

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**João Carlos Matarezi**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO DE EDDY CURRENT  
PHASED ARRAY EM COMPONENTES  
AEROSPACIAIS**

**Taubaté – SP**

**2009**

**João Carlos Matarezi**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO DE EDDY CURRENT  
PHASED ARRAY EM COMPONENTES  
AEROESPACIAIS**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Título de Mestre pelo curso de Engenharia  
Mecânica do Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Produção Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo.

**Taubaté – SP**

**2009**

**JOÃO CARLOS MATAREZI**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO DE EDDY CURRENT PHASED ARRAY EM  
COMPONENTES AEROESPACIAIS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Produção Mecânica

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. José Rubens de Camargo                      Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda      Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sergio Rebello Ferreira                      DCTA/IFI

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha esposa que já não está mais entre nós, e aos meus filhos Guilherme, Marina e Camila.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, que sempre me municia de forças para me manter firme nos meus propósitos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Rubens de Camargo, pelo apoio e dedicação na orientação. Seu conhecimento e a sua experiência foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À Universidade de Taubaté, pelo alto nível do curso e dos professores.

Ao Instituto de Fomento e Coordenação Industrial – IFI, que me ofereceu todas as condições para a realização do mestrado.

À Agência Espacial Brasileira – AEB, por apoiar financeiramente a realização do curso.

À Ligia, pela ajuda e carinho, ao Eduardo Mineiro, Eng. Antonio Carlos, José Maria Cavalcanti e todos que me apoiaram na realização deste trabalho.

“A educação faz com que as pessoas sejam fáceis de guiar,  
mas difíceis de arrastar, fáceis de governar, mas  
impossíveis de escravizar”

Henry Peter

## RESUMO

Na área de Ensaio Não Destrutivos, o ensaio por *eddy current* (correntes parasitas) é uma técnica eletromagnética largamente utilizada nas indústrias aeroespacial, nuclear e petroquímica. Esse ensaio detecta descontinuidades superficiais e subsuperficiais, prevenindo acidentes. A técnica *phased array* surgiu para suprir carências, como o enorme tempo gasto para execução do ensaio em materiais de geometria complexa e falta de registro do ensaio. Essa técnica, já bastante utilizada em outros países, ainda é pouco utilizada no Brasil, por não haver estudos que comprovem a viabilidade econômica, os níveis de detectabilidade de descontinuidades e a confiabilidade dos resultados. Este trabalho tem como objetivo comparar as técnicas do ensaio por Correntes Parasitas convencional com a técnica por *phased array*, em materiais e peças especificamente utilizados no setor aeronáutico e espacial. Foram selecionadas amostras de materiais e peças, para que pudessem ser aplicadas ambas as técnicas e comparados os resultados. Foi realizado um levantamento bibliográfico das principais normas e especificações utilizadas neste segmento, para verificar a compatibilidade dos métodos. Para atender ao objetivo deste trabalho, foram realizados sete experimentos, variando o material e as técnicas. Após a realização dos ensaios, observou-se uma grande redução de tempo na execução do ensaio, com consequente redução de custos e maior detectabilidade das descontinuidades, com o uso da técnica por *phased array*. Portanto, baseado nos resultados encontrados, pode-se afirmar que a técnica por *phased array* pode ser utilizada neste segmento, com vantagens sobre a técnica convencional.

**Palavras-chave:** Correntes parasitas. Ensaio não-destrutivo. Aeroespacial.

## ABSTRACT

In the area of nondestructive testing, eddy current testing is an electromagnetic technique widely used in aerospace, nuclear and petrochemical industries. This test detects surface and subsurface discontinuities, preventing accidents. Phased array technique has emerged to fill in the gaps, as the enormous time spent implementing the test of large parts or complex geometry and lack of trial registration. This technique, already widely used in others countries, is not used in Brazil, there is no studies proving the economic viability, levels of detectability of discontinuities and reliability of the results. This study aims to compare the conventional technique by eddy current testing with phased array technique, in particular materials and parts used in aeronautics and space sector. Samples of materials and parts were prepared, so that could be applied both techniques and compared the results. A literature survey of the main standards and specifications for this segment was conducted to verify the compatibility of the methods. To meet the objective of this work, seven experiments were performed, varying the material and techniques. After the tests, there was a significant time reduction with the use of phased array technique, costs reduction and increased detectability of discontinuities. Based on the results, it can be said that phased array technique can be used in this segment, with advantages over the conventional technique.

**Keywords:** Eddy current. Nondestructive testings. Aerospace.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Correntes parasitas produzidas por uma bobina superficial.....	26
Figura 2-	Sentido das discontinuidades detectadas pelo ensaio.....	27
Figura 3-	Circuito elétrico.....	29
Figura 4-	Plotagem da voltagem (CA) e corrente.....	29
Figura 5-	Relação entre a resistência, reatância e impedância.....	30
Figura 6-	Blocos de referência.....	32
Figura 7-	Relação da condutividade elétrica com a profundidade de penetração....	33
Figura 8-	Curvas de magnetização.....	35
Figura 9-	Relação da permeabilidade magnética com a profundidade de penetração.....	36
Figura 10-	Comparação da distância sonda peça com a profundidade de penetração.....	37
Figura 11-	Efeito <i>lift off</i> no diagrama do plano de impedância.....	38
Figura 12-	Profundidade de penetração padrão.....	40
Figura 13-	Tipos de sondas superficiais.....	41
Figura 14-	Bobina de superfície.....	41
Figura 15-	Bobina interna.....	41
Figura 16-	Bobina externa.....	42
Figura 17-	Bobinas simples absoluta e diferencial.....	43
Figura 18-	Bobina dupla absoluta.....	44
Figura 19-	Bobina dupla diferencial.....	44
Figura 20-	Bobina dupla diferencial e padrão.....	45
Figura 21-	Relação da frequência com a profundidade de penetração.....	46
Figura 22-	Funções dos equipamentos de correntes parasitas.....	48
Figura 23-	Circuito ponte com resistência e reatância variáveis.....	49
Figura 24-	Padrão de calibração – bloco de referência.....	53
Figura 25-	Representação das curvas na tela do equipamento.....	56
Figura 26-	Respostas de trincas de diferentes profundidades.....	57

Figura 27-	Tipos de inclusões.....	58
Figura 28-	Trinca localizada na ZTA.....	58
Figura 29-	Tipos de porosidade.....	59
Figura 30-	Imagem de varredura típica de corrosão.....	60
Figura 31-	Corrosão ao <i>pitting</i> .....	61
Figura 32-	Comparação da varredura convencional e por <i>phased array</i> .....	63
Figura 33-	Efeito do multiplexador.....	64
Figura 34-	Sonda com o efeito multiplexador.....	64
Figura 35	Padrão de alumínio, utilizado para calibração do equipamento.....	65
Figura 36-	Parte inferior do padrão, com as trincas a partir dos rebites.....	66
Figura 37-	Sonda convencional simples e sonda <i>phased array</i> múltipla.....	67
Figura 38-	Equipamento digital de correntes parasitas.....	68
Figura 39-	Equipamento com a imagem das indicações de corrosões.....	69
Figura 40-	Imagem C Scan.....	70
Figura 41-	Sonda flexível <i>array</i> .....	71
Figura 42-	Sonda para detecção de corrosão.....	72
Figura 43-	Sonda rotativa automática para furos.....	72
Figura 44-	Fluxograma das etapas de ensaio.....	77
Figura 45-	Fuselagem de aeronave.....	83
Figura 46-	Detecção de corrosão pela técnica convencional.....	84
Figura 47-	Detecção de corrosão pela técnica <i>phased array</i> .....	84
Figura 48-	Amostra de grafite do foguete.....	86
Figura 49-	Ensaio por <i>phased array</i> da amostra de grafite.....	87
Figura 50-	Adaptador do motor aeronáutico Lycoming.....	88
Figura 51-	Trincas detectadas pelo ensaio por líquido penetrante.....	89
Figura 52-	Calibração do equipamento com a utilização do padrão.....	90
Figura 53-	Ensaio por <i>phased array</i> no adaptador.....	91
Figura 54-	Ensaio do adaptador, com a representação das trincas na tela.....	92
Figura 55-	Registro da representação da imagem das trincas.....	92
Figura 56-	Garfo do trem de pouso da aeronave Xavante.....	94

Figura 57-	Utilização da sonda rotativa no ensaio de furos.....	95
Figura 58-	Localização das trincas no furo do trem de pouso.....	95
Figura 59-	Ensaio <i>phased array</i> no garfo do trem de pouso.....	96
Figura 60-	Furos de fixação do trem de pouso.....	97
Figura 61-	Resultado da representação das trincas na tela do equipamento.....	97
Figura 62-	Empena vertical da aeronave Xavante.....	99
Figura 63-	Equipamento, sonda e padrão no ensaio da empena vertical.....	99
Figura 64-	Sonda <i>array</i> com <i>encoder</i> , utilizada para o ensaio.....	100
Figura 65-	Equipamento <i>phased array</i> com a indicação dos rebites.....	101
Figura 66-	Empena do foguete VSB 30.....	102
Figura 67-	Ensaio convencional na empena do foguete, com as trincas.....	103
Figura 68-	Ensaio <i>phased array</i> na empena do foguete.....	103
Figura 69-	Processo de solda por junção.....	104
Figura 70-	Solda por junção (FSW).....	105
Figura 71-	Corpo de prova FSW com as descontinuidades.....	106
Figura 72-	Indicação das descontinuidades na tela do equipamento.....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resistividade e condutividade dos metais e ligas.....	32
Tabela 2	Classificação dos valores da frequência.....	47
Tabela 3	Valores da frequência em função dos tipos de materiais.....	47
Tabela 4	Materiais e ligas dos corpos de prova.....	78
Tabela 5	Composição química e tratamento térmico.....	78
Tabela 6	Corpos de prova ensaiados.....	79

## ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaio Não-Destrutivo e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEB	Agência Espacial Brasileira
AMS	<i>Aerospace Material Specification</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASNT	<i>American Society for Nondestructive Testing</i>
CA	Corrente alternada
COMAER	Comando da Aeronáutica
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
ECA	<i>Eddy current array</i>
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
END	Ensaio Não-Destrutivo
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
FSW	<i>Friction stir welding</i>
GE	<i>General Electric</i>
Hp	Campo magnético primário
Hs	Campo magnético secundário
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IFI	Instituto de Fomento e Coordenação Industrial
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

Mol	Quantidade de matéria
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
POD	<i>Probability of detection</i>
R	Resistência elétrica
SI	Sistema Internacional de Unidades
TO	<i>Technical Order</i>
VLS	Veículo Lançador de Satélite
VSB	Veículo de sondagem <i>Booster</i>
XL	Reatância indutiva
ZTA	Zona termicamente afetada
m	Metro
kg	Quilograma
A	Ampere
°C	Graus Celsius
K	Kelvin
B	Indução magnética
H	Intensidade do campo magnético
Z	Impedância
$\rho$	Resistividade
$\Omega$	Ohm
Hz	Hertz
$\sigma$	Sigma
$\delta$	Profundidade
f	Frequência
$\mu$	Permeabilidade magnética

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Justificativa.....	20
1.2	Objetivos.....	20
1.3	Estrutura do trabalho.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	Ensaio não-destrutivo.....	22
2.1.1	Ensaio mais comuns.....	22
2.1.2	Qualificação de pessoal na área de END.....	22
2.2	Ensaio por correntes parasitas.....	24
2.2.1	Histórico.....	24
2.2.2	Fundamento do método.....	25
2.2.2.1	Vantagens do método .....	27
2.2.2.2	Limitações do método.....	28
2.2.3	Variáveis principais do ensaio.....	28
2.2.3.1	Indução.....	28
2.2.3.2	Impedância.....	30
2.2.3.3	Condutividade elétrica.....	31
2.2.3.3.1	Padrões de condutividade.....	32
2.2.3.3.2	Fatores que afetam a condutividade.....	33
2.2.3.3.3	Efeito da condutividade nas correntes parasitas.....	33
2.2.3.4	Permeabilidade magnética.....	34
2.2.3.5	Acoplamento magnético.....	36
2.2.3.5.1	Efeito sonda peça - <i>lift off</i> .....	36
2.2.3.5.2	Fator de enchimento – <i>fill factor</i> .....	38
2.2.3.5.3	Efeito de borda – <i>edge effect</i> .....	39
2.2.3.5.4	Efeito pelicular – <i>skin effect</i> .....	39
2.2.4	Tipos de sondas e bobinas.....	40
2.2.4.1	Classificação das sondas.....	41
2.2.4.2	Bobinas.....	42
2.2.4.3	Arranjo das bobinas.....	43
2.2.5	Seleção da frequência do ensaio.....	45

2.2.6	Instrumentação.....	47
2.2.7	Aplicações do ensaio.....	49
2.2.7.1	Medição de condutividade.....	49
2.2.7.2	Medição de espessura de camadas.....	49
2.2.7.3	Medição de espessura de materiais não-condutores.....	50
2.2.7.4	Diferenciação de materiais.....	50
2.2.7.5	Detecção de descontinuidades.....	50
2.2.7.6	Dureza.....	50
2.2.8	Calibração.....	50
2.2.8.1	Padrões.....	52
2.2.8.2	Considerações sobre os padrões.....	53
2.2.9	Prática do ensaio convencional.....	54
2.2.10	Segurança.....	55
2.2.11	Descontinuidades detectáveis pelo ensaio.....	55
2.2.11.1	Aparência das descontinuidades.....	57
2.2.11.2	Tipos de descontinuidades detectáveis pelo ensaio.....	57
2.2.12	Aplicações do ensaio em aeronaves.....	61
2.2.12.1	Ensaio em estruturas de aeronaves.....	61
2.2.12.2	Ensaio em componentes de motores aeronáuticos.....	61
2.3	Técnica por <i>phased array</i> .....	62
2.3.1	Efeito do multiplexador.....	63
2.3.2	Utilização de padrões.....	64
2.3.3	Vantagens da técnica por <i>phased array</i> .....	66
2.3.4	Equipamentos.....	67
2.3.5	Imagem <i>C Scan</i> .....	69
2.3.6	Tipos de sondas.....	71
2.3.7	Probabilidade de detecção de descontinuidades.....	72
2.3.8	Registros.....	73
3	PROPOSIÇÃO.....	75
3.1	Análise de custo e viabilidade econômica do ensaio.....	76
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	77
4.1	Planejamento experimental.....	77



4.2	Materiais.....	78
4.3	Corpos de prova.....	79
4.3.1	Descrição das peças e materiais.....	79
4.3.2	Descontinuidades artificiais.....	81
4.4	Métodos.....	82
4.4.1	Técnica convencional.....	82
4.4.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
5.1	Experiência 1 – Fuselagem de aeronave.....	83
5.1.1	Técnica convencional.....	83
5.1.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	84
5.1.3	Comparação das técnicas.....	85
5.2	Experiência 2 – Amostra de grafite da tubeira do VLS.....	85
5.2.1	Técnica convencional.....	86
5.2.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	86
5.2.3	Comparação das técnicas.....	87
5.3	Experiência 3 – Adaptador do motor aeronáutico Lycoming.....	87
5.3.1	Técnica convencional.....	88
5.3.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	89
5.3.3	Comparação das técnicas.....	93
5.4	Experiência 4 – Garfo do trem de pouso.....	93
5.4.1	Técnica convencional.....	94
5.4.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	96
5.4.3	Comparação das técnicas.....	98
5.5	Experiência 5 – Empena vertical da aeronave Xavante.....	98
5.5.1	Técnica convencional.....	99
5.5.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	100
5.5.3	Comparação das técnicas.....	101
5.6	Experiência 6 – Empena do foguete VSB 30.....	101
5.6.1	Técnica convencional.....	102
5.6.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	103
5.6.3	Comparação das técnicas.....	104

5.7	Experiência 7 – Solda por junção.....	104
5.7.1	Técnica convencional.....	105
5.7.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	106
5.7.3	Comparação das técnicas.....	107
5.8	Resultados.....	107
5.8.1	Técnica convencional.....	108
5.8.2	Técnica por <i>phased array</i> .....	108
6	CONCLUSÕES.....	109
	REFERÊNCIAS.....	111

## 1 INTRODUÇÃO

Os ensaios não-destrutivos (END) foram desenvolvidos no final do século XVII. No Congresso Mundial de END, realizado no ano de 2000 em Roma, Itália, foi estabelecido o ano de 1900 como sendo o marco inicial dos ensaios não-destrutivos, e nesse evento foi comemorado o primeiro centenário.

Os END são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos, sem afetar o funcionamento normal e sem danificá-los, sendo executados em todas as etapas de fabricação, montagem e manutenção.

Constituem uma das principais ferramentas empregadas no controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para a garantia da qualidade, redução de custos e para o aumento da confiabilidade da inspeção (ABENDI, 2009).

A manutenção aeronáutica é uma atividade que possui características peculiares. As técnicas de manutenção preventiva, corretiva e de modificações e reparos em aeronaves têm evoluído com o tempo, tornando-se cada vez mais complexas, principalmente na manutenção de motores. Os ensaios não-destrutivos têm evoluído no mercado aeronáutico mundial de forma sistemática, sendo que não há hoje uma peça constante de uma aeronave e que possa afetar a segurança de voo, sem um ensaio (ANAC, 2005).

O ensaio por correntes parasitas inicialmente foi pouco utilizado, se comparado a outros ensaios, tais como radiografia industrial ou líquido penetrante. Devido à necessidade cada vez maior de não permitir que uma peça contenha descontinuidades prejudiciais ao seu funcionamento, foram desenvolvidos equipamentos para atender as necessidades de todos os processos de fabricação e manutenção, inclusive com tamanhos reduzidos para o trabalho de campo.

Hoje, o ensaio é amplamente utilizado, principalmente em oficinas de manutenção de aeronaves e motores, devido à facilidade de operação, mas apresenta limitações, como o tempo elevado de ensaio para peças maiores, tendo em vista que as sondas de varredura são pontuais, e é necessária uma grande habilidade do operador, devido ao fato que os equipamentos não têm disponibilidade de registro.

A técnica por *phased array* (arranjo de fases), inicialmente utilizada para antenas e para o ensaio por ultrassom, foi também desenvolvida para ser aplicada ao ensaio por correntes

parasitas. Novas sondas foram desenvolvidas, proporcionando maior velocidade de varredura e possibilidade de registro do ensaio.

O ensaio de tubos com costura, durante o processo de fabricação é apenas uma das grandes aplicações do método, principalmente com equipamentos automáticos.

Podem ser detectadas descontinuidades de pequeno comprimento, de até 0,5 mm e largura de 0,3 mm.

Com o uso de sondas internas rotativas, a sensibilidade e a resolução do ensaio se apresentam bem maiores.

## 1.1 Justificativa

A técnica de ensaio por *phased array* foi um grande avanço no desenvolvimento do ensaio, que proporcionou maior confiabilidade e rapidez, graças ao desenvolvimento de novas sondas, ao aumento da capacidade de armazenamento de dados, possibilitando a geração de registros e redução enorme no tempo de inspeção, facilitando o trabalho do inspetor e reduzindo o tempo da aeronave em solo.

É necessário saber se esse método pode ser aplicado no setor aeroespacial, de acordo com as normas aplicáveis e se os resultados são confiáveis, iguais ou melhores do que a técnica convencional.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos do ensaio são basicamente garantir a qualidade dos materiais, com o menor custo, fornecer informações sobre as descontinuidades e corrigir o processo de fabricação. Essas descontinuidades podem causar danos muitas vezes irreparáveis, como a queda de uma aeronave (DCTA/IFI, 2006a).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivos da utilização do equipamento por *phased array*:

- 1- Verificar a aplicabilidade do método no setor aeroespacial, em materiais utilizados em aeronaves e foguetes;
- 2- Verificar a sensibilidade do ensaio, para detecção de pequenas descontinuidades e o poder de resolução para verificação de descontinuidades muito próximas umas das outras, ou próximas a bordas e a redução do tempo de ensaio;

- 3- Medir o tempo gasto para execução do ensaio convencional e comparar com a nova técnica, que possui sondas de maior dimensão.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho foi organizado para a sua apresentação nos seguintes capítulos:

#### Capítulo 1 – Introdução

Esse capítulo é composto por uma apresentação dos ensaios não-destrutivos, do ensaio por correntes parasitas efetuado pela técnica convencional e da nova técnica *phased array*, as justificativas, objetivos e os resultados esperados.

#### Capítulo 2 – Revisão da literatura

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica da dissertação, necessária para a realização do ensaio por correntes parasitas convencional, a necessidade de qualificação e certificação do pessoal envolvido com o ensaio, o fundamento do método, as variáveis e a teoria da técnica *phased array*.

#### Capítulo 3 – Proposição

É apresentada a proposta de comparação do ensaio convencional com a nova técnica desenvolvida, para verificação da sua utilização no setor aeroespacial e uma análise de custo e viabilidade econômica.

#### Capítulo 4 – Materiais e métodos

São apresentados o planejamento experimental, os materiais utilizados no setor aeronáutico e espacial, os corpos de prova selecionados e a descrição das técnicas de ensaio utilizadas.

#### Capítulo 5 – Resultados e discussão

Neste capítulo é apresentado o resultado das sete experiências efetuadas com as amostras selecionadas de materiais aeronáuticos e espaciais, para execução do ensaio em ambas as técnicas e uma discussão sobre esses resultados.

#### Capítulo 6 – Conclusões

A dissertação é finalizada com as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros, tendo em vista que a técnica apresentada é muito recente e poucos equipamentos estão disponíveis no Brasil.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Ensaaios Não-Destrutivos**

Os ensaios não-destrutivos (END) são parte integrante de um sistema de gestão da qualidade. São ensaios realizados em materiais e peças, sem destruí-las, não interferindo na utilização futura das mesmas.

Em alguns casos, os ensaios podem ser realizados durante o pleno funcionamento dos equipamentos, o que torna a operação bastante ágil e de baixo custo.

Os ensaios devem ser realizados com pessoal treinado, qualificado e certificado. Os ensaios não-destrutivos são largamente utilizados nos setores petroquímico, nuclear, automobilístico, naval, siderúrgico, aeroespacial e na medicina.

Na indústria são realizados para detectar discontinuidades na prevenção de acidentes, principalmente no setor aeroespacial, onde os erros são mais ainda inaceitáveis. Uma discontinuidade como uma trinca, imperceptível a olho nu em uma peça de motor de avião ou na sua estrutura, se não for detectada por meio de um ensaio, pode causar sérios danos.

A seleção do ensaio depende de uma série de fatores, tais como: tipo de material, acabamento, processo de fabricação, discontinuidades esperadas, etc.(DCTA/IFI, 2006a).

#### **2.1.1 END mais comuns**

Os ensaios mais utilizados na área industrial são: líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia industrial e correntes parasitas. Um ensaio complementa o outro, tendo em vista as aplicações inerentes a cada ensaio.

Os ensaios por radiação penetrante e ultrassom são mais utilizados para detecção de discontinuidades internas. Os ensaios por partículas magnéticas e correntes parasitas detectam discontinuidades superficiais e subsuperficiais. O ensaio por líquido penetrante detecta discontinuidades superficiais.

#### **2.1.2 Qualificação de pessoal na área de END**

Todo o pessoal que atua na área de END deve ser formalmente treinado, qualificado e certificado. Os organismos de qualificação existentes no Brasil são o Departamento de

Ciência e Tecnologia Aeroespacial/Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (DCTA/IFI), pertencente ao Comando da Aeronáutica (COMAER) e a Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos e Inspeção - ABENDI.

No setor aeronáutico, a fase de qualificação é aquela em que o profissional, após o treinamento teórico e prático, é submetido a exames, com a finalidade de verificar a habilidade, o conhecimento e a aptidão do candidato. Essa fase é de responsabilidade do DCTA/IFI, elo executivo do sistema de segurança de voo, que coordena a qualificação da totalidade dos profissionais do mercado da aviação civil brasileira (ANAC, 2005).

A norma utilizada para a qualificação de pessoal no setor aeroespacial é a NAS 410, *Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel*, para todos os países que possuem acordo com o *Federal Administration Aviation* (FAA), dos Estados Unidos.

A qualificação pode ser obtida em três níveis:

- Nível 1 - o indivíduo deve ter habilidades e conhecimento para ensaiar e realizar ajustes de equipamento.
- Nível 2 - o indivíduo deve ter habilidades e conhecimento para ajustar e calibrar equipamentos, conduzir ensaios, interpretar e avaliar para aceitação e rejeição.
- Nível 3 - o indivíduo deve ter habilidades e conhecimento para interpretar códigos, normas e outros documentos contratuais que controlem o método, conforme utilizado pelo empregador, ser capaz de selecionar o método e a técnica para um ensaio específico, aprovar procedimentos e ter conhecimento geral de todos os outros métodos de END (NAS 410, 2008).

Após a qualificação, deve ser efetuada a certificação, que é a declaração escrita por um empregador, indicando que um indivíduo atende aos requisitos da norma. A qualificação e a certificação têm a validade de 5 anos (NAS 410, 2008).

Outras normas são utilizadas, tais como a *Recommended Practice SNT – TC – 1A* que, desde 1966, quando foi emitida, é considerada a primeira a padronizar a qualificação de pessoal, e a NBR ISO 9712 – *Nondestructive Testing – Qualification and Certification of Personnel*, utilizada para qualificação e certificação do setor petroquímico, pela Abendi.

A prática recomendada estabelece a estrutura geral para um programa de qualificação e certificação de pessoal. O documento fornece a educação recomendada, experiência e treinamento requeridos para os diferentes métodos de ensaio (SNT - TC-1A, 2006).

## 2.2 Ensaio por Correntes Parasitas.

### 2.2.1 Histórico

O ensaio por correntes parasitas baseia-se na lei de indução eletromagnética desenvolvida por Michael Faraday.

