

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

MARCELO LAERT HOCHUDT

ESTUDO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS NA SEPARAÇÃO DOS AÇOS
DIN 58CRV4 E DIN 75CR1

Porto Alegre
2016

MARCELO LAERT HOCHUDT

ESTUDO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS NA SEPARAÇÃO DOS AÇOS
DIN 58CRV4 E DIN 75CR1

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Departamento de
Metalurgia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial à obtenção
do título de Engenheiro
Metalurgista

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauro Clarke

Porto Alegre
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

Chefe do Departamento: Telmo Roberto Strohaecker

Laert Hochudt, Marcelo
Estudo do ensaio de correntes parasitas na
separação dos aços DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1 / Marcelo
Laert Hochudt. -- 2016.
46 f.

Orientador: Thomas Clarke.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2016.

1. ensaios não destrutivos. 2. correntes
parasitas. 3. ligas ferrosas. 4. caracterização de
materiais. I. Clarke, Thomas, orient. II. Título.

MARCELO LAERT HOCHUDT

ESTUDO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS NA SEPARAÇÃO DOS AÇOS
DIN 58CRV4 E DIN 75CR1

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado e julgado adequado do título de Engenheiro Metalurgista e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador – Prof. Dr. Thomas Clarke

Coordenador – Prof. Dr. Telmo Strohaecker

Aprovado em: __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker – UFRGS _____

Prof. Dr. Ing. Antônio Cezar Faria Vilela – UFRGS _____

Dedico este trabalho a minha
família, amigos, colegas e todos os
professores, que fizeram parte dessa etapa
da eterna busca de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Thomas Clarke pela orientação.

Ao Laboratório de Metalurgia Física, que é responsável por grande parte do conhecimento necessário para acompanhar o curso e para conceber o presente trabalho. Agradecimentos estendidos aos colegas pelo conhecimento compartilhado e amizade.

Ao CNPq, FLE e SIGITEC pelo apoio financeiro durante a graduação e para realização deste trabalho.

RESUMO

A separação de ligas metálicas é um problema recorrente da indústria, que exige técnicas rápidas, confiáveis, reproduzíveis e, acima de tudo, não destrutivas. Lotes de componentes idênticos fabricados de ligas ferrosas distintas, DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1, foram misturados. O ensaio de correntes parasitas foi sugerido como uma técnica não destrutiva adequada para a separação sistemática dos componentes. Neste trabalho, uma amostra de cada componente foi inspecionada pelo ensaio de correntes parasitas, selecionando os parâmetros adequados para o problema apresentado. Em seguida, foram obtidas amostras dos componentes, cujos materiais foram caracterizados pela composição química obtida por espectrômetro óptico; pela microestrutura, revelada por técnica metalográfica; e pela dureza e microdureza, medida em durômetros Brinell e Vickers. Os resultados foram relacionados ao comportamento dos materiais no ensaio de correntes parasitas, a fim de oferecer uma explicação sobre a possibilidade de aplicação dessa técnica.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo. Correntes parasitas. Ligas ferrosas. Caracterização de materiais.

ABSTRACT

The separation of metallic alloys is a recurrent problem in industry, which requires techniques that are fast, reliable, reproducible and, most importantly, nondestructive. Batches of identical components manufactured from different ferrous alloys, DIN 58CrV4 and DIN 75Cr1, were mixed. The eddy current testing was suggested as an adequate nondestructive technique for the systematic separation of the components. In this work, a sample from each component was inspected by the eddy current testing by selecting the optimal parameters for the presented problem. In the next step, samples were obtained from the components, which materials were characterized from the chemical composition obtained by the optical spectrometer; from the microstructure revealed by metallographic technique; and from the hardness, as measured in Brinell and Vickers scales. The results were related to the behavior of the materials in the eddy current inspection, in order to draw an explanation about the application possibility of this technique.

Keywords: Nondestructive testing. Eddy currents. Ferrous alloys. Materials characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Representação dos três efeitos – (a), (b) e (c) – da magnetização na relação entre a intensidade do campo magnético H e a densidade de fluxo magnético B	4
Figura 2.2	Curva de histerese demonstrando as principais propriedades magnéticas.	5
Figura 2.3	Variação da permeabilidade magnética μ e a força coerciva H_C com o teor de carbono. Linha contínua se refere ao eixo da permeabilidade, linha tracejada se refere ao eixo da força coerciva.	6
Figura 2.4	Variação da força coerciva H_C com a dureza Rockwell C HRC para a família de aços AISI 1000.	7
Figura 2.5	Ilustração do fenômeno de geração das correntes parasitas. A corrente alternada flui pelo fio da bobina, gerando um campo magnético primário, que por sua vez induz as correntes parasitas. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário, que interage com o campo primário.	9
Figura 2.6	Circuito equivalente simplificado (a) de uma sonda de correntes parasitas e a amostra a ser inspecionada. As figuras (b) a (d) representam diagramas de impedância para três condições do circuito equivalente.	10
Figura 2.7	Representação do sinal obtido no plano de impedância.	10
Figura 2.8	Profundidades de penetração padrão em função das frequências utilizadas no ensaio de correntes parasitas para vários materiais com diferentes condutividades elétricas.	12
Figura 3.1	Componentes fabricados nos aços DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1 utilizados no estudo. As tarjas pretas estão presentes para preservar a marca dos componentes.	16
Figura 3.2	Esquema de obtenção das amostras a partir dos componentes.	17
Figura 3.3	Ensaio de correntes parasitas sendo realizado nos componentes estudados. .	18
Figura 4.1	Resultado o ensaio de correntes parasitas nos componentes antes da amostragem. Os parâmetros da análise são frequência de 10 kHz, fase de $177,7^\circ$ e ganho de 19,0/44,4 dB.	21
Figura 4.2	Ensaio de correntes parasitas em diferentes pontos de espessura e variável ($e_1 > e_2 > e_3$), demonstrando o efeito da espessura na curva lissajous do plano de impedância.	22
Figura 4.3	Comparação gráfica da dureza Brinell média para os dois aços estudados, juntamente com a dispersão dos 5 (cinco) valores medidos.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Vantagens e desvantagens das correntes parasitas como ensaio não destrutivo..	15
Tabela 4.1	Comparação do teor de elementos químicos chave para a microestrutura e propriedades dos aços 58CrV4 e 75Cr1, obtidos por espectrometria de emissão atômica a arco (* <L.D. – abaixo do limite de detecção).....	23
Tabela 4.2	Micrografias do aço 58CrV4 em nital 2% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).	25
Tabela 4.3	Micrografias do aço 75Cr1 em nital 2% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).	26
Tabela 4.4	Micrografias do aço 58CrV4 em picral 4% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).	27
Tabela 4.5	Micrografias do aço 75Cr1 em picral 4% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).	28
Tabela 4.6	Micrografias dos aços 58CrV4 e 75Cr1 em nital 2% mostrando a camada superficial com dureza superior, acompanhado do valor de dureza Vickers obtido por microdurômetro. A dureza do núcleo, para as duas ligas, estava em torno dos 230 HV.	29
Tabela 4.7	Resultado da medição de dureza Brinell.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

σ	condutividade elétrica em siemens por metro [S/m];
B	densidade de fluxo magnético em tesla [T];
HV	dureza Vickers;
ECP	ensaio de correntes parasitas;
H_C	força coerciva;
f	frequência de um circuito elétrico em corrente alternada em hertz [Hz];
Z_0	impedância elétrica em ohm [Ω];
L_0	indutância elétrica em henry [H];
I_0	intensidade de corrente elétrica em ampère [A];
H	intensidade do campo magnético em ampère por metro [A/m];
M	magnetização [A/m];
B_S	magnetização de saturação;
B_R	magnetização remanescente;
μ	permeabilidade magnética [H/m];
X_0	reatância elétrica em ohm [Ω];
R_0	resistência elétrica em ohm [Ω];
ρ	resistividade elétrica em ohm-metro [$\Omega.m$];
χ_m	susceptibilidade magnética;
V_0	voltagem em volt [V].

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	1
2.0	REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1	Propriedades magnéticas das ligas ferrosas	2
2.1.1	Curva de magnetização	3
2.1.2	Relação entre a microestrutura e as propriedades magnéticas ...	5
2.1.3	Relação entre as propriedades magnéticas e outras propriedades	7
2.2	Ensaio de correntes parasitas	8
2.2.1	Histórico	8
2.2.2	Princípios do ensaio	8
2.2.3	Interpretação dos resultados	10
2.2.4	Fatores de influência	11
2.2.5	Aplicações	14
2.2.6	Vantagens e limitações	15
3.0	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	Obtenção de amostras	16
3.2	Ensaio de correntes parasitas (ECP)	17
3.3	Análise química	18
3.4	Metalografia.....	19
3.5	Dureza.....	19
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1	Ensaio de correntes parasitas (ECP)	21
4.2	Análise química	23
4.3	Metalografia.....	24
4.4	Dureza.....	30
5.0	CONCLUSÕES	31
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	31
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1.0 INTRODUÇÃO

O problema da separação de ligas metálicas segundo sua composição é recorrente entre fabricantes que trabalham com ligas similares. Na indústria, muitas vezes ocorre mistura de produtos com características físicas parecidas, porém com composição diferente, que exige técnicas confiáveis, rápidas e reprodutíveis de separação. A motivação para tal separação pode ser diversa: composições mais nobres de materiais, propriedades diferentes que se adequam para aplicações distintas, rastreamento de lotes, entre outras.

Os ensaios não destrutivos (ENDs) representam uma boa alternativa no que se refere a análises que não danifiquem no material, o que é especialmente desejável em relação a produtos acabados que são virtualmente idênticos, mas fabricados de ligas distintas, que é o caso específico tratado no presente trabalho.

Uma empresa de equipamentos agrícolas da Região Metropolitana de Porto Alegre surgiu com o problema de mistura de produtos com aparência física idêntica e composição diferente. O objetivo era separar 470 peças fabricadas dos aços DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1 de uma forma rápida, confiável e reprodutível. Dentre os numerosos ENDs disponíveis, foi sugerido o ensaio de correntes parasitas (ECP), que possui um bom histórico em separação de ligas (BADADZHANOV et al., 1995; MENDES 2009).

Os objetivos do presente trabalho são:

- consolidar o ensaio de correntes parasitas como uma técnica não destrutiva eficiente para a separação de ligas metálicas ferrosas;
- investigar o comportamento das correntes parasitas através da análise das propriedades magnéticas e sua relação com a microestrutura e outras propriedades dos materiais envolvidos.

Para tanto, o ensaio de correntes parasitas foi realizado em componentes fabricados nos dois tipos de aços estudados, selecionando os parâmetros para o tipo de análise. Em seguida foi realizada caracterização do material em relação a sua composição química, microestrutura e propriedade mecânica (dureza).

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Propriedades magnéticas das ligas ferrosas

Em geral, as propriedades magnéticas dos materiais são definidas através da relação que estes apresentam com um campo magnético externo. Os campos magnéticos são definidos por vetores, a intensidade de campo magnético H se refere a um campo externo, enquanto a densidade de fluxo magnético B se refere à intensidade do campo interno a um material exposto ao campo H (CALLISTER, 2001). A intensidade e a densidade de fluxo magnético estão relacionadas de acordo com a equação (1).

$$B = \mu H \quad (1)$$

O fator μ é denominado permeabilidade magnética, que é uma propriedade específica e intrínseca ao meio exposto ao campo magnético de intensidade H . A permeabilidade magnética do vácuo μ_0 é uma constante universal cujo valor é $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, que é utilizada como comparação para definição da permeabilidade relativa do material, segundo a equação (2).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2)$$

Outro vetor característico é a magnetização M do sólido, que se relaciona aos outros vetores segundo a equação (3) e representa a contribuição no campo magnético vinda do alinhamento dos momentos magnéticos do material com o campo magnético externo.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (3)$$

Na equação (4), observa-se que a magnetização, assim como a densidade de fluxo magnético, se relaciona com a intensidade do campo. Nesse caso, o fator de proporcionalidade χ_m se denomina susceptibilidade magnética.

