SEVEN
publicações acadêmicas

INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO TÉRMICO NA DETERMINAÇÃO DE RUÍDOS MAGNÉTICOS PARA DETECÇÃO DA FASE SIGMA EM AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX DE DIFERENTES ESPESSURAS

https://doi.org/10.56238/sevened2024.041-042

Izaura Luiz Viegas
Mestra em Engenharia Elétrica (IFPB-JP)
Instituto Federal da Paraiba
izaura.viegas@ifpb.edu.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2524885264263106

José Patrocínio da Silva
Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica(UNICAMP)
patroc.silva@gmail.com
ORCID:0000-0003-1843-7879
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5753289728835624

Edgard de Macedo Silva
Pós-Doutorado na Faculdade de Engenharia de Portto (Portugal)
Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (UFRJ)
edgard@ifpb.edu.br
ORCID:0000-0002-8478-6199
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2164149082149281

Filipe Fragoso
Graduação em Automação Industrial(IFPB-Cajazeiras)
Instituto Federal da Paraiba
abreu.filipe@academico.ifpb.edu.br
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9117040670241008

RESUMO
Este trabalho é resultado de um estudo sobre influência do tempo de tratamento térmico em amostras de aço inoxidável duplex(AID)quando sujeito a uma interação magnética gerada a partir da aplicação de ondas senoidais aplicadas a amostras de AID in natura/sem tratamento(CR) e tratadas termicamente em condições específicas. O estudo correlaciona a análise do ruídos magnéticos, que foram gerados na região de reversibilidade magnética, à capacidade de detecção da fase deletéria sigma no material e prediz quais as melhores condições de aplicação da onda, como frequências e amplitudes a serem consideradas para identificar a presença da fase deletéria no material.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Duplex(AID). Fase sigma. Frequência. Ondas senoidais. Permeabilidade magnética. Ruído Magnético.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de ruídos magnéticos foram percebidos pela primeira vez em um ensaio realizado por Heinrich Barkhausen em meados do século XX. Em seu estudo Barkhausen percebeu que ao magnetizar um pedaço de material ferromagnético circundado por uma bobina com os terminais desta conectados a um aparato de amplificação acústica, este sistema, foi capaz de detectar sons audíveis através de um alto-falante (TAVARES *et al*., 2019) (NETO, 2021). Os ruídos ouvidos foram originados pelos impactos microscópicos ocorridos no interior do material devido ao deslocamento das paredes dos domínios magnéticos que constituem o material que geraram picos de tensão elétrica após ser aplicado um campo magnético variável (DIWAKAR *et al*., 2022).

O conceito de permeabilidade magnética está relacionado à facilidade com que um fluxo magnético pode passar através de um material ou mesmo a medida da quantidade de magnetização que pode sofrer um material ou a facilidade na qual um campo magnético pode ser induzido neste mesmo material. A permeabilidade magnética é representada pela letra grega μ. Ela mede a capacidade de um material em oferecer maior ou menor resistência à indução magnética. Os materiais ferromagnéticos possuem valores de μr (permeabilidade magnética relativa) maiores que 1, indicando que eles facilitam a passagem do fluxo magnético. Por outro lado, os materiais diamagnéticos e paramagnéticos apresentam valores de μr iguais ou menores que 1, o que significa que eles oferecem maior resistência ao fluxo magnético(LIMA,2021);(NASCIMENTO JUNIOR,2011); (LEITE,2014).

