

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE REVESTIMENTOS DE
COMBUSTÍVEIS DE REATORES DE PESQUISA E TESTE
DE MATERIAIS UTILIZANDO O ENSAIO DE
CORRENTES PARASITAS**

DONIZETE ANDERSON DE ALENCAR

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores.**

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

São Paulo

2004

Aos meus amados pais, Odon e Nancy.

A minha querida esposa, Terezinha.

Aos meus filhos, Thaís e Rafael.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que deu-nos as nozes e permitiu-nos descobrir como quebrá-las.

Ao amigo e orientador Dr. Miguel Mattar Neto, pelas diretrizes seguras e pelo constante incentivo.

Ao Julio Cruz e Tanius Mansur, que abriram as primeiras trilhas.

Ao José Messias, Antônio Aguiar, Antônio Santiago, João Bosco, Daniel Braga, Pio Moreira, Geraldo Scoralick, Paulo de Tarso, Vlamir Caio e Márcia Sandinha, pela competência e sobretudo pelo formidável espírito de colaboração.

Ao Wilmar Ferraz, Amir Zacarias, Rose Mary Prado e Adolpho Soares, pela cessão de bibliografia e por todos os esclarecimentos.

Aos meus companheiros de jornada do Serviço de Integridade Estrutural do CDTN e “vizinhos do prédio 7”, pela troca de idéias, sugestões e incentivo.

Ao José Eduardo Silva, Michelângelo Durazzo, Antônio de Souza, Carlos Alexandre, Adalberto Soares e demais especialistas e servidores do IPEN, pela cooperação e solicitude.

Aos servidores da Unidade de Informação e Biblioteca do CDTN e da Biblioteca Terezine Arantes Ferraz do IPEN, pelo excelente atendimento.

À direção do CDTN, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À IAEA, pelo fundamental suporte ao desenvolvimento desta pesquisa, financiamento para participação em eventos e aquisição de equipamentos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele
conduz somente até onde os outros foram.”*

Alexander Graham Bell

RESUMO

É apresentada neste trabalho uma metodologia para avaliação não destrutiva de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais, dos tipos instalados nos reatores IPR-R1 (TRIGA) e IEA-R1 (MTR), utilizando o ensaio eletromagnético de correntes parasitas. Constituem esta metodologia: o desenvolvimento de padrões de referência para calibração específicos para cada tipo de combustível; o desenvolvimento de sondas de teste específicas para cada tipo de combustível; as recomendações para a calibração do sistema de ensaio; a obtenção de curvas de avaliação por amplitude de tensão e os procedimentos utilizáveis para a avaliação das descontinuidades detectadas. O desenvolvimento de sondas de teste, especialmente aquelas utilizadas na inspeção de revestimentos de combustíveis de reatores MTR, de difícil acesso em razão da pequena distância de separação (2,89 mm para o reator IEA-R1) entre suas placas, constituiu um desafio que exigiu a introdução de materiais e técnicas construtivas inovadoras. O desempenho operacional dos recursos desenvolvidos, bem como as características funcionais especiais das sondas de teste, especialmente sua imunidade a interferências resultantes das placas adjacentes e de variações de resistividade elétrica do núcleo dos combustíveis, são demonstradas experimentalmente. A aplicabilidade da metodologia desenvolvida é comprovada em ambiente não radioativo, em um corpo-de-prova especialmente construído, contendo descontinuidades artificiais de geometria e dimensões conhecidas e que reproduz parcialmente um combustível do tipo placa, semelhante àqueles fabricados no IPEN e utilizados no reator IEA-R1. Os resultados alcançados comprovam a eficácia da metodologia proposta.

ABSTRACT

A methodology to perform the integrity assessment of research reactors nuclear fuels cladding, such as those installed in IPR-R1 (TRIGA) and IEA-R1 (MTR), using nondestructive electromagnetic inspection (eddy current) is presented. This methodology is constituted by: the development of calibration reference standards, specific for each type of fuel; the development of special test probes; the recommendations for the inspection equipment calibration; the construction of voltage based evaluation curves and the inspection procedures developed for the characterization of detected flaws. The test probes development, specially those designed for the inspection of MTR fuels cladding, which present access difficulties due to the narrow gap between fuel plates (2,89 mm for IEA-R1), constituted a challenge that demanded the introduction of unusual materials and constructive techniques. The operational performance of the developed resources, as well as the special operative characteristics of the test probes, such as their immunity to adjacent fuel plates interference and electrical resistivity changes of the fuels meat are experimentally demonstrated. The practical applicability of the developed methodology is verified in non radioactive environment, using a dummy MTR fuel element model, similar to an IEA-R1 reactor fuel element, produced and installed in IPEN, São Paulo. The efficacy of the proposed methodology was verified by the achieved results.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Definição do tema	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivo, originalidade e aspectos relevantes da pesquisa	19
1.4 Organização do trabalho	20
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 Aspectos construtivos e operacionais de combustíveis utilizados em reatores de pesquisa e teste de materiais	22
2.1.1 Reator TRIGA IPR-R1	23
2.1.2 Reator MTR IEA-R1	27
2.2 Fundamentos e aplicações do ensaio eletromagnético de correntes parasitas	30
2.2.1 Geração de correntes parasitas	34
2.2.2 Aplicação de correntes parasitas como método de avaliação de integridade	45
2.2.3 Sistema básico de inspeção	46
2.2.4 Sondas de teste	48
2.2.5 Padrões de referência de calibração	50
2.2.6 Metodologias de calibração e avaliação	51
3 DESENVOLVIMENTO DE PADRÕES, SONDAS E CORPO-DE-PROVA	54
3.1 Apresentação da estratégia de desenvolvimento	54
3.1.1 Aspectos particulares à inspeção de reatores de pesquisa e testes de materiais	55
3.1.2 Infra-estrutura disponível	56
3.2 Desenvolvimento de padrões de referência para calibração	59
3.2.1 Padrões para combustíveis do tipo cilíndrico	59
3.2.2 Padrões para combustíveis do tipo placa	62