A corrente elétrica é definida como o movimento dos elétrons através de um condutor.

Um condutor é qualquer material capaz de conduzir corrente elétrica. Alguns materiais são condutores, outros não. Isso depende da estrutura dos átomos do material (ASNT-E.T.B., 2006).

O eletromagnetismo surgiu em 1820, quando Orsted (Hans Christian Orsted) conseguiu provar experimentalmente que quando uma corrente elétrica passava ao longo de um fio, surgia um campo magnético ao seu redor (ELETROMAGNETISMO, 2009).

André-Marie Ampere, em 1821, esclareceu o efeito de uma corrente sobre um ímã e o efeito oposto.

Em 1879, outro cientista, chamado D.E. Huges registrou mudanças nas propriedades de uma bobina, quando colocada em contacto com metais de diferentes condutividades e permeabilidades. Dessa forma, foi possível detectar diferenças de condutividade elétrica, de permeabilidade magnética, de temperatura, de tratamento térmico e tamanho dos objetos próximos às bobinas balanceadas e calibradas, usando um fone de ouvido como detector, por meio de um sistema de correntes parasitas.

As correntes parasitas são também chamadas de correntes de *eddy*, por terem a forma de redemoinho, turbilhão, ou correntes de Foucault. Jean Bernard Leon Foucault nasceu em Paris em 1819 e construiu o pêndulo de Foucault, para demonstrar a rotação da Terra. Ele observou que, quando um disco de cobre era colocado entre os pólos de um magneto, era preciso mais força para fazê-lo girar do que quando não havia o magneto, devido ao surgimento de correntes parasitas no interior do metal, produzidas pela variação do fluxo.

Michael Faraday, químico inglês, em 1831, iniciou suas pesquisas argumentando que se uma corrente num fio produzia efeitos magnéticos conforme Ampere havia demonstrado, o inverso poderia ser verdadeiro, ou seja, um efeito magnético poderia produzir uma corrente elétrica. Faraday provou que uma corrente que varia a sua intensidade em função do tempo, ao passar por uma espira, induz uma corrente elétrica numa espira adjacente. Isso é chamado de indução eletromagnética (ASNT-E.T.B., 2006).



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

Em 1926, H.E. Kranz desenvolveu um instrumento de correntes parasitas para medir espessuras de paredes em metais condutores elétricos (ELETROMAGNETISMO, 2009).

Pierre Curie e Jaques Curie anunciaram a descoberta de um importante fenômeno, a piezoeletricidade, que é a eletricidade produzida pela tensão nos cristais. Observaram também que quando um material ferromagnético era aquecido acima de uma dada temperatura, ele perdia suas propriedades magnéticas, que ficou conhecida como temperatura Curie (770° C).

Os primeiros equipamentos comerciais foram desenvolvidos entre 1950 e 1960, por Frederich Forster, para atender inicialmente a indústria aeronáutica e nuclear. Foi introduzido o conceito de análise do plano de impedâncias, amplamente utilizado até hoje (ASNT-E.T.B., 2006).

### **2.2.2 – Fundamento do método**

O ensaio por correntes parasitas é o processo de induzir pequenas correntes elétricas em um material condutor de eletricidade, observando-se as mudanças nos efeitos causados pelas correntes sobre os campos magnéticos.

Quando uma corrente elétrica flui através de um fio, forma um campo magnético ao seu redor. O campo magnético é representado pelas linhas de força magnética. A direção do campo magnético ou linhas de força ao redor do fio depende da direção do fluxo da corrente através do fio (MIL HDBK 728/2, 1992).

Essa relação direta é chamada de regra da mão direita. Quando uma barra é mantida pela mão direita, a corrente elétrica passará pela barra no sentido longitudinal do dedo polegar, enquanto o campo magnético será formado na direção dos demais dedos, no sentido circular à barra.

O ensaio por correntes parasitas é bastante similar à técnica de aquecimento por indução. Ambas as técnicas dependem do princípio da indução eletromagnética para induzir correntes parasitas numa peça dentro ou nas proximidades de uma ou mais bobinas de indução. O aquecimento é consequência das perdas produzidas pelo fluxo de correntes parasitas na peça (MIL HDBK 728/2, 1992).

Existem algumas diferenças entre ambas as técnicas. Uma delas está nos níveis de potência utilizados. Para a técnica de aquecimento por indução, são utilizadas potências bem mais elevadas do que no ensaio por correntes parasitas. Outra diferença está nos tipos de

bobina. No aquecimento por indução, a bobina possui apenas um campo primário, enquanto que, no ensaio, a bobina é composta pelos campos primário e secundário (BLITZ, 1997).

O ensaio por correntes parasitas é aplicado principalmente na detecção de descontinuidades em materiais ferrosos e não-ferrosos, mas possibilita também a determinação de certas características físicas dos materiais, tais como:

- medição de espessura de camada;
- condutividade elétrica;
- permeabilidade magnética;
- diferenciação de metais quanto à composição química, dureza, microestrutura e tratamento térmico (ABENDI, 2008).

As variações nas características do material produzem uma variação no fluxo de correntes parasitas e como consequência, uma variação do campo secundário ( $H_s$ ), do campo resultante ( $H_p - H_s$ ), da impedância e da tensão induzida na bobina.

A peça a ser ensaiada é colocada dentro de uma bobina, ou em contato com uma sonda, pela qual circula corrente alternada (corrente de excitação). Nas proximidades da bobina, é gerado um campo eletromagnético chamado de campo primário ( $H_p$ ), o qual induz um fluxo de correntes parasitas na peça ensaiada, conforme apresentado na Figura 1.

As correntes parasitas geram um segundo campo eletromagnético, chamado secundário ( $H_s$ ), com sentido contrário ao primário. O campo magnético resultante é igual a  $H_p - H_s = 0$  (DCTA/IFI, 2006a).

A descontinuidade provoca uma distorção do fluxo de correntes parasitas (ASNT-N.T.H.,2004).

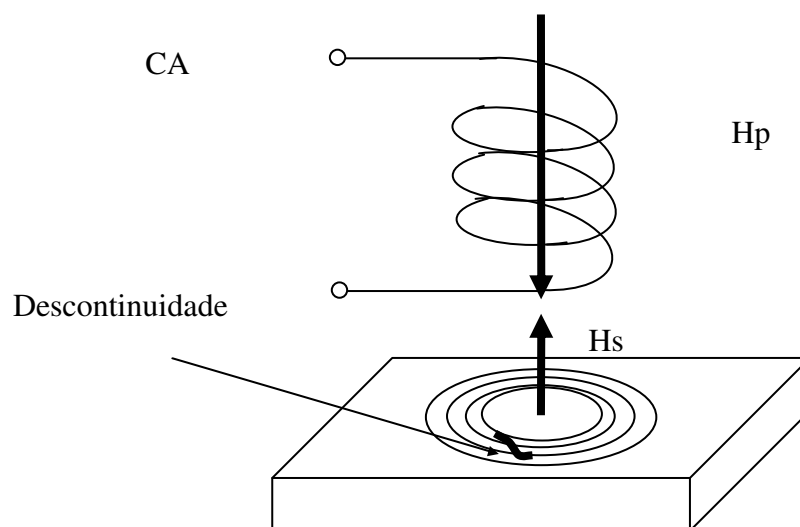


Figura 1 – Correntes parasitas produzidas por uma bobina superficial (ASNT-N.T.H., 2004)

A intensidade do campo  $H_p$  depende da intensidade do campo de excitação primário. A intensidade do campo  $H_s$  depende da condutividade elétrica, da permeabilidade magnética, das características geométricas do material e da frequência da corrente de excitação.

A varredura em uma superfície da peça ou material deve favorecer a detecção das possíveis discontinuidades. A localização das discontinuidades deve estar em um sentido que interrompa o fluxo das correntes parasitas. A Figura 2 apresenta o sentido das discontinuidades que podem ser detectadas pelo ensaio.

Descontinuidades paralelas ao caminho das correntes não causam interrupção e não podem ser detectadas (DCTA/IFI, 2006b).

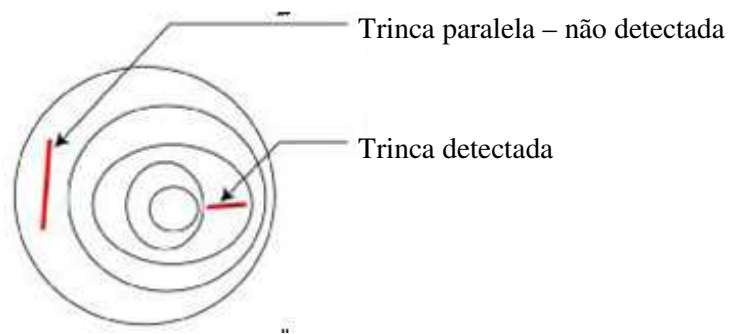


Figura 2 – Sentido das discontinuidades detectadas pelo ensaio (GE, 2009)

### 2.2.2.1 Vantagens do método

- Ótima sensibilidade na detecção de discontinuidades superficiais;
- Usado para metais ferrosos e não-ferrosos;
- Resultados imediatos das discontinuidades;
- Não é necessário contato direto entre a sonda e a superfície da peça;
- Não há necessidade de material de consumo;
- Alto grau de automatização, com maiores velocidades de ensaio;
- Não exige preparação superficial rigorosa;
- Não é necessária a remoção de camadas de tinta.

### 2.2.2.2 Limitações do método

- Aplicável somente em materiais condutores de eletricidade;
- A profundidade de penetração do ensaio é limitada;
- Em várias aplicações, o resultado é qualitativo, não quantitativo;
- De acordo com o tipo de equipamento, o investimento inicial é elevado;
- Para alcançar resultados seguros, é necessária grande habilidade do operador (DCTA/IFI, 2006a).

As ligas de alumínio para utilização aeroespacial são largamente utilizadas, devido ao seu baixo peso, e utilizadas inclusive em estruturas consideradas críticas, que requerem rigoroso controle durante a fabricação. O ensaio por correntes parasitas assegura:

- que cada parte do material é feita de uma liga específica de alumínio;
- que as propriedades resultantes da composição química e do tratamento térmico das ligas são as requeridas para a aplicação específica; e
- que pela condutividade elétrica seja possível verificar propriedades das ligas que tenham sido alteradas como consequência de processos térmicos.

Desde o início dos anos 60, fabricantes de estruturas de aeronaves têm utilizado o ensaio para detecção de pequenas trincas superficiais, com equipamentos de baixa frequência (10 kHz a 1 MHz). Estudos mais recentes provaram que esse ensaio é mais sensível do que o ensaio por Raios X, para detectar trincas de fadiga localizadas em regiões subsuperficiais dos materiais, com baixa frequência (100 Hz a 10 kHz). Hoje são utilizadas frequências mais baixas ainda, em torno de 60 Hz, e os tamanhos das sondas foram enormemente reduzidos (ASNT-N.T.H., 2004).

### 2.2.3 Variáveis principais do ensaio

#### 2.2.3.1 Indução

O campo magnético criado por cada espira do fio em uma bobina induz uma corrente em todas as outras espiras da mesma bobina. Esse efeito é chamado de indução e se opõe à corrente original.

A Figura 3 apresenta uma fonte de corrente alternada, conectada a uma bobina simples. Um voltímetro mede a voltagem aplicada e um amperímetro mede a passagem da corrente por meio da bobina.

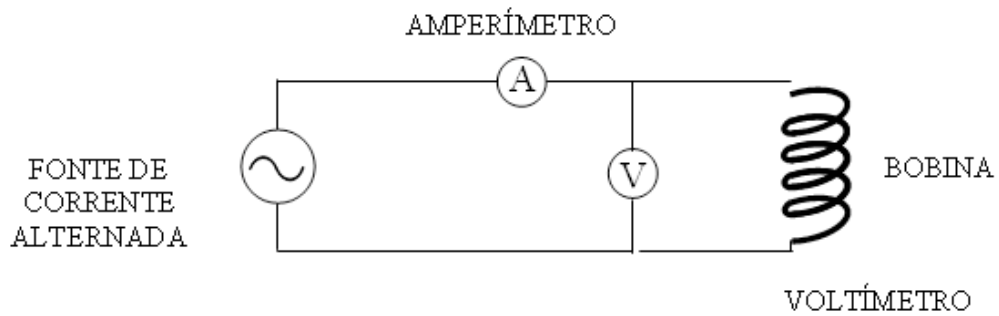


Figura 3 - Circuito elétrico (DCTA/IFI, 2006b)

Se os valores instantâneos de voltagem e corrente são plotados em um gráfico, a corrente tem um atraso no tempo, em comparação com a voltagem. O valor mais alto da corrente não ocorre ao mesmo tempo do valor mais alto da voltagem. Dessa maneira, a indução ou indutância afeta a relação entre voltagem e corrente, conforme apresentado na Figura 4 (HARVEY, 1995).

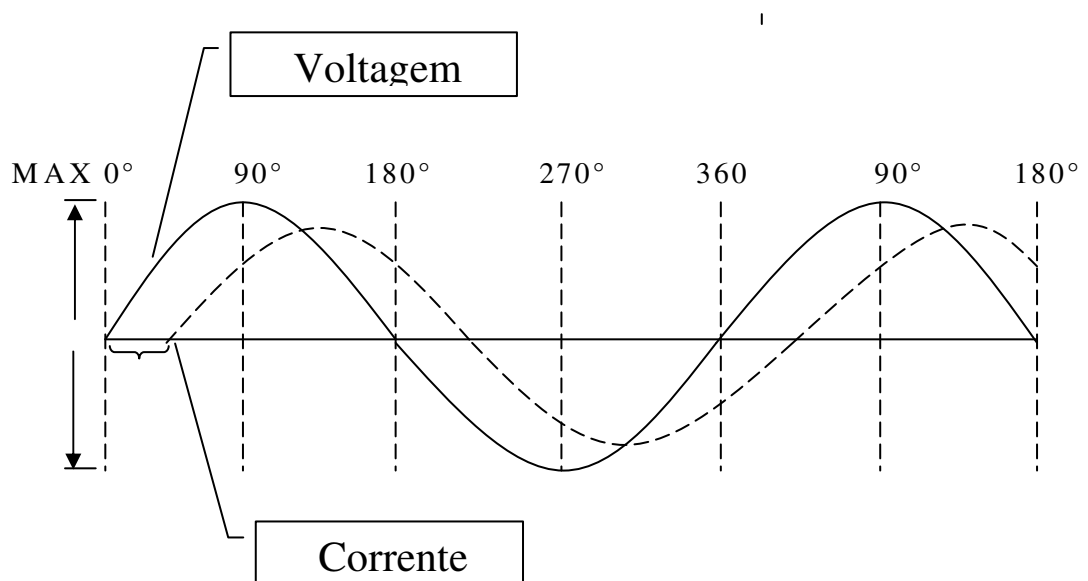


Figura 4 - Plotagem da voltagem (CA) e corrente (MIL HDBK 728/2, 1992)

Essa propriedade é chamada reatância indutiva, que é a oposição a mudanças no fluxo da corrente alternada e é função direta da frequência da mesma. Se a frequência aumenta, a reatância indutiva aumenta e a corrente através da bobina se reduz, diminuindo a intensidade do campo magnético da bobina (ASNT-E.T.B., 2006).

Algumas resistências estão presentes em todos os circuitos. O próprio fio oferece resistência, que limita a quantidade de corrente no circuito. Para fios de dimensões diferentes, a resistência aumenta com o comprimento e diminui quando a seção transversal aumenta. Materiais diferentes com as mesmas dimensões físicas têm resistências diferentes. O recíproco da resistividade é chamado de condutividade. A temperatura afeta diretamente a condutividade. Quando a temperatura diminui, a condutividade diminui (GOLDEMBERG, 1998).

A resistência não é a única variável que afeta o fluxo de corrente. A impedância, designada pela letra Z, é o nome dado à combinação de todas as propriedades que restringem ou limitam o fluxo de corrente através do circuito (BLITZ, 1997).

### 2.2.3.2 Impedância

Em um circuito de corrente alternada, a impedância é a oposição total ao fluxo da corrente através do circuito. A unidade é o ohm, representada pela letra “Z”.

Quando uma corrente alternada circula por uma bobina, há duas oposições ao fluxo de corrente, que são a resistência elétrica do arame (R) e a reatância indutiva (XL), representada na Figura 5.

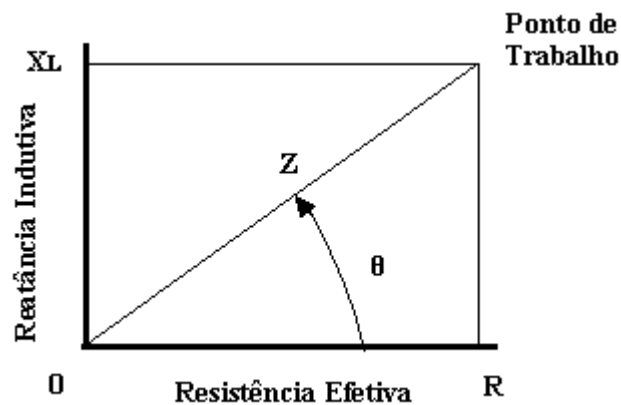


Figura 5 - Relação entre a resistência, reatância e impedância (TECHNICAL ORDER, 2007).

A impedância é uma quantidade vetorial cujos vetores formam um ângulo de  $90^{\circ}$ , formando um retângulo e a diagonal de canto a canto representa a impedância (ASNT-E.T.B., 2006).

Aplicando-se o teorema de Pitágoras, obtêm-se:

$$Z^2 = R^2 + XL^2 \quad \blacktriangleright \quad Z = \sqrt{(R^2 + XL^2)} \quad (1)$$

A letra  $\theta$  (teta) representa o ângulo de fase de  $45^\circ$  do vetor impedância (ASNT-E.T.B., 2006).

### 2.2.3.3 Condutividade elétrica

É a facilidade do material em conduzir corrente elétrica, ou seja, o número de amperes da corrente que vai fluir através do material, quando uma voltagem é aplicada no material. Bons condutores de eletricidade não têm elétrons fortemente ligados às ligações atômicas da estrutura e são relativamente livres para se movimentarem através do material.

Cada material tem uma condutividade elétrica específica, baseada na habilidade dos elétrons em mover-se através das ligações sem obstrução.

Todos os materiais apresentam certa resistência ao fluxo de corrente elétrica. Com base nisso, os materiais podem ser classificados em: isolantes, semicondutores e condutores.

Os materiais que possuem a mais alta resistividade são classificados como isolantes. Os materiais que possuem resistividade intermediária são classificados como semicondutores. Os condutores, que são a maioria dos metais, são de grande interesse no ensaio, pois sua aplicação possibilita a medição da condutividade elétrica, em termos de porcentagem IACS - *International Annealed Copper Standard* (Norma Internacional de Cobre Recozido). Essa norma de condutividade elétrica atribui um valor de 100% IACS à condutividade do cobre recozido puro a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  (ABNT NBR 8859, 2005).

O símbolo para a condutividade é o  $\sigma$  (sigma), e a unidade é expressa em % IACS. Os outros metais e suas ligas são porcentagens desse material de referência.

A resistividade é definida como a habilidade do material de resistir ao fluxo da corrente. A unidade da corrente é expressa em microohm.cm ou ohm.cm. $10^{-6}$ .

A condutividade e a resistividade trabalham em oposição uma à outra (ASNT-E.T.B., 2006).

Na Tabela 1, são indicados os valores da resistividade e da condutividade elétrica em % IACS de diversos metais e ligas.

Diferenças na condutividade de materiais diferentes são detectadas pelo ensaio por correntes parasitas, devido ao efeito que a condutividade do material tem sobre o campo magnético e na excitação da bobina (ASNT-E.T.B., 2006).

Bons condutores incluem o cobre e a prata. Maus condutores incluem o níquel e o aço. Não condutores incluem a madeira e o vidro.

Tabela 1 – Resistividade e condutividade dos metais e ligas (ASNT-N.T.H., 2004)

<b>MATERIAL</b>	<b>RESISTIVIDADE (ohm x cm.10<sup>-6</sup>)</b>	<b>CONDUTIVIDADE (% IACS)</b>
Latão	6.90	25.00
Alumínio (99.9)	2.65	64.94
Alumínio 2024-T4	5.20	30.00
Cobre recozido	1.72	100.00
Ouro	2.46	70.00
Prata	1,6	108,00
Chumbo	20.77	8.30
Magnésio (99%)	4.47	38.60
Aço Inox 316	74.00	2.50
Aço Carbono	20.00	8.6
Ferro puro	9,58	18,00
Bronze recozido	3,92	44,00

### 2.2.3.3.1 Padrões de condutividade

Padrões são utilizados para a verificação da condutividade ou a sua variação nos materiais em ensaio. Todos os padrões são calibrados a uma temperatura de 20<sup>0</sup> C e a uma frequência de 60 kHz. Esses padrões são os normalmente utilizados na indústria aeroespacial.

Os blocos são fornecidos com certificado de calibração e devem ser recalibrados periodicamente.

A Figura 6 apresenta alguns tipos de blocos de referência para verificação de condutividade, do fabricante GE.



Figura 6 – Blocos de referência (GE, 2009)



As aplicações da condutividade são:

- identificação de ligas e verificações;
- verificação do tratamento térmico durante a fabricação;
- detecção de mudanças na composição do material;
- variação dos materiais; e
- medição de condutividade elétrica dos materiais, durante a produção (DCTA/IFI, 2006b).

### 2.2.3.3.2 Fatores que afetam a condutividade:

- composição química;
- tratamento térmico (variação na microestrutura, tamanho de grão, dureza e tensões residuais);
- processos de conformação a frio;
- temperatura (quanto maior a temperatura, menor a condutividade); e
- descontinuidades que provocam a diminuição da condutividade (DCTA/IFI, 2006b).

### 2.2.3.3.3 Efeito da condutividade nas correntes parasitas

A distribuição e a intensidade das correntes parasitas em materiais não-ferromagnéticos são fortemente afetadas pela condutividade, conforme apresentado na Figura 7.

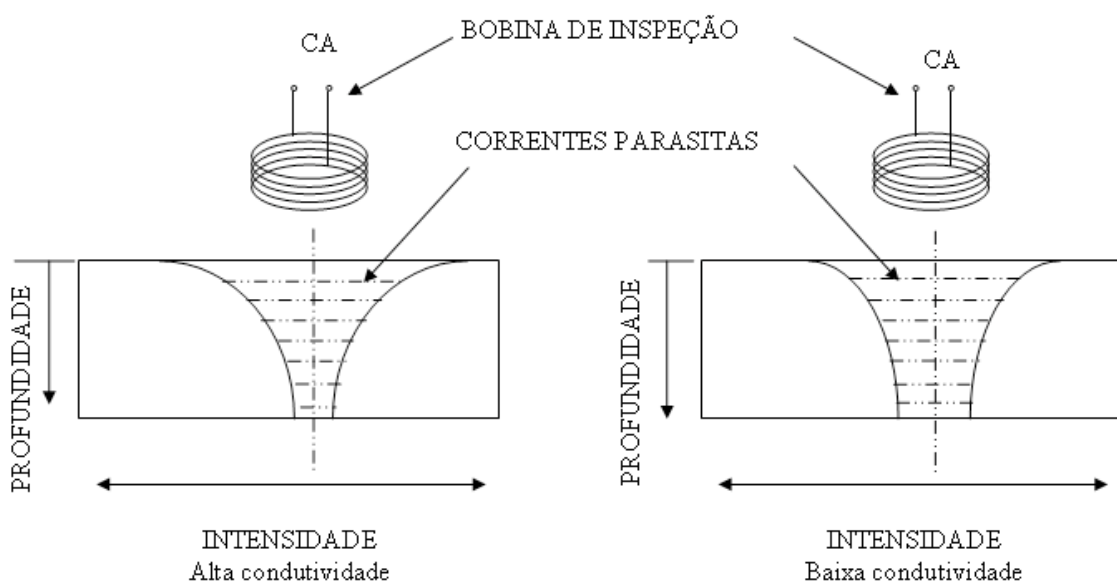


Figura 7 - Relação da condutividade elétrica com a profundidade de penetração (TECHNICAL ORDER, 2007).

Variando o campo magnético de uma intensidade e frequência especificada, o campo penetra no condutor elétrico, gerando correntes parasitas na superfície do condutor. A magnitude da corrente, imediatamente abaixo da superfície, depende da condutividade do material.

Em materiais de boa condutividade, fortes correntes parasitas são geradas na superfície e é formado um forte campo magnético secundário, opondo-se ao campo magnético primário aplicado. Portanto, em bons condutores, fortes correntes são formadas próximas à superfície, mas sua intensidade se reduz rapidamente com a profundidade. Em maus condutores, fracas correntes parasitas são geradas próximas à superfície, mas ocorrem com magnitude apreciável em maiores profundidades (GATINEU, 1996).

#### **2.2.3.4 Permeabilidade magnética**

É a relação entre a indução (quando a alteração simétrica em relação a zero for de caráter cíclico) e a alteração correspondente na força de magnetização.

A permeabilidade, representada pela letra “ $\mu$ ”, é afetada pela composição química, microestrutura e tamanho de grão.

É a capacidade que um material possui em conduzir linhas de fluxo magnético, ou seja, é a facilidade com que o material é magnetizado.

A permeabilidade magnética relativa, representada por  $\mu_r$ , é um número adimensional, que indica quantas vezes a permeabilidade magnética de um material é maior que a do vácuo.

Os materiais são classificados em três tipos: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

O material ferromagnético é o que geralmente exhibe o fenômeno da histerese e saturação, cuja permeabilidade é dependente da força de magnetização (ABNT NBR 8859, 2005).