Sobre os aços inoxidáveis duplex (AID) sabe-se que estes são formados a partir da junção das fases ferrita e austenita, que surgiu no início do século XX e só a partir da década de 1970 passou a ser estudado e produzido em escala comercial (FRANCIS; BYRNE,2021). Essa liga de aço apresenta em sua composição quantidades de cromo, em porções aproximadamente iguais tanto na fase ferrítica quanto na fase austenítica (HÄTTESTRAND et al,2009). Essa composição confere a este tipo de aço uma miscelânea, em relação a algumas propriedades específicas, como por exemplo: a alta resistência da ferrita associada a ductilidade e tenacidade da austenita o que promove ao material uma alta resistência a corrosão, uma melhoria no tocante a resistência ao escoamento e melhoria da resistência à corrosão sob tensão, em relação aos aços inoxidáveis compostos apenas por fase austenítica (XU et al, 2019) (FRANCIS; BYRNE, 2021). Devido suas propriedades mecânicas, o AID é empregado em uma gama de aplicações, como: indústrias de petróleo e gás e de processos químicos, no setor naval e de celulose e papel, de controle de poluição, de processamento mineral e de engenharia civil e estrutural (XU et al,2019). Apesar das inúmeras vantagens, os aços inoxidáveis duplex apresentam características como as supracitadas anteriormente quando se trabalha com este material considerando um intervalo de temperatura entre -50 a 250 °C (HÄTTESTRAND et al, 2009). O AID é levado à fragilização quando o material é exposto a temperaturas acima de 250 °C até próximas dos 550 °C onde passa a ocorrer uma reação causada por meio de decomposição espinodal,visto que a fase alfa-

linha (α') é precipitada sendo esta fase responsável pelo comprometimento das propriedades mecânicas do AID levando a diminuição da resistência à corrosão deste tipo de material (FONTES et al,2009). Quando há o aumento de temperatura aproximadamente entre 600 °C e 1000 °C, surge a precipitação de diversas fases secundárias como sigma (σ), chi (χ), austenita secundária (γ2), nitretos (Cr_2N), carbonetos ($M_{23}C_6$) e carbonitretos (FERNANDES et al, 2021).

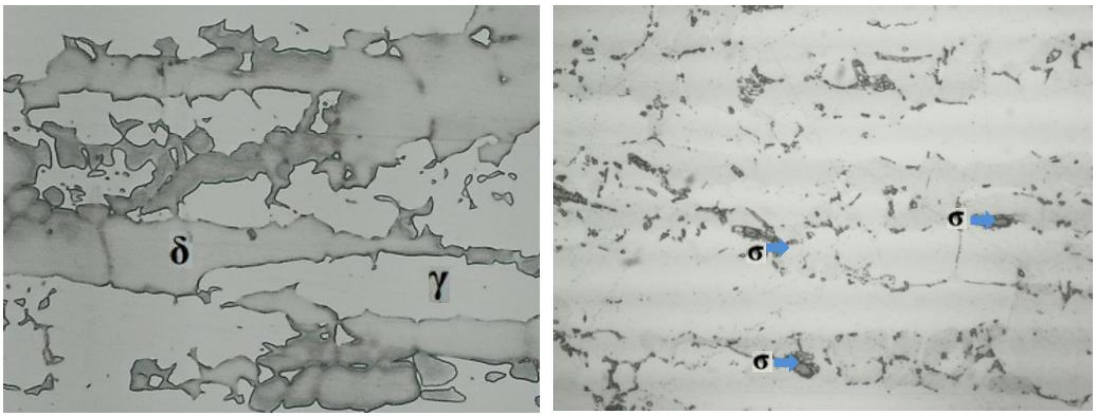
Esta pesquisa objetivou mostrar as características, como a frequência e amplitude do sinal gerados por ondas senoidais e consequentemente a melhor condição de trabalho para aplicação deste tipo de onda que seja propícia a detecção da fase deletéria sigma (σ) no interior do AID com base na análise do ruído magnético na região de reversibilidade dos domínios magnéticos,a princípio, tomando como referência estudos do ruído magnético de Barkhausen.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando amostras de um aço inoxidável duplex (SAF 2205). Amostras com as seguintes dimensões:24 mm de diâmetro;2mm de espessura;8 mm de espessura. Quanto ao tempo de tratamento: Amostras in natura ou sem tratamento térmico como recebida(CR); amostras envelhecidas termicamente em forno de indução JUNG Modelo 912 a 850ºC durante 15minutos(t15) e durante 60 minutos(t60). Com o intuito de se obter a fase deletéria sigma no AID em um menor intervalo de tempo, a amostra foi tratada termicamente a 850ºC por tempo mínimo de 15 minutos, sendo este tempo, segundo a literatura específica, Normando et al.,(2010), tempo suficiente para o surgimento de 4% fase sigma no AID. Amostras resfriadas ao ar livre e temperatura ambiente local depois lixadas, polidas e atacadas quimicamente em sua superfície com Hidróxido de potássio a 10% de tal forma a acentuar através da oxidação a região em que se encontra a fase sigma para sua visualização microscópica. Para a análise microscópica foi utilizado um microscópio NIKON FX 35XD de aumento máximo de 400x.