3.3	Desenvolvimento de sondas de teste	65
3.3.1	Sondas para combustíveis do tipo cilíndrico	69
3.3.2	Sondas para combustíveis do tipo placa	71
3.4	Obtenção das curvas de avaliação para combustíveis do tipo cilíndrico	75
3.5	Obtenção das curvas de avaliação para combustíveis do tipo placa	77
3.6	Metodologia de análise proposta para caracterização de descontinuidades	78
3.7	Desenvolvimento do corpo-de-prova para validação	81
4	RESULTADOS OBTIDOS	85
4.1	Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico	85
4.2	Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo placa	88
4.3	Verificação da imunidade da sonda desenvolvida para combustíveis do tipo placa às interferências geradas por placa adjacente	89
4.4	Verificação da imunidade das sondas às variações de resistividade elétrica do núcleo combustível	92
4.5	Validação experimental da metodologia desenvolvida	93
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	98
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	104
6.1	Conclusões	104
6.2	Recomendações e sugestões para trabalhos futuros	106
	ANEXOS	108
ANEXO A	Relatórios de metrologia dimensional	108
ANEXO B	Detalhes construtivos das sondas desenvolvidas	119
ANEXO C	Parâmetros de ensaio, tabelas de dados e curvas de avaliação obtidas para os padrões de referência construídos	122
ANEXO D	Tabelas de dados e curvas de caracterização para as descontinuidades existentes no corpo-de-prova	131
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Caracterização metrológica dimensional das descontinuidades usinadas para combustíveis do tipo cilíndrico	60
2 Caracterização metrológica dimensional das descontinuidades usinadas para combustíveis do tipo placa	65
3 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 5C)	76
4 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 5P)	78
5 Dados obtidos para a falha número 1	96
6 Dados obtidos para a falha número 6	97
C1 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 1C)	123
C2 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 2C)	124
C3 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 3C)	125
C4 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 4C)	126
C5 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 1P)	127
C6 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 2P)	128
C7 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 3P)	129
C8 Valores de amplitude e profundidade obtidos (grupo 4P)	130
D1 Dados obtidos para a falha número 2	131
D2 Dados obtidos para a falha número 3	132
D3 Dados obtidos para a falha número 4	133
D4 Dados obtidos para a falha número 5	134

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Vista geral do reator IPR-R1	24
2 Conjunto núcleo/refletor do reator TRIGA IPR-R1	24
3 Elemento combustível de reator tipo TRIGA	25
4 Dimensões de um elemento combustível do reator TRIGA IPR-R1	26
5 Vista geral do núcleo reator IEA-R1	27
6 Aspecto de elemento combustível do reator IEA-R1	28
7 Seqüência típica empregada na construção de combustíveis do tipo placa	29
8 Campo magnético formado em uma bobina	32
9 Geração de correntes parasitas	34
10 Representação do plano complexo	38
11 Rotação do vetor Z no plano complexo	39
12 O plano complexo de impedância	41
13 Distribuição de densidade de correntes parasitas com a profundidade	42
14 Rotação de fase em função da profundidade	43
15 Distribuição de correntes parasitas num material eletricamente condutor	44
16 Variações de impedância no plano complexo	45
17 Variação da impedância da sonda pela presença de uma falha superficial	46
18 Diagrama de blocos de um sistema básico para a inspeção	47
19 Sistema de ensaio MAD8D	48
20 Principais tipos de interconexões de sondas	49
21 Padrão de referência de calibração típico (sulcos)	50
22 Sinais referentes aos sulcos de 1,0 mm (a), 0,5 mm (b) e 0,2 mm (c)	52
23 Curva de avaliação típica para sulcos superficiais	52
24 Equipamento de usinagem por eletro-erosão	57
25 Laminador SUNDWIG instalado no CDTN	58
26 Laminação de combustível no CCN (IPEN)	58
27 Ferramentas construídas e utilizadas na construção de padrões do tipo cilíndrico	61
28 Três etapas: laminação, usinagem de descontinuidade e conformação	61

29	Conjunto de padrões do tipo cilíndrico	62
30	Representação do processo empregado na montagem de padrões do tipo placa.	63
31	Conjunto de placas antes da colagem	63
32	Descontinuidades usinadas do tipo sulco	64
33	Descontinuidades usinadas do tipo orifício	64
34	Interface de projeto do programa CalCOILS	68
35	Tela de ajuda mostrando algumas fórmulas empregadas	68
36	Representação esquemática da sonda desenvolvida (combustível cilíndrico).	70
37	Detalhes internos da sonda desenvolvida antes do encapsulamento	70
38	Aspecto final da sonda desenvolvida	71
39	Representação esquemática da sonda para combustíveis do tipo placa	72
40	Detalhes internos do protótipo da sonda (placa)	73
41	Aspecto interno da segunda sonda construída para combustíveis tipo placa	73
42	Detalhes do sensor de compensação	74
43	Aspecto do carretel do sensor ativo	74
44	Aspecto final da sonda para construída para combustíveis do tipo placa	75
45	Curva de avaliação 5C (f_0 : 80 kHz)	77
46	Curva de avaliação 5P (f_0 : 280 kHz)	78
47	Fluxograma de caracterização para perdas de espessura e descontinuidades	80
48	Esquema construtivo do corpo-de-prova	81
49	Placas constituintes do corpo-de-prova antes da colagem	82
50	Demais partes que constituem o corpo-de-prova	83
51	Aspecto final do corpo-de-prova construído	84
52	Sinais referentes aos padrões de referência 14C, 19C e 20C	86
53	Sinais referentes aos padrões de referência 14C, 15C e 16C	87
54	Variação de níveis de tensão contínua em função da espessura do revestimento.	87
55	Sinais registrados para os padrões de referência 4P, 7P e 8P	88
56	Sinais registrados para os padrões de referência 10P, 13P, e 14P	89
57	Representação da primeira aquisição de dados (a) e sinal adquirido correspondente (b)	90

58	Representação da segunda aquisição de dados (a) e sinal adquirido correspondente (b)	91
59	Arranjo empregado na operação de varredura	94
60	Aspecto da montagem empregada nos experimentos de validação	95
61	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 1	96
62	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 6	97
63	Comportamento do sistema para falhas superficiais afastadas	99
64	Erros de caracterização para a falha número 1	101
65	Tensão medida em função da posição relativa sensor-falha	102
B1	Diagrama contendo as dimensões principais da carcaça para sonda de teste construída para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico	119
B2	Desenho (<i>lay-out</i>) de circuito impresso para a sonda (combustíveis tipo cilíndrico)	120
B3	Diagrama contendo as dimensões principais da carcaça para sonda de teste construída para ensaio de combustíveis do tipo placa	121
B4	Desenho (<i>lay-out</i>) de circuito impresso para a sonda (combustíveis tipo placa)	121
C1	Curva de avaliação 1C (f_0 : 80 kHz)	123
C2	Curva de avaliação 2C (f_0 : 80 kHz)	124
C3	Curva de avaliação 3C (f_0 : 80 kHz)	125
C4	Curva de avaliação 4C (f_0 : 80 kHz)	126
C5	Curva de avaliação 1P (f_0 : 280 kHz)	127
C6	Curva de avaliação 2P (f_0 : 280 kHz)	128
C7	Curva de avaliação 3P (f_0 : 280 kHz)	129
C8	Curva de avaliação 4P (f_0 : 280 kHz)	130
D1	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 2	131
D2	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 3	132
D3	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 4	133
D4	Gráfico de caracterização obtido para a falha número 5	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanics Engineers
ASNT	American Society of Non-Destructive Testing
AWG	American Wire Gage
CCN	Centro do Combustível Nuclear do IPEN
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DC	<i>Direct Current</i> (CC- Corrente Contínua)
ECT	Eddy Current Technology
EDM	<i>Electric-discharge machining</i> - (Usinagem por Eletro-erosão)
END	Ensaio não Destrutivo
HEU	<i>High Enrichment Uranium</i> (Urânio com Alto Enriquecimento)
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i> (Padrão Internacional para Cobre Recozido)
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> (AIEA- Agência Internacional de Energia Atômica)
IEA-R1	Reator de Teste de Materiais Instalado no IPEN
INFCE	<i>International Nuclear Fuel Cycle Evaluation</i> (Programa Internacional de Avaliação do Ciclo de Combustível Nuclear)
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo
IPR-R1	Reator de Pesquisa Instalado no CDTN
LEU	<i>Low Enrichment Uranium</i> (Urânio com Baixo Enriquecimento)
MTR	<i>Materials Test Reactor</i> (Reator de Testes de Materiais)
OFP	Orifício de Fundo Plano
OP	Orifício Passante
ODSCC	<i>Outer Diameter Stress Corrosion Crack</i> (Trincas Circunferenciais Externas Geradas por Corrosão sob Tensão)
PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Polivinil Clorídrico ou Cloreto de Polivinila)
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> (Reator a Água Pressurizada)