Os materiais ferromagnéticos, tais como o ferro, níquel, cobalto e suas ligas são fortemente atraídos por um ímã e o valor de  $\mu_r$  é bem superior a 1. O  $\mu_r$  do ferro é  $\cong 100$  (DCTA/IFI, 2006a).

Os materiais paramagnéticos, tais como o alumínio, cromo, magnésio e estanho são os materiais cuja permeabilidade relativa é ligeiramente maior que a unidade, sendo praticamente independente da força de magnetização (ABNT NBR 8859, 2005).

Os materiais paramagnéticos são fracamente atraídos por ímã. A permeabilidade magnética é aproximadamente igual a 1 ( $\mu_r \sim 1$ ) (DCTA/IFI, 2006b).

Os materiais diamagnéticos, tais como o cobre, mercúrio e o zinco, são os materiais cuja permeabilidade relativa é ligeiramente menor que a unidade, sendo praticamente independente da força de magnetização (ABNT NBR 8859, 2005).

Os materiais diamagnéticos são fracamente repelidos por um ímã ( $\mu_r < 1$ ).

A permeabilidade magnética é definida como:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

onde B é a indução magnética ou densidade do fluxo e H é a intensidade do campo magnético.

A Figura 8 apresenta a curva de magnetização com a relação existente entre a intensidade do campo magnético aplicado na peça e a densidade do fluxo induzido nela. Quanto maior a intensidade, maior a densidade, mas até certo ponto.

A velocidade de crescimento diminui, e por mais que aumente H, não há aumento de B, até chegar ao ponto de saturação (DCTA/IFI, 2006b).

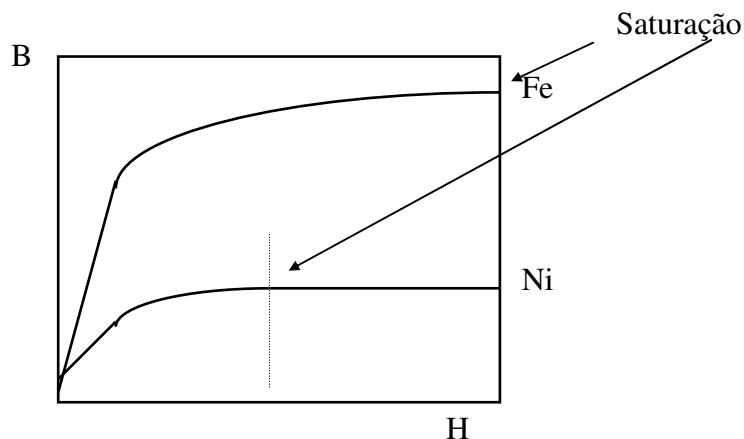


Figura 8 – Curvas de magnetização (MIL HDBK 728/2, 1992)

As correntes parasitas são induzidas por campos magnéticos variáveis. A permeabilidade magnética do material ensaiado influencia fortemente a resposta das correntes parasitas. Conseqüentemente, as técnicas e condições utilizadas para ensaiar materiais magnéticos diferem dos usados para materiais não-magnéticos. Os mesmos fatores que podem influenciar a condutividade elétrica podem influenciar a permeabilidade magnética (MIL HDBK 728/2, 1992).

Quanto maior a permeabilidade magnética, maior o fluxo de correntes parasitas, conforme a Figura 9.

Para o ensaio por Correntes Parasitas, é necessário saturar o material. Para essa finalidade, é aplicada uma corrente contínua ao material, até que o aumento da corrente não acarrete em aumento do campo magnético, estando o material saturado (ASNT-N.T.H., 2004).

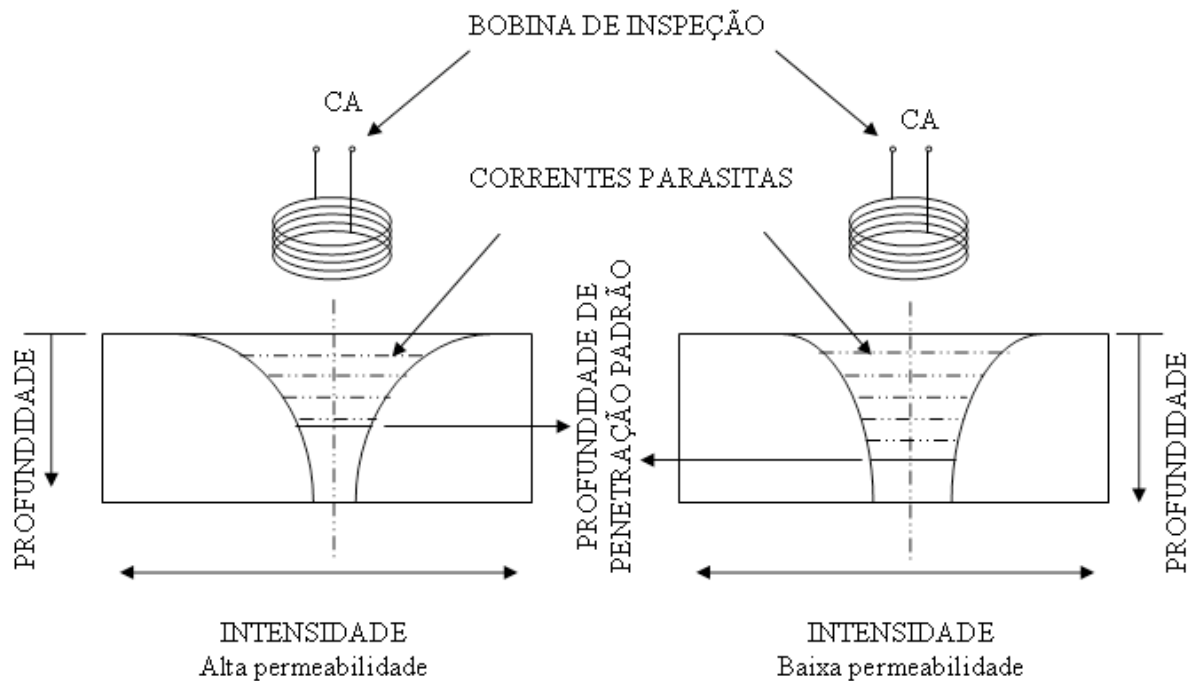


Figura 9 – Relação da permeabilidade magnética com a profundidade de penetração (ASNT-N.T.H., 2004).

### 2.2.3.5 Acoplamento magnético

A peça é acoplada à sonda por meio do campo eletromagnético induzido. A distância sonda-peça (*lift-off*) e o fator de enchimento (*fill-factor*) definem o acoplamento magnético para os casos de ensaios com sondas e bobinas, respectivamente.

#### 2.2.3.5.1 Efeito sonda peça – *lift off*

É o efeito observado devido à mudança no acoplamento entre o objeto ensaiado e a sonda ou bobina, sempre que a distância entre eles é variada.

Quando uma bobina é suspensa no ar, produzirá algum tipo de indicação, mesmo sem material condutor nas proximidades. Essa indicação varia, à medida que a sonda é aproximada

da superfície do material condutor. A maior variação é obtida quando a sonda encosta na peça, conforme apresentado na Figura 10.

Esse efeito é tão pronunciado que pequenas variações no espaçamento (a partir de 20 microns) podem provocar o mascaramento de uma indicação produzida por outra variável de interesse primário (ASNT-N.T.H., 2004).

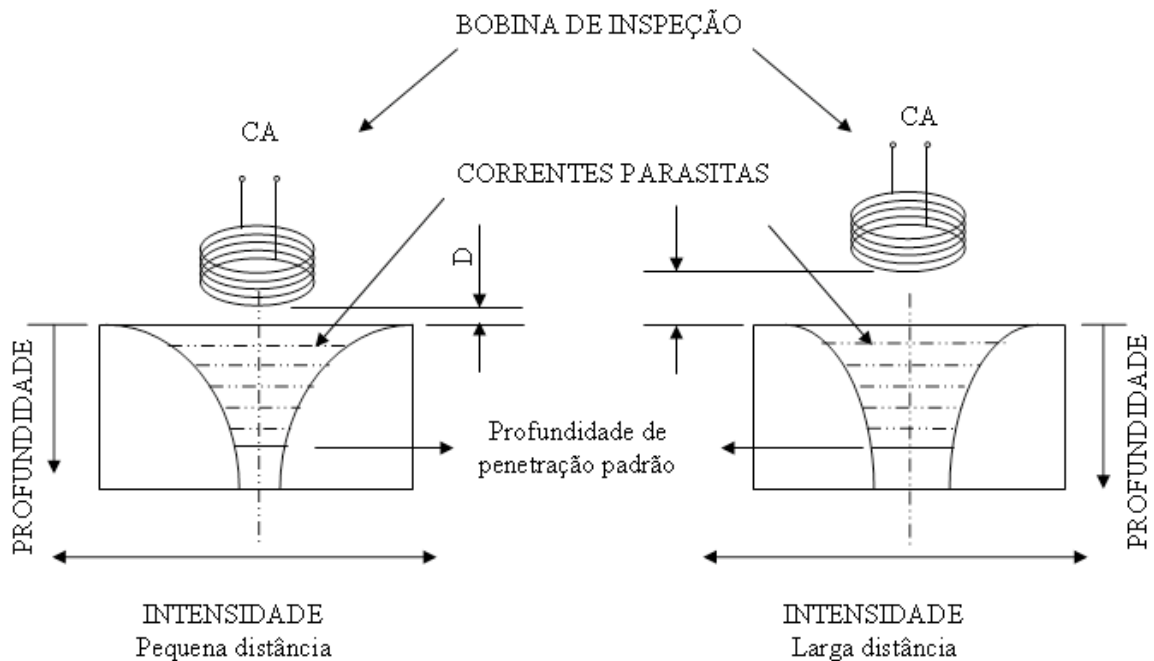


Figura 10 – Comparação da distância sonda peça com a profundidade de penetração (ASNT-N.T.H., 2004)

É necessário manter uma relação constante entre o tamanho e a forma da sonda e da peça. Isso torna muito difícil e complicado o ensaio de peças com geometria complexa. Para eliminar ou compensar esse efeito, alguns equipamentos possuem sondas com molas, para manter a distância constante (DCTA/IFI, 2006b).

Embora o efeito da distância sonda peça possa dificultar o ensaio em determinadas aplicações, pode ser de utilidade para medição de camadas não-condutivas (tintas e camadas anodizadas), sobre metais condutores. Quando a sonda está em contacto com a superfície não condutiva, a espessura é uma medida direta da distância sonda-peça.

A Figura 11 apresenta o efeito *lift off* no diagrama do plano de impedância. Quando a bobina é suspensa no ar, o valor da impedância é do ponto 1, que é igual a zero. À medida que se aproxima da superfície, vai tomando o valor das linhas pontilhadas no sentido de baixo

para cima, até atingir o ponto 2 e a curva cheia que é a condutividade elétrica do material (ASM, 1992).

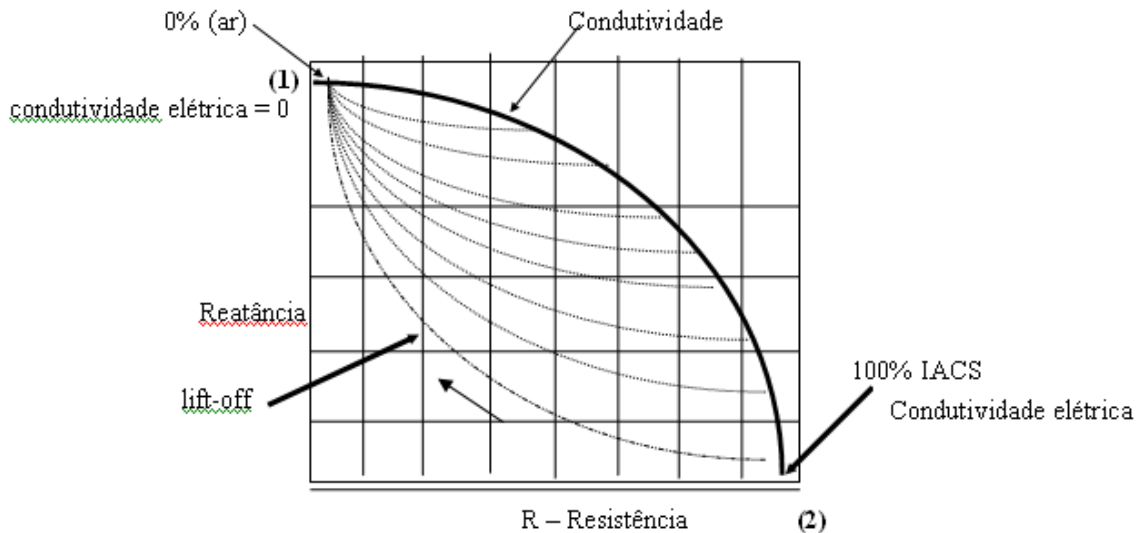


Fig. 11- Efeito *lift off* no diagrama do plano de impedância (ASNT-N.T.H., 2004)

#### 2.2.3.5.2 Fator de enchimento – *fill factor*

É a relação entre a área da seção transversal da peça e a área da seção transversal efetiva do núcleo da bobina envolvente primária (diâmetro externo da forma da bobina, e não o diâmetro interno adjacente à peça) (ABNT NBR 8859, 2005).

Na bobina, o acoplamento magnético é definido pelo fator de enchimento, o qual indica o quanto a peça preenche a bobina. Da mesma maneira que o efeito da distância sonda-peça produz variações na impedância, diversos fatores de enchimento produzem variações pronunciadas na impedância da bobina.

O fator de enchimento é definido por:

$$Nt = \left( \frac{Dem}{Dib} \right)^2 \quad (3)$$

onde Dem é o diâmetro externo do material e Dib é o diâmetro interno da bobina. Para aplicação em bobinas internas, a fórmula é o inverso.

O fator de enchimento pode ser definido como teórico e real.

O fator de enchimento é sempre um número menor do que 1. Quanto mais próximo de 1 for o resultado, mais sensível e preciso é o ensaio.

Para aplicações, tais como diferenciação de materiais quanto à composição química, tratamento térmico ou dureza, podem ser utilizados valores de  $N_t$  bem menores.

O fator de enchimento varia a impedância da bobina e pode ser utilizado como um método para controlar o diâmetro externo dos materiais cilíndricos, tais como barras, tubos ou arames (ASM, 1992).

#### **2.2.3.5.3 Efeito de borda – *edge effect***

No ensaio eletromagnético, é o distúrbio do campo magnético e das correntes parasitas, em virtude da proximidade de uma mudança abrupta na geometria da peça (borda). Esse efeito geralmente provoca um mascaramento das descontinuidades existentes dentro da região (ABNT NBR 8859:2005).

Quando a sonda se aproxima da borda da peça, ocorre uma distorção do fluxo de correntes parasitas como consequência da diferença de permeabilidade e condutividade. Essa distorção produz uma falsa indicação, como se fosse a representação de uma trinca larga ou um furo e prejudica a detecção de outras descontinuidades que podem estar presentes. Quanto menor for o diâmetro da bobina, menor será o efeito de borda (ASNT-E.T.B., 2006).

#### **2.2.3.5.4 Efeito pelicular – *skin effect***

Fenômeno segundo o qual a profundidade de penetração da corrente elétrica em um condutor diminui com o aumento da frequência da corrente. Para frequências muito elevadas, o fluxo de corrente é limitado a uma camada externa e extremamente fina do condutor (ABNT NBR 8859:2005).

A espessura da peça também produz mudanças no fluxo de correntes parasitas. O fluxo é maior na superfície em contato com a sonda e diminui até chegar a zero no interior da peça.

A profundidade de penetração padrão é onde a densidade das correntes parasitas é reduzida a aproximadamente 37% da densidade na superfície.

A profundidade de penetração padrão é uma função da frequência do ensaio e varia de acordo com o material, devido a diferentes condutividades elétricas.

Quanto maior a profundidade de penetração, menor a sensibilidade de detecção de descontinuidades (ASNT-E.T.B., 2006).

A Figura 12 apresenta um gráfico da densidade das correntes parasitas, em função da profundidade de penetração, que é dada em múltiplos de profundidade padrão de penetração.

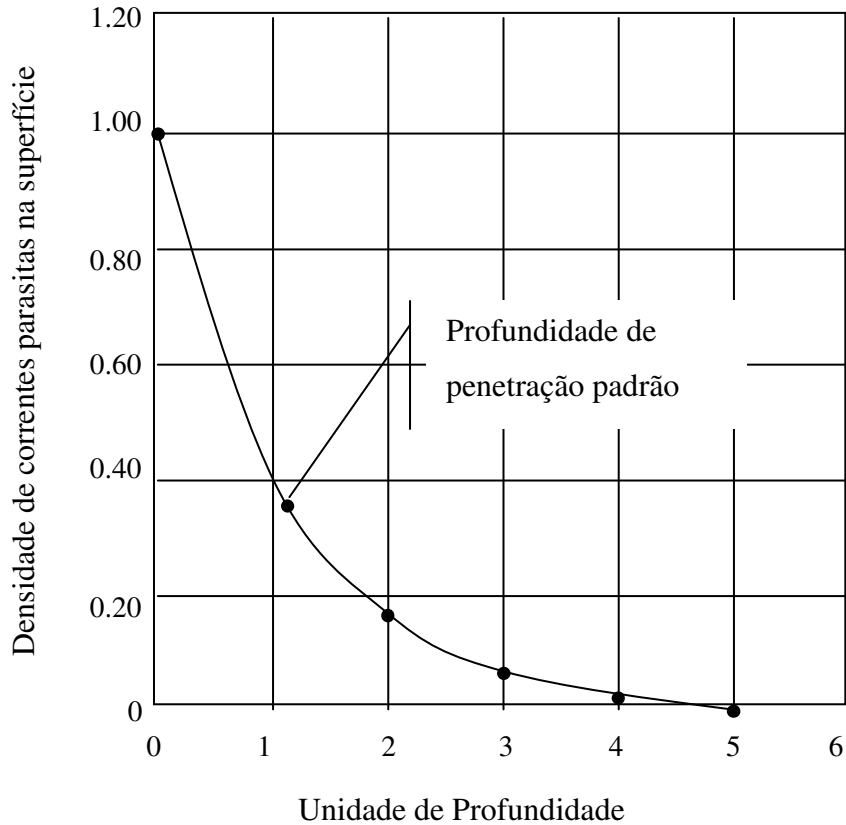


Figura 12 - Profundidade de penetração padrão (ASM, 1992).

#### 2.2.4 – Tipos de sondas e bobinas

O tamanho e a forma das bobinas definem a capacidade de resolução do ensaio. A escolha da bobina é um dos mais importantes fatores para o sucesso do ensaio.

A bobina é formada por uma ou mais espiras de condutor, que produzem um campo magnético, quando este condutor é atravessado por uma corrente elétrica (ABNT NBR 8859:2005).

A sonda é uma pequena bobina ou conjunto de pequenas bobinas, colocadas sobre a superfície a ser examinada, ou próxima a essa superfície. É uma bobina e a respectiva carcaça de proteção. Pode ter diferentes formas geométricas, de acordo com o objeto a ser ensaiado (ABNT NBR 8859, 2005).

A Figura 13 apresenta dois tipos de sondas superficiais, do fabricante Olympus.



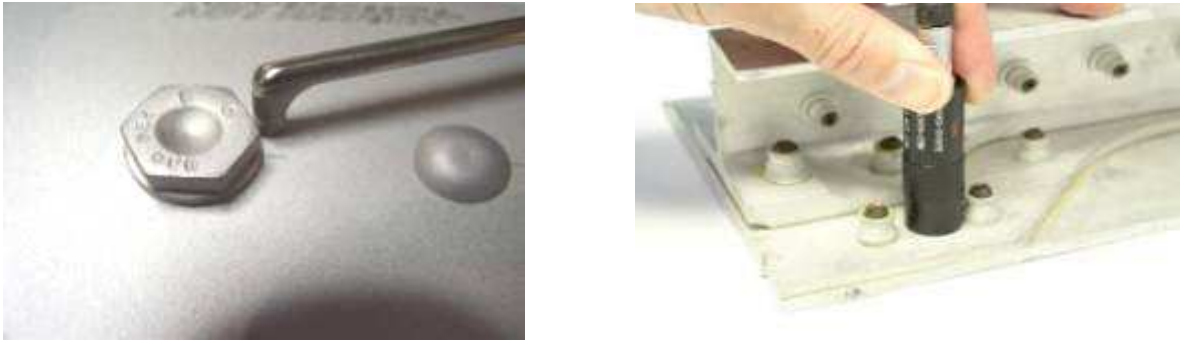


Figura 13 – Tipos de sondas superficiais (OLYMPUS, 2008)

A Figura 14 apresenta a configuração de uma bobina de superfície.

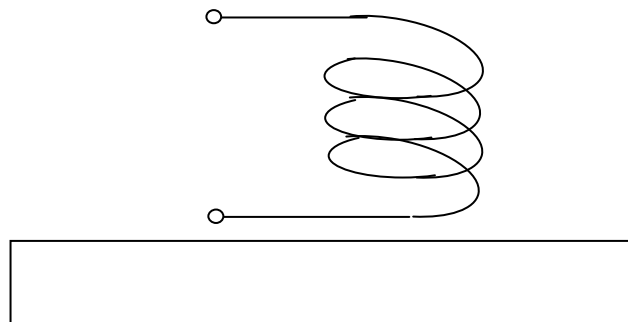


Figura 14 - Bobina de superfície (ASNT-E.T.B., 2006)

#### 2.2.4.1 Classificação das sondas

As sondas ou bobinas são classificadas em internas e externas. A bobina interna é usada para ensaios dos diâmetros internos de materiais, tais como furos ou tubos.

A Figura 15 apresenta a configuração de uma bobina interna.

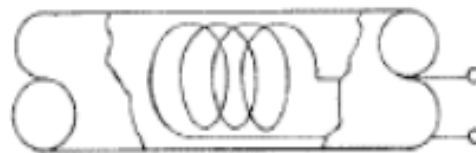


Figura 15 - Bobina interna (TECHNICAL ORDER, 2007)

Pode ser inserida no interior do tubo, para verificação de descontinuidades e variações de espessura. Essa bobina induz correntes que envolvem a superfície interna do tubo ao redor da bobina. Para furos são utilizadas bobinas rotativas manuais ou automáticas.

A bobina externa, também chamada de envolvente ou circunferencial, é usada para a verificação das superfícies externas dos materiais que estão envolvidos pela bobina. A Figura 16 apresenta a configuração de uma bobina externa.

A bobina é usada manualmente para superfícies planas e para o ensaio automático de material cilíndrico.

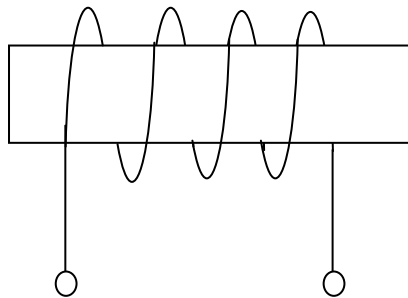


Figura 16 - Bobina externa (ASNT-E.T.B., 2006)

Para material cilíndrico a sonda tem maior sensibilidade, mas limita a velocidade do ensaio. Pode ser necessária a utilização de duas ou mais sondas para um dado ensaio.

As bobinas externas apresentam maior sensibilidade quando a descontinuidade é longitudinal, perpendicular ao fluxo de correntes parasitas. No processo de fabricação de barras, tubos e arames, a maioria das descontinuidades é longitudinal.

Quando desejamos detectar descontinuidades transversais planas, devemos usar uma sonda rotativa. Nesse caso, só podem ser detectadas descontinuidades superficiais (ASNT-E.T.B., 2006).

#### **2.2.4.2. Bobinas**

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

Podem ser utilizadas na diferenciação de materiais quanto à composição química, dureza, tratamento térmico, etc..

Nesse caso, podem ser usadas uma ou duas bobinas. Para duas bobinas, uma envolve o padrão ou a peça de referência e a outra o material.

As bobinas duplas possuem dois enrolamentos, o primário, onde circula a corrente de excitação, e o secundário, que capta a mudança no fluxo de correntes parasitas no material.

O enrolamento secundário fica sempre mais próximo à superfície do material. Para bobinas externas, o primário é enrolado sobre o secundário. Para internas, o secundário é enrolado sobre o primário (DCTA/IFI, 2006b).

### 2.2.4.3 Arranjo das bobinas

As bobinas simples e duplas podem ser absolutas ou diferenciais.

A Figura 17 apresenta as configurações das bobinas simples absoluta e diferencial, com a passagem de uma corrente alternada.

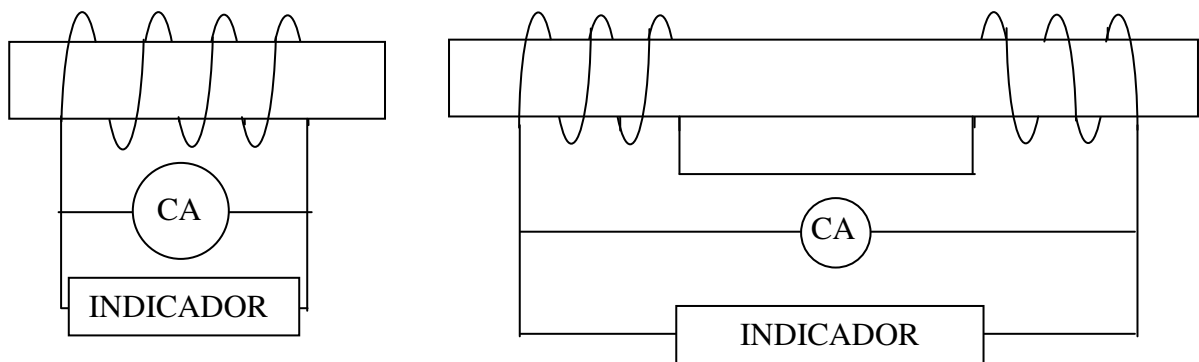


Figura 17 – Bobinas simples absoluta e diferencial (TECHNICAL ORDER, 2007).