A Figura 1, mostra a micrografia (com aumento de 400X) de como se apresenta o AID SAF 2205: (a)AID (in natura) / sem tratamento térmico mostrando as fases ferrita(δ) e austenita(γ); (b) AID tratado termicamente a 850ºC mostrando a presença da fase deletéria sigma(σ) (RODRIGUES,2022).

Figura 1: Micrografia (aumento 400X) da microestrutura de um Aço Inoxidável Duplex (AID) SAF 2205. (a) Micrografia da amostra de um AID in natura (sem tratamento térmico)/CR. (b) Micrografia da amostra de um AID tratada termicamente a 850ºC.

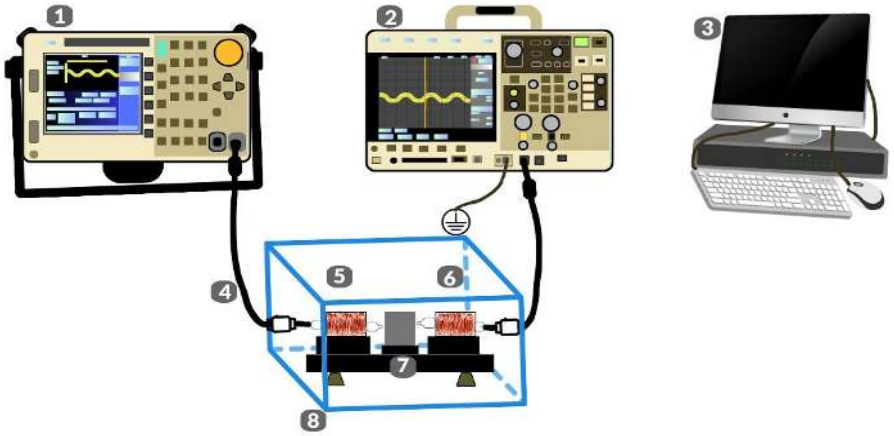


(a) (b)

Fonte da Imagem: RODRIGUES,2022

A Figura 2 representa a bancada de ensaio para a detecção do ruído magnético gerado na região de reversibilidade magnética. O aparato experimental montado não gera um campo magnético capaz de atingir a faixa da irreversibilidade magnética. É composta por duas bobinas (BG – bobina de geração da onda e BC – bobina de captação da onda). A BG é conectada em sua entrada a um gerador de sinais enquanto e a sua saída faz contato com a amostra do material. A bobina de captação(BC) está em contato em sua entrada com a amostra do material e em sua saída está conectada através de um cabo a um osciloscópio que por sua vez, foi conectado a um computador para a aquisição dos valores rms do sinal após a passagem da onda pela amostra do material em estudo.Foram aplicadas ondas senoidais em diferentes freqüências entre 0,1 até 50Hz com amplitude do sinal de 1V (ou $2V_{pp}$) para serem captados os ruídos e realizadas as observações em relação ao quão eficaz este sistema permite regular a freqüência e a amplitude capazes de detectar a presença da fase sigma no material.As ondas especificadas no gerador de ondas através da regulagem da freqüência e da tensão de amplitude do sinal em valores V_{pp} foram aplicadas tanto nas amostras de 2mm quanto nas de 8mm, in natura(sem tratamento térmico,como recebida- CR) e nas tratadas termicamente a 850ºC durante 15 minutos e 60 minutos.No ensaio, as amostras foram colocadas entre as bobinas e isoladas do meio externo por uma carcaça metálica estilo gaiola de Faraday. Em seguidas, foram aplicadas ondas senoidais com amplitude de $2V_{pp}$ nas freqüências de:(0,1/0,2/0,4/0,6/0,8/1/2/3/4/5/10/15/20/25/50)Hz e captados o rms dos sinais dos ruídos utilizando o osciloscópio e levando os dados através de um periférico de saída(pen drive) para serem tratados estatisticamente no computador desktop através de um programa específico chamado de Análise de Barkhausen que foi desenvolvido no Laboratório de Simulação e Comportamento de Materiais do IFPB (GSCMat).

