

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 -
PPGEM

SEPARAÇÃO DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE AÇO PELO
MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS: OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
AJUSTE

Gustavo Morey Mendes

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

Porto Alegre
2009

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 -
PPGEM

SEPARAÇÃO DE DIFERENTES COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE AÇO PELO
MÉTODO DE CORRENTES PARASITAS: OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
AJUSTE

Gustavo Morey Mendes
Engenheiro Metalúrgico,

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 - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título Mestre em
Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Área de Concentração: Siderurgia

Porto Alegre
2009

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. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Otavio Damas Martins

Dr. Rubem Manuel de Braga

Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly pela orientação e bibliografia recomendada.

Aos colegas da Gerdau Aços Especiais Charqueadas do setor Transformação Mecânica que contribuíram com idéias e apoiaram o desenvolvimento do trabalho, em especial aos colaboradores da célula de produção “Linha de Inspeção de Barras Laminadas 3” pela dedicação e comprometimento.

À minha esposa Etiene e ao meu filho Guilherme pelo carinho e compreensão.

À minha irmã Amanda, meu pai Alberto e minha mãe Yara por estarem sempre ao meu lado.

Às minhas avós Terezinha e Erna pelas orações e pelo carinho.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 TESTE DE FAGULHA.....	3
2.1.1 <i>Teoria da Formação</i>	4
2.1.2 <i>Técnica de Observação</i>	4
2.1.3 <i>Verificação do Feixe de Fagulha</i>	6
2.2 ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS.....	6
2.2.1 <i>Introdução ao Método</i>	6
2.2.2 <i>Histórico do Método</i>	7
2.2.3 <i>Vantagens e Limitações</i>	8
2.2.4 <i>Fundamentos do Método</i>	9
2.2.5 <i>Propriedades que afetam as Correntes Parasitas</i>	11
2.2.5.1 <i>Condutividade Elétrica</i>	11
2.2.5.2 <i>Dimensão e Forma do Objeto Ensaiado</i>	12
2.2.5.3 <i>Permeabilidade Magnética</i>	13
2.2.6 <i>Aplicações do Método</i>	14
2.2.7 <i>Tipos de Bobinas</i>	16
2.2.7.1 <i>Bobina Envolvente</i>	18
2.2.7.2 <i>Sonda Superficial</i>	19
2.2.7.3 <i>Sonda Interna</i>	21
2.2.8 <i>Acoplamento Magnético</i>	21
2.2.8.1 <i>Lift-off</i>	22
2.2.8.2 <i>Fator de Enchimento em Bobinas Envolventes</i>	23
2.2.8.3 <i>Efeito de Borda</i>	24
2.2.8.4 <i>Efeito Peculiar</i>	25
2.2.9 <i>Plano de impedância</i>	28
2.2.10 <i>Princípio harmônico</i>	30
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.1 MATERIAIS	32
3.2 EQUIPAMENTO.....	33
3.2.1 <i>Ajuste e Formas de Avaliação</i>	34

3.2.2	<i>Cuidados Especiais</i>	36
3.3	METODOLOGIA UTILIZADA.....	36
3.3.1	<i>Procedimento de Ensaio Geral</i>	37
3.3.2	<i>DOE - Projeto de Experimento – Primeira etapa dos Experimentos</i>	37
3.3.3	<i>Procedimento Final – Segunda etapa de Experimentos</i>	38
3.3.3.1	Detalhamento do Melhor Resultado	39
4	RESULTADOS	41
4.1	RESULTADOS DO PROJETO DE EXPERIMENTO - DOE	41
4.2	RESULTADOS DO PROCEDIMENTO FINAL	44
4.2.1	<i>Detalhamento do Melhor Resultado</i>	45
4.2.1.1	Análise da Classificação Errada	46
4.2.1.2	Análise dos limites de separação por ajuste de composição química:	46
4.2.1.3	Análise do aço SAE 1020.....	49
5	DISCUSSÕES	53
6	CONCLUSÕES	56
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	57
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – OBSERVAÇÃO DAS ZONAS DO FEIXE DE FAGULHAS [1].	4
FIGURA 2.2 – GERAÇÃO DAS CORRENTES PARASITAS NO MATERIAL CONDUTOR [4].	9
FIGURA 2.3 – EFEITO DA ESPESURA DO MATERIAL NO ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS [5].	13
FIGURA 2.4 – TIPOS DE BOBINAS PARA ENSAIOS DE CORRENTES PARASITAS [16].	17
FIGURA 2.5 – DIFERENÇA DE RESPOSTAS DOS SINAIS DEVIDO AO ARRANJO DOS SENSORES [16].	18
FIGURA 2.6 – EXEMPLOS DE SONDAS SUPERFICIAIS [16].	20
FIGURA 2.7 – EXEMPLOS SISTEMA ROTATIVO DE SONDAS SUPERFICIAIS [17].	20
FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO DE BORDA [2].	25
FIGURA 2.9 – CURVA DA ATENUAÇÃO DE INTENSIDADE DE CORRENTES PARASITAS EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO [2].	26
FIGURA 2.10 – PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DAS CORRENTES PARASITAS [18].	27
FIGURA 2.11 – DIAGRAMA DE IMPEDÂNCIA [5].	29
FIGURA 2.12 – FORMAÇÃO DA CURVA DE CONDUTIVIDADE NUM DIAGRAMA DO PLANO DE IMPEDÂNCIA [2].	29
FIGURA 2.13 – DISTORÇÃO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA CAUSADA PELA NÃO-LINEARIDADE DA CURVA DE HISTERESE [22].	30
FIGURA 3.1: EQUIPAMENTO FOERSTER - MAGNATEST D 3.263 [27].	33
FIGURA 3.2: BOBINAS CIRCULARES FOERSTER [17].	34
FIGURA 3.3: FORMA DE AVALIAÇÃO CIRCULAR PARA ENSAIOS NO MAGNATEST D 3.263 [27].	35
FIGURA 4.1: INFLUÊNCIA DOS FATORES DE AJUSTE PARA SEPARAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE AÇO.	42
FIGURA 4.2: AVALIAÇÃO INDIVIDUAL DOS FATORES DE AJUSTE.	43
FIGURA 4.3: RESULTADO FINAL DO DOE DAS INTERAÇÕES DOS FATORES DE AJUSTE.	43
FIGURA 4.4: LIMITES DE SEPARAÇÃO TIPO CÍRCULO PARA CADA COMPOSIÇÃO QUÍMICA. (A) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 1020; (B) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 8620; (C) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 4320; (D) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 8640; (E) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 1045; (F) LIMITE DE SEPARAÇÃO AJUSTADO EM SAE 4140. AMPLIAÇÃO: A,B,C 16:1 E D, E, F 32:1.	47
FIGURA 4.5: MICROESTRUTURA NA REGIÃO SUPERFICIAL LONGITUDINAL DAS CINCO AMOSTRAS PADRÕES DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SAE 1020. (A) AMOSTRA 1; (B) AMOSTRA 2; (C) AMOSTRA 3; (D) AMOSTRA 4; (E) AMOSTRA 5. AMPLIAÇÃO: 50X. ATAQUE: NITAL 3%	50
FIGURA 4.6: REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DOS ENSAIOS DE DUREZA REALIZADOS NAS AMOSTRAS DO AÇO SAE 1020.	51
FIGURA 5.1: SIMULAÇÃO DOS RESULTADOS EM PLANO DE IMPEDÂNCIA PARA AJUSTE EM SAE 1020.	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: FORMAÇÃO DE FAGULHA PARA AÇOS[1].	5
TABELA 2.2: RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE DE MATERIAIS METÁLICOS [5].....	11
TABELA 3.1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS UTILIZADOS.....	32
TABELA 3.2: MATRIZ EXPERIMENTAL DO ENSAIO.....	38
TABELA 3.3: TABELA DE DECISÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA SEPARAÇÃO DE BARRAS POR COMPOSIÇÃO QUÍMICA [38].	39
TABELA 4.1: MATRIZ EXPERIMENTAL COM RESULTADOS.	41
TABELA 4.2: COMPARATIVO DOS RESULTADOS FINAIS.	45
TABELA 4.3: RESULTADOS DETALHADOS DA MELHOR CONDIÇÃO DE PARÂMETROS.	46
TABELA 4.4: RESULTADOS DOS VALORES RESISTIVOS E INDUTIVOS DA COMPOSIÇÕES QUÍMICAS.....	48
TABELA 4.5: RESULTADOS DOS VALORES RESISTIVOS E INDUTIVOS DA COMPOSIÇÕES QUÍMICAS.....	51
TABELA 4.6: RESULTADOS DAS ANÁLISES DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS DO AÇO SAE1020.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Hz	Hertz
H _p	Campo magnético primário
H _s	Campo magnético secundário
Z	Impedância
B	Indução magnética
μ	Permeabilidade magnética
μ _{rel}	Permeabilidade magnética relativa
μ _o	Permeabilidade magnética do vácuo
γ	Característica geométrica
σ	Condutividade elétrica, em % IACS.
ρ	Resistividade elétrica, em μΩ.cm
f	Frequência de ensaio
η	Fator enchimento
δ	Profundidade penetração
U _{ind}	Tensão induzida
HB	Dureza Brinell
Fe	Elemento químico Ferro
C	Elemento químico Carbono
Si	Elemento químico Silício
Mn	Elemento químico Manganês
Cr	Elemento químico Cromo
Ni	Elemento químico Níquel
Mo	Elemento químico Molibdênio
Cu	Elemento químico Cobre

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar o ajuste do equipamento de correntes parasitas para aumentar a confiabilidade de separação de diferentes composições químicas de aço.

Para atingir este objetivo foram realizados experimentos utilizando o aparelho de correntes parasitas - MAGNATEST D - sendo avaliado três diferentes variáveis do processo: frequência de teste, fator de enchimento e avaliação por harmônica.

Foram empregadas frequências de ensaio 2, 4, 8, 16, 32 e 64 Hz, fatores de enchimento de 40% e 18%, as harmônicas utilizadas foram de 1^a e 3^a ordem.

As amostras do teste foram barras de 63,50mm de diâmetro com 6 metros de comprimento e composições químicas SAE 1020, 8620, 4320, 8640, 1045 e 4140 isentas de qualquer tratamento térmico.

Os resultados demonstraram a possibilidade de separar os materiais, onde obtivemos mais de 96% de acerto de separação sem erros falsos para frequência 4 Hz e harmônica de 1^a ordem. O fator de enchimento teve pouca influência nos resultados, indicando que com 40% é mais confiável devido a não indicação de erros falsos.

ABSTRACT

The aim of this work was to find the optimal parameters for Eddy Current equipment to detect different grades of steel thus improving the reliability for this application.

The eddy current equipment utilized was a MAGNATEST D. Three different process parameters were evaluated: frequency, fill factor and harmonic analysis. Frequency varied from 2, 4, 8, 16, 32 and 64 Hz, fill factor ranged from 40% and 18%, and 1st and 3rd harmonic were used.

The samples were steel bars with 63,50mm diameter, 6 meters in length in six SAE steel grades: 1020, 8620, 4320, 8640, 1045 e 4140, without heat treatments.

The results have shown the possibility of separating the materials, with more than 96% of success of separation without false errors for frequencies 4 Hz and harmonic of the 1st order. The fill factor had little influence on results, with 40% being more reliable due to no indication of false errors.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente as indústrias siderúrgicas responsáveis pela fabricação e fornecimento de aços especiais tem buscado alternativas para garantir a composição química do produto fornecido. Dentre os vários problemas estudados estão os de “Mistura de Material”, onde dois ou mais aços de composições químicas distintas daquelas solicitados pelo cliente são entregues erroneamente.

As causas do problema de Mistura de Material são diversas dentro de todo o processo siderúrgico, onde o material não conforme entregue pode ser uma única barra, feixes de barras inteiros, ou até mesmo tarugos.

O grande ônus para a indústria, ocorrendo o problema, é a alta probabilidade da realização de um “RECALL” do produto não conforme gerando alto custo para a empresa, além da sua imagem e prestígio perante os clientes ficar fortemente abalada podendo perder por completo contratos de fornecimento e mercado para a concorrência.

Com o objetivo de reduzir ou eliminar o problema de Mistura de Material no cliente, as indústrias siderúrgicas estão realizando investimentos em tecnologias de inspeção e qualificação de seus colaboradores em inspeção final do produto.

O método de fagulha para liberação final do material é muito usual no ambiente siderúrgico, pois se trata de um ensaio rápido e barato, porém apresenta limitações e dificuldades de separar certas composições químicas de aço principalmente por se tratar de um teste que depende muito da experiência e habilidade do operador.

As técnicas de ensaios não destrutivos estão sendo estudadas e aplicadas para detecção e separação de composições químicas de materiais tornando-se alternativas robustas e automatizadas para o processo siderúrgico. Dentre as técnicas não destrutivas destaca-se o método por Correntes Parasitas.

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.

Este trabalho tem como objetivo principal otimizar os parâmetros de ajuste do equipamento de correntes parasitas visando aumentar a sua confiabilidade na separação de diferentes composições químicas de aço. As amostras utilizadas no teste foram barras de 63,50mm de diâmetro com 6 metros de comprimento. As composições químicas selecionadas foram SAE 1020, 8620, 4320, 8640, 1045 e 4140 isentas de qualquer tratamento térmico e que por características apresentam dificuldade de separação no método de fagulha.

Foram empregadas frequências de ensaio 2, 4, 8, 16, 32 e 64 Hz, fatores de enchimento de 40% e 18%, as harmônicas utilizadas foram de 1^a e 3^a ordem. Posteriormente, definidas as influências de cada parâmetro na separação das composições químicas utilizando a ferramenta estatística DOE e comparando os melhores resultados com os critérios do Sistema de Análise de Medição – MSA obtendo-se a melhor parametrização do equipamento para a aplicação estudada.

Este trabalho está dividido em: revisão bibliográfica dos métodos de separação de diferentes composições químicas de aços utilizados na unidade da Gerdau Charqueadas relacionados ao escopo do trabalho, procedimento experimental adotado para o desenvolvimento do trabalho, apresentação dos resultados obtidos e discussões dos mesmos correlacionando com a bibliografia pesquisada, e por fim as conclusões destacando as principais informações e conhecimento gerados ao longo do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma pequena revisão dos métodos utilizados atualmente para separação de material na Gerdau Aços Especiais Charqueadas.

2.1 Teste de Fagulha

O teste de fagulha é um método de determinação da classificação de um aço através da observação do aspecto do feixe de fagulhas que se origina pelo contato do mesmo com um disco abrasivo à alta rotação. O ensaio de fagulha é prático, rápido e seguro quando realizado por profissional habilitado e experiente [1].

Através da observação cuidadosa do feixe de fagulhas é possível determinar a composição química aproximada do aço com satisfatório grau de precisão.

As vantagens deste processo são:

- Alta produtividade devido à rapidez com que se pode inspecionar uma quantidade apreciável de material;

- É simples e econômico, utilizando um equipamento barato;

- Versatilidade, pois pode ser empregado em diferentes estágios de produção, dispensando preparação preliminar do material a ser testado.

As desvantagens deste método são:

- Avaliação visual;

- Possibilidade de erro de avaliação devido a semelhança de explosão das fagulhas para determinadas composições químicas de aços;

- Método de inspeção manual, tendo fadiga e cansaço dos inspetores influências nos resultados;

- Inspeção sem registros;

- Locais com excesso de claridade podem dificultar a realização do ensaio.