RERTR	<i>Reduced Enrichment of Research and Test Reactors</i> (Programa de Redução de Enriquecimento de Reatores de Pesquisa e Teste)
SFP	Sulco de Fundo Plano
SI	Sistema Internacional de Unidades (<i>International System of Units</i>)
SP	Sulco Passante
TRIGA	<i>Training, Research, Isotopes - General Atomics</i> (Reator nuclear de treinamento e pesquisa)
US-DOE	<i>United States – Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére (unidade de corrente elétrica)
A	Altura do enrolamento (no projeto de bobinas)
A	Seção transversal de uma bobina
\vec{B}	Densidade de fluxo ou Indução magnética
\vec{B}_0	Indução magnética no vácuo
d	Profundidade de penetração padrão
dB	Decibel
D	Diâmetro interno (no projeto de bobinas)
E	Extensão de uma descontinuidade
F	Frequência de teste
f_o	Frequência ótima (canal principal)
f_a	Frequência auxiliar (canal auxiliar)
\vec{H}	Campo magnético (ou força magnetizadora)
\vec{H}_p	Campo magnético primário
\vec{H}_s	Campo magnético secundário
H	Henry (unidade de indutância)
Hz	Hertz (unidade de frequência ou ciclos/segundo)
i_o	Densidade de corrente superficial
i_x	Densidade de corrente para uma distância x
I	Corrente elétrica
I_o	Corrente máxima
j	Unidade imaginária sendo: $j^2 = -1$
l	Comprimento
L	Indutância
m	Metro
n	Número de espiras (no projeto de bobinas)
P_e	Profundidade estimada de falha
P_x	Posição horizontal de uma falha
P_y	Posição vertical de uma falha

R	Resistência elétrica
R_{fc}	Relação frente/costas
s	Segundo (unidade de tempo)
S	Siemens (unidade de condutividade elétrica)
t	Tempo
U	Tensão elétrica ou diferença de potencial
U_{ind}	Tensão induzida
U_o	Tensão máxima
V	Volt (unidade de tensão elétrica)
V_a	Amplitude de sinal medido no canal auxiliar de teste
V_c	Amplitude de sinal adquirido com a sonda posicionada de costas
V_f	Amplitude de sinal adquirido com a sonda posicionada de frente
V_p	Amplitude de sinal medido no canal principal de teste
V_{pp}	Volt pico a pico
V_x	Componente horizontal de sinal num monitor complexo
V_y	Componente vertical de sinal num monitor complexo
W	Espessura de um revestimento
W	Watt (unidade de potência elétrica)
x	Distância (para correntes induzidas em materiais)
x	Parte real de um número complexo Z
X	Fator de forma (no projeto de bobinas)
X_L	Reatância indutiva
Z	Impedância complexa
α	Rotação de fase padrão
Φ	Fluxo magnético
Φ_P	Fluxo magnético primário
Φ_S	Fluxo magnético secundário
μ	Permeabilidade magnética total
μ_o	Constante de permeabilidade magnética no vácuo
μ_{rel}	Permeabilidade magnética relativa
ρ	Resistividade elétrica
σ	Condutividade elétrica
ω	Velocidade angular ($2\pi f$)
Ω	Ohms (unidade de resistência elétrica)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do Tema

Reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais são ferramentas da física e da engenharia que vêm sendo utilizadas em todo o mundo há mais de meio século. Foram construídas neste período 675 unidades, das quais 278 encontram-se em operação, distribuídas por 59 países, verificando-se que houve uma grande concentração de instalações entre a década de 50 e a década de 70 (IAEA, 1995). No Brasil podem ser mencionados, dentre outros, os reatores: IEA-R1 - tipo MTR - instalado no IPEN e IPR-R1 - tipo TRIGA- instalado no CDTN. Estes reatores estão em atividade há mais de 40 anos e vêm sendo utilizados em pesquisas e testes de materiais, treinamento de operadores de centrais nucleares e produção de radioisótopos. São instalações que operam sob condições especiais, incluindo-se radiações ionizantes, estando pois sujeitas a desgastes e à ocorrência de falhas em suas partes constituintes.

Particularmente críticos são seus combustíveis, constituídos por um núcleo que contém material físsil e um revestimento, geralmente uma liga de alumínio ou aço inoxidável, que garante sua integridade e estabilidade estrutural (Hausner e Schumar, 1959). Encontram-se na forma de barras cilíndricas individuais (TRIGA) ou de placas ou de cascas cilíndricas finas, agrupadas em arranjos, denominados *elementos* (MTR). Falhas e acidentes podem ocorrer com os combustíveis durante sua fabricação, manuseio ou operação, com reflexos nos revestimentos tais como: alterações geométricas, perdas de espessura localizadas, corrosões superficiais, etc. (Silva, 2001).