Figura 2: Ilustração do tipo de bancada para medição do ruído magnético.
1. Gerador de sinais. 2. Osciloscópio. 3. Desktop. 4.Cabo blindado. 5. Bobina de geração (BG). 6. (BC)Bobina de captação. 7. Amostra do AID.

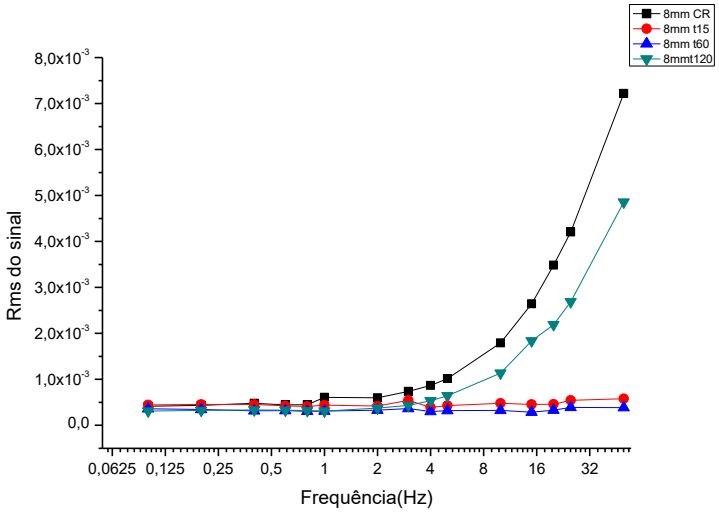


Fonte da Imagem: Própria.

3 RESULTADOS

Para todas as amostras de AID em estudo, após a aplicação de um campo magnético variável, foram captados rms de sinais de ruídos magnéticos que se comportaram de acordo com a configuração expressa na Figura 3. Ao se analisar os comportamentos dos sinais de ruídos magnéticos captados, os valores rms do sinal se mantém bem próximos tanto para as amostras tratadas termicamente (t15, t60 e t120) como para as amostras não tratadas(CR) até a frequencia de 5Hz para as duas espessuras(2mm e 8mm) das amostras estudadas. Com o aumento da freqüência a partir de 5Hz, observa-se que ocorre uma diferença significativa, entre os valores rms do ruído nas amostras tratadas termicamente, sendo estes menores que os valores rms do ruído do sinal em relação aos obtidos para as amostras in natura(CR). O comportamento do sinal captado conforme pode-se ler no gráfico das Figuras 3 e 4, ocorre independente da espessura das amostras até a faixa de aplicação de freqüência de 5Hz.Acima deste valor de freqüência, o que se pode extrair é que para as amostras de menor espessura os valores rms do ruído apesar de se mostrarem de forma crescente em função do aumento da freqüência, mantêm uma certa proximidade quando consideradas as amostras de menor espessura. A partir da aplicação de ondas senoidais, com freqüências acima de 5Hz, observa-se que há uma discrepância ou distanciamento nos valores rms dos ruídos em relação as condições do material in natura(CR) para as amostras com maior espessura.

