

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

## **Efeito da laminação a frio na corrosão em água do mar de uma liga do sistema Fe-Mn-Al**

Luiz C. Casteletti<sup>1</sup>, Frederico A.P. Fernandes<sup>2</sup>, Ricardo G. Pereira<sup>3</sup>, Stênio C. Heck<sup>4</sup>, Carlos A. Picon<sup>5</sup>

### **Abstract**

Iron alloys with appreciable amounts of aluminum present alumina surface film that shows high corrosion resistance. The addition of Mn in appropriate levels to these alloys makes them austenitic, significantly increasing its ductility and cold forming ability. Due to strategic factors, it is interesting the development of the austenitic Fe-Mn-Al alloys that can substitute, in some applications, the traditional stainless steels containing chromium as alloying element. This study aims at evaluating the corrosion resistance in natural seawater of a Fe-32Mn-8Al alloy after cold rolling. The rolling was performed after solubilization of the alloy in multiple passes with thickness reductions of 20 %, 40 % and 80 %. The corrosion tests were performed in natural seawater by means of potentiodynamic polarization curves. The results showed that the studied Fe-Mn-Al alloy is very ductile and present good ability for cold forming, with a progressive increase of microhardness with the level of reduction. The corrosion resistance of the alloy decreased with the increase of the strain hardening due to deformation. Such behavior may be associated with stress corrosion cracking, which is amplified as the degree of reduction.

**Key-words:** Fe-Mn-Al alloys; Cold rolling; Corrosion; Sea water.

### **Resumo**

Ligas à base de ferro com teores adequados de alumínio podem apresentar filmes de alumina resistentes à corrosão. A adição de Mn a essas ligas pode torná-las austeníticas, aumentando significativamente a sua ductilidade e capacidade de deformação a frio. Isto torna possível o desenvolvimento dos aços austeníticos do sistema Fe-Mn-Al que podem substituir, em algumas aplicações, os aços inoxidáveis tradicionais, que contém o cromo e o níquel como elementos de liga principais. Este trabalho teve como objetivo a avaliação da resistência à corrosão, em água do mar natural, de uma liga Fe-32Mn-8Al após laminação a frio. A laminação foi realizada, após a solubilização da liga, em múltiplos passes com reduções de espessuras de 20 %, 40 % e 80 %. Os ensaios de corrosão foram realizados em água do mar natural por meio de curvas de polarização potenciodinâmicas. Os resultados mostraram que a liga Fe-Mn-Al estudada é bastante dúctil apresentando boa capacidade de deformação a frio, com aumento progressivo da microdureza com o nível de redução. A resistência à corrosão da liga diminuiu com o aumento do encruamento decorrente da deformação. Tal comportamento pode estar associado à corrosão sob tensão, que é amplificada com o grau de redução.

**Palavras-chave:** Ligas Fe-Mn-Al; Laminação a frio; Corrosão; Água do mar.

<sup>1</sup> Prof. Doutor, Engenheiro de Materiais – EESC - USP

<sup>2</sup> Doutorando, Engenheiro Químico – EESC - USP

<sup>3</sup> Mestrando, Licenciado em Ciências Exatas, EESC - USP

<sup>4</sup> Mestrando, Químico – EESC - USP

<sup>5</sup> Prof. Doutor, Físico – FEIS - UNESP

## Introdução

Os aços austeníticos do sistema Fe-Mn-Al podem substituir, em algumas aplicações de corrosão e oxidação menos severas, os aços inoxidáveis tradicionais, que contêm o cromo e níquel como elementos de liga <sup>(1-5)</sup>. Além de apresentar boas propriedades mecânicas, as ligas do sistema Fe-Mn-Al apresentam também uma grande capacidade de conformação a frio, podendo ser produzida facilmente na forma de arames, que apresentam as características adequadas para a confecção de elementos resistivos <sup>(5-6)</sup>.