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

Quanto às propriedades magnéticas, os materiais podem ser classificados em (CALLISTER, 2001):

- **Diamagnéticos:** materiais fracamente atraídos por campos magnéticos, com permeabilidade relativa pouco menor que 1 e susceptibilidade magnética menor que zero.
- **Paramagnéticos:** materiais atraídos por campos magnéticos, com permeabilidade relativa pouco maior que 1 e susceptibilidade magnética maior que zero.
- **Ferromagnéticos:** materiais com permeabilidade relativa bem maior que 1 e susceptibilidade bem maior que zero. Isso é consequência da existência dos domínios magnéticos, porções do material cujos átomos estão com momentos magnéticos alinhados em uma direção comum. Ao ser aplicado um campo magnético externo, esses domínios tendem a se alinhar na direção do campo.
- **Antiferromagnéticos:** materiais cujos domínios/momentos magnéticos estão alinhados de forma antiparalela e que resulta uma magnetização nula.
- **Ferrimagnéticos:** materiais cujos domínios/momentos magnéticos estão alinhados de forma antiparalela, porém com resultante não nula, o que configura um material com magnetização residual permanente.

A maioria das ligas ferrosas é ferromagnética, isto é, seus domínios magnéticos se alinham a um campo magnético externo que esteja sendo aplicado. Cada grão monocristalino do material contém muitos domínios magnéticos, que estão aleatoriamente alinhados quando não há atuação de campo magnético externo (FARIA, 2005).

2.1.1 Curva de magnetização

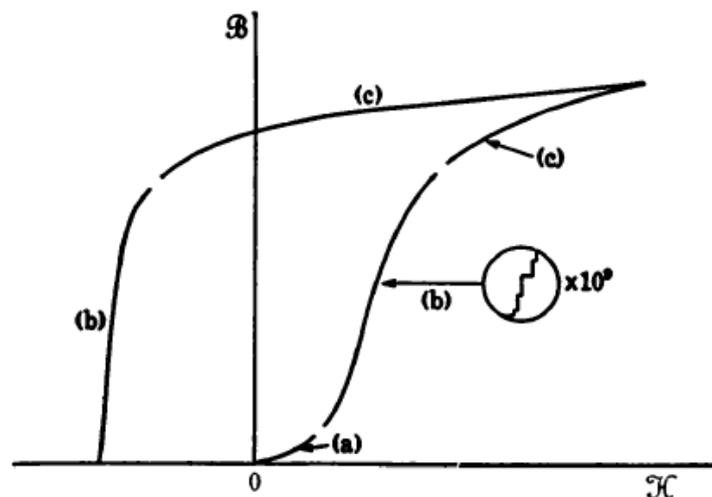
Quando não existe um campo magnético aplicado externamente a um material ferromagnético, seus domínios magnéticos estão alinhados aleatoriamente em uma das direções preferenciais do grão cristalino onde o domínio se encontra, que são a família de planos {100} nas ligas ferrosas. Ao impor um campo magnético externo, os seguintes efeitos ocorrem sucessivamente com a intensidade do campo (expresso como H):

- (a) Para pequenos valores de campo magnético, os domínios em direções mais favoráveis ao campo crescem em detrimento dos domínios menos favoráveis, resultando em uma pequena magnetização do material (expressa na densidade de fluxo B);

- (b) Com o aumento do campo magnético, os momentos magnéticos de cada domínio se alinham na direção cristalográfica preferencial mais próxima à direção do campo magnético, havendo uma correlação quase linear crescente entre H e B ;
- (c) Um grande número de direções cristalográficas não está paralelo ao campo magnético externo, portanto ocorre uma sutil orientação dos momentos magnéticos ao longo dessas direções, saindo da direção cristalográfica correspondente para a direção do campo aplicado, o que resulta em pequenos incrementos de H à medida que B aumenta, até alcançar a saturação magnética do material (MARTIN, 1967).

A Figura 2.1 apresenta uma curva de magnetização genérica de um material ferromagnético, ilustrando os efeitos (a), (b) e (c) citados acima com o aumento da intensidade de campo magnético.

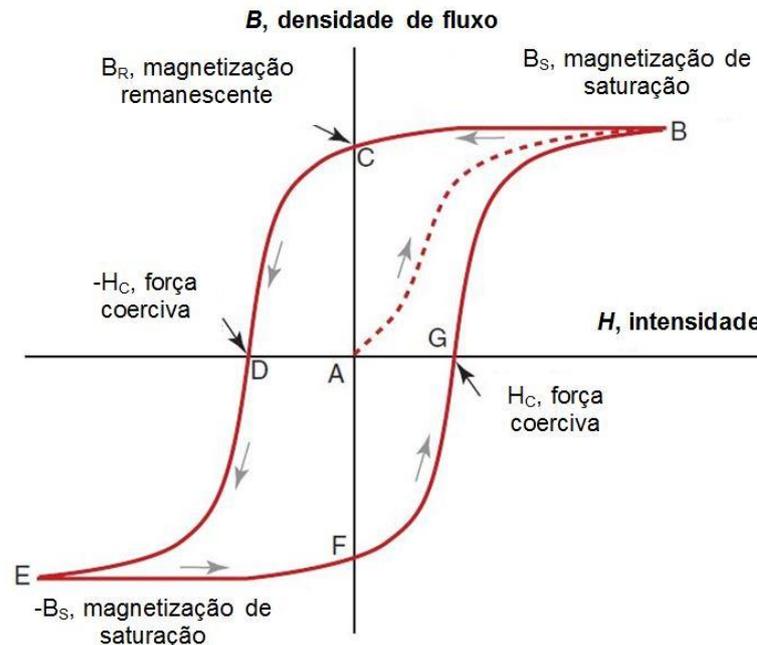
Figura 2.1 Representação dos três efeitos – (a), (b) e (c) – da magnetização na relação entre a intensidade do campo magnético H e a densidade de fluxo magnético B .



Fonte: MARTIN, 1967.

Em materiais ferromagnéticos, após atingir a saturação magnética, ocorre uma resistência à mudança na densidade de fluxo com a diminuição da intensidade do campo externo, levando a permanência de uma densidade de fluxo magnético residual no material mesmo quando a intensidade do campo é nula (BERTOTTI, 1998). A esse fenômeno se dá o nome de histerese, sendo ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 Curva de histerese demonstrando as principais propriedades magnéticas.



Fonte: ASHBY, 2007.

A partir da curva de histerese, pode-se retirar uma série de valores que definem as propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos (ASHBY, 2007). Entre eles:

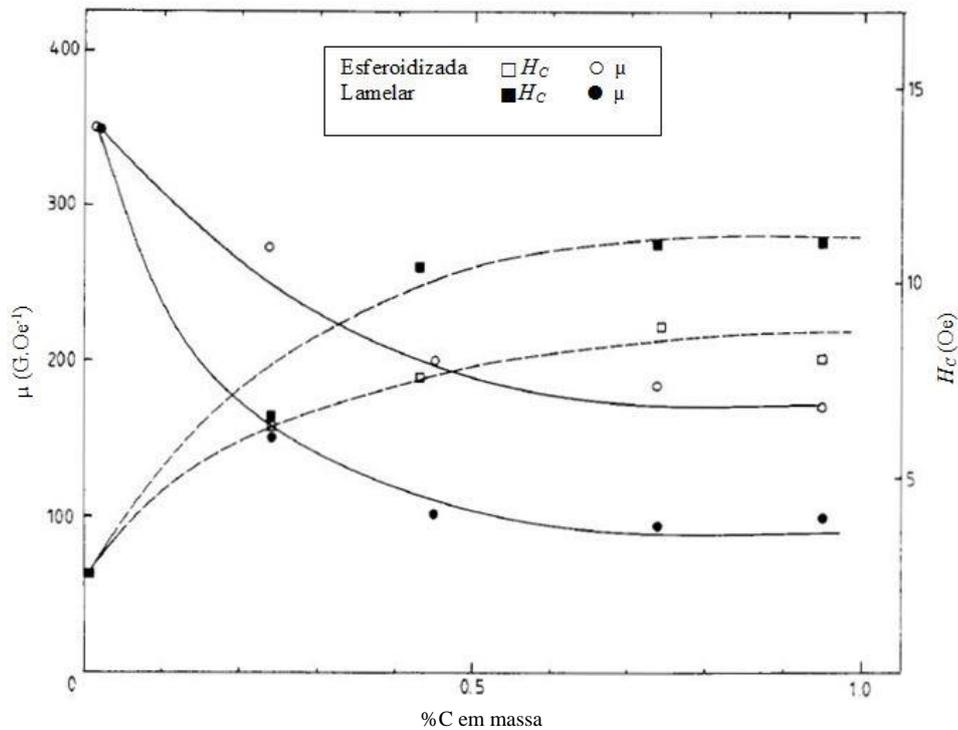
- (a) *Magnetização de saturação B_s* : o máximo valor de densidade de fluxo magnético que o material pode conter.
- (b) *Magnetização remanescente ou densidade de fluxo residual B_r* : é o valor da densidade de fluxo magnético na condição de intensidade de campo nula.
- (c) *Força coerciva ou coercividade H_C* : intensidade do campo magnético externo na qual densidade de fluxo se torna zero.

2.1.2 Relação entre a microestrutura e as propriedades magnéticas

As propriedades magnéticas dos aços são afetadas por fatores como microestrutura, tratamento térmico, composição química e condição mecânica. A presença de inclusões não magnéticas, principalmente carbonetos, causa degradação das propriedades magnéticas como redução na permeabilidade e aumento da força coerciva (JILES, 1988). Isso acontece porque essas inclusões oferecem um obstáculo à movimentação das paredes dos domínios magnéticos, que é o mecanismo por trás do alinhamento dos domínios na direção de um campo externo (KAMEDA, 1987).

Dessa forma, consegue-se estabelecer uma relação entre as propriedades magnéticas e o teor de carbono de aços carbono, como pode ser observado na Figura 2.3.

Figura 2.3 Variação da permeabilidade magnética μ e a força coerciva H_C com o teor de carbono. Linha contínua se refere ao eixo da permeabilidade, linha tracejada se refere ao eixo da força coerciva.



Fonte: JILES, 1988.

A Figura 2.3 mostra que o aumento do teor de carbono leva a um aumento da força coerciva e diminuição da permeabilidade magnética. A relação entre o teor de carbono e as propriedades magnéticas em aços é explorado por Sandovskii (2012) em seu estudo. O teor de carbono está relacionado com a presença de carbonetos (cementita), que reduz o potencial de magnetização do aço (RUMICHE, 2007).

O estudo de Khan et al. (2008) estabelece uma relação entre a geração de correntes parasitas e a porcentagem de fase perlítica no aço, para aços de baixo a médio carbono. Lembrando que a perlita é uma microestrutura constituída de lamelas intercaladas de ferro- α e cementita (Fe_3C), a última fase exerce influência nas propriedades magnéticas do material e logo nas correntes parasitas.