As bobinas absolutas respondem a todas as propriedades elétricas ou magnéticas, ou ambas, detectadas de uma região da peça, através de um ensaio eletromagnético, sem comparação com outra seção da peça, ou com outra peça (ABNT NBR 8859, 2005).

As absolutas são as mais simples disponíveis e mais largamente utilizadas. São usadas na diferenciação de material (composição química, dureza, tratamento térmico, etc.), conforme apresentada na Figura 18. Não são indicadas para detecção de descontinuidades, por serem sensíveis a variações localizadas.

As bobinas diferenciais eliminam esse problema. Detectam mudanças na impedância do material e eliminam o problema de sensibilidade a variações. O secundário tem dois enrolamentos em série e em oposição que comparam duas seções do material. Se ambas as seções apresentam as mesmas características, as impedâncias serão iguais, e a saída é zero. Se existir uma diferença ou descontinuidade numa das seções, haverá diferença de impedância e indicação do equipamento (TECHNICAL ORDER, 2007).

As bobinas diferenciais são duas ou mais bobinas conectadas eletricamente em oposição de série, de modo que qualquer condição elétrica ou magnética, ou ambas, que não sejam comuns às áreas da peça que estiverem sendo examinadas, ou entre um corpo de prova e um padrão, provoquem um desbalanceamento do sistema e, por consequência, produzam uma indicação (ABNT NBR 8859, 2005).

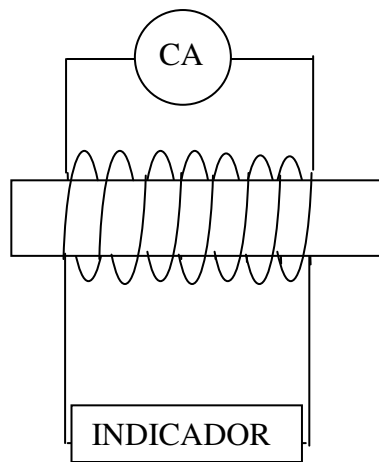


Figura – 18 Bobina dupla absoluta (TECHNICAL ORDER, 2007)

A Figura 19 apresenta a configuração de uma bobina dupla diferencial.

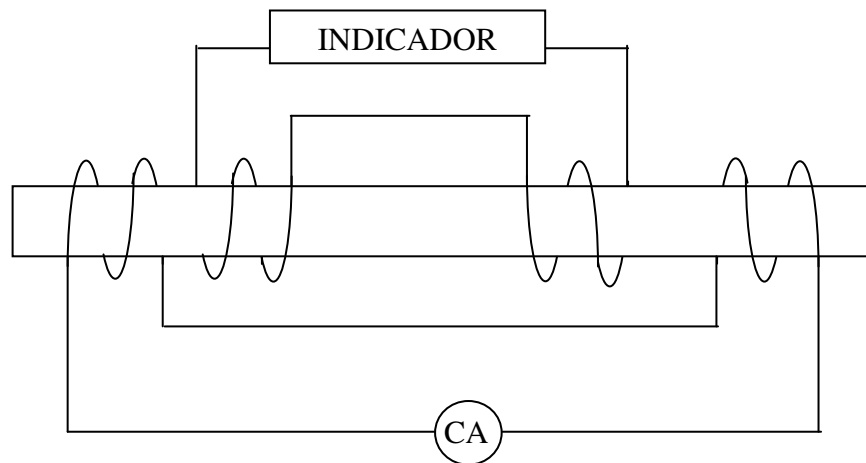


Figura 19 – Bobina dupla diferencial (TECHNICAL ORDER, 2007)

Se existir uma diferença ou descontinuidade numa das seções, haverá diferença de impedância e conseqüente indicação no equipamento.

A Figura 20 apresenta a ilustração de uma bobina dupla diferencial, utilizada juntamente com um padrão para inspeção.

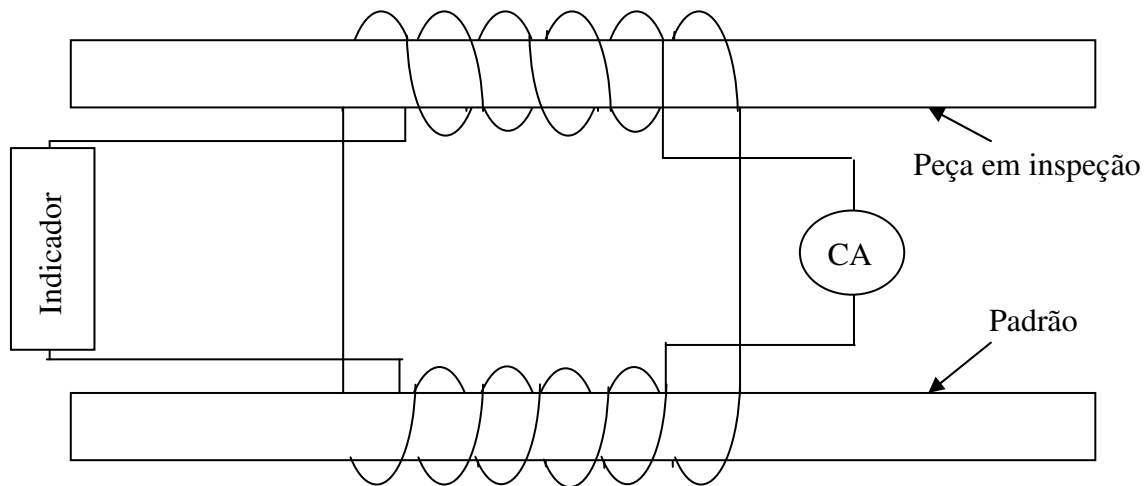


Figura 20 – Bobina dupla diferencial e padrão (TECHNICAL ORDER, 2007)

### 2.2.5 Seleção da frequência do ensaio

A frequência de uma corrente alternada é definida pelo número de ciclos da corrente que ocorre em um segundo. A sua unidade é o hertz (ASNT E.T. B, 2006).

A variação do campo magnético é a mesma da corrente alternada na bobina. A magnitude das correntes induzidas na superfície da peça cresce na proporção da variação da frequência do campo.

Quanto maior for a frequência, maior é a intensidade das correntes na superfície e menor é a profundidade de penetração no material.

A Figura 21 apresenta a relação da frequência com a profundidade de penetração. As frequências usualmente utilizadas estão situadas na faixa de 100 Hz a 6 MHz.

A seleção da frequência depende dos seguintes fatores:

- espessura do material;
- profundidade de penetração desejada;
- sensibilidade desejada; e
- tipo de aplicação, para detecção de descontinuidades, diferenciação de materiais, etc (ASNT-N.T.H., 2004).

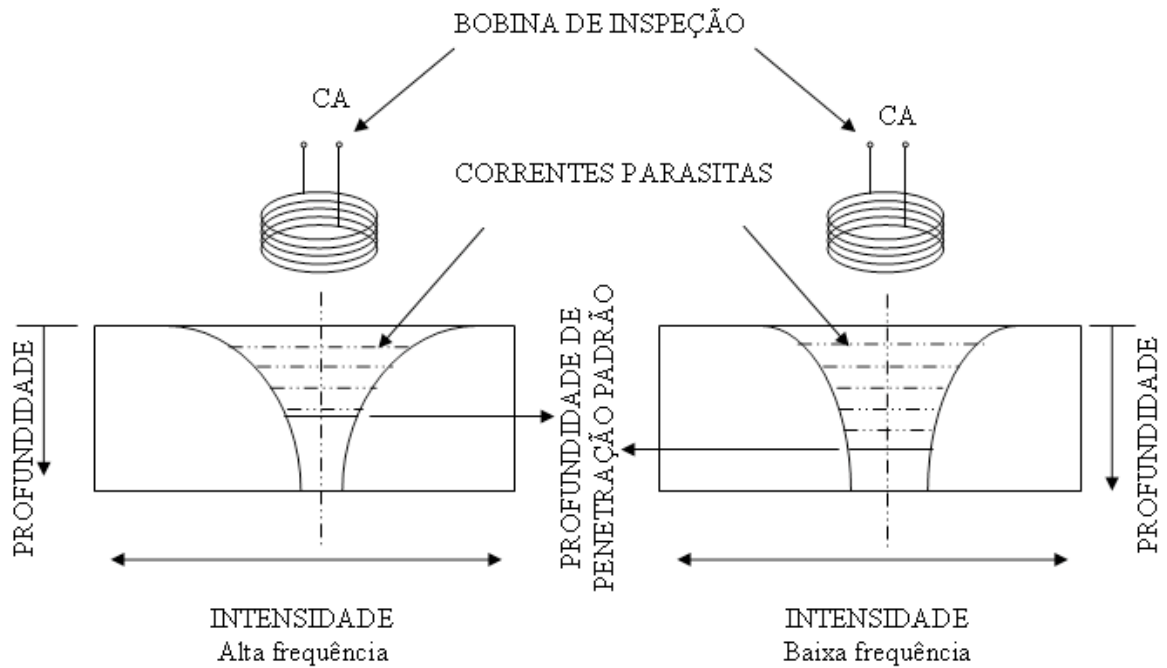


Figura 21 – Relação da frequência com a profundidade de penetração (ASNT-N.T.H., 2004)

A seleção da frequência é sempre um compromisso entre a profundidade de penetração e a sensibilidade desejada. Quanto maior for a frequência, maior a sensibilidade do ensaio para detecção de pequenas trincas superficiais e menor a profundidade de penetração.

A frequência máxima é dada pela fórmula:

$$F \text{ max} = \sqrt{\frac{\rho}{4 \pi^2 \cdot \mu_r \cdot \delta^2}} \quad (4)$$

$\rho$  = resistividade =  $72 \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^{-6}$  (dado de tabela)

$\mu_r = 1$

$\delta$  = profundidade

Para descontinuidades superficiais, devemos utilizar altas frequências.

Alguns equipamentos mais antigos, como os analógicos, não possuem a seleção da frequência por valores, mas por faixas chamadas de baixa, média ou alta. A Tabela 2 apresenta os valores de cada faixa utilizada para o ensaio (ASNT-E.T.B., 2006).

Tabela 2 – Classificação dos valores da frequência (GE, 2009)

Faixa de frequência	Classificação
100 Hz a 20 kHz	Baixa
Acima de 20 kHz a 40 kHz	Média
Acima de 40 kHz	Alta

A frequência a ser utilizada no ensaio é determinada em função do material a ser ensaiado e da localização da descontinuidade, se na superfície, com valores mais altos, ou na subsuperfície, com valores menores.

A Tabela 3 apresenta alguns valores estabelecidos de frequência, de acordo com o tipo de material, localização das descontinuidades e medição de condutividade.

Tabela 3 – Valores da frequência em função dos tipos de materiais (DCTA/IFI, 2006b)

Material ou localização	Frequência
Alumínio	50 a 500 kHz
Aço	500 kHz a 1 MHz
Medição de condutividade	100 kHz
Descontinuidades superficiais	100 kHz a 2 MHz
Descontinuidades subsuperficiais	100 Hz a 50 kHz

### 2.2.6 - Instrumentação

Os equipamentos de correntes parasitas estão disponíveis em diversos modelos e tipos. Todos são similares no princípio, mas variam nas funções e nos acessórios. Todos os equipamentos têm alguns métodos de detecção da mudança da impedância da bobina.

O circuito eletrônico é que varia de equipamento para equipamento. Um circuito básico consiste de uma fonte de corrente alternada que é dirigida à bobina.

Um voltímetro é conectado através da bobina para medir a voltagem. Quando a bobina é posicionada sobre ou próximo a uma peça, a impedância sofre uma mudança. Essa mudança é refletida na leitura do medidor.

A maioria dos equipamentos realiza as funções de acordo com a Figura 22. O gerador fornece a corrente de excitação.

A modulação ou mudança do sinal ocorre no campo eletromagnético, produzido pela sonda e pela peça.

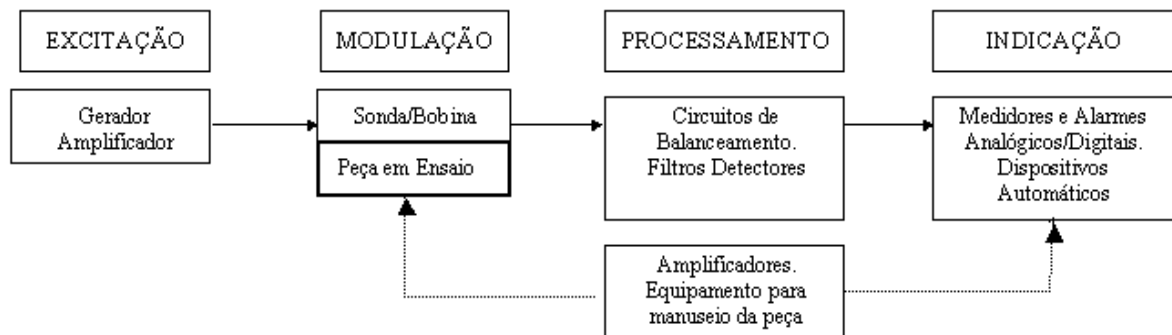


Figura 22 – Funções dos equipamentos de correntes parasitas (ASNT-E.T.B., 2006)

O processamento do sinal é feito por circuitos de compensação ou balanceamento, filtros para melhorar a relação sinal/ruído, amplificadores e circuitos de detecção de amplitude.

O circuito ponte é muito utilizado nos equipamentos portáteis, tais como medidores de condutividade elétrica, detectores de discontinuidades, etc..

As impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$  são iguais e de valor constante. A impedância  $Z_4$  é a sonda. Colocada a sonda sobre a peça ou no padrão, o circuito é balanceado pela impedância variável  $Z_3$ , para se obter uma saída igual a zero.

Balanceado o circuito, conforme apresentado na Figura 23, pode ser iniciado o ensaio com as varreduras sobre a superfície (ASNT-E.T.B., 2006).



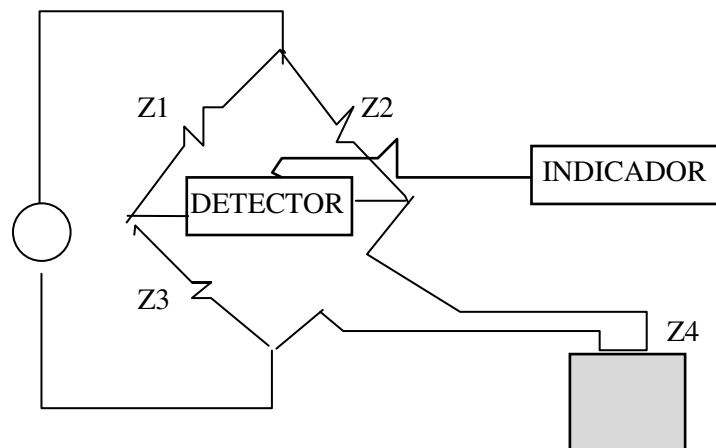


Figura 23 - Circuito ponte com resistência e reatância variáveis (DCTA/IFI, 2006b).

Se a peça for igual ao padrão, a saída será zero, se for diferente (apresentar uma descontinuidade ou outro tipo de material), a saída será diferente de zero (ASNT-E.T.B., 2006).

### 2.2.7 – Aplicações do ensaio

O ensaio por correntes parasitas não se limita à detecção de descontinuidades. Possui aplicações diversas, de grande auxílio nas linhas de produção, descritas a seguir:

#### 2.2.7.1 - Medição de condutividade

Para a medição de condutividade elétrica e diferenciação de materiais não-magnéticos, os equipamentos utilizados são normalmente portáteis, com frequência fixa de 100 kHz.

Esta aplicação é somente para materiais não-magnéticos. Os materiais ferromagnéticos apresentam uma variável que é a permeabilidade magnética, que torna impossível a determinação exata da condutividade.

Como o valor da permeabilidade dos materiais não-magnéticos é igual a 1 e os equipamentos operam com frequência fixa, a profundidade de penetração depende da condutividade elétrica.

#### 2.2.7.2 - Medição de espessura de camadas

Para a medição de camadas não condutivas sobre metais condutores não-magnéticos, é utilizado o efeito *lift off*.

Ex.: Camada de anodização, verniz, plástico sobre alumínio, cobre, latão, etc..

Podem também ser medidas camadas não-magnéticas sobre materiais magnéticos.

Ex.: Camadas de tinta, plásticos, cromo, cádmio, borracha, vernizes, papel, esmalte, etc..

### **2.2.7.3 - Medição de espessura de materiais não-condutores**

O material não-condutor é colocado sobre uma chapa de material condutor. Ao colocar a sonda sobre ele, a espessura será igual à distância da sonda até a superfície do material condutor. Pode ser utilizado o efeito *lift off*, até aproximadamente 50 mm de espessura.

### **2.2.7.4 - Diferenciação de materiais**

Com a utilização de duas sondas, se os materiais são iguais, não há tensão de saída no secundário. Se os materiais são diferentes, a tensão de saída será proporcional à diferença entre ambas.

Com a utilização de uma sonda, é colocada a peça padrão na bobina e posteriormente na peça em ensaio. Pela análise do gráfico, é verificada se há diferença.

### **2.2.7.5 - Detecção de descontinuidades**

Descontinuidades tais como trincas, inclusões e corrosão podem ser detectadas na superfície ou na subsuperfície dos materiais e peças, pelo desbalanceamento do circuito ponte.

### **2.2.7.6 Dureza**

É a verificação da homogeneidade de tratamento térmico. Quando um metal ou liga é submetido a um tratamento térmico, a dureza aumenta ou diminui, dependendo do material, que também afeta a condutividade e a permeabilidade do material.

A variação indesejada do tratamento térmico é detectada pelo ensaio por Correntes Parasitas (DCTA/IFI, 2006b).

### **2.2.8 Calibração**

Calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição de

valores, representados por uma medida materializada de um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas (ABNT NBR 8859, 2005).

A metrologia fornece as técnicas que permitem que grandezas sejam corretamente verificadas. Incorpora-se, como função essencial e indispensável a todo e qualquer sistema que execute medidas. É por esta razão que o claro entendimento aos conceitos de medição e do significado das medidas tem sido constantemente expandidos e aperfeiçoados, incorporando ao domínio dos valores medidos os erros existentes e a incerteza das medidas.

Realizar ensaios não-destrutivos é essencialmente medir. Do ponto de vista técnico e na maioria dos casos, quando realizamos um ensaio utilizando equipamentos que forneçam resultados, estamos medindo e esperamos que a medição envolvida tenha exatidão e que apresente as características de precisão, repetibilidade e reprodutividade necessária para assegurar a qualidade dos mesmos.

A precisão estabelece o quanto um equipamento de ensaio é capaz de reproduzir um valor obtido numa medição, mesmo que ele não esteja correto.

Exatidão é a capacidade que o equipamento de ensaio tem de fornecer um resultado correto ou que, após várias medições de um mesmo ponto, nos fornece um valor médio próximo do real, mesmo apresentando uma baixa precisão.

Tolerância é a diferença entre os valores máximos e mínimos admissíveis para uma medida.

Calibrar um equipamento ou instrumento é comparar, em condições controladas de laboratório e utilizando procedimentos validados, os resultados das medidas apresentadas por este equipamento, com relação aos valores apresentados por padrões de referência de elevada confiabilidade, exclusivamente utilizados para esta finalidade (ROSSI, 2009).

Padrão é a referência física usada como base para comparação ou calibração. Um conceito que tenha sido estabelecido por uma autoridade ou um cliente, ou mediante um acordo, para servir como modelo ou regra na medição da qualidade, ou no estabelecimento de práticas ou procedimentos (ABNT NBR 8859, 2005).

Os padrões devem ser metrologicamente superiores aos instrumentos a calibrar. A mão-de-obra deve ser especializada e treinada para a atividade de calibração. Essa atividade é diferente da atividade de verificar se os equipamentos utilizados estão operando corretamente, antes do início das operações, pela verificação do desempenho operacional. O nome para este caso é ajuste, do inglês *set up*.

A calibração é fruto de uma política que objetiva assegurar resultados confiáveis das medições dos ensaios realizados. Deve ser executada periodicamente sempre que algum

equipamento for submetido à manutenção ou reparo, para garantir a rastreabilidade das medições.

A utilização da metodologia de probabilidade de detecção de descontinuidades (POD) tem sido cada vez mais usada para melhoria nos métodos e na redução de riscos. Equipamentos de ensaios têm influência direta sobre essa probabilidade (ROSSI, 2009).

### 2.2.8.1 Padrões

São utilizados para ajustar a sensibilidade do equipamento para vários parâmetros dos materiais a serem ensaiados, tais como descontinuidades, variação de permeabilidade e outras condições do material.

O desenvolvimento e uso dos padrões de referência requerem uma completa compreensão do ensaio a ser realizado (DCTA/IFI, 2006b).

Os padrões usados para ajustar a sensibilidade devem estar livres de indicações que possam interferir com o ensaio e devem ser da mesma liga e tratamento térmico do produto a ser ensaiado. Devem ter suficiente comprimento para permitir uma varredura adequada das descontinuidades artificiais, que forneçam uma boa resolução de sinal. A Figura 24 apresenta um padrão chamado de bloco de referência, do fabricante *General Electric* (GE, 2009).

As descontinuidades artificiais desenvolvidas para elaboração do padrão podem ser com profundidades variadas, ou passantes. Em alguns casos, uma própria parte da peça pode ser utilizada como padrão. As descontinuidades artificiais superficiais, quando não for especificada a dimensão da descontinuidade no documento de engenharia, devem ser de 5 mm de comprimento por 0,75 mm de profundidade. Outras dimensões são permitidas em função da padronização, desde que a sensibilidade estabelecida durante o ajuste operacional detecte a descontinuidade acima especificada (ABNT NBR 15548, 2008).

Descontinuidades artificiais são descontinuidades de referência, tais como furos, rasgos ou entalhes, introduzidos em um padrão de referência, para proporcionar, com precisão, níveis de sensibilidade reproduzíveis para o equipamento de ensaio eletromagnético (ABNT NBR 8859, 2005).

Blocos de referência são disponibilizados para utilização com os equipamentos de ensaio por correntes parasitas, para a obtenção dos corretos níveis de sensibilidade, durante a calibração e ensaio (GE, 2009).

O padrão do fabricante GE apresenta quatro tipos de materiais de ensaio, ferro, alumínio, titânio e aço inoxidável, com rasgos de 0,2 mm, 0,5 mm e 1,0 mm. O padrão do

fabricante Elotest apresenta os quatro tipos de materiais em um único bloco, com as mesmas dimensões dos rasgos.

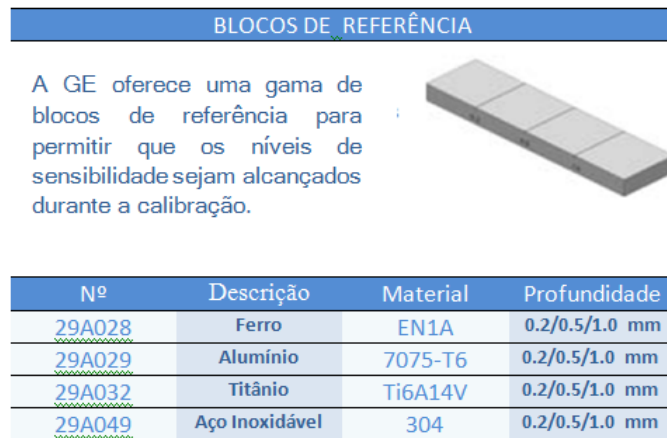


Figura 24 – Padrão de calibração – bloco de referência (GE, 2009)

### 2.2.8.2 Considerações sobre os padrões

As considerações sobre os padrões incluem:

- a- o material a ser ensaiado;
- b- tamanho e forma do material;
- c- tipos de descontinuidades;
- d- meios de produzir descontinuidades artificiais;
- e- indicações relevantes que podem ser encontradas;
- f- capacidades e limitações do equipamento; e
- g- critério para análise das indicações relevantes.

Muitos tipos de descontinuidades artificiais podem ser produzidos. A utilização desses padrões deve corresponder às descontinuidades reais esperadas. Por exemplo: para detecção de descontinuidades transversais, utiliza-se um bloco com entalhe transversal.

Os blocos de referência podem ser construídos para verificação de condutividade, espessura de camada, detecção de descontinuidades, etc..

Os equipamentos de correntes parasitas devem ser verificados muitas vezes durante o ensaio quanto à calibração e devidos ajustes, com os padrões estabelecidos em um procedimento escrito (ASNT-E.T.B., 2006).

Os padrões e os ensaios devem estar de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), que é o sistema oficialmente adotado no Brasil, para expressar as unidades das grandezas e atender aos propósitos das medições.

O SI está fundamentado em sete unidades de base e as unidades derivativas. As unidades de base são consideradas independentes do ponto de vista dimensional e utilizadas para medir as grandezas indicadas que são:

- comprimento – metro (m);
- massa – quilograma (kg);
- tempo – segundo (s);
- intensidade de corrente elétrica – ampere (A);
- temperatura termodinâmica – kelvin (K);
- quantidade de matéria – mol (mol);
- intensidade luminosa – candela (cd).

Algumas unidades derivativas do SI são apresentadas abaixo, utilizadas para os ensaios eletromagnéticos:

- temperatura – t (°C);
- frequência – hertz (Hz);
- resistência elétrica – ohm ( $\Omega$ ) (ABNT NBR ISO 1000, 2006).

Para a correta calibração, é necessário efetuar a repetitividade dos resultados de medição.

A repetitividade é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo objeto de medição, efetuadas sob as mesmas condições de medição (VIM, 2007).

