

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

ESTUDO DE CONFIABILIDADE E ASSERTIVIDADE NA INSPEÇÃO SUPERFICIAL
PELO MÉTODO DE CORRENTE PARASITA

Marconi Lanzarini Curtinaz

Dissertação para obtenção do título de:
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

ESTUDO DE CONFIABILIDADE E ASSERTIVIDADE NA INSPEÇÃO SUPERFICIAL
PELO MÉTODO DE CORRENTE PARASITA

Marconi Lanzarini Curtinaz
Engenheiro Mecânico,

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título Mestre em
Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Área de Concentração:

Porto Alegre

2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Banca Examinadora:

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujso

Dr. Ricardo Jacques

Dr. Rubem Manuel de Braga

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho a Martha, fonte de
inspiração e amor da minha vida...

AGRADECIMENTOS

À minha família, onde busco força, estímulo, ajuda e compreensão em todos os momentos da vida;

À Gerdau Aços Especiais, Unidade Charqueadas, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional;

À equipe da Transformação Mecânica, em especial aos colegas da Trefila SCHUMAG IV, pelo auxílio na realização de todos os testes;

Ao professor Dr. Thomas Gabriel Rosauero Clarke pelo conhecimento e orientação recebida durante o trabalho;

Aos colegas Eng^o Samuel Henrique Freese e o Eng^o Marcelo Kalata, pela ajuda para execução dos testes deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	X
RESUMO.....	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 AÇO E ORIGEM	2
2.2 DEFEITOS SUPERFICIAIS	2
2.2.1 Escamas.....	2
2.2.2 Dobras	3
2.2.3 Trincas Superficiais.....	3
2.2.4 Riscos.....	3
2.2.5 Carepa Incrustada.....	4
2.3 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	4
2.4 CORRENTES PARASITAS.....	6
2.4.1 Evolução do Método.....	7
2.4.2 Vantagens e Desvantagens.....	8
2.4.3 Fundamentos do Método	9
2.4.4 Variáveis que afetam as Correntes Parasitas	12
2.4.4.1 Impedância da Bobina (ou sonda)	12
2.4.4.2 Condutividade Elétrica	13
2.4.4.3 Permeabilidade Magnética	15
2.4.5 Acoplamento Magnético	16
2.4.5.1 Efeito Peculiar (skin-effect).....	16
2.4.5.2 Distância Sonda e a Peça (lift-off).....	19
2.4.5.3 Fator de Enchimento (fill-factor).....	21
2.4.5.4 Efeito de Borda (edge-effect)	23
2.4.6 Aplicações do Método	24
2.4.7 Tipos de Sondas para Ensaio	25
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 EQUIPAMENTO DE INSPEÇÃO	28
3.2.1 Calibração do Equipamento.....	30
3.2.2 Cuidados Especiais	31
3.3 METODOLOGIA EMPREGADA.....	31
3.3.1 Estudo de Capabilidade – Primeira Etapa dos Experimentos.....	32

3.3.2	<i>MSA – Análise de Sistema de Medição – Segunda Etapa dos Experimentos ..</i>	<i>34</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	RESULTADOS DO ESTUDO DE CAPABILIDADE	36
4.2	RESULTADO DO MSA – ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÕES	39
4.2.1	<i>Análise Metalográfica dos Defeitos</i>	<i>45</i>
5	CONCLUSÃO.....	49
6	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	50
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Sonda de correntes parasitas usada para detectar o caráter de materiais condutores. Sonda de resposta (A) na ausência de um material condutor e (B) na presença de um material condutor [6].	7
FIGURA 2.2 Método de correntes parasitas com uma corrente elétrica alternada com uma direção adequada, amplitude e frequência na peça a ser testada [30].	10
FIGURA 2.3 Mostra como uma trinca afeta as características das correntes parasitas em um material condutor [30].	11
FIGURA 2.4 Definição do padrão de eficácia da profundidade de penetração das correntes parasitas [18].	18
FIGURA 2.5 Definição do padrão de eficácia da profundidade de penetração das correntes parasitas [18].	19
FIGURA 2.6 Curvas no plano de impedância mostrando o efeito da distância entre a sonda e a peça [19].	20
FIGURA 2.7 Influência da relação (componente indutiva) e R (componente Ω) com o fator de preenchimento (fill-factor) [30].	21
FIGURA 2.8 Ilustra diferença de amplitude em função do fator de preenchimento da barra com a bobina [30].	22
FIGURA 2.9 Representação esquemática do efeito de borda durante a saída da barra na inspeção [20].	23
FIGURA 2.10 Tipos de bobinas para ensaios de correntes parasitas em equipamentos de inspeção [6].	26
FIGURA 3.1 Barra padrão com defeito artificial utilizada para realizar os testes do estudo de capacidade [Elaborado pelo autor].	28
FIGURA 3.2 Sistema de detecção Circograph, ilustração do sinal gerado durante a inspeção em uma barra com defeito superficial [27].	29
FIGURA 4.1 Diferentes amplitudes geradas após a inspeção A) amplitude defeito artificial e B) amplitude do efeito de borda (defeito falso) [Elaborado pelo autor].	37
FIGURA 4.2 Estudo de performance quanto à capacidade de detecção do padrão NI 0,15mm realizado no software MINITAB [Elaborado pelo autor].	38
FIGURA 4.3 Estudo de performance quanto à rejeição por defeitos falsos devido ao efeito de borda realizado no software MINITAB [Elaborado pelo autor].	38
FIGURA 4.4 Microestrutura na região superficial longitudinal das amostras retiradas para análise de profundidade dos defeitos da bitola 22,30mm. (A) amostra 1; (B) amostra 2; (C) amostra 3; (D) amostra 4; (E) amostra 6; (F) amostra 7; (G) amostra 8; (H) amostra 13; (I) amostra 14; (J) amostra 15; (K) amostra 16; (L) amostra 17; (M) amostra 18; (N) amostra 19; (O) amostra 20; (P) amostra 21; (Q) amostra 23. Ampliação: 50X. Ataque: Nital 3%	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 VALORES DE RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS PARA METAIS E LIGAS [ELABORADO PELO AUTOR].	14
TABELA 3.1 ILUSTRAÇÕES COM AS DIFERENTES CALIBRAÇÕES PARA CADA FAIXA DE AMPLITUDE UTILIZADA NO ESTUDO DE CAPABILIDADE [ELABORADO PELO AUTOR].....	33
TABELA 3.2 TABELA DE DECISÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA SEPARAÇÃO DE BARRAS POR QUALIDADE [29].	35
TABELA 4.1 PLANILHA COM MEDIDAS DE AMPLITUDES OBTIDAS A PARTIR DOS RESULTADOS DA INSPEÇÃO [ELABORADO PELO AUTOR].	36
TABELA 4.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS E DESEMPENHO DA INSPEÇÃO [ELABORADO PELO AUTOR].....	37
TABELA 4.3 TABELA DE DECISÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA SEPARAÇÃO DE BARRAS POR QUALIDADE [ELABORADO PELO AUTOR].....	40
TABELA 4.4 TABULAÇÃO CRUZADA RELAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS - RESPOSTA PARA O MSA ENTRE OS OPERADORES A, B E C [ELABORADO PELO AUTOR].	42
TABELA 4.5 TABULAÇÃO CRUZADA RELAÇÃO A REFERÊNCIA – RESPOSTA PARA O MSA ENTRE OS OPERADORES A, B E C [ELABORADO PELO AUTOR].	43
TABELA 4.6 RESPOSTA DO MSA ENTRE OS OPERADORES A, B E C [ELABORADO PELO AUTOR].....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

I	corrente no material
R	resistência do material
H_p	campo primário
H_s	campo secundário
H_t	campo total
U_{ind}	tensão induzida
X_L	reatância indutiva
Z	impedância
δ	profundidade de penetração das correntes
f	freqüência de teste
μ_0	permeabilidade absoluta
μ_r	permeabilidade relativa do material
σ	condutividade elétrica do material
J	densidade das correntes parasitas em uma amostra condutora, a uma profundidade, x
J_0	densidade das correntes parasitas na superfície da amostra
β	fator de atenuação da densidade das correntes parasitas com a profundidade, x
e	base dos logaritmos naturais
$(\omega.t - \beta.x)$	argumento da função seno, representando a freqüência de ensaio e o atraso que ocorre com as correntes parasitas, à medida que penetram mais no material
d	diâmetro de material sendo ensaiado
D	diâmetro interno da bobina
η	fator de enchimento da bobina
l_1	lift off
V_p	velocidade de teste

K	número de cabeça de teste
B_s	número de sondas por cabeça de teste
n	rotação (RPM)
\bar{X}	média das amostras
LSL	limite inferior de especificação
σ	desvio padrão calculado
PpK	índice de performance
NI	nível de inspeção
MSA	Análise dos Sistemas de Medição
E	eficácia
CE	probabilidade de classificação errada
FA	probabilidade de alarme falso
Kappa	medida da razão do teste
po	soma das proporções observadas da diagonal principal da célula dividido pelo total geral.
pe	soma das proporções esperadas da diagonal principal da célula dividido pelo total geral.
Γ	constante
END	ensaio não destrutivo
L	indutância
I.A.C.S.	(International Annealed Cupper Standard).
m/Ω^2	medição de condutividade elétrica
$\sigma_{material}$	tensão material
$\rho_{material}$	densidade material
δ	profundidade de penetração
B_s	número de sondas por cabeça de teste

RESUMO

A base deste trabalho visa analisar a capacidade de detecção de diferentes tipos de defeitos superficiais em barras trefiladas redondas, onde para o tal estudo do utilizado o equipamento com princípio ensaio de correntes parasitas (eddy current) – CIRCOGRAPH.

Foram selecionadas aleatoriamente 13 barras com defeitos superficiais, sendo o tipo de defeito caracterizado a partir de análise metalográfica posterior ao ensaio. A avaliação da detecção, ou não, dos defeitos foi realizada por meio da variação de parâmetros operacionais, calibração e inspeção do equipamento, separação de amostras e correlação dos resultados do ensaio com a morfologia e tipo de defeito encontrado. A partir disso, buscou-se determinar o comportamento do equipamento quanto sua confiabilidade e assertividade da inspeção, relacionando a profundidade dos defeitos e morfologia, conseqüentemente à limitação de detecção do método de correntes parasitas.

Por fim, foi realizado um estudo de capacidade no equipamento para verificar a capacidade de detecção e rejeição por defeitos falsos, assim podendo estabelecer uma parametrização que garanta um ensaio mais adequado para o processo. Logo após definido qual a melhor calibração do equipamento com o estudo de capacidade, foi realizado um MSA para analisar a interação entre os operadores. A meta do trabalho é garantir uma detecção mais assertiva, buscando evitar a alta incidência de indicações falsas, conhecendo a possibilidade de que o problema não seja eliminado, mas minimizado, principalmente devido a ruídos e vibrações existentes no processo e garantir uma confiabilidade na detecção dos defeitos, conhecendo as limitações do equipamento automático e dos defeitos existentes.

Os resultados alcançados com o trabalho foram à garantia de uma inspeção com um índice de defeitos falsos aceitáveis e, uma assertividade na detecção de defeitos reais muito elevadas.

ABSTRACT

This work was carried out aiming to analyze the detection capacity of different kinds of superficial flaws on drawn bars using the eddy current method (Circograh).

Thirteen bars with different types of flaws were collected. The bars had they flaws analyzed metallographically after the eddy current test. The detection of the test was evaluated, varying the process parameter, calibration and comparing the test results to the flaws morphology. Thus, this work aimed to determine the Circograph reliability and assertiveness with respect de flaws morphology and deepness.

The equipment capability was evaluated to determine the capacity of detection and rejection of false flaws, thus establishing a group of parameters that ensures a more assertive test. A MSA (Measuring System Analysis) was also performed to find the best calibration for the process and to analyze the iteration of different operator.

The target of these studies was to ensure a more assertive detection, avoid the detection of false flaws and find out the equipment limitations.

The results were achieved with the work to ensure an inspection with an acceptable rate of false defects and assertive in the detection of very high real defects.

1 INTRODUÇÃO

Os aços ligados são amplamente utilizados na fabricação de produtos e peças destinados principalmente à indústria automobilística, o que exige elevada qualidade do material em relação à isenção de defeitos superficiais. Durante a fabricação e processamento do aço, a ocorrência de defeitos é inevitável, devido ao gradiente de temperatura envolvido, à presença de fase gasosa, de impurezas (provenientes da matéria prima e desgaste dos revestimentos dos equipamentos envolvidos), transformações mecânicas (laminação) e geração de tensões residuais no material.

Para garantir a qualidade necessária do material trefilado, barras laminadas de aço são submetidas a um sistema de inspeção através da utilização de ensaios não destrutivos, onde as barras são 100% testadas à procura de defeitos superficiais.

As técnicas de ensaios não destrutivos estão sendo estudadas e aplicadas para detecção de defeitos superficiais de materiais, tornando-se alternativas robustas e automatizadas para o processo siderúrgico. Dentre as técnicas não destrutivas destaca-se o método por corrente parasita.

Os ensaios não destrutivos por correntes parasitas baseiam-se na interação de campos eletromagnéticos: indutor e induzido. O campo magnético gerado por uma sonda ou bobina alimentada por corrente alternada produz correntes induzidas (correntes parasitas) na peça sendo ensaiada. O fluxo destas correntes depende das características físico-químicas ou da estrutura do material tais como: composição química, granulação, dureza, profundidade de camada endurecida, tempera, entre outros. Essas características alteram o fluxo das correntes parasitas, possibilitando a detecção da mistura de material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço e Origem

O aço é definido como liga metálica composto principalmente de ferro e carbono.

O processo de fabricação do aço tem início na Aciaria, onde se originam os lingotes e tarugos, que posteriormente passam pelo processo de Laminação, podendo ser a quente ou a frio, dando forma ao produto como barras redondas e quadradas, chapas, vergalhões e tiras.

Durante os processos de Lingotamento e Laminação os materiais muitas vezes podem apresentar defeitos superficiais e internos, havendo assim a necessidade de realizar uma inspeção nestes materiais para garantia da qualidade do produto final.

2.2 Defeitos Superficiais

Defeitos superficiais são descontinuidades ou falhas que ocorrem na superfície dos materiais, resultantes na maioria das vezes do processo de fabricação.

Durante o lingotamento, os defeitos superficiais são gerados devido às impurezas oriundas dos processos no forno (levando à formação de macroinclusões), lingotamento e a tensões internas geradas durante o resfriamento. Defeitos como trincas e poros, presentes nos tarugos, irão ser modificados, sofrendo alongamento, compressão, abertura ou fechamento (retendo óxidos) e dobramento durante o processo de laminação, gerando defeitos superficiais, com origem na aciaria, nas barras laminadas.