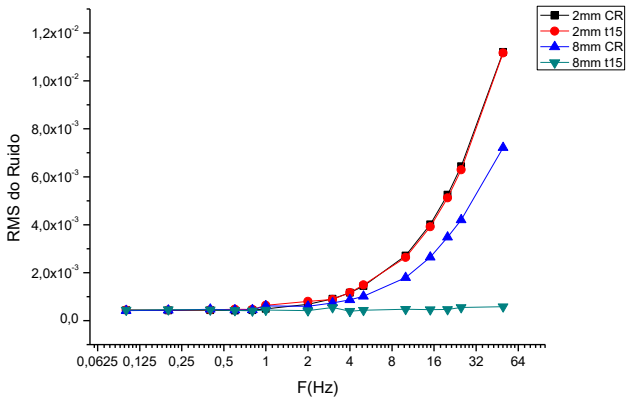
Figura 3: Gráfico dos Valores do RMS do ruído em função da frequência. Condição das amostras: tratadas termicamente durante 15 minutos(t15) , 60 minutos(t60), 120 minutos(t120) a 850ºC. In natura/sem tratamento térmico(CR). Espessuras: 2mm e 8mm.



Fonte da Imagem: Própria.

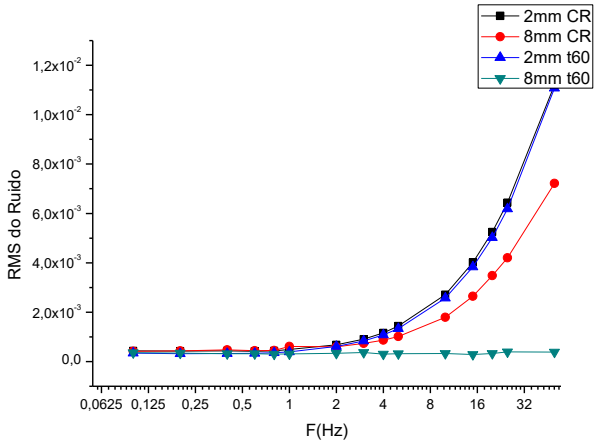
Nas Figuras 4 e 5 observa-se que ocorre uma diferença entre as amplitudes dos valores rms do ruído a partir da freqüência de 5Hz e que a diferença relativa entre estes rms dos ruídos magnéticos é mais perceptível nas amostras de maior espessura quando comparadas amostras CR e tratadas termicamente. Para as amostras de menor espessura, estudadas na mesma faixa de freqüência, os rms dos ruídos mostram que estes estão bem próximos entre si, com uma baixa faixa de amplitude de valor que impossibilita a distinção entre os ruídos nas amostras com e sem tratamento térmico, não sendo possível essa diferenciação e não permitindo que na menor espessura da amostra o sistema identifique a presença da fase deletéria no material.

Figura 4: Gráfico dos Valores do RMS do ruído em função da frequência. Condição das amostras: tratadas termicamente durante 15 minutos(t15) a 850ºC. In natura/sem tratamento térmico(CR). Espessuras: 2mm e 8mm



Fonte da Imagem: Própria.

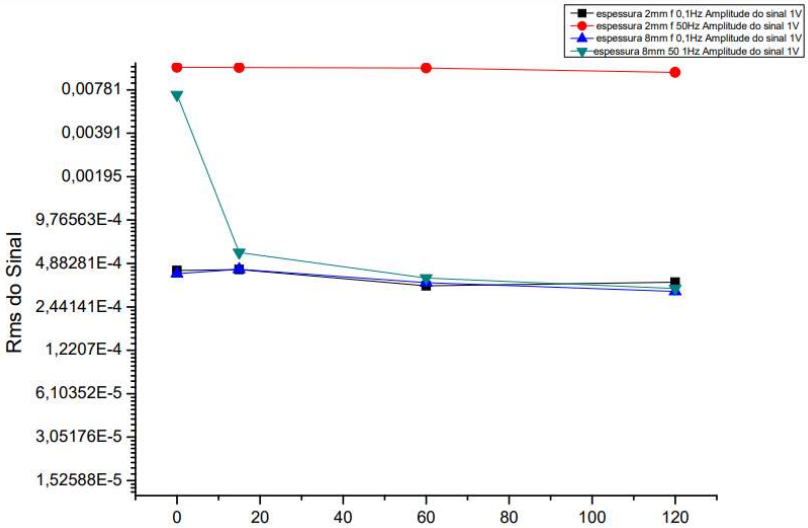
Figura 5: Gráfico dos Valores do RMS do ruído em função da frequência. Condição das amostras: tratadas termicamente durante 60 minutos(t60) a 850ºC. In natura/sem tratamento térmico(CR). Espessuras: 2mm e 8mm



