

# INFLUÊNCIA DOS PRECIPITADOS NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DA LIGA FeMnSiCrNiCo COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

Sofia Salles Lantyer Marques<sup>1</sup>;  
Rita de Cássia Mendonça Sales Contini<sup>2</sup>;  
Heide Heloíse Bernardi<sup>3</sup>

Aluno do CPS - FATEC SJC – Prof. Jessen Vidal; e-mail: sofialantyer21@gmail.com<sup>1</sup>  
Professor da FATEC SJC – Prof. Jessen Vidal; e-mail: rita.sales@fatec.sp.gov.br<sup>2</sup>  
Professor da FATECSJC – Prof. Jessen Vidal; e-mail: heide.bernardi@fatec.sp.gov.br<sup>3</sup>

## Área do Conhecimento:

**Palavras-chave:** Liga inoxidável; Efeito de Memória de Forma; Resistência à Corrosão; Precipitados.

## INTRODUÇÃO

A descoberta do efeito de memória de forma (EMF) em ligas FeMnSi fez com que os estudos e pesquisas nos últimos anos aumentasse. Isso porque as ligas inoxidáveis com EMF são uma alternativa econômica quando comparadas as ligas de NiTi, devido à sua facilidade de fabricação e ao baixo custo de produção (DELLA ROVERE, 2011). Todavia, quando se refere a produção, é uma liga difícil de ser fabricada pois exige uma elaboração complexa e equipamentos sofisticados o que resulta em um alto valor do produto (OTUBO, 1996).

Muito esforço se concentra, com a finalidade, de obter-se uma melhora no EMF e na resistência à corrosão das ligas FeMnSi. Nesse contexto, adições de cromo (Cr), níquel (Ni), cobalto (Co) foram realizadas, resultando numa melhoria no EMF e na resistência à corrosão. A união desses materiais faz com que eles sejam denominados de ligas inoxidáveis com EMF e são muito úteis quando aplicados no acoplamento de tubulações sem solda em diversos segmentos da indústria, como na indústria química, petroquímica e de construção civil (DELLA ROVERE, 2011).

Na literatura é possível identificar que existem poucas aplicações prática e a razão disso é devido ao baixo valor de recuperação de forma (grau de recuperação de aproximadamente 2% a 4%). Estudos também indicam valores baixos de tensão de recuperação ligada à resistência à corrosão quando comparadas as ligas NiTi (SIMON, 2014).

Para que ligas inoxidáveis com EFM sejam efetivas em aplicações reais nos inúmeros setores na indústria, várias pesquisas na área são realizadas com a intenção de estabelecer condições de aprimoramento do EMF nas ligas inoxidáveis. Sabe-se que existem fatores que influenciam na recuperação de forma, como: composição química, estrutura inicial, tratamentos termomecânicos, microestrutura, tamanho de grão e energia de falha de empilhamento (LI et al.,1999). Com isso, fica clara a necessidade de novos estudos que garantam que as propriedades de recuperação de forma e resistência à corrosão sejam adaptáveis com aquelas esperadas para a aplicação no meio industrial (DELLA ROVERE, 2011).

As modificações que são realizadas nas ligas com EMF acabam influenciando em outras propriedades, como por exemplo, na resistência à corrosão deste material. Na literatura são encontrados trabalhos que reportam estudos de corrosão em ligas FeMnSiCrNiCo com EMF, porém destacando e comparando os meios de corrosão utilizados. No que diz respeito à precipitação de segunda fase e a sua influência na resistência à corrosão, não é reportado (DELLA ROVERE et al. 2011).

Portanto, este trabalho apresenta estudos priorizando o tratamento térmico de envelhecimento para induzir a precipitação de uma segunda fase e análise de mudanças microestruturais em relação a resistência à corrosão da liga inoxidável FeMnSiCrNiCo com EMF.

## OBJETIVO

Este trabalho possui como objetivo geral o estudo da resistência à corrosão de uma liga de aço inoxidável FeMnSiCrNiCo com EMF submetida a diferentes tratamentos térmicos.

## METODOLOGIA

A liga inoxidável com EMF Fe-7,4%Mn-5,25%Si-12,8%Cr-5,81%Ni-11,84% (%p.) foi produzida em um forno de indução a vácuo (VIM). Uma barra deste material com diâmetro inicial de aproximadamente 5 mm foi submetida ao tratamento térmico de solubilização em 1050°C por 1 h com resfriamento em água. Após solubilização, esta barra foi submetida ao forjamento rotativo a frio até redução de área de 20%, obtendo uma barra de aproximadamente 4 mm (material deformado). Este material deformado é o material de partida.

