

## **AVALIAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX ATRAVÉS DE MEDIDAS DE TENSÃO HALL**

José Luiz Gomes Neto, [gomezneto25@hotmail.com](mailto:gomezneto25@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Edgard de Macedo Silva, [edgardmsilva@gmail.com](mailto:edgardmsilva@gmail.com)<sup>1</sup>  
Francisco Antonio de França Neto, [fafn@ifpb.edu.br](mailto:fafn@ifpb.edu.br)<sup>1</sup>  
Josinaldo Pereira Leite, [josinaldo@ct.ufpb.br](mailto:josinaldo@ct.ufpb.br)<sup>2</sup>  
Santos, Neilor César, [neilor@ifpb.edu.br](mailto:neilor@ifpb.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFPB, Av. 1º de maio, 720, Jaguaribe – 58015-430 - João Pessoa/PB

<sup>2</sup>UFPB, Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Cidade Universitária, S/N – 58059-900 – João Pessoa/PB

**Resumo:** *Aço inoxidável duplex apresenta propriedades mecânicas especiais como, por exemplo, resistência mecânica e à corrosão, em relação a outros aços inoxidáveis. Um dos grandes problemas do aço inoxidável duplex são as suas mudanças microestruturais as quais estão relacionadas com a fragilização acima de 300° C, onde a precipitação da fase  $\alpha'$  ocorre sobre a matriz ferrítica. Com o objetivo de caracterizar a fragilização do aço inoxidável duplex, as transformações microestruturais na temperatura de 475 °C, para diferentes tempos de envelhecimentos, foram analisadas através de medidas de tensão hall, energia de impacto Charpy, difração de raio-x e dureza. A técnica proposta com base em medidas de tensão Hall mostrou-se promissora para o acompanhamento das mudanças microestruturais do aço inoxidável duplex na região crítica de fragilização.*

**Palavras-chave:** *tensão hall, aço inoxidável duplex, fragilização*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os aços inoxidáveis duplex (AID) atualmente estão, em algumas aplicações, substituindo os aços inoxidáveis ferríticos e os austeníticos, devido à sua alta resistência mecânica e à corrosão. Esses AID são vastamente usados em sistemas de recirculação de usinas nucleares, bem como em outras indústrias como, de celulose e de petróleo, onde eles são expostos a ambientes severamente agressivos.

Os aços inoxidáveis ferríticos tornam-se frágeis, devido à precipitação da fase  $\alpha'$ , quando exposto a temperaturas na faixa de 300 à 500 °C. O AID é composto pelas fases austenita e de ferrita. A ferrita é formada durante o processo de solidificação, e durante o resfriamento ocorre a precipitação da austenita na matriz ferrítica.

A fase  $\alpha'$  é formada pelo mecanismo de decomposição espinodal, na qual temos a formação de regiões alternadas rica em cromo dentro da fase ferrítica, aumentando a barreira ao movimento de discordâncias e, conseqüentemente, aumenta a dureza do material. A dureza na temperatura de 525 °C apresenta um menor valor, isto, devido ao coalescimento da fase  $\alpha'$  rica em cromo (Berger, 1992).

O uso intensivo de materiais ferromagnéticos dentro das aplicações na engenharia permite que a perda de fluxo magnético seja uma das técnicas utilizadas para determinar a presença de descontinuidades. As mudanças do fluxo magnético próximo as descontinuidades permite o sensoramento devido as fugas de campo magnético. Sensores Hall têm sido utilizados para detecção de tamanho e posição de fases intermetálicas em materiais. Estes sensores são sensíveis também a detecção de falhas superficiais em materiais metálicos magnéticos, principalmente sob excitação de corrente alternada (Bi, 1998). O uso de propriedades magnéticas também já é bastante difundido na ciência dos materiais, mas até então tais propriedades foram utilizadas apenas em mecanismos de detecção de descontinuidades ou falhas.

Silva (2008) apresenta a utilização de sensores de efeito Hall, para a caracterização micro estrutural de aços, submetidos a tratamentos térmicos. Amostras de aços com diferentes tempos de tratamentos foram submetidas a um campo de 300 Gauss. Os resultados obtidos mostram que a tensão Hall é sensível a mudança micro estrutural.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de aço inoxidável duplex foram envelhecidas em um forno à temperatura de 475 °C, nos tempos de 0 (como recebido), 1, 4, 8, 12, 24, 50 e 100 horas. A composição química do AID estudado é mostrada na Tab. (1) a seguir.