Tais reatores são regularmente monitorados e inspecionados (Kopelman, 1959) por meio de procedimentos tais como: testes de *Sipping* (Perrotta et al., 1997), testes de varredura gama (Zeituni, 1998), análises químicas (Aguida e Ting, 2000), monitoração radiológica e ensaios de inspeção visual (Silva et al., 2001). Os quatro primeiros são úteis na detecção e investigação de falhas já ocorridas e orientam as tomadas de decisão subsequentes, de caráter *corretivo*. O ensaio de inspeção visual permite a observação do estado de integridade das diversas partes constituintes dos reatores e em especial dos seus combustíveis, contribuindo na tomada de decisões de caráter *preventivo*, visando evitar a

ocorrência de falhas e suas conseqüências. Observe-se todavia, que a aplicação deste ensaio restringe-se às superfícies externas, acessíveis e visíveis ao sistema de inspeção. Nos reatores TRIGA é possível o exame de toda a superfície dos revestimentos. Nos reatores MTR, a aplicação do ensaio é limitada, não sendo possível a observação direta das superfícies das placas internas. Este ensaio de inspeção visual vem sendo realizado periodicamente em reatores de pesquisa e teste de materiais instalados no Brasil (Alencar e Silva Júnior, 2000) (Silva et al., 2001).

Um valioso método de inspeção não destrutiva utilizado para o controle de qualidade de materiais e verificação de integridade de componentes e equipamentos, que vem sendo largamente empregado na indústria, em especial nos setores nuclear e aeroespacial (Stegmann, 1987) (HARTZELL PROPELLER INC., 1994) é o ensaio por correntes parasitas (ASNT, 1986). Aplica-se a materiais eletricamente condutores e é especialmente indicado para a detecção e caracterização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais (até cerca de 5 mm de profundidade). Entre suas aplicações clássicas podem ser mencionadas: a inspeção de tubos instalados em geradores de vapor de usinas núcleo-elétricas e a inspeção de trocadores de calor industriais. Especificamente na área de combustíveis nucleares, este ensaio é aplicado no controle de qualidade de fabricação de tubos de Zircaloy, utilizados em reatores tipo PWR (Alencar e Silva Júnior, 1996).

Para sua realização, são empregadas sondas e equipamentos específicos (ECT INC., 1999) (ZETEC INC., 1992), além de padrões de referência para calibração, uma vez que o processo de avaliação de falhas é comparativo. Como ocorre em outros ensaios, pode haver limitações para algumas aplicações. Ocorrendo problemas de geometria, localização ou dimensão dos objetos de ensaio, que possam dificultar ou até impedir o acesso das sondas de teste aos locais a inspecionar, desenvolvimentos especiais deverão ser conduzidos, de modo a viabilizar a execução da inspeção.

1.2 Justificativa

Ante às restrições encontradas nos atuais procedimentos de inspeção de revestimentos de combustíveis nucleares de reatores de pesquisa e teste de materiais, considerou-se que o desenvolvimento de metodologias alternativas, que representem avanços na capacidade de detecção e melhoria na capacidade de avaliação de sua integridade, representa uma contribuição inédita e importante para melhorar seu nível de confiabilidade e segurança operacional.

Para reatores que utilizam combustíveis do tipo cilíndrico, tal desenvolvimento contribuirá para uma melhor caracterização das falhas existentes na superfície externa de seus revestimentos e para a detecção de descontinuidades volumétricas sub-superficiais, não detectáveis pelos sistemas de ensaio atualmente disponíveis.

No caso dos reatores que utilizam combustíveis do tipo placa, a possibilidade de investigação do estado de integridade dos revestimentos das placas internas, cujo espaçamento é reduzido (inferior a 2,9 mm para o reator IEA-R1) representa uma contribuição importante.

Os produtos deste trabalho poderão, também, ser aplicados como ferramentas de investigação de combustíveis falhados ou estocados e, ainda, adaptados para utilização no controle de qualidade de fabricação de combustíveis.

1.3 Objetivo, Originalidade e Aspectos Relevantes da Pesquisa

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia de inspeção, que permita avaliar a integridade dos revestimentos de combustíveis nucleares de reatores de pesquisa e teste de materiais, por meio do ensaio eletromagnético de correntes parasitas. São apresentados: o projeto e o desenvolvimento de padrões de referência para calibração; o projeto e o desenvolvimento de sondas específicas e as metodologias propostas para calibração do sistema de teste e para avaliação das descontinuidades volumétricas, quando detectadas. A aplicabilidade da metodologia é demonstrada em um corpo-de-prova, em ambiente não radioativo.

Diversas dificuldades apresentam-se para o desenvolvimento proposto e sua aplicação. As sondas de teste desenvolvidas devem ter características construtivas para operar em ambiente submerso e suportar os efeitos de degradação por radiações ionizantes. Para o ensaio de revestimentos de combustíveis do tipo placa, as sondas devem ter pequena espessura e estabilidade mecânica adequada para alcançar pontos remotos dos combustíveis, imunidade às interferências geradas pela proximidade de placas adjacentes e imunidade às variações de resistividade elétrica do núcleo. Para tanto, foram utilizados materiais de baixo custo e processos construtivos não usuais, como circuitos impressos. O desenvolvimento de condições otimizadas de operação do sistema de testes, especialmente a frequência de operação e a incorporação de processos eficazes de blindagem eletromagnética, permitiu minorar ou isolar as interferências indesejáveis.

Consultas realizadas nas bibliotecas do IPEN e do CDTN e em bases de dados tais como: INIS-IAEA, NRC e outras, além de sistemas de busca na Internet, não indicaram nenhum estudo semelhante para reatores de pesquisa e testes de materiais.

Trata-se pois de proposta inédita, aplicável aos elementos combustíveis de reatores tipo TRIGA e MTR, tais como o reatores: IPR-R1 - instalado no CDTN e IEA-R1 instalado no IPEN.

É importante destacar as dificuldades inerentes ao desenvolvimento proposto e sua aplicação, principalmente aquelas relacionadas com as características construtivas das sondas de teste e as particularidades da inspeção em ambiente submerso e radioativo, que foram superadas com a aplicação de métodos de fabricação e materiais específicos.

1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos que abrangem dois temas de interesse para a pesquisa. Inicialmente, são abordados os aspectos construtivos e operacionais de reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais e em especial de seus combustíveis. Em seguida, mostram-se os fundamentos do ensaio eletromagnético por correntes parasitas, equipamentos de teste e seu modo de operação, tipos e detalhes construtivos de sondas e padrões de referência e métodos de calibração e análise.

No Capítulo 3, descrevem-se os métodos empregados no desenvolvimento dos padrões de referência para calibração e sondas de teste para os dois tipos de combustíveis considerados neste trabalho. Os detalhes construtivos do corpo-de-prova para validação da metodologia de avaliação de integridade proposta são apresentados. A infra-estrutura disponível no IPEN e no CDTN, assim como demais detalhes relativos aos processos de fabricação e materiais utilizados são destacados. Focam-se especialmente as soluções propostas para superar as dificuldades que se apresentam para as condições de realização do ensaio, em particular para reatores do tipo placa. Descreve-se a metodologia de análise e caracterização, baseada na correlação entre as amplitudes de tensão dos sinais registrados para padrões de referência e aquelas correspondentes às discontinuidades ou falhas detectadas. Mostram-se ainda os critérios e regras para seleção das curvas de avaliação adequadas, bem como a utilização de frequência de teste auxiliar, como método para identificação de localização (superficial ou sub-superficial) de falhas detectadas.