### **2.2.9 Prática do ensaio convencional**

A maioria dos metais utilizados na engenharia são ligas formadas pela adição de um ou mais metais ao metal base, para se conseguir as propriedades desejadas e aumentar a resistência à deformação. Essa adição é usualmente efetuada durante a fundição. A condutividade de um metal pode aumentar ou diminuir de acordo com as ligas formadas.

Alguns elementos de liga têm um efeito maior na condutividade do que outros. Geralmente átomos que diferem muito em tamanho e distribuição dos elétrons comparados ao metal base causam grande diminuição de condutividade.

Tendo em vista que o ensaio por correntes parasitas é aplicado a materiais condutores de eletricidade, deve-se dar especial atenção à composição química das peças a serem ensaiadas.

Todo ensaio por correntes parasitas requer os seguintes parâmetros:

- Um equipamento apropriado para seleção da frequência necessária;
- As sondas superficiais, envoltentes ou de furos, de acordo com os tipos de peças;
- Padrões para calibração e ajuste do equipamento e do ensaio;
- Ter uma idéia da localização, tamanho e tipo das descontinuidades esperadas;
- Um procedimento escrito com o critério de aceitação/rejeição; e
- Um operador qualificado para compreender e interpretar o resultado (TECHNICAL ORDER, 2007).

### **2.2.10 Segurança**

A segurança do pessoal que executa ensaio envolve as normas de segurança da própria organização.

A maioria dos equipamentos de correntes parasitas requer uma fonte externa de energia elétrica. Devem ser observados procedimentos relativos ao manuseio dos cabos, sua manutenção e seu uso. Cabos danificados ou que estejam posicionados em locais de passagem de pessoal podem ocasionar a queda do equipamento, provocando danos que devem ser evitados (MIL HDBK 728/2, 1992).

### **2.2.11 – Descontinuidades detectáveis pelo ensaio**

Qualquer interrupção que altere de forma significativa a continuidade do fluxo das correntes parasitas é chamada de descontinuidade e pode ser detectada pelo ensaio, desde que localizada na superfície ou na subsuperfície do material ensaiado.

Descontinuidade é a interrupção na estrutura física ou configuração de um objeto em ensaio.

Defeito é a descontinuidade cujo tamanho, forma, orientação ou localização é prejudicial ao uso do material, ou que excede o critério de aceitação/rejeição de uma especificação aplicável. Algumas descontinuidades não excedem as especificações e não são consideradas defeitos (ASNT-E.T.B., 2006).

Descontinuidades abertas à superfície são mais facilmente detectadas do que descontinuidades subsuperficiais.

No caso de utilização de sondas internas ou externas, são mais facilmente detectadas descontinuidades superficiais longitudinais e radiais. À medida que aumenta a profundidade das descontinuidades, mais difícil é a detecção. Dependendo do tipo e tamanho da descontinuidade, do tipo de material e do equipamento utilizado, a profundidade máxima pode chegar a 12,7mm da superfície, embora o mais comum seja até 5 mm (ASNT-E.T.B., 2006).

Sensibilidade é a capacidade de encontrar as descontinuidades mais difíceis de serem detectadas, com referência ao tamanho e tipo (TECHNICAL ORDER, 2007).

Para ensaios manuais, a Figura 25 apresenta a tela de um equipamento digital, com as curvas no plano de impedância de um material não magnético, contendo várias descontinuidades.

O ponto A representa a impedância do material sem descontinuidade. A trinca subsuperficial, além de apresentar uma amplitude menor do que a superficial, tem ângulo de fase diferente.

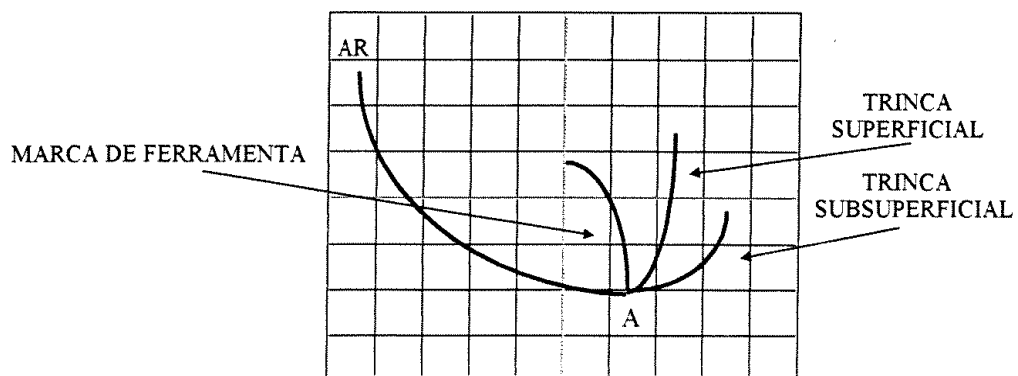


Figura 25 – Representação das curvas na tela do equipamento (DCTA/IFI, 2006b)

A Figura 26 apresenta a tela de um equipamento quando uma sonda passa inicialmente na superfície da peça e por trincas artificiais de diferentes profundidades. A amplitude e a fase de resposta variam de acordo com cada profundidade da trinca (GE, 2009).



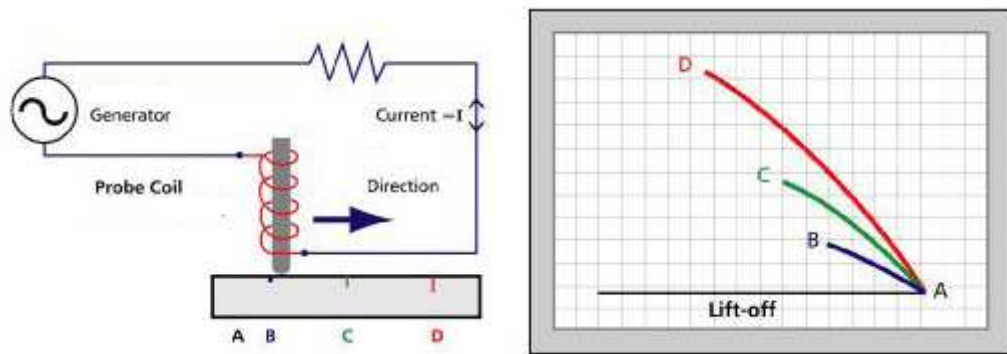


Figura 26 – Respostas de trincas de diferentes profundidades (GE, 2009)

### 2.2.11.1 Aparência das discontinuidades

As discontinuidades são quaisquer variações na homogeneidade de uma peça ou material, tanto em sua estrutura como em sua forma. Os critérios de aceitação são definidos por meio da análise da influência que a discontinuidade terá sobre a utilização do material ou do equipamento, ou por normas especificadas pelo cliente.

As discontinuidades podem ser atribuídas a diferentes causas. Elas podem ocorrer durante o próprio processo de fabricação do material (por exemplo: durante a fundição), durante o processamento (durante a laminação, forjamento, usinagem, etc.), ou durante o uso do equipamento em serviço por aplicação de esforços mecânicos ou corrosão (ABENDI, 2009).

### 2.2.11.2 – Tipos de discontinuidades detectáveis pelo ensaio

#### a) Inclusões

Concentrações de material metálico ou não-metálico estranhos à fusão, tais como gases ou escória, aprisionados durante o processo de soldagem ou fundição. São partículas arredondadas ou alongadas, que podem surgir internamente ou na superfície do material. Não são considerados prejudiciais se relativamente pequenos e bem dispersos e se não estiverem localizados em filetes, furos ou bordas. Se aparecerem em forma de grupamentos, alongadas ou largas, podem ser prejudiciais (MIL HDBK 728/2, 1992).

A Figura 27 apresenta quatro tipos de inclusões de escória, que são de material não-metálico retido na zona fundida de um cordão de solda:

- a) alinhadas

- b) dispersas
- c) isolada
- d) agrupadas

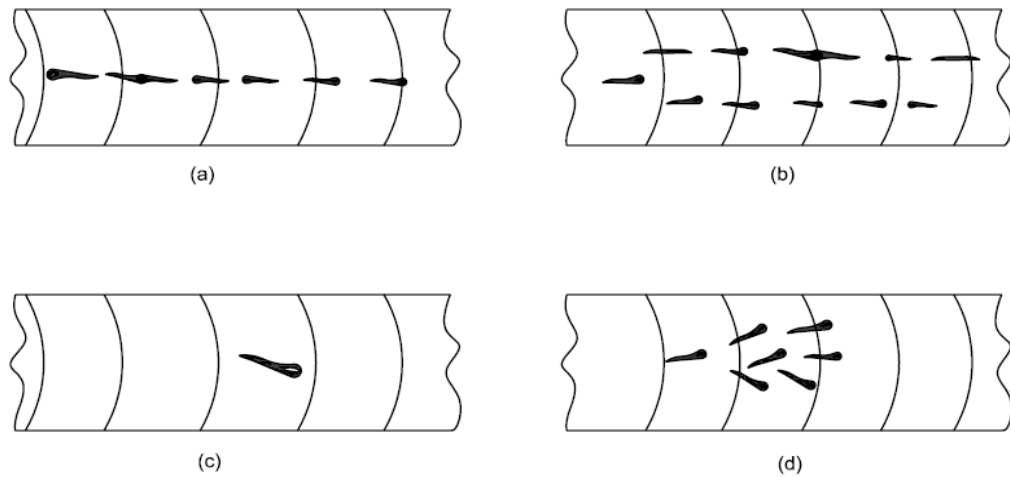


Figura 27 – Tipos de inclusões (ABNT/ONS-58, 2009)

### b) Trincas

São descontinuidades de propagação contínua, produzidas por rupturas no metal sob tensão mecânica ou ação química a quente ou a frio. A Figura 28 apresenta uma trinca na zona termicamente afetada (ZTA), de um cordão de solda.

São caracterizadas por uma extremidade aguda e seu comprimento. Devido ao fato da trinca ser considerada como grave defeito de fabricação ou de serviço, é considerada crítica e deve-se ter uma atenção especial para a sua detecção (MIL HDBK 728/2, 1992).

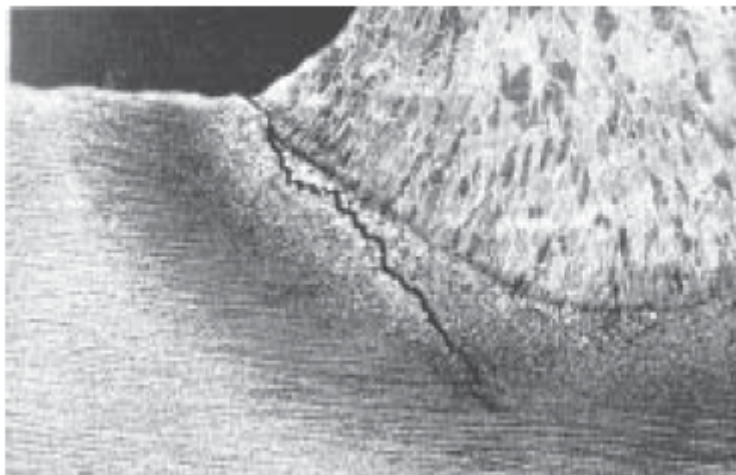


Figura 28 - Trinca localizada na ZTA (SILVA; PARANHOS, 2003)

### c) Trincas por fadiga

São usualmente causadas por cargas cíclicas repetitivas em uma estrutura. Pontos de concentração de tensão como furos ou rasgos são áreas de grande concentração de tensão, onde a trinca por fadiga se inicia. Propagam-se usualmente normal à direção da máxima tensão aplicada (TECHNICAL ORDER, 2007).

### d) Porosidade de gás

Os poros, usualmente de forma redonda, são decorrentes dos gases aprisionados e não eliminados durante o vazamento e solidificação do material nos processos de fundição e soldagem. Os gases tendem a escapar facilmente para a atmosfera enquanto a liga permanecer no estado líquido. Com a solidificação, alguns desses gases ficam aprisionados no interior da peça ou na sua superfície, na forma de bolhas (MIL HDBK 927/2, 1992).

A porosidade é o conjunto de poros distribuídos de maneira uniforme, porém não alinhados. A porosidade pode ocorrer de forma uniformemente distribuída, em grupos, alinhada ou como porosidade vermiforme (NERIS, 2008), conforme apresentado na Figura 29.

- a) Porosidade
- b) Porosidade agrupada
- c) porosidade alinhada

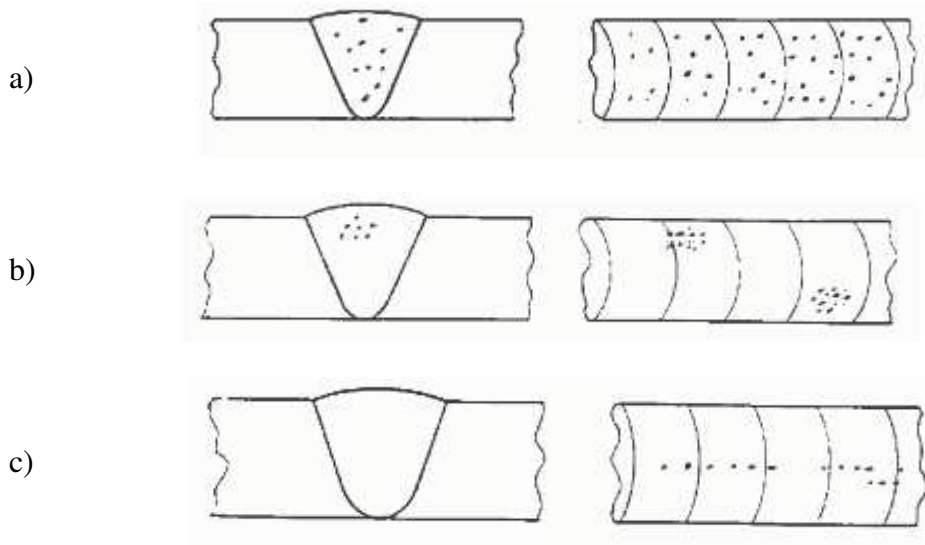


Figura 29 - Tipos de porosidade no cordão de solda (NERIS, 2008)

### e) Corrosão

A corrosão é um tipo de deterioração facilmente encontrada em materiais metálicos. O aço oxida quando em contacto com gases nocivos, íons de hidrogênio ou umidade. Um dos tipos mais normalmente encontrados é a corrosão ao *pitting* (ASNT-E.T.B., 2006).

A corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletrolítica do meio, podendo estar ou não associada a esforços mecânicos. Pode incidir em diversos tipos de materiais, sejam metálicos ou não-metálicos (FERREIRA, 2007).

A Figura 30 apresenta a forma de corrosão entre camadas

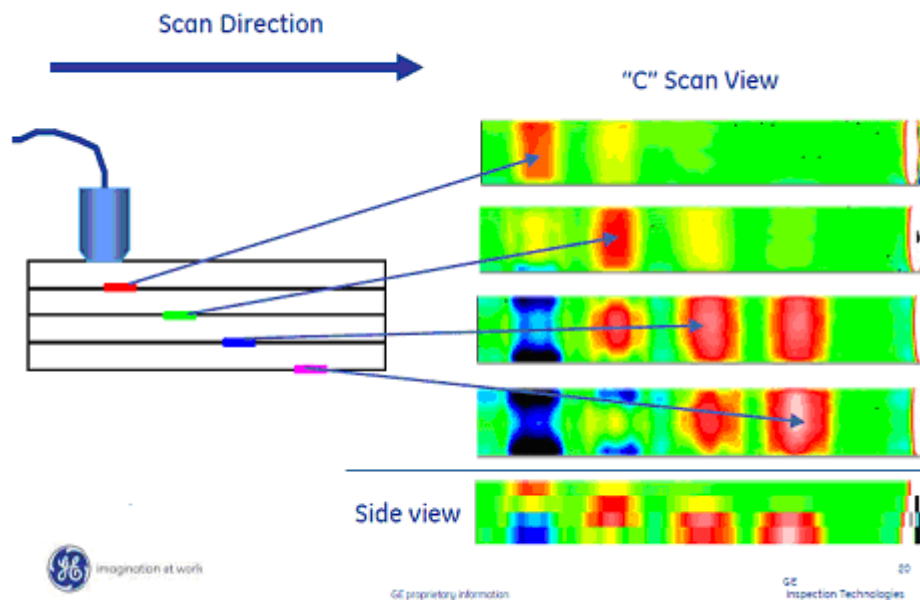


Figura 30 - Imagem de varredura típica de corrosão (GE, 2009)

### f) Corrosão ao *pitting*

Um dos tipos de descontinuidade mais normalmente encontrados é a corrosão ao *pitting*, que significa furo ou orifício. Também é chamada de corrosão alveolar.

As correntes utilizadas na medição do campo de correntes alternadas são mais fortemente perturbadas por descontinuidades planares, entretanto, a corrosão ao *pitting* também causa perturbação ao fluxo da corrente e podem ser detectadas. O grau de perturbação da corrente é muito menor do que de uma trinca de mesma profundidade e tamanho. A Figura 31 apresenta um exemplo desse tipo de corrosão localizada.

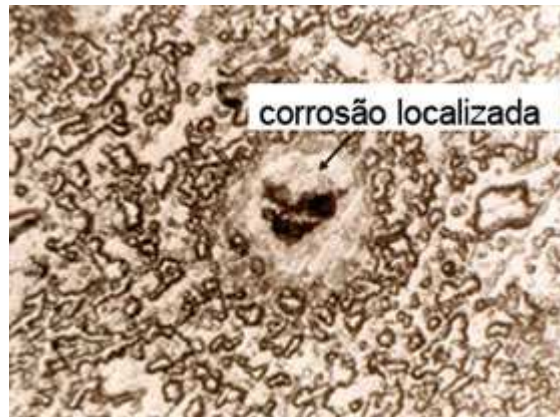


Figura 31 – Corrosão ao *pitting* (CIMM, 2009)

Numa varredura essa descontinuidade tem a aparência de uma trinca rasa (ASNT-E.T.B., 2006)

### **2.2.11 Aplicações do ensaio em aeronaves**

Os ensaios por correntes parasitas são largamente aplicados em estruturas e componentes de motores de aeronaves.

#### **2.2.12.1 Ensaios em estruturas de aeronaves**

Fabricantes de aeronaves e de estruturas de aeronaves utilizam a técnica de correntes parasitas para detecção de trincas, desde o início dos anos 1960. Os equipamentos foram projetados para detectar pequenas trincas superficiais.

Por volta de 1973, estudos comprovaram que o ensaio por correntes parasitas é mais sensível do que o ensaio radiográfico para detectar trincas de fadiga. Durante as manutenções das aeronaves, a detecção de corrosão e sua extensão em estruturas são facilmente verificadas.

#### **2.2.12.2 Ensaios em componentes de motores aeronáuticos**

O ensaio é muito utilizado na detecção de descontinuidades superficiais. A Força Aérea dos Estados Unidos e os fabricantes americanos de motores aeronáuticos utilizam equipamentos automáticos para assegurar que os componentes críticos não contenham descontinuidades rejeitáveis.

Componentes de motores de aeronaves militares são ensaiados na fabricação, para assegurar que as peças estejam livres de pequenas descontinuidades em zonas críticas. Normalmente são ensaiados rotores, palhetas de turbina e tubos sujeitos à corrosão, difíceis de serem verificados por outros ensaios (ASNT-E.T.B., 2006).

### **2.3 Técnica por *phased array***

O ensaio por correntes parasitas foi desenvolvido para aplicação da tecnologia de *phased array*, inicialmente utilizada somente para o ensaio de ultrassom.

Devido à técnica ser a mesma para ambos os ensaios, os equipamentos desenvolvidos são também utilizados para ambos os ensaios, com módulos específicos para ultrassom e para correntes parasitas. Um ensaio complementa o outro, pois o de correntes parasitas detecta descontinuidades superficiais e subsuperficiais e o ultrassom detecta descontinuidades principalmente internas, ultrapassando 600 mm de profundidade.

Nesse caso, o conhecimento operacional, a experiência e a habilidade do operador se tornam fatores primordiais (GE, 2009).

Essa técnica foi inicialmente utilizada pela indústria nuclear, na inspeção de tubulações. Aos poucos, passou a ser utilizada em todas as áreas de fabricação e manutenção, principalmente a petroquímica e aeroespacial. É uma extensão da técnica convencional do ensaio.

Esse rápido interesse na utilização levou ao grande desenvolvimento da técnica e dos equipamentos, para adaptação a todos os tipos de materiais e peças, desde que condutores de eletricidade.

Essa tecnologia permitiu que diversos sensores fossem posicionados lado a lado em uma única sonda. Esses sensores são eletronicamente excitados e alterações das correntes parasitas no material ou na peça são medidas. A aquisição de dados é possível por meio do emprego de multiplexadores, evitando indutância mútua entre os sensores individuais (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007).

A Figura 32 apresenta uma comparação entre uma varredura típica de um equipamento convencional, de um elemento e uma varredura por *phased array*, com uma sonda de 32 elementos.

Podem ser coordenadas eletronicamente múltiplas bobinas de correntes parasitas simultaneamente. Cada bobina individual na sonda produz um sinal relativo à fase e amplitude da estrutura sob ensaio. Esses dados são referenciados para uma posição e tempo e

representados graficamente como uma imagem em *C Scan*. Isso representa uma enorme economia de tempo no ensaio e maior sensibilidade de detecção no resultado.

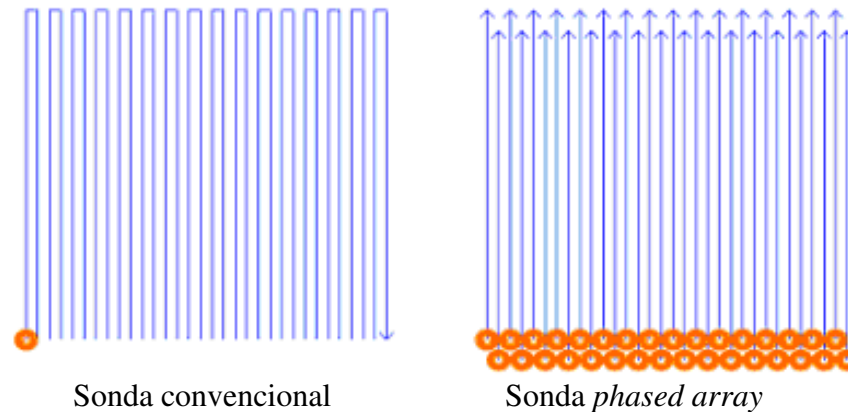


Figura 32 – Comparação da varredura convencional e por *phased array* (GE, 2009)

É largamente utilizada para o ensaio em barras, chapas, tubos, superfícies planas, fuselagem, rodas e estruturas de aeronaves, peças com formas geométricas complexas, inclusive para detecção de descontinuidades em serviço (GE, 2009).

### 2.3.1 Efeito do multiplexador

Um multiplexador ou seletor de dados é um circuito lógico que aceita várias entradas de dados digitais e seleciona apenas uma das entradas, em qualquer instante, para ser a saída. Tem como aplicações principais a seleção de dados, operações sequenciais e encaminhamento de dados.

O multiplexador efetua o processo onde múltiplos sinais de mensagem analógica são combinados em um sinal digital sobre um meio compartilhado, conforme apresentado na Figura 33.

Quando os dados das correntes parasitas *phased array* passam por um multiplexador, as bobinas individuais são excitadas em diferentes tempos, permitindo ao sistema excitar todas as bobinas da sonda, sem excitar quaisquer duas bobinas adjacentes ao mesmo tempo (SILVA, 2008).

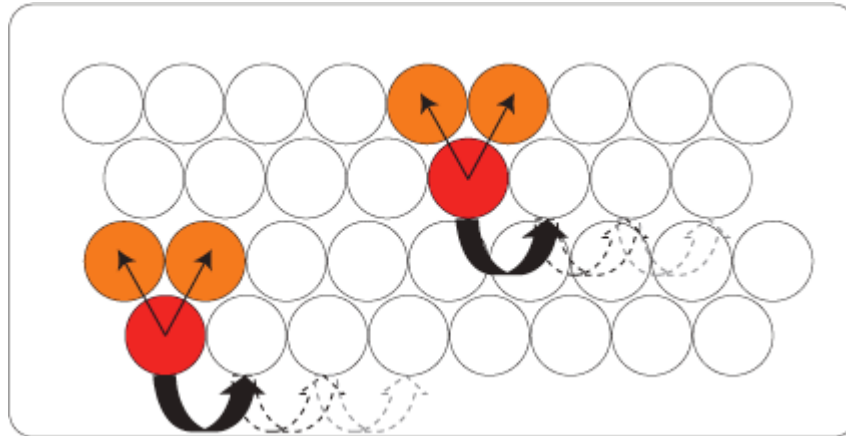


Figura 33 - Efeito do multiplexador (OLYMPUS, 2008)

A indutância mútua, que é o acoplamento magnético entre bobinas próximas, é um efeito indesejável no ensaio, por induzir corrente em uma bobina pela mudança do fluxo magnético da outra bobina próxima. Esse efeito é minimizado com o uso de um sistema de multiplexadores, que cuidadosamente programa o momento exato que cada bobina é excitada para transmitir o seu sinal de correntes parasitas. Os sinais passam por um arranjo para serem visualizados como uma imagem, conforme apresentado na Figura 34.

O multiplexador funciona como um scanner, que permite um aumento na sensibilidade da bobina, por meio da redução da indutância mútua, e uma redução do nível de ruído (OLYMPUS, 2008).



Figura 34 – Sonda com o efeito multiplexador (GE, 2009)

### 2.3.2 Utilização de padrões

Os padrões são fundamentais para o ajuste e a calibração dos equipamentos e estabelecimento da sensibilidade das sondas *phased array*.