2.2.1 Escamas

Escama é um defeito superficial que tem o aspecto de lascas de materiais, tendo forma, distribuição e dimensões variadas. Uma característica geralmente observada é que o interior da escama do fio máquina apresenta-se, muitas vezes, preenchido com carepa ou substâncias não metálicas. É um tipo de defeito superficial que pode ocorrer paralelamente à direção de laminação, podendo surgir em ambas às faces, e em qualquer lugar ao longo da largura de barras de aço trefiladas.

As escamas são sobreposições de metal com extensão maior que a profundidade e consecutivamente maior que a largura. Logo, os defeitos analisados são na sua maioria rasos e extensos. As escamas podem ter diversas origens, desde a Aciaria (usualmente profundas, descarbonetadas, com presença de óxidos), até a Laminação (participação dos fornos de reaquecimento, dos passes intermediários e até mesmo do acondicionamento dos tarugos). Pode ocorrer também um tipo especial de escama com origem nas operações de manuseio, onde descontinuidades superficiais são sobrepostas na superfície do material formando uma escama encruada e sem a presença de óxidos [1].

2.2.2 Dobras

Dobras são descontinuidades que na maioria das vezes penetram transversalmente, na superfície para o interior do material, estes defeitos são extensos e uniformes, quase sempre paralelos ao eixo longitudinal.

Segundo Meyete [2], dobras são trincas longas que usualmente são originados pelo processo de laminação, estes defeitos são conformados mecanicamente ao longo do processo, uma trinca paralela a superfície, ou rebarba é modificada, ficando extensa e fina.

2.2.3 Trincas Superficiais

Trincas superficiais são descontinuidades que iniciam na superfície do material e se desenvolvem perpendicularmente ou inclinadamente para o interior do material, tendo seu comprimento e profundidade variada dependendo da origem [3].

Estas trincas são oriundas tanto do processo de laminação quanto do lingotamento contínuo. São dificilmente eliminadas ao longo dos processos de conformação mecânica a quente ou na trefilação.

2.2.4 Riscos

Riscos são depressões de formato irregular, contínuos na direção longitudinal, têm forma e dimensões variáveis de acordo com a origem dos defeitos. Formam-se quando o

produto quente raspa sob pressão em cantos vivos que podem ser superficiais não planas dos condutos de guias nas quais se depositam carepas ou partículas de produto laminado, guias mal usinadas, gastas ou quebradas. Podem ser observadas a olho nu ou com pequeno aumento, mesmo com carepa e melhor ainda no produto decapado. Na metalografia os riscos são visualizados na forma de cavidades na superfície do corpo de prova [4].

2.2.5 Carepa Incrustada

É o resultado da reação entre o material aquecido e o oxigênio do ar. Esta camada de óxidos pode ter espessura variável em função da temperatura, tempo de permanência em altas temperaturas e atmosfera do forno de reaquecimento, aderindo com maior ou menor firmeza no laminado. Se a carepa não é eliminada nos descarepadores a pressão exercida pelos cilindros pode provocar a sua incrustação, dificultando sua remoção posterior [4].

2.3 Ensaio Não-Destrutivo

Ensaio não-destrutivo está em uso em todo o mundo para detectar variações na estrutura, alterações mínimas no acabamento da superfície, a presença de rachaduras ou outros tipos de descontinuidade física, para medir a espessura de materiais e revestimentos, bem como determinar outras características dos produtos industriais.

São largamente utilizados nos setores petróleo/petroquímico, químico, aeronáutico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, entre outros. Contribuem para a qualidade dos bens e serviços, redução de custo, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam.

Os ensaios não-destrutivos incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito da quantidade de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas [5].

Os métodos mais usuais de END são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia, correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, estanqueidade e análise de deformações.

Alguns cuidados devem ser verificados para obter resultados satisfatórios e válidos. Os seguintes itens devem ser considerados como elementos fundamentais para os resultados destes ensaios:

- Pessoal treinado, qualificado e certificado;
- Equipamentos calibrados;
- Procedimentos de execução de ensaios qualificados com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecido.

Comparativamente, podemos afirmar que o controle da qualidade que o médico faz de um corpo humano na avaliação da saúde ou da patologia de um paciente, é o mesmo aplicado na indústria, só que para materiais e produtos.

Sempre precisa-se levar em conta o processo de fabricação e/ou conformação do material acabado e semi-acabado, pois o processo, além de modificar propriedades físicas em relação ao material bruto, também pode gerar ou ampliar defeitos.

Os passos a serem seguidos para a determinação do tipo de ensaio a ser utilizado são:

- Entender a natureza física das propriedades ou descontinuidades do material a ser inspecionado;
- Entender os processos físicos que estão envolvidos nos métodos de ensaios não-destrutivos;
- Entender a natureza física das interações das sondas com o material em teste;
- Entender o potencial e as limitações da tecnologia disponível;
- Considerações econômicas, ambientais e outros fatores.

É preciso também ter conhecimento de como os métodos de Ensaios Não Destrutivos funcionam. Por exemplo: correntes parasitas (eddy current) usam um campo magnético para induzir corrente na peça testada, exigindo que o material seja eletricamente condutor. Por isso precisa-se conhecer a interação do método de ensaio com as propriedades ou características de interesse do material ensaiado [6].

2.4 Correntes Parasitas

O método de ensaio por correntes parasitas é um método não destrutivo, fundamentado na indução de correntes elétricas no material que está sendo inspecionado e na observação dos sinais originados da interação dessas correntes com o material. As correntes parasitas são induzidas no material por campos magnéticos variáveis, produzidos por bobinas. Através da monitoração da variação da impedância elétrica dessas bobinas avaliamos o material sob inspeção quanto:

- ao tipo de liga do material;
- a espessura do material, levando-se em conta a profundidade de penetração das correntes parasitas;
- a dureza do material;
- a existência de alguma camada de revestimento, condutora ou não condutora e sua profundidade;
- a existência de descontinuidades e sua avaliação.

O ensaio por correntes parasitas é um método versátil, usado principalmente em materiais de pequena espessura. Em materiais espessos a penetração das correntes parasitas limita o volume inspecionado às camadas mais superficiais. Além da detecção de descontinuidades, esse tipo de ensaio pode ser usado para medir características mecânicas e metalúrgicas, relacionadas com as propriedades elétricas e mecânicas. Efeitos geométricos tais como espessura e o espaçamento entre a sonda e o material influenciam o fluxo das correntes parasitas [5].

O fluxo destas correntes depende das características do metal. Imagine uma sonda com um par de bobinas (figura 2.1). Uma bobina está excitada com um sinal AC, a outra, a bobina pick-up, está ligada a um par de voltímetros. A bobina de excitação produz um campo (primário) magnético parte, dos quais passa por (ou seja, casais) a bobina pick-up.

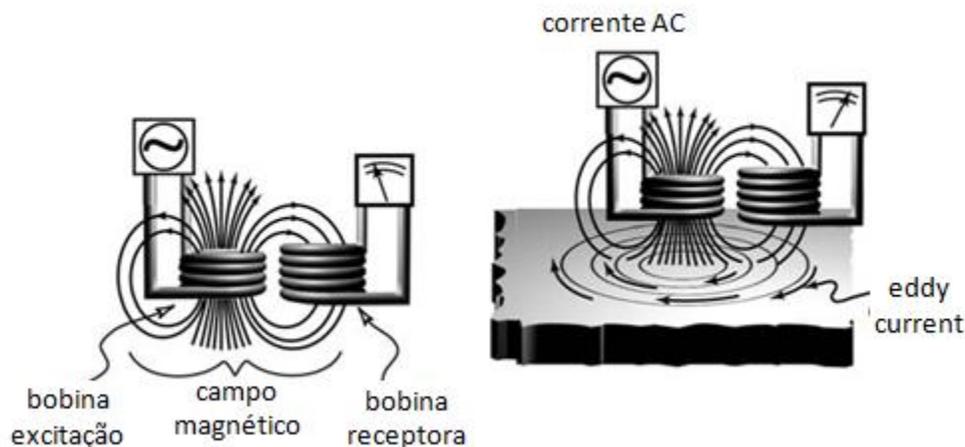


Figura 2.1 Sonda de correntes parasitas usada para detectar o caráter de materiais condutores. Sonda de resposta (a) na ausência de um material condutor e (b) na presença de um material condutor [6].

No método de corrente parasita, os sinais de resposta são exibidos em uma variedade de formatos, que representam algum tipo de mudança de impedância na bobina de captação.

2.4.1 Evolução do Método

Os ensaios não destrutivos por correntes parasitas, também conhecidos como ensaios por correntes de Eddy ou correntes de Foucault, baseiam-se no princípio da indução eletromagnética.

O princípio de indução eletromagnética foi descoberto por Michael Faraday em 1831. Faraday comprovou que uma corrente que varia a sua intensidade em função do tempo, ao passar ao longo de uma espira, induz uma corrente elétrica numa espira adjacente.

Em 1864, James Maxwell apresentou as conhecidas equações de Maxwell, que descrevem as interações eletromagnéticas, dando assim uma base teórica ao método.

Em 1879, D.E. Hughes desenvolveu um sistema de correntes parasitas com o qual conseguiu detectar diferenças de condutividade elétrica, permeabilidade magnética e temperatura em metais.

Em 1926, H. E. Kranz, da firma Western Electric, desenvolveu um instrumento de correntes parasitas para medir espessuras de parede, em metais condutores elétricos.

Na década de 1930, foi desenvolvido o primeiro sistema para detecção de descontinuidades na linha de produção de tubos com costura, uma das grandes aplicações de correntes parasitas na atualidade.

Na década de 1940, Frederich Foerster desenvolveu os primeiros aparelhos e sistemas comerciais para ensaios por correntes parasitas. O próprio Foerster, na década 1950, introduziu o conceito de análise do plano de impedância, amplamente difundido e utilizado nos dias de hoje [7].

2.4.2 Vantagens e Desvantagens

O ensaio por correntes parasitas apresenta algumas vantagens na aplicação deste método, tais como:

- O sinal indicativo do estado do material é sempre imediato;
- Na maioria das aplicações, não apresenta problemas de acoplamento entre a sonda e a superfície da peça a ser ensaiada;
- Aplicação tanto em materiais ferrosos como em não-ferrosos;
- O método pode ser aplicado para inspeção de peças com alto grau de automatização e com elevadas velocidades;
- O método por ser sensível e versátil é utilizado com sucesso em uma larga faixa de aplicações;
- Devido aos equipamentos serem alimentados por pilhas ou baterias, é caracterizado como portátil;
- Não existe a possibilidade de uso de materiais de consumo;
- Não é preciso realizar a preparação da superfície detalhada da peça a ser ensaiada, pois apresenta ótima sensibilidade na detecção de descontinuidades superficiais.

São consideradas algumas desvantagens deste método de ensaio:

- O ensaio de materiais ferromagnéticos é difícil de executar;
- O sucesso do ensaio está ligado à habilidade do sistema operador/equipamento em suprir variáveis indesejáveis;

2.4.3 Fundamentos do Método

O método de ensaios por correntes parasitas é bastante similar a técnica de aquecimento por indução utilizada em processos de solda e têmpera por indução. Ambas as técnicas dependem do princípio de indução eletromagnética para induzir correntes parasitas numa peça disposta dentro ou nas proximidades de uma ou mais bobinas de indução. O aquecimento é consequência das perdas produzidas pelo fluxo de correntes parasitas na peça ($I^2 \times R$). Em ambos os casos, o chamado efeito peculiar determina a escolha da frequência de operação.

Existem algumas diferenças entre ambas as técnicas, uma delas, está nos níveis de potências utilizados. No caso da técnica de aquecimento por indução, utilizam-se potências bem mais elevadas do que no caso de ensaios por correntes parasitas.

No método de ensaios não destrutivos por correntes parasitas, a peça a ser ensaiada é disposta dentro de uma bobina (ou em contato com uma sonda), pela qual circula uma corrente alternada, chamada corrente de excitação (vide figura 2.2). Como consequência disto, nas proximidades da bobina, é gerado um campo eletromagnético chamado de campo primário (H_p), o qual induz um fluxo de correntes parasitas na peça sendo ensaiada.

As correntes parasitas induzidas na peça, por sua vez, geram um segundo campo eletromagnético, chamado de campo secundário (H_s), o qual tem sentido contrário ao primário. Desta maneira, obtém-se um campo magnético resultante $H_p - H_s$ [8].

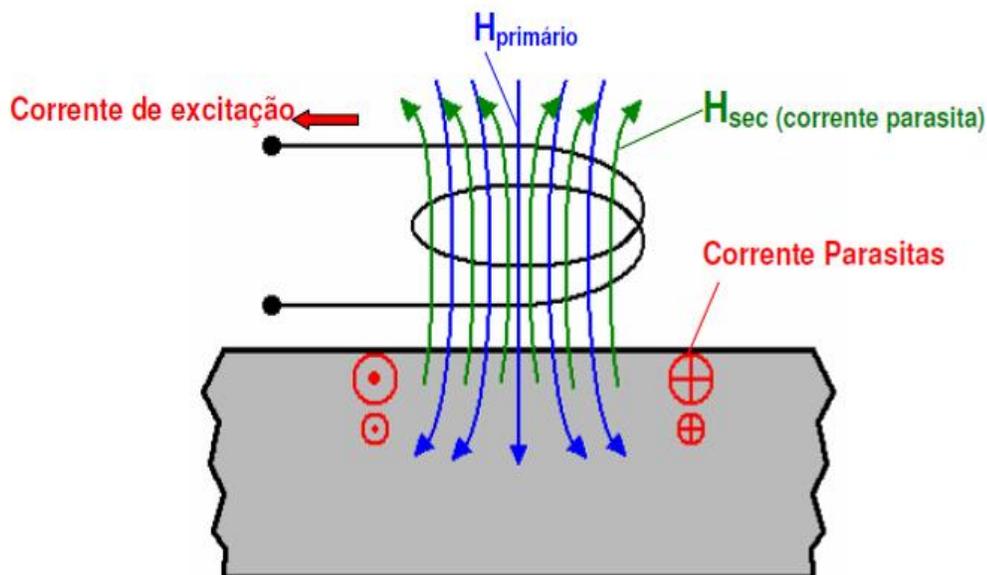


Figura 2.2 Método de correntes parasitas com uma corrente elétrica alternada com uma direção adequada, amplitude e frequência na peça a ser testada [30].

Variações nas características do material sendo ensaiado, tais como composição química, dureza, espessura de camadas endurecidas, condição do tratamento térmico, descontinuidades, geometria, dimensões, etc., produzem uma mudança no fluxo de correntes parasitas, e como consequência, uma variação do campo secundário (H_s), do campo resultante ($H_p - H_s$) e da impedância ou da tensão induzida da bobina. Esta variação de impedância e da tensão induzida da bobina, ao ser processada, pode ser mostrada num instrumento analógico ou digital, num aparelho com tubo de raios catódicos ou num registrador gráfico.

A figura 2.3 mostra a distorção do fluxo de correntes parasitas numa peça de superfície plana e numa barra, devido à presença de descontinuidades.