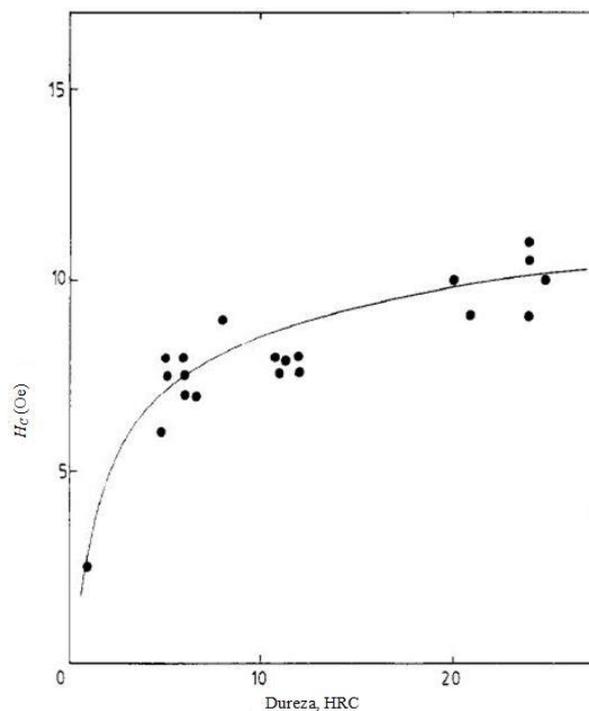
2.1.3 Relação entre as propriedades magnéticas e outras propriedades

A relação que existe entre as propriedades magnéticas e as propriedades mecânicas para ligas de alumínio é bastante conhecida e largamente aplicada na determinação da eficácia de tratamentos térmicos (ZERZOUG et al., 2004), assim como separação de ligas (MOROZOV, 2010; EGOROV, 2015; NOVÁKOVÁ, 2015). Em referências às ligas ferrosas, suas diferentes classes se comportam de maneira distinta.

Como uma consequência da relação entre as propriedades magnéticas e a composição e microestrutura dos aços, existe uma correlação entre as propriedades mecânicas e as propriedades magnéticas. Estatisticamente, a melhor correlação entre as propriedades mecânicas e magnéticas se dá ao comparar a força coerciva com o limite de escoamento ou a dureza do material, para aços estruturais de baixo a médio carbono (SWARTZENDRUBER, 1994).

A razão para isso é que o aumento da fração de carbonetos, que está relacionado ao endurecimento do material, exerce efeito de retardar o movimento das paredes dos domínios magnéticos, o que resulta em uma maior força coerciva e menor permeabilidade magnética (JILES, 1988). A Figura 2.4 demonstra a relação entre a dureza Rockwell C e a força coerciva para uma série de aços carbono da família AISI 1000.

Figura 2.4 Variação da força coerciva H_C com a dureza Rockwell C HRC para a família de aços AISI 1000.



Fonte: JILES, 1988.

2.2 Ensaio de correntes parasitas

O ensaio de correntes parasitas é um ensaio não destrutivo baseado nos princípios da indução eletromagnética, sendo utilizado para identificar e/ou classificar uma ampla gama de materiais condutores de eletricidade, segundo suas condições físicas, estruturais e metalúrgicas (ASM INTERNATIONAL, 1989).

2.2.1 Histórico

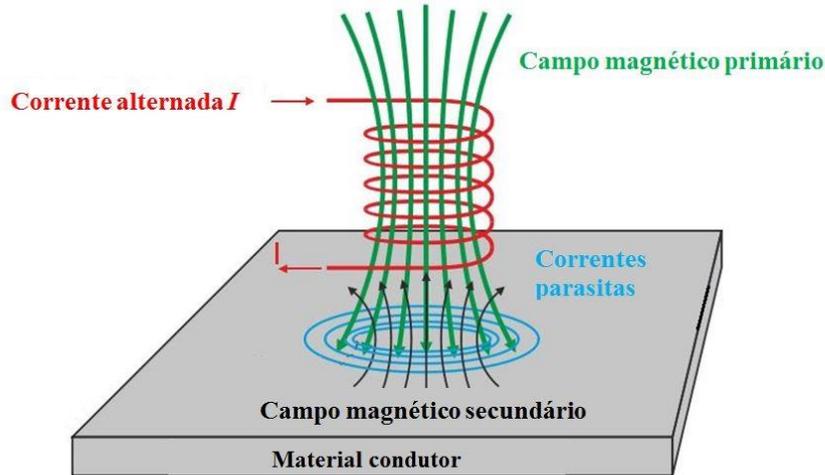
O método de inspeção por correntes parasitas figura como um dos mais antigos entre os ensaios não destrutivos. O desenvolvimento da técnica já se fazia possível desde 1820, quando Hans Christian Oersted descobriu o eletromagnetismo, e principalmente depois de 1831, quando Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética, que é base do fenômeno de correntes parasitas. Entretanto, as correntes parasitas só foram observadas por James Maxwell em 1864 e o primeiro uso para ensaios não destrutivos foi realizado em 1879 por D.E. Hughes (HELLIER, 2003).

O desenvolvimento de um ensaio não destrutivo baseado nas correntes parasitas progrediu pouco até o fim dos anos 1940, quando o Dr. Friedreich Foerster fundou o Institut Dr. Foerster, que realizou grandes progressos na instrumentação do ensaio (HELLIER, 2003). Ao fim dos anos 1960, o Instituto havia desenvolvido uma ampla linha de produtos que cobriam praticamente todas as aplicações do ensaio, além de popularizar a técnica nos Estados Unidos.

2.2.2 Princípios do ensaio

De acordo com as leis do eletromagnetismo, uma corrente elétrica que flui em um fio de material condutor tem um campo magnético associado. Quando essa corrente é alternada, o campo magnético é conseqüentemente alternado, e quando esse campo entra em contato com um material condutor, ele gera as correntes parasitas. Sabendo uma corrente elétrica induz um campo magnético que flui segundo a lei de Faraday, através da alteração do formato do fio condutor pode-se alterar o formato do campo magnético induzido e, por conseqüência, alterar como as correntes parasitas fluem no material (STEGEMANN, 1990). A Figura 2.5 ilustra o fenômeno de geração de correntes parasitas.

Figura 2.5 Ilustração do fenômeno de geração das correntes parasitas. A corrente alternada flui pelo fio da bobina, gerando um campo magnético primário, que por sua vez induz as correntes parasitas. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário, que interage com o campo primário.



Fonte: GARCÍA-MARTIN, 2011.

As correntes parasitas induzem um campo magnético secundário, que interage com o primário, alterando a impedância da bobina. Todas as bobinas são caracterizadas por sua impedância Z_0 , que é um número complexo que representa a razão entre a voltagem e a corrente (V_0/I_0) para um sistema de corrente alternada de frequência f (GARCÍA-MARTIN, 2011). A impedância pode ser calculada de acordo com as seguintes relações:

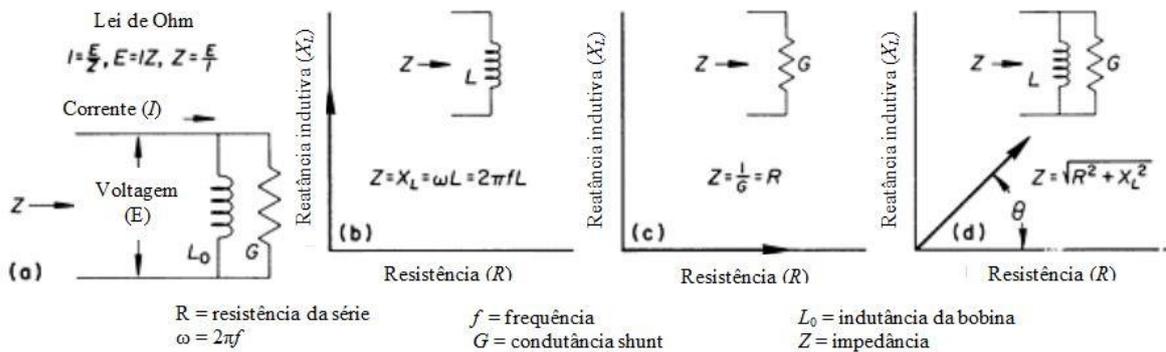
$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = R_0 + jX_0 = R_0 + j2\pi fL_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = |Z|_{\varphi} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan 2(X_0/R_0) \quad (6)$$

O ensaio de correntes parasitas pode ser visto como um circuito elétrico equivalente, que consiste de uma associação em série entre um indutor de indutância L_0 e uma resistência de condutância G . A Figura 2.6 ilustra esse circuito.

A Figura 2.6a representa o circuito equivalente do ensaio de correntes parasitas como uma associação em série entre a sonda e amostra. As Figuras 2.6b a 2.6d apresentam os diagramas de impedância para três situações do circuito equivalente: (b) quando apenas a sonda está presente; (c) quando apenas a amostra está presente e (d) quando ambas sonda e amostra estão presentes (ASM INTERNATIONAL, 1989).

Figura 2.6 Circuito equivalente simplificado (a) de uma sonda de correntes parasitas e a amostra a ser inspecionada. As figuras (b) a (d) representam diagramas de impedância para três condições do circuito equivalente.

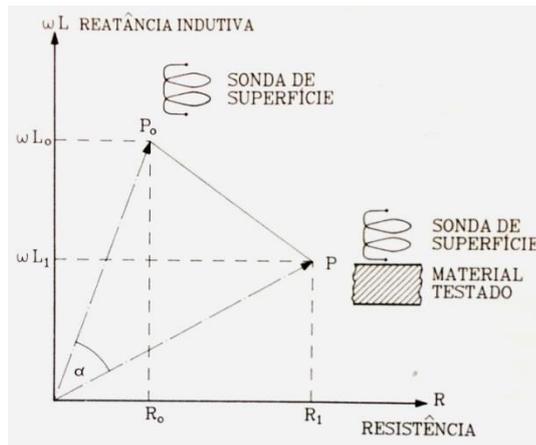


Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1989.

2.2.3 Interpretação dos resultados

O plano de impedância é o método mais comum de representação da interação entre o campo primário da bobina e o campo secundário das correntes parasitas, pois essa interação resulta em diminuição da parte imaginária da impedância da bobina (STEGEMANN, 1990). A Figura 2.7 ilustra a variação de impedância em duas situações do ensaio de correntes parasitas: na ausência do material testado e na presença do mesmo.

Figura 2.7 Representação do sinal obtido no plano de impedância.



Fonte: STEGEMANN, 1990.

A curva formada pela movimentação do ponto P_0 ao ponto P é dependente de uma série de fatores individuais que se combinam. Esses fatores que determinam a forma da curva no plano de impedância, assim como a posição do ponto P serão discutidos nas próximas seções (STEGEMANN, 1990). Esse tipo de curva, cujo traçado depende de vários fatores atuando sobre a posição dos pontos que a compõe, é dado o nome de *lissajous*, apresentando um aspecto elíptico.

2.2.4 Fatores de influência

Frequência

O ensaio de correntes parasitas é realizado em frequências entre 50 Hz e 10 MHz, embora a maioria das aplicações lide com os extremos dessa escala (HELLIER, 2003). Para baixas frequências a profundidade de penetração das correntes parasitas é grande e a densidade de correntes parasitas é pequena, enquanto que para altas frequências as correntes se concentram na superfície da amostra (STEGEMANN, 1990).

Dessa forma, a profundidade de penetração é altamente dependente da frequência da corrente alternada na bobina, assim como a condutividade elétrica. Como a frequência é um fator ajustável do equipamento de correntes parasitas, a seleção da frequência define uma penetração adequada para determinada aplicação, sendo para isso usada a equação de profundidade de penetração (HELLIER, 2003).

A profundidade em que a densidade das correntes parasitas é 36,8% da densidade na superfície é definida como profundidade de penetração padrão (ASM INTERNATIONAL, 1989). Na Figura 2.8 observa-se um diagrama que mostra a relação entre a frequência e a profundidade de penetração para alguns materiais, o que serve como ponto de partida para a seleção da frequência ideal para cada tipo de análise desejada no ensaio de correntes parasitas (HELLIER, 2003).