A Figura 35 apresenta um padrão de alumínio do fabricante Olympus, RD Tech modelo CD-402040, para verificação do efeito *lift off* (faixa roxa), entalhes (faixas centrais), trincas (rebites superiores) e corrosão (rebites inferiores).

O operador efetua uma varredura no padrão contendo descontinuidades conhecidas, para gerar o mesmo sinal para cada canal. Normalmente a descontinuidade conhecida pode ser um entalhe raso e longo, transversal ao padrão. O operador ajusta o ganho e a rotação de cada canal, de tal modo que a mesma resposta de fase e amplitude seja obtida para todos os canais (GE, 2009).

A calibração também pode ser efetuada na própria peça a ser ensaiada, ou com uma peça que contenha descontinuidades, estabelecida como padrão no procedimento específico.

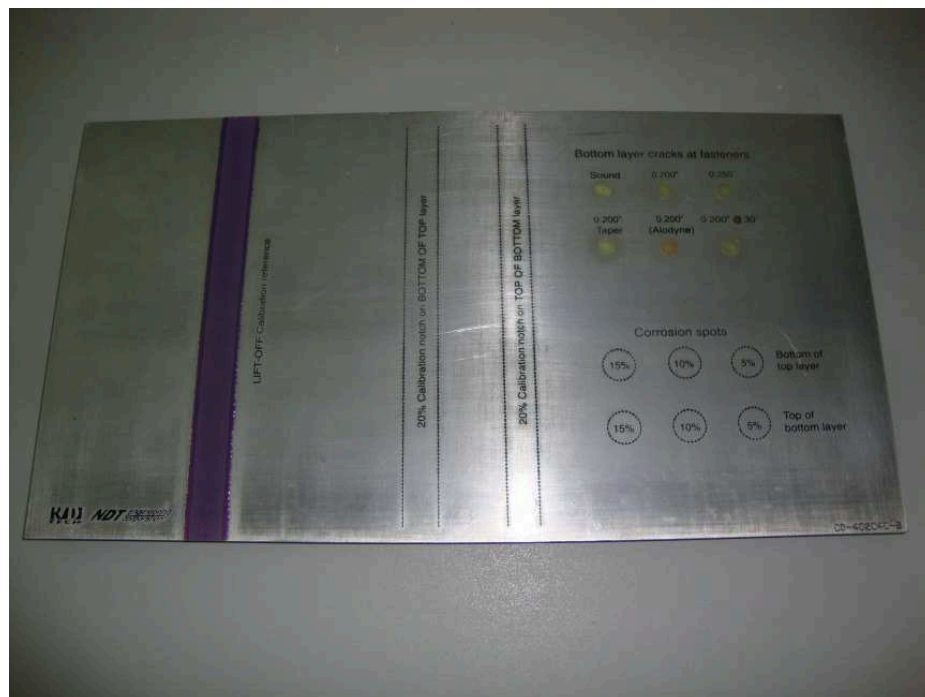


Figura 35 – Padrão de alumínio para calibração do equipamento (OLYMPUS, 2008)

A Figura 36 apresenta a parte inferior do padrão para a detecção de trincas de 6 tamanhos e profundidades diferentes.



Figura 36 – Parte inferior do padrão com as trincas à partir dos rebites (OLYMPUS, 2008)

### 2.3.3 Vantagens da técnica por *phased array*

Essa tecnologia, quando comparada ao ensaio convencional, proporciona os seguintes benefícios:

- redução enorme do tempo de ensaio, com o aumento da velocidade de varredura;
- em uma única varredura é inspecionada uma larga área superficial, reduzindo os custos consideravelmente, conforme apresentado na Figura 37;
- redução na complexidade mecânica dos sistemas de varredura ou de sistemas automatizados;
- uma simples varredura manual é suficiente;
- proporciona visão cartográfica em tempo real da região inspecionada, facilitando a interpretação dos resultados;
- adapta-se bem a peças com forma geométrica complexa;
- melhora a confiabilidade e a probabilidade de detecção de descontinuidades (POD) (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007);
- melhor confiabilidade do ensaio, como resultado da imagem *C Scan*, inclusive para detecção de pequenas descontinuidades como pontos de corrosão;
- a preparação superficial é mínima, ao contrário de outros ensaios que requerem limpeza completa da superfície;
- não é necessário remover camadas de tinta da superfície a ser ensaiada;

- alta resolução do ensaio;
- armazenamento de todos os registros referentes à região inspecionada;
- o ensaio pode ser realizado com monitoramento por alarme, baseado no sistema “passa não passa” (*go no go*). A descontinuidade que excede o critério de aceitação estabelecido por norma faz soar o alarme pré ajustado e a peça é segregada; e
- a sensibilidade do ensaio permite detectar poros de até 0,25 mm de diâmetro por 0,125 mm de profundidade. São detectadas trincas de 0,5 mm de comprimento por 0,1 mm de profundidade (OLYMPUS, 2008).

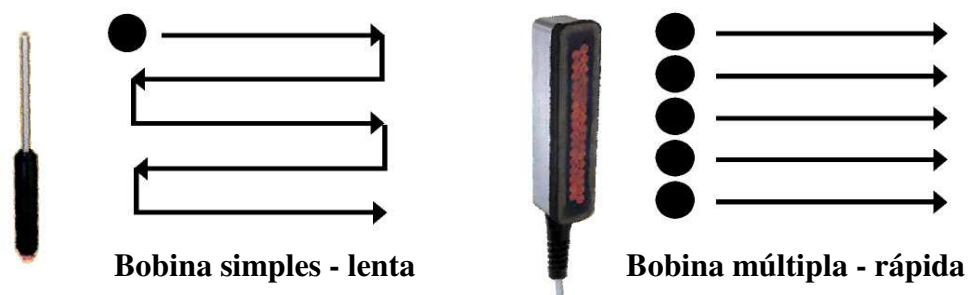


Figura 37 – Sonda convencional simples e sonda *phased array* múltipla (OLYMPUS, 2008).

### 2.3.4 Equipamentos

Os equipamentos são normalmente portáteis e alimentados por eletricidade e bateria. Podem ser encontrados módulos *phased array* utilizados para os ensaios por ultrassom e por correntes parasitas. A faixa de frequência operacional é entre 20 Hz e 6 MHz, com opção do uso de várias frequências simultâneas na sonda. Sensores de deslocamento podem ser usados junto à sonda. Podem ser arquivadas as informações (OLYMPUS, 2008).

A Figura 38 apresenta um equipamento digital portátil, com variação de frequência, para detecção de descontinuidades, medição de condutividade elétrica e de camadas, marca Elotest, modelo M2 – V3, do fabricante Rohmann GmbH, utilizado para execução dos ensaios no laboratório do DCTA/IFI.

Equipamentos foram desenvolvidos para atividades específicas, como por exemplo, a detecção de corrosão nas aeronaves A 330 e A 340 da Airbus, com o equipamento Olympus Omniscan ECA e a respectiva sonda, localizada entre a primeira camada e o painel acústico.

Nesse caso, normalmente é utilizada uma sonda de 32 elementos e frequência de 50 kHz, para atingir uma profundidade de 2 mm abaixo da superfície.



Figura 38 – Equipamento digital de correntes parasitas (POLIMETER, 2009).

A Figura 39 apresenta um equipamento Olympus *phased array* com a imagem das corrosões. À direita da tela, são visualizados os pontos de corrosão ao redor dos rebites de uma fuselagem de aeronave. Na mesma tela, é apresentado no lado esquerdo superior o plano de impedância e no inferior a imagem em forma de “tira de registro”.

São também apresentadas duas imagens ampliadas da tela, com pontos de corrosão.

Uma sonda convencional para inspeção de 12 m<sup>2</sup> levaria 9 horas, enquanto que uma sonda com arranjo de elementos *phased array* leva 1 hora. Essa técnica apresenta boa repetitividade e confiabilidade.

A imagem por *C Scan* proporciona facilidade de detecção de pequenas corrosões localizadas em grandes superfícies (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007).



Figura 39 - Equipamento com a imagem das indicações de corrosões (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007)

Os equipamentos modernos emitem relatório de ensaio, que podem ser encaminhados por meio eletrônico, discutidos e armazenados.

Os equipamentos devem ser capazes de induzir corrente parasita em um condutor e detectar a alteração na corrente. Devem também ser capazes de identificar ou compensar o *lift off* (ABNT NBR 15548, 2008).

Todos os canais do grupo são calibrados simultaneamente, cada canal tendo seu próprio ganho e rotação.

Os parâmetros são automaticamente ajustados quando a sonda é conectada.

### 2.3.5 Imagem *C Scan*

Equipamentos foram projetados para permitir a imagem em *C Scan*, que é um mapeamento em cores, em duas dimensões da superfície a ser ensaiada. As informações de cada uma das bobinas são registradas e permanecem disponíveis no plano de impedância.

A Figura 40 apresenta uma representação em *C Scan*, que é a imagem com código de cores correspondentes às amplitudes dos sinais de correntes parasitas. O eixo horizontal

representa o eixo da direção de deslocamento da sonda e o eixo vertical o eixo da sonda. A imagem em *C Scan* representa a posição da descontinuidade e a sua gravidade (GE, 2009).

A representação em *C Scan* fornece uma vista plana da peça ou material sendo ensaiado. A localização e tamanho das áreas contendo descontinuidades que causam reflexão em uma determinada amplitude são indicados na apresentação *C Scan* (AMS-STD-2154, 2005).

Na técnica por *phased array*, vários sensores são montados lado a lado na mesma sonda. A reprodução das informações representa um papel importante no emprego dessa técnica. A informação de cada uma das bobinas é registrada e permanece disponível no plano de impedância. A sonda é deslocada por cima das descontinuidades e cada bobina produz um sinal de correntes parasitas. A representação em *C Scan* é a imagem com código de cores correspondentes às amplitudes dos sinais de correntes parasitas.

Em juntas soldadas de alumínio para o setor aeroespacial, pode-se detectar falta de penetração na raiz das juntas em uma única varredura, em curto espaço de tempo, além de identificar as áreas que tenham grande probabilidade de presença de camadas de óxido (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007).

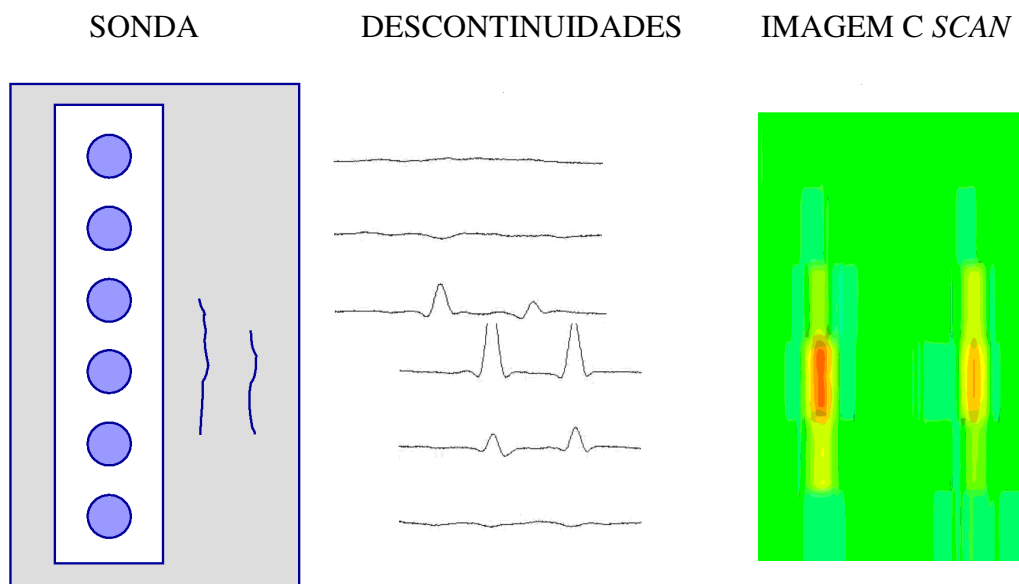


Figura 40 – Imagem *C Scan* (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007)

### 2.3.6 Tipos de sondas

Uma sonda *phased array* pode ser otimizada para uma aplicação específica, alterando-se a configuração das bobinas e sua forma geométrica. Podem ser construídos diferentes tipos de sondas como absoluta em ponte, diferencial em ponte, absoluta em reflexão, diferencial em reflexão, transmissoras-receptoras, blindadas ou diferenciais eixos em cruz.

Sondas podem ser projetadas para detectar uma descontinuidade específica ou atender a uma forma geométrica específica de uma peça. As sondas são também chamadas de *probes*, termo em inglês muito utilizado.

Sondas são disponíveis para detecção de descontinuidades superficiais, como trincas e microfissuras, ou descontinuidades subsuperficiais, como trincas em estruturas de multicamadas ou corrosão.

As sondas podem ser rígidas ou semirígidas. Configurações permitem operações com sondas de até 32 elementos. No caso de utilização de um multiplexador externo, pode-se ter até 64 elementos (LAMARRE; GOLDBERGER, 2007).

Para aplicação em tubulações e outras superfícies arredondadas, foi desenvolvida uma sonda com material flexível para aplicação da técnica por *phased array*, que se adapta à superfície a ser ensaiada. A Figura 41 apresenta uma sonda flexível FLXECA, do fabricante GE. Os elementos são posicionados em locais de contacto direto com o material (GE, 2009).



Figura 41 - Sonda flexível *array* (GE, 2009)

Existem sondas específicas para detecção de corrosão. A Figura 42 apresenta uma sonda *array* do fabricante Olympus, modelo SAA-096-L60-016, de 16 elementos, com resolução de 3,5 mm e detecção de corrosão com penetração de 3 a 6 mm.





Figura 42 - Sonda para detecção de corrosão (OLYMPUS, 2008)

Sondas rotativas podem ser usadas para detecção de descontinuidades localizadas no interior de furos. Podem ser manuais ou automáticas que possuem um motor para dar a rotação necessária para a varredura (GE, 2009). A Figura 43 apresenta uma sonda automática para essa finalidade, do fabricante GE.

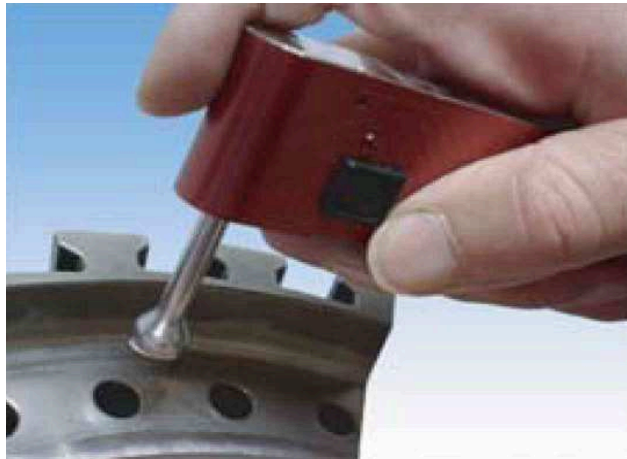


Figura 43 - Sonda rotativa automática para furos (GE, 2009)

Durante a execução de ensaio de furos, o incremento na varredura deve ser tal que a descontinuidade de referência no bloco padrão aplicável seja varrida pelo menos duas vezes. A cada aumento de profundidade, é exigida uma varredura de 360° (ABNT NBR 15548, 2008).

### **2.3.7 Probabilidade de detecção de descontinuidades**

A probabilidade de detecção de descontinuidades é conhecida em inglês pela sigla POD.



As curvas POD avaliam a confiabilidade do ensaio nas técnicas manual e automática. Para se chegar a um resultado confiável, nas duas técnicas são utilizados vários inspetores qualificados e amostras com diferentes tipos de descontinuidades.

O fator humano ainda é a maior causa de falhas na detecção de descontinuidades em ensaios que dependem mais da habilidade do operador, tais como o ultrassom e correntes parasitas. Até os mais bem treinados e experientes cometem erros. A solução para a anulação da influência humana e consequente aumento da capacidade de detecção e confiabilidade do ensaio é a implementação de sistemas automatizados.

Em alguns casos, a POD no ensaio manual chega a 70% para detecção das descontinuidades menores de 2 mm. Para o ensaio automático é de 100%.

No ensaio por correntes parasitas, as sondas são pontuais e necessitam diversas varreduras. No ensaio por *phased array*, por dispor de vários elementos que trabalham simultaneamente e com tamanhos variados, que chegam a 100 mm, aumenta significativamente a probabilidade de detecção. Caso haja a necessidade de mais de uma varredura devido ao tamanho da peça ou material, normalmente é efetuada uma sobreposição de cerca de 10% sobre a varredura anterior, garantindo que o ensaio seja completo.

A sonda flexível, utilizada para superfícies arredondadas, aumenta significativamente a probabilidade de detecção de descontinuidades, tendo em vista a sua utilização ser idêntica à da sonda plana (SOUZA; RABELLO; CARVALHO, 2009).

### 2.3.8 Registros

Os equipamentos desenvolvidos para a técnica por *phased array* utilizam um suporte e um sistema de varredura (*scanner*) mecânico para mover uma sonda de correntes parasitas através de uma área específica e utilizam um instrumento de registro do ensaio.

O registro pode ser efetuado de várias maneiras. Os equipamentos mais modernos fornecem meios de armazenar informações em meio eletrônico. Essa é uma vantagem muito grande, onde o tempo de execução do ensaio é fundamental, pois o mesmo pode ser realizado rapidamente, e a informação é armazenada em meio apropriado, para análises posteriores ou encaminhamento imediato, por meio da internet, para análise, discussão e tomada de ações.

Para a seleção do meio adequado do registro do resultado do ensaio, alguns fatores devem ser levados em conta, tais como a impedância que pode ocorrer entre o equipamento e o instrumento de registro e o tempo de resposta.

Os instrumentos de registro oferecem todas as informações referentes ao ensaio, em meio físico (papel) ou eletrônico. Normalmente dispõe de todas as informações referentes a um relatório de ensaio, tais como o nome da empresa, cliente, data, nome e qualificação do operador, detalhes da peça a ser ensaiada, dados do equipamento, utilização de filtros para eliminação de ruídos, condições de calibração antes, durante e após o ensaio e os dados da inspeção com os resultados finais (GE, 2009).

### 3 PROPOSIÇÃO

Foram selecionados corpos-de-prova de peças e materiais condutores de eletricidade, com descontinuidades superficiais e subsuperficiais, para aplicação de ambas as técnicas e posterior comparação dos resultados. As comparações foram efetuadas quanto a detectabilidade das descontinuidades mais comuns ao ensaio, tempo gasto, poder de resolução e viabilidade econômica.

A detectabilidade ou sensibilidade é a capacidade do ensaio em perceber variações mínimas, tais como uma fina descontinuidade.

O poder de resolução é a capacidade do ensaio em detectar pequenas descontinuidades muito próximas entre si.

Os parâmetros analisados foram:

- aceitação desta técnica pelas principais normas aplicáveis, desenvolvidas pelas principais associações de normalização internacionais;
- verificação do poder de resolução, para detecção de descontinuidades muito próximas;
- comparação das técnicas para a detectabilidade de descontinuidades superficiais e subsuperficiais, por variação da frequência do equipamento de ensaio; e
- medição do tempo gasto para a realização do ensaio em cada técnica.

Para verificar se a técnica por *phased array* pode ser aplicada no segmento aeroespacial, foi realizado um levantamento bibliográfico das principais normas utilizadas na execução do ensaio por correntes parasitas no setor aeroespacial, aplicadas para a fabricação e manutenção de componentes e motores (MIL HDBK 728/2, 1992; ABNT NBR 8859, 2005; *Technical Order Navair 33B-1-1*, 2007; NAS 410, 2008; ANAC 3146, 2005; *ASM Handbook*, 1992 e ASTM).

Avanços no microprocessamento, nos computadores e na automação têm grandemente afetado os equipamentos utilizados para o ensaio de correntes parasitas. Os dados reais obtidos são essencialmente os mesmos, mas a facilidade de ajuste e o armazenamento dos dados têm sido bastante aperfeiçoados. O armazenamento era limitado à retenção da imagem na tela de fósforo, mas o armazenamento digital é ilimitado (MIL-HDBK-728/2, 1992).

Os equipamentos digitais utilizam os mesmos princípios básicos do ensaio convencional. As sondas modernas utilizadas na técnica por *phased array* possuem um número maior de elementos agrupados na mesma sonda, tudo de acordo com as normas.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados os equipamentos Elotest M2 Rohmann, Pulsec da GE e Omniscan MX da Olympus.

### **3.1 Análise de custo e viabilidade econômica do ensaio**

Todos os equipamentos e acessórios são importados. No Brasil só há empresas representantes dos fabricantes, tais como a GE e a Olympus, que importam equipamentos sob encomenda.

Os novos equipamentos lançados no mercado já incorporaram a possibilidade de utilização da técnica por *phased array*. A diferença está na aquisição das sondas, que podem ser as convencionais ou por *phased array*.

A diferença de custo é muito grande. Uma sonda convencional custa em média US\$ 100,00. Uma sonda por *phased array* custa em média US\$ 1.000,00, portanto, dez vezes mais. A sonda completa com *encoder*, que gera a informação sobre o posicionamento na peça durante o ensaio, custa aproximadamente US\$ 2.000,00. A aquisição desse equipamento e sondas se justifica principalmente para empresas que tenham alta produção de peças a serem ensaiadas, com grande redução de tempo.

Para o ensaio de pequenas quantidades de peça, é também justificável o investimento, tendo em vista a redução do tempo de parada em solo da aeronave para manutenção, ou pela utilização do pessoal qualificado efetuando o ensaio, que, após a conclusão, pode efetuar outras atividades. Em um ensaio convencional de rodas de aeronaves, onde são ensaiadas 120 rodas/dia, o trabalho realizado em 8 horas é reduzido para 1:27 horas utilizando a técnica por *phased array*. A economia diária é de US\$ 100, 95, com um aumento médio de produção de ensaio de seis vezes.

Em um ano de trabalho diário de 8 horas, obtém-se uma economia de US\$ 36.846,75.

De um total de 15 rodas/h ensaiadas com o método convencional, chega-se a ensaiar 90 rodas/h com a técnica por *phased array* (GE, 2009).

## 4- MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Planejamento experimental

Para a comparação das técnicas do ensaio convencional e por *phased array*, foi elaborado um fluxograma definindo as principais etapas realizadas neste trabalho, conforme mostrado na Figura 44.

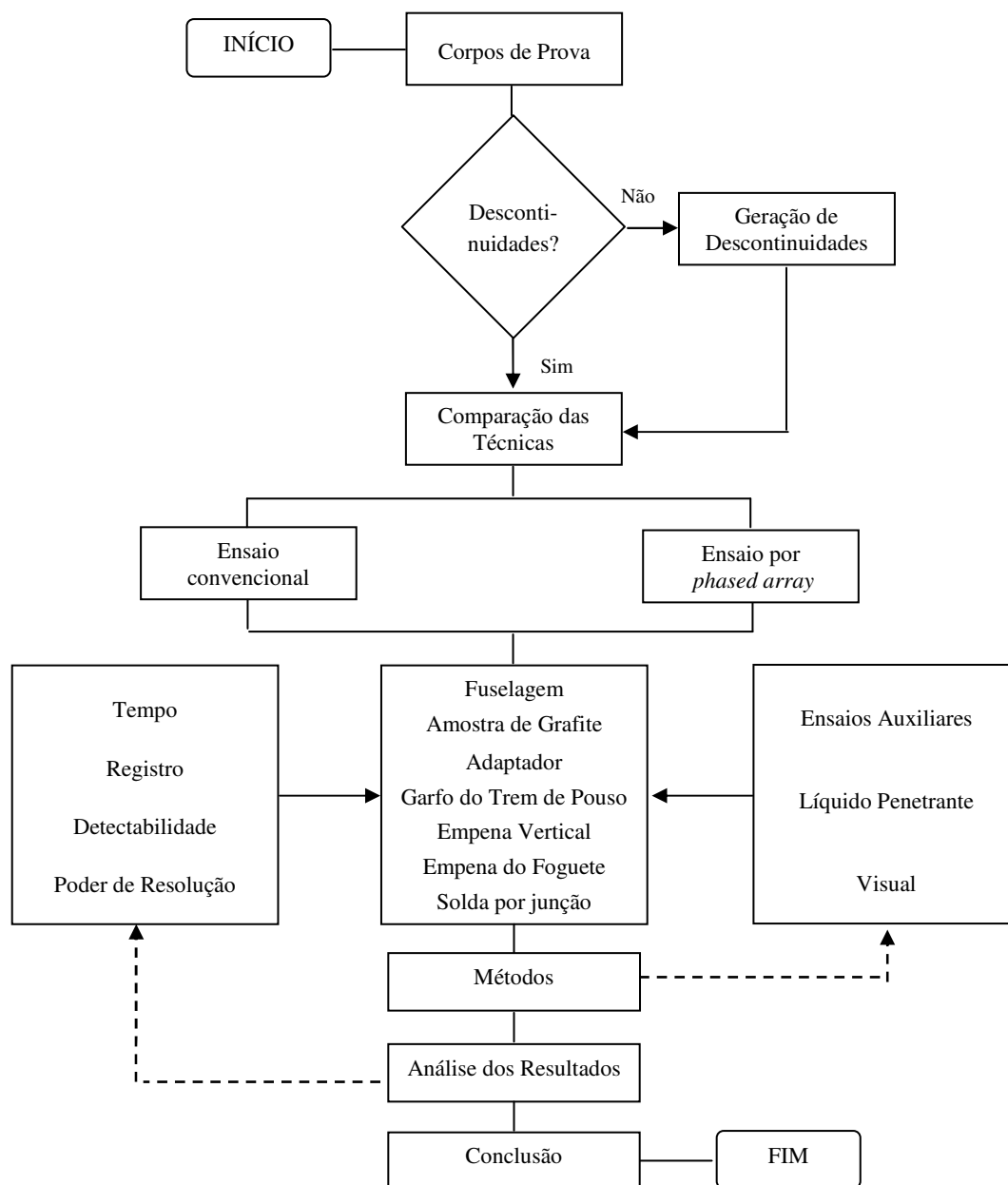


Figura 44 - Fluxograma das etapas do ensaio

## 4.2 Materiais

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados materiais e peças de aeronaves militares e de foguetes desenvolvidos pelo Comando da Aeronáutica (COMAER), de diferentes composições químicas, espessuras e formas geométricas.