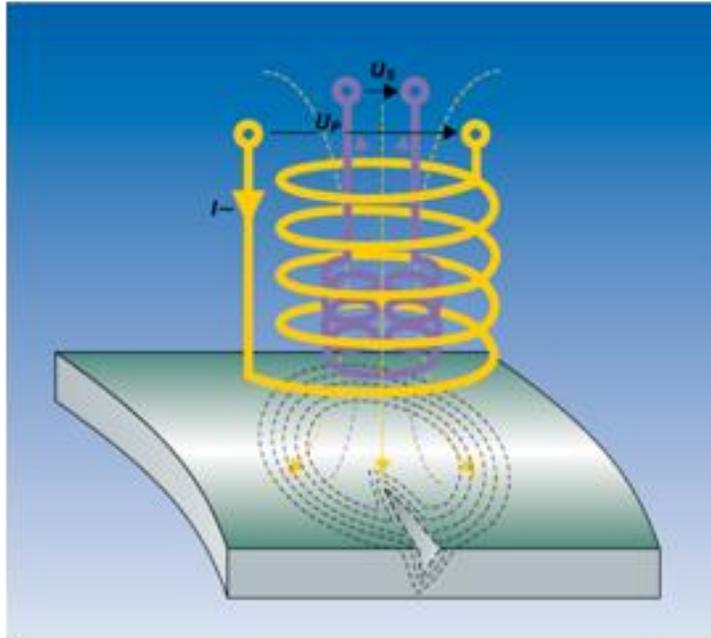


Figura 2.3 Mostra como uma trinca afeta as características das correntes parasitas em um material condutor [30].

A intensidade do campo primário depende fundamentalmente da intensidade da corrente de excitação (I), isto é:

$$H_p = \phi(I) \quad \text{equação (2.1)}$$

A intensidade do campo secundário depende da condutividade elétrica (σ), da permeabilidade magnética (μ) e das características geométricas (Γ) do material sendo ensaiado, assim como da frequência (f) da corrente de excitação, isto é:

$$H_s = \phi(\sigma, \mu, \Gamma, f) \quad \text{equação (2.2)}$$

Portanto, a intensidade do campo eletromagnético resultante ou total será:

$$H_t = H_p - H_s = \phi \quad \text{equação (2.3)}$$

A tensão induzida (U_{ind}) é proporcional a variação do campo resultante (H_t), com relação ao tempo, isto é:

$$U_{\text{ind}} = \frac{dHt}{dt} \quad \text{equação (2.4)}$$

Uma vez definidas as variáveis externas, isto é, a corrente de excitação (I) e a frequência (f), o ensaio passa a depender das características da peça, isto é:

$$U_{\text{ind}} = \phi(\sigma, \mu, \Gamma) \quad \text{equação (2.5)}$$

Se o ensaio é realizado em peças de iguais características geométricas, $\Gamma = \text{constante}$. Neste caso:

$$U_{\text{ind}} = \phi(\sigma, \mu) \quad \text{equação (2.6)}$$

De forma geral, nos ensaios por correntes parasitas:

- as variações de permeabilidade magnética (μ), correspondem a variação na dureza do material;
- as variações de condutividade elétrica (σ), correspondem à variação na liga do material;
- as variações locais de condutividade elétrica ($\Delta\sigma$), correspondem a descontinuidades superficiais no material.

2.4.4 Variáveis que afetam as Correntes Parasitas

Nos ensaios por correntes parasitas existem quatro variáveis principais, tais como: impedância da bobina (ou sonda), condutividade elétrica, permeabilidade magnética e o acoplamento magnético.

2.4.4.1 Impedância da Bobina (ou sonda)

Quando uma corrente contínua circula por uma bobina, o campo magnético atinge um valor constante, desde que a resistência elétrica do arame é a única oposição ao fluxo de corrente. Entretanto, quando uma corrente alternada circula por uma bobina, há duas

oposições ao fluxo de corrente: a resistência elétrica do arame (R) e a reatância indutiva (X_L).

A reatância indutiva é o efeito combinado da indutância (L) e da frequência (f), e é medida em ohms. A oposição total ao fluxo de corrente alternada numa bobina é conhecida como impedância (Z), a qual é uma quantidade vetorial, composta da resistência (R) e da reatância indutiva (X_L).

Ao se colocar uma peça dentro ou nas proximidades de uma bobina, o campo eletromagnético da mesma muda devido ao fluxo de correntes parasitas na peça. De maneira geral, tanto a resistência como a reatância indutiva variam. A resistência da bobina com uma peça no seu interior passa a ter dois componentes: a resistência do arame ao fluxo de corrente alternada e a resistência aparente produzida pela presença da peça.

A impedância (Z) é usualmente representada num diagrama conhecido como plano de impedância, sendo que num dos eixos é representada a resistência (R), e no outro, a reatância indutiva (X_L). Desde que cada condição ou característica diferente da peça em ensaio pode produzir certo valor de impedância, cada uma destas condições ou características diferentes da peça podem produzir um ponto diferente no plano de impedância [9].

2.4.4.2 Condutividade Elétrica

Todos os materiais apresentam certa resistência ao fluxo de corrente elétrica. Com base neste parâmetro, os materiais podem ser classificados como isolantes, semicondutores e condutores, conforme o seu grau de resistência. Os materiais condutores, que incluem a maioria dos metais, são de grande interesse nos ensaios por correntes parasitas, desde que a sua aplicação possibilita a medição da condutividade elétrica, tanto em m/Ω^2 , como em termos de porcentagem I.A.C.S. (International Annealed Copper Standard).

No sistema IACS, o valor de condutividade do cobre puro recozido e à temperatura de 20°C é 100% IACS e dito como padrão. Dizer que a condutividade elétrica de um fio de alumínio é de 61% IACS, significa que ele tem a habilidade de conduzir 61% da corrente elétrica que conduziria um fio de cobre puro recozido, de mesmo diâmetro e comprimento, submetidos à mesma voltagem e a mesma temperatura de 20°C . Na tabela 2.1, indicam-se

os valores de resistividade em ($\mu\Omega.cm$), e de condutividade elétrica em (% IACS) de vários metais e ligas.

Tabela 2.1 Valores de resistividade e condutividades elétricas para metais e ligas [Elaborado pelo Autor].

MATERIAL	RESITIVIDADE ($\mu\Omega.cm$)	CONDUTIVIDADE (% IACS)
Prata	1,63	105
Cobre Recozido	1,72	100
Ouro	2,44	70
Alumínio	2,82	61
Magnésio	4,6	37
Latão 70-30	6,2	28
Zircônio	50	3,4
Titânio	54,8	3,1
Aço Inox 304	70	2,5

Para transformar resistividade ($\mu\Omega.cm$) em condutividade % IACS, usa-se a seguinte expressão:

$$\sigma_{material} = \frac{172}{\rho_{material}} \%IACS$$

equação (2.7)

São várias as características dos metais que produzem uma variação na condutividade elétrica. Abaixo seguem alguns destes fatores:

- composição química;
- tratamento térmico (o que por sua vez produz uma variação na microestrutura, tamanho de grão, dureza e tensões residuais);
- processos de conformação a frio;
- temperatura: um aumento da temperatura produz uma diminuição da condutividade elétrica do material;
- descontinuidades: produzem uma diminuição da condutividade elétrica.

Com base nisto, pode-se dizer e concluir que os ensaios por correntes parasitas possibilitam que tanto a composição química, como as outras características de certo material, podem ser monitoradas, desde que seja possível obter uma diferença mínima em termos de condutividade elétrica.

Como exemplo, a presença de uma camada condutora sobre um material condutor, que altera a condutividade inerente do material. Se a espessura da camada varia, a condutividade também varia, onde esta mudança na espessura pode ser detectada por correntes parasitas [10].

2.4.4.3 Permeabilidade Magnética

Permeabilidade é a capacidade de um material em conduzir linhas de fluxo magnético, ou seja, pode ser definida como a tendência do material de amplificar as linhas de força magnéticas [11].

A permeabilidade magnética, designada com o símbolo μ , pode ser determinada pela expressão:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad \text{equação (2.8)}$$

Onde:

μ_r = permeabilidade magnética relativa ao vácuo;

μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo (valor constante) e igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$.

A permeabilidade magnética relativa é um número adimensional, que indica quantas vezes a permeabilidade magnética de certo material é maior que a do vácuo.

Desde que as correntes parasitas são induzidas por um campo magnético variável, a permeabilidade influencia enormemente os resultados do ensaio. Isto é, quanto maior for a permeabilidade magnética do material a ser ensaiado, maior será o fluxo de correntes parasitas do mesmo. No ensaio por correntes parasitas em materiais ferromagnéticos, o

efeito da permeabilidade magnética tem um efeito maior do que a condutividade elétrica, podendo ter efeito de outras variáveis (composição química e tratamento térmico).

No caso de materiais não magnéticos, μ_r é igual a 1 (constante). Para materiais ferromagnéticos, as variações podem mascarar a detecção de descontinuidades, isto é, pequenas variações de permeabilidade podem induzir à rejeição de um material isento de descontinuidades. Para evitar isto, o material passa por uma bobina excitada com corrente contínua, com intensidade suficiente para produzir a saturação magnética passando logo em seguida por uma bobina de teste, onde são detectadas as descontinuidades.

Esta técnica apresenta uma vantagem adicional que é aumentar a profundidade de penetração das correntes parasitas.

2.4.5 Acoplamento Magnético

Nos ensaios por correntes parasitas, o acoplamento entre a bobina e a peça é necessariamente dependente pelos campos magnético indutor e induzido, através dos quais a peça é excitada e emite uma resposta a essa excitação.

Para estabelecer e determinar o acoplamento, os termos efeito peculiar (skin-effect), distância sonda-peça (lift-off), fator de enchimento (fill-factor) e o efeito de borda (edge-effect) são essenciais para os casos de ensaios com sondas e bobinas.

2.4.5.1 Efeito Peculiar (skin-effect)

Além da relação geométrica entre a sonda ou bobina e a peça em ensaio, a espessura da peça também tem influência na intensidade do fluxo das correntes parasitas [12].

Segundo Robert [13], o efeito peculiar determina que as correntes parasitas produzidas em uma amostra apresentam-se mais intensas e concentradas na superfície adjacente à bobina e, à medida que a profundidade aumenta, a sua intensidade se torna menor.

O efeito peculiar no ensaio por correntes parasitas é quanto à limitação da penetração no material condutor. O campo magnético das correntes é neutralizar o campo

magnético do probe, reduzindo assim a densidade da corrente com aumento da profundidade.

Shull [6], diz que este comportamento não pode ser mudado, mas os probes e os parâmetros de inspeção podem ser ajustados para ter a penetração máxima. As correntes parasitas formadas na superfície do material servem como uma barreira ao campo magnético primário formado, reduzindo a intensidade de penetração das correntes parasitas, abaixo mostra o cálculo do empobrecimento do sinal do fluxo em função da profundidade de penetração do campo magnético em um material condutor.

$$J = J_0 e^{-\beta \cdot x} \text{sen}(\omega t - \beta \cdot x) \quad \text{equação (2.9)}$$

J = densidade das correntes parasitas em uma amostra condutora, a uma profundidade, x .

J_0 = densidade das correntes parasitas na superfície da amostra.

β = fator de atenuação da densidade das correntes parasitas com a profundidade, x .

e = base dos logaritmos naturais

$(\omega t - \beta \cdot x)$ = argumento da função seno, representando a frequência de ensaio e o atraso que ocorre com as correntes parasitas, à medida que penetram mais no material.

Segundo o modelo de Dodd e Deeds [14] Mottl [15] calculou a diminuição de eddy densidade de corrente analiticamente. Para uma sonda de núcleo de ar, o autor descobriu que a diminuição do eddy densidade de corrente depende fortemente do diâmetro da sonda. Com pequenos diâmetros ($R/\delta \approx 1$), a densidade diminui de acordo com a linha tracejada na figura (2.4) e fornece significativamente menores valores para a profundidade de penetração (δ_i), em comparação com a onda plana.

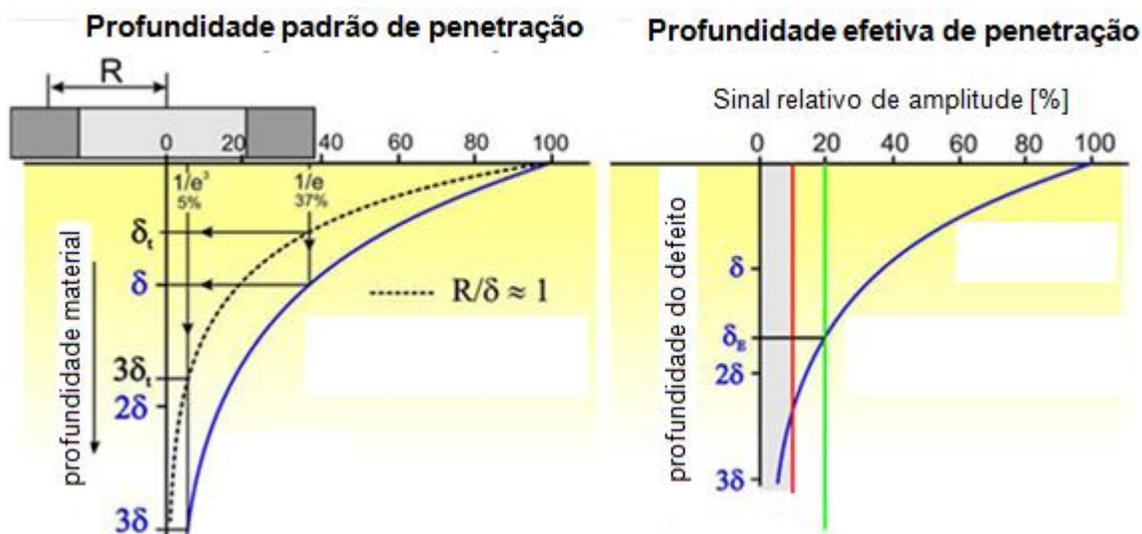


Figura 2.4 Definição do padrão de eficácia da profundidade de penetração das correntes parasitas [18].

A frequência de inspeção determina a profundidade de penetração das correntes parasitas, na medida em que a frequência aumenta, a penetração diminui e a distribuição das correntes fica mais densa na superfície do material. Tanto as correntes parasitas como o campo magnético diminuem com a profundidade. A condutividade elétrica e a permeabilidade magnética também possuem influência na profundidade de penetração. Em função disso, materiais ferromagnéticos como níquel, ferro, aços ferríticos, possuem grande permeabilidade magnética e, conseqüentemente, as correntes parasitas induzidas neles têm baixa penetração [16, 17, 18].

A profundidade de penetração padrão (δ) é a profundidade na qual a densidade de correntes parasitas cai para $1/e = 36,8\%$ de seu valor na superfície do material, como pode ser mostrada na figura 2.5.