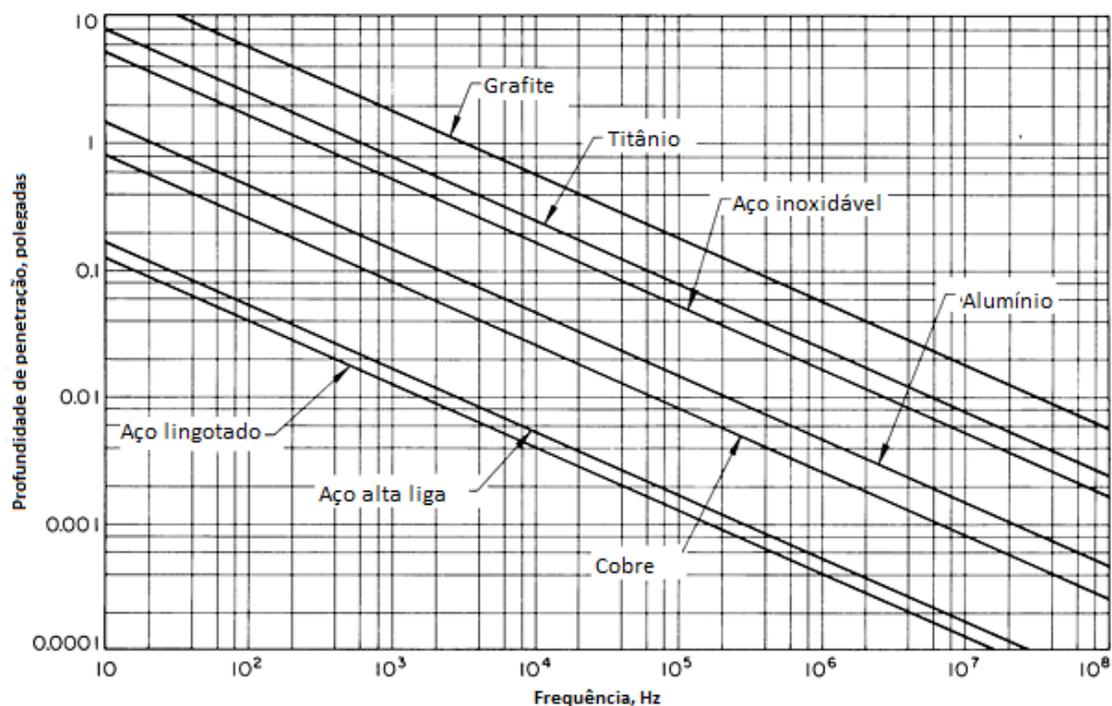
Condutividade elétrica

Todos os materiais apresentam uma resistência característica ao fluxo de uma corrente elétrica, que é definida pela resistividade elétrica (ρ), medido em Ω/m (ohm por metro). O recíproco deste valor é definido como a condutividade elétrica (σ), que é medido em S/m (siemens/metro). O sistema de medida de condutividade IACS (*International Annealed Copper Standard*) é frequentemente utilizado no contexto do ensaio por correntes parasitas, atribuindo 100% de condutividade para um padrão de cobre puro e recozido e sendo a condutividade dos outros metais uma porcentagem sobre esse padrão (ASM INTERNATIONAL, 1989).

O ensaio de correntes parasitas exige que o material tenha alta condutividade elétrica, i.e. que o material seja condutor, o que se aplica para a maioria dos metais e suas ligas. Quanto maior a condutividade, maior será a sensibilidade para descontinuidades superficiais,

porém menor será a penetração das correntes parasitas no material. Isso se dá porque à medida que o campo magnético da bobina se expande, a voltagem é induzida primeiro na superfície e depois na subsuperfície. Em materiais de alta condutividade, um fluxo de correntes parasitas relativamente grande se desenvolve, induzindo um forte campo magnético, que cancela em grande parte o fluxo primário da bobina. Porque o fluxo primário é enfraquecido, ele não é capaz de induzir correntes parasitas em profundidades maiores (HELLIER, 2003).

Figura 2.8 Profundidades de penetração padrão em função das frequências utilizadas no ensaio de correntes parasitas para vários materiais com diferentes condutividades elétricas.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 1989.

Um material não apresenta condutividade constante se um dos fatores estiverem presentes (HELLIER, 2003):

- Variações de composição química;
- Processamento mecânico, que principalmente a frio induz distorções que causam mudanças de condutividade;
- Processamento térmico;
- Variações de espessura em camadas galvanizadas ou cladeadas;
- Variações de temperatura, já que a condutividade decresce com o aumento da temperatura;

- Tensões residuais não aliviadas, que causam variações imprevisíveis na condutividade.

Permeabilidade magnética

Como discutido anteriormente, a maioria das ligas ferrosas, assim como algumas ligas de níquel e cobalto, são ferromagnéticas, tendendo a concentrar o fluxo de um campo magnético. A permeabilidade magnética é uma propriedade que varia apenas em materiais ferromagnéticos, cujo valor não é constante e depende da magnitude do campo magnético que está sendo aplicado (ASM INTERNATIONAL, 1989). Em relação ao material, o valor da permeabilidade magnética é definido pela composição, microestrutura e dureza (BLITZ, 1987).

À medida que a permeabilidade magnética aumenta, ruídos resultantes de variações de permeabilidade se tornam mais intensos, podendo até mascarar o sinal obtido, sendo este efeito mais pronunciado em maiores profundidades. Por consequência, a permeabilidade limita a profundidade de penetração das correntes parasitas (HELLIER, 2003).

Distância da amostra (*Lift-off*)

Como a densidade de fluxo diminui exponencialmente com a distância entre a amostra e a sonda, também chamada de *lift-off*, há um impacto significativo na sensibilidade da técnica para diferentes *lift-offs* (HELLIER, 2003). À medida que o *lift-off* aumenta, o acoplamento indutivo entre a sonda e a amostra diminui (menos o campo magnético alcança a amostra) e a impedância da sonda se aproxima ωL_0 , a impedância do espaço livre (SHULL, 2002).

Fatores geométricos da amostra

Em relação ao comportamento das correntes parasitas no material, dois efeitos originados de fatores geométricos da amostra a ser analisada são importantes: o efeito pelicular (*skin effect*) e o efeito de borda (*edge effect*).

As correntes parasitas presentes na amostra geram um campo magnético secundário, contrário ao campo primário da sonda. A interação entre esses dois campos faz o fluxo magnético diminuir, o que limita a profundidade de penetração ao concentrar as correntes parasitas na superfície da amostra. A esse efeito se dá o nome de *efeito pelicular* ou *skin effect*, que também pode ser explicado pela concentração superficial de correntes parasitas que agem como uma “blindagem” ao campo magnético primário (STEGEMANN, 1990). Esse

efeito explica o fato do ensaio não ser adequado para análises volumétricas de amostras de maior espessura (HELLIER, 2003).

O *efeito de borda* ou *edge effect* se explica da seguinte forma: quando a sonda se aproxima de um dos cantos da amostra, o fluxo de correntes parasitas é distorcido, causando uma alteração bastante significativa no sinal, o que limita a inspeção em regiões nos extremos da amostra (ASM INTERNATIONAL, 1989).

2.2.5 Aplicações

As aplicações do ensaio de correntes parasitas podem ser subdivididas entre técnicas que envolvem a medição de uma diferença de propriedade física, detecção de descontinuidades, medição de espessura, técnicas que envolvem medição de parâmetros relativos a condutividade (p.ex. dureza) e técnicas que envolvem mudança de permeabilidade em materiais ferromagnéticos (MIX, 2005). A seguinte lista sumariza as algumas aplicações típicas do ensaio:

- Detectar e determinar a severidade de descontinuidades superficiais;
- Determinar avaliar integridade de tubulações com e sem costura através de medição de perda de parede, corrosão intergranular, trincas na solda, etc.;
- Medir espessura de camadas. Medir camadas não condutoras em materiais condutores ou camadas não magnéticas sobre magnéticos;
- Determinar proporção de misturas em metalurgia do pó, assim como o grau de sinterização;
- Determinar a dureza e profundidade de camada de endurecimento superficial;
- Determinar o efeito de redução de espessura por corrosão em tubos e vasos;
- Separar ligas metálicas;
- Separar materiais metálicos segundo sua microestrutura;
- Medir condutividade elétrica;
- Determinar condição de tratamento térmico, grau de recozimento e efeitos de envelhecimento;
- Determinar o teor de carbono em aços;
- Determinar a composição química de materiais ferromagnéticos através da permeabilidade, assim como o efeito de tratamento térmico na permeabilidade.

2.2.6 Vantagens e limitações

A versatilidade do ensaio de correntes parasitas pode ser vista ao mesmo tempo como vantagem e limitação (ASM INTERNATIONAL, 1989). O ensaio se adapta a vários problemas de inspeção, desde que as características físicas do material sejam compatíveis com cada método, o que é visto como vantagem. Porém, em certas aplicações, a sensibilidade do método a propriedades e características do material pode ser considerada uma desvantagem; variáveis do material que não são importantes para avaliação da integridade do componente podem gerar sinais que mascaram as variáveis que são importantes ou podem ser interpretadas como variáveis críticas. A Tabela 2.1 sumariza as vantagens e desvantagens associadas ao ensaio de correntes parasitas.

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens das correntes parasitas como ensaio não destrutivo.

Vantagens	Desvantagens
Inspeciona condutores	Apenas inspeciona condutores
Pequenos riscos de segurança	Apenas detecção superficial e sub-superficial
Inspeção rápida	Sensibilidade a uma ampla gama de parâmetros aumenta a complexidade da interpretação
Sensibilidade a um grande número de parâmetros relacionados à condutividade, permeabilidade magnética e geometria (p. ex. defeitos, espessura, camadas, dureza, proximidade e vértices)	Sensibilidade a variações de <i>lift-off</i>
Ampla faixa de temperatura de operação	Apenas sensível a trincas perpendiculares à superfície de análise
Pequeno tamanho de sonda	
Equipamento leve e portátil	
Custo relativamente baixo	
Pode ser configurado em arranjos	
Tecnologia estabelecida	

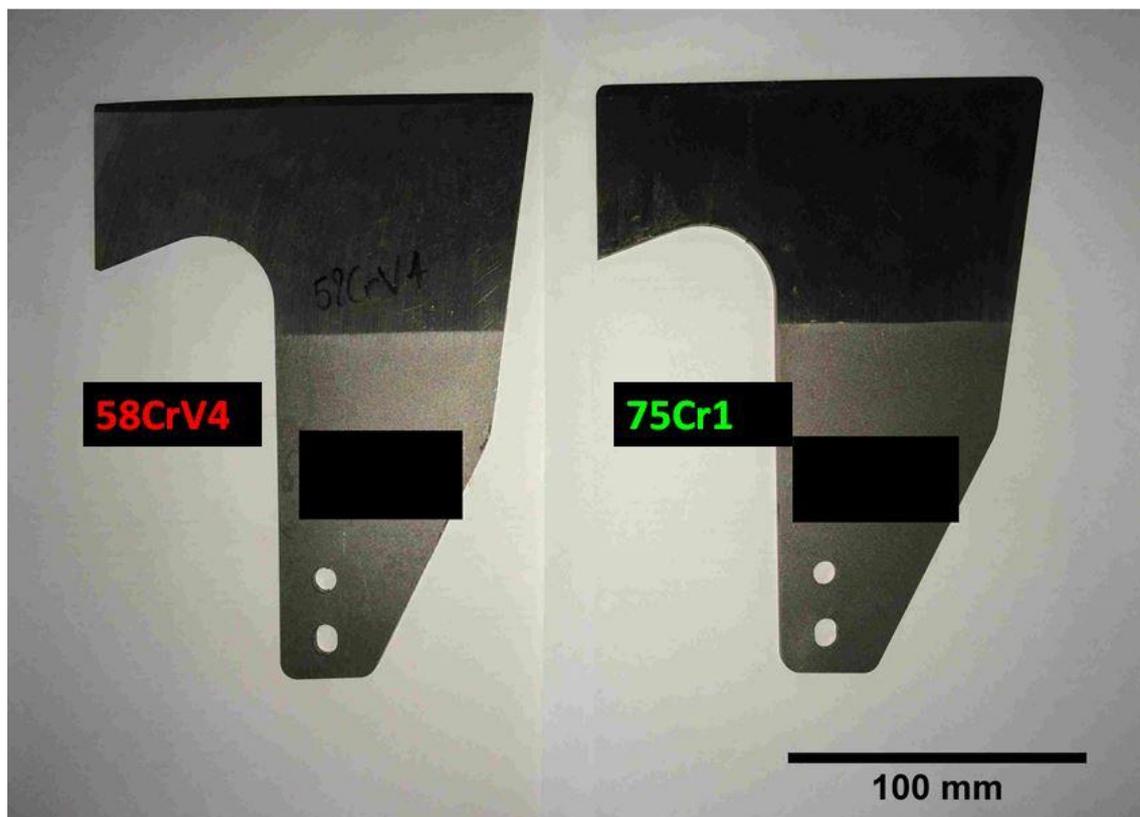
Fonte: SHULL, 2002.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção de amostras

Os componentes analisados são de elementos cortantes, fabricados nos aços DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1, como pode ser observado na Figura 3.1. Os componentes são virtualmente idênticos, não apresentando nenhuma característica visual que os diferenciem.