A Tabela 4 apresenta os materiais e ligas utilizados nos experimentos.

Tabela 4 - Materiais e ligas dos corpos de prova

<b>Corpo de prova</b>	<b>Material</b>	<b>Liga</b>
1	alumínio	2014
2	grafite	-
3	alumínio	2014
4	alumínio	7075
5	alumínio	2014
6	alumínio	2024
7	alumínio	2024

A composição química das ligas de alumínio e o tipo de tratamento térmico são os descritos na Tabela 5, com os valores em porcentagem.

Tabela 5 – Composição química e tratamento térmico

<b>Liga</b>	<b>Composição química</b>				<b>Tratamento térmico</b>
2014	Cobre-4,5	Silício-0,85	Manganês-0,80	Magnésio-0,50	T 6
2024	Cobre-4,4	Magnésio-1,5	Manganês-0,62	Ferro-0,16	T 3
7075	Zinco-5,6	Magnésio-2,5	Cobre-1,6	Cromo-0,23	T 6

### 4.3 Corpos de prova

Neste trabalho, foram preparados sete corpos de prova para conseguir uma abrangência de todos os parâmetros necessários ao ensaio, conforme descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição dos corpos de prova ensaiados

Número	Tipo de peça ou material
1	Fuselagem de aeronave – corrosão
2	Grafite da tubeira do foguete - trincas
3	Adaptador de motor convencional aeronáutico - trincas
4	Garfo do trem de pouso de aeronave militar - trincas
5	Empena vertical – tempo do ensaio
6	Empena de foguete – trincas
7	Solda por junção - trincas

#### 4.3.1 Descrição das peças e materiais

Corpo de prova nº 1 – Fuselagem de aeronave, pertencente à GE da Inglaterra, de alumínio liga 2014, contendo furação para fixação de rebites.

Corpo de prova nº 2 – Amostra de grafite da tubeira do Veículo Lançador de Satélite (VLS).

A grafite corresponde a uma das três formas alotrópicas do carbono. As outras são o carbono amorfo e o diamante. É composta unicamente por átomos de carbono. É mole, facilmente desgastável, de boa condutividade elétrica e muito resistente ao calor.

Existem compostos cuja composição é a mesma da grafite, mas com o arranjo molecular mais unido e são mais resistentes, como o ferro e o diamante (ALVES, 2009).

Corpo de prova nº 3 – Adaptador pertencente ao motor aeronáutico Lycoming.

Adaptador usinado a partir de uma liga de alumínio 2014 T6. A liga 2014 tem como componentes principais o cobre e o silício. Essa liga é largamente empregada na indústria aeronáutica, quando o fator resistência/peso for fundamental, como é o caso das aeronaves.

A designação T6 da liga de alumínio significa um tratamento térmico solubilizado e envelhecido artificialmente. A solubilização consiste em aquecer o material a uma temperatura bem elevada, próxima do ponto de fusão. O envelhecimento artificial é o resfriamento em uma temperatura bem mais baixa e tempo prolongado.

Esse tratamento provoca aumento de dureza e consequente resistência às camadas superficiais (DUTRA, 2003).

Corpo de prova nº 4 – Garfo do trem de pouso.

Garfo de alumínio forjado, da aeronave militar de treinamento T-25 - Universal. As ligas de alumínio para aplicação no setor aeronáutico normalmente são das famílias 2XXX, onde o cobre é o principal elemento de liga e 7XXX, onde o zinco é o principal elemento de liga.

A liga utilizada para esse material é a 7075 T6, com altos índices de resistência mecânica e tenacidade, forjada a temperaturas entre 400 e 530 °C, cujos principais elementos da composição química são o zinco, magnésio, cobre e cromo. O tratamento térmico T6 é o processo de solubilização e envelhecimento artificial. (SILVA, 2001).

Corpo de prova nº 5 – Empena vertical de aeronave militar.

Empena de estabilização vertical da aeronave AT 26 - Xavante, da Força Aérea Brasileira, de liga de alumínio 2014 T6, É uma aeronave de ataque de solo e treinamento.

Corpo de prova nº 6 – Empena do foguete VSB 30.

Empena de estabilização do primeiro estágio do foguete, de alumínio, liga 2024. Essa liga permite boa usinabilidade, alta resistência mecânica e é muito utilizada em peças de aviões, veículos e máquinas submetidas a altas tensões (BANCZEK et al., 2008).

O foguete VSB 30 - veículo de sondagem *booster*, é um foguete bi estágio, pertencente ao projeto Cumã II, desenvolvido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), organização pertencente ao DCTA, em conjunto com a Agência Espacial Brasileira (AEB). Tem por objetivo transportar cargas úteis científicas e tecnológicas, de até 400 kg, para experimentos na faixa de 270 km de altitude. Possui um jogo de 3 empenas em cada estágio e propulsores sólidos nos 2 estágios (DCTA, 2008).



Corpo de prova nº 7 – Solda por junção

Junta de alumínio liga 2024, tratamento térmico T3, com uma solda por junção. Esse material está em desenvolvimento para ser utilizado em estruturas de aeronaves, inclusive na Embraer.

A solda por junção ou fricção no estado sólido, cujo nome técnico é *friction stir welding*, - FSW, foi patenteada em 1993 na Inglaterra e vem sendo aplicada com muitas vantagens para as ligas de alumínio, eliminando problemas que ocorrem com os processos convencionais à fusão. As partes devem estar fixadas contra uma barra de fundo. Uma ferramenta cilíndrica arredondada com um pino perfilado, em movimento de rotação, penetra levemente na área de união entre as juntas encostadas topo a topo. O calor gerado pela fricção entre a ferramenta e a peça permite que ela amoleça sem atingir o ponto de fusão e se desloque transversalmente ao longo da linha de solda. O material em estado plástico é transferido para a linha de arrastamento do pino, e forjado pelo contacto do perfil do pino e do topo da ferramenta (SOLDAGEM E INSPEÇÃO, 2004).

A aplicação desse tipo de solda no setor aeroespacial evoluiu rapidamente. É utilizada nos tanques externos dos foguetes da NASA e no Airbus 380. Esse avanço se deve ao desenvolvimento do pino retrátil, por engenheiros da *National Aeronautics and Space Administration*-NASA e da Boeing (MENDEZ; EAGAR, 2002)

#### **4.3.2 Descontinuidades artificiais**

Nesse trabalho, foi adotado um procedimento para criação de descontinuidades artificiais, quando necessárias, obedecendo a seguinte sequência:

- 1- Demarcação do local onde as descontinuidades seriam efetuadas;
- 2- Marcação por furação de uma amostra, para verificação da detecção da profundidade de penetração do ensaio;
- 3- Aquecimento de uma amostra e resfriamento em água à temperatura ambiente, para surgimento de trincas térmicas;
- 4- Riscos efetuados em uma amostra, com um bisturi cirúrgico, ou por eletroerosão, para simular finas descontinuidades superficiais;
- 5- Execução do ensaio por líquido penetrante, para demarcação e registro das descontinuidades superficiais.

O ensaio por líquido penetrante foi executado no laboratório do DCTA/IFI, utilizando um equipamento estacionário, com produtos da marca Metal Chek, para obtenção da visualização das trincas.

#### **4.4 Método**

Nesse trabalho foram utilizadas duas técnicas do ensaio por correntes parasitas. A técnica convencional e a técnica por *phased array*.

##### **4.4.1 Técnica convencional**

Os ensaios para a técnica convencional foram realizados no laboratório do DCTA/IFI e na empresa WDT Engenharia, localizada no Rio de Janeiro. As amostras foram ensaiadas com os equipamentos Elotest M2 Rohmann, Omniscan MX da Olympus e Pulsec da GE, com sondas convencionais.

Foram efetuados relatórios contendo os resultados dos ensaios e a localização das descontinuidades de cada amostra.

##### **4.4.2 Técnica por *phased array***

Os ensaios foram realizados no laboratório do DCTA/IFI, na empresa WDT Engenharia e na Embraer São José dos Campos, nas mesmas amostras ensaiadas pela técnica convencional.

Os equipamentos e acessórios utilizados foram o modelo Pulsec, da GE e o modelo OmniScan MX da Olympus.

No Brasil, poucos equipamentos estão disponíveis para execução dos ensaios.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados nos corpos de prova, aplicando-se as duas técnicas, convencional e por *phased array*. Para a técnica convencional, foram identificadas todas as descontinuidades e mapeadas quanto ao tamanho e forma, para constarem dos relatórios de ensaio.

Para a técnica *phased array*, as imagens dos resultados dos ensaios foram arquivadas e posteriormente foram efetuadas as comparações dos resultados, quanto à detectabilidade das descontinuidades, poder de resolução e tempo de execução do ensaio.

A seguir, serão apresentados os resultados e as discussões para as sete experiências realizadas.

### 5.1 Experiência 1 – Fuselagem de aeronave

Foi efetuado o ensaio para detecção, mapeamento e tamanho dos pontos de corrosão da parte de fuselagem de aeronave, com furação para rebites. As dimensões são de 100 X 50 mm e espessura de 12 mm, conforme apresentado na Figura 45.



Figura 45 – Fuselagem de aeronave

#### 5.1.1 Técnica convencional

Foi utilizado o equipamento Pulsec, do fabricante GE, utilizando uma sonda GE convencional para metal não-ferroso, de baixa frequência. Esse equipamento permite a utilização de sondas convencionais de qualquer marca. Os registros podem ser obtidos para ambas as técnicas.

A Figura 46 apresenta o registro do ensaio emitido pelo equipamento. Foi detectada uma região de corrosão, definida pela cor azul, com a maior dimensão horizontal de 22,5 mm, por 28,5 mm da maior dimensão vertical. Parte dessa corrosão se apresentou visível a olho nu.

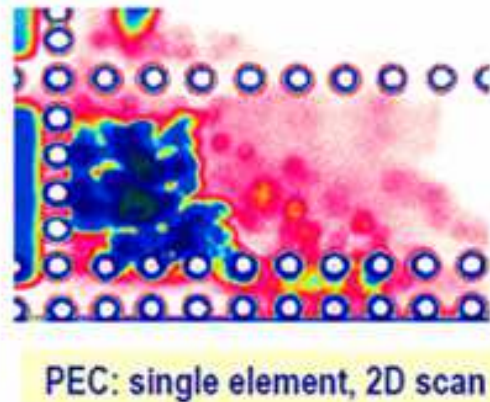


Figura 46 - Detecção de corrosão pela técnica convencional (GE, 2009)

### 5.1.2 Técnica por *phased array*

A Figura 47 apresenta o resultado do ensaio da mesma fuselagem, com o mesmo equipamento digital. Foi utilizada uma sonda *phased array* de 32 elementos do fabricante GE.

Para o ensaio por *phased array*, somente sondas da mesma marca do fabricante do equipamento podem ser utilizadas.

Foi encontrada uma região de corrosão, definida pela cor azul, bem mais nítida do que no método convencional. No lugar de uma única área de corrosão, foram detectadas quatro regiões distintas, sendo de dimensões máximas de 21 X 16,5 mm, 12 mm, 6 mm e 6 mm.

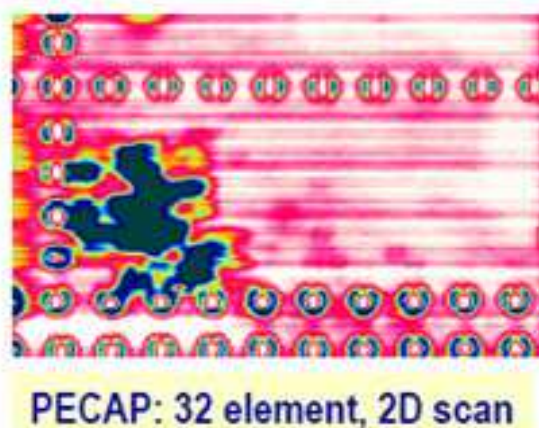


Figura 47 - Detecção de corrosão pela técnica *phased array* (GE, 2009)

Essa nova formação altera significativamente o resultado do ensaio, tendo em vista a área menor da corrosão, localizada em quatro regiões distintas e não em uma única.

O poder de resolução obtido, que é a capacidade de detectar descontinuidades muito próximas umas das outras, é muito maior do que na técnica convencional.

O critério de aceitação é definido pelo cliente, estabelecido em procedimentos escritos ou nos pedidos de execução do ensaio, encaminhado normalmente junto com os materiais a serem ensaiados.

As normas estabelecem os ensaios por correntes parasitas em toda a fuselagem de uma aeronave, para verificação de trincas ao redor dos rebites e algumas regiões para detecção de corrosão

### **5.1.3 Comparação das técnicas**

Comparando-se os resultados, o poder de resolução resultante do ensaio pela técnica por *phased array* foi superior ao resultado obtido pela técnica convencional. Houve um ganho considerável na nitidez da imagem e localização das áreas de corrosão. O poder de resolução obtido pela técnica *phased array* foi superior à técnica convencional, alterando significativamente o resultado do ensaio.

## **5.2 Experiência 2 – Amostra de grafite da tubeira do VLS**

As descontinuidades mais comuns que ocorrem nesse material são trincas na região subsuperficial. Foram desenvolvidas descontinuidades artificiais na amostra, para verificação da detectabilidade de descontinuidades em diferentes profundidades, na região subsuperficial do material, simulando trincas.

Foram efetuados 4 furos de 3 mm de diâmetro, na face inferior do material. Os furos ficaram a uma distância de 1 mm, 2 mm, 2,5 mm e 3 mm da superfície de varredura.

Os ensaios foram efetuados somente pela superfície sem os furos, pois o interesse é na região subsuperficial.

A Figura 48 apresenta a amostra vista pela face inferior.



Figura 48 – Amostra de grafite do foguete

### 5.2.1 Técnica convencional

O ensaio foi realizado com o equipamento Elotest M2 LS, com a sonda PEN 925-5, convencional, de baixa frequência.

A calibração foi efetuada na própria peça, por não existir um bloco padrão de referência para esse tipo de material.

A seguir, foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com a mesma sonda PEN 925-5 Elotest. Novamente foi efetuada a calibração no próprio material.

As varreduras foram efetuadas nos sentidos horizontal e vertical.

O resultado das varreduras de ambos os equipamentos foi a detecção dos furos de 1,0 mm, 2,0 mm e 2,5 mm. Não foi detectado o furo de 3,0 mm.

### 5.2.2 Técnica por *phased array*

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech 067.005.032, de 32 elementos, de baixa frequência.

A calibração foi efetuada na própria peça, mas apresentou alguma dificuldade, pelo tamanho da sonda, de 100 X 55 mm, em função do tamanho da peça, conforme apresentado na Figura 49.

Com o equipamento calibrado, foi efetuada uma única varredura, no sentido horizontal, e detectados os furos de 1,0 mm, 2,0 mm e 2,5 mm. Não foi detectado o furo de 3,0 mm.

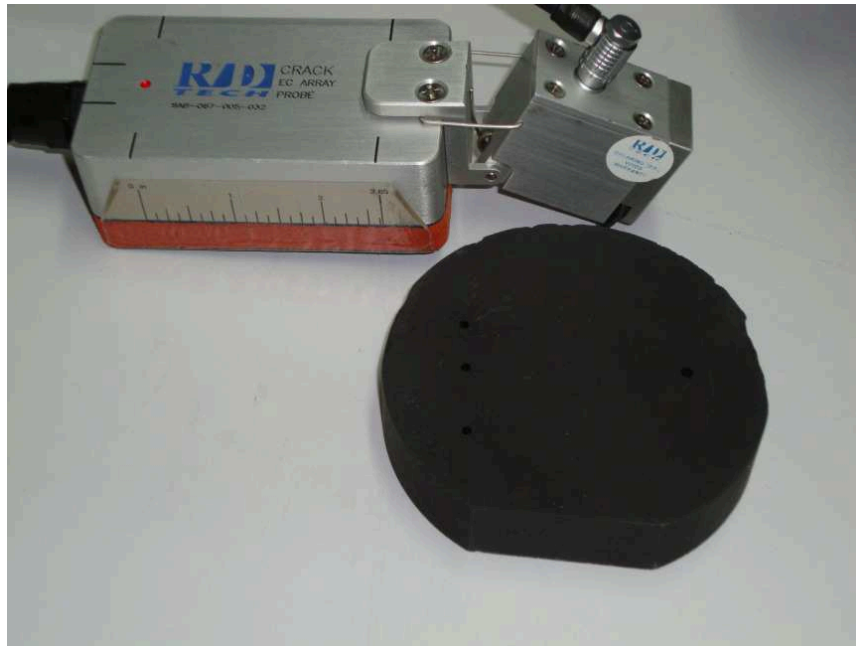


Figura 49 – Ensaio por *phased array* da amostra de grafite

### 5.2.3 Comparação das técnicas

A detectabilidade foi a mesma em ambas as técnicas. O furo de 3,0 mm não foi detectado em ambos os casos, por estar localizado mais internamente, muito abaixo do valor de profundidade padrão, onde a densidade das correntes parasitas é reduzida a aproximadamente 37% da densidade da superfície. A profundidade de penetração é uma limitação do ensaio para ambas as técnicas.

A técnica por *phased array* apresentou a mesma sensibilidade de detecção da técnica convencional.

### 5.3 Experiência 3 – Adaptador do motor aeronáutico Lycoming

O tipo mais comum de descontinuidade que ocorre no adaptador de alumínio, conforme apresentado na Figura 50, é a trinca superficial na região interna.



Figura 50 – Adaptador do motor aeronáutico Lycoming

#### 5.3.1 Técnica convencional

A calibração e o ensaio foram realizados com o equipamento Elotest M2 LS, sonda PEN 925-5, convencional, de baixa frequência.

Foram efetuadas varreduras em todas as superfícies. Como a peça apresenta muitos cantos e dobras, foi utilizada a menor sonda disponível, para minimizar o efeito de borda, descrito em 2.2.3.5.3. Mesmo assim, não foi possível efetuar uma varredura total.

Foram encontradas quatro trincas. A trinca na direção vertical possui 12 mm e as trincas na direção horizontal possuem dimensão de 19 mm, 36 mm (passante) e 21 mm.

Para visualização, visto que o ensaio não possui registro, foi efetuado um ensaio por líquido penetrante visível, lavável com água, modelo VP 30 e revelador não aquoso modelo D 70, ambos do fabricante Metal Chek. Esse ensaio, cujo resultado é apresentado na Figura 51,



serviu para a confirmação do tamanho das discontinuidades, principalmente na curva, tendo em vista o efeito de borda. A trinca vertical é parcialmente visível a olho nu.



Figura 51 – Trincas detectadas pelo ensaio por líquido penetrante

### 5.3.2 Técnica por *phased array*

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech 067.005.032, de 32 elementos, de baixa frequência.

A calibração foi efetuada com o bloco padrão de alumínio CD 402040-B, S/N 02061335, do fabricante Olympus, conforme apresentado na Figura 52, para detecção de trincas e corrosão.

Foram encontradas quatro trincas. A trinca na direção vertical possui 12 mm e as trincas na direção horizontal possuem dimensão de 19 mm, 36 mm (passante) e 21 mm.

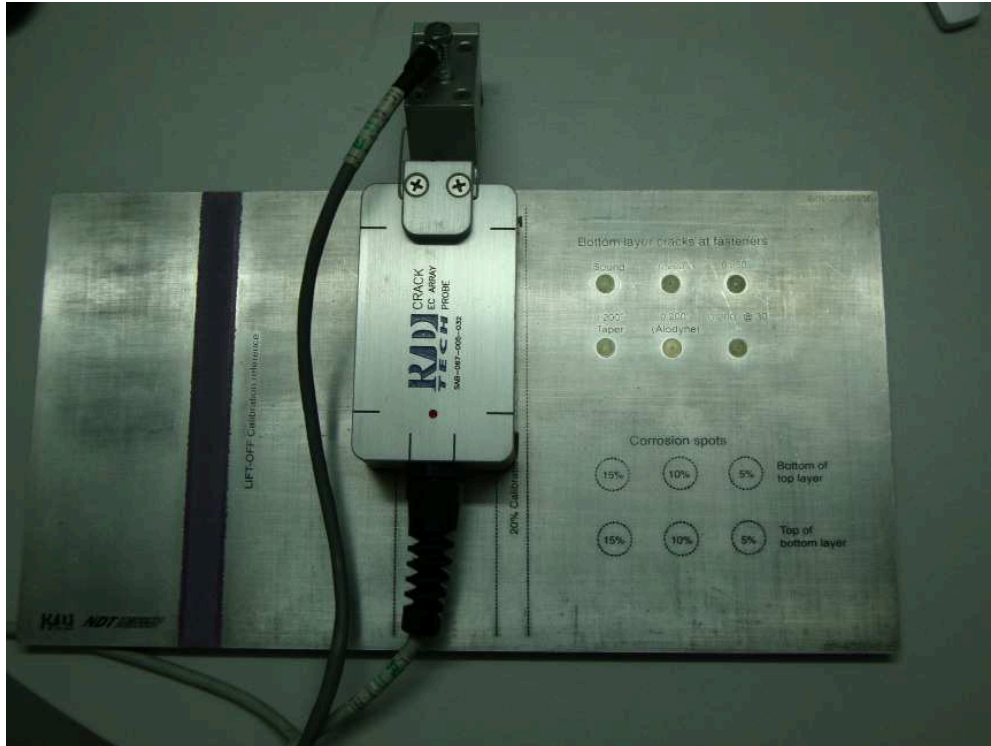


Figura 52 – Calibração do equipamento com a utilização do padrão.

A Figura 53 apresenta o ensaio do adaptador, em uma das posições sobre a sonda, com a localização das trincas marcadas a caneta, na cor azul.

Foi possível efetuar uma melhor varredura da peça, com o efeito de borda menor do que o encontrado na técnica convencional. A sonda com 32 elementos, mesmo com uma parte fora das dimensões da peça, conseguiu detectar as descontinuidades.



Figura 53 – Ensaio por *phased array* no adaptador

O equipamento detectou as trincas e apresentou uma representação na tela, conforme apresentado na Figura 54, com as faixas horizontais nas cores laranja e amarelo, em uma única varredura. Esse resultado foi registrado e arquivado, pois o equipamento possui um cartão de memória. São encontrados no mercado cartões de grande capacidade de arquivo, para até 5.000 pontos de ensaios.

A possibilidade de registro do ensaio é um diferencial muito grande em relação à técnica convencional. O registro com a imagem das discontinuidades foi arquivado na própria unidade do equipamento e foi posteriormente transferido para um computador e um *pen drive*.



Figura 54 – Ensaio do adaptador, com a representação das trincas na tela

A imagem do registro é apresentada na Figura 55 e pode ser editada para melhor visualização das descontinuidades na tela, quanto ao brilho, contraste e tamanho.

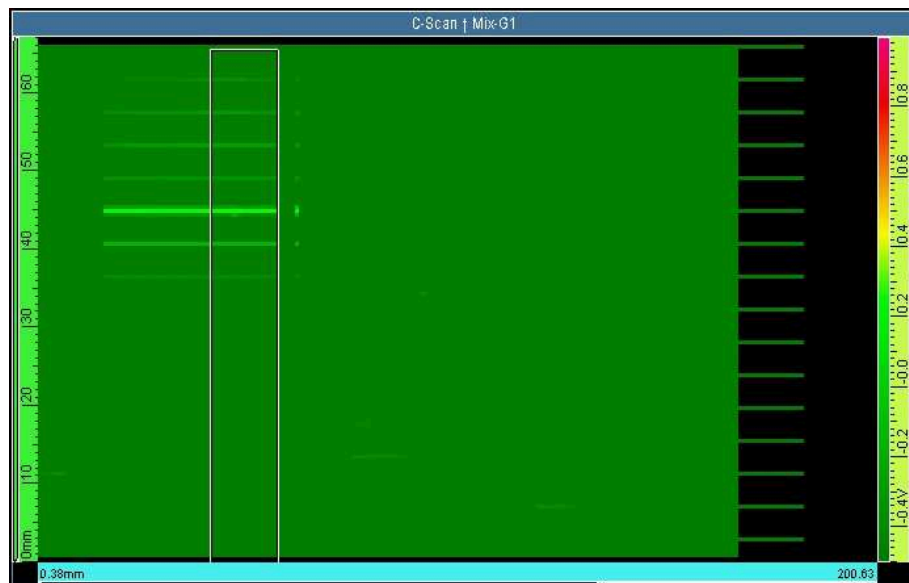


Figura 55 – Registro da representação da imagem das trincas

Pode também ser encaminhada por meio eletrônico para análise do resultado, pelo nível 3 responsável pela emissão do relatório de ensaio e pelo cliente.

### **5.3.3 Comparação das técnicas**

O resultado foi o mesmo para ambas as técnicas, quanto à localização e dimensão das trincas. O ensaio por líquido penetrante foi efetuado para confirmação e visualização da imagem, por estarem as trincas localizadas em uma região que provoca o efeito de borda, dificultando a interpretação dos resultados pela técnica convencional.

A detectabilidade das descontinuidades no ensaio por *phased array* foi a mesma que da técnica convencional, mas apresentou grandes vantagens, devido à forma geométrica da peça ensaiada, podendo ser efetuada a varredura em toda a superfície da peça.