Para o tratamento térmico, a liga inoxidável de FeMnSiCrNiCo no estado deformado foi seccionada em uma cortadeira de precisão com um disco diamantado. Posteriormente, foram recozidas em um forno tipo mufla nas temperaturas de 250°C, 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C, 950°C e 1050°C durante 1 hora e resfriadas ao ar. Todas as amostras foram preparadas metalograficamente para a realização dos ensaios de corrosão e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

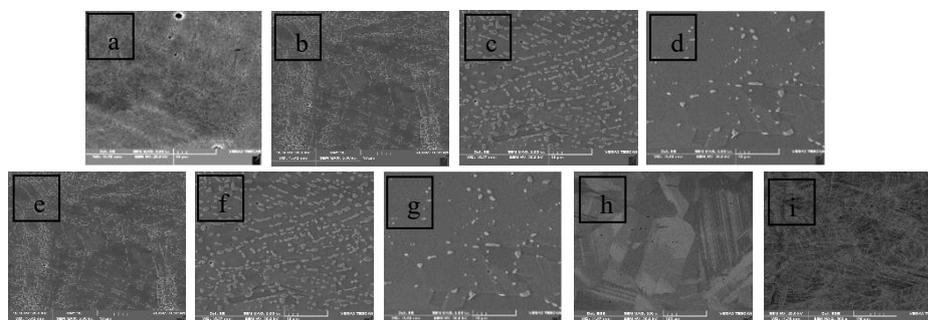
Para realização da análise à resistência a corrosão foi realizado ensaio eletroquímico nas amostras. Nesta etapa foram determinadas curvas de polarização potenciodinâmica em soluções de NaCl 3,5%, para verificação do comportamento anódico em meio ácido. Uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos (eletrodo de referência, eletrodo de trabalho e eletrodo de platina) foi utilizada para a realização do ensaio. Para os eletrodos de trabalho foram utilizadas as amostras. O eletrodo de referência utilizado foi o de cloreto de prata e o contra eletrodo utilizado foi o eletrodo de platina.

Os parâmetros utilizados no Potenciostato/GalvanostatoAutolab, foi inicialmente uma corrente de 1A para a medição do potencial de circuito aberto, escolhendo o modo de potenciostado do equipamento, com estabilidade alta e tempo de estabilização de 300s, para depois começar a variação de potencial, de 0,25 V a -0,25 V em uma taxa de 0,001 V/s em passo de 0,001 V.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a microestrutura da liga FeMnSiCrNiCo após o recozimento (Figura 1.a; 1.b; 1.c; 1.d; 1.e; 1.f; 1.g; 1.h) e solubilizada (Figura 1.i). pode-se verificar as mudanças microestruturas que ocorrem durante os tratamentos térmico e comparar com a amostra deformada. Nas temperaturas de 250°C à 550°C não é observado nenhuma mudança microestrutural visível. No caso do material desde estudo, até esta temperatura não foi observado a presença de precipitados, porém em 450°C há um leve aumento da dureza  $HV_{\text{deformado}} \cong 447 \pm 16$  e  $HV_{\text{deformado}+450^\circ\text{C}} \cong 486 \pm 37$ .

**Figura 1.** Microestrutura da liga inoxidável com EMF FeMnSiCrNiCo na condição recozida na temperatura de (a) 250°C, (b) 450°C, (c) 550°C, (d) 650°C, (e) 750°C, (f) 850°C, (g) 950°C e (h) 1050°C, e na condição (i) deformada.



Fonte: Autor (2020)

As amostras recozidas em 650°C à 950°C (Figura 1.d, 1.e, 1.f, 1.g) possuem presença de pequenos precipitados. Em 850°C é possível observar o coalescimento dos precipitados, e análises de EDS mostram que esses precipitados são enriquecidos principalmente em cromo e silício. Como a liga inoxidável estudada neste trabalho apresenta uma grande quantidade de elementos de liga, a precipitação e coalescimento de uma segunda fase podem ocorrer, principalmente, devido ao tratamento térmico em

elevadas temperaturas. A amostra recozida em 1050°C (Figura 1.h) apresenta uma microestrutura com uma segunda fase completamente dissolvida na matriz e grãos austeníticos da ordem de 100 µm.

Em relação às propriedades de corrosão desta liga, os resultados do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) estão em boas concordâncias com a literatura de Della Rovere (2011) que apresenta o  $E_{corr}$  de -0,401V à -0,340 V para ligas estruturalmente semelhantes em soluções de NaCl 3,5%. Sabe-se que quanto menor valor de potencial de corrosão, maior a propensão do material sofrer corrosão (GONÇALVES, 2019). No caso das amostras estudadas nesse trabalho, a variação no potencial de corrosão pode ser devido a presença de precipitados, pois as análises de EDS mostram que essa segunda fase é rica em Cr e Si, diminuindo assim a concentração de cromo na matriz e favorecendo à corrosão. A Tabela 1 mostra os valores de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), densidade da corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) e taxa de corrosão (TC) obtidos através das curvas de polarização linear em solução NaCl 3,5% e cálculos de acordo com a norma ASTM G102 (1994).