**Tabela 1. Composição química das amostras de aço inoxidável duplex UNS S31803 como recebido**

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
0,018	1,480	0,019	0,001	0,450	22,220	5,590	0,130
Cu	Mo	N	Nb	Al	Sn	Ce	Fe
0,280	3,080	0,180	0,021	0,003	0,012	0,020	66,496

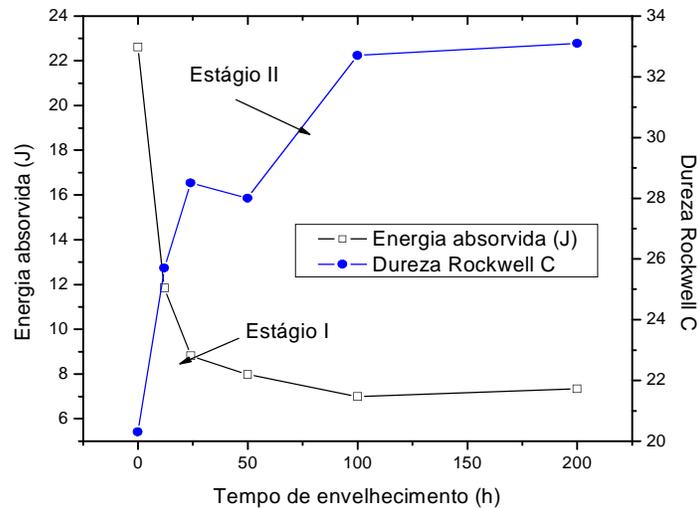
Foram realizados testes de dureza Rockwell C, ensaios de impacto Charpy, bem como ensaio de difração de raio x. O ensaio de raio-x foi realizado em torno do pico (2 0 0), onde o ângulo de varredura ( $2\theta$ ) variou de 63° até 65,5°, para os diferentes tipos de tratamentos aplicados. Foi usado um difratômetro de raio x, modelo XRD – 6000, tipo vertical, que utiliza radiação Cu- $\alpha$ .

Para o ensaio de caracterização por meio de tensão hall nos corpos de prova, foi usado um sensor hall do tipo A1323E. As amostras ensaiadas possuíam dimensões de 12 x 10 x 7 mm e foi utilizado um campo magnético de 600 Gauss.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A transformação da microestrutura do AID à 475 °C é caracterizado pela decomposição da fase  $\alpha$  em duas regiões, uma pobre em cromo e outra rica em cromo. A decomposição espinodal (Iacoviello et al, 2005) é o mecanismo responsável por esta transformação. A fase  $\gamma$  não sofre transformação nesta região (Mathew et al, 1999).

A Figura (1) apresenta a correlação entre medidas de dureza Rockwell C, energia absorvida por ensaios de impacto Charpy e tempos de envelhecimentos até 200 horas, na temperatura de 475° C.



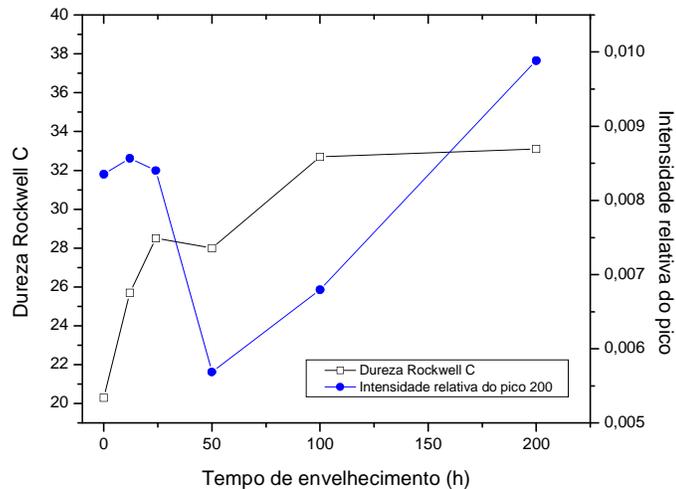
**Figura 1. Variação das medidas de dureza Rockwell C e de energia absorvida por impacto em amostras envelhecidas à 475 °C.**

Observa-se na Fig. (1) que a cinética de endurecimento é rápida. A Curva de dureza pode ser dividida em dois estágios de endurecimento, o primeiro até o tempo de envelhecimento de 24 horas, onde a cinética de endurecimento é rápida, e o segundo a partir de 50 horas, com cinética mais lenta com tendência a estabilização. A presença de dois estágios de endurecimento foi observada em outros trabalhos que analisaram a decomposição espinodal, como em Choo et al (1997) e Kratochvil et al (1984).

Segundo Choo et al (1997), as duas fontes de endurecimento responsáveis pelo primeiro e segundo estágios são, respectivamente, a decomposição espinodal e o crescimento das partículas da fase ordenada.