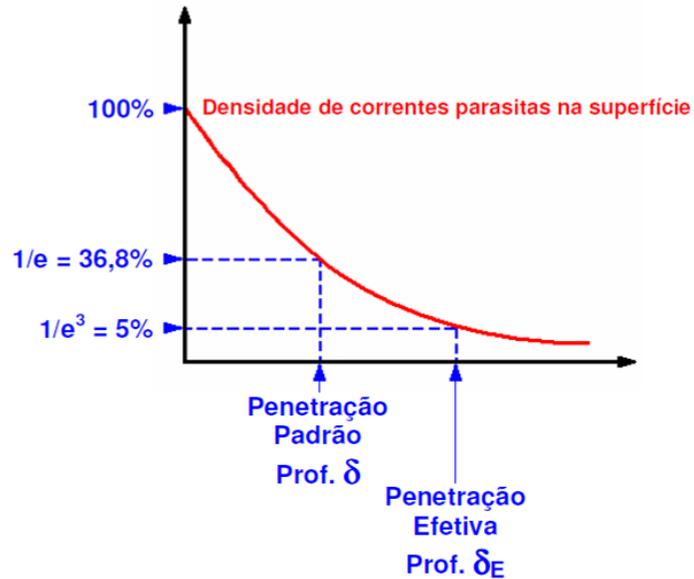


Figura 2.5 Definição do padrão de eficácia da profundidade de penetração das correntes parasitas [18].

A profundidade de penetração das correntes parasitas pode ser calculada aproximadamente através da equação abaixo.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad \text{equação 2.10}$$

Onde:

f = frequência de teste [Hz]

μ_0 = permeabilidade absoluta = $1,257 \times 10^{-6}$ [Vs/Am]

μ_r = permeabilidade relativa do material [Vs/Am]

σ = condutividade elétrica do material [10^6 s/m]

2.4.5.2 Distância Sonda e a Peça (lift-off)

Quando uma sonda de teste ligada a um aparelho de ensaios por correntes parasitas é suspensa no ar, produzirá algum tipo de indicação, onde esta varia à medida que a sonda,

é aproximada da superfície do material condutor. Como conseqüência disto, normalmente torna-se necessário manter uma relação constante entre o tamanho e forma da sonda, e o tamanho e forma da peça sendo ensaiada, fazendo com que seja extremamente difícil e complicado o ensaio de peças com geometria complexa [19].

A variação da impedância da sonda com o espaçamento sonda e a peça pode ser verificada nas curvas do plano de impedância correspondente à condutividade elétrica, mostrado na figura 2.6.

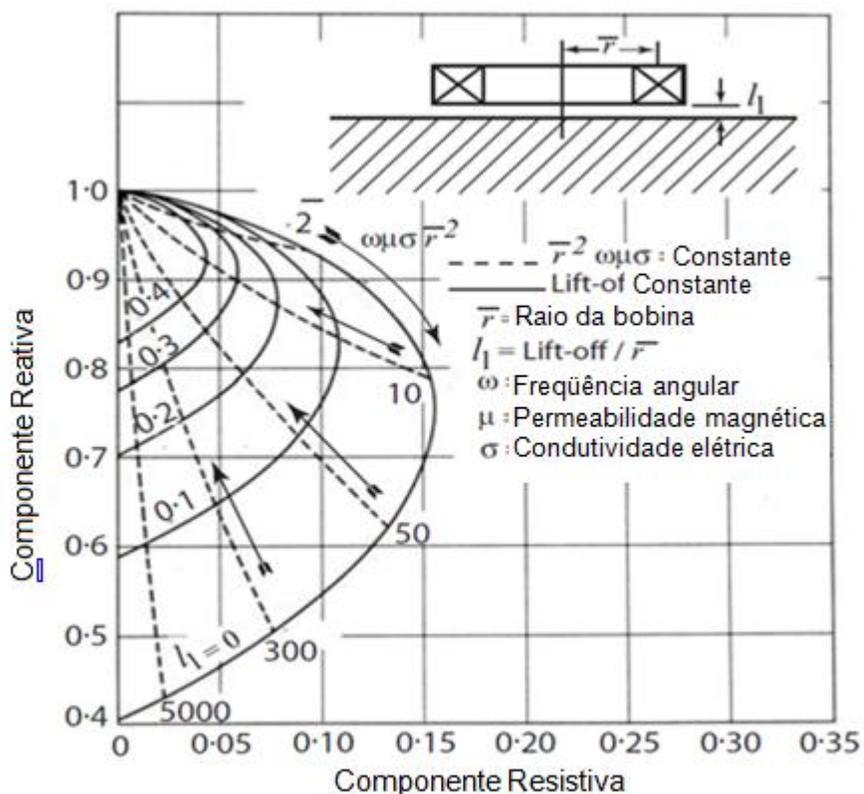


Figura 2.6 Curvas no plano de impedância mostrando o efeito da distância entre a sonda e a peça [19].

A impedância se altera quando a sonda é suspensa no ar (longe do material condutor) e à medida que a sonda se aproxima da superfície da peça, a impedância vai tomando o valor indicado pelas linhas pontilhadas. Quando a sonda é encostada na superfície da peça, a impedância toma o valor correspondente à linha principal ($l_1=0$), que neste caso representa a condutividade elétrica do material.

Torna-se, portanto, necessário manter um espaçamento entre a sonda e a peça para detectar e analisar defeitos superficiais, minimizar o efeito de camadas de tintas e irregularidades nas superfícies.

A sensibilidade do sistema está diretamente ligada ao tamanho das sondas, onde diâmetros pequenos e sondas são mais sensíveis para o lift-off do que sondas de grandes diâmetros.

O lift-off para sondas rotativas que circulam a peça inspecionada é considerado como fator de enchimento (fill-factor), Z , é proporcional a quantidade da bobina que circula o teste.

2.4.5.3 Fator de Enchimento (fill-factor)

Fator de preenchimento descreve o grau de acoplamento do campo magnético entre a área de uma seção do material sobre a área da seção da bobina. Semelhante ao lift-off para uma sonda de superfície, fator de preenchimento compara o diâmetro das bobinas para o diâmetro do tubo ou haste de teste [6].

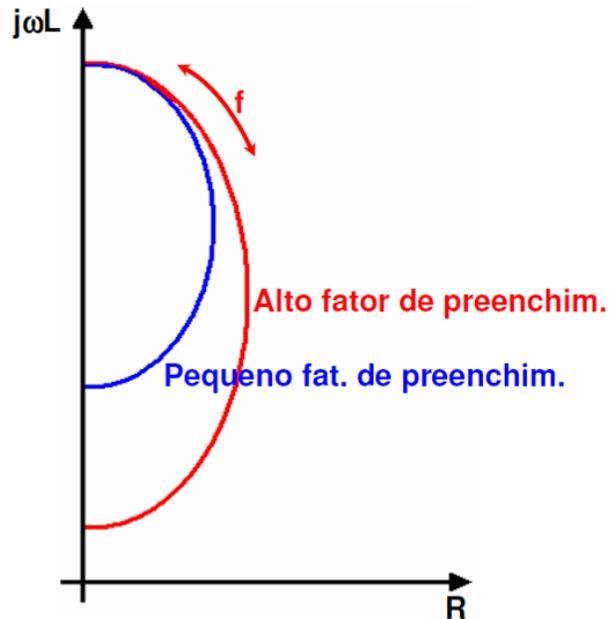


Figura 2.7 Influência da relação (componente indutiva) e R (componente Ω) com o fator de preenchimento (fill-factor) [30].

Quanto maior a diferença entre o diâmetro da sonda e do diâmetro do tubo ou haste, menos o campo magnético atinge parte da peça ensaiada.

A amplitude do sinal durante a inspeção é influenciada diretamente pelo fator de preenchimento para bobinas envoltivas, conforme ilustrado pela figura 2.8.

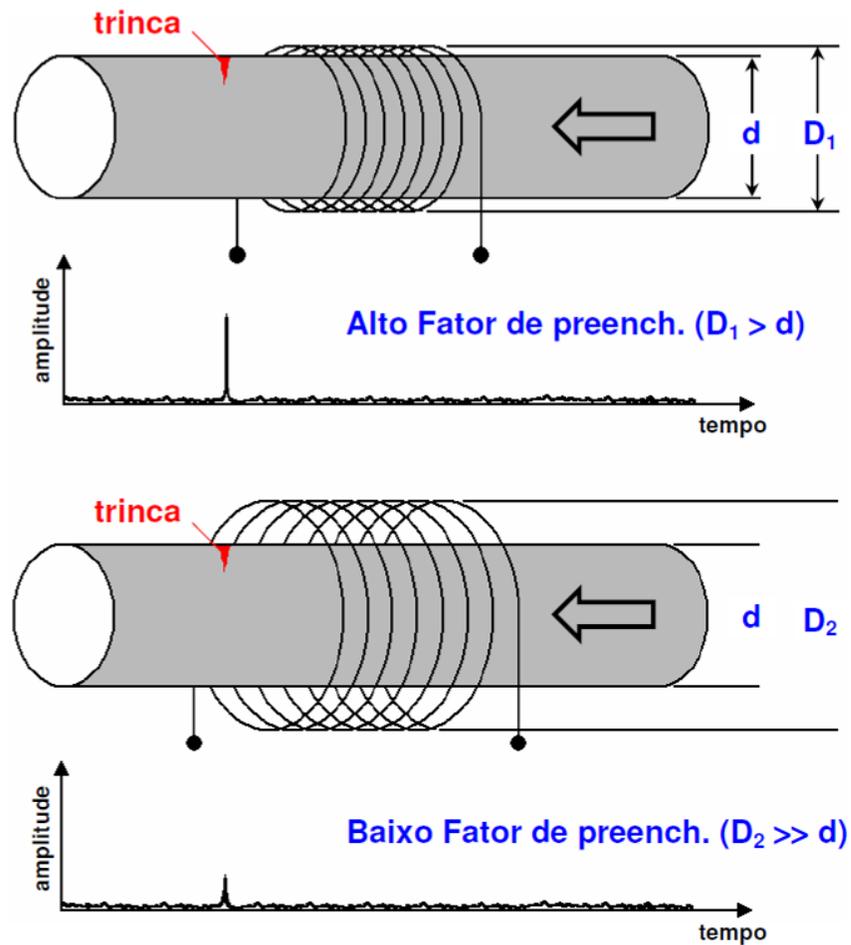


Figura 2.8 Ilustra diferença de amplitude em função do fator de preenchimento da barra com a bobina [30].

No caso de ensaio com bobinas externas, o fator de enchimento teórico é definido matematicamente pela expressão:

$$\eta = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad \text{equação 2.11}$$

Onde:

d = diâmetro de material sendo ensaiado

D = diâmetro interno da bobina

O fator de enchimento na inspeção de tubos e barras é muito importante na determinação da sensibilidade do sistema de ensaio. Quanto maior é o fator de enchimento, melhores serão os resultados do ensaio, em termos de sensibilidade. No caso de detecção de descontinuidades, isto é extremamente crítico, pois usualmente recomenda-se uma folga de 2 a 3mm entre a bobina e a peça.

2.4.5.4 Efeito de Borda (edge-effect)

O efeito de borda também é importante no ensaio por correntes parasitas, pois quando uma sonda ou bobina se aproxima da borda da peça durante a inspeção, ocorre uma distorção no fluxo das correntes, como consequência da diferença de permeabilidade e condutividade elétrica dos dois meios que formam a interface ar-peça, ou seja, uma porção do campo magnético está fora da peça. A figura 2.9 representa a diferença entre o campo magnético de uma peça sem efeito de borda e outra com. Verifica-se que, na peça com efeito de borda, parte do campo magnético não está ensaiando o material.

Desde que a magnitude deste efeito é bastante pronunciada, pode mascarar descontinuidades ou outras mudanças nas características do material nas bordas do mesmo. No caso de inspeção com sondas, recomenda-se a utilização de sondas de menores dimensões, para diminuir em parte esse efeito [9].

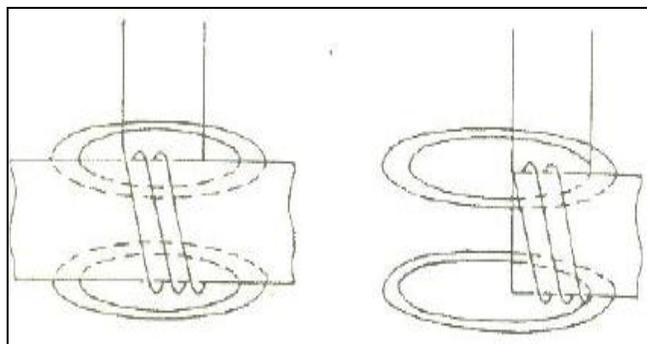


Figura 2.9 Representação esquemática do Efeito de Borda durante a saída da barra na inspeção [20].

No caso de ensaios automáticos em barras, tubos ou arames, o aparelho é desligado antes que as pontas do material passem pela bobina ou sonda, com o objetivo de eliminar o

sinal produzido pelo efeito de borda. Isso significa que as pontas do material não são ensaiadas.

2.4.6 Aplicações do Método

O método de ensaio por correntes parasitas é aplicado em vários setores da indústria, principalmente para controle de processos, controle de qualidade, e inspeção da integridade de equipamentos.

Zergoug [21], com seus estudos determinou o estado microestrutural e microdureza de materiais em diferentes condições de tratamento térmica pela variação da impedância.

Alencar [22] cita que o ensaio possibilita a detecção e o dimensionamento de descontinuidades em tubos de trocadores de calor, como condensadores e gerador de vapor.

Dybiec e seus pesquisadores [23] aplicaram o método de análise das correntes parasitas para caracterizar o estado de tensões em materiais ferromagnéticos.

Boucherou [24] utilizou o método para a análise do carregamento externo aplicado em amostras de alumínio e aços austeníticos. Os resultados mostraram boa correlação com os parâmetros mecânicos (carregamento, deformação e alongação) permitindo, através da análise da impedância e do ângulo de fase das correntes parasitas, identificar as zonas de transição elasto-plásticas e de rupturas para as amostras analisadas.

X. Ma e seus colegas [25] conseguiram estimar simultaneamente a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética de metais porosos, tais como Fe e Cu, utilizando o método de correntes parasitas. Para as amostras magnéticas de Fe, os resultados mostraram que para baixas frequências a parte imaginária (reatância indutiva) manteve-se relativamente constante, possibilitando assim estimar a permeabilidade do material.

O método pode ser utilizado para determinar uma série de propriedades importantes para a evolução do ensaio por correntes parasitas, de modo geral pode ser aplicado para:

- Detecção de descontinuidades em metais ferrosos e não ferrosos;
- Medição de condutividade elétrica em metais não-magnéticos;
- Medição de espessuras de camadas não condutivas sobre metais condutores não magnéticos;
- Medição de espessuras de camadas não magnéticas sobre metais magnéticos;

- Separação de materiais pela composição química ou estrutura, onde há alteração elétrica ou magnética no material testado;
- Medição de espessuras de chapas, paredes de tubos de matérias condutores;
- Medição de camadas endurecidas por tratamentos térmicos em aços e suas ligas;

2.4.7 Tipos de Sondas para Ensaio

A sonda ou bobina de teste é um dos componentes de maior importância num sistema de ensaio por correntes parasitas, já que através dela se obtém toda a informação sobre o material que está sendo ensaiado. Além disso, o número de bobinas que compõem uma determinada sonda pode variar em função do aparelho utilizado, ao qual a sonda é acoplada. As sondas podem ser classificadas quanto:

- a) A região do campo magnético, utilizada na inspeção;
- b) Ao arranjo elétrico a que estão submetidas suas bobinas;
- c) Ao modo como o campo magnético é detectado.