Os resultados obtidos são mostrados no Capítulo 4. O desempenho das sondas de teste desenvolvidas para ensaio de combustíveis dos tipos cilíndrico e placa, semelhantes aos instalados nos reatores IPR-R1 e IEA-R1, respectivamente, é demonstrado. Suas características funcionais especiais, em particular a imunidade às interferências resultantes de placas adjacentes e, ainda, às variações de resistividade elétrica do núcleo do combustíveis, são demonstradas. A aplicabilidade da metodologia de avaliação de integridade dos revestimentos de combustíveis nucleares proposta é comprovada experimentalmente, em ambiente não radioativo, em um corpo-de-prova que reproduz parcialmente um combustível do tipo placa.

No Capítulo 5, são discutidos os resultados obtidos. Mostram-se os pontos positivos alcançados com os recursos e métodos desenvolvidos, destacando-se a eficácia da metodologia de avaliação de integridade proposta e experimentalmente validada. Por outro lado, como em outros ensaios não destrutivos, verifica-se que os processos de caracterização de falhas detectadas estão sujeitos à ocorrência de erros e imprecisões. Neste contexto, discutem-se suas principais causas e analisam-se seus efeitos. Por fim, apresentam-se as limitações observadas quando da aplicação do ensaio em um corpo-de-prova para validação.

Apresentam-se, no Capítulo 6, as conclusões extraídas da realização deste trabalho, assim como as recomendações para futuros desenvolvimentos e melhorias, dentro do tema pesquisado, à luz da experiência adquirida.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Aspectos Construtivos e Operacionais de Combustíveis Utilizados em Reatores de Pesquisa e Teste de Materiais

Os processos físicos relacionados com a fissão nuclear, seus efeitos sobre os materiais e suas propriedades são objetos de estudo da física. Em Lamarsh e Baratta (2001), dentre outros autores, podem ser encontrados os fundamentos sobre os quais se assentam a tecnologia e os produtos da engenharia nuclear. Neste Capítulo, procurou-se destacar aqueles aspectos diretamente relacionados com a construção e a utilização dos combustíveis empregados em reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais.

Desde a década de 40, reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais vêm sendo construídos e instalados em todo o mundo, permitindo a formação de cientistas e técnicos, assim como a condução de pesquisas em diversas áreas da ciência e da engenharia nuclear (IAEA, 1995). A faixa de potência destes reatores é ampla, indo de menos de 30 kW até 125 MW (US-DOE, 1995). De uma maneira geral, os combustíveis utilizados nestas instalações são constituídos por um núcleo (*meat*), composto por materiais físséis e férteis, onde ocorrem as reações nucleares. Para garantir sua integridade e estabilidade estrutural, estes combustíveis possuem um revestimento (*cladding*), constituído geralmente por uma liga de alumínio ou aço inoxidável (Hausner e Schumar, 1959).

Na fabricação de combustíveis, os principais materiais físséis utilizados são: U-235, U-233, Pu-239 e Pu-241. Quanto aos materiais férteis, podem ser citados: U-238, Th-232 e Pu-240. A maioria dos reatores de pesquisa e testes de materiais em operação utiliza U-235 como material físsil (Smith, 1967). Os materiais do núcleo encontram-se geralmente na forma de óxidos, hidretos ou silicetos dispersos numa matriz de pó de alumínio ou aço inoxidável. Em termos de enriquecimento, podem ser encontrados combustíveis com até 93% de U-235, mas valores próximos a 20% são os mais freqüentes. Esta constatação está em parte associada a programas como o *International Nuclear Fuel Cycle Evaluation* – INFCE (IAEA) ou o *Reduced Enrichment of Research and Test Reactors* – RERTR (US-DOE), que têm como objetivo desenvolver as tecnologias necessárias para reduzir valores

de enriquecimento de combustíveis maiores ou iguais a 20% (*High enrichment uranium – HEU*), para valores menores que 20% (*Low enrichment uranium – LEU*) (Perrotta, 1996) (IAEA, 1988), bem como qualificá-los. Essencialmente, tais iniciativas visam o direcionamento do uso da energia nuclear para fins pacíficos.

Os combustíveis utilizados nestes reatores, apresentam significativas diferenças, tais como: tipo de material físsil, percentual de enriquecimento, composição do núcleo, composição do revestimento e geometria. Particularmente quanto à geometria, podem ser mencionados os seguintes tipos principais (MacPhee et al., 1960):

- Tubulares (*Tubes*);
- Feixe de varetas (*Pin bundle / Pin cluster*);
- Cilíndricos (*Rods*);
- Placa (*Plate*);
- Casca (*Shell*).

Neste trabalho apresentam-se aspectos construtivos e operacionais relativos aos combustíveis utilizados nos reatores: IPR-R1, instalado no CDTN e IEA-R1, instalado no IPEN.

2.1.1 Reator TRIGA IPR-R1

O Reator IPR-R1 é um reator TRIGA, modelo MARK I, fabricado pela empresa norte americana Gulf General Atomic, projetado para operar a até 30 kW de potência em regime contínuo e até 100 kW em regime intermitente (Gulf General Atomic, 1958, 1960). Na FIG. 1 apresenta-se uma vista geral desta instalação.

Este reator atingiu sua primeira criticalidade em 1960. É refrigerado a água leve desmineralizada, que funciona também como moderador e blindagem biológica. Ao final da década de 60, modificações introduzidas permitiram sua operação a 100 kW em regime contínuo (Santos, 1997) (CDTN, 2000). Atualmente, outras modificações estão sendo introduzidas visando sua elevação de potência para 250 kW (Veloso, 1999) (Mesquita et al., 2002). A configuração atual do seu núcleo compreende 5 anéis concêntricos, contendo 63 elementos combustíveis e 23 elementos de grafita

(CDTN, 2003). O núcleo do reator, conforme representado na FIG. 2, fica envolvido por um refletor anular também de grafita.