Algumas aplicações do ensaio de fagulha são:

- Seleção de aços de composições diferentes;

- Seleção de sucata a ser utilizada nos fornos de fusão;

- Controle ou determinação do grau de descarbonetação superficial de aços tratados termicamente ou trabalhados à quente.

2.1.1 Teoria da Formação

A ação de um disco abrasivo em alta rotação em contato com o aço é o responsável pelo que chamamos de feixe de fagulha. Os grãos abrasivos arrancam pequenas partículas da superfície do aço onde o calor é tão intenso que as partículas são lançadas ao ar em incandescência.

O carbono, dentre os elementos presentes nos aços, é o que mais influencia a formação e aspecto das centelhas, cuja frequência de explosões características aumenta com o teor de carbono.

2.1.2 Técnica de Observação

Um feixe de fagulha apresenta diversas características conforme descrito na tabela 2.1 e é dividido em três zonas, conforme verificamos na figura 2.1. Estas três zonas podem ser descritas segundo suas características [1]:



Figura 2.1 – Observação das zonas do feixe de fagulhas [1].

- 1ª Zona:

É a zona mais próxima do disco esmerilhado. Os aspectos mais importantes a observar nessa zona são: a coloração característica dos raios, a intensidade luminosa do feixe (de mais difícil distinção), a espessura dos raios, comprimento, sua quantidade e sua continuidade.

A tabela 2.1 apresenta todos os tipos de formações de fagulha para aços, nos quais dependem das características da composição química da amostra analisada.

Tabela 2.1: Formação de fagulha para aços[1].

✓ Raios Primários	✓ Lanças
✓ Raios Secundários	✓ Línguas
✓ Abaulamentos	✓ Gotas
✓ Bifurcações	✓ Ramificações
✓ Flores	✓ Ramificações Secundárias
✓ Estrelas	✓ Spear Point (Molibdênio)
✓ Raios Tracejados	✓ Variações de Cores.

- 2ª Zona:

Onde inicia a observação de feixe de fagulhas, embora seja uma zona de transição e sem limite preestabelecido. É quando começa a aparecer as bifurcações, ramificações, explosões de carbono, lanças e abaulamentos.

Observando a quantidade e tamanho das explosões que teremos uma ideia do teor de carbono.

- 3ª Zona:

É a mais afastada do ponto gerador e onde aparece o maior número de elementos característicos do tipo fagulha, além de um maior número de explosões.

É um complemento de 2ª zona, pois as explosões geradas na 2ª zona dão origem a esta, onde poderemos ter a ideia do número de elementos e a aproximação do teor dos elementos possíveis de serem detectados, terminando neste momento a trajetória do feixe de fagulhas.

2.1.3 Verificação do Feixe de Fagulha

Devemos ter o cuidado de examinar o feixe de fagulha de maneira que a 2ª e 3ª zonas não sejam encobertas ou obstruídas por qualquer objeto. O feixe de fagulhas deve ser produzido de modo que o observador tenha uma visão transversal do mesmo, situando-se em plano superior de forma que seu campo visual o abranja totalmente.

Ao realizar o teste de fagulha devemos observar os seguintes itens:

- Luminosidade;
- Variações de cores;
- Quantidade e forma geométrica dos raios;
- Número e tamanho de explosões;
- Bifurcações e ramificações;
- Forma da extremidade dos raios e coloração.

Deve-se ainda lembrar que uma pressão excessiva ou deficiente acarreta um maior ou menor número de explosões e que a pressão deverá ser tal que permita manter uma velocidade constante do rebolo durante o teste.

2.2 Ensaio por Correntes Parasitas

2.2.1 Introdução ao Método

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 do metal.

Praticamente as "bobinas" de teste tem a forma de canetas ou sensores que passadas por sobre o material detectam trincas ou descontinuidades superficiais, ou ainda, podem ter a forma de circular, oval ou quadrada por onde passa o material. Neste caso detectam-se descontinuidades ou ainda as características metalúrgicas da amostra.

A presença de descontinuidades superficiais e sub-superficiais (trincas, dobras ou inclusões), assim como mudanças nas características físico-químicas ou da estrutura do material (composição química, granulação, dureza, profundidade de camada endurecida,

tempera, entre outros.) alteram o fluxo das correntes parasitas, possibilitando a sua detecção.

O ensaio por correntes parasitas se aplica em metais tanto ferromagnéticos como não ferromagnéticos, em produtos siderúrgicos (tubos, barras e arames), em auto-peças (parafusos, eixos, comandos, barras de direção, terminais, discos e painéis de freio), entre outros. O método se aplica também para detectar trincas de fadiga e corrosão em componentes de estruturas aeronáuticas e em tubos instalados em trocadores de calor, caldeiras e similares.

É um método limpo e rápido de ensaios não destrutivos, mas requer tecnologia e prática na realização e interpretação dos resultados. Tem baixo custo operacional e possibilita automatização a altas velocidades de inspeção. [2]

2.2.2 Histórico do Método

Os ensaios não destrutivos por correntes parasitas baseiam-se na interação de campos eletromagnéticos: indutor e induzido, com sua descoberta em 1831, quando Michael Faraday descobriu o fenômeno físico da indução eletromagnética..

Em 1864, James Maxwell apresentou as conhecidas equações de Maxwell, que descreveram as interações eletromagnéticas criando a base teórica em que se apóia este método de ensaio.

Em 1879, D.E. Hughes realizou os primeiros ensaios utilizando o método, onde ele conseguiu separar materiais diferentes, simplesmente observando mudança na frequência de excitação, devido a efeito de resistência e permeabilidade diferente dos materiais.

No fim da II Guerra Mundial, alguns aparelhos de ensaios começaram a surgir, graças ao desenvolvimento da eletrônica e da instrumentação.

Por volta de 1948, Frederich Förster e sua equipe contribuíram de maneira substancial para o desenvolvimento deste método de ensaio.

Coube a esse grupo, entre outros trabalhos, o mérito de ter introduzido o sistema de análise de sinais através de um plano de impedância, tão difundido e utilizado nos dias atuais. [2]

2.2.3 Vantagens e Limitações

O ensaio por correntes parasitas é um método extremamente versátil e com muitas vantagens para o usuário:

- O sinal indicativo do estado do material é obtido sempre instantaneamente, não havendo necessidade de esperar um tempo para obtenção dos resultados, ou seja, ensaio em tempo real;

- O método é sensível a várias propriedades físicas e metalúrgicas. Se as variáveis que não apresentam interesse puderem ser eliminadas ou discriminadas pelo usuário, pode apresentar uma larga faixa de aplicação;

- O ensaio não precisa ter contato com a peça a ser ensaiada;

- Os equipamentos podem ser portáteis, com alimentação de baterias ou pilhas;

- Os sistemas de ensaios podem ser automatizados e instalados em linhas de produção, levando a uma altíssima produtividade de inspeção e com registro dos resultados obtidos;

- Sistemas de ensaios por controle remoto podem ser utilizados, por exemplo, em inspeções de tubos ou dutos de geradores de vapor de centrais nucleares ou de industriais petrolíferas;

- Não há necessidade de materiais de consumo;

- Não exige uma preparação superficial rigorosa das peças a serem ensaiadas;

- Os procedimentos de ensaio são prontamente adaptáveis a situações do tipo passa/não passa.

São limitações desse método de ensaio:

- Somente aplicável em materiais eletricamente condutores;

- Profundidade de penetração das correntes parasitas restringe-se, na maioria das vezes, a menos que 6 milímetros, pois é limitada pela frequência do ensaio e pelo material ensaiado;

- Mais de uma variável afeta simultaneamente o ensaio;

- Em várias aplicações, os resultados do ensaio são qualitativos e não quantitativos;

- Em algumas aplicações, as peças a serem ensaiadas precisam ter geometria uniforme.

- Geometria e tipo de sensor podem limitar a inspeção por este método.

2.2.4 Fundamentos do Método

Quando uma corrente alternada é usada para excitar uma bobina, um campo magnético alternado é produzido e linhas magnéticas do fluxo são concentradas no centro da bobina, chamado de campo primário (H_p). Então, a bobina é colocada próxima de um material eletricamente condutivo e o campo magnético alternado penetra no material e gera correntes parasitas, conforme demonstrado na figura 2.2 [3].

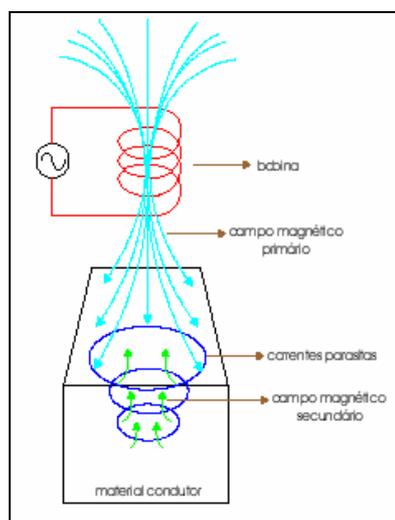


Figura 2.2 – Geração das correntes parasitas no material condutor [4].

As correntes parasitas geradas são correntes alternadas com uma variação defasada de 90° em relação a voltagem indutora e com sentido de circulação que se opõe ao fluxo magnético indutor. Geram seu próprio campo magnético alternado de sentido oposto ao campo primário, denominado de campo magnético secundário (H_s). [2,4]

A bobina de ensaio reflete, portanto, a influência de dois campos magnéticos, ou de dois fluxos magnéticos que ocorrem simultaneamente, o indutor e o induzido. Desta maneira, obtém-se um campo magnético resultante $H_p - H_s$.

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

$$H_p = \Phi(I) \quad \text{equação 1}$$

A intensidade do campo secundário depende da condutividade elétrica (σ), da permeabilidade (μ), e das características geométricas (γ) do material próximo a bobina ou que está sendo ensaiado, assim como a frequência (f) de excitação, isto é:

$$H_s = \varphi(\sigma, \mu, \gamma, f) \quad \text{equação 2}$$

Portanto, a intensidade do campo magnético resultante será:

$$H_t = H_p - H_s = \Phi(I) - \varphi(\sigma, \mu, \gamma, f) \quad \text{equação 3}$$

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

$$U_{ind} \approx dH_t / dt \quad \text{equação 4}$$

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.

$$U_{ind} \approx \Phi(\sigma, \mu, \gamma) \quad \text{equação 5}$$

Portanto, variações nas características do material condutor próximo à bobina, tais como composição química, espessura de camada endurecida, geometria da peça, descontinuidades, entre outras, produzem uma mudança no fluxo de correntes parasitas. Como consequência, uma variação do campo magnético secundário, do campo resultante ($H_p - H_s$) e da impedância ou tensão induzida da bobina podem ser mostradas e monitoradas em um instrumento analógico ou digital.

Em resumo, pode-se dizer que:

- um fluxo magnético é produzido dentro e fora de uma bobina, sempre que uma corrente elétrica flui por ela. Se a corrente for alternada, com uma dada frequência excitação, o fluxo magnético gerado será também alternado, com a mesma frequência.
- aproximando-se da bobina uma amostra condutora, correntes elétricas alternadas e de mesma frequência serão induzidas na amostra, denominadas correntes parasitas.
- as correntes parasitas na amostra geram um campo magnético alternado, na mesma frequência de excitação, com a mesma direção do campo magnético indutor porém com sentido oposto, e, associado a este campo magnético induzido, passa a existir um fluxo magnético induzido, oposto ao fluxo magnético indutor;

- qualquer variação que ocorra na amostra, em termos de condutividade elétrica, permeabilidade magnética, dimensões e presença de descontinuidade, poderá, em princípio, ser detectada através da monitoração da impedância da bobina de ensaio.

2.2.5 Propriedades que afetam as Correntes Parasitas

Conforme o item 2.2.4, as propriedades dos materiais que afetam o fluxo das correntes parasitas são: condutividade elétrica, geometria (dimensões) do objeto e permeabilidade magnética.

2.2.5.1 Condutividade Elétrica

Sabe-se que a condutividade elétrica e a resistividade são duas grandezas elétricas inversamente proporcionais. A caracterização elétrica de um material é feita preferencialmente através de sua condutividade, podendo utilizar o sistema de medida de condutividade I.A.C.S. (International Annealed Copper Standard). No Sistema Internacional, a unidade de condutividade elétrica é S/m (Siemens por metro), onde $S/m = 1 / \Omega \cdot m$.

No sistema IACS o valor da condutividade do cobre puro recozido e a temperatura de 20°C é arbitrado em 100% IACS e tomado como padrão. Na tabela 2.2 são apresentados os valores da resistividade e da condutividade elétrica de vários materiais.

Tabela 2.2: Resistividade e Condutividade de Materiais Metálicos [5].

Material	Resistividade $\mu\Omega \cdot cm$	Condutividade % IACS
Prata	1,63	105
Cobre recozido	1,72	100
Ouro	2,46	70
Alumínio	2,82	61
Magnésio	4,65	37
Zircônio	50,6	3,4
Inconel 600	101	1,7

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

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

equação 6

A condutividade elétrica é uma propriedade característica de cada material.

Todavia, há certos fatores que podem mudar a condutividade de um material. Como exemplo, a presença de uma camada condutora sobre um material condutor, que muda a condutividade inerente do material base. Se a espessura da camada varia, a condutividade também varia. Essa mudança na espessura pode ser detectada por correntes parasitas [5].

Outro exemplo são as ligas, que são combinações de outros metais e/ou elementos químicos com um metal base, sobre a qual e a condutividade do metal base muda para diferentes valores da composição química da liga [2].

2.2.5.2 Dimensão e Forma do Objeto Ensaiado

No uso de correntes parasitas, há casos em que, para as condições de ensaio utilizadas, o campo magnético gerado não consegue "varrer" toda a espessura da peça, como mostrado na figura 2.3 (a). Nesse caso, a inspeção de todo o material da peça que se situar abaixo de uma dada espessura, poderá deixar de detectar discontinuidades importantes e o objeto ensaiado é considerado muito espesso para as condições do ensaio.

Pode-se ter a situação em que o objeto ensaiado apresenta espessura muito fina, de modo que o campo magnético gerado ultrapassa toda essa espessura, como na figura 2.3 (b). Nesse caso, um aumento na espessura do objeto, aparecerá no ensaio como se houvesse um aumento na condutividade elétrica do material. [5]

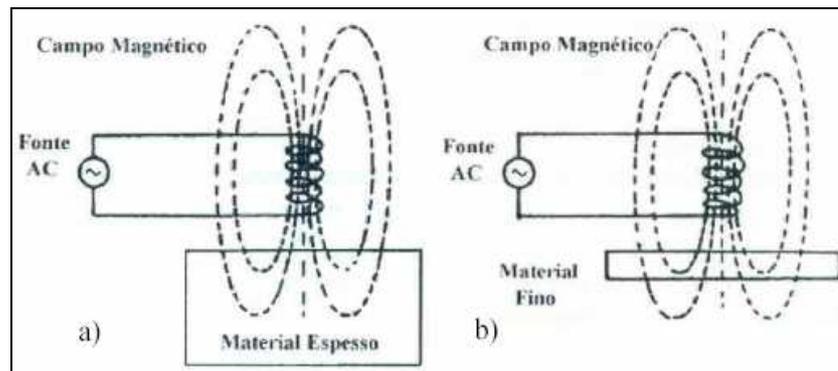


Figura 2.3 – Efeito da espessura do material no ensaio por Correntes Parasitas [5].

