrografia aço austeno-ferrítico laminado ($\epsilon = 0,50$) e calandrado ($\epsilon = 0,22$) – microscopia óptica (MO), reativo *Behara II*.

Com o tratamento térmico observou-se apenas o aumento do tamanho dos grãos de ferrita e de austenita e novamente, sem a presença de corrosão intergranular ou por pites (Figura 6). O ponto identificado por seta na Figura 6b não é uma fase nova, mas também sujeira como identificado por EDS.

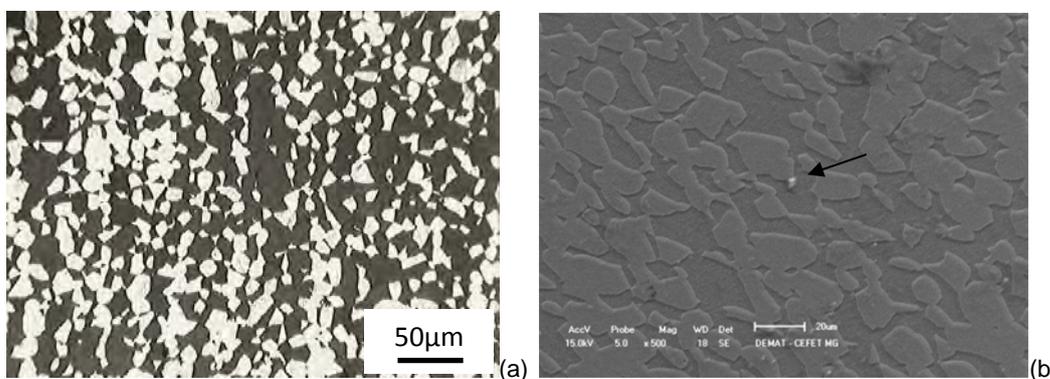


Figura 6. Fotomicrografias aço austeno-ferrítico laminado ($\epsilon = 0,50$), calandrado ($\epsilon = 0,22$) e recozido a 1.000°C durante 20 minutos: (a) MO e (b) microscopia de varredura (MEV), reativo *Behara II*.

Por fim o ensaio de cisalhamento também promoveu uma orientação parcial dos grãos de ferrita e de austenita, mas sem ocasionar a presença de corrosão intergranular ou por pites após o acúmulo da deformação plástica em laminação, calandragem e cisalhamento e a condução do tratamento térmico (Figura 7).

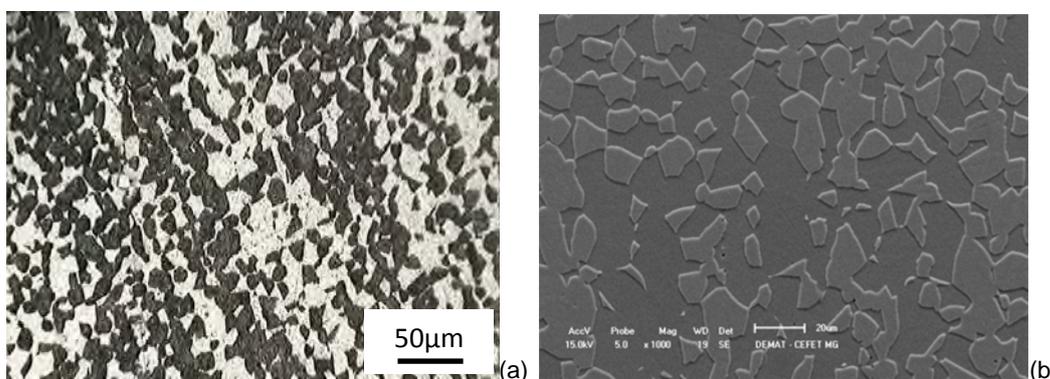


Figura 7. Fotomicrografias aço austeno-ferrítico laminado ($\epsilon = 0,50$), calandrado ($\epsilon = 0,22$), recozido a 1.000°C durante 20 minutos e cisalhado ($\epsilon = 0,45$): (a) MO e (b) MEV, reativo *Behara II*.