Nas ligas deste sistema o Al é adicionado visando melhorar sua resistência à corrosão e oxidação, o Mn como estabilizador da estrutura austenítica e o C como endurecedor e estabilizador da fase austenítica <sup>(7)</sup>.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos vários níveis de deformação a frio nas características de corrosão em água do mar natural de uma liga do sistema Fe-Mn-Al.

## Materiais e Métodos

A liga estudada foi fundida ao ar em um forno de indução *Inductoterm*, em cadinho revestido de refratário básico. A Tabela 1 apresenta a composição nominal da liga.

**Tabela 1** – Composição nominal da liga estudada.

Elementos (% em massa)				
Fe	Mn	Al	Si	C
Balanco	32,00	8,00	1,50	1,00

Após fundição a liga foi solubilizada a uma temperatura de 1050 °C por um período de 3 h, seguido de resfriamento em óleo. Em seguida o material foi laminado a frio partindo de barras com 10 mm de espessura. Foram realizadas reduções de 20 %, 40 % e 80 %, que correspondem a espessuras finais de 8 mm, 6 mm e 2 mm. As reduções foram realizadas em múltiplos passes, sendo que cada passe consistiu em uma redução de 0,9 %, que corresponde a aproximadamente 0,2 mm.

Amostras laminadas foram submetidas a análises por microscopia óptica, medidas de microdureza *Vickers* e ensaios de corrosão em água do mar natural. Para as observações metalográficas foi empregado um microscópio óptico *Zeiss* modelo *Axiotech*, após ataque das amostras com solução 10 % de Nital. As medidas de micro-dureza foram obtidas em um equipamento digital da marca *Buehler* com carga de 100 gf, sendo realizadas pelo menos seis medidas para obtenção de uma média.

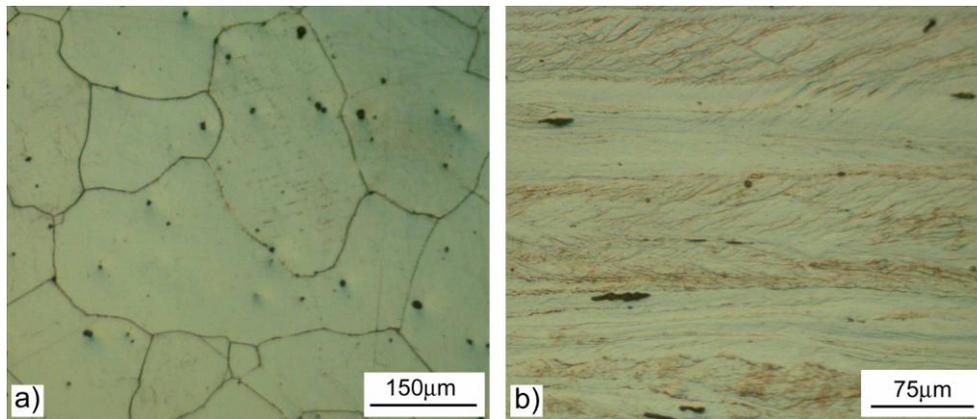
A célula eletroquímica, utilizada para a obtenção das curvas de polarização potenciodinâmicas, consiste de um eletrodo de referência do tipo calomelano saturado (ECS) e um eletrodo auxiliar de platina. O eletrólito empregado foi água do mar natural (pH 8,0) obtida em alto mar na praia de Itapuã em Salvador, Bahia (Brasil). Para a realização dos ensaios foi empregado um potenciostato modelo *Autolab-VGSTAT-302*. A velocidade de varredura usada foi de 1 mV/s. A expressão usada para o cálculo da velocidade de penetração ( $V_p$ ) durante processo de corrosão é dada por:

$$V_p = K_1 \cdot I_{corr} \cdot \rho^{-1} \cdot PE \quad (1)$$

em que, o valor da constante  $K_1=3,27 \times 10^{-3} \text{ mm.g.}(\mu\text{A.cm.ano})^{-1}$ , a densidade  $\rho$  é dada em  $\text{g.cm}^{-3}$  e o peso equivalente (PE) é adimensional <sup>(8)</sup>. Foi usado PE=20 e  $\rho=7,9$  (Fe-Mn-Al) conforme referência.