2.2.5.3 Permeabilidade Magnética

A permeabilidade é a quantidade que caracteriza o comportamento magnético do material, ou seja, podemos defini-la como a tendência do material de alterar as linhas de força do campo magnéticos [6].

A permeabilidade magnética é expressa como $\mu = \mu_{rel} \cdot \mu_0$, onde μ_{rel} é a permeabilidade relativa do material e, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, ou seja, uma constante definida com valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

Quando colocamos uma bobina energizada sobre um material ferromagnético não magnetizado, o campo magnético é aumentado pelas propriedades magnéticas do material, provocando uma grande variação na impedância da bobina, isto é, a permeabilidade magnética do material altera a intensidade do campo magnético.

Se a intensidade do campo magnético indutor em vários locais varia mesmo que muito levemente, essas pequenas variações apresentam um grande efeito sobre a impedância da bobina. Essas variações da impedância da bobina provocadas pela influência da permeabilidade são, muitas vezes, tão grandes (em comparação com variações provocadas por mudanças na condutividade ou dimensões), que mascaram todas as outras variações. Quando a geometria da amostra permite, este efeito pode ser contornado pela magnetização do material, até atingir a saturação. Usa-se para isso, outra bobina, alimentada por corrente contínua. A saturação magnética efetivamente elimina quaisquer variações do campo magnético residual.

2.2.6 Aplicações do Método

O método de ensaio por correntes parasitas é aplicado em vários setores da indústria, tais como, pesquisa, produção, geração de energia, e manutenção sendo utilizado para controle de processos, controle de composição química, e inspeção da integridade de equipamentos em serviço.

Zergoug [7], em seus estudos, verificou que o método de correntes parasitas pode determinar o estado microestrutural e microdureza de materiais como o aço e o alumínio em diferentes condições de tratamento térmico pela relação de variação da impedância. Para materiais ferromagnéticos o uso de baixas frequências do ensaio proporcionou aos resultados melhor resolução de separação no plano de impedância para diferenciar as condições dos aços por ele estudados.

A profundidade de camada descarbonetada do aço SAE 92V45 temperado em óleo foi determinada pelo método de correntes parasitas em comparação com os tradicionais testes de perfil de microdureza e análise em microscópio óptico. Mercier [8] concluiu que a técnica não-destrutiva de correntes parasitas é muito sensível e relaciona muito bem as modificações da superfície com a descarbonetação. Porém salientou que é necessário realizar um ajuste adequado do equipamento de inspeção com padrões de propriedades conhecidas, no caso uma amostra de camada descarbonetada com profundidade conhecida.

Alencar [9] cita que o ensaio por correntes parasitas possibilita a detecção e o dimensionamento de descontinuidades em tubos de trocadores de calor, como condensadores e geradores de vapor, fornecendo informações que auxiliam na avaliação dos processos de degradação a que estes componentes estão submetidos em serviço. Uma informação relevante obtida através deste ensaio é a profundidade das descontinuidades detectadas e, portanto, a espessura de parede remanescente nos tubos. Esta informação é de extrema importância para a avaliação da integridade destes componentes, definindo a necessidade de substituição ou tamponamento de tubos que apresentem descontinuidades.

Dybiec e seus colaboradores [10] aplicaram o método de Análise das Correntes Parasitas para caracterizar o estado de tensões em materiais ferromagnéticos.

Boucherou [11] 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 colaboradores [12] 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 amostras não magnéticas de Cu, suas condutividades elétricas foram medidas comparando alteração da impedância em diferentes frequências com uma curva de impedância de amostras de alumínio no qual suas condutividades eram conhecidas. 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. Na conclusão do trabalho, foi relatado que as propriedades elétricas dos materiais testadas apresentaram forte dependência da porosidade e do tamanho dos poros, pois quanto maior e mais poroso as amostras de Fe, maior a redução de condutividade e permeabilidade causada por um menor volume de Fe nas amostras.

Haldane e colaboradores [13] utilizaram análise das correntes parasitas e mediram as impedâncias em uma faixa de frequência de 100Hz a 1MHz em amostras de aço AISI 434L contendo diferentes frações volumétricas da fase ferromagnética (ferrita). Resultados de simulação da impedância utilizando um modelo 3D em elementos finitos considerando uma estrutura compósita de matriz ferromagnética (ferrita) com a inserção de esferas randômicas simulando a fase austenítica (paramagnética) mostraram que os valores de impedância são aproximadamente lineares com relação à fração de ferrita a porcentagens acima de 40%. Este trabalho exemplificou a capacidade de correlacionar as variações de impedâncias com características microestruturais do material.

Já para a caracterização de revestimentos, a técnica de correntes parasitas foi bem demonstrada na literatura para medidas de espessura, condutividade elétrica e permeabilidade magnética de revestimentos condutores em metais.

Tai [14] utilizou revestimentos de níquel (25-200 μ m) em substratos de cobre, camadas de cobre (25-200 μ m) em substratos de níquel, e camadas de zinco (40-400 μ m) sobre substratos de aço para demonstrar a capacidade de utilização do método de correntes parasitas em determinar a espessura, condutividade elétrica e permeabilidade magnética dos revestimentos. A impedância elétrica foi medida utilizando uma pequena bobina na faixa de

frequência de 1kHz a 1MHz, sendo os resultados representados através da comparação entre os dados experimentais e cálculos teóricos.

Halleux e Lumberg [15] utilizaram uma série de fios de aço carbono de diâmetro de 2,2mm revestidos de zinco tendo espessuras entre 2,7-64 μ m. A espessura e a condutividade elétrica dos revestimentos foi determinada independentemente das variações dos parâmetros elétricos e magnéticos dos substratos, utilizando medidas de impedância elétrica de 100Hz a 1MHz comparadas com as medidas teóricas. Foi encontrado um excelente acordo entre a teoria e o experimento para revestimentos com espessuras menores que 12 μ m.

A literatura mostra que de modo geral o método de correntes parasitas pode ser aplicado em:

- Detecção de discontinuidades 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;

2.2.7 Tipos de Bobinas

No ensaio por correntes parasitas, os elementos sensores são bobinas que em diferentes formas, arranjos e tamanhos, compõem diversos tipos de sondas para diferentes aplicações.

Basicamente, podemos classificar os sensores em três sistemas distintos: bobina envolvente, sonda superficial e sonda interna com métodos de medição absolutos ou diferenciais sendo com bobinas duplas ou simples, conforme demonstrado na figura 2.4.

Bobinas simples se caracterizam por um único enrolamento ser utilizado para induzir as correntes parasitas e a mesma captar as mudanças de impedância.

No caso de bobinas duplas, há dois enrolamentos: o primário, pelo qual circula a corrente de excitação, e o secundário, que capta a mudança no fluxo de correntes parasitas no material.

Como citado anteriormente, há dois amplos métodos de construção dos circuitos das sondas de ensaios por correntes parasitas: absoluto e diferencial.

No método absoluto a bobina caracteriza mudanças no material de teste ou no ambiente em que se encontra relacionando os valores com a própria bobina, sendo que no método diferencial há uma comparação de duas ou mais áreas do material pelas respostas dos enrolamentos da bobina. [16,33]

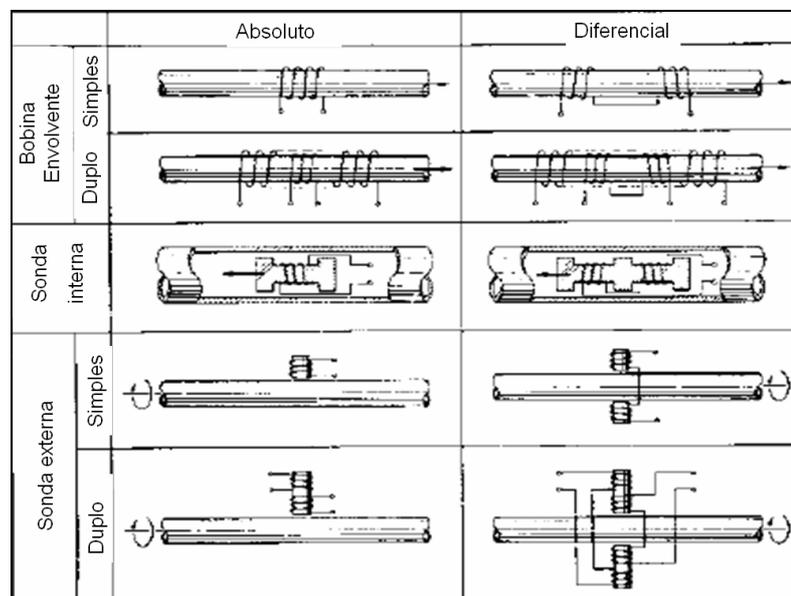


Figura 2.4 – Tipos de bobinas para ensaios de Correntes Parasitas [16].

Para melhor visualizar a diferença entre os dois métodos, pode-se citar o exemplo de uma inspeção em um tubo com fina parede de espessura devido a corrosão (pequena variação dimensional) e com uma trinca (descontinuidade abrupta). Assumimos que a inspeção seja ao longo da seção corroída, onde a espessura da parede do tubo tenha uma pequena variação. Na figura 2.5, podemos verificar que no modo absoluto as respostas dos sinais caracterizam as variações de espessura do tubo devido à corrosão bem como a trinca,

e o método diferencial a variação de espessura é praticamente desconsiderada e o sinal da trinca é muito nítido.

Isto ocorre pelo fato de que no método diferencial as bobinas leem 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 à pequenas variações de espessura (os pequenos sinais indicam apenas rugosidade na superfície). 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. [16]

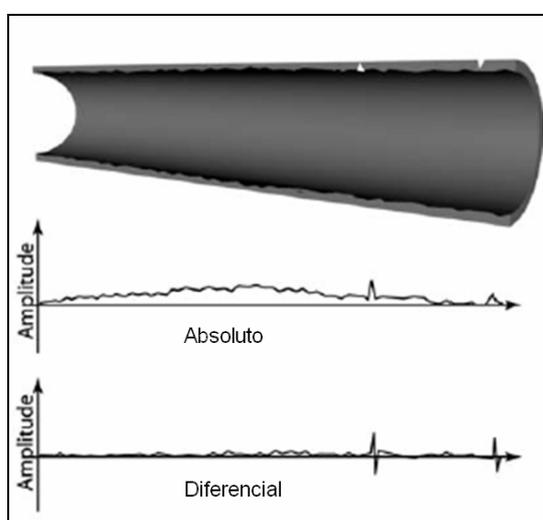


Figura 2.5 – Diferença de respostas dos sinais devido ao arranjo dos sensores [16].

2.2.7.1 Bobina Envolvente

Quando se utiliza o campo magnético gerado no interior da bobina, diz-se que a bobina é envolvente e, nesse caso, o material a ser ensaiado deve estar dentro da bobina. Este é o caso típico de inspeção de tubos e barras, normalmente realizados após sua fabricação [6].

No ensaio, a peça a ser ensaiada pode ser mantida fixa, enquanto a bobina é movimentada ao longo de sua secção ou a peça pode ser movimentada através de uma bobina fixa envolvente. Em sistemas automatizados, a inspeção por bobina envolvente é

caracterizada pela sua facilidade de uso e por possibilitar altas velocidades de inspeção tornando todo o processo muito produtivo.

Uma bobina envolvente ao ser construída pode ter seu enrolamento mais largo ou mais estreito.

As bobinas que apresentam o enrolamento com largura maior cobrem áreas maiores da amostra, sendo indicadas para a detecção de descontinuidades maiores, para variações de diâmetros, de condutividade ou permeabilidade, e/ou grandes perdas volumétricas de material (corrosão agressiva, desgaste de componentes, etc).

Em contrapartida, bobinas construídas com enrolamentos estreitos apresentam maior sensibilidade, destinando-se à detecções de descontinuidades menores, tais como trincas e pequenos pontos de corrosão. Observa-se que a largura das bobinas envolventes influencia significativamente a sensibilidade do sistema de ensaio. É importante ressaltar que a área de inspeção neste tipo de bobina compreende toda a circunferência da peça a ser ensaiada multiplicada pelo seu comprimento que estiver dentro da bobina, ou seja, largura do enrolamento da bobina.

Uma variável importante no processo de inspeção com este tipo de bobina é o fator de enchimento da bobina, o qual determina maior ou menor sensibilidade do ensaio e o maior ou menor ruído no movimento relativo à peça/bobina [4].

2.2.7.2 Sonda Superficial

Em uma inspeção, quando se utiliza um campo magnético gerado fora da bobina, exatamente na região de um dos pólos magnéticos, classifica-se que a sonda é superficial.

A sensibilidade de uma sonda superficial está diretamente ligada à área de sua bobina, que tem a forma normalmente de um círculo. Para maior área de bobina temos uma menor sensibilidade no ensaio, sendo que diminuindo sua área aumentamos a sensibilidade.

O poder de penetração das correntes parasitas para uma mesma condição de frequência é, também, correlacionada com a área da bobina, sendo a relação de maior área maior o poder de penetração. [2,33]

A sonda superficial é indicada para inspecionar, em princípio, qualquer geometria de superfície: plana, côncava ou convexa [16]. As possibilidades de aplicação geram grandes variedades de tipos de sondas, exemplificadas na figura 2.6.



Figura 2.6 – Exemplos de sondas superficiais [16].

A sonda superficial também pode ser utilizada para inspecionar tubos, com as bobinas colocadas sobre as superfícies interna ou externa do mesmo. Se a inspeção se der na parte interna, por exemplo, tem-se uma sonda rotativa interna, em que uma ou mais bobinas “varrem” toda a superfície interna do tubo, em um movimento helicoidal.

Uma das técnicas mais utilizadas na indústria, 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, conforme figura 2.7.

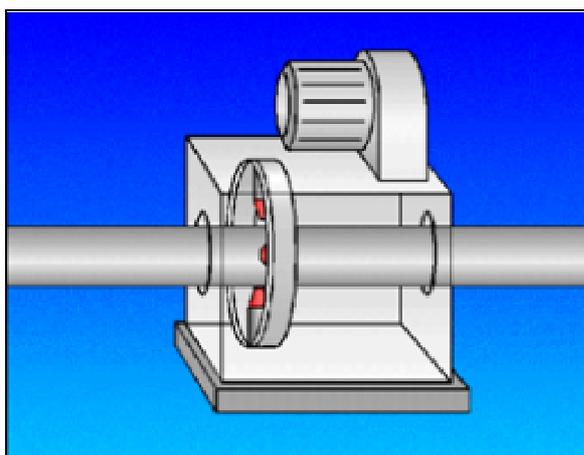


Figura 2.7 – Exemplos sistema rotativo de sondas superficiais [17].

Da mesma forma da inspeção interna do tubo, 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 [17].

2.2.7.3 Sonda Interna

A sonda interna é mais utilizada na inspeção de tubos, instalados em equipamentos de troca térmica, tais como: condensadores e geradores de vapor de usinas termonucleares, usinas térmicas, resfriadores de geradores de hidroelétricas, trocadores de calor, e muito utilizados na indústria de petróleo e petroquímica.