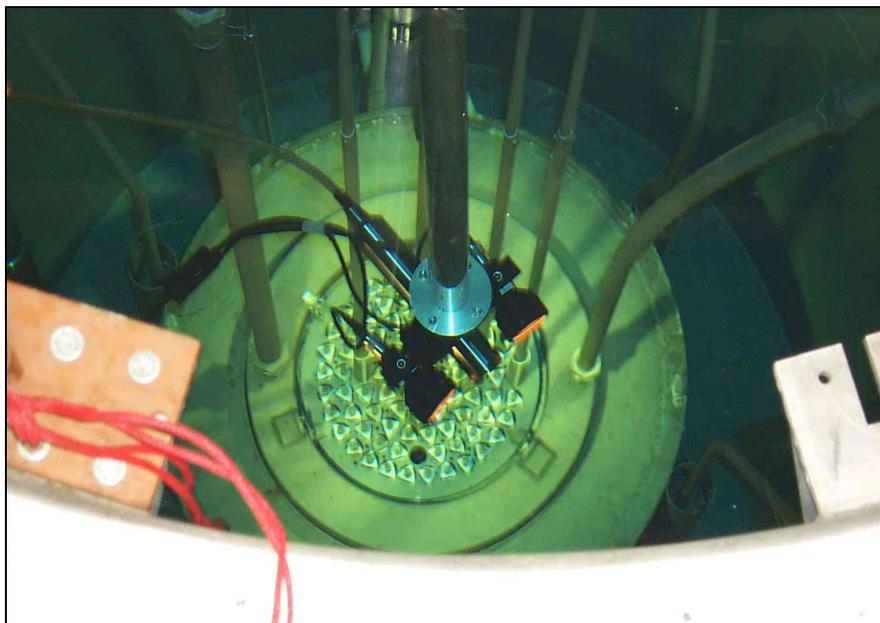


Figura 1. Vista geral do reator IPR-R1 (Alencar e Silva Júnior, 2000).

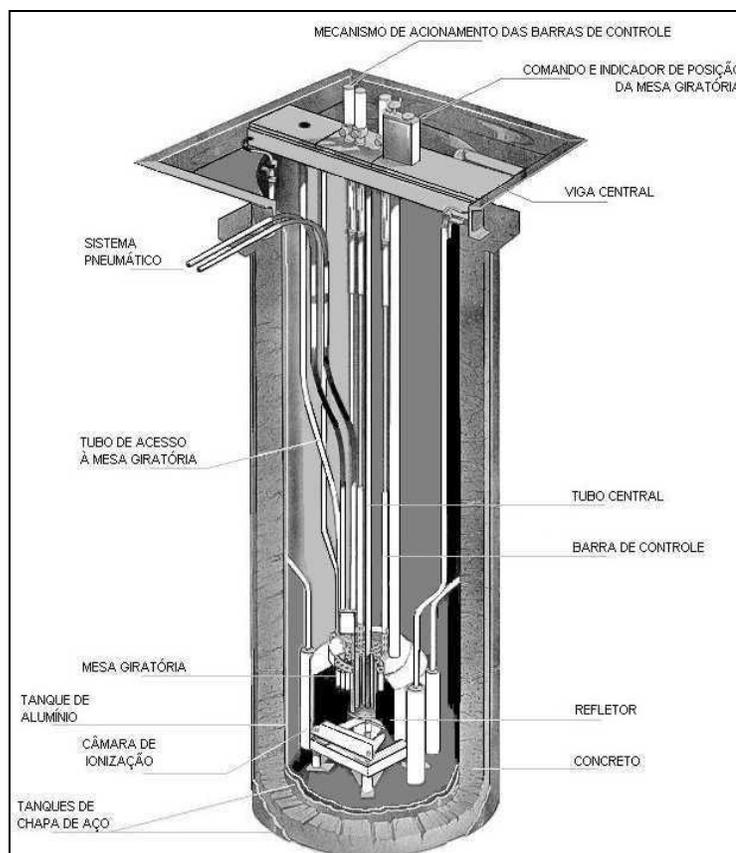


Figura 2. Conjunto núcleo/refletor do reator TRIGA IPR-R1 (CDTN, 2003).

O conjunto núcleo/refletor encontra-se submerso e assentado sobre uma base de alumínio afixada ao fundo de um tanque cilíndrico, com 1,92 m de diâmetro interno e 6,63 m de altura. Este tanque é revestido internamente com a liga de alumínio AA-5052-H34 (Gulf General Atomic, 1960).

Nos reatores TRIGA, os combustíveis têm a forma de barras cilíndricas individuais. Suas dimensões variam em função do modelo. Para os reatores modelo MARK I, a altura total é de 720,6 mm. Na FIG. 3 podem ser observados detalhes dos componentes utilizados na sua fabricação. Na parte inferior, podem ser vistos: o núcleo combustível, segmentado em três seções; um disco separador e dois cilindros de grafita. No centro podem ser vistos os componentes: revestimento (*cladding*) e os pinos superior (*top end-fixture*) e inferior (*bottom end-fixture*). Na parte superior vê-se o aspecto de um elemento montado.



Figura 3. Elemento combustível de reator tipo TRIGA (General Atomics, 2004).

No reator IPR-R1 (TRIGA - MARK I), o combustível é composto por: urânio (8% em peso); zircônio (91% em peso) e hidrogênio (1% em peso). O enriquecimento nominal em U-235 é de 20%. O núcleo do combustível é um cilindro sólido de U-ZrH, com diâmetro de 35,6 mm e comprimento de 355,6 mm. O revestimento é feito com a liga de alumínio 1100F, na forma tubular, com espessura nominal de 0,76 mm.

Dois refletores cilíndricos de grafita, com 101,6 mm de comprimento e mesmo diâmetro do combustível estão posicionadas abaixo e acima da região ativa, separados desta por dois discos de alumínio, impregnados de óxido de samário, que constitui o veneno queimável (*burnable poison*) cuja espessura é de 1,3 mm. Completam o conjunto um pino superior e um inferior, também construídos em alumínio. Mais detalhes e dimensões são vistos na FIG. 4.