Fonte da Imagem: Própria

A Figura 6 mostra como se comporta o rms do sinal do ruído em função do tempo de tratamento térmico (0 min(CR); 15minutos(t15);60 minutos(t60);120 minutos(t120))nos extremos da faixa de freqüência do estudo, ou seja, considerando o menor e maior valor da freqüência aplicada (0,1Hz e 50Hz) nas amostras de 2mm e 8mm de espessura. Observa-se que à medida que a amostra foi tratada termicamente em diferentes tempos de tratamento(t15,t60 e t120) e para as diferentes freqüências aplicadas ,as que foram tratadas termicamente, evidenciaram valores rms do sinal do ruído praticamente constante e de valores próximos entre si tanto para as amostras de 2mm quanto para as amostras de 8mm, na menor freqüência menor. Por sua vez, na maior frequência aplicada para a geração da onda, os valores rms do ruídos se apresentam com valores maiores em ambas as espessuras.

Figura 6: Gráfico dos Valores do RMS do ruído em função do tempo de tratamento térmico a 850ºC. Amostras 2mm nas frequências 0,1Hz e 50Hz com amplitude 1V. Amostras 8mm nas frequências 0,1Hz e 50Hz com amplitude 1V.



Fonte da Imagem: Própria.

4 DISCUSSÃO

Na Figura 6 é possível perceber que para a menor espessura e na maior freqüência os valores rms dos ruídos se mantiveram superiores aos valores obtidos na maior freqüência para as amostras de maior espessura. Essa diferença nos valores rms medidos nas amostras de diferentes espessuras (2mm e 8mm) e na maior freqüência do estudo possibilitou enxergar uma diferença significativa entre os valores rms dos ruídos.Essa diferença de valores rms leva a identificar que há uma influência da presença da fase deletéria na aquisição dos sinais dos ruídos e que esta diferença entre esses valores rms de ruídos se mostram mais úteis no estudo de identificação da presença da fase deletéria no material quando se trata da amostra com a espessura maior na freqüência de 50Hz. É importante observar que com o aumento do tempo do tratamento térmico até o limite da formação total da fase sigma os ruídos decrescem independente da espessura do material, muito embora, neste estudo ter havido a impossibilidade desta observação de forma mais precisa com as amostras da menor espessura devido a pequena faixa de diferença entre as amplitudes dos valores rms do ruído se confundirem por estarem muito próximos na freqüência mais baixa. Segundo Huallpa (2016), corrobora em seu trabalho, observou que a diminuição dos sinais de ruídos em decorrência da cinética de formação da fase sigma ao longo do tempo de tratamento térmico pois a fase ferromagnética ferrita presente no material in natura (CR) tende a diminuir à medida em que há um aumento de temperatura e que o tempo de sujeição ao tratamento térmico pode levar a diminuição do ferromagnetismo do material ao ocorrer a transformação da ferrita na fase sigma (σ), que além de ser prejudicial as propriedades do material, ao se formar no seu interior do aço eleva o paramagnetismo diminuindo o ferromagnetismo e consequentemente pode se observar tal fenômeno através da diminuição do rms dos ruídos captados.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foram aplicadas diferentes freqüências para a geração de uma onda senoidal com a finalidade de detectar a presença da fase deletéria ao material. Os ruídos gerados remetem ao choque entre as paredes dos domínios magnéticos no interior da microestrutura do material e pode ser capaz de identificam existência da fase sigma em seu interior. Diante deste estudo foram consideradas as condições de tratamento térmico a que foram sujeitadas as amostras do AID e até que ponto estes tempos de tratamentos assim como as dimensões das amostras interferiram nos valores rms do sinal gerado. Após o estudo observou-se que em freqüências maiores que 5Hz e utilizando uma amplitude de 2Vpp é possível identificar a presença da fase sigma presente no interior do material da amostra e que a diferença na espessura da amostra pouco afetou a detecção da fase deletéria enquanto o aumento da temperatura leva o aço a diminuir seu ferromagnetismo se tornando mais paramagnético impactando diretamente na diminuição dos valores rms dos ruídos, ou seja, o rms do foi pouco impactado por estes fatores dimensionais. Em relação ao tempo de exposição ao tratamento térmico observou-se que com