Assim como as bobinas envolventes, a sonda interna também induz correntes parasitas ao longo da circunferência do tubo, de modo que toda a seção ao redor da bobina seja inspecionada de uma só vez. A região do campo magnético produzido pela bobina e utilizado na inspeção é aquela que circunda lateralmente o enrolamento correspondente. Esse tipo de sonda é conhecido como sonda interna convencional [16].

As sondas internas são mais sensíveis na detecção de descontinuidades interna da parede superficial do tubo, assim como as sondas envolventes são mais sensíveis na detecção de descontinuidade da superfície externa do tubo.

Semelhante, ao que foi mencionado para as bobinas envolventes, as sondas internas, cujos enrolamentos são estreitos, são mais sensíveis à detecção de descontinuidades pequenas.

2.2.8 Acoplamento Magnético

O acoplamento entre uma sonda e uma peça a ser ensaiada é constituído pelo campo magnético indutor e induzido, através dos quais a peça é excitada e emite uma resposta a essa excitação. Esse acoplamento magnético depende do espaçamento entre a bobina de ensaio e a peça, do tamanho e forma da bobina e da intensidade do campo magnético indutor.

Para sondas externas e internas a distância entre sonda-peça é conhecido pelo termo em inglês de Lift-off, sendo para bobinas envoltivas chamado de fator de enchimento.

2.2.8.1 Lift-off

Uma bobina de ensaio, quando energizada e mantida no ar, longe de qualquer material condutor, apresenta um determinado valor de impedância, ao qual corresponde a um sinal apresentado pelo equipamento de ensaio. Se a bobina é levada para perto de algum material condutor, o valor inicial da impedância da bobina começa a mudar, assim que o campo magnético indutor intercepta o material. Essa variação da impedância continua até que a bobina se apoie inteiramente no material resultando a maior variação em relação ao valor inicial da impedância. Com isso é possível deduzir-se que a máxima sensibilidade que um sistema de ensaio pode ter é quando a sonda se encontra em contato com a superfície da peça ensaiada e, à medida que, a sonda é afastada de sua superfície, a sensibilidade diminui.

O efeito é tão pronunciado que pequenas variações no espaçamento sonda-peça podem provocar o “mascaramento” de uma indicação produzida por outra variável de interesse primário. Como consequência disto, normalmente torna-se necessário manter uma relação constante entre o tamanho e a forma da sonda e, o tamanho e forma da peça ensaiada, fazendo com que seja extremamente difícil e complicado o ensaio em peças com geometrias complexas. [20]

Para eliminar ou compensar este efeito, alguns aparelhos de correntes parasitas incorporam circuitos eletrônicos especiais, assim como sondas com um dispositivo de molas de forma a manter sempre constante a distância sonda-peça.

Embora o efeito da distância sonda-peça possa dificultar alguns ensaios por correntes parasitas, ele também pode ser de muita utilidade em outros tipos de ensaios.

Um exemplo disto é a utilização deste efeito para medição de camadas não condutoras, tais como tintas e camadas anodizadas, sobre metais condutores. Nestes casos, quando a sonda é encostada na superfície não condutora, a espessura desta camada é uma medida direta da distância sonda-metal base [6].

2.2.8.2 Fator de Enchimento em Bobinas Envolventes

Nos ensaios por correntes parasitas com bobinas envolventes, a espira é do tipo solenoidal na forma de uma cavidade. Seu anel interior é grande o suficiente para que peças possam ser introduzidas através de seus campos magnéticos da bobina de magnetização captadora de sinais. A força máxima do campo magnetizador está, como sempre, diretamente adjacente às espiras dos enrolamentos da bobina magnetizadora. Se um objeto de teste estiver bem ajustado dentro das espiras do enrolamento da bobina magnetizadora, o acoplamento do campo magnético com o material de ensaio também será maximizado.

Contudo, se o diâmetro do objeto for somente uma fração do diâmetro da bobina, o acoplamento magnético é reduzido, pois muitas linhas do fluxo magnético podem retornar através do espaço de ar entre a superfície do material de ensaio e as espiras do enrolamento da bobina. Essas linhas de fluxo com caminhos somente no ar, não interceptam o material de ensaio, sendo perdidas e não servindo para induzir correntes parasitas no objeto. Elas contribuem para a indutância da bobina, mas não medem as propriedades do material.

Então, quando o objeto de ensaio possuir diâmetro significativamente menor do que as espiras do enrolamento da bobina envolvente, uma porção muito reduzida do fluxo magnético das bobinas de teste interage com o material de ensaio. As correntes parasitas induzidas são de menor magnitude e seus efeitos de reação sobre a bobina de ensaio são diminuídos. Isto resulta em uma redução da sensibilidade dos testes com bobinas envolventes de correntes parasitas.

Portanto, quanto maior for o fator de enchimento, melhores serão os resultados do ensaio, em termos de sensibilidade [2,3,19].

Para se determinar o fator de enchimento teórico de um ensaio com bobinas envolventes, utilizamos o cálculo simples da expressão matemática abaixo:

$$\eta = (D/d)^2 \quad \text{equação 7}$$

Onde:

η : fator de enchimento

D: Diâmetro externo do objeto de ensaio

d: diâmetro interno da bobina envolvente

Nestes ensaios além de se preocupar em ter a maior relação possível do fator de enchimento da bobina, é necessário se preocupar com a centragem do objeto no interior da bobina [3].

Caso os objetos não fiquem centrados na bobina, a porção do material que tem sua superfície mais próxima do enrolamento receberá indevidamente alta magnetização, enquanto a outra porção de sua superfície, mais afastada, receberá menos magnetização do que o normal.

A não centragem do material no interior da bobina exercerá forte influência nos resultados do ensaio podendo torná-los não confiáveis. Este fato pode indicar variações que na realidade não existem nas propriedades do material testado, afetando a interpretação dos resultados.

Para evitar problemas de não centragem do material, usualmente são utilizados guias roletadas, tubos guias ou rolos de transporte alinhadores [4,16] para garantir a centragem do objeto dentro da bobina. Estes componentes devem ser feitos de materiais não condutores (polímeros, madeira, resinas orgânicas, entre outros) para não interferir no ensaio. A checagem da reprodutibilidade do posicionamento do objeto de teste e do dispositivo ou sistema de posicionamento do objeto é aconselhável antes da realização do teste.

2.2.8.3 Efeito de Borda

Outro fator ligado ao acoplamento magnético entre a bobina e a peça sendo ensaiada, é o chamado efeito de borda [2,3,4,6].

Quando uma sonda ou bobina se aproxima da borda da peça em ensaio, ocorre uma distorção do fluxo de correntes parasitas, 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 2.8 representa a diferença entre o campo magnético de uma peça sem efeito de borda e outra com. Nota-se que na peça com efeito de borda parte do campo magnético não está ensaiando o material.

A magnitude excessiva deste efeito 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.

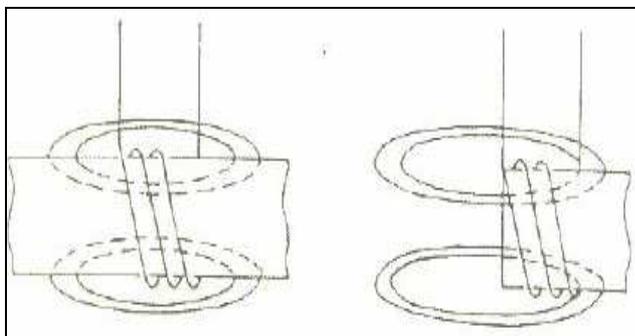


Figura 2.8 – Representação esquemática do Efeito de Borda [2].

No caso de ensaios automáticos em barras, tubos ou arames, o aparelho é “desligado” antes que as pontas do material passem pela bobina, com o objetivo de eliminar o sinal produzido pelo efeito de borda. Isso significa que as pontas do material não são ensaiadas.

2.2.8.4 Efeito Peculiar

O fenômeno denominado efeito peculiar, ou efeito de pele, ou ainda em inglês “skin effect”, determina a intensidade do fluxo de correntes parasitas no material em relação a sua espessura [2,3,4,6].

O efeito peculiar determina que as correntes parasitas produzidas em uma amostra apresentem-se mais intensas e concentradas na superfície adjacente à bobina e, à medida que a profundidade aumenta, a sua intensidade se torna menor [26].

O efeito peculiar ocorre porque as correntes parasitas geradas em qualquer lugar dentro do material testado formam o campo magnético secundário, que é oposto ao campo primário. Desse modo, o fluxo magnético efetivo diminui, causando uma diminuição das correntes parasitas quando aumentada a profundidade no material. As correntes parasitas formadas na superfície do material podem ser consideradas como uma espécie de blindagem ao campo magnético primário, enfraquecendo e diminuindo a intensidade das correntes parasitas em profundidades maiores.

O cálculo quantitativo do enfraquecimento do sinal do fluxo de correntes parasitas manifestado pela profundidade de penetração do campo magnético em um condutor plano e de espessura grande, pode ser dado por [2]:

$$J_x = J_{0x} e^{-\beta \cdot x} \sin(\omega \cdot t - \beta \cdot x) \quad \text{equação 8}$$

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

J_{0x} = 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

$\omega \cdot t - \beta \cdot x$ = 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.

A Figura 2.9 demonstra este fenômeno.

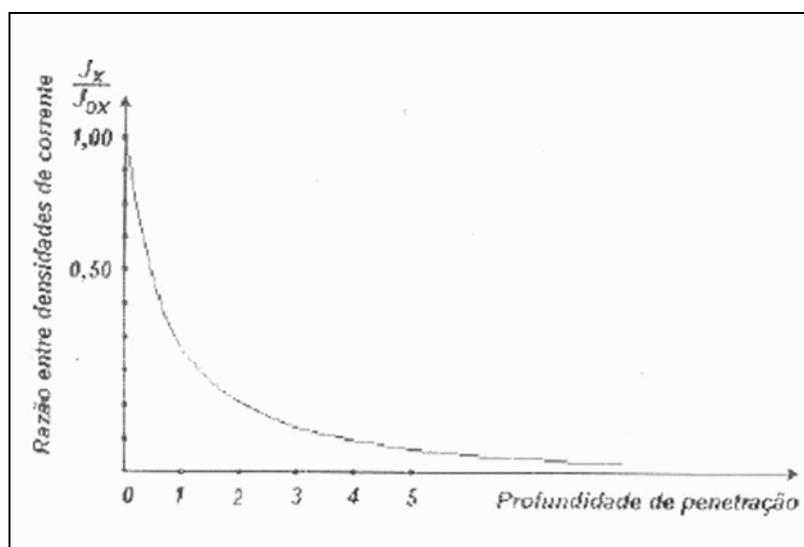


Figura 2.9 – Curva da atenuação de intensidade de correntes parasitas em relação à profundidade de penetração [2].

Quando um defeito está presente em uma profundidade em que as correntes parasitas não alcançam não é possível detectá-lo. Teoricamente, a intensidade do campo magnético primário que penetra no material condutor decresce com a profundidade. Isto é, a densidade de correntes parasitas decresce exponencialmente com a profundidade de penetração apresentando uma redução acentuada no início, abaixo da superfície da amostra, tornando-se mais suave a medida que atinge maiores profundidades.

Na figura 2.10, pode-se ver que a frequência de inspeção determina a profundidade de penetração, na medida em que a frequência aumenta, a penetração diminui e a distribuição das correntes fica mais densa na superfície do material.

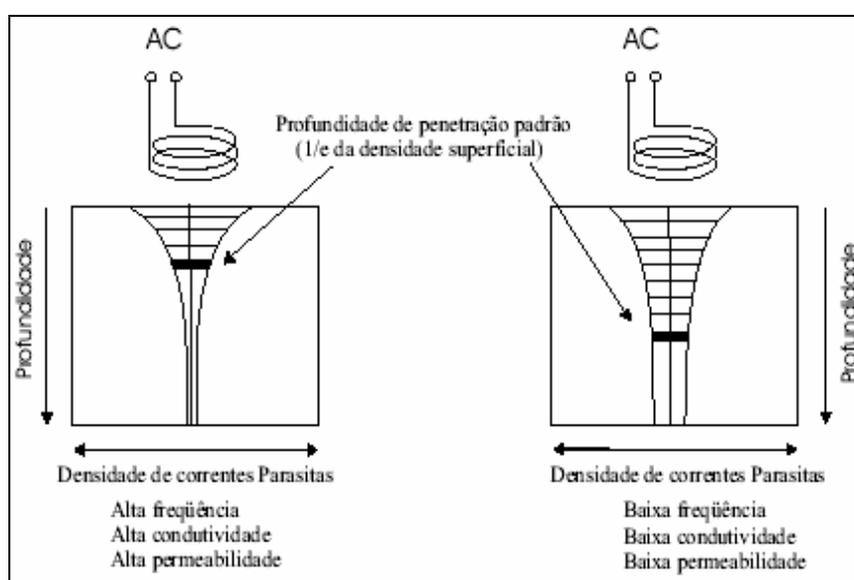


Figura 2.10 – Profundidade de penetração das correntes parasitas [18].

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 tem baixa penetração [18,28,29,33].

O cálculo quantitativo aproximado da profundidade de penetração das correntes parasitas para o caso de bobinas envoltivas pode ser determinado por [16]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

equação 9

Onde:

δ = profundidade de penetração [m]

f = frequência de teste [Hz]

μ_0 = permeabilidade absoluta [$1,25 \times 10^6$ H/m]

μ_r = permeabilidade relativa do material

σ = condutividade elétrica do material [$\text{m}/\Omega \times \text{m}^2$]

2.2.9 Plano de impedância

O ensaio de correntes parasitas consiste no monitoramento do fluxo e da distribuição das correntes elétricas induzidas na amostra [21]. Isto é feito indiretamente através da monitoração da impedância da bobina de ensaio, durante a inspeção. Portanto, é muito importante compreender o significado de impedância e das quantidades elétricas a ela associadas. Todas as informações a respeito da amostra são obtidas através das variações características elétricas do conjunto bobina/amostra, as quais, como se sabe, são:

- a) a reatância indutiva, $X_L = \omega \cdot L$
- b) a resistência ôhmica, R.

A figura 2.11 demonstra graficamente a relação entre reatância indutiva (eixo “y”) e resistência ôhmica (eixo “x”), onde a reta Z representa a impedância medida da amostra com seu ângulo de fase.

A impedância elétrica (Z) é dada pela expressão $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$. O ângulo de fase entre a corrente e a tensão elétrica é dado pelo ângulo formado entre a reatância (X_L) e a resistência (R). Assim, o ângulo de fase é calculado como $\theta = \arcsin R/Z$. [5]

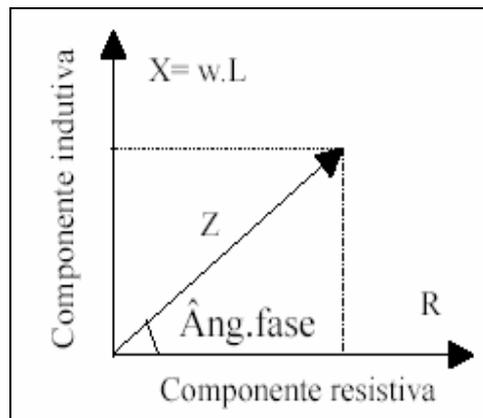


Figura 2.11 – Diagrama de Impedância [5].

A figura 2.12 exemplifica a variação da impedância para uma determinada variável. Observa-se a influência da condutividade elétrica (%IACS), para algumas amostras de diferentes condutividades, onde cada ponto foi obtido o valor correspondente da impedância através do posicionando de uma sonda na superfície de cada amostra.