Embora não tenha sido observada a presença de corrosão intergranular ou por pites pelas técnicas de microscopia apresentadas neste trabalho não é possível afirmar a

inexistência desses tipos de corrosão no aço SAF 2205 após as operações de trabalho a frio descritas aqui. É recomendável a adoção de outras técnicas de ensaio de corrosão (perda de massa e eletroquímicos, por exemplo).

Deve-se destacar que a ausência de pontos sob corrosão intergranular (temperatura adotada para o tratamento térmico, considerada alta, reduziu a possibilidade de formação de uma fase deletéria à resposta mecânica do aço SAF 2205, a fase sigma) e por pites está ainda diretamente associada aos arranjos micro subestrutural assumidos por esse aço, como observado em trabalhos anteriores que identificaram a melhor resposta de aços inoxidáveis ferríticos quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos devido às mudanças no arranjo subestrutural apresentados por esses materiais.⁽⁸⁾

4 CONCLUSÕES

A submissão da rota de processamento termomecânico composta pela combinação da laminação a frio (deformação efetiva, ϵ , de 0,50), calandragem (ϵ igual a 0,22), tratamento térmico de recozimento (1.000°C durante 20 minutos) e cisalhamento planar simples (ϵ) igual a 0,45, deformação efetiva acumulada de 1,17) ao aço austeno-ferrítico SAF 2205 indicou:

- o acréscimo da orientação dos grãos de ferrita e de austenita com o acréscimo da deformação plástica em laminação, em calandragem e em cisalhamento;
- a redução indireta da resistência mecânica do aço SAF 2205 após o ensaio de cisalhamento identificada a partir do posicionamento da curva de fluxo deste modo de deformação abaixo da curva de fluxo do carregamento de referência (tração monotônica); e
- a ausência de regiões sob corrosão intergranular ou por pites mediante a observação por microscopia óptica e de varredura por feixe de elétrons (MEV).

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelo apoio quanto à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SCHILLMOLLER, C. M. KLEIN, H. P. *Selecting and using some high technology stainless steels*. Metal Progress, p. 9-22, (1981).
- 2 TERADA, M., ESCRIBA, D.M., COSTA, I., MATERNA-MORRIS, E., PADILHA, A.F. *Investigation on the intergranular corrosion resistance of AISI 316L(N) stainless steel after long time creep testing at 600°C*. Materials Characterization, v. 59, p. 663-668, (2008).
- 3 RAVI KUMAR, B., SINGH, R., MAHATO, B., DE, P.K., BANDYOPADHYAY, N.R., BHATTACHARYA, D.K. *Effect of texture on corrosion behavior of AISI 304L stainless steel*. Materials Characterization, v. 54, p. 141-147, (2005).
- 4 GUTMAN, E.M. *Mechanochemistry of Solid Surfaces*, World Scientific Publishing, 1st edition, London/UK, 332p, (1994).
- 5 SALVAGO, G., FUMAGALLI, D., SINIGAGLIA, D. *The corrosion behavior of AISI 304L stainless steel in 0,1M HCl, at room temperature. Part II: The effect of cold working*. Corrosion Science, v. 23, p. 515-523, (1983).

- 6 NAVAÏ, F. *Effects of tensile and compressive stresses on the passive layers formed on a type 302 stainless steel in a normal sulphuric acid bath.* Journal of Materials Science, v. 30, p. 1166 – 1172, (1995).
- 7 HUNDY, B.B., SINGER, A.R.E. *The distribution of strains in the rolling process.* J. Inst. Metals, v. 83, p. 401-407, (1954).
- 8 PEGUETE, L., MALKI, B., BAROUX, B. *Influence of cold working on the pitting corrosion resistance of stainless steel.* Corrosion Science, v. 49, p. 1933-1948, (2007).