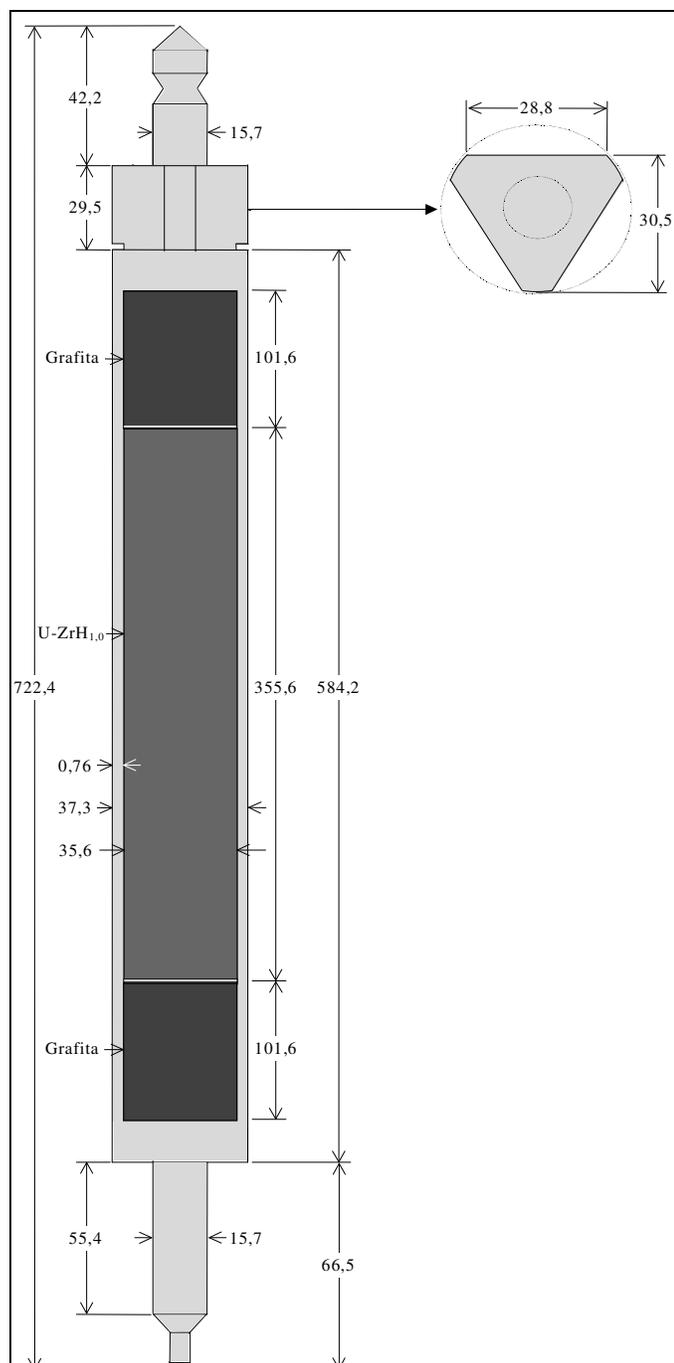


Figura 4. Dimensões de um elemento combustível do reator TRIGA IPR-R1 (Veloso, 1999).

2.1.2 Reator MTR IEA-R1

O reator IEA-R1 (MTR), instalado no IPEN, foi fabricado pela empresa norte americana Babcock & Wilcox Company. É refrigerado a água leve desmineralizada e está em operação desde 1957 (IPEN, 2001). Sua potência máxima de projeto é de 5 MW. O aspecto geral de seu núcleo, em operação, pode ser observado na FIG. 5.

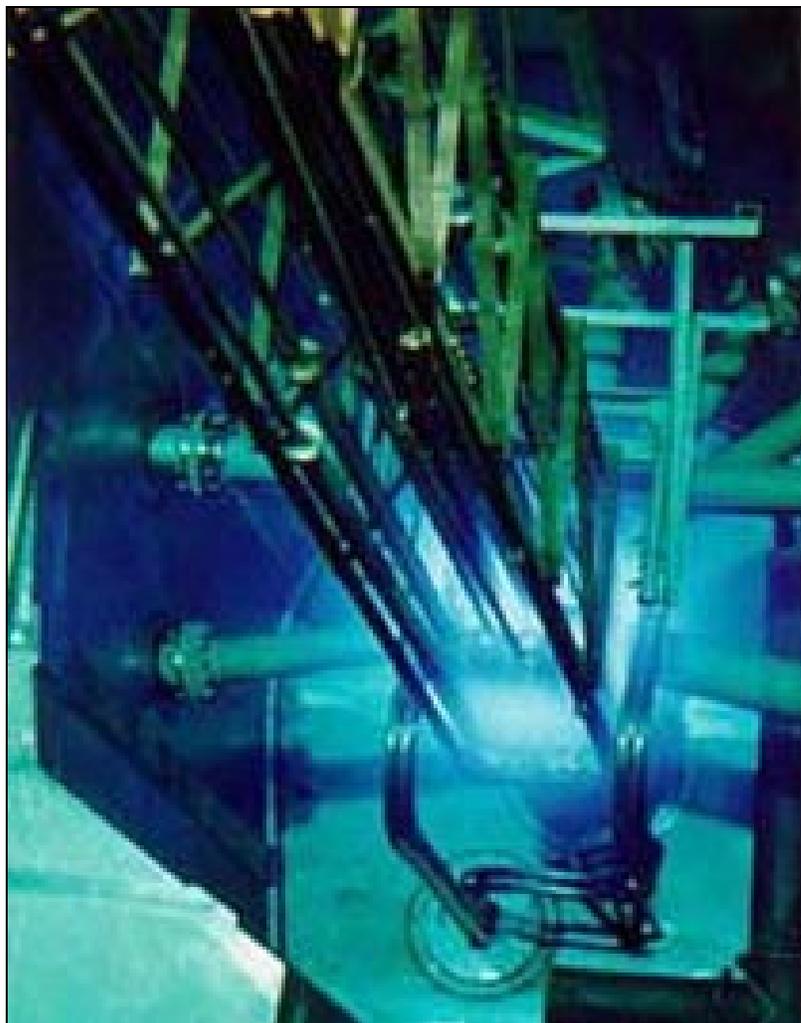


Figura 5. Vista geral do núcleo do reator IEA-R1 (IPEN, 2001).

Segundo Frajndlich (2004), a configuração atual de seu núcleo compreende 24 elementos combustíveis (sendo 4 de controle), 20 elementos refletores de grafita e 10 elementos refletores de berílio. O IPEN fabrica os elementos combustíveis que utiliza neste reator. Cada elemento combustível padrão é composto por 18 placas (16 internas e 2 externas) e pelos componentes estruturais, a saber: 1 bocal, 2 suportes laterais, 2 parafusos

de fixação e 1 pino de sustentação (Silva, 2003). Na FIG. 6 mostra-se o aspecto de um combustível construído.



Figura 6. Aspecto de elemento combustível do reator IEA-R1 (IPEN, 2004).

Diversos materiais são utilizados na sua fabricação, sendo de interesse para este trabalho a liga de Al-1060 (em chapas), utilizada na fabricação de revestimentos e molduras, a liga de Al-1100 (em pó), utilizada na fabricação de briquetes e o óxido de urânio (U_3O_8) calcinado e enriquecido a 20% (em pó), utilizado na fabricação de briquetes. O siliceto de urânio (U_3Si_2) tem sido também empregado na fabricação de briquete.

No recebimento destes materiais, para cada lote, diversas análises e ensaios são realizados (Silva, 2003). Para as ligas de alumínio, empregadas na fabricação de elementos estruturais, são feitas análises químicas para a determinação dos teores de impurezas e de alumínio total. Realizam-se também ensaios mecânicos, tais como: dureza, tensão de ruptura, tensão de escoamento e alongamento. Aplicam-se ainda ao combustível : medição de densidade (g/cm^3), medição da área de superfície específica (m^2/g), análise granulométrica, teor de umidade, teor de U total, teor de U-235 e fração dos gases H e N.