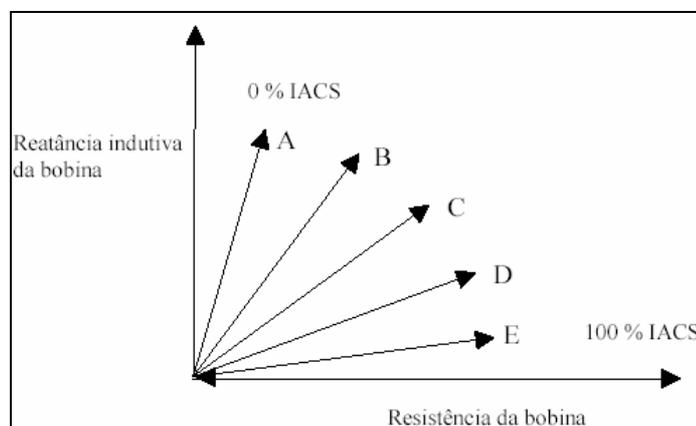


Figura 2.12 – Formação da Curva de Condutividade num Diagrama do Plano de Impedância [2].

Da mesma maneira, podem ser determinados outros valores variando outras variáveis do processo tais como composição química do material, dureza, descontinuidades, entre outros.

Portanto, o sinal produzido pelas variáveis depende tanto da amplitude como da fase das correntes obstruídas.

Conforme a defasagem aumenta com a profundidade, haverá uma diferença no vetor impedância da bobina e este efeito permite dimensioná-lo e localizá-lo.

2.2.10 Princípio harmônico

Devido à histerese magnética e a não linearidade da permeabilidade, a indução magnética, B , de um material ferromagnético sujeito a um campo magnético externo senoidal, H_t , não é senoidal, mas distorcida [22].

A figura 2.13 demonstra graficamente o comportamento da frequência de excitação versus histerese do material, no qual a onda de resposta ou saída do ensaio é representada de forma distorcida em relação à onda de excitação.

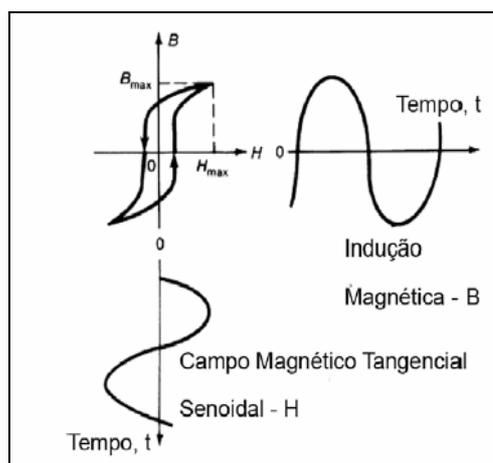


Figura 2.13 – Distorção da indução magnética causada pela não-linearidade da curva de Histerese [22].

Esta onda distorcida da indução magnética contém as harmônicas do campo magnético aplicado [25].

Assim, a partir da aplicação de um campo magnético alternado, a quantidade harmônica da onda também é excitada com a frequência fundamental, dependendo da indutância total, da frequência de magnetização e da forma do laço de histerese [22].

Durante este processo, devido à simetria do laço de histerese, apenas as harmônicas ímpares são exibidas. Amplitudes e fases da oscilação fundamental e das ondas harmônicas (A_i, P_i ; com $i = 1, 3, 5, 7\dots$) são determinadas pela Análise de Fourier de $H_t(t)$.

Fourier demonstrou que toda função periódica pode ser decomposta em uma função constante e uma série de funções senoidais. O primeiro termo da série tem frequência igual à da função original. Este é chamado de componente fundamental (1ª Harmônica). Os demais componentes possuem frequências múltiplas inteiras da fundamental, recebendo o nome de i^{a} harmônica, de acordo com o fator de multiplicidade.

Então para a figura 2.13 temos:

Sinal de entrada (senoidal):

$$U_1(t) = \hat{U}_1 \text{ sen } \omega t \quad \text{equação 10}$$

Sinal de saída (não senoidal, ocorre distorção devido ao material sendo ensaiado):

$$U_2(t) = a_1 \hat{U}_1 \text{ sen } \omega t + \frac{3}{4} a_3 \hat{U}_1 \text{ sen } \omega t + \frac{1}{4} a_3 \hat{U}_1 \text{ sen } 3\omega t + \dots$$

Onde, \hat{U}_1 é a tensão aplicada no ensaio e cada componente do sinal de saída são as harmônicas, sendo $a_1 \hat{U}_1 \text{ sen } \omega t$ de 1ª ordem, $\frac{3}{4} a_3 \hat{U}_1 \text{ sen } \omega t$ de 3ª ordem e assim por diante. Os fatores a_1, a_3 são fatores de correção correlacionados com a curva de histerese do material [23, 24].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Buscando desenvolver uma base experimental para a aplicação do método de Correntes Parasitas como meio de separação de barras laminadas redondas de diferentes composições químicas, foram realizados testes utilizando o equipamento de correntes parasitas da Gerdau Aços Especiais Charqueadas, célula de produção Linha de Inspeção 3.

O Laboratório Metalúrgico da Gerdau Aços Especiais Charqueadas foi o responsável pela caracterização metalúrgica de todas as amostras utilizadas neste trabalho.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram analisadas 6 composições químicas de aço em barras laminadas redondas com comprimento de 6 metros e diâmetro 63,50mm. Para cada composição química teve-se 5 barras ensaiadas, totalizando 30 barras de amostragem para os testes.

As composições químicas de aço selecionadas foram SAE 1020, 8620, 4320, 8640, 1045 e 4140.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química das corridas de produção dos aços utilizados no trabalho.

Tabela 3.1: Composição química dos aços utilizados.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SAE 1020	0,20	0,23	0,38	0,022	0,007	0,06	0,06	0,01
SAE 8620	0,20	0,29	0,81	0,015	0,029	0,51	0,42	0,16
SAE 4320	0,17	0,24	0,58	0,012	0,029	0,54	1,76	0,25
SAE 8640	0,39	0,24	0,82	0,026	0,027	0,46	0,63	0,20
SAE 1045	0,47	0,24	0,63	0,013	0,023	0,13	0,06	0,02
SAE 4140	0,40	0,24	0,83	0,013	0,027	0,98	0,13	0,16

Devido às características específicas no ensaio de fagulha destes aços temos dois grupos distintos para o estudo proposto.

Os aços SAE 1020, 8620 e 4320 compõem um grupo e os aços SAE 8640, 1045 e 4140 o outro grupo. Dentro de cada grupo a separação por este método se torna muito difícil devido a semelhança de explosão e coloração das fagulhas, sendo possível a não detecção de Mistura de Material pelo método de fagulhamento.

3.2 Equipamento

O equipamento utilizado neste trabalho foi o MAGNATEST modelo D 3.623 do fabricante FOERSTER, mostrado na figura 3.1. Este modelo possibilita a inspeção em até 6 (seis) canais de frequência, cada um deles com a frequência variando de 2 Hz até 1024 Hz, controle de ganho, sensibilidade e avaliação de harmônicas.

Os resultados são mostrados digitalmente em um plano de impedância, baseada em medidas de amplitude e fase dos sinais das indicações detectadas. Os dados são armazenados em banco de dados próprio possibilitando completa rastreabilidade das informações obtidas.



Figura 3.1: Equipamento FOERSTER - MAGNATEST D 3.263 [27].

As bobinas utilizadas nos testes para avaliar a influência do fator de enchimento tinham diâmetros interno de 100 mm e 150 mm, com secção circular. Conforme revisão

bibliográfica, as bobinas deste trabalho são classificadas como envolventes, enrolamento duplo e método absoluto.

Bobina envolvente, pois o material ensaiado é inserido no seu interior. Enrolamento duplo, pois há um enrolamento para excitação das correntes parasitas e outro para captar as mudanças do fluxo das correntes parasitas no material. Método absoluto, pois o meio comparativo dos resultados é com o próprio ajuste da bobina com o material de referência. A figura 3.2 mostra bobinas semelhantes às utilizadas no teste, sendo ambas fornecidas pelo fabricante FOERSTER.



Figura 3.2: Bobinas circulares FOERSTER [17].

Conforme descrito nas referencias bibliográficas [2,6,30,31] os fatores de enchimento foram calculados para estas duas bobinas circulares tendo o material de teste com diâmetro de 63,50mm, resultando nos fatores de enchimento das bobinas de 18% e 40% para este trabalho.

3.2.1 Ajuste e Formas de Avaliação

O ajuste do equipamento é a definição dos limites de separação dado pelo cálculo da dispersão e da posição dos valores de impedância das amostras definidas como padrões.

Para a realização do ajuste do aparelho devem ser testadas entre 5 e 30 amostras padrões para que automaticamente se forme os limites de separação.

Uma vez definidos os limites de separação, o usuário pode optar por quatro formas de avaliação na tela digital, sendo elas: forma circular, elíptica, caixa de regressão e retângulo.

Após definidas as formas de avaliação com base nas amostras de referências, inicia-se a inspeção. Quando as indicações das barras inspecionadas ficarem dentro do círculo estas são consideradas aprovadas e as que ficarem fora são rejeitadas.

Para este trabalho foi adotado a forma de avaliação circular, onde o centro do círculo de ajuste representa a média de todos os pontos de impedância das amostras padrões e o raio do círculo é três vezes o valor mais distante da média dos pontos de impedância [27].

Na figura 3.3 observa-se a tela principal do equipamento FOERSTER - MAGNATEST D 3.263 com exemplos de formas de avaliação circular para diferentes parâmetros de ajuste.

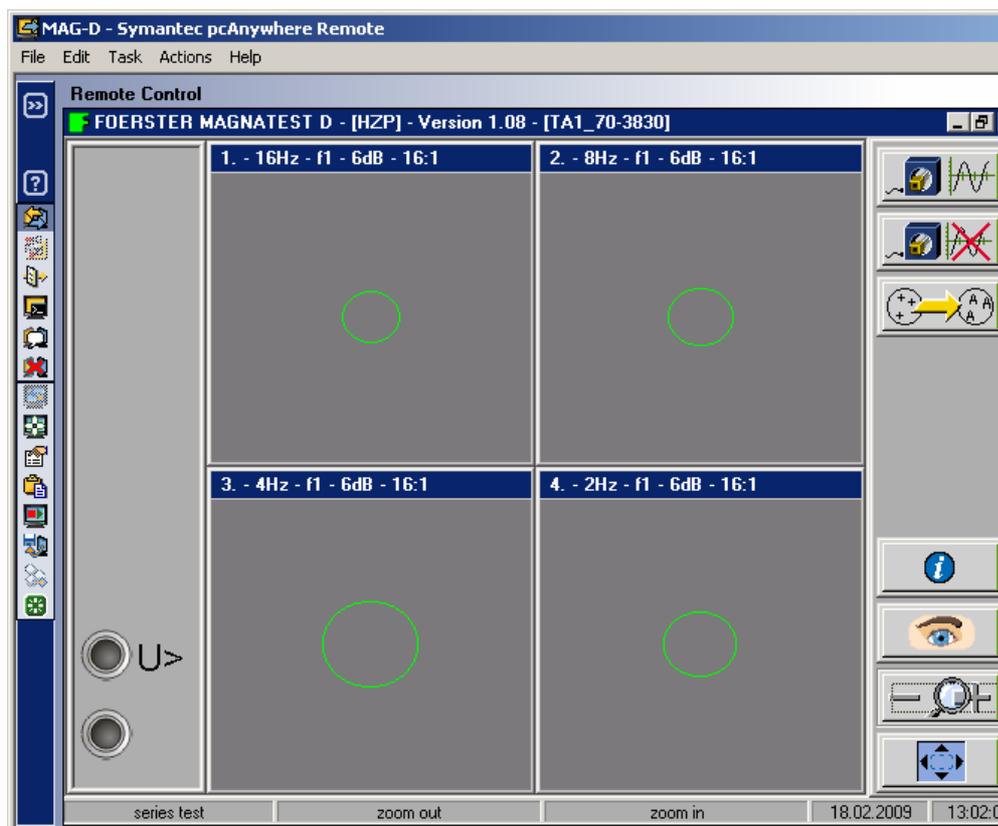


Figura 3.3: Forma de avaliação circular para ensaios no MAGNATEST D 3.263 [27].

A tela pode ser dividida em até quatro quadrantes, onde cada um representa uma forma de avaliação com os parâmetros escolhidos pelo usuário. Os parâmetros ajustados pelo usuário podem ser visualizados no cabeçalho de cada quadrante. Neste exemplo, temos no primeiro quadrante o ensaio com frequência 16 Hz, f1 representa harmônica 1, 6 dB de sensibilidade, sendo 16:1 a representação da escala de visualização ou ampliação do círculo dos limites de separação [27].

3.2.2 Cuidados Especiais

Conforme descrito na revisão bibliográfica, as “bordas” do material podem influenciar os resultados do ensaio, ocasionando o chamado “Efeito de Borda”. No caso deste trabalho as “bordas” representam as pontas das barras, ou melhor, as duas extremidades das barras.

Dois sensores com a função de “ligar e desligar” a bobina de teste após a passagem das pontas das barras foram instalados de modo a minimizar ou até mesmo eliminar este efeito.

3.3 Metodologia Utilizada

Todos os testes realizados para este trabalho ocorreram no ambiente industrial. Esta condição implicou na utilização de métodos de análise que permitiram a redução do trabalho experimental.

Os ensaios foram realizados em duas etapas distintas.

Primeiramente, foi elaborado um DOE - Projeto de Experimentos buscando identificar a influência das principais variáveis do processo de inspeção por correntes parasitas na aplicação de separação de barras de aço com diferentes composições químicas: frequência de ensaio, fator enchimento e harmônica.

A segunda etapa do experimento buscou identificar efetivamente o melhor ajuste do equipamento variando os parâmetros controláveis do processo conforme as conclusões dos resultados do DOE.

3.3.1 Procedimento de Ensaio Geral

O procedimento de ensaio geral foi estabelecido e adotado em todas as etapas do experimento, ou seja, um padrão para todas as etapas do trabalho.

- Parametrização do equipamento:

Antes do início da inspeção do material, o equipamento MAGNATEST foi ajustado para as condições de ensaio definidas.

Estes parâmetros de processo definiram os conjuntos de testes avaliados neste trabalho. Portanto toda a vez que se alterava um dos parâmetros, um novo conjunto de teste era criado.

- Ajuste do equipamento:

Todos os conjuntos de testes foram ajustados para as seis composições químicas testadas, sendo assim possível avaliar o comportamento dos parâmetros de uma forma abrangente e simulando as condições de uso real do equipamento durante a produção.

- Resultados:

Os resultados foram coletados após a finalização de todos os ensaios, onde se obteve de forma direta a separação ou não das composições químicas de forma quantificada.

De uma maneira geral, o equipamento é ajustado para “identificar” uma determinada composição química de aço e todas as 30 amostras são inspecionadas. As amostras que não pertencerem à composição química de ajuste devem ser segregadas. Por exemplo, para ajuste em SAE 4140 o equipamento deverá, teoricamente, segregar as 25 barras de composições químicas diferentes e aprovar as 5 barras de SAE 4140.