O registro do ensaio na técnica *phased array* foi muito vantajoso para a análise de cada descontinuidade, devido à localização muito próxima uma da outra e na mesma região da peça. O registro das imagens é uma grande vantagem da técnica, mas o arquivamento das imagens e a transferência de dados necessitam treinamento e habilidade do operador.

Esse treinamento pode ser efetuado com a utilização do bloco padrão para execução do ensaio, por apresentar descontinuidades conhecidas.

## **5.4 Experiência 4 - Garfo do trem de pouso**

O ensaio foi realizado no garfo do trem de pouso de liga de alumínio da aeronave T 25 - Universal, conforme apresentado na Figura 56, para a detecção de trincas superficiais e subsuperficiais ao redor e no interior dos furos, de acordo com a exigência das normas e procedimentos específicos de manutenção de aeronaves.



Figura 56 – Garfo do trem de pouso da aeronave T 25 - Universal

#### 5.4.1 Técnica convencional

O ensaio foi realizado com o equipamento Elotest M2 LS, sonda PEN 925-5, convencional, de baixa frequência.

A calibração do equipamento para realização do ensaio foi efetuada com o padrão de alumínio Elotest.

Foram efetuadas varreduras em todas as superfícies dos furos. Foi utilizada uma sonda rotativa automática Elotest, para verificação do interior dos furos, conforme apresentado na Figura 57.



Figura 57 – Utilização da sonda rotativa no ensaio dos furos

Foram encontradas 3 trincas na superfície do furo apresentado na Figura 58. Foi efetuada uma marcação à tinta, para melhor visualização das trincas.



Figura 58 – Localização das trincas no furo do trem de pouso

As dimensões das trincas são de 4 mm na posição vertical, 6,0 mm e 6,5 mm na posição horizontal.



#### 5.4.2 Técnica por *phased array*

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech 067.005.032, de 32 elementos.

Foram encontradas 3 trincas na superfície do mesmo furo detectado pelo ensaio convencional. As dimensões das trincas são de 4 mm na posição vertical, 6,0 mm e 6,5 mm na posição horizontal.

A Figura 59 apresenta o ensaio em uma das posições da sonda sobre a peça, no furo com as trincas.



Figura 59 – Ensaio *phased array* no garfo do trem de pouso

Devido ao tamanho da sonda *phased array*, houve dificuldade de acesso à superfície de alguns furos. Não foi possível verificar a parte interna dos furos. Foi necessário utilizar uma sonda rotativa convencional para essa finalidade. Também não foi possível ensaiar os furos das aletas de fixação do trem de pouso na parte interior, conforme apresentado na Figura 60.

Para complemento do ensaio foi utilizada uma sonda convencional PEN 925-5 Elotest.





Figura 60 – Furos de fixação do trem de pouso

A Figura 61 apresenta o resultado do ensaio com a representação das trincas na tela do equipamento. Foi efetuado o registro para análise.



Figura 61 – Resultado da representação das trincas na tela do equipamento

### 5.4.3 Comparação das técnicas

Ambas as técnicas apresentaram o mesmo resultado quanto à detectabilidade e tamanho das descontinuidades.

O ensaio pela técnica convencional foi efetuado em todos os furos, sem dificuldade. A técnica por *phased array* não permitiu que fosse efetuada uma varredura total, devido à forma geométrica da peça e ao tamanho da sonda. Houve dificuldade na região de alguns furos e uma limitação do ensaio em áreas importantes, ao redor de furos, que tinham que ser inspecionados. Para cumprir o requisito da norma, foi necessária a utilização combinada das duas técnicas de ensaio, com uma sonda *phased array* e duas sondas convencionais.

Esse fato não gerou grande dificuldade, pois o equipamento utilizado permite a utilização de sondas convencionais.

### 5.5 Experiência 5 - Empena vertical da aeronave Xavante

Empena de estabilização vertical da aeronave Xavante, material de liga de alumínio, com dimensões de 0,75 m de largura por 1,56 m de altura, conforme apresentado na Figura 62. Possui uma camada de tinta sobre toda a superfície.

Foi efetuado o ensaio para verificação do tempo gasto para a varredura 100% na detecção de corrosão nas superfícies e ao redor de todos os 436 rebites de cada lado.

O ensaio por correntes parasitas tem como maior utilização a verificação de trincas de estruturas de aeronaves, ao redor de rebites e furos. Essas trincas são usualmente geradas por fadiga ou corrosão do material. O progresso dessas trincas é lento no estágio inicial. A detecção nesse estágio previne a ruptura do material. Ensaio são solicitados para até 100% dos rebites de uma aeronave, podendo levar alguns dias para a sua conclusão (TECHNICAL ORDER, 2007).



Figura 62 - Empena vertical da aeronave Xavante

### 5.5.1 Técnica convencional

Foi utilizado o equipamento digital Elotest M2 LS, com uma sonda PEN 925-5, de frequência na faixa de 50 a 500 kHz. A frequência utilizada para o ensaio foi de 40 kHz.

O padrão utilizado foi o de alumínio Elotest, conforme apresentado na Figura 63.



Figura 63 – Equipamento, sonda e padrão do ensaio da empena vertical

Tendo em vista o tamanho da peça, a velocidade de varredura foi ajustada em média a cada 15 minutos de ensaio, com o padrão. A ponta da sonda foi protegida com fita crepe. As varreduras foram efetuadas no sentido horizontal, vertical e ao redor de todos os rebites.

O tempo gasto para o lado direito foi de 1 hora e 50 minutos e para o lado esquerdo foi de 1 hora e 40 minutos, totalizando 3,5 horas.

### 5.5.2 Técnica por *phased array*

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech 067.005.032, de 32 elementos, de baixa frequência, com encoder SXA-270, apresentado na Figura 64.

A varredura foi efetuada no sentido horizontal.

Para a calibração do sistema e determinação da velocidade de varredura padrão, foram efetuadas experiências utilizando o padrão de alumínio. A velocidade de varredura padrão é a que consegue detectar as discontinuidades no padrão, de acordo com a habilidade de cada operador. Foi efetuado um teste de aumento de velocidade, tendo em vista a grande área a ser ensaiada. O equipamento detectou as discontinuidades com menor nitidez, pois o processamento da imagem não acompanha o aumento da velocidade. A velocidade selecionada foi determinada para obter um aumento na sensibilidade de detecção, com o processamento de imagem compatível.



Figura 64 – Sonda *array* com *encoder*, utilizada para o ensaio (OLYMPUS, 2008)

A Figura 65 apresenta a indicação dos rebites na tela do equipamento. Foi necessário o tempo de 11 minutos para a execução da varredura de cada lado da empena, totalizando 22 minutos.



Figura 65 – Equipamento *phased array* com a indicação dos rebites

### 5.5.3 Comparação das técnicas

Os tempos para realização das técnicas foram significativamente diferentes. Com a técnica *phased array*, o ensaio teve a duração de 22 minutos. A técnica convencional teve a duração de 3,5 horas (210 minutos), cerca de 10 vezes mais do que o valor obtido pela técnica *phased array*. Essa vantagem é fundamental para a execução do ensaio, tendo em vista o custo da mão-de-obra especializada e a redução do tempo de permanência da aeronave em solo.

### 5.6 Experiência 6 – Empena do foguete VSB 30

Empena de alumínio, com rebites no mesmo nível do material, sem ressalto. As descontinuidades que podem ocorrer são trincas ao redor dos rebites. A empennagem tem 60 cm de largura por 50 cm de altura, conforme apresentada na Figura 66.

Foram retirados diversos rebites para o desenvolvimento de trincas artificiais na saída dos furos. Posteriormente, foram colocados novos rebites, idênticos aos originais.



Figura 66 – Empena do foguete VSB 30

### 5.6.1 Técnica convencional

Foi utilizado o equipamento digital Elotest M2 LS, com uma sonda PEN 925-5, de frequência na faixa de 50 a 500 kHz. A frequência utilizada para o ensaio foi de 40 kHz. O padrão utilizado foi o de alumínio, marca Elotest.

Foi efetuada uma varredura ao redor dos rebites de cada lado da empena. Foram encontradas duas trincas superficiais entre rebites, com dimensão de 34,5 mm de comprimento cada uma. A Figura 67 apresenta o ensaio com o equipamento digital e as marcas das trincas entre os rebites, na cor vermelha, juntamente com a sonda e o bloco padrão.

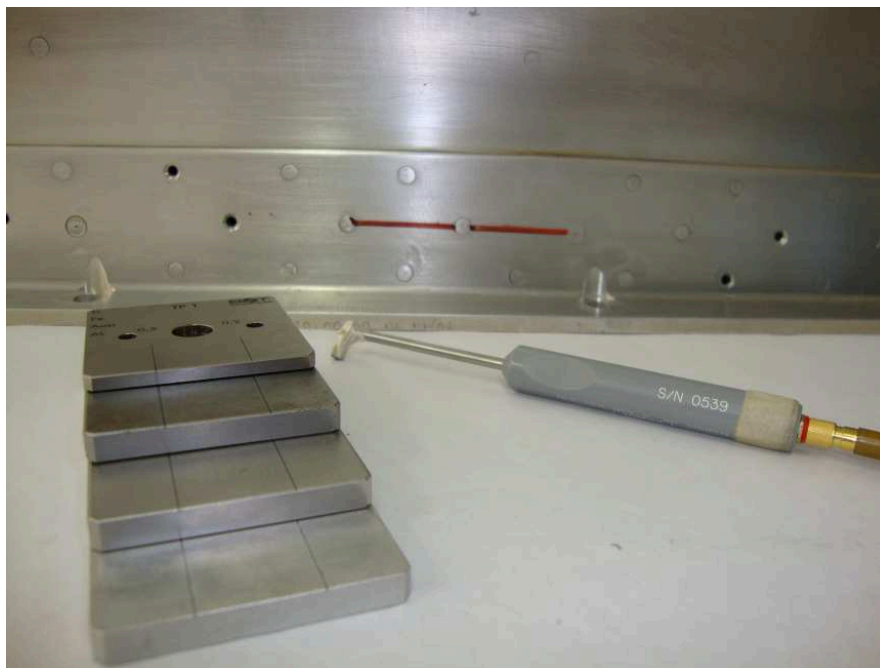


Figura 67 – Ensaio convencional na empena do foguete, com as trincas

### 5.6.2 Técnica por *phased array*

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech 067.005.032, de 32 elementos, de baixa frequência. A Figura 68 apresenta a sonda *phased array* com o *encoder*, durante o ensaio.



Figura 68 – Ensaio *phased array* na empena do foguete



Foi efetuada uma varredura no sentido horizontal de ambos os lados da empena. Foram encontradas duas trincas superficiais entre os mesmos rebites da técnica convencional, com dimensão de 34,5 mm de comprimento cada uma.

Foi encontrada uma trinca de 4 mm, abaixo da primeira trinca encontrada, com início no mesmo ponto e final com 2 mm de distância da primeira trinca de 34,5 mm.

### 5.6.3 Comparação das técnicas

A detectabilidade das discontinuidades foi superior com a utilização da técnica por *phased array*. As trincas maiores foram detectadas igualmente, mas a menor, por estar localizada muito próxima da maior, não foi detectada pela técnica convencional, por apresentar um poder de resolução menor.

### 5.7 Experiência 7 - Solda por junção (FSW)

A solda por junção foi desenvolvida com a fixação das partes a serem unidas e a passagem da ferramenta cilíndrica em movimento de rotação, para uma leve penetração na área de união, conforme apresentado na Figura 69. O calor gerado permitiu a fusão.



Figura 69 – Processo de solda por junção (MENDEZ; EAGAR, 2002)

Foi efetuado o ensaio em uma chapa de alumínio de 1,3 mm de espessura, com solda por junção, conforme apresentada na Figura 70. Foram desenvolvidas três trincas artificiais



por eletroerosão na superfície da solda, sendo duas no sentido transversal e uma no sentido longitudinal da solda.

As trincas foram desenvolvidas com um tamanho mínimo, para verificação da sensibilidade de detecção.

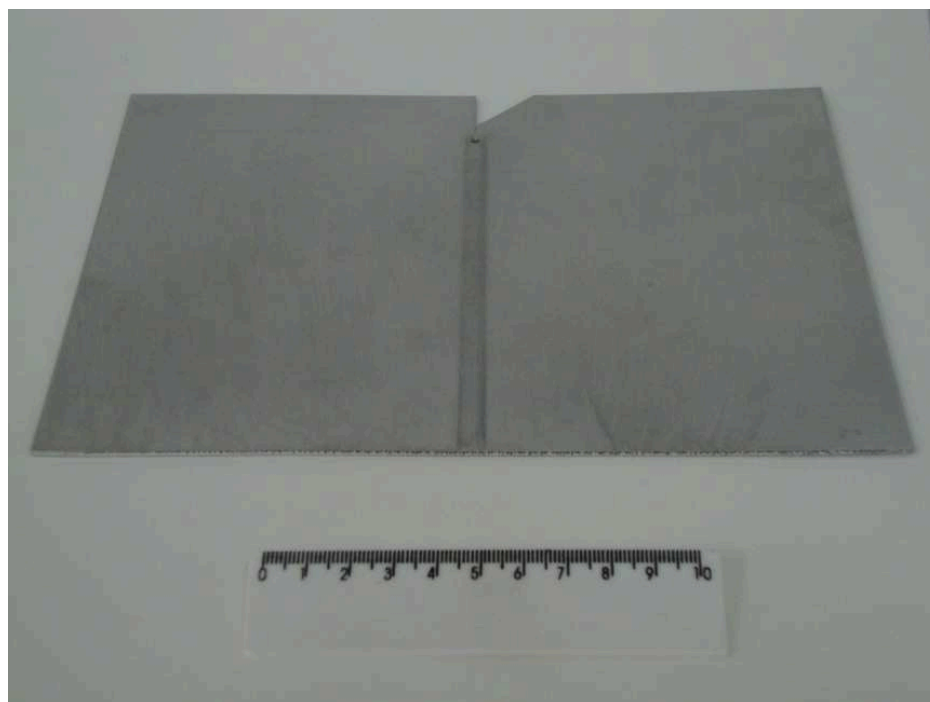


Figura 70 – Solda por junção (FSW)

### 5.7.1 Técnica convencional

Foi utilizado o equipamento digital Elotest M2 LS, com uma sonda PEN 925-5, de frequência na faixa de 50 a 500 kHz. A frequência utilizada para o ensaio foi de 60 kHz. O padrão utilizado foi o de alumínio marca Elotest.

A Figura 71 apresenta o corpo de prova com descontinuidades.

Foto do CDP



Figura 71 – Corpo de prova FSW, com as descontinuidades

Foram efetuadas duas varreduras, uma no sentido longitudinal ao cordão de solda e uma no sentido transversal. Tendo em vista a falta de experiência em ensaiar esse tipo de solda e pelo tamanho mínimo das descontinuidades esperadas, foi efetuada mais uma varredura nos dois sentidos, com uma velocidade menor e sempre comparando com o padrão, para confirmar o mapeamento completo da região da solda.

Foram encontradas duas trincas transversais de 2 mm e 3 mm cada, e uma trinca longitudinal de 2 mm.

### **5.7.2 Técnica por *phased array***

Foi utilizado o equipamento Omniscan MX da Olympus, com uma sonda *array* RD Tech SBBR – 022-300-032, de 32 elementos, mini de 20 mm de comprimento e frequência de 300 kHz. A calibração para o alumínio estava gravada na memória do equipamento. A Figura 72 apresenta a visualização do cordão de solda, com duas trincas na tela do equipamento.



Figura 72 – Indicação das descontinuidades na tela do equipamento.

Foi efetuada uma varredura no sentido longitudinal ao cordão de solda. Foram encontradas duas trincas transversais de 2 mm e 3 mm cada, e uma trinca longitudinal de 2 mm.

A sonda mini *array* permitiu grande facilidade na varredura e foi utilizada com maior velocidade. A apresentação do resultado na tela, a possibilidade de congelamento e ajuste de imagem e a gravação das imagens foram fundamentais no resultado final, pois as trincas são pequenas e em sentidos opostos, com boa probabilidade de detecção.

### 5.7.3 Comparação das técnicas

Os resultados obtidos pela técnica por *phased array* para ambas as técnicas foram os mesmos, quanto à detectabilidade e tamanho das trincas. A técnica convencional apresentou menor probabilidade de detecção, exigindo maior experiência e atenção do inspetor, devido ao fato de as trincas serem de pequenas dimensões.

A técnica por *phased array* apresentou grande facilidade e rapidez de varredura, principalmente com os recursos que o equipamento tem disponível, como a visualização da imagem na tela e o registro que permanece arquivado.

## 5.8 Resultados

Vantagens e desvantagens da técnica convencional e por *phased array*.

### 5.8.1 – Técnica convencional

Vantagens:

- baixo custo das sondas;
- simplicidade do uso;
- requer somente um equipamento normal; e
- sondas podem ser projetadas para atingir cantos vivos.

Desvantagens:

- as sondas possuem características de análise limitadas;
- baixa probabilidade de detecção (POD);
- requer sistema automatizado para grandes varreduras; e
- consome enorme tempo para inspeção de grandes superfícies.

### 5.8.2 – Técnica por *phased array*

Vantagens:

- alta probabilidade de detecção (POD), aumentando a produtividade e a qualidade;
- redução enorme do tempo de inspeção;
- reduz a necessidade de automações complexas;
- possibilidade de registros de todos os resultados dos ensaios; e
- possibilidade de visualização e encaminhamento de resultados por computador.

Desvantagens:

- alto custo do equipamento e das sondas; e
- difícil acesso a regiões de forma geométrica complexa.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pelas técnicas dos ensaios convencional e *phased array*, pode-se concluir:

- 1- As normas e especificações do segmento aeroespacial permitem o uso da técnica *phased array*;
- 2- A detectabilidade das descontinuidades pela técnica *phased array* alcançou os mesmos resultados da técnica convencional e em alguns casos até superiores, inclusive para descontinuidades localizadas em diferentes profundidades. As sondas com maior número de elementos permitem que se obtenha uma probabilidade de detecção de descontinuidades maior do que na técnica convencional, com um efeito de borda muito menor, possibilitando uma área maior de varredura;
- 3- O poder de resolução da técnica *phased array* foi superior à técnica convencional, apresentado na detecção de corrosão;
- 4- A rapidez do ensaio é o ponto mais vantajoso da técnica *phased array*, chegando a ser dez vezes maior do que na técnica convencional;
- 5- A possibilidade de registro do ensaio é uma grande vantagem da aplicação da técnica *phased array*. As normas não citam essa técnica, mas permitem o registro e o armazenamento eletrônico dos resultados;
- 6- O alto custo do equipamento, das sondas e a forma geométrica de algumas peças são uma limitação da técnica *phased array*;
- 7- A técnica *phased array* pode ser empregada no segmento de aeronáutica e espaço, com grandes vantagens sobre a técnica convencional.

## Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Estudo completo para aquisição e automatização do equipamento *phased array*.
- Análise de todos os tipos de sondas para o ensaio de peças com formas geométricas complexas, para melhor desenvolvimento das utilizações e limitações.
- Estudos para o desenvolvimento de sondas *phased array* menores, que possam ser adaptadas a regiões de difícil acesso.
- Efetuar um estudo detalhado dos módulos de ensaio por correntes parasitas *phased array* e por ultrassom, para verificação dos pontos comuns, tendo em vista que o equipamento básico é o mesmo.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, ABENDI. Revista ABENDI nº 24. **NOS 58 desenvolve norma para o setor aeronáutico.** Fev 2008.

\_\_\_\_\_. ABENDI. 2009. Disponível em: <http://www.abendi.org.br>. **Correntes Parasitas.** Acesso em 18 jun 2009.

ALVES. L., **Grafite sob um olhar microscópico.** Canal do educador, estratégia Brasil escola. 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, ASNT E.T.B. - **Electromagnetic Testing Book**, USA, 2006.

\_\_\_\_\_. SNT-TC-1A – **Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing, recommended practice**, 2006.

\_\_\_\_\_. N.T.H. - Nondestructive Testing Handbook. **Eddy current, flux leakage and microwave nondestructive testing**, Third edition, volume four. USA 2004. 536 p.

AEROSPACE MATERIAL SPECIFICATION, AMS STD 2154 – **Inspection, Ultrasonic, Wrought Metals, process for.** SAE – Society of Automobile Engineers, 2005.

AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, ANAC, **Instrução de Aviação Civil - IAC 3146**, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, ASM **Handbook Nondestructive Evaluation and Quality Control**, Volume 17, 9<sup>th</sup> edition, USA, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15548:2008, Ensaio Não Destrutivo - **Correntes Parasitas – Procedimento de ensaio para o setor aeronáutico.** Primeira edição, 2008.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 8859:2005, **Ensaio Não Destrutivo – Correntes Parasitas – terminologia.** Segunda edição, 2005.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR ISO 1000:2006 – **Unidades SI e recomendações para o uso dos seus múltiplos e de algumas outras unidades.** 2006.

\_\_\_\_\_. ABNT NM ISO 9712:2007 – **Ensaio Não Destrutivo, qualificação e certificação de pessoal.** 2007.

\_\_\_\_\_. ABNT/ONS-58, Projeto 58:000.13-001 – **Ensaio Não Destrutivos – Terminologia. Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados.** 2009.

BANCZEK, M.; TERADA, M.; ASSIS, S.; COSTA, I. **Caracterização eletroquímica da liga de alumínio AA 2024 com filme de moléculas auto organizáveis.** 18º Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais. Pernambuco, Brasil. 2008.

BLITZ, J. **Electrical and magnetic methods of Nondestructive Testing.** Editora Chapman and Hall, ISBN – 0-412-79150-1, second edition, 1997. 261 p.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, CIMM. **Pontos de corrosão localizada.** Informativo 20.08.2009.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL, DCTA. **Operação CUMÃ II – O foguete de sondagem VSB 30.** 2008.

\_\_\_\_\_./IFI – Instituto de Fomento e Coordenação Industrial. **Ensaio Não Destrutivos, Qualificação no Ensaio por Correntes Parasitas, nível 1,** 2006a.

\_\_\_\_\_./IFI - Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. **Ensaio Não Destrutivos, Qualificação no Ensaio por Correntes Parasitas, nível 2,** 2006b.

DUTRA, L. **Tratamentos térmicos de ligas de alumínio.** Fórum tecnomateriais, propriedades mecânicas. 2003.

**ELETROMAGNETISMO.** Colégio São Francisco, portal São Francisco, ondas eletromagnéticas, leis fundamentais. 2009.

FERREIRA, E. **Ciência e tecnologia dos materiais.** Engenharia da produção, Univates, Universidade Vale do Taquari de Educação e Desenvolvimento Social. 2007.



GATINEAU, Q. G. **Advanced manual for: eddy current test method**. Can/CGSB-48.14-M86. Canadian General Standards Board, 1996.

**GE Inspection Technologies & Sensing**. Soluções em END. USA, Abril 2009. 1 CD ROM.

GOLDEMBERG, J. **Curso de física. Eletromagnetismo**. Ference J., Lemon, S. Editora Edgard Blucher Ltda.1998.

HARVEY, E. D. **Eddy current testing theory and practice**. 76 p. ISBN 0-57117-007-3. 1995.

LAMARRE, A.; GOLDBERGER, H. Ensaio com a técnica de eddy current array. **Revista ABENDI** nº 23, Novas tecnologias de END: criar ou aperfeiçoar. Dez 2007.

MENDEZ, P.; EAGAR, T. New trends in welding in the aeronautic industry. **2<sup>nd</sup> Conference of new manufacturing trends**. Bilboa, Espanha, 2002.

MILITARY HANDBOOK, HDBK 728/2 – **Military handbook eddy current testing**. Department of defense. USA. 1992. 52 p.

NATIONAL AEROSPACE STANDARD, NAS 410. Aerospace industries association of America. **Certification and qualification of nondestructive testing personnel**. Revision 3. 2008. 22p.

NERIS, M. M. **Soldagem dos metais – defeitos em operações de soldagem**. Universidade Santa Cecília. Agosto 2008.

OLYMPUS Innovation in Nondestructive Testing. **Eddy current and ultrasonic phased array equipments**. 2008.

POLIMETER. **Ensaio não destrutivo**., Comércio e representação Ltda. Rohmann GmbH. Catálogo de equipamentos e acessórios. 2009.

ROSSI, O. J., Metrologia e os ensaios não destrutivos – apresentação de um panorama. **Revista ABENDI** nº 33, agosto 2009. Ano VI.

SILVA, C. L. J., PARANHOS, R., Fissuração pelo hidrogênio – trincas a frio. **Infosolda** artigos. 2003.

SILVA, L. M. C. **Arquitetura de computadores - multiplexadores**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2008.

SILVA, M. C. **Vida em fadiga das ligas de alumínio AA 7175-T1**. FEI – Faculdade de Engenharia Industrial. 38 p. 2001.

SOLDAGEM E INSPEÇÃO. Associação Brasileira de Soldagem, volume 9, nº 2, p 48-55. **Solda por fricção**. FAPESP – Fundação de amparo à pesquisa do Estado de São Paulo. Junho 2004.

SOUZA, P. V.; RABELLO, J. M. A.; CARVALHO, A. A. Confiabilidade dos ensaios não destrutivos utilizando curvas POD. **Revista ABENDI**, Ano 6, nº 32, São Paulo. Junho 2009.

TECHNICAL ORDER TO 33B-1-1, NAVAIR - Nondestructive Inspection Methods. Basic Theory, chapter 4. **Eddy Current Inspection Method**, change C1. 2007.

VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE TERMOS FUNDAMENTAIS E GERAIS DE METROLOGIA, **VIM**, INMETRO 5ª edição. 71 p., 2007.