Quando se utiliza o campo magnético gerado fora da bobina, exatamente na região de uma dos pólos magnéticos, diz-se que a sonda é superficial.

A sensibilidade de uma sonda depende diretamente da área de sua bobina, isto é, quanto maior a área menor a sensibilidade, e vice-versa. Em contrapartida, quanto maior a área da bobina, maior será o poder de penetração das correntes parasitas [20].

Existem dois amplos métodos de construção dos circuitos das sondas de ensaios por corrente parasita: absoluto e diferencial. A figura 2.10 mostram alguns tipos de bobinas.

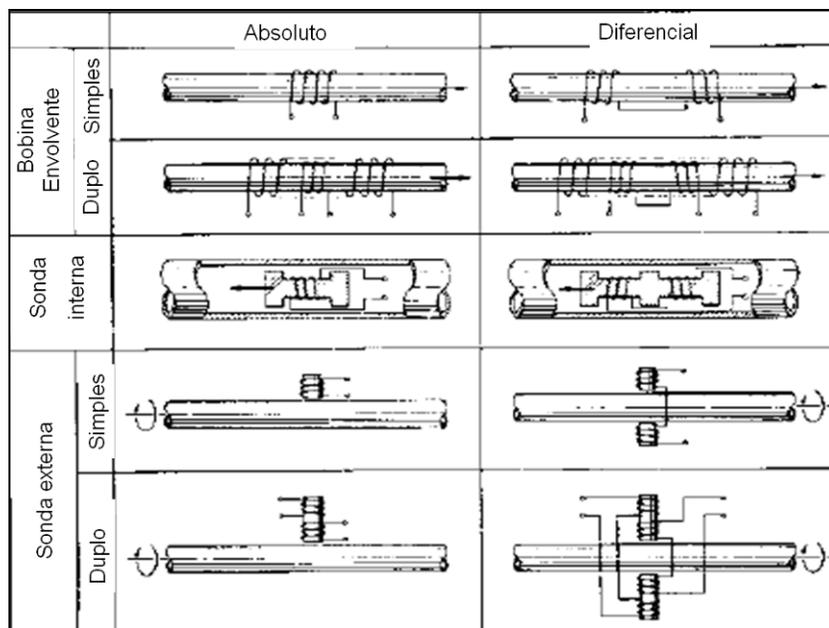


Figura 2.10 Tipos de bobinas para ensaios de correntes parasitas em equipamentos de inspeção [6].

No caso de detecção de discontinuidades em material cilíndrico, obtêm-se maior sensibilidade com a utilização de sondas do que com bobinas envoltentes. Porém, a utilização de sondas limita a velocidade do ensaio, já que para obter uma adequada varredura de toda a superfície do material, a sonda deve ter um movimento de rotação, enquanto o material passa pela mesma. Com a utilização de duas ou mais sondas, aumenta-se a área de varredura, permitindo assim uma maior velocidade de passagem do material.

As sondas ou bobinas podem ser classificadas como simples ou duplas. No caso de bobinas simples, o mesmo enrolamento utilizado para induzir as correntes parasitas no material é também usado para captar a mudança na impedância.

A sonda superficial é indicada para inspecionar superfícies planas e na inspeção automática de material cilíndrico.

Para inspeção superficial externa de tubo e barras cilíndricas para detecção de defeitos superficiais e trincas, é o arranjo de uma ou mais sondas na qual estão acopladas em um sistema rotativo. As sondas nesta aplicação fazem a inspeção em um movimento helicoidal em toda a superfície da barra ou tubo. Este método é muito utilizado na indústria metalúrgica para inspeção de barras cilíndricas com acabamento superficial, tais como barras retificadas, usinadas e/ou polidas e barras trefiladas [26].

No método diferencial as bobinas lêem os sinais de tensão da variação de espessura igualmente, ou seja, com polaridade de mesma grandeza, porém opostas devido à defasagem 180° de fase. Isso faz com que se anulem umas às outras, não indicando mudança no material inspecionado quanto a pequenas variações de espessura. Portanto, para trincas que representam mudanças abruptas o método diferencial é muito sensível, pois o sinal do defeito não é atenuado pelas pequenas variações de espessura do tubo, como ocorre com o método absoluto.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado para desenvolver uma base para a aplicação do método de corrente parasita na inspeção de defeitos superficiais em barras trefiladas de bitola 22,30mm, os testes foram em um equipamento CIRCOGRAPH tipo RO 30.

3.1 Materiais

Para desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada 1 barra padrão com diâmetro 22,30mm com comprimento de 2000mm, que possui um defeito artificial de 0,15mm de profundidade e 100mm de comprimento, conforme ilustrado na figura 3.1.



Figura 3.1 Barra padrão com defeito artificial utilizada para realizar os testes do estudo de capacidade [Elaborado pelo Autor].

Foram utilizadas 30 barras com diâmetro 22,30mm, onde nestas existem 13 barras com defeitos superficiais reias de morfologias diferentes que apresentam profundidade acima de NI 0,15mm (nível de inspeção).

3.2 Equipamento de Inspeção

O Circograph é um equipamento de controle da qualidade superficial de barras redondas que se baseia em um método de correntes induzidas.

As sondas exploram a superfície da barra sem entrar em contato direto com ela, gerando correntes induzidas eletricamente, que em sua vez influem sobre a bobina de medição devida recepção das sondas.

Ao passar a sonda sobre o defeito, se modifica de forma abrupta a tensão de medição registrada, por não poder desenrolar as correntes induzidas na zona do defeito da

mesma forma homogênea que há em zonas sem defeitos. Na figura 3.2 se mostra um esquema de sistema de detecção do Circograph em que as sondas rotativas passam por um defeito a cada volta, emitindo cada vez um sinal.

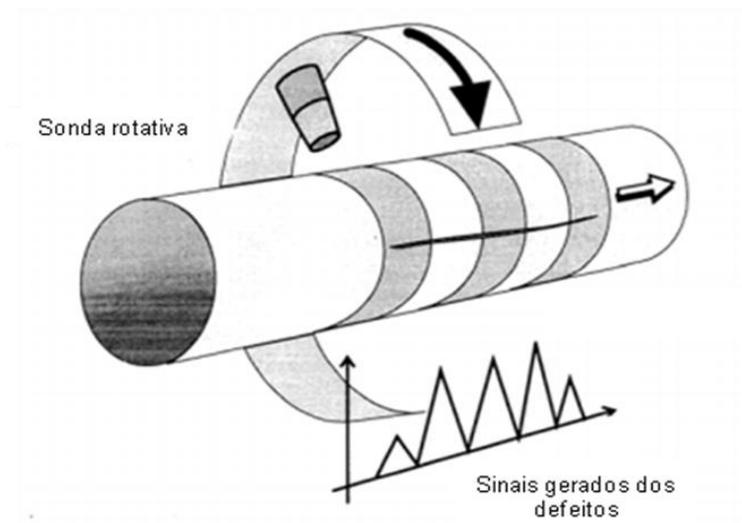


Figura 3.2 Sistema de detecção Circograph, ilustração do sinal gerado durante a inspeção em uma barra com defeito superficial [27].

O Circograph da Gerdau Charqueadas possui um cabeçote rotativo tipo RO 30 onde sua faixa de inspeção é de 9mm à 30mm de diâmetro, comprimento de 2000mm à 7000mm.

O cabeçote possui quatro sondas dispostas a 90°, podendo operar com rotações variáveis até 9000 RPM. A velocidade de inspeção máxima é 1,5 m/s (90m/min), com cobertura de 100% da superfície. A fórmula que permite o calcula de velocidade de teste é:

$$V_p = \frac{K.m.Bs.n}{60000} \quad \text{equação (3.1)}$$

V_p = velocidade de teste (m/s)

K = número de cabeça de teste

Bs = número de sondas por cabeça de teste

n = rotação (RPM)

As sondas em rotação traçam um percurso helicoidal na superfície da peça em teste, durante a passagem da mesma pelo cabeçote rotativo. A fórmula acima é utilizada para que

a velocidade de teste garanta a cobertura total da superfície da barra, através de sobreposição de varredura. Este cálculo não é feito pelo inspetor, o mesmo recebe uma tabela indicando a velocidade máxima de teste e a rotação associado a esta velocidade.

A superfície da peça é inspecionada pelas sondas sem contato físico. As sondas possuem circuitos diferenciais, sendo que os sinais são formados comparando-se pequenas regiões adjacentes da superfície da peça [28].

3.2.1 Calibração do Equipamento

O Circograph é calibrado com padrões artificiais, que possuem o mesmo acabamento superficial do material a ser utilizado no ensaio.

Durante a calibração são realizadas as compensações dos sinais das sondas, ou quando o ajuste de compensação de distância. As sondas por não serem fisicamente iguais, necessitam de compensação eletrônica para fornecerem sinais de mesma amplitude.

A calibração de distância é outro controle necessário para garantir que o mesmo defeito possa fornecer a mesma amplitude de sinal, independente da posição que passa pela sonda de teste.

Quando o ruído proveniente da superfície da peça em ensaio interfere com a detectabilidade do defeito desejável, o Circograph possui um recurso que é o ângulo de fase. Esta ferramenta possibilita posicionar o sinal de defeito defasado do sinal ruído, ajustando o sinal de defeito em relação ao de interferência.

Uma etapa importante é o ajuste da distância da sonda e a peça. Esta distância é fornecida em uma tabela em função do diâmetro do material. Se a distância ajustada for menor que o necessário, existe o risco de danificar as sondas, e se for maior, a calibração adequada não será obtida. Geralmente se dá entre 2mm e 3mm de distância da sonda e peça.

A verificação da calibração do equipamento é feita no modo automático, nas mesmas condições de teste, passando o padrão com o defeito voltado para os sentidos Norte, Sul, Leste e Oeste. Nestas verificações, o defeito artificial deve ser detectado todas às vezes com variação máxima da amplitude do sinal dentro dos limites permitidos [27].

3.2.2 Cuidados Especiais

Conforme citado na revisão bibliográfica, as bordas do material influenciam diretamente os resultados da inspeção das barras, ocasionando o chamado efeito de borda, neste trabalho, as bordas representam as pontas das barras, ou melhor, as duas extremidades das barras.

Com ajuste interno do equipamento na função tamanho ponta não testada da barra durante o ensaio, foi ajustado no equipamento, para não inspecionar a ponta de entrada em 50mm e a ponta de saída (calda da barra) nada foi modificado, isto de modo a minimizar ou até mesmo eliminar este efeito, que é prejudicial ao ensaio.

3.3 Metodologia Empregada

Os testes realizados neste trabalho ocorreram no ambiente fabril, sendo que foram divididos em duas etapas distintas.

De acordo com MSA 3ª Edição (2002), muitas vezes assume-se que as medições são exatas e freqüentemente a análise e inclusões são baseadas em suposições. Quando uma falha individual ocorre, o sistema de medição varia afetando a medida individual e, conseqüentemente, a decisão é baseada neste dado.

Erros nos sistemas de medição podem ser classificados em cinco categorias: Tendência (Bias), repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade e linearidade. No caso estudado será realizada uma Análise do Sistema de Medição (MSA) por atributo. O método atributo é utilizado quando se tem um valor medido apresentando um número finito de categorias. O mais comum é o tipo passa-não-passa no qual existem somente duas possibilidades de resultados. Outros sistemas por atributo, por exemplo o padrão visual, resulta de cinco a sete categorias de distinção.

Primeiramente, foi elaborado um estudo de capacidade buscando identificar a influência das principais variáveis, e elaborada uma matriz experimental para avaliação dos parâmetros de processo amplitude, ganho e ajuste mecânico.

A segunda etapa do experimento buscou identificar efetivamente o melhor ajuste do equipamento variando os operadores conforme as conclusões dos resultados do MSA – Análise dos Sistemas de Medição método por atributos sistema passa-não-passa.

3.3.1 Estudo de Capabilidade – Primeira Etapa dos Experimentos

Com auxílio do software MINITAB, foi elaborada uma matriz experimental para avaliação dos parâmetros de processo amplitude. Sendo analisada a influência na variação das amplitudes de inspeção durante a calibração e inspeção do equipamento, pode-se determinar a confiabilidade e assertividade do ensaio, abaixo segue definição:

Confiabilidade – Quantidade de defeitos reais existentes no material, sobre a quantidade de defeitos detectados.

Assertividade – Quantidade de defeitos existentes detectados acima do NI (nível de inspeção), sobre a quantidade de defeitos detectados acima do NI.

Neste trabalho foram definidos os índices de performance (PpK) que informam como o processo agiu no passado ou está agindo no momento e indica quão próxima a média está do valor alvo do processo.

A fórmula para cálculo do **PpK** é dada por:

$$PpK = \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \quad \text{equação 3.2}$$

Onde:

\bar{X} = média das amostras

LSL = limite inferior de especificação

σ = desvio padrão calculado

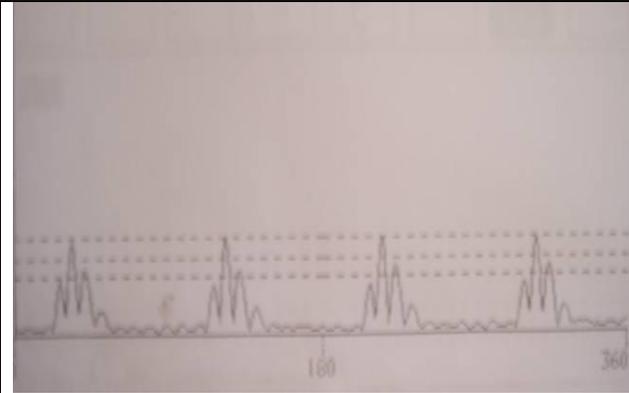
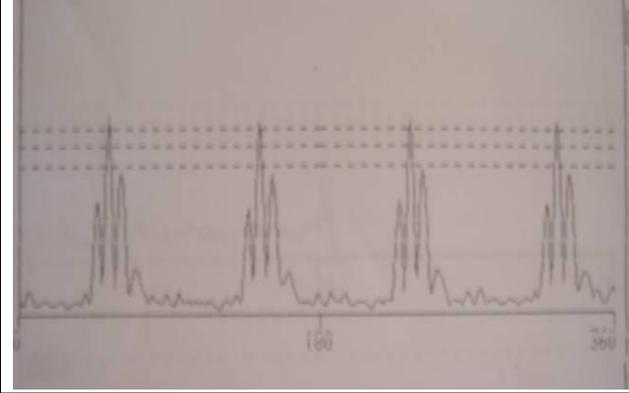
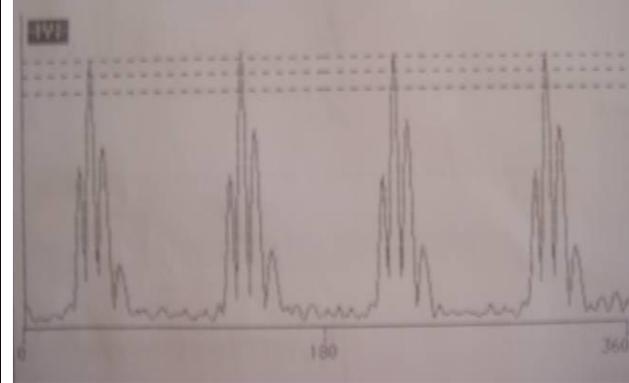
Avaliação do cálculo do índice:

- processo incapaz: $PpK < 1$
- processo aceitável: $1 \leq PpK \leq 1,33$
- processo capaz: $PpK \geq 1,33$

O principal objetivo deste estudo do índice de capacidade do processo de inspeção foi definir qual melhor parâmetro de inspeção que se possa ter uma confiável inspeção com um menor índice de defeitos falsos.