3.3.2 DOE - Projeto de Experimento – Primeira etapa dos Experimentos

Foi estabelecido um projeto de experimento fatorial que contemplou três fatores, cada um deles com dois níveis. Conhecido na literatura como 2^3 . [34-37]

Com auxílio do software MINITAB, foi elaborada a matriz experimental para avaliação dos parâmetros de processo frequências de ensaio, fator de enchimento e harmônica para uma variável de resposta percentual de acerto de separação.

As linhas da matriz experimental representam um conjunto de testes realizados, ou seja, todas as composições químicas foram inspecionadas com estas configurações.

Tabela 3.2: Matriz experimental do ensaio.

Fator Enchimento	Harmônica	Frequência	% Acerto
18	1	2	
		64	
	3	2	
		64	
40	1	2	
		64	
	3	2	
		64	

Este projeto de experimentos buscou responder as seguintes perguntas:

- Para esta aplicação é melhor trabalharmos com frequências altas ou baixas?
- O fator de enchimento para esta aplicação tem importância significativa?
- Qual a influência das harmônicas neste processo?

3.3.3 Procedimento Final – Segunda etapa de Experimentos

Com base na orientação dos resultados do DOE - procedimento experimental, os parâmetros de processo não significativos foram descartados e os significativos foram testados de forma mais detalhada.

Os ensaios realizados tiveram seus resultados comparados com o critério de aceite do manual 3ª edição do MSA – Análise dos Sistemas de Medição [38] método por atributos sistema passa-não-passa.

- Definições:

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.

A Eficácia (% C) ou % ACERTO: representam a capacidade do equipamento em detectar, de uma forma correta itens perfeitos e defeituosos.

$$\%C = \frac{\text{Número de identificações corretas}}{\text{Número total de oportunidades de acerto}} \quad \text{equação 11}$$

A Probabilidade de Classificação Errada (% E): representa a chance de que um item defeituoso não seja rejeitado. No nosso caso, que uma “mistura” não fosse detectada.

$$\%E = \frac{\text{Número de identificações falhas}}{\text{Número total de oportunidades de falhas}} \quad \text{equação 12}$$

A Probabilidade de Alarme Falso (% EF): representa a chance de que um item perfeito seja rejeitado. No nosso caso, que um material bom fosse dado como misturado.

$$\%EF = \frac{\text{Número de alarmes falsos}}{\text{Número total de oportunidades de alarmes falsos}} \quad \text{equação 13}$$

Tabela 3.3: Tabela de decisão do sistema de medição para separação de barras por composição química [38].

Decisão Sistema de Medição	Eficácia	Classificação Errada	Alarme Falso
Aceitável	> 90%	< 2%	< 5%
Marginal – pode ser melhorado	> 80%	< 5%	< 10%
Rejeitado – necessita ser melhorado	< 80%	> 5%	> 10%

3.3.3.1 Detalhamento do Melhor Resultado

O conjunto de teste que apresentou melhores resultados, conforme os critérios da tabela de decisões, foi detalhado para responder as seguintes perguntas:

- O melhor resultado é aceitável?

- Não foi possível separar alguma composição química?
- Há dificuldade de ajuste neste conjunto de teste?

O detalhamento consistiu em:

1) Verificar em qual ajuste de composição química ocorreu a falha da não detecção (caso ocorra);

2) Analisar os dados de impedância de cada composição química verificando a influência no resultado de separação das composições químicas;

3) Avaliação metalúrgica das composições químicas nas quais não foram separadas, buscando verificar se ocorreu alguma heterogeneidade nas amostras ensaiadas. Esta avaliação abrangeu metalografia, ensaio de dureza e repetição da análise química.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do Projeto de Experimento - DOE

A matriz experimental proposta foi completada com os resultados coletados, sendo possível verificar grandes diferenças entre os dados para cada conjunto de experimento.

A tabela 4.1 demonstra os resultados dos percentuais de acertos obtidos na primeira etapa dos experimentos para os parâmetros propostos.

Tabela 4.1: Matriz experimental com resultados.

Fator Enchimento	Harmônica	Frequência	% Acerto
18	1	2	86,1
		64	78,3
	3	2	21,1
		64	58,5
40	1	2	88,8
		64	78,3
	3	2	47,2
		64	52,2

Com o auxílio do software MINITAB, foi possível verificar estatisticamente a interação dos fatores na influência dos resultados.

A figura 4.1 mostra um gráfico de barras com o nível de significância de cada fator. Nesta figura é analisada a influência dos fatores: frequência, harmônica e fator de enchimento e suas interações no resultado do % de acerto.

Os fatores cujos resultados apresentaram valores do efeito acima de 26,8 %, à direita da linha vermelha, são considerados estatisticamente significantes com 90 % de confiabilidade. Este nível de confiabilidade é dado pelo fator de correção estatístico “alfa” igual a 0,10 no qual os resultados foram gerados no software.

O fator harmônica mostrou-se uma variável significativa no processo de inspeção por correntes parasitas, correspondendo a 38% de influência no efeito do resultado final do

ensaio. Os demais fatores e suas interações apresentaram pequeno efeito no resultado, sendo o segundo mais significativo a interação entre frequência-harmônica com aproximadamente 17% de efeito ou influência no percentual de acerto da separação de mistura entre as composições químicas.

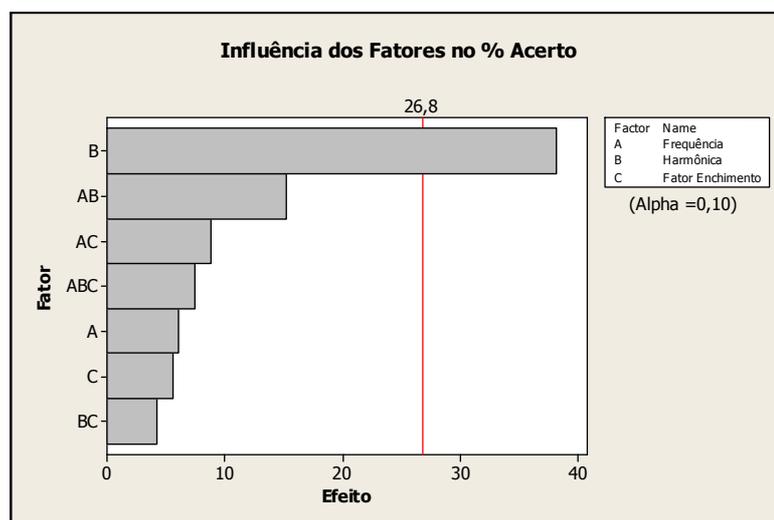


Figura 4.1: Influência dos fatores de ajuste para separação das composições químicas de aço.

Visando uma análise individual dos fatores, foi analisada a linha de tendência de cada fator desconsiderando-se a interação entre eles.

A construção das linhas de tendências de cada fator foi dada por funções lineares obtidas a partir de dois pontos que resultam das médias dos resultados dos testes práticos considerando somente um fator.

A acentuação da inclinação da reta representa maior influência do fator analisado, ou seja, quanto maior a inclinação da reta (positiva ou negativa) mais significativa é o efeito do fator para o processo de inspeção.

A figura 4.2 representa graficamente os resultados das tendências lineares de cada fator de avaliação. Observa-se maior inclinação da reta do fator harmônica no resultado de percentual de acerto, indicando melhor condição de separação das composições químicas para ajuste do equipamento com valor igual a 1.

Os resultados de frequência e fator de enchimento demonstraram pequena tendência e melhores resultados para valores de maior frequência e maior fator de enchimento. Porém

as linhas de tendência apresentaram baixa inclinação das retas representando pouca influência individual dos fatores nos resultados do percentual de acerto.

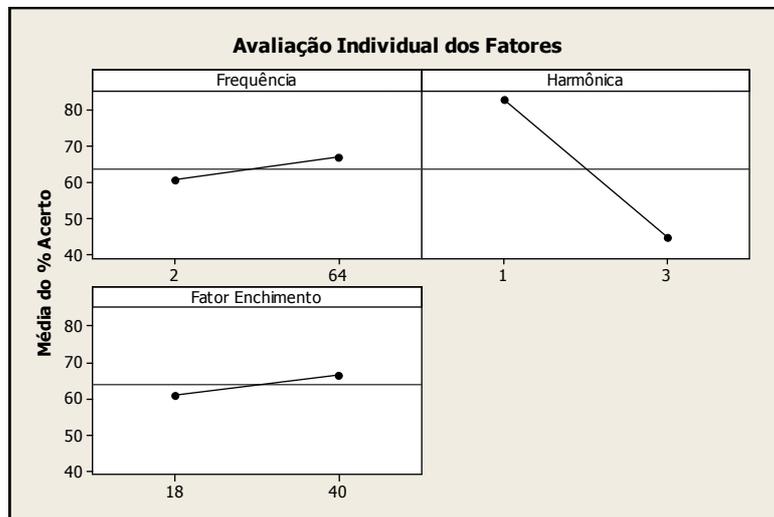


Figura 4.2: Avaliação individual dos fatores de ajuste.

A figura 4.3 mostra os resultados finais do projeto de experimento, o qual representa a interação entre os três fatores de ajuste para o resultado do percentual de acerto de separação das composições químicas de aço envolvidas no trabalho.

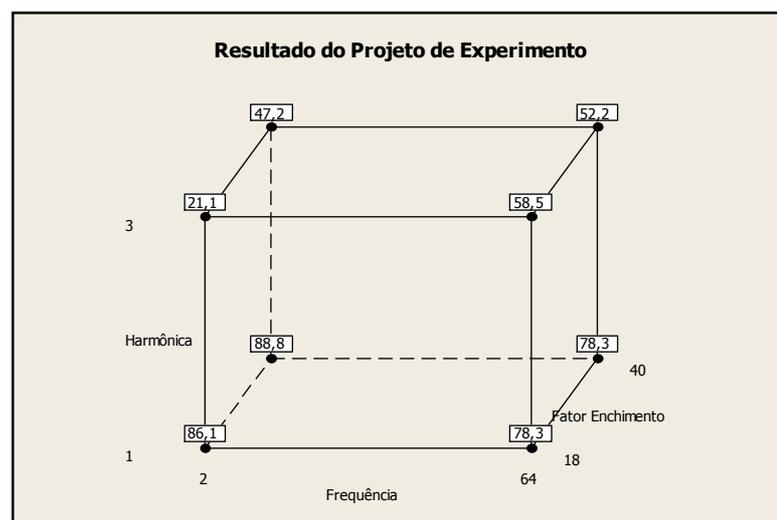


Figura 4.3: Resultado final do DOE das interações dos fatores de ajuste.

Os vértices do cubo representam a intersecção dos eixos, tendo em cada um os resultados do percentual de acerto, conforme tabela 4.1. Os eixos do cubo representam os três fatores e os valores de ajuste estudado. Para o presente trabalho o maior resultado encontrado no vértice do cubo representa a melhor tendência de ajuste do equipamento de correntes parasitas para separação das composições químicas estudadas.

O melhor resultado de separação das composições químicas foi 88,8% de acerto para o conjunto de teste frequência 2Hz, harmônica 1 e fator de enchimento 40%, seguido do resultado 86,1 para o conjunto de teste frequência 2Hz, harmônica 1 e fator de enchimento 18%.

Os resultados demonstraram uma melhor tendência de ajuste para frequências menores, harmônicas baixas e fator de enchimento utilizado relativamente insignificante ou de pouca influência para o objetivo do trabalho.

Esta avaliação foi de extrema importância, pois o equipamento necessita da interação de ajuste dos três fatores para que se possa realizar a inspeção, ou seja, não há possibilidade de se utilizar somente o melhor resultado de um fator e desconsiderar os demais, há necessidade da melhor relação entre eles.

4.2 Resultados do Procedimento Final

Conforme conclusões do DOE, o fator de enchimento não é significativo para esta aplicação, sendo considerado para esta etapa do trabalho apenas o valor de 40%, assim seguindo as considerações da bibliografia dando preferência para o maior fator possível [2,6,30,31].

O estudo inicial mostrou que faixas de menor frequência de ensaio apresentaram melhor desempenho, portando valores acima de 64Hz foram descartados e não avaliados.

Da mesma maneira, a 1^a harmônica ímpar demonstrou ser a mais eficaz no processo de separação das composições químicas dos aços estudados, sendo desta forma desconsiderado qualquer outro valor para o procedimento final de otimização dos parâmetros de ajuste do equipamento.

Embasado nestas orientações, novos conjuntos de testes foram criados e testados gerando os resultados mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparativo dos resultados finais.

Fator Enchimento	Harmônica	Frequência	% Acerto	% E	%EF
40	1	64	78,3	21,6	-
		32	77,2	22,7	-
		16	80,0	20,0	-
		8	85,2	14,7	-
		4	96,6	3,3	-
		2	88,8	11,1	-

Confrontando os resultados obtidos na tabela 4.2 com a tabela 3.3 dos critérios de aceite do sistema de medição, conforme manual do MSA [38], constata-se:

- Todos os conjuntos de testes foram aceitos no critério de Falso Erro (%EF), onde a composição química de ajuste do equipamento não foi rejeitada;
- O conjunto de teste com frequência 4Hz, foi considerado marginal podendo ser aperfeiçoado para o critério de Classificação Errada (%E), sendo os demais conjuntos de testes inaceitáveis para esta avaliação;
- Para o critério de % Acerto ou eficácia do sistema o conjunto de teste 4Hz foi considerado aceito, sendo os conjuntos 16Hz, 8Hz e 2Hz marginais com possibilidade de aperfeiçoamento, e os conjuntos 64Hz e 32Hz foram rejeitados pelo critério.

Dentro das condições testadas e pelos critérios definidos o conjunto de testes com frequência de ensaios 4 Hz, fator de enchimento 40% e harmônica 1, constituiu a melhor parametrização do equipamento para a aplicação de separação de barras de aço por diferença de composição química, porém com o % de Classificação Errada (%E) fora do critério aceitável.

4.2.1 Detalhamento do Melhor Resultado

Devido ao fato da melhor condição de parametrização do equipamento não ter o critério de %E dentro do aceitável, foi necessário realizar uma análise detalhada dos resultados do conjunto de testes frequência 4Hz, fator enchimento 40% e harmônica 1.

4.2.1.1 Análise da Classificação Errada

Com o objetivo de identificar em que momento da inspeção ocorreram as falhas de classificação errada, ou seja, ocorrência de mistura de composições químicas, foram analisados os resultados de inspeção para cada ajuste de composição química.

Na tabela 4.3 verifica-se que as falhas ocorreram quando o equipamento estava ajustado para a composição química SAE 1020, situação em que as 5 barras da composição química SAE 4320 e 1 barra da composição química SAE 8620 não foram detectadas.

No processo inverso, ou seja, quando o equipamento foi ajustado com as composições químicas SAE 8620 e SAE 4320 a composição química SAE 1020 foi segregada corretamente sendo identificada a mistura entre elas.

Tabela 4.3: Resultados detalhados da melhor condição de parâmetros.