Assim como o potencial de corrosão, a densidade de corrente possui diferença de 1-2 ordens de grandeza maiores, dos valores de 20% deformada para as demais amostras, o que resulta em valores menores da taxa de corrosão. De uma forma geral pode ser observado que os valores de Taxa de corrosão são bem baixos e divergem bastante dos encontrados na literatura, o que indica que essa liga submetida à diferentes tratamentos térmicos possui a resistência à corrosão maior em ambientes fortemente oxidantes.

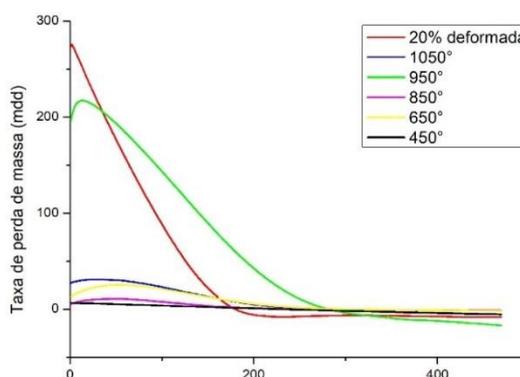
A Figura 2 mostra o gráfico de taxa de perda de massa, dado em perda de massa por unidade de área por unidade de tempo (mdd) que assim como a Taxa de Corrosão foi calculada por meio da ASTM G102 (1994). A partir desses dados foi visto que a taxa de perda de massa é bastante elevada das ligas 20% deformada e 950°C, quando comparadas às outras ligas. No entanto, em determinado ponto as taxas se estabilizam, mantendo os valores similares uns dos outros.

**Tabela 1.** Valores de potencial de corrosão, densidade da corrente e taxa de corrosão obtidos pelo método de polarização linear em solução NaCl 3,5%.

Condição	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ (µA/cm²)	TC (mpy)
20% deformada	-0.150	6,90797E-05	0,0000268
450°C	-0.353	0.008	0,0030359
650°C	-0.417	0.014	0,0053073
850°C	-0.416	0.012	0,0046249
950°C	-0.406	0.077	0,0298735
1050°C	-0.410	0.132	0,0512499

Fonte: Autor (2020)

**Figura 2.** Taxa de perda de massa em solução de NaCl 3,5% para as ligas inoxidáveis com EMF.



Fonte: Autor (2020)

## CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados obtidos conclui-se que:

- a) A liga FeMnSiCrNiCo apresentou partículas de precipitado enriquecidas principalmente com Si e Cr. No entanto, estes precipitados localizam-se apenas nos contornos de grão e durante o recozimento, provocou um leve aumento de dureza em 450°C;
- b) As ligas inoxidáveis FeMnSiCrNiCo no estado deformado e recozido em 450°C possuem melhores resistência a corrosão quando comparada com as demais condições, isso pode ser devido aos precipitados formados;
- c) Devido ao baixo valor de taxa de corrosão as ligas submetidas à diferentes tratamentos térmicos possuem a resistência à corrosão maior em ambientes fortemente oxidantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DELLA ROVERE, C. A. **Caracterização da resistência à corrosão de ligas inoxidáveis Fe-Mn-Si-Cr-Ni-(Co) com efeito de memória de forma**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

DELLA ROVERE, C. A. et al. **Corrosion behavior of shape memory stainless steel in acid media**. Journal of Alloys and Compounds, v. 509, p. 5376–5380, 2011. FUNAKUBO, H. Shape memory alloys. Ed. Hiroyasu Funakubo, University of Tokyo, cap. 1, 1987.

GONÇALVES, Rogério Felipe dos Santos. **Estudo das Propriedades Corrosivas dos Aços Maraging com e sem Adição de Cobalto**. 2019.48f. Trabalho de Graduação - FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal.

LI, H.; DUNNE, D.; KENNON, N. **Factors influencing shape memory effect and phase transformation behavior of Fe-Mn-Si based shape memory alloys**. Materials Science and Engineering A, v. 273-275, p. 517-523, 1999.

OTUBO, J. **Desenvolvimento de ligas inoxidáveis com efeito de memória de forma: elaboração e caracterização**. Tese (Doutorado em Engenharia de Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SIMON, R. W. **Desenvolvimento e Caracterização de Liga FeMnSiCrNi com efeito de memória de forma**. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao PIBIT-CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Tecnológica. Ao Dr. Jorge Otubo pela doação da liga FeMnSiCrNiCo e aos institutos ITA e ao INPE-SJC por fornecer os equipamentos utilizados durante os processos.