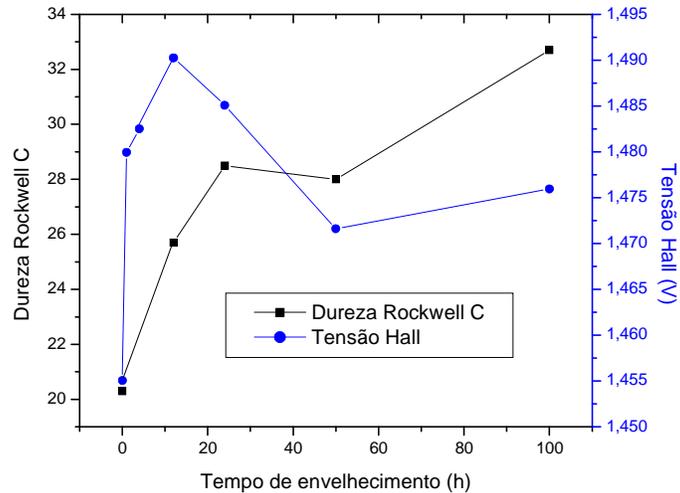
Analisando o comportamento do material devido à energia absorvida pelo ensaio de impacto Charpy, verifica-se que os dois estágios estão bem definidos, o primeiro com característica frágil e o segundo apresentando característica dúctil, conforme pode ser visto ainda na Fig. (1).

A formação da fase  $\alpha'$  foi analisada através de difração de raios-X no pico (2 0 0), como pode se observar na Fig. (2). O ordenamento da fase  $\alpha'$  foi analisado na difração de raios-X. O estudo da variação da intensidade do pico (2 0 0) revela que as amostras envelhecidas na temperatura de 475° C, Fig. (2), apresentam uma queda da intensidade relativa do pico para valores a partir de 24 horas. Conforme os resultados de resistividade elétrica (Silva, 2009), esta faixa de envelhecimento corresponde à região de decomposição espinodal. A intensidade relativa diminui devido ao espalhamento do pico 2 0 0, à medida que as regiões ricas e pobres de cromo crescem e provocam o aparecimento de bandas laterais que alargam o pico e diminuem a intensidade relativa do mesmo, (Miyazaki et al, 1996 e Kalashnikov et al, 1986). A presença de bandas laterais decorrentes do ordenamento de fases devido ao mecanismo de decomposição espinodal tem sido observada por difração de área selecionada por Microscopia Eletrônica de Transmissão e por difração de raios-X, (Miyazaki et al, 1996 e 1999 e Mattern et al, 2009).



**Figura 2. Relação entre intensidade do pico 200 e a dureza Rockwell C para amostras envelhecidas à 475 ° C.**

As transformações de fases a 475 °C, foram analisada através de medições da tensão hall, ver Fig. (3). A 475 °C, observa-se que existe uma relação direta entre tensão hall e dureza. Isso indica que a tensão Hall é capaz de acompanhar as transformações de fase que ocorreram nos dois estágios de endurecimento. No primeiro estágio, que é caracterizado pelo mecanismo de decomposição espinodal, temos a formação de uma estrutura modular coerente com a matriz precursora da fase ordenada  $\alpha'$ . A formação da fase ordenada  $\alpha'$  facilita a passagem do campo magnético tendo como resposta o aumento da tensão Hall. Para tempos entre 12 e 48 horas temos uma redução dos valores de tensão Hall, em virtude da perda de coerência dos precipitados da fase  $\alpha'$  com a matriz. Tempos superiores a 48 horas mostram uma recuperação dos valores de tensão Hall devido ao crescimento da fase  $\alpha'$ , aumentando a permeabilidade do meio a passagem das linhas de campo, em consequência da redução das superfícies de contornos de grão da fase  $\alpha'$ .



**Figura 3. Variação dos valores de tensão hall em relação aos diferentes tempos de envelhecimento aplicados as amostras.**

#### 4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de estudar a fragilização do aço inoxidável duplex, foram observadas as transformações de fase ocorridas no aço UNS S31803, quando exposto a temperatura de 475 °C por diferentes tempos de permanência na mesma. A análise das transformações, foi realizada através de medições de tensão Hall, difração de raios x, ensaio de impacto Charpy e de dureza Rockwell C. Com os resultados dos ensaios, foi possível concluir que a cinética de endurecimento apresentou duas fases distintas, a primeira com características dúcteis, determinada pelo mecanismo de decomposição espinodal, cujos valores de tensão Hall foram mais elevados e a segunda fase, de características frágeis que mostrou baixos níveis de energia absorvida e valores de tensão Hall menores.