Figura 3.1 Componentes fabricados nos aços DIN 58CrV4 e DIN 75Cr1 utilizados no estudo. As tarjas pretas estão presentes para preservar a marca dos componentes.

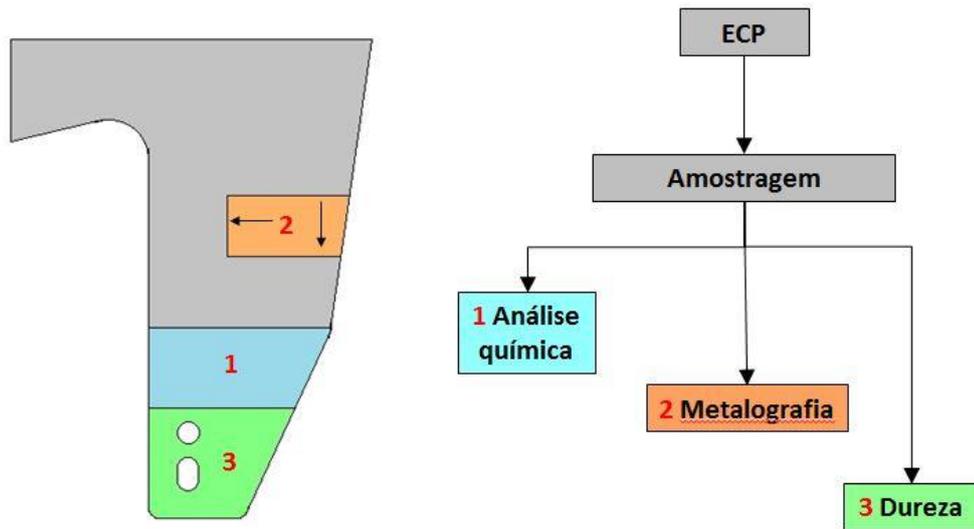


Fonte: Autor.

O mesmo procedimento de obtenção de amostras foi seguido para os dois componentes após o ensaio de correntes parasitas (ECP). Através de corte abrasivo em máquina semiautomática foram separadas as amostras destinadas para os outros ensaios de caracterização, que foram todos realizados no Grupo de Análise de Falhas (GAF) do

Laboratório de Metalurgia Física (Lamef), na UFRGS. A Figura 3.2 apresenta o esquema de obtenção das amostras seguido para as duas amostras (uma amostra de 58CrV4 e outra de 75Cr1).

Figura 3.2 Esquema de obtenção das amostras a partir dos componentes.



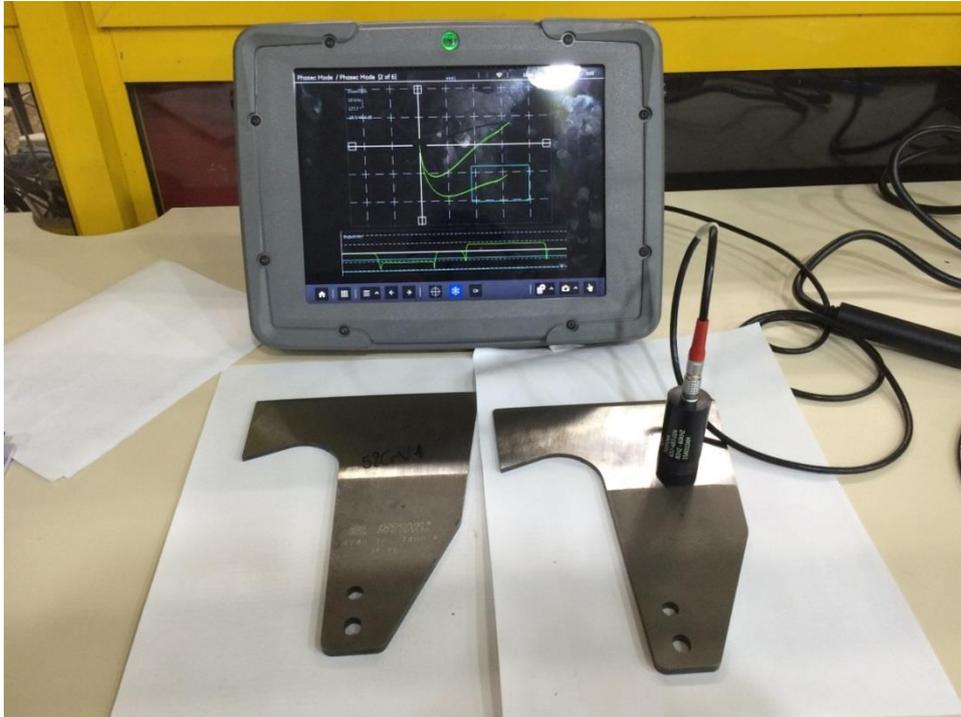
Fonte: Autor.

3.2 Ensaio de correntes parasitas (ECP)

O instrumento portátil por correntes parasitas Mentor EM da marca GE foi utilizado para realização do ensaio de correntes parasitas. O equipamento é propriedade do Grupo de Ensaio Não Destrutivos (GEND) do Lamef-UFRGS, sendo o ensaio realizado em suas dependências na Unidade Embrapii. A seleção da frequência de inspeção foi feita levando em consideração o tipo de análise, que visa diferenciar as duas ligas pelo ensaio de correntes parasitas. Para tanto, a frequência escolhida deve estar livre de fatores da superfície, como corrosão localizada, rugosidade, possíveis descontinuidades, tratamentos térmicos superficiais, entre outros.

A Figura 3.3 apresenta o ECP sendo realizado nos dois componentes pelo equipamento GE Mentor EM.

Figura 3.3 Ensaio de correntes parasitas sendo realizado nos componentes estudados.



Fonte: Autor.

Foi utilizada uma sonda absoluta GE 700P24A que inspeciona entre as frequências de 80 Hz a 60 kHz.

3.3 Análise química

A composição química dos dois aços foi obtida através de espectrometria de emissão óptica a arco, popularmente conhecido como “queima”, que permite obter informação sobre o teor de elementos químicos através do retorno de um pequeno volume de átomos do estado excitado pelo arco para o estado fundamental, onde há liberação de energia característica para cada elemento.

Os ensaios foram realizados no equipamento Spectro, calibrado com a liga AISI 1065, em amostras obtidas a partir do componente como mostrado na Figura 3.2. Foram realizadas 5 (cinco) queimas para obtenção de uma média de composição química para as duas amostras.

3.4 Metalografia

A análise metalográfica tem por objetivo revelar a microestrutura do material, confirmando ou não as hipóteses baseadas apenas na composição química, obtida no espectrômetro. Como discutido anteriormente, a microestrutura está relacionada com as propriedades magnéticas do material.

Da amostra retirada de cada componente/material, foram preparadas duas amostras em duas direções indicadas na Figura 3.2. Como convenção, a amostra relativa a direção transversal à flecha vertical à página será denominada TRANSVERSAL, enquanto a amostra transversal à flecha horizontal à página será a LONGITUDINAL.

O procedimento de preparação das amostras é muito similar ao descrito no Metals Handbook, e segue as seguintes etapas:

1. **Corte:** realizado com disco abrasivo na máquina semiautomática AROTEC Modelo COR-120.
2. **Embutimento:** para facilitar a manipulação das amostras, realizado em resina termofixa fenólica.
3. **Lixamento:** para obtenção de uma superfície plana, sucessivo em lixas de granulometria decrescente (120, 200, 320, 400, 600 e 1200) de carbetto de sílicio, sempre girando a amostra 90° até retirar as marcas deixadas na lixa anterior.
4. **Polimento:** para acabamento da superfície, com abrasivo de pasta de diamante de granulometria 4 e 1 µm, sucessivamente.
5. **Ataque químico:** para revelar aspectos da microestrutura. Foram utilizados dois reagentes: nital 2% (98 mL de álcool e 2 mL de ácido nítrico) e picral 4% (96 mL de álcool e 4 g de ácido pícrico).

Seguido o procedimento para revelação da microestrutura, as amostras foram observadas em microscópio óptico OLYMPUS conectado a um computador para o posterior processamento/tratamento das imagens.

3.5 Dureza

O ensaio de medição de dureza tem como objetivo testar as hipóteses sobre a dureza do material baseadas na sua composição química e microestrutura, que foram avaliadas nos

ensaios anteriores até então. A partir da confirmação das hipóteses, uma correlação entre as durezas e as propriedades magnéticas dos materiais será feita para explicar seu comportamento no ensaio de correntes parasitas.

O ensaio foi realizado no durômetro Wolpert na escala Brinell, com um indentador de ponta esférico de aço duro com 5 mm de diâmetro, aplicando uma carga de 127,5 kgf. Com a medição do diâmetro da indentação, juntamente com a carga e o diâmetro de indentador, foi obtido o valor de dureza a partir de uma tabela que relaciona tais parâmetros. Foram realizadas 5 (cinco) medidas em cada amostra, das quais foram retiradas a dureza média na escala HB.

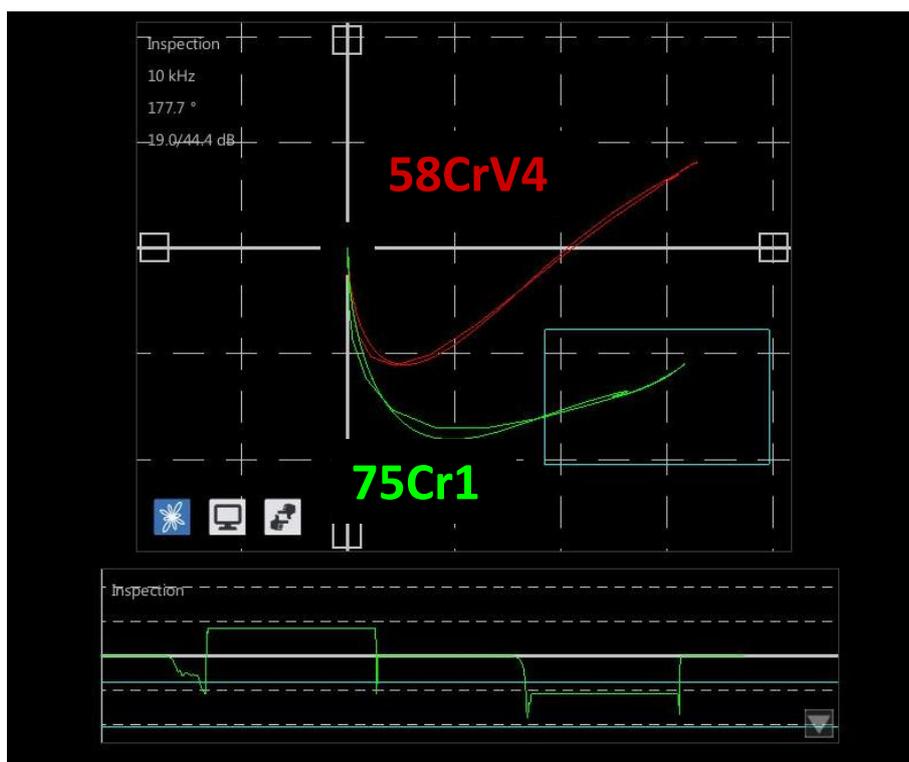
O ensaio de microdureza foi realizado no durômetro Struers Duramin na escala Vickers, com um indentador piramidal de diamante, aplicando uma carga de 9,807 N. A medição das diagonais da indentação e cálculo do valor médio, juntamente com fatores geométricos do indentador e informações sobre a carga, entra no cálculo da dureza Vickers (HV), fornecido diretamente pelo aparelho.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de correntes parasitas

O resultado do ensaio de correntes parasitas para separação dos aços 58CrV4 e 75Cr1 está apresentado na Figura 4.1. A duração do ensaio é instantânea, sendo o manuseio das peças o fator limitante para uma possível sistematização de análise, o que confirma a rapidez do ensaio de correntes parasitas em si. Pela sua pequena duração, também foi possível repeti-lo extensivamente, onde foi notada a reprodutibilidade do ensaio.