Para este estudo foram definidas algumas faixas de amplitudes para realizar a calibração do equipamento, com auxílio da barra padrão. A tabela 3.1, mostra as calibrações para cada faixa especificada no ensaio.

Tabela 3.1 Ilustrações com as diferentes calibrações para cada faixa de amplitude utilizada no estudo de capacidade [Elaborado pelo Autor].

	<p>Trig A – Amplitude de 15% (primeira linha pontilhada, tendo como referência base). Trig B – Amplitude de 20% (linha pontilhada do meio). Trig C – Amplitude de 25% (linha pontilhada superior).</p> <p>Figura mostra equalização das 4 sondas de ensaio na amplitude de +/- 25% (picos) com defeito de 0,15mm de profundidade.</p> <p>Os testes foram definidos como referencia para rejeição uma amplitude de 25% (Trig C).</p>
	<p>Trig A – Amplitude de 40% (primeira linha pontilhada, tendo como referência base). Trig B – Amplitude de 45% (linha pontilhada do meio). Trig C – Amplitude de 50% (linha pontilhada superior).</p> <p>Figura mostra equalização das 4 sondas de ensaio na amplitude de +/- 50% (picos) com defeito de 0,15mm de profundidade.</p> <p>Os testes foram definidos como referencia para rejeição uma amplitude de 45% (Trig C).</p>
	<p>Trig A – Amplitude de 75% (primeira linha pontilhada, tendo como referência base). Trig B – Amplitude de 80% (linha pontilhada do meio). Trig C – Amplitude de 85% (linha pontilhada superior).</p> <p>Figura mostra equalização das 4 sondas de ensaio na amplitude de +/- 80% (picos) com defeito de 0,15mm de profundidade.</p> <p>Os testes foram definidos como referencia para rejeição uma amplitude de 75% (Trig C).</p>

Para garantia de uma correta equalização de todas as sondas, é extremamente importante realizar um ajuste mecânico muito rigoroso no equipamento (roletes, guias e

buchas). Isto ajuda a minimizar o impacto da rejeição por defeitos falsos causados pelo excesso de ruído.

3.3.2 MSA – Análise de Sistema de Medição – Segunda Etapa dos Experimentos

Com base nos resultados do estudo de capacidade, os parâmetros de processo não significativos foram descartados (amplitude de calibração e NI) e os significativos foram testados de forma mais detalhada (influência ajuste operacional).

Os ensaios realizados tiveram seus resultados comparados com o critério de aceite do manual 3ª edição do MSA – Análise dos Sistemas de Medição [29] método por atributos sistema passa-não-passa.

A avaliação de sistemas de classificação de atributos é feita por meio do estudo da eficácia do equipamento em detectar itens perdidos ou defeituosos e da tendência com que o equipamento rejeita unidades perfeitas e aceita unidades defeituosas.

Para a tomada de decisão é necessário o cálculo da eficácia que é a probabilidade de classificação errada e a probabilidade de falso alarme. O cálculo da eficácia do sistema de medição mede a capacidade dos diferentes testes no equipamento automático em classificar um item como conforme ou não - conforme, equação 3.3. O índice varia de 0 a 1, sendo 1 a perfeição em termos de classificação, conforme MSA 3ª Edição (2002).

A Eficácia (%E) ou Acerto: representam a capacidade do equipamento em detectar, de uma forma correta itens aprovados e defeituosos.

$$\%E = \frac{\text{Número de identifica ções corretas}}{\text{Número total de oportunidades de acerto}} \quad \text{equação 3.3}$$

O cálculo da probabilidade de classificação errada (%CE), equação 3.4, identifica a probabilidade de se aceitar um item não conforme, este erro é considerado grave por permitir o aceite de itens ruins.

A Probabilidade de Classificação Errada (%CE): representa a chance de que um item defeituoso não seja rejeitado. No caso, que uma barra não fosse rejeitada.

$$\%CE = \frac{\text{Número de identifica ções falhas}}{\text{Número total de oportunidades de falhas}}$$

equação 3.4

O cálculo de probabilidade de falso alarme (%FA), Equação 3.5, identifica a probabilidade de se rejeitar um item conforme. Este erro, a princípio, não é extremamente grave, mas pode gerar altos custos com retrabalhos e re-inspeções. Ainda, no caso estudado, pode deixar o poder decisivo nas mãos do operador, o que também causa um problema de confiabilidade.

A Probabilidade de Alarme Falso (%FA): representa a chance de que um item perfeito seja rejeitado. No caso, que um material sem defeito fosse dado como rejeitado.

$$\%FA = \frac{\text{Número de alarmes falsos}}{\text{Número total de oportunidades de alarmes falsos}}$$

equação 3.5

Tabela 3.2 Tabela de decisão do sistema de medição para separação de barras por qualidade [29].

Decisão Sistema Medição	de	Eficácia	Classificação Errada	Alarme Falso
Alta		> 90%	< 2%	< 5%
Regular – pode ser melhorado		> 80%	< 5%	< 10%
Baixa – necessita ser melhorado		< 80%	> 5%	> 10%

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do Estudo de Capabilidade

Os ensaios foram realizados conforme se tinha previsto e os dados todos coletados após a inspeção sem nenhuma anormalidade, sendo lançados na matriz que serviu de base para a definição dos melhores parâmetros.

A matriz experimental foi definida conforme tabela 4.1, tendo sido constatadas grandes diferenças entre a performance na confiabilidade e a quantidade de defeitos falsos, sendo possível se estabelecer uma melhor relação para garantia e definição da capacidade do processo de inspeção que utiliza o método por correntes parasitas.

Tabela 4.1 Planilha com medidas de amplitudes obtidas a partir dos resultados da inspeção [Elaborado pelo Autor].

Qde Amstras	AMPLITUDE (%)					
	Calibração 15 - 25	Efeito Borda	Calibração 40 - 50	Efeito Borda	Calibração 75 - 85	Efeito Borda
1	24,89	11,63	53,04	16,84	91,39	37,12
2	25,00	9,74	53,74	24,64	83,20	31,43
3	24,60	9,48	57,01	22,49	84,05	32,53
4	23,75	10,59	55,32	20,93	90,70	39,13
5	26,05	12,30	57,92	20,53	86,85	30,18
6	26,42	14,12	48,88	22,44	92,72	33,56
7	27,27	10,55	49,38	18,04	96,15	34,77
8	25,02	10,96	55,98	23,62	98,51	38,17
9	25,07	12,65	54,29	38,13	93,02	35,40
10	24,98	12,78	49,43	19,91	96,39	40,07
11	26,53	12,35	49,13	27,93	96,87	40,48
12	25,20	9,88	52,03	22,44	83,69	34,75
13	23,95	12,44	55,23	18,58	91,44	33,47
14	24,31	10,55	50,00	18,91	88,58	32,89
15	26,82	13,48	58,93	15,89	81,69	40,97
16	23,60	11,31	60,02	22,51	95,43	31,68
17	27,76	11,08	54,59	22,36	97,50	34,43
18	25,13	14,93	56,35	16,40	88,92	31,66
19	25,13	11,38	53,88	19,69	90,31	38,91
20	23,09	10,50	51,53	26,80	89,35	32,55
21	27,20	11,61	52,12	21,56	84,26	32,08
22	27,38	17,75	48,47	19,87	93,78	43,30
23	23,49	11,68	53,33	19,40	84,80	48,56
24	28,02	11,38	51,55	22,36	86,67	34,14
25	25,47	12,21	54,32	21,49	82,34	42,45
26	26,98	14,24	57,85	22,82	85,00	34,66
27	27,16	9,28	55,37	19,33	92,72	33,47
28	25,00	15,00	52,19	20,96	92,68	40,68
29	22,29	10,66	50,14	19,93	95,27	48,11
30	24,24	10,78	55,66	22,71	84,53	35,08

Tabela 4.2 Avaliação dos resultados e desempenho da inspeção [Elaborado pelo Autor].

	Amplitude LSL (%)	Desvio Padrão	Média Amplitude (%)	PpK	Performance (PPM)	Def. Falsos (PPM)	PpK
Calibração 15-25	15	1,49	25,39	2,32	0	49817,92	0,55
	20			1,2	150,48	8,17	1,44
Calibração 40-50	40	3,16	53,58	1,43	8,77	4,59	1,48
	45			0,9	3321,33	0,01	1,88
Calibração 75-85	75	5,08	89,95	0,98	1635,24	0	2,67
	80			0,65	25109,78	0	3,01

Com auxílio do software MINITAB, foi possível verificar estatisticamente a influência do efeito de borda quanto rejeição por defeitos falsos e estabelecer a melhor faixa de amplitude para calibração do equipamento. Na tabela 4.2, pode-se verificar uma melhor relação entre a performance (capacidade de não detecção da barra padrão em PPM) com defeitos falsos (capacidade de detecção de defeitos falsos por efeito de borda em PPM). Após determinado a melhor relação, tem-se que avaliar se o processo é capaz, isto quer dizer, possui um $PpK > 1,33$.

Os resultados obtidos durante a inspeção para cada uma das faixas de amplitudes estão ilustrados na figura 4.1, onde se pode verificar os picos (amplitudes) gerados pelo defeito artificial do padrão e o efeito da borda.

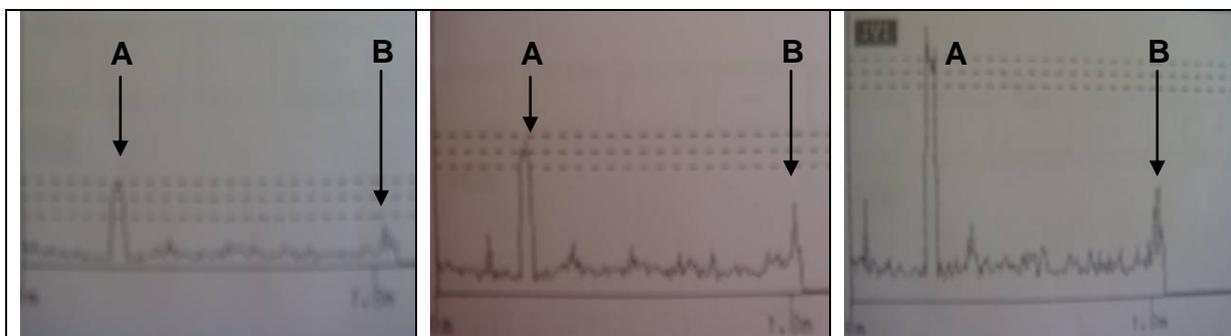


Figura 4.1 Diferentes amplitudes geradas após a inspeção A) amplitude defeito artificial e B) amplitude do efeito de borda (defeito falso) [Elaborado pelo Autor].

A figura 4.2 demonstra o estudo de capacidade do processo que apresenta um melhor índice de performance em relação à amplitude de calibração com a confiabilidade de inspeção, pois verifica-se que o $PpK > 1,33$, tornando o processo capaz para uma faixa de calibração de 40-50%.

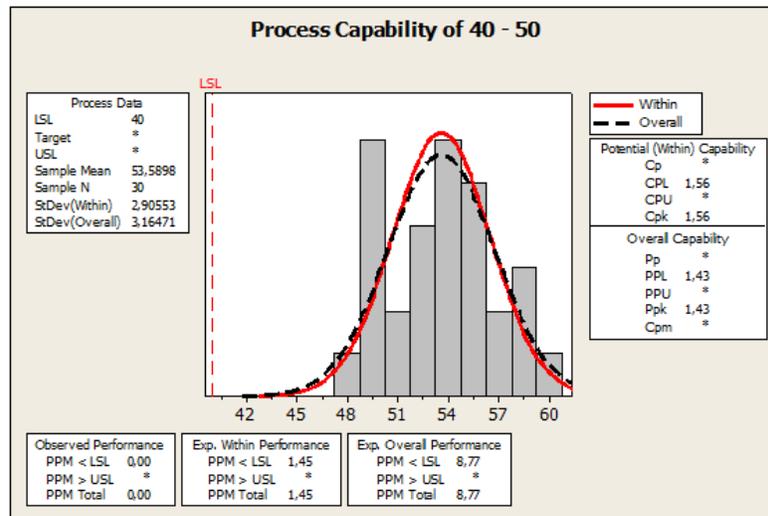


Figura 4.2 Estudo de performance quanto à capacidade de detecção do padrão NI 0,15mm realizado no software MINITAB [Elaborado pelo Autor].

A figura 4.3 demonstra o estudo de capacidade do processo que apresenta um menor índice de rejeição por defeitos falsos devido ao efeito de borda em relação à amplitude de calibração com a confiabilidade de inspeção, pois se verifica que o $PpK > 1,33$, tornando o processo capaz para uma faixa de calibração de 40-50%.

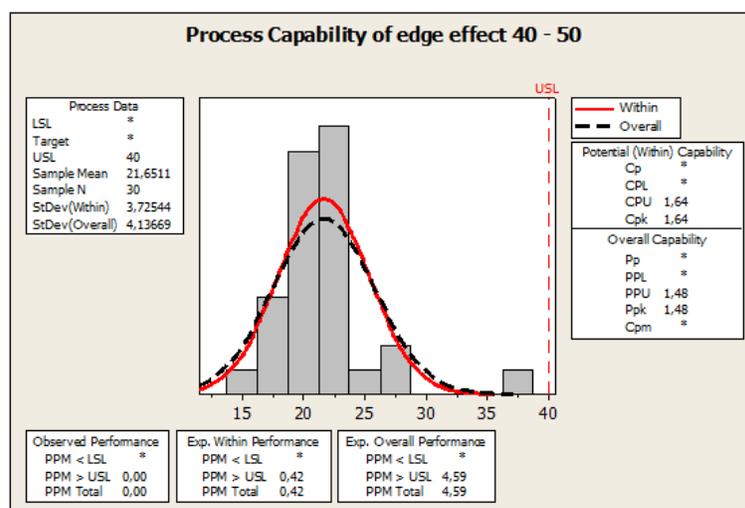


Figura 4.3 Estudo de performance quanto à rejeição por defeitos falsos devido ao efeito de borda realizado no software MINITAB [Elaborado pelo Autor].