Tomando-se como base os resultados das análises de dureza e de ensaio hall, podemos concluir ainda que a variação dos valores adquiridos através das medições de tensão Hall foram diretamente proporcionais as variações dos valores obtidos com os ensaios de dureza, demonstrando que houve sensibilidade com as transformações de fase por parte do sensoriamento através de tensão Hall. Com isso, podemos afirmar que a tensão Hall, é um importante e promissor método de ensaio não destrutivo para acompanhar a fragilização em um aço inoxidável duplex.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório do GSCMat no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus I, João Pessoa – PB, e Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

Os autores agradecem ao RPCMOD/FINEP/PETROBRAS, ENDESA/ANEEL e ao CNPq pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Berger, H., 1992, “Nondestructive characterization of materials”, *Materials Evaluation*, Vol. 50, No.2, pp. 299-305.
- Bi, Y. e Jiles, D. C., 1998, “Dependence of magnetic properties on crack size in steels”, *IEEE, Trans. Magn.*, Vol. 34, pp. 2021–2224.
- Choo, W.K., Kim, H.J. e Yoon, J.C., 1997, “Microstructure changes in austenitic Fe-30.0 wt% Mn-7.8 wt% Al-1.3 wt% C initiated by spinodal decomposition and its influence on mechanical properties”, *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 12, pp. 4877–4885.
- Iacoviello, F., Casari, F. e Gialanella, S., 2005, “Effect of “475 °C embrittlement” on duplex stainless steels localized corrosion resistance”, *Corrosion Science*, Vol. 47, No. 4, 909–916.
- Kalashnikov, I.S., Kibalnik, V.D., Litvinov, V.S. e Maliyenko, Y.E.I., 1986, Structure deviation in a high-strength 90G28Yu9MVB steels at the early stages of aging, “Structure and properties of non-magnetic steels”, pp. 83–88.
- Kratochvíl, P., Mencl, J., Pesicka, J. e Komnik, S.N., 1984, “The structure and low temperature strength of the age hardened Cu-Ni-Sn alloys”, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, No. 9, 1493–1500.
- Mathew, M.D., Lietzan, L.M., K.L. Murty e V.N. Shah, 1999, “Low temperature aging embrittlement of CF-8 stainless steel”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 269, No. 1, 186–196.
- Miyazaki, T. e Koyama, T., 1996, “Theoretical analysis of phase decomposition in real alloy systems based on the non-linear diffusion equation”, *Materials Transaction JIM*, Vol. 37, No.4, pp. 684–690.

- Silva, E. M., Albuquerque, V. H. C., Leite, J. P., Varela, A. C. G., Moura, E. P. e Tavares, J. M. R. S., 2009, "Phase transformations evaluation on a UNS S31803 duplex stainless steel based on nondestructive testing", Materials Science and Engineering A, Vol. 516, pp. 126–130.
- Silva, E. M. e Santos, N. C., 2008, Utilização de sensor Hall para caracterização de microestrutura de aços. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Salvador, Brasil.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

## EVALUATION OF PHASE TRANSFORMATIONS IN A DUPLEX STAINLESS STEEL USING HALL VOLTAGE MEASUREMENTS

José Luiz Gomes Neto, gomezneto25@hotmail.com<sup>1</sup>  
Edgard de Macedo Silva, edgardmsilva@gmail.com<sup>1</sup>  
Francisco Antonio de França Neto, fafn@ifpb.edu.br<sup>1</sup>  
Josinaldo Pereira Leite, josinaldo@ct.ufpb.br<sup>2</sup>  
Santos, Neilor César, neilor@ifpb.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFPB, Av. 1º de maio, 720, Jaguaribe – 58015-430 - João Pessoa/PB

<sup>2</sup>UFPB, Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Cidade Universitária, S/N – 58059-900 – João Pessoa/PB

**Abstract:** Duplex stainless steel has special mechanical properties, how, for example, mechanical strength and corrosion, compared to other stainless steels. A major problem with the duplex stainless steel is the understanding of its microstructural changes which are related to the embrittlement above 300 ° C, where precipitation of phase  $\alpha'$  occurs on the ferritic matrix. Aiming to characterize the embrittlement of duplex stainless steel, microstructural changes in temperature of 475 ° C for different times of aging were examined through measures of tension hall, Charpy impact energy, x-ray diffraction and hardness. The proposed technique based on the measurement of Hall voltage was effective for monitoring the microstructural changes of duplex stainless steel in the critical region of embrittlement.

**keywords:** *hall voltage, duplex stainless steel, embrittlement.*