A fabricação das placas combustíveis compreende inicialmente a obtenção de uma mistura ou dispersão dos pós de alumínio e de U_3O_8 calcinado. É feita em seguida a compactação mecânica da mistura, com a obtenção de briquetes. Um briquete típico contém cerca de 70,0 g de U_3O_8 e 41,5 g de alumínio. Suas dimensões nominais são: $4,20 \pm 0,10$ mm de espessura; $59,10 \pm 0,20$ mm de largura; $104,2 \pm 0,20$ mm de comprimento.

Ao final do processo de compactação, cada briquete é degaseificado. Todas estas etapas são desenvolvidas sob rígido controle de qualidade, incluindo-se o registro de parâmetros e a geração de documentação aplicável.

Cada placa combustível é construída por sucessivos passes de laminação, a quente e a frio, a partir de um arranjo constituído por 4 componentes: um briquete contendo a dispersão compactada e sinterizada de pó de alumínio e pó de U_3O_8 ; uma moldura e um par de placas laterais de alumínio. A espessura nominal obtida para o revestimento é de 0,38 mm. Para o núcleo (*meat*) este valor é de 0,76 mm. Logo, a espessura nominal de cada placa combustível é de $1,52 \pm 0,05$ mm.

Por meio de ensaios radiográficos, é delimitado o contorno do núcleo laminado. Por fim, por meio de cortes laterais, aparam-se os excessos existentes, obtendo-se a placa combustível no formato e nas dimensões de projeto.

Após a montagem final do conjunto que constitui um elemento, a distância nominal que separa placas adjacentes é de 2,89 mm. As dimensões finais de um elemento são: 76 mm x 79,9 mm x 875,0 mm. Na FIG. 7 está representada a seqüência típica utilizada na construção destes combustíveis.

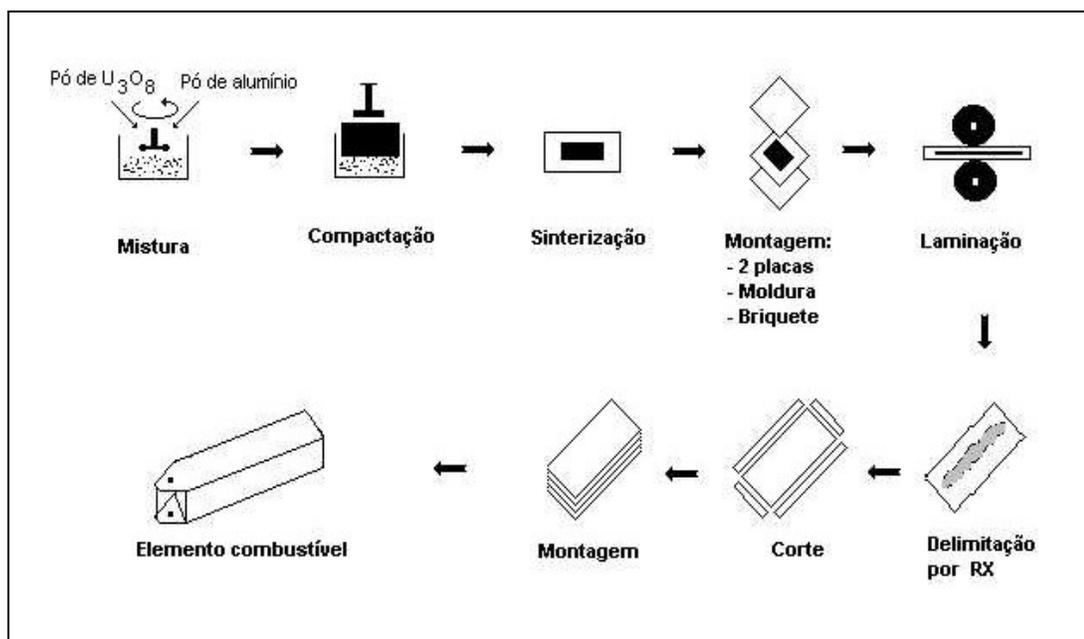


Figura 7. Seqüência típica empregada na construção de combustíveis do tipo placa.

São gerados, para todos os processos relacionados com a fabricação dos combustíveis, relatórios dos ensaios aplicáveis (dimensionais, análises químicas, radiográficos, etc. Assim, é possível garantir sua qualidade e conformidade com as especificações estabelecidas.

Uma importante etapa deste processo é a qualificação. Um combustível é considerado como qualificado quando pode ser demonstrado que o mesmo consegue atingir a queima especificada em seu projeto, sem apresentar falhas. A IAEA faz recomendações neste sentido (IAEA, 1988). No caso do IPEN foi adotada a chamada “qualificação operacional”, realizada no próprio reator IEA-R1 (Perrotta, 1996). Isto ocorre devido a atual inexistência, no IPEN, de um laboratório de células quentes. A qualificação se dá pela irradiação do combustível no núcleo do reator, inicialmente na periferia, com posteriores remanejamentos. São realizadas inspeções visuais periódicas e a água da piscina é constantemente monitorada.

De uma maneira geral, as condições de operação tais como: temperatura, pressão, vazão de refrigerante, etc., para a maioria dos reatores de pesquisa, são consideravelmente menos severas do que aquelas encontradas em reatores de potência. No reator IPR-R1, experimentos realizados (Rezende, 1995) permitiram levantar informações relacionadas com seu comportamento térmico, para várias condições de operação. Foram registrados valores de temperaturas compreendidos entre 21° C e 32° C, para potências de operação de 50 e 100 kW. A pressão máxima no refrigerante é basicamente função da altura da coluna d’água no poço do reator, que é de aproximadamente 6 metros. Para o reator IEA-R1, as temperaturas encontradas chegam a até 37° C, a pressão máxima no refrigerante alcança o equivalente a 9 metros de coluna d’água.

2.2 Fundamentos e Aplicações do Ensaio Eletromagnético de Corrente Parasitas

As chamadas correntes parasitas (*eddy currents*) foram constatadas experimentalmente pela primeira vez por Jean Foucault, em 1825, quando investigava fenômenos de indução eletromagnética (ASNT, 1986). Por esta razão, são também conhecidas como correntes de *Foucault*, que têm sido objeto de constantes investigações por parte da física e da eletrotécnica. Se por um lado provocam efeitos indesejáveis em máquinas elétricas, como a geração de calor, podem ser úteis como método de investigação de propriedades de materiais ou da integridade de peças e equipamentos industriais.

Como exemplo de aplicação, cita-se a inspeção de tubos de geradores de vapor de Centrais PWR, onde o ensaio por correntes parasitas