4.2 Resultado do MSA – Análise de Sistemas de Medições

Para a avaliação imparcial dos resultados obtidos até o momento, utilizaram-se os dados dos testes realizados para a elaboração de um MSA.

O estudo é realizado através da avaliação das discontinuidades existentes em cada uma das barras testadas, não mais considerando a somente a barra padrão, mas as 30 barras com discontinuidades superficiais. Foram utilizadas 30 repetições, conforme planilha 4.3 e divididos os testes entre três operadores diferentes.

Conforme parágrafo anterior, para o estudo de atributo são necessárias três repetições na avaliação dos resultados para cada barra contendo defeitos superficiais. Esta repetição será realizada para cada um dos parâmetros selecionados, que são os parâmetros definidos no estudo de Capabilidade.

A tabela 4.3 demonstra os resultados dos testes quanto ao critério de aprovação ou reprovação das barras inspecionadas, representando os acertos obtidos dos experimentos para os parâmetros propostos bem como a quantidade de vezes que o equipamento sinalizou.

No caso estudado e apresentado na Tabela 4.3, o valor 1 significa que a discontinuidade existente foi detectada e o valor 0 que a barra foi aprovada (sem defeito).

Tabela 4.3 Tabela de decisão do sistema de medição para separação de barras por qualidade [Elaborado pelo autor].

Item	Operador A			Operador B			Operador C			Referência
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Na tabulação cruzada, cada teste é cruzado com outro para a visualização de sua interação e o nível de concordância, através da avaliação de kappa Equação 4.1.

Esta análise é utilizada para determinar se existe alguma divergência entre os diferentes testes no equipamento automático (avaliadores), o que não garante que o sistema de medição é adequado para classificar peças boas ou ruins.

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad \text{equação 4.1}$$

Onde:

p_o = soma das proporções observadas da diagonal principal da célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) dividido pelo total geral.

p_e = soma das proporções esperadas da diagonal principal da célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) dividido pelo total geral.

Conforme MSA 3ª Edição (2002), kappa é a medida da razão do teste. O valor de Kappa $> 0,75$ indica muito boa concordância (com um kappa máximo = 1); valores $< 0,40$ indicam uma média concordância.

De acordo com a Tabela 4.4, os testes apresentam uma boa concordância entre os operadores, não ocorrendo muita diferença entre os mesmos, com *Kappa* variando entre 0,49 e 0,50, devido quantidade de defeitos falsos detectados durante o teste.

Com esta informação, é desenvolvida uma tabulação cruzada comparando os diferentes testes no equipamento automático (avaliadores) com a decisão de referência. O kappa também é calculado, seguindo a mesma equação.

De acordo com a Tabela 4.5, os operadores A, B e C apresentam uma média concordância com a referência, com valores de kappa entre 0,42 e 0,45. Os resultados foram influenciados diretamente pelo índice de defeitos falsos apresentados (rejeição falsa média de 17,6%), mas, em contrapartida, todos mostraram uma garantia na inspeção com uma confiabilidade alta.

Tabela 4.4 Tabulação cruzada relação entre os métodos - resposta para o MSA entre os operadores A, B e C [Elaborado pelo autor].

Tabulação Cruzada A X B			B		TOTAL
			0,00	1,00	
A	0,00	Contagem	47	0	47
		Contagem Esperada	15,7	12,5	28,2
	1,00	Contagem	3	40	43
		Contagem Esperada	14,3	11,5	25,8
TOTAL		Contagem	50	40	90
		Contagem Esperada	30,0	24,0	54,0

Tabulação Cruzada B X C			C		TOTAL
			0,00	1,00	
B	0,00	Contagem	47	3	50
		Contagem Esperada	15,7	14,3	30,0
	1,00	Contagem	0	40	40
		Contagem Esperada	12,5	11,5	24,0
TOTAL		Contagem	47	43	90
		Contagem Esperada	28,2	25,8	54,0

Tabulação Cruzada A X C			C		TOTAL
			0,00	1,00	
A	0,00	Contagem	46	1	47
		Contagem Esperada	14,7	13,5	28,2
	1,00	Contagem	1	42	43
		Contagem Esperada	13,5	12,3	25,8
TOTAL		Contagem	47	43	90
		Contagem Esperada	28,2	25,8	54,0

Kappa	A	B	C
A	-	0,49	0,50
B	0,49	-	0,49
C	0,50	0,49	-

Tabela 4.5 Tabulação cruzada relação a referência – resposta para o MSA entre os operadores A, B e C [Elaborado pelo autor].

Tabulação Cruzada A X REF			REF		TOTAL
			0,00	1,00	
A	0,00	Contagem	39	8	47
		Contagem Esperada	12,2	16,0	28,2
	1,00	Contagem	0	43	43
		Contagem Esperada	11,2	14,6	25,8
TOTAL		Contagem	39	51	90
		Contagem Esperada	23,4	30,6	54,0

Tabulação Cruzada B X REF			REF		TOTAL
			0,00	1,00	
B	0,00	Contagem	39	11	50
		Contagem Esperada	13,0	17,0	30,0
	1,00	Contagem	0	40	40
		Contagem Esperada	10,4	13,6	24,0
TOTAL		Contagem	39	51	90
		Contagem Esperada	23,4	30,6	54,0

Tabulação Cruzada C X REF			REF		TOTAL
			0,00	1,00	
C	0,00	Contagem	39	8	47
		Contagem Esperada	12,2	16,0	28,2
	1,00	Contagem	0	43	43
		Contagem Esperada	11,2	14,6	25,8
TOTAL		Contagem	39	51	90
		Contagem Esperada	23,4	30,6	54,0

	A	B	C
Kappa	0,45	0,42	0,45

A Tabela 4.6 mostra os parâmetros resultantes da aplicação do MSA para o resultado de cada teste realizado no equipamento de inspeção automática utilizando o método por corrente parasita.

Na avaliação realizada na Tabela 4.6, os operadores A e C apresentaram os melhores resultados, com uma eficácia de 91,1%, probabilidade de falso alarme de 15,7% e probabilidade de classificações erradas de 0% (100% de confiabilidade).

O melhor método foi padronizado, sendo os ajustes utilizados pelos operadores A e C. Por fim, a equipe foi treinada para melhor atender o ensaio por correntes parasitas.

Tabela 4.6 Resposta do MSA entre os operadores A, B e C [Elaborado pelo autor].

Avaliador:	Boas Corretas	Ruins Corretas	Total Correto	Falsos Alarmes	Class. Errada	Total Geral
A	43	39	82	8	0	90
B	40	39	79	11	0	90
C	43	39	82	8	0	90

Avaliador	A	Laudo	B	Laudo	C	Laudo
Eficácia	91,1%	BOM	87,8%	REGULAR	91,1%	BOM
P (FA)	15,7%	RUIM	21,6%	RUIM	15,7%	RUIM
P (CE)	0,0%	BOM	0,0%	BOM	0,0%	BOM

Analisando todos os resultados e conforme verificado na tabela 3.2, obteve-se uma alta Eficácia com os operadores A e B. Destaca-se que a classificação Errata não ocorreu com nenhum dos operadores, porém nota-se que há necessidade de melhoria quanto à classificação por Falso Alarme, pois todos os operadores mostraram baixa capacidade.

Sabe-se que algumas variáveis influenciam diretamente na rejeição falsa em equipamento automático. Abaixo seguem os fatores que afetam a rejeição por defeitos falsos em equipamento por inspeção utilizando o método por correntes parasitas:

- Vibração do equipamento durante a inspeção;
- Ajuste operacional adequado (lift off);
- Defeitos abaixo do NI com morfologias irregulares;
- Rugosidade da superfície do material;
- Efeito de borda (edge effect);
- Desgaste em buchas de ajuste;

- Desgaste do cabeçote de inspeção.

4.2.1 Análise Metalográfica dos Defeitos

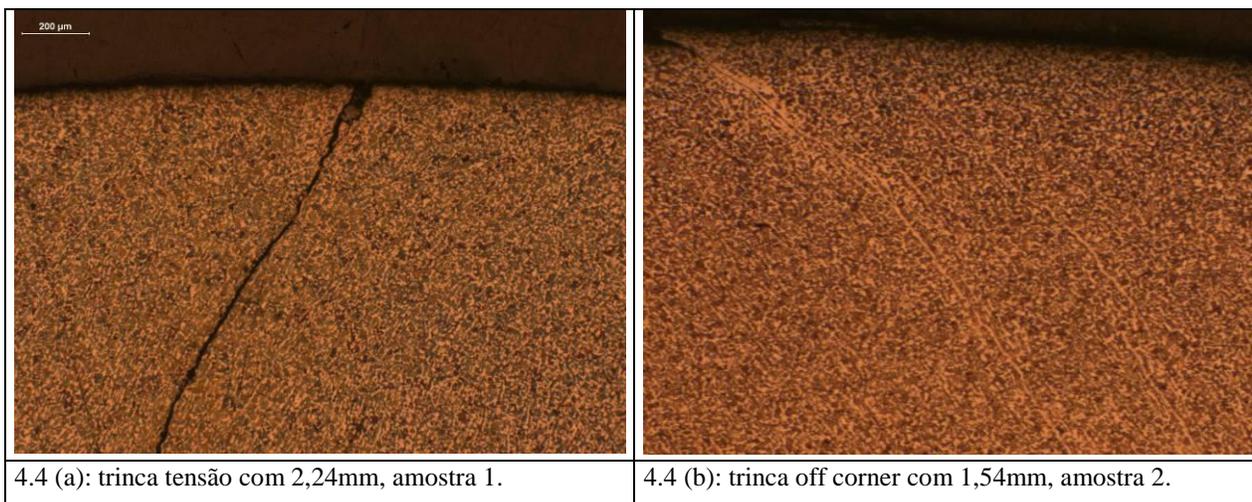
Teve-se a necessidade de avaliar metalurgicamente as barras de bitola 22,30mm que apresentaram defeitos de morfologias diferentes, e que, impactaram diretamente nos resultados de inspeção.

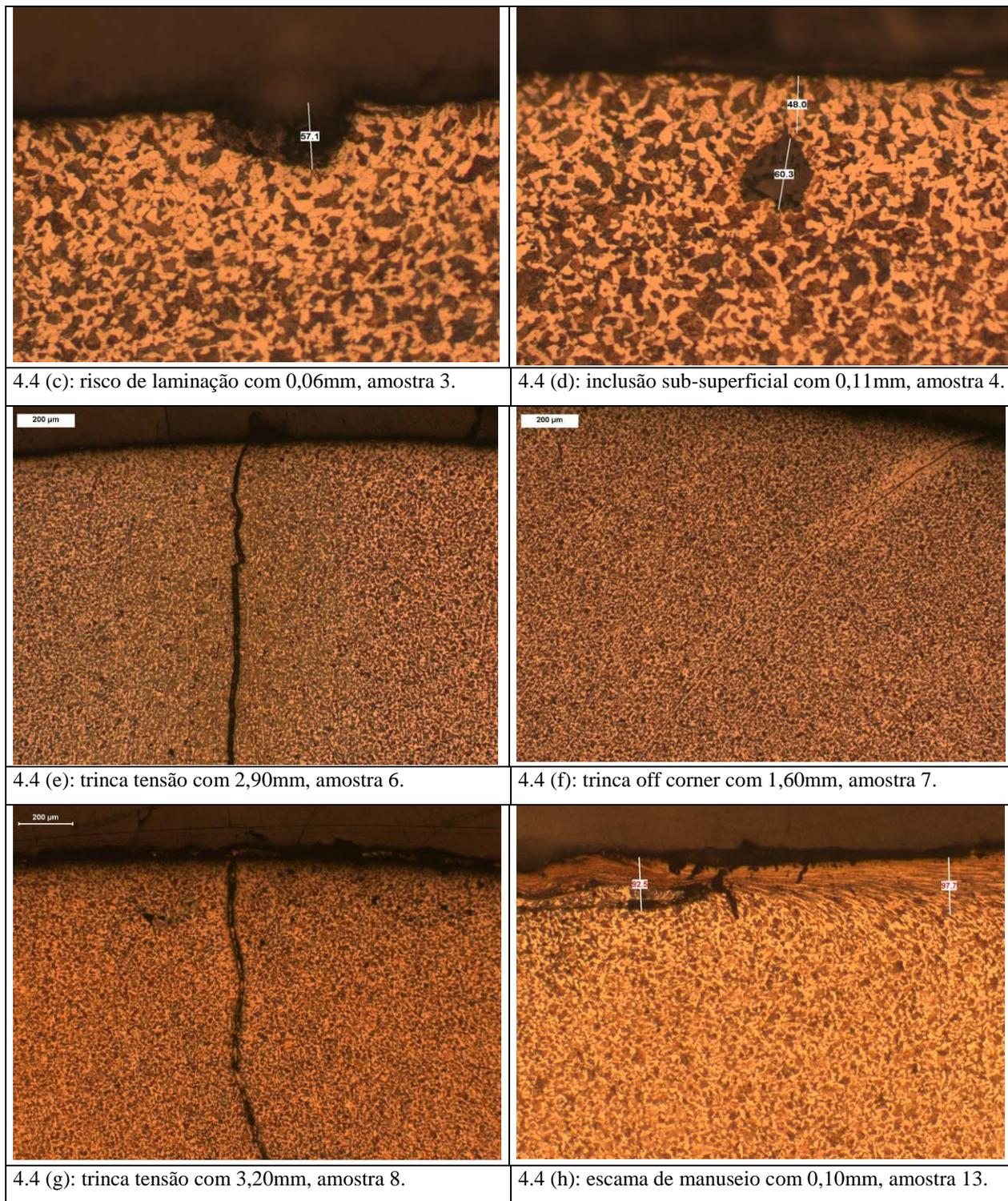
As amostras foram seccionadas longitudinalmente e tiveram suas superfícies submetidas a um esmerilhamento e subsequente lixamento, polimento e ataque químico com reagente nital 3%. As análises foram realizadas em um microscópio ótico.