Figura 4.1 Resultado o ensaio de correntes parasitas nos componentes antes da amostragem. Os parâmetros da análise são frequência de 10 kHz, fase de 177,7° e ganho de 19,0/44,4 dB.



Fonte: Autor.

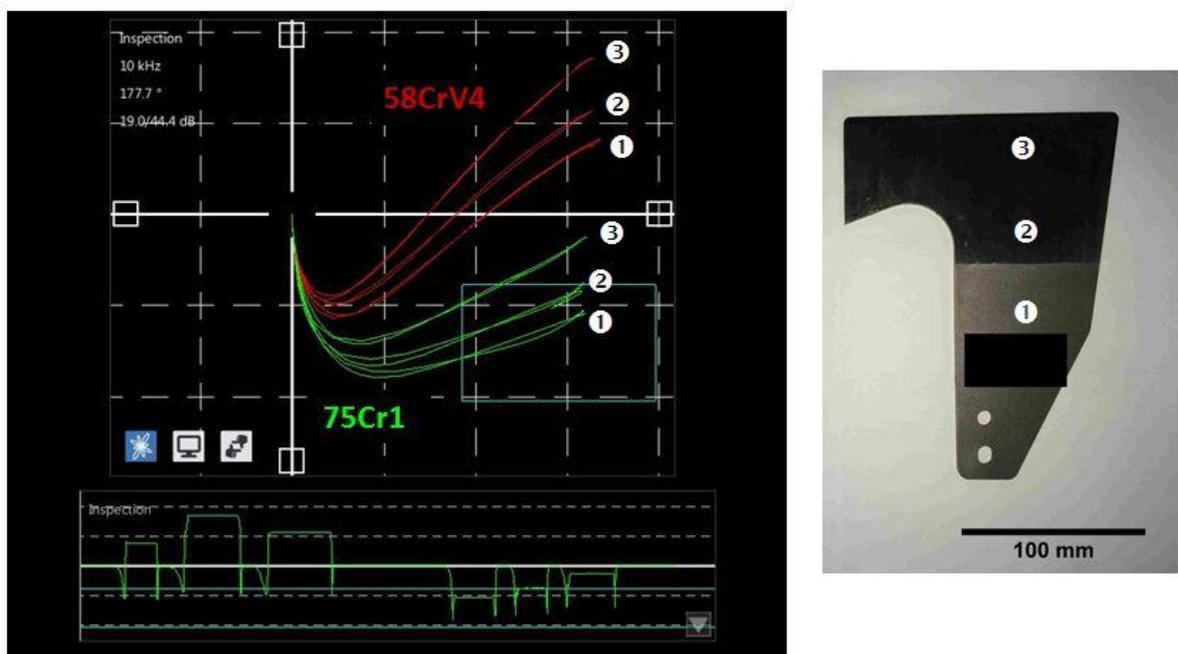
A seleção dos parâmetros do ECP foi tal que as curvas fossem distinguíveis entre si. Para tanto, foi desenhada uma janela de inspeção como auxílio. A seleção da frequência de trabalho foi o fator crítico para se obter a diferenciação entre as curvas dos materiais. Os

outros fatores, como condutividade, permeabilidade magnética, *lift-off* foram considerados constantes para a análise em questão.

Dentre a faixa de frequências possíveis de se inspecionar com a sonda GE 700P24A, a frequência de 10 kHz se mostrou adequada para o problema de separação das ligas. Relembrando a relação que existe entre a frequência e profundidade de penetração (quanto maior a frequência, mais superficiais são as correntes parasitas e vice-versa), frequências que se afastem nas duas direções resultarão em interferências que mascaram a diferenciação entre as ligas, não sendo úteis para o ensaio. Isso ocorre porque para altas frequências, as correntes parasitas são muito superficiais e sujeitas à interferência de fatores superficiais, como corrosão localizada, rugosidade, tratamentos superficiais, entre outros. Na outra direção, baixas frequências são inadequadas, pois há aumento da sensibilidade às mudanças de permeabilidade magnética (ASM INTERNATIONAL, 1989).

A Figura 4.2 apresenta como as curvas variam no plano de impedância de acordo com a espessura do componente, que é variável, pois se trata de um elemento cortante. Isso demonstra a aplicabilidade do ECP para medição de espessura de ligas ferrosas com precisão, dado um padrão de calibração. O estudo de Klyuev (1970) explora o ECP para esse fim.

Figura 4.2 Ensaio de correntes parasitas em diferentes pontos de espessura e variável ($e_1 > e_2 > e_3$), demonstrando o efeito da espessura na curva lissajous do plano de impedância.



Fonte: Autor.

4.2 Análise química

O resultado da análise química para elementos-chave da microestrutura e propriedades dos aços estudados está presente na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Comparação do teor de elementos químicos chave para a microestrutura e propriedades dos aços 58CrV4 e 75Cr1, obtidos por espectrometria de emissão atômica a arco (<L.D. – abaixo do limite de detecção).

Elemento (% em massa)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Fe
58CrV4	0,455	0,178	0,773	0,00470	0,00260	0,888	0,0299	0,142	Base
75Cr1	0,544	0,213	0,641	0,00400	0,00310	0,356	0,0326	<L.D.	Base

Como pode ser observado, teores de elementos como níquel, enxofre e fósforo não diferem entre as ligas estudadas. As diferenças se dão no que se refere ao teor de carbono e o fato de que um dos aços é levemente mais ligado que o outro. O teor de carbono mais alto para a liga 75Cr1 sugere uma dureza maior, sem considerar efeito de outros tratamentos térmicos que fazem com que a microestrutura não seja a esperada pelo diagrama de fases ferro-carbono. Em contrapartida, o aço 58CrV4 apresenta um teor levemente mais alto de elementos cromo e vanádio, que são formadores de carbonetos com efeito endurecedor.

Essa diferenciação entre as ligas pode ser vista como um equilíbrio entre a dureza aumentada pelo teor de carbono, no caso do aço 75Cr1 e a dureza aumentada por precipitação, para o aço 58CrV4. De qualquer forma, se especula que as aplicações dos elementos cortantes sejam distintas, do contrário não seria um problema misturá-las. O fato do aço 58CrV4 ser mais ligada, portanto mais cara e/ou para uma aplicação diferente, pode ser a motivação por trás da separação.

Na revisão bibliográfica, o teor de carbono figurava como elemento chave na definição das propriedades magnéticas, pois estava relacionado ao aparecimento de fases com propriedades magnéticas diferentes, como os carbonetos, que agem como barreira à movimentação das paredes dos domínios magnéticos, que é o mecanismo pelo qual a estrutura dos materiais ferromagnéticos se alinha a um campo magnético.

4.3 Metalografia

O resultado da análise da microestrutura dos aços 58CrV4 e 75Cr1 está apresentado nas figuras apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3, para revelação com nital 2% e nas figuras das Tabelas 4.4 e 4.5, para revelação com picral 4%.

Conforme a comparação entre as figuras das Tabela 4.2 e 4.3, a microestrutura de ambas as ligas se apresentou bastante refinada e similar entre si, constituída por ferrita, perlita, cementita globular e uma dispersão de carbonetos, que é mais visível para a liga 75Cr1.

As microestruturas reveladas por picral 4% se mostraram distintas entre si, como pode ser notado ao comparar as figuras das Tabelas 4.2 e 4.3 com as figuras das Tabelas 4.4 e 4.5. Os dois reagentes de revelação agem de forma diferente com a microestrutura. Enquanto o nital 2% revela a os contornos de grão ferríticos e seus constituintes, o picral 4% revela a interface entre carbonetos e a matriz (VOORT, 2004). A micrografia do aço 75Cr1 apresenta uma clara dispersão de carbonetos.

Em todas as micrografias, especialmente as que se referem às figuras das Tabelas 4.2 e 4.3, é percebido um bandeamento, provavelmente originado do processo de conformação das chapas que deram origem aos componentes.

As amostras denominadas transversais de ambas as ligas apresentavam uma modificação superficial que se estende por aproximadamente 0,1 mm, como pode ser visto na Tabela 4.6. Foi realizado ensaio de microdureza Vickers nessa camada e se observou uma dureza superior em comparação com o núcleo do material. Essa camada endurecida estava na borda do componente, sugerindo que toda a borda apresentasse endurecimento superficial.

O processo de endurecimento superficial, possivelmente uma têmpera por indução, é aplicado para aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta sem comprometer a tenacidade (capacidade de absorção de impactos sem que haja fratura).

Tabela 4.2 Micrografias do aço 58CrV4 em nital 2% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).

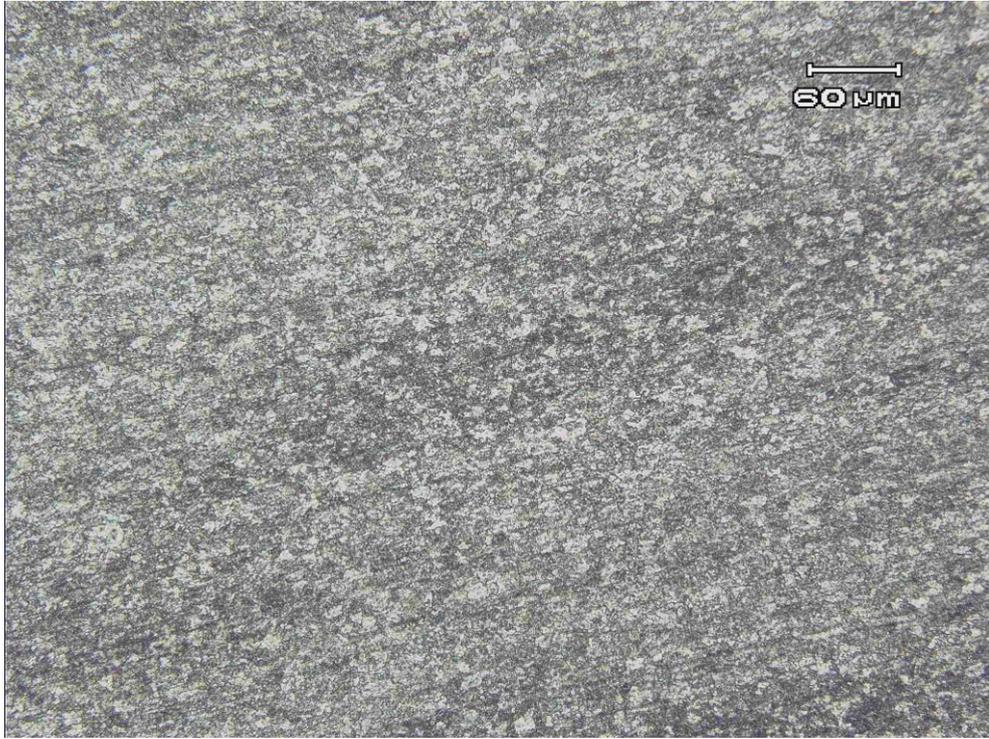
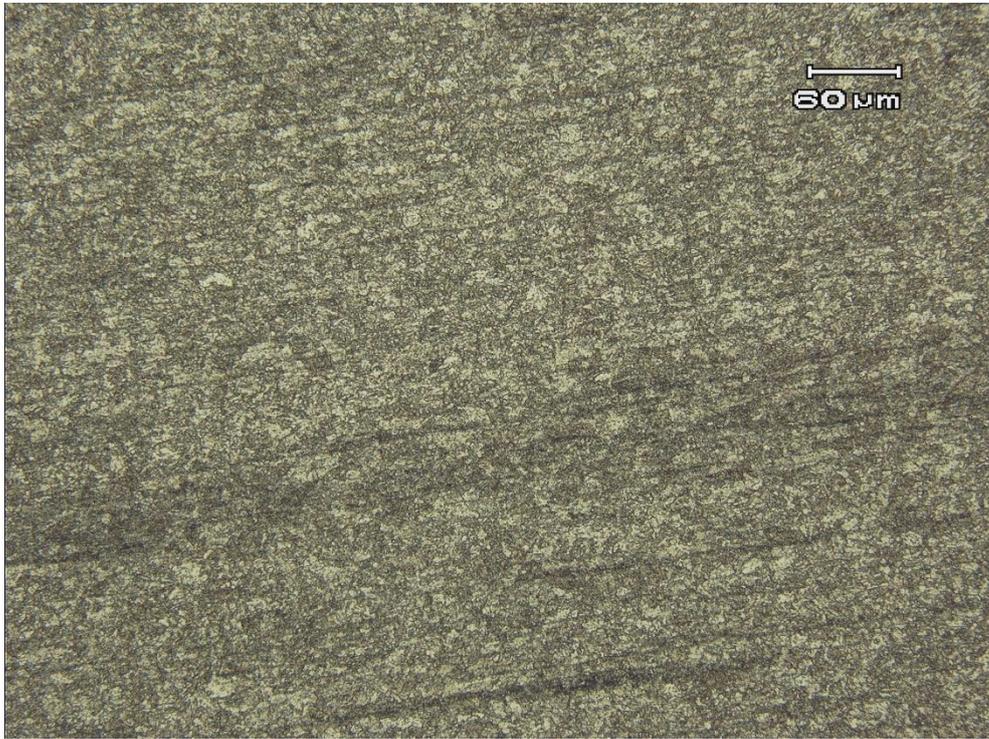
58CrV4 - nital	
Micrografia	Posição
	T
	L