o aumento do tempo de tratamento térmico(t15,t60 ou t120) na etapa de formação da fase deletéria sigma os valores rms dos ruídos decresceram a queda e da espessura da amostra do estudo. E que ondas geradas em freqüências maiores que 5Hz estimulam a geração do ruído e que na freqüência do topo da faixa estudada com a amplitude de 2Vpp, 50Hz, mostra-se como a melhor região de caracterização para a aplicação da onda senoidal para a detecção da fase sigma no AID.

REFERÊNCIAS

DIWAKAR, V.; SHARMA, A.; YUSUFZAI, M. Z. K.; VASHISTA, M. Barkhausen noise signal analysis of IS 2062 steel and AISI D2 tool steel with different range of magnetizing frequency and intensity. Journal of Nondestructive Testing, v. 58, n. 9, p. 821–832, 2022.

FRANCIS, Roger; BYRNE, Glenn. Duplex stainless steels — alloys for the 21st century. Metals, v. 11, n. 5, p. 836, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/met11050836. Acesso em: 6 mar. 2025.

FERNANDES, Loyslene Rabelo et al. Interação do hidrogênio no aço duplex 2205 recozido e envelhecido após laminação a frio. 2021. Dissertação (Mestrado)

FONTES, Talita Filier et al. Utilização de ensaios mecânicos e eletroquímicos para determinação indireta da fase alfa linha no aço inoxidável superdúplex UR 52N+. In: Anais... São Paulo: ABM, 2009.

HUALLPA, Edgar Apaza et al. Use of Magnetic Barkhausen Noise (MBN) to Follow Up the Formation of Sigma Phase in Saf2205 (UNS S31803) Duplex Stainless Steel. Materials Research, v. 19, n. 5, p. 1008-1016, 2016.

LIMA, A. F. P. Detecção de tratamentos térmicos e anisotropia magnética em um aço SAE 4340 através de medidas de permeabilidade magnética. 2021. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

LEITE, J. P. Técnica não destrutiva para análise da interação de linhas de campo magnético e material. 2014. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

MAGNABOSCO, Rodrigo. Cinética das transformações de fase em aço inoxidável superdúplex. Relatório final submetido ao CNPq. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI, 2010.

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. Máquinas elétricas: teoria e ensaios. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

NETO, I. P. B. Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em aço. 2021. 71 p. Dissertação (Mestrado)

RODRIGUES, Amanda Medeiros. Caracterização do ruído magnético de Barkhausen em aço utilizando transformada wavelet discreta para detecção do constituinte sigma. 2022. Dissertação (Mestrado)

TAVARES, S. S. M.; NORIS, L. F.; PARDAL, J. M.; SILVA, M. R. Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic Barkhausen noise. Engineering Failure Analysis, v. 100, p. 322-328, 2019.

XU, Xin et al. Nanoestrutura, microestrutura e propriedades mecânicas de aços inoxidáveis duplex 25Cr-7 Ni e 22Cr-5Ni (% em peso) envelhecidos a 325°C. Ciência e Engenharia de Materiais: A, v. 754, p. 512-520, 2019.