Frequência	4Hz	Qualidade de Ajuste						Total geral
Harmonica	1							
Fator Enchimento	40							
Resultados		SAE 1020	SAE 8620	SAE 4320	SAE 8640	SAE 1045	SAE 4140	
Acerto	SAE 1020	5	5	5	5	5	5	30
	SAE 8620	4	5	5	5	5	5	29
	SAE 4320		5	5	5	5	5	25
	SAE 8640	5	5	5	5	5	5	30
	SAE 1045	5	5	5	5	5	5	30
	SAE 4140	5	5	5	5	5	5	30
Acerto Total		24	30	30	30	30	30	174
Erro	SAE 8620	1						1
	SAE 4320	5						5
Erro Total		6						6
Total geral		30	30	30	30	30	30	180

4.2.1.2 Análise dos limites de separação por ajuste de composição química:

Conforme relatado no capítulo 3, após escolhidos os parâmetros de ajuste o equipamento necessita de amostras de referências para delimitar os limites de separação da composição química utilizada no ensaio. Estes limites são representados por um círculo, no qual quanto menor seu diâmetro mais homogêneo e confiável são as amostras de referência utilizadas.

Nas figuras 4.4 estão apresentados os limites de separação por composição química de ajuste do equipamento. Os conjuntos de testes com o melhores resultados de

parametrização do equipamento foram as composições químicas SAE 4320 e SAE 1045, pois apresentaram menor diâmetro quando equipamento ajustado.

Observa-se que a composição química SAE 1020 apresenta o diâmetro do limite de separação superior às demais composições químicas, indicando maior campo para resultados de aprovação, conseqüentemente aumentando a probabilidade de erro, pois a faixa de tolerância encontra-se mais aberta em relação aos demais ajustes.

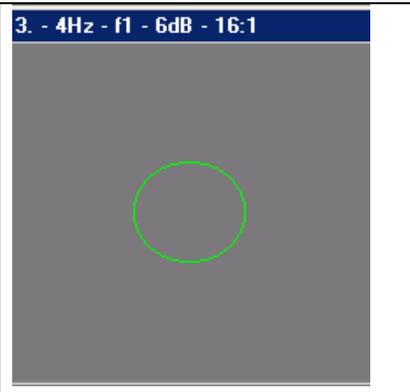
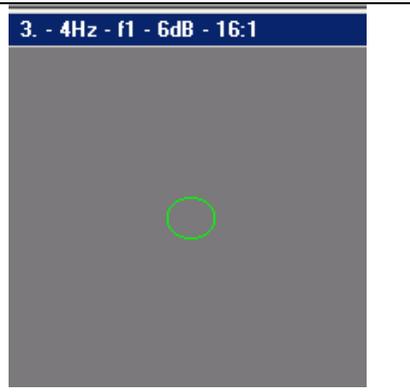
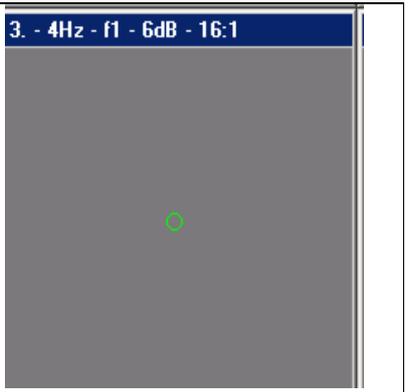
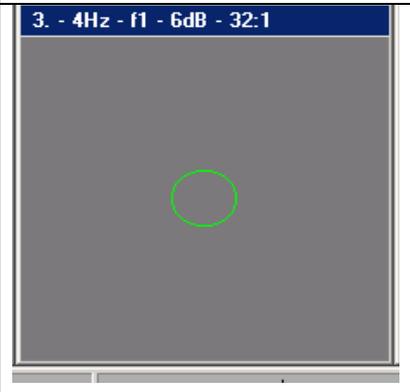
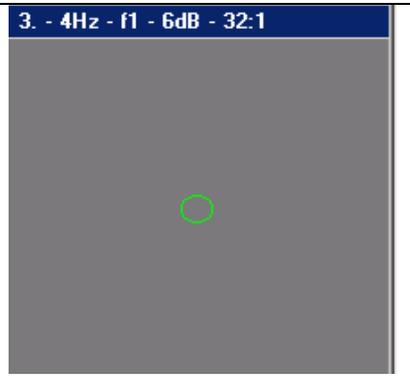
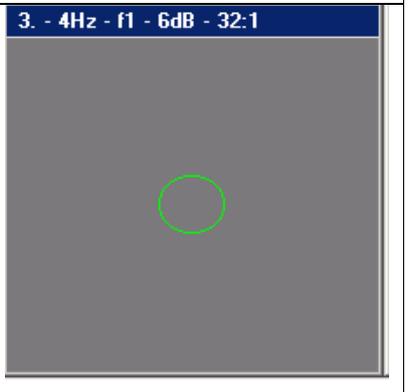
		
4.4(a): Limite de separação ajustado em SAE 1020.	4.4(b): Limite de separação ajustado em SAE 8620.	4.4(c): Limite de separação ajustado em SAE 4320.
		
4.4(d): Limite de separação ajustado em SAE 8640.	4.4(e): Limite de separação ajustado em SAE 1045.	4.4(f): Limite de separação ajustado em SAE 4140.

Figura 4.4: Limites de separação tipo círculo para cada composição química. (a) Limite de separação ajustado em SAE 1020; (b) Limite de separação ajustado em SAE 8620; (c) Limite de separação ajustado em SAE 4320; (d) Limite de separação ajustado em SAE 8640; (e) Limite de separação ajustado em SAE 1045; (f) Limite de separação ajustado em SAE 4140. Ampliação: a,b,c 16:1 e d, e, f 32:1.

A tabela 4.4 mostra os valores dos resultados das componentes resistivas e indutivas do plano de impedância para cada composição química, após a inspeção no equipamento MAGNATEST ajustado na composição química SAE 1020, e parametrizado com frequência 4Hz, fator enchimento 40% e harmônica 1.

Tabela 4.4: Resultados dos valores resistivos e indutivos da composições químicas.

Frequência	4Hz	Resultados	
Harmonica	1		
Fator Enchimento	40		
Qualidade de Ajuste	SAE 1020	Resistivo	Indutivo
SAE 1020		2392	3766
		2418	3778
		2347	3717
		2275	3620
		2215	3539
SAE 8640		1440	2963
		1449	2995
		1456	2988
		1448	2987
		1454	3000
SAE 8620		1810	3156
		1816	3140
		1814	3149
		1871	3238
		1914	3239
SAE 4140		1363	2849
		1351	2816
		1325	2814
		1349	2829
		1349	2824
SAE 1045		1667	2925
		1679	2968
		1665	2916
		1692	2924
		1703	2956
SAE 4320		1947	3408
		1963	3408
		1973	3448
		1969	3439
		1946	3431

O fato constado nos resultados foi que as impedâncias das amostras de referência da composição química SAE 1020 utilizados no trabalho apresentaram maior variação nos valores e geraram um limite de separação maior do que as demais composições químicas, conforme verificado no comparativo da figura 4.4.

4.2.1.3 Análise do aço SAE 1020

Teve-se a necessidade de avaliar metalurgicamente as amostras da composição química SAE 1020 que apresentaram grande variação nos resultados de impedância, sendo o principal problema o aumento dos limites de separação que ocasionou a não identificação da mistura de material referente às composições químicas SAE 8620 e SAE 4320.

➤ **Análise da Microestrutura:**

As amostras da referida composição química 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 óptico Olympus BX 60M com ampliação de 50 x.

Os resultados obtidos mostraram certa heterogeneidade microestrutural nas regiões superficiais longitudinais das amostras SAE 1020 utilizadas como padrão de ajuste do equipamento de correntes parasitas, conforme de mostrado nas figuras 4.5.

As amostras 1 e 3, figuras 4.6(a) e 4.6(c) respectivamente, apresentaram microestruturas relativamente adequadas em sua superfície com ilhas de perlita distribuídas na matriz ferrítica de forma homogênea.

Na amostra 2, figura 4.6(b), foram encontradas muitas regiões ao longo de sua superfície com defeitos superficiais pontuais do tipo “carepa incrustada” os quais geraram regiões descarbonetadas e encruadas próximas a estes defeitos.

A amostra 4, figura 4.6(d), apresentou camada descarbonetada ao longo de sua superfície com espessura de 200 à 300 μm .

Na amostra 5, figura 4.6(e), foram identificadas regiões com encruamento de grãos e descarbonetação com 200 μm de espessura ao longo da superfície.

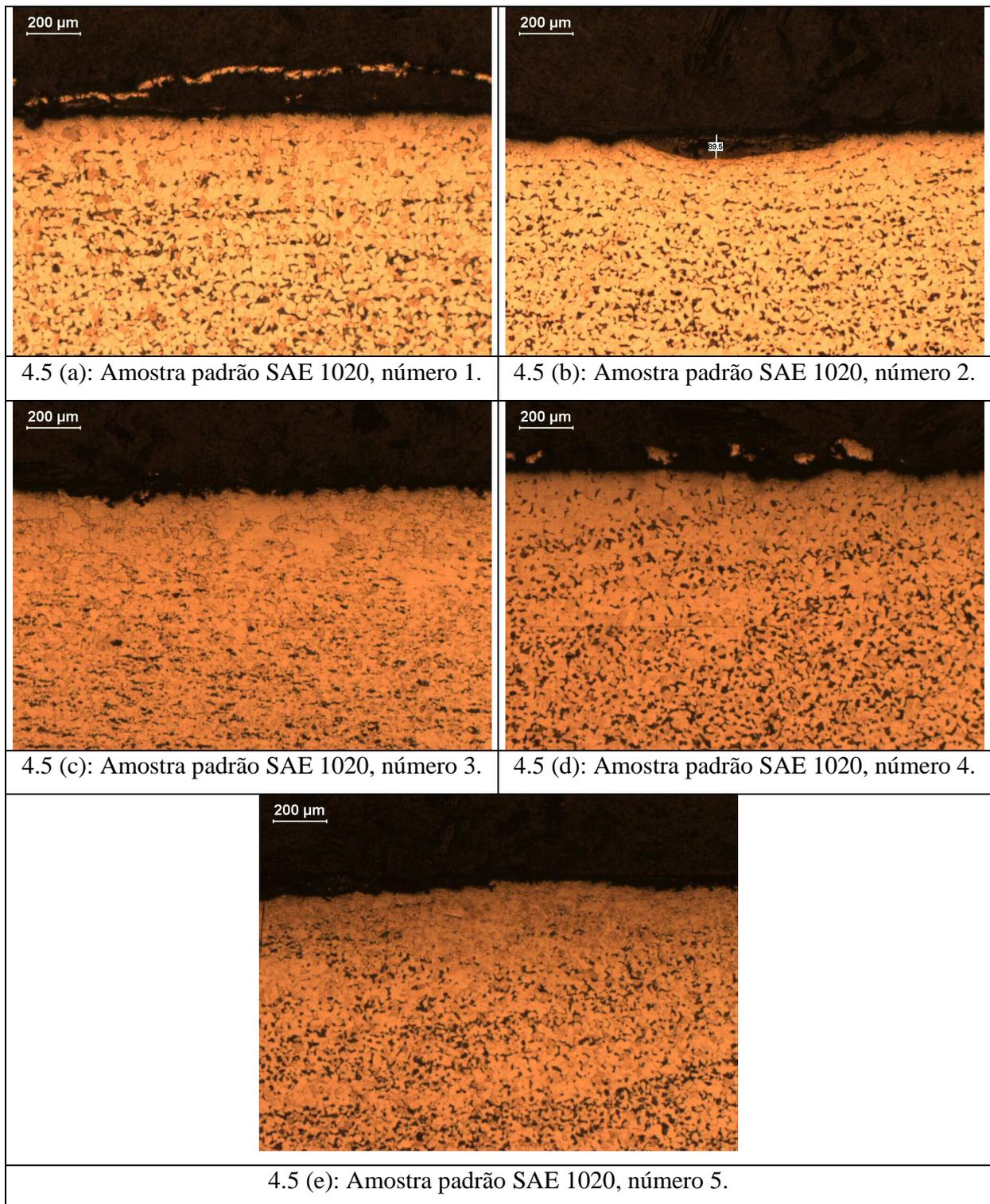


Figura 4.5: Microestrutura na região superficial longitudinal das cinco amostras padrões da composição química SAE 1020. (a) amostra 1; (b) amostra 2; (c) amostra 3; (d) amostra 4; (e) amostra 5. Ampliação: 50X. Ataque: Nital 3%

➤ Análise da Dureza:

As medições foram feitas na superfície, na metade do raio e no núcleo das amostras. Os ensaios foram conduzidos em um durômetro Wolpert BK 300B com esfera de 5,0 mm de diâmetro e carga de 750 kg. As medições das calotas foram realizadas no aparelho Dia Testor 2N.

Os resultados das medições de dureza realizadas nas amostras do aço SAE 1020 estão apresentados na Tabela 4.5 e representados graficamente na Figura 4.7.

Tabela 4.5: Resultados dos valores resistivos e indutivos da composições químicas.

SAE 1020	Dureza Superfície	Dureza 1/2 Raio	Dureza Núcleo	Média	Desvio Padrão
Amostra 1	139	123	119	127	11
Amostra 2	139	132	129	133	5
Amostra 3	149	133	124	135	13
Amostra 4	129	129	128	129	1
Amostra 5	132	137	123	131	7
Média	138	131	125		
Desvio Padrão	8	5	4		

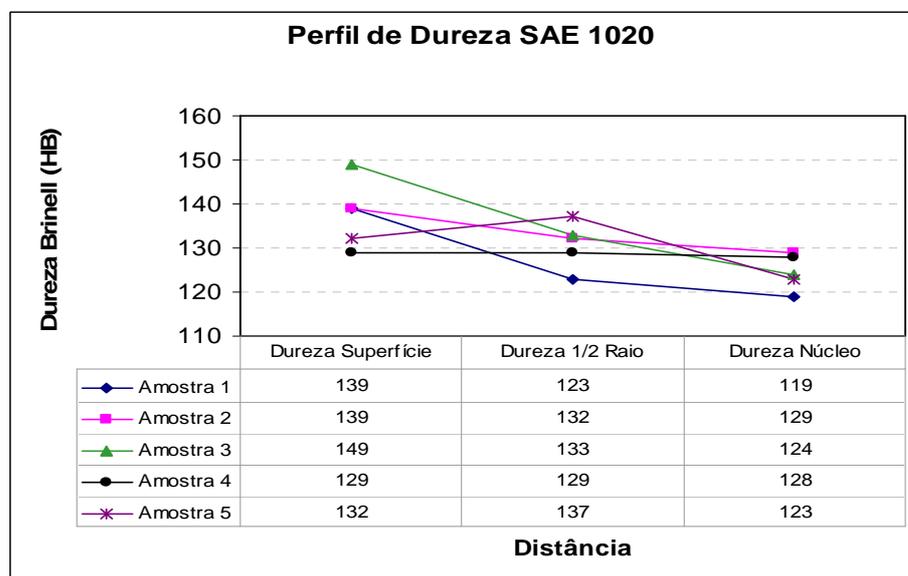


Figura 4.6: Representações gráficas dos ensaios de dureza realizados nas amostras do aço SAE 1020.

Os resultados demonstram que a amostra 3 foi a de maior dureza superficial, bem como a maior média de dureza com 135 HB, e maior desvio padrão representando uma variação maior de dureza ao longo de sua secção.

A amostra 4 apresentou menor dureza superficial, porém com uma boa homogeneidade de dureza representada pelo baixo desvio padrão entre seus resultados. Na amostra 1 os resultados mostraram o segundo maior desvio padrão e a menor média de dureza entre todas as amostras com 127 HB.