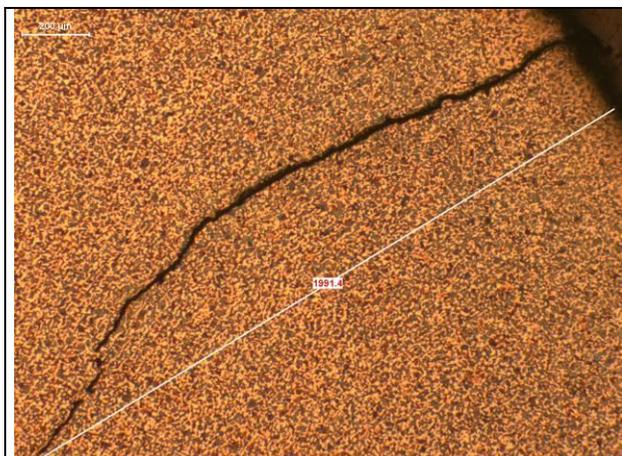
As análises metalográfica das amostras nas regiões superficiais longitudinais dos defeitos utilizadas como referencia para realização dos testes de verificação através do MSA – Análise de Sistema de Medição método por atributo, conforme mostrado nas figuras 4.4.

As amostras 1, 2, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 20, 21 e 23 apresentaram defeitos superficiais com profundidade acima do NI 0,15mm (nível de inspeção ajustado no equipamento para segregação das barras durante os testes), sendo estas consideradas como reprovadas pelo equipamento.

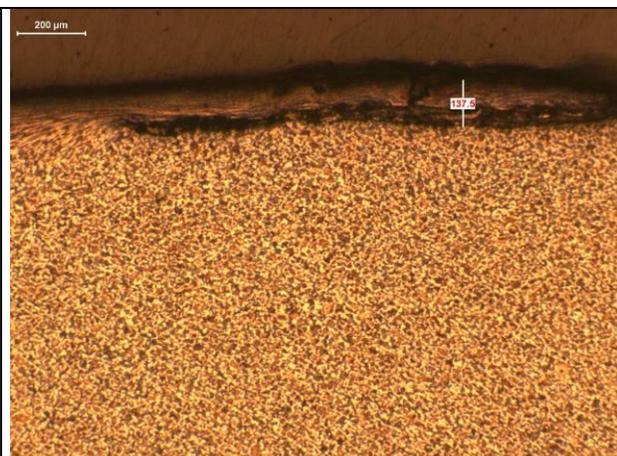
As amostras 3, 4, 13, 18 19 apresentaram defeitos superficiais com profundidade abaixo do NI 0,15mm, onde estas também foram segregadas com reprovadas pelo equipamento, sendo consideradas como classificação errata.



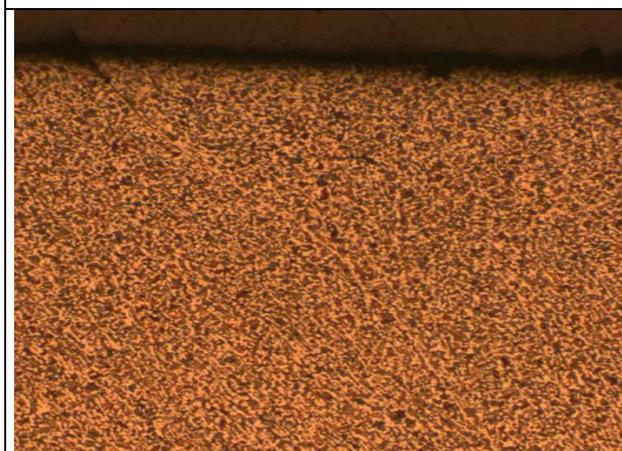




4.4 (i): trinca tensão com 2,00mm, amostra 14.



4.4 (j): escama de manuseio com 0,16mm, amostra 15.



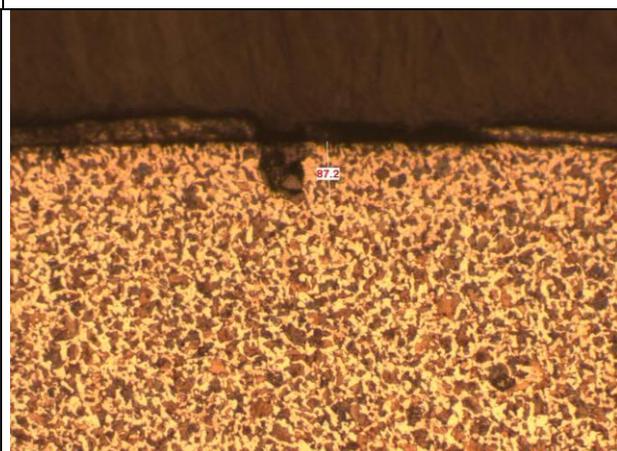
4.4 (k): trinca tensão com 2,50mm, amostra 16.



4.4 (l): trinca laminação com 0,55mm, amostra 17.



4.4 (m): escama de manuseio com 0,08mm, amostra 18.



4.4 (n): trinca de laminação com 0,09mm, amostra 19.

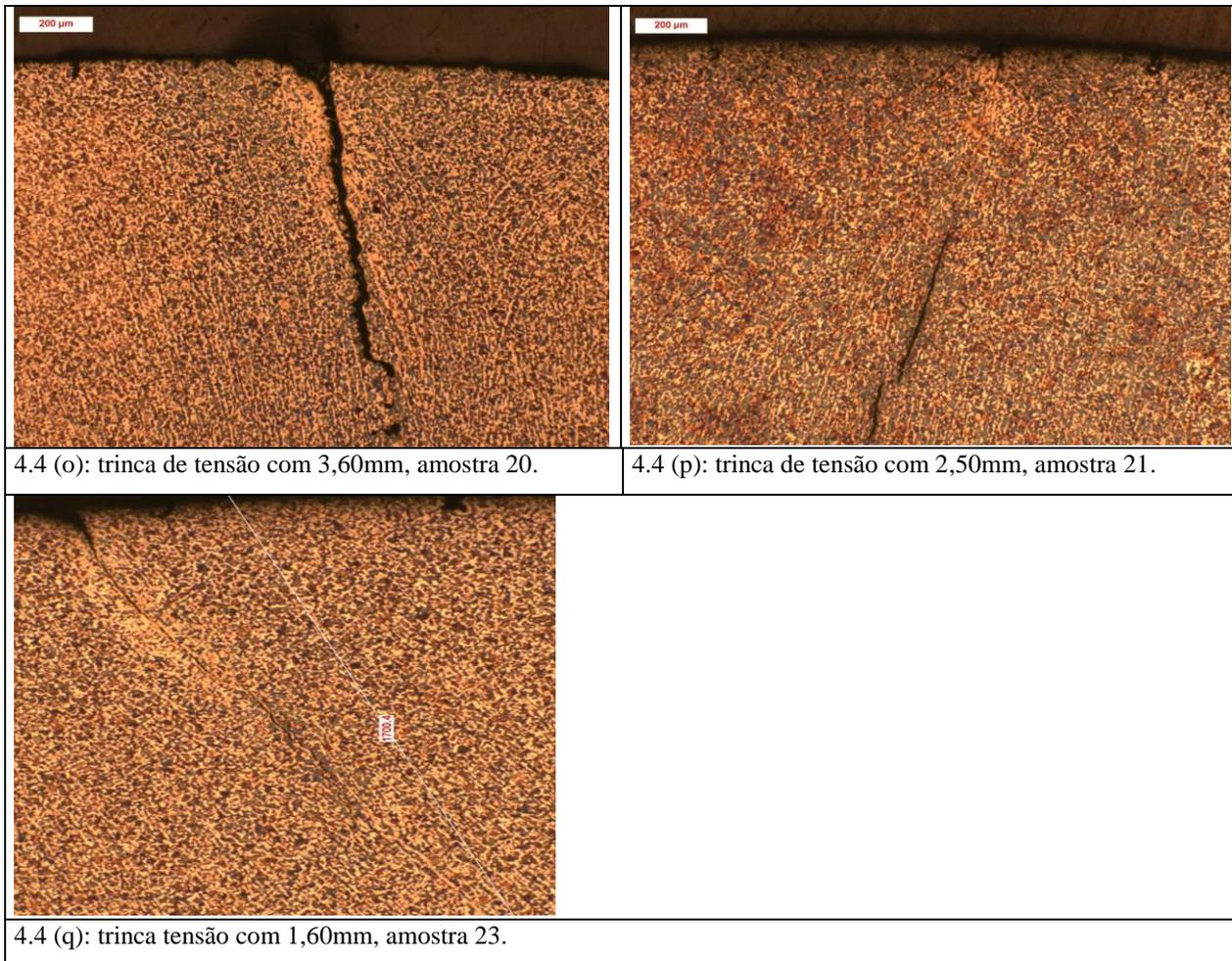


Figura 4.4 Microestrutura na região superficial longitudinal das amostras retiradas para análise de profundidade dos defeitos da bitola 22,30mm. (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3; (d) amostra 4; (e) amostra 6; (f) amostra 7; (g) amostra 8; (h) amostra 13; (i) amostra 14; (j) amostra 15; (k) amostra 16; (l) amostra 17; (m) amostra 18; (n) amostra 19; (o) amostra 20; (p) amostra 21; (q) amostra 23. Ampliação: 50X. Ataque: Nital 3%

5 CONCLUSÃO

Com o resultado dos testes foi possível melhorar a inspeção no equipamento CIRCOGRAPH que utiliza o método por correntes parasitas. O estudo de capacidade mostrou-se extremamente importante para avaliação da confiabilidade de inspeção. Os resultados demonstraram que quanto maior a amplitude de calibração do equipamento maior o desvio padrão, e vice-versa, quanto menor a amplitude de calibração do equipamento menor o desvio padrão. A amplitude que melhor apresentou uma relação entre a capacidade de detecção do padrão e a rejeição por defeito falso foi à calibração com amplitude de 40-50%.

A coleta de dados do trabalho realizado foi facilitada pela existência de um controle adequado no equipamento de inspeção automático, permitindo a correta compreensão e resolução do problema. Os testes realizados apresentaram diferentes respostas relativas à inspeção do material de bitola com diâmetro de 22,30 mm. Alguns deles se mostraram robustos e confiáveis o suficiente para garantir uma inspeção com uma alta assertividade e confiabilidade, com o menor índice de indicações falsas possível.

A partir de um comparativo entre os testes realizados com a primeira padronização proposta do trabalho, o estudo de capacidade, se obteve um ganho significativo. Após o desenvolvimento do MSA, garantiu-se uma assertividade razoável e uma alta confiabilidade do equipamento, porém com um índice de indicações falsas muito inferiores, passando de 25% para um índice de 8%, sendo então este o mais assertivo.

Os operadores A e C apresentaram os melhores resultados, dentre eles uma alta confiabilidade e um baixo índice de defeitos falsos, sendo que todos com nenhuma classificação errata.

O que se pode deixar como uma ressalva neste trabalho é que para obter dados confiáveis é necessário realizar um ajuste mecânico adequado no equipamento, mantendo-o sempre alinhado, com buchas e guias novas.

O objetivo do trabalho foi alcançado, sendo que foi aumentada a confiabilidade de inspeção e reduzido o índice de defeitos falsos, utilizando a nova calibração definida neste estudo.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Utilizar metodologia para otimizar parâmetros do aparelho CIRCOGRAPH RO 30;

Avaliar comportamento de materiais com superfícies rugosas;

Análise estatística da influência da variação de bitola com a relação do efeito de borda;

Avaliar comportamento do ensaio para material com superfície rugosa;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Madias, J.; Reda, L. Defeitos em produtos longos de aços ao carbono e baixa liga. Buenos Aires: Instituto Argentino de Siderurgia, 2004..
- [2] Meyete, C. L.; Elliott, V.E. A Method for determining the Origin of Surface Defects in Rolled Steel Products. Transaction of the AIME, v. 176, pp. 201-218, 1948.
- [3] Menezes, G.; Torres, V. Defeitos Superficiais em Fio Máquina de Aço Carbono e Suas Conseqüências. In: Congresso da associação Brasileira de Metais-ABM, XXXV, s.d.
- [4] Gerdau Charqueadas – Álbum de Defeitos Superficiais. Garantia da Qualidade, Laboratório Metalúrgico, 2005.
- [5] ASNT, American Society of Nondestructive Testing, 2002. <http://www.asnt.org/publications/library/library.htm>. Acesso em: 20 jun. 2011
- [6] SHULL, Peter J. . Nondestructive Evaluation Theory, Techniques, and Applications. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [7] Guido, M. A. – Curso de Correntes Parasitas. Sumaré, SP: Eletrometal, Junho à Julho/1995.
- [8] Hagemaiier, D. – Princípios Fundamentais do Ensaio com Correntes parasitas. 1ª edição. California, 1990.
- [9] Guido, M. A. – Apostila 11, Correntes Parasitas. Nivelamento nível 3, ABENDE.
- [10] Pereira, P. “Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis” Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007, 80p.
- [11] Stegemann, D. – Fundamentos do Método de Correntes Parasitas. 1ª edição. Junnich, 1990.
- [12] Mix, P. – Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. 2ª edição. New Jersey, 2005.
- [13] Robert, R., “Efeito Pelicular”, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, Nº 2, 2000.
- [14] Dodd, C.V.; Deeds, W.E.: Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems. Journal of Applied Physics, 39 (1968) No.6, pp. 2829-2838.

- [15] Mottl, Z.: The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing. *NDT International*, 23 (1990) No.1, pp. 11-18.
- [16] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 1. History and electrical theory”, *Insight* Vol 46 N° 5 May 2004.
- [17] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 2. The impedance plane and probe”, *Insight* Vol 46 N° 6 June 2004.
- [18] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V., “Deep Penetrating Eddy Currents and Probes”, 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Germany, 2006.
- [19] Yin, W.; Peyton, A.; “Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors”, *NDT&E International* 40, 2007, p. 43–48.
- [20] Soares, A. – *Correntes Parasitas*. 1^a edição. São Paulo: ABENDE, 2005.
- [21] Zergoug, M.; Lebaili, S. “Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing”. *NDT&E International* 37, 2004, p. 65–72.
- [22] Alencar, D.; Ferraz, W. “O ensaio de correntes parasitas utilizado no controle de qualidade de fabricação de combustíveis nucleares”, XXIV Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, CONAEND 016, São Paulo, junho de 2006.
- [23] Dybiec, C., Włodarczyk, S.; Dybiec, M., “Measurement of own stress using the eddy current method”, *ECNDT*, Vol. 3, 1998.
- [24] Boucherou, N.; Zergoug, M.; Kamel, G. “Mechanical Stress Analysis by Eddy Current Method”, *The Journal of American Science*, 4(4), 2008.
- [25] Ma, X.; Peyton, A.; Zhao, Y. “Eddy current measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals”. *NDT&E International* 39, 2006, p. 562–568.
- [26] Extraída de: <http://www.foerster.com.de>, em Agosto de 2011.
- [27] Cardoso, J.A. – *Apostila Circograph e Defectomat*. Gerdau Charqueadas, 1999.
- [28] Verdasco, J.; Cubero, A. – *Defectos superficiales em barras laminadas*. Fabrica de Basauri, 2003.
- [29] MSA – *Análise dos Sistemas de Medição – Manual de Referência*. 3^a Edição. Direitos Autorais: DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation, 2003.
- [30] Institut Dr. Friedrich Förster - *Teste em Materiais não destrutivos por Processos eletromagnéticos: Princípios de Correntes Parasitas*, 2003.