Tabela 4.3 Micrografias do aço 75Cr1 em nital 2% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).

75Cr1 - nital	
Micrografia	Posição
	T
	L

Tabela 4.4 Micrografias do aço 58CrV4 em picral 4% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).

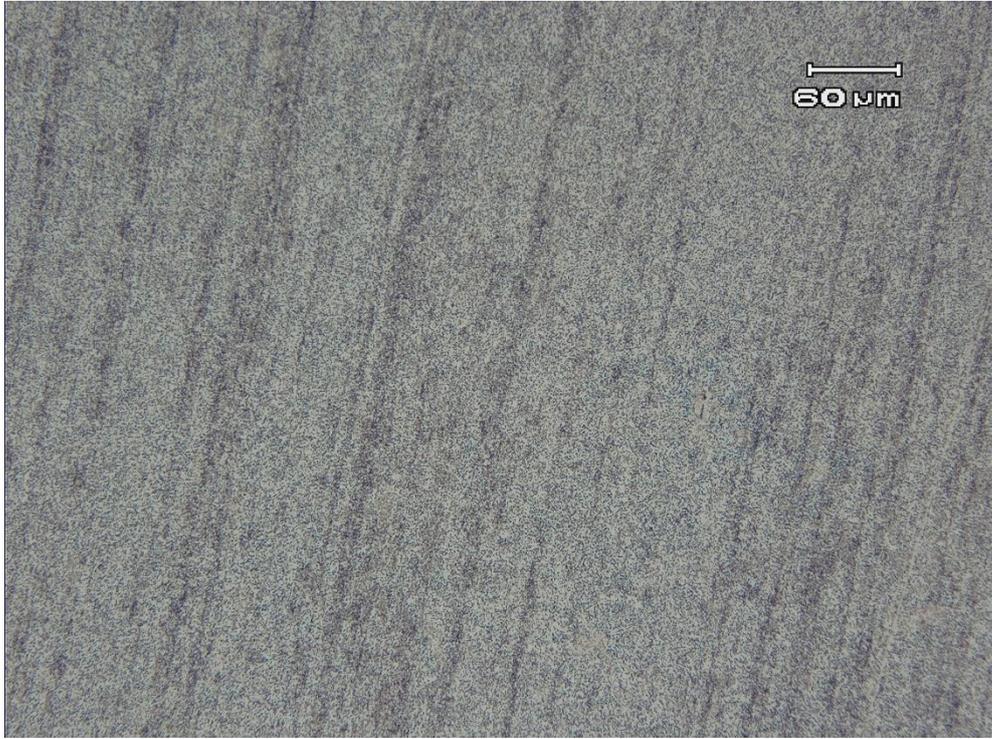
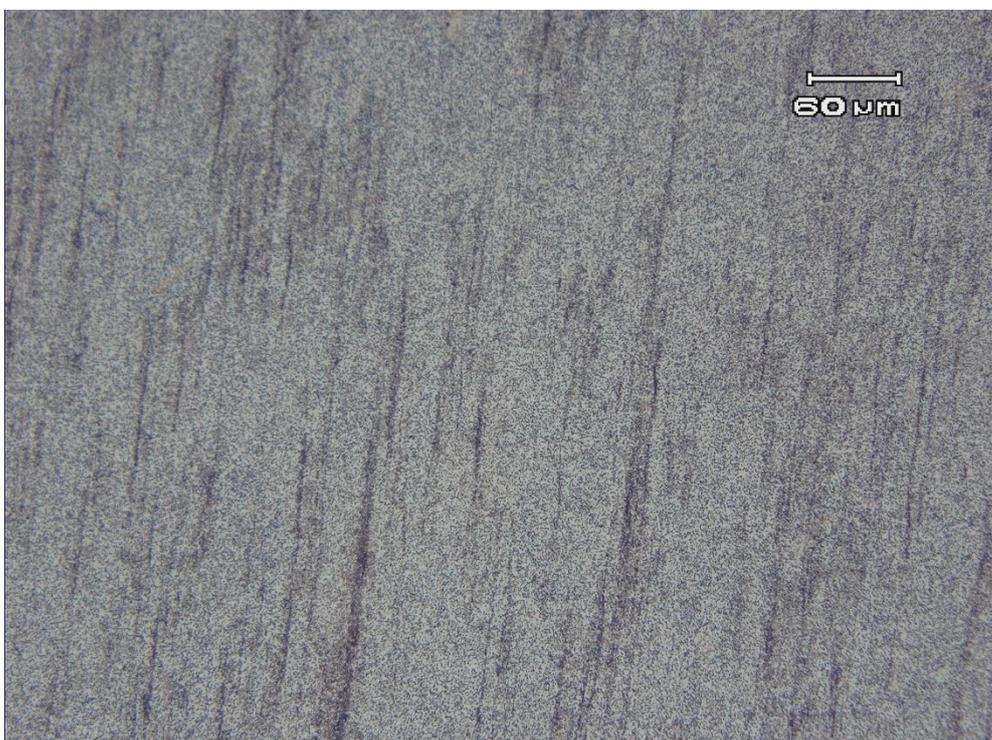
58CrV4 - picral	
Micrografia	Posição
	T
	L

Tabela 4.5 Micrografias do aço 75Cr1 em picral 4% em 200x (T – transversal; L – longitudinal).

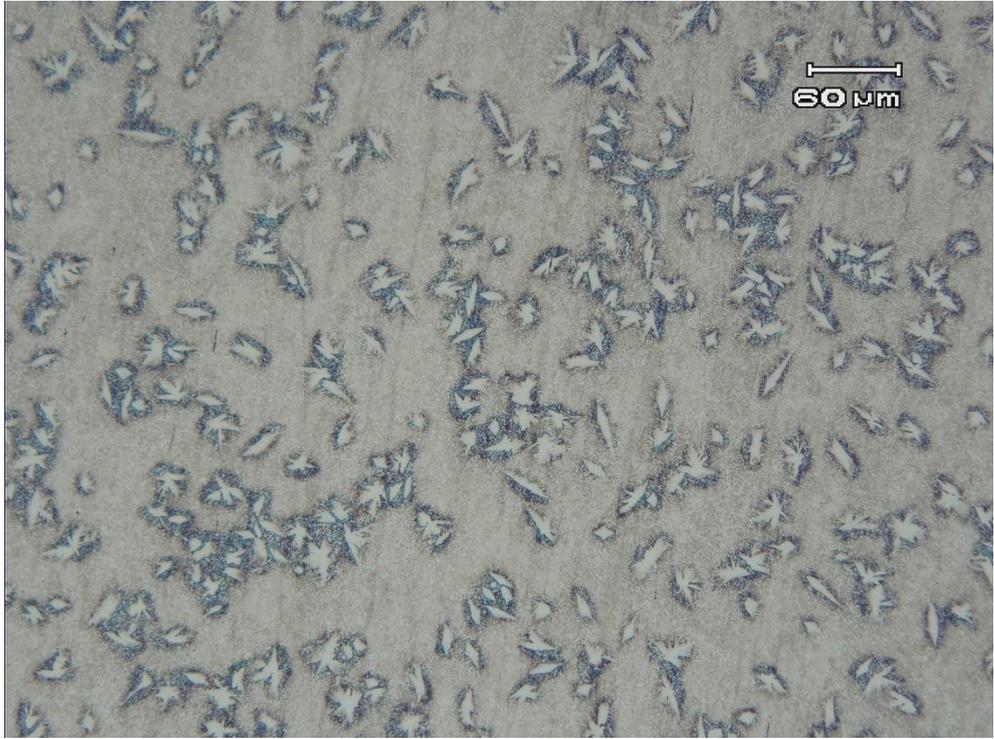
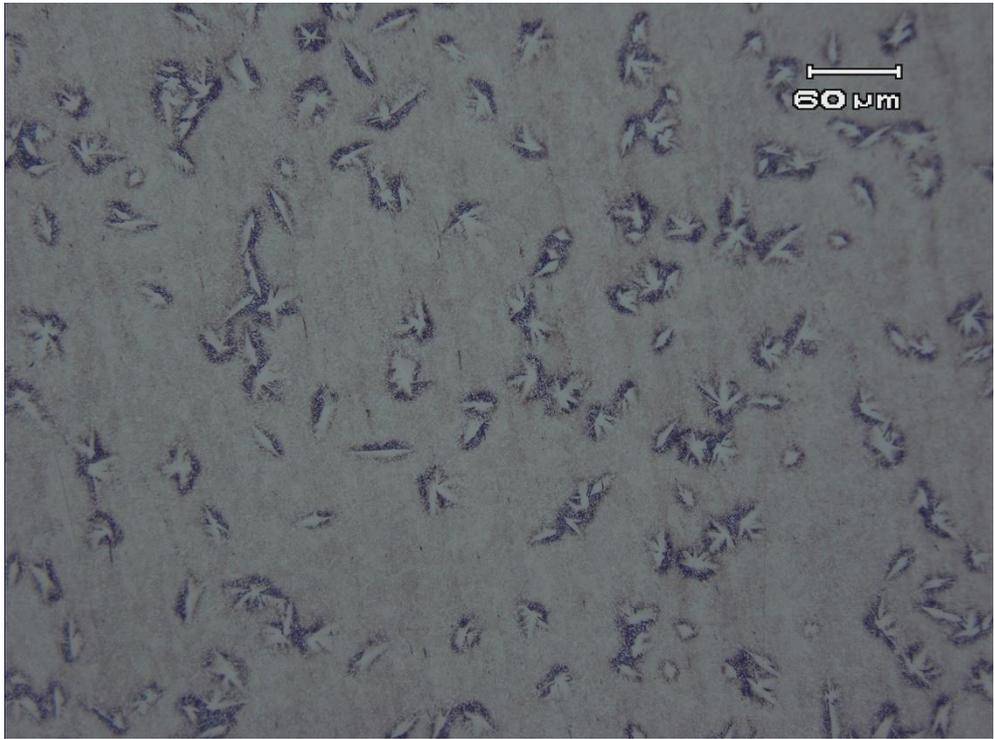
75Cr1 - picral	
Micrografia	Posição
	T
	L

Tabela 4.6 Micrografias dos aços 58CrV4 e 75Cr1 em nital 2% mostrando a camada superficial com dureza superior, acompanhado do valor de dureza Vickers obtido por microdurômetro. A dureza do núcleo, para as duas ligas, estava em torno dos 230 HV.