## Resultados e Discussão

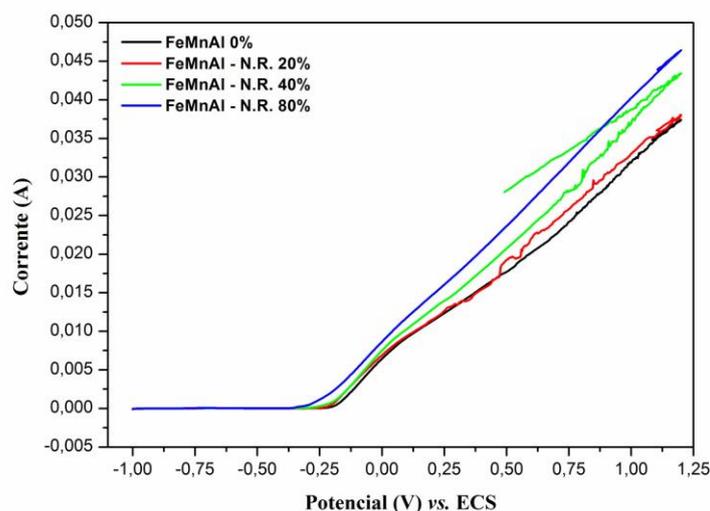
A Figura 1 apresenta micrografias ópticas de amostras da liga Fe-MnAl, solubilizada (Fig. 1a) e laminada com 80 % de redução em espessura (Fig. 1b). As micrografias foram obtidas na direção normal ao plano de laminação.



**Figura 1** - Micrografias ópticas de amostras da liga Fe-Mn-Al: (a) Solubilizada; (b) Laminada a frio N.R. 80 %.

O material solubilizado apresenta grãos com contornos bastante definidos. A amostra com redução de 80 % em espessura mostra uma microestrutura com a presença de alguns grãos distintos e bastante deformados, com a presença de bandas de deslizamento em seus interiores.

Na Figura 2, são apresentadas as curvas de corrente contra potencial (IxE), obtidas em água do mar natural, para amostras da liga Fe-Mn-Al não deformada (0 %) e com diversos níveis de redução (NR=20 %, 40 % e 80 %).

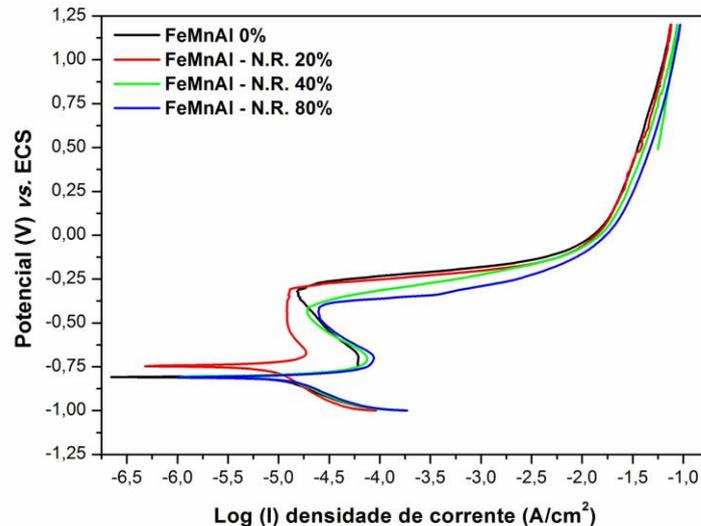


**Figura 2** - Curvas de corrente contra potencial para as amostras com diferentes níveis de redução.

Do potencial de  $-1,00 V_{ECS}$  até próximo de  $-0,25 V_{ECS}$  a corrente que percorre as amostras é praticamente nula e semelhante para todas as condições estudadas.