As análises por regiões das amostras demonstraram que a média das durezas nas superfícies das amostras foi maior do que no meio raio e no núcleo, porém nesta região teve-se o maior desvio padrão representando uma maior variação na medida de dureza entre as cinco amostras.

➤ **Análise da Composição Química:**

As cinco amostras da composição química SAE 1020 utilizadas como padrão de ajuste no ensaio de correntes parasitas foram analisadas em um espectrômetro de emissão ótica ARL 3560.

Os resultados obtidos de suas composições químicas apresentaram excelente homogeneidade entre as amostras com variações insignificantes, conforme demonstrado na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados das análises de composição química das amostras do aço SAE1020.

SAE 1020	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Amostra 1	0,19	0,23	0,37	0,021	0,007	0,05	0,06	0,01
Amostra 2	0,19	0,23	0,37	0,023	0,009	0,06	0,06	0,01
Amostra 3	0,19	0,24	0,38	0,025	0,011	0,06	0,07	0,01
Amostra 4	0,19	0,24	0,38	0,023	0,009	0,06	0,06	0,01
Amostra 5	0,19	0,24	0,38	0,024	0,01	0,06	0,06	0,01

5 DISCUSSÕES

Os resultados mostraram a grande potencialidade da utilização do método de correntes parasitas para separação de composições químicas de aço com diferentes composições químicas.

A melhor parametrização de ajuste do equipamento MAGNATEST D 3.623 foi a frequência de ensaios 4 Hz com fator de enchimento 40% e harmônica 1, conforme tabela 4.2.

Os resultados obtidos confirmam a tendência teórica obtida na bibliografia pesquisada, pois Tai, C. C [14] e Zergoug, M [7] citam em seus trabalhos que com frequências menores obtiveram melhor clareza na determinação de espessura de camada e avaliação de microdureza encontrando menor variação de resultados quando comparados com ensaios destrutivos. Marques, P.F [23] em seus estudos de influência das harmônicas no método de correntes parasitas, constatou que as harmônicas menores apresentavam menos distorção em relação a onda de excitação tornando a resposta de ensaio relativamente melhor em certas aplicações do ensaio. O fator de enchimento foi a única variável que não confirmou a tendência teórica, de que quanto maior o fator de enchimento melhor a sensibilidade e resposta do ensaio [2,6,30,31]. Os resultados práticos neste trabalho mostraram pouca influência na separação de composições químicas de aço para valores de 18% e 40% de enchimento da bobina.

A combinação frequência de teste e harmônica não chegou ser significativa para o processo, mas conforme descrito por Silva, L [18] a frequência de ensaio determina a profundidade de penetração das correntes e pode ter fortes influências nos ensaios e resultados dependendo da aplicação do método de correntes parasitas.

Mercier, D [8] relata a importância do conhecimento das propriedades dos padrões de referência ou amostras de ajuste para equipamentos e ensaios de correntes parasitas. Neste sentido, os resultados mostraram uma tendência de erro quando o equipamento foi ajustado na composição química SAE 1020 para a melhor condição de parametrização de ajuste: 4Hz, 1ª harmônica e 40% fator enchimento.

A grande preocupação foi de que nesta condição de parametrização o % de Classificação Errada (%E) ficou fora do critério aceitável. Na prática, este resultado

significou que há possibilidade do equipamento não detectar uma mistura de material no fluxo normal de produção aprovando barras de diferentes composições químicas.

A simulação dos resultados da tabela 4.4 e a delimitação da forma aproximada dos limites de separação para o equipamento ajustado em SAE 1020, conforme figura 5.1, demonstraram uma variação considerável dos pontos de impedância entre cada barra desta composição química. Estes resultados ocasionaram o limite de separação para esta composição química maior do que as demais composições químicas, conforme verificado na figura 4.4 (a).

Observou-se que a composição química SAE 4320 encontrava-se dentro do limite de aprovação da composição química SAE 1020, mesmo sendo de composição química diferente. A composição química SAE 8620 encontra-se muito próxima do limite de aprovação para esta condição de ajuste justificando o erro de uma barra desta composição química e as cinco barras da SAE 4320, conforme demonstrado na tabela 4.3.

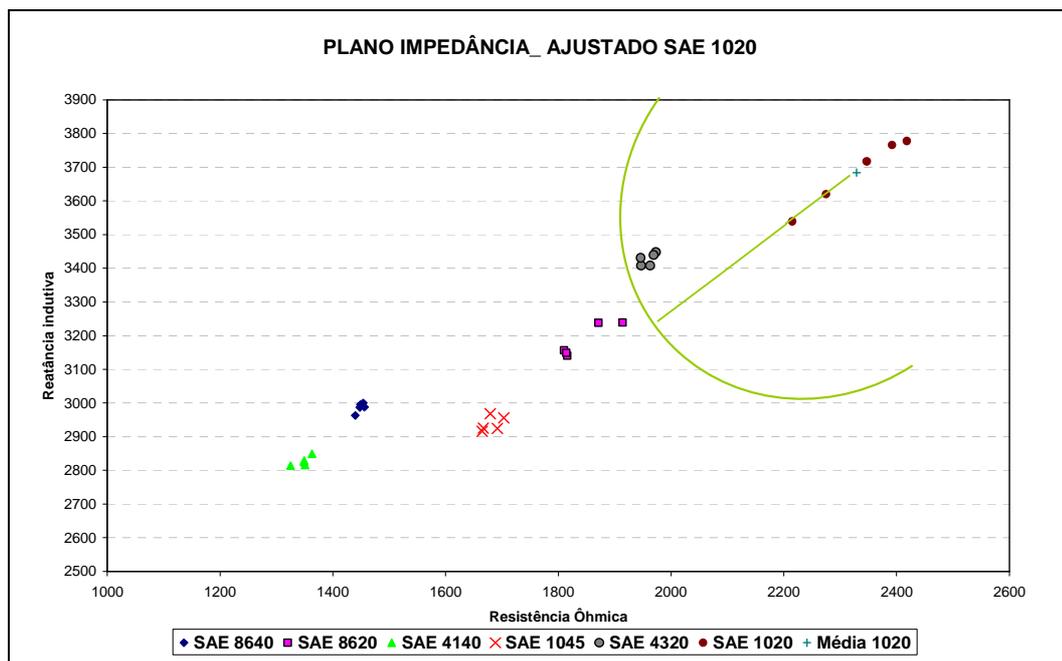


Figura 5.1: Simulação dos resultados em plano de impedância para ajuste em SAE 1020.

Nos trabalhos de Ma, X [12] e Haldane, R.J [13], foi constatada a influência da microestrutura, porosidade e propriedades metalúrgicas na impedância dos materiais

utilizando o método de correntes parasitas para avaliação de componentes por eles estudados.

É importante salientar que pelo fato da grande concentração das correntes parasitas estarem na superfície das amostras os resultados superficiais encontrados foram de grande valia para compreender o comportamento dos limites de separação das amostras de referência da composição química SAE1020.

Neste sentido, os resultados das análises microestruturais da composição química SAE1020 apresentados nas figuras 4.5 identificaram variações significativas entre as regiões superficiais. Defeitos superficiais, regiões descarbonetadas e regiões encruadas encontradas em cada amostra podem ter gerado as diferenças nos resultados de impedâncias das barras tornando o limite de separação nesta composição química maior do que as demais no ajuste do equipamento, conforme figura 5.1.

Zergoug, M [7] relata que as variações de durezas e microestruturas influenciam em variações dos valores de impedância, sendo que tal comportamento o permitiu correlacionar os valores de impedância com os resultados destrutivos de microdureza dos aços tratados termicamente por ele estudados.

Através dos resultados de dureza entre as amostras do SAE1020, conforme tabela 4.5, a região superficial apresentou maior variação com desvio padrão igual a 8. O comportamento de dureza superficial das amostras pode ter influenciado de forma negativa nos resultados de ajuste do equipamento para esta composição química, tornando o percentual de classificação errada fora dos limites aceitáveis, conforme critérios estabelecidos na tabela 3.3.

Apesar das dificuldades encontradas durante a condução do trabalho foi possível otimizar os parâmetros de ajuste do equipamento de correntes parasitas MAGNATEST D 3.623 para aplicação de separação de barras de aços com diferentes composições químicas, obtendo eficácia na inspeção de 96,6% e 3,3% de classificação errada.

6 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados foi possível chegar as seguintes conclusões:

A metodologia DOE mostrou-se uma ferramenta importante para o desenvolvimento do trabalho, pois foi facilmente aplicada nos estudos propostos gerando eficiência, rapidez e confiabilidade nos resultados obtidos agilizando o conhecimento do processo de otimização dos parâmetros de ajuste do equipamento MAGNATEST para aplicação de separação de composições químicas de aços.

Os resultados demonstraram a possibilidade de separar os materiais, onde obtivemos mais de 96% de acerto de separação sem erros falsos para frequência 4 Hz e harmônica de 1ª ordem. O fator de enchimento teve pouca influência nos resultados, indicando que com 40% foi mais confiável devido a não indicação de erros falsos.

As amostras utilizadas para o ajuste do equipamento devem ser muito bem conhecidas e com características metalúrgicas homogêneas, pois variações microestruturais ou de dureza podem aumentar o limite de separação resultando em classificação errada dos materiais, ou seja, possibilitando a não detecção de Mistura de Material.

O objetivo do trabalho, aumentar a confiabilidade do equipamento para detecção de Mistura de Materiais, foi plenamente alcançado através da utilização da otimização dos parâmetros de ajuste.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Utilizar metodologia para otimizar parâmetros do aparelho MAGNATEST S 3.625;
2. Avaliar comportamento de materiais tratados termicamente nos parâmetros otimizados;
3. Análise estatística da influência da dureza superficial nos resultados de impedância;
4. Avaliar comportamento das formas de avaliação: elíptica, caixa de regressão e retangular para os parâmetros de ajuste otimizados;
5. Avaliar comportamento do ensaio para material com superfície usinada.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ESPAÇO CAPACITAR GERDAU – Apostila de Treinamento FAG-000– Capacitação em Ensaios Não Destrutivos Fagulha. Charqueadas, 2006.
- [2] Soares, A. – Correntes Parasitas. 1ª edição. São Paulo: ABENDE, 2005.
- [3] Mix, P. – Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. 2ª edição. New Jersey, 2005.
- [4] Hagemaiier, D. – Princípios Fundamentais do Ensaio com Correntes parasitas. 1ª edição. California, 1990.
- [5] 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.
- [6] Stegemann, D. – Fundamentos do Método de Correntes Parasitas. 1ª edição. Junnich, 1990.
- [7] Zergoug, M.; Lebaili, S. “Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing”. NDT&E International 37, 2004, p. 65–72.
- [8] Mercier, D.; Lesage, J. “Eddy Currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing”. NDT&E International 39, 2006, p. 652–660.
- [9] Alencar, D.; Ferraz, W. “O ensaio de correntes parasitas utilizado no controle de composição química de fabricação de combustíveis nucleares”, XXIV Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, CONAEND 016, São Paulo, junho de 2006.
- [10] Dybiec, C., Wlodarczyk, S.; Dybiec, M., “Measurement of own stress using the eddy current method”, ECNDT, Vol. 3, 1998.
- [11] Boucherou, N.; Zergoug, M.; Kamel, G. “Mechanical Stress Analysis by Eddy Current Method”, The Journal of American Science, 4(4), 2008.
- [12] 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.
- [13] Haldane, R.J., Yin, W., Strangwood, M., Peyton, A. J., Davis, C. L. “Multi-frequency electromagnetic sensor measurement of ferrite/austenite phase fraction-Experiment and theory”. Scripta Materialia 54, 2006, p 1761-1765.

- [14] Tai, C. C. “Characterization of coatings on magnetic metal using the swept-frequency eddy current method”. *Review of Scientific Instruments* 71, 2000, p. 3161-3167.
- [15] Halleux, B.; Ptchelintsev, A.; Limburg, S. B. “Thickness and conductivity determination of thin coatings on ferromagnetic substrates in the case of cylindrical symmetry.” *Review of Scientific Instruments* 68, 1997, p. 3533-3539.
- [16] Shull, P. – *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*. 1ª edição. Altoona, 2002.
- [17] Extraída de: <http://www.foerster.com.de>, em Março de 2009.
- [18] Silva, L. “Caracterização de Revestimentos de Níquel Compósito por Correntes Parasitas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007, 153p.
- [19] Ditchburn, R.; Burke, S.; “Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection”, *NDT&E International* 38, 2005, p. 690–700.
- [20] Yin, W.; Peyton, A.; “Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors”, *NDT&E International* 40, 2007, p. 43–48.
- [21] Maouche, B.; Alkama, R.; “Semi-analytical calculation of the impedance of differential sensor for eddy current non-destructive testing”, *NDT&E International* 41, 2008, p. 101–116.
- [22] Martins, C. O. D.; “Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões”, Tese de Doutorado, PPGEM–UFRGS, 2008, 122p.
- [23] Marques, P.F; Rebello, J.; Feiste, K. L.; Stegemann, D. “Fundamentals of harmonic analysis of electromagnetic fields”. CONAEND, 2000.
- [24] Mandache, C.; Lefebvre, J.H.V.; “Transient and harmonic eddy currents: Lift-off point of intersection”, *NDT&E International* 39, 2006, p. 57–60.
- [25] Campos, M. A., Sanchez, J. C., Padovese, L. R., “Ensaio não Destrutivo em Aços Carbono: Análise Harmônica Não Linear e Ruído Magnético Barkhausen”, CONAEND&IEV–045, XXVI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo/BR, 2008.
- [26] Robert, R., “Efeito Pelicular”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 22, N° 2, 2000.

- [27] “FOERSTER MAGNATEST D 3.623 – Operating Instructions”, Dortmund - Institut Dr. Förster, 2004.
- [28] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 1. History and electrical theory”, *Insight* Vol 46 N° 5 May 2004.
- [29] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 2. The impedance plane and probe”, *Insight* Vol 46 N° 6 June 2004.
- [30] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 3. Instrumentation and applications”, *Insight* Vol 46 N° 7 July 2004.
- [31] Hansen, J., “The eddy current inspection method: Part 4. Applications, practical testing and advanced concepts”, *Insight* Vol 46 N° 8 August 2004.
- [32] Yin, W.; Dickinson, S.J.; Peyton, A.J.; “A multi-frequency impedance analyzing instrument for eddy current testing”, *Meas Sci Technol* 2006;17:393–402.
- [33] Mook, G.; Hesse, O.; Uchanin, V., “Deep Penetrating Eddy Currents and Probes”, 9th European NDT Conference (ECNDT), Berlin, Germany, 2006.
- [34] MONTGOMERY, D. C. – Design and Analysis of Experiments. 6^a edição. New York: J. Wiley, 2005.
- [35] Box, G.; Hunter, G.; Hunter, J. – Statistic for experimenters. 1^a edição. New York: J. Wiley, 1987.
- [36] Cardoza, J.; Correia, E.; “Planejamento de Experimento no processo produtivo”, II CONNEPI, João Pessoa, 2007.
- [37] Jiju, A., Kaye, M. A.; “Methodology for Taguchi Design of Experiments for Continuous Quality Improvement”, *Quality World TS*, p. 98-102, September 1995.
- [38] MSA – Análise dos Sistemas de Medição – Manual de Referência. 3^a Edição. Direitos Autorais: DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation, 2003.