Material	Micrografia	Dureza Superficial (HV)
58CrV4		574,5
75Cr1		734,0

A presença de carbonetos seja na forma livre ou na forma de cementita (Fe_3C) pró-eutetoide, como parte da perlita, está associada ao teor de carbono, como prevê o diagrama de fases ferro-carbono. Como já discutido na revisão bibliográfica, especialmente em referência à Figura 2.3, o teor de carbono está relacionado com as propriedades magnéticas, pois quanto maior o teor de carbono, maior seria a presença de carbonetos em geral. A presença de tal

inclusão não magnética altera as propriedades magnéticas ao representar uma barreira à movimentação das paredes dos domínios magnéticos, que é o mecanismo pelo qual os domínios magnéticos de um material ferromagnético (como o aço) se alinham a um campo magnético externo, no caso o campo que induz as correntes parasitas.

Dessa forma, a microestrutura do aço 75Cr1 é coerente com a composição química apresentada na Tabela 4.1. O teor de carbono maior dessa liga sugere que ela apresenta uma quantidade maior de carbonetos, o que influencia em suas propriedades magnéticas. As figuras presentes da Tabela 4.5 apresentam carbonetos mais grosseiros que foram revelados pelo ataque picral. Isso possivelmente está relacionado ao revenimento para alívio de tensões que a liga foi submetido após a têmpera por indução, que causou coalescimento dos carbonetos em contraste com o aço 58CrV4, que por apresentar um teor maior de elementos cromo e vanádio, permaneceu uma microestrutura refinada e mais estável.

4.4 Dureza

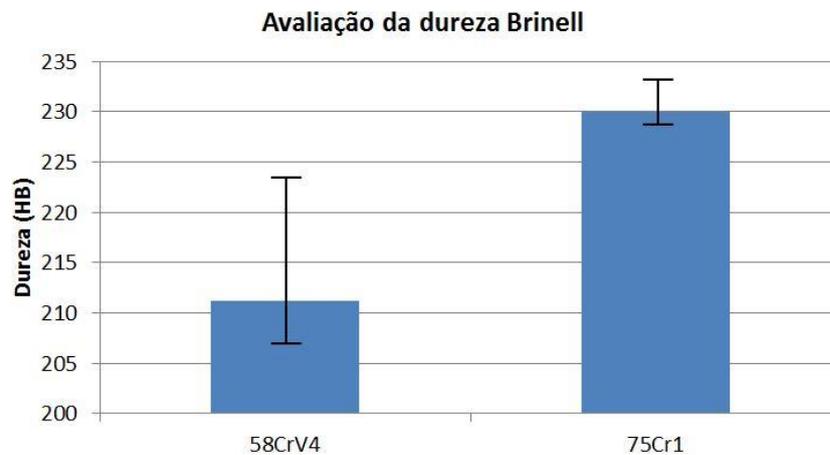
A Tabela 4.7 apresenta o resultado da medição de dureza Brinell realizado nas amostras obtidas a partir do componente, como ilustrado na Figura 3.2.

Tabela 4.7 Resultado da medição de dureza Brinell.

	Dureza Brinell (HB)
58CrV4	212,4
75Cr1	230

A Figura 4.3 apresenta uma comparação gráfica do resultado do ensaio de dureza Brinell para os dois aços estudados no presente trabalho, assim como a dispersão dos valores cuja média foi apresentada na Tabela 4.7.

Figura 4.3 Comparação gráfica da dureza Brinell média para os dois aços estudados, juntamente com a dispersão dos 5 (cinco) valores medidos.



Fonte: Autor.

A Figura 4.3 permite observar que apesar dos limites superior de dureza do aço 58CrV4 e inferior do aço 75Cr1 quase se sobreporem, o aço 75Cr1 apresenta um valor de dureza levemente superior ao da liga 58CrV4.

A dureza levemente superior da liga 75Cr1 é coerente com a sua composição química, pois havendo mais carbono é esperada uma maior dureza, devido à restrição ao movimento das discordâncias causada pelos carbonetos. Como discutido nos resultados da análise metalográfica e na revisão da literatura, os carbonetos representam barreiras à movimentação das paredes de domínios magnéticos, o que implica nas propriedades magnéticas do material.

Fazendo o paralelo entre a dureza e as propriedades magnéticas do material, como foi discutido na revisão da literatura (Figuras 2.3 e 2.4), o aço 75Cr1 apresenta menor permeabilidade magnética e maior força coerciva do que o aço 58CrV4, oferecendo mais uma base para a separação das ligas por correntes parasitas e ainda abrindo possibilidade de medição de dureza pelo ECP, se fornecido um padrão de calibração.

5.0 CONCLUSÕES

- A diferença entre as duas ligas no ensaio de correntes parasitas se refere ao aço DIN 75Cr1 (0,544% em massa de C) apresentar um maior teor de carbono que o do aço DIN 58CrV4 (0,455%), o que se relaciona com a microestrutura, na forma de carbonetos mais grosseiros para o aço 75Cr1, e com a dureza, que é levemente superior para o aço 75Cr1.
- O ensaio de correntes parasitas pode ser utilizado para separação de ligas ferrosas de composição e propriedades similares, sendo sensível a pequenas variações, além de ser um ensaio rápido, portátil, reprodutível e de baixo custo relativo.
- O comportamento do ensaio de correntes parasitas está relacionado às propriedades magnéticas do material, que por sua vez se relacionam à microestrutura e composição do aço. O aumento do teor de carbono e a consequente maior fração de carbonetos resultam em uma menor permeabilidade magnética e maior força coerciva, o que altera o comportamento das correntes parasitas.
- Além da separação de ligas, o ensaio se mostrou promissor para determinação de espessura de chapas fabricadas nas ligas estudadas, além da correlação entre dureza e propriedades magnéticas permitir medir dureza de forma não destrutiva através do ECP.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do comportamento das correntes parasitas para outras classes de aços e outras ligas ferrosas, correlacionando com a microestrutura e outras propriedades.
- Desenvolvimento de procedimento para medição de espessura de chapas de ligas 58CrV4 e 75Cr1 por correntes parasitas, através de comparação com padrões.
- Desenvolvimento de procedimento para medição de dureza por correntes parasitas.
- Avaliar o efeito de tratamentos térmicos das ligas supracitadas nas propriedades magnéticas e comportamento no ECP.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM A340**: Standard Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Testing. Philadelphia, PA, 2015.
- ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials Engineering, Science, Processing and Design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, p. 345-351.
- ASM INTERNATIONAL. Eddy Current Inspection. In: **ASM Handbook: Nondestructive Evaluation and Quality Control**. Novelt, OH: ASM International, 1989. P
- BERTOTTI, Giorgio. **Hysteresis in Magnetism for Physicists, Materials Scientists, and Engineers**. Maryland: Academic Press, 1998, p. 3-11.
- BLITZ, Jack. Eddy current testing of metals. **Materials & Design**, v. 8, n. 9, p. 340-345, Nov./Dec. 1987.
- CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 2001, p. 720-732.
- EGOROV, A. V. et al. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method. **Defence Technology**, v. 11, p. 99-103, Jan. 2015.
Disponível em: <doi:10.1016/j.dt.2014.12.002 >. Acesso em: 10 maio 2016.
- FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao Magnetismo dos Materiais**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- GARCÍA-MARTIN, J.; GÓMEZ-GIL, J.; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, E. Non-destructive techniques based on eddy current testing (Review). **Sensors**, v. 11, n. 3, p. 2525-2565, Feb. 2011.
Disponível em: < <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2525>>. Acesso em: 20 abril 2016.
- HELLIER, Charles. **Handbook of Nondestructive Evaluation**. New York: McGraw-Hill, 2003, p. 417-440.
- JILES, D. C. Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, v. 21, p. 1186-1195, Nov. 1988.
Disponível em: < <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/21/7/022/meta>>.
Acesso em: 05 junho 2016.

KHAN, S. H. et al. Pearlite determination in plain carbon steel by eddy current method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, n. 1-3, p. 316-318, Sept. 2008. Disponível em: < doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.09.003 >. Acesso em: 05 junho 2016.

KLYUEV, V. V. Measuring the thickness of steel sheets by the eddy-current method. **Measurement Techniques**, v. 13, n. 11, p. 1675-1678, Nov. 1970. Disponível em: <doi:10.1007/BF00980988>. Acesso em: 15 junho 2016.

MARTIN, D.H. **Magnetism in Solids**. Cambridge, MA: MIT Press, 1967. p. 10-12.

MENDES, G. M. **Separação de diferentes composições químicas de aço pelo método de correntes parasitas: otimização dos parâmetros de ajuste**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/18423>. Acesso em: 15 abril 2016.

MIX, Paul E. **Introduction to nondestructive testing: a training guide**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, p. 65-95.

MOROZOV, M.; TIAN, G. Y.; WITHERS, P. J. The pulsed eddy current response to applied loading of various aluminium alloys. **NDT&E International**, v. 43, n. 6, p. 493-500, Sept. 2010. Disponível em: < doi:10.1016/j.ndteint.2010.05.004>. Acesso em: 01 junho 2016.

NOVÁKOVÁ, L.; BOHÁČOVÁ, M.; HOMOLA, P. Application of material analysis and eddy current conductivity tests to aircraft accident investigation. **Engineering Failure Analysis**, v. 56, p. 422-428, Oct. 2015. Disponível em: < doi:10.1016/j.engfailanal.2014.12.011>. Acesso em: 10 junho 2016.

RUMICHE, F.; INDACOCHEA, J. E.; WANG, M. L. Assessment of the effect of microstructure on the magnetic behavior of structural carbon steels using an electromagnetic sensor. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 17, n. 4, p. 586-593, Nov. 2007. Disponível em: <doi: 10.1007/s11665-007-9184-2>. Acesso em: 06 junho 2016.

SANDOVSKII, V. A. Measurement of carbon content in iron-carbon alloy by an eddy current method. **Measurement Techniques**, v. 55, n. 3, p. 360-365, June 2012. Disponível em: < doi:10.1007/s11018-012-9965-3>. Acesso em: 06 junho 2016.

SHULL, Peter J. Eddy current. In: SHULL, Peter J. (Ed.). **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications**. New York: Marcel Dekker, 2002. cap. 5, p. 1-108.

STEGEMANN, Dieter. **Fundamentos do método de correntes parasitas**. Julich: Forschungszentrum Julich, 1990.

SWARTZENDRUBER, L. J.; ROSENTHAL, Y.; HICHO, G. E. Characterization of sheet steels in the development of on-line sensors for quality-control monitoring of mechanical properties. In: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE

CHARACTERIZATION OF MATERIALS, 6., 1994, Oahu, Hawaii. **Nondestructive Characterization of Materials VI**. New York: Springer, 1994. p. 59-69.

VOORT, G. F. V. (Ed.). **ASM Handbook: Metallography and Microstructures**. Novelty, OH: ASM International, 2004. p. 1294.

ZERZOUG, M. et al. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. **NDT&E International**, v. 37, n. 1, p. 65-72, Jan. 2004.

Disponível em: <doi:10.1016/j.ndteint.2003.09.002-3>. Acesso em: 10 junho 2016.