Percebe-se que próximo ao potencial de  $-0,25 V_{ECS}$  esta corrente aumenta bastante, quase que linearmente, para todas as amostras. Porém, esta corrente é maior, para um mesmo potencial, na amostra com NR=80 % e decresce de acordo com a diminuição do nível de redução. Desta maneira observa-se que, quanto maior o NR maior a corrente que percorre a amostra, após  $-0,25 V_{ECS}$ .

A Figura 3 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmicas do material solubilizado e das amostras laminadas com vários níveis de redução. Essas curvas são obtidas após divisão da corrente pela área que sofreu corrosão em seguida aplicando-se logaritmo na base 10.



**Figura 3** - Curvas de polarização potenciodinâmicas para as amostras com diferentes níveis de redução.

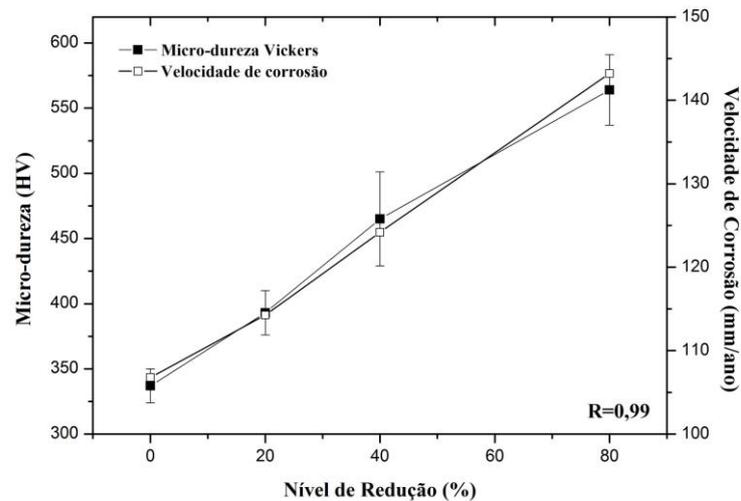
Embora o potencial de corrosão do material com NR=20 % seja levemente superior aos outros, sua corrente de corrosão é significativamente maior, que as amostras com NR=40 % e 80 %. Assim, após os cálculos baseados nas equações de Tafel a velocidade de corrosão ( $V_p$ ) das amostras aumenta com o nível de redução.

A Figura 4 mostra a variação da micro-dureza Vickers (HV) e da velocidade de corrosão ( $V_p$ ) em função do nível de redução, para a liga Fe-Mn-Al. Observa-se que os parâmetros HV e  $V_p$  aumentam linearmente conforme o nível de redução. Isto indica que uma maior redução em espessura, durante a laminação, aumenta a dureza do material e conseqüentemente diminui sua resistência à corrosão. Isto ocorre devido à absorção de energia durante a conformação a frio, aumentando a tensão interna residual do material. Esta tensão interna, por sua vez, facilita o início do processo de corrosão. Além disso, ocorre um aumento na densidade de discordâncias em todo volume do material, gerando um aumento em sua dureza.

O coeficiente de correlação (R), após regressão linear, para ambas as curvas foi de aproximadamente 0,99, o que indica uma forte aproximação, conforme as equações obtidas:

$$HV = 2,8614 \cdot N.R. + 339,60 \quad (2)$$

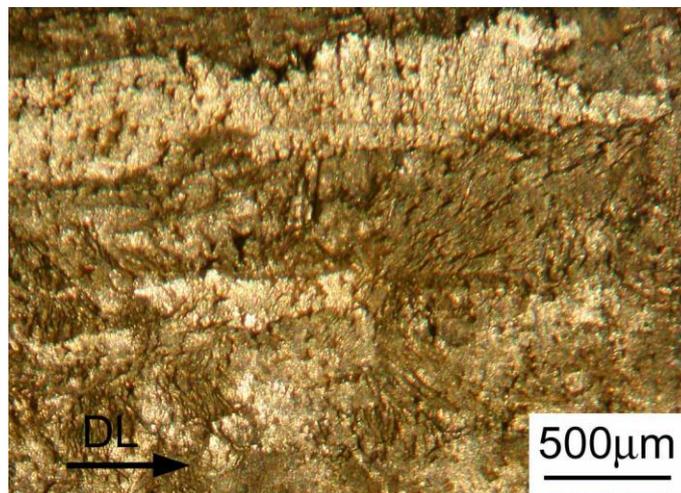
$$V_p = 0,46117 \cdot N.R. + 105,97 \quad (3)$$



**Figura 4** - Variação da micro-dureza e da velocidade de corrosão em relação ao nível de redução.

Com base nas equações (2) e (3) pode-se obter, respectivamente, a micro-dureza e velocidade de corrosão, em função do nível de redução, nas condições de ensaio usadas e para a liga estudada.

A Figura 5 mostra a superfície da amostra laminada com 20 % de redução em espessura, após ensaio de corrosão em água do mar natural.



**Figura 5** - Superfície da amostra com nível de redução de 20 % após ensaio de corrosão (DL - Direção de laminação).

Verifica-se que a deterioração ocorreu em toda área exposta ao eletrólito e nota-se a presença de um grão alongado na direção de laminação, que foi revelado após a exposição em água do mar.

## Conclusões

Com base nos experimentos realizados pode-se concluir que a liga Fe-32Mn-8Al apresenta grande capacidade de conformação a frio. Após laminação foi observada uma microestrutura com grãos bastante alongados.

Foi observado que a micro-dureza e a velocidade de corrosão das amostras aumentaram linearmente com o aumento do nível de redução, possivelmente devido ao encruamento e aumento da densidade de discordâncias no material e sua energia interna.

As curvas de potencial versus corrente e de polarização, em água do mar natural, mostraram que a resistência à corrosão diminui com o aumento do nível de redução.

### Referências bibliográficas

---

1. ALTSTETTER, C.J., BENTLEY, A.P., FOURIE, J.W., KIRKBRIDE, A.N. Processing and Properties of Fe-Mn-Al Alloys. **Mater. Sci. Eng.**, v.82, p.13, 1986.
2. WEN, T., JING, B., JU, T. Electrochemical polarization and pitting behaviour of Fe-Al-Mn alloys in chloride solutions. **J. Mater. Sci.**, v. 22, p. 3517, 1987.
3. TJONG, S.C. Aqueous corrosion properties of austenitic Fe-8.7Al-29.7Mn-1.04C alloy. **Surf. Coat. Technol.**, v. 28, p. 181, 1986.
4. SHIN, S.T., TAI, C.Y., PERNG, T.P. Corrosion behavior of two-phase Fe-Mn-Al alloys in 3.5% NaCl solution. **Corrosion.**, v. 49, p. 130, 1993.
5. RUSCAK, M., PERNG, T.P. Deformation and cracking behavior of Iron-Manganese- aluminum alloys in Sodium Chloride solution. **Corrosion.**, v. 51, p. 738, 1995.
6. HWANG, K.-H., WAN, C.-M., BYRNE, J.G. Phase transformation in a duplex Fe-Mn-Al-C alloy. **Mater. Sci. Eng. A**, v. 132, p. 161, 1991.
7. BANERJI, S.K. Austenitic Stainless-Steel without Nickel and Chromium. **Metall. Prog.**, v. 113, p. 59, 1978.
8. BABOIAN, R., TRESEDER, R.S. **Corrosion Engineers Reference Book**, 3ed., NACE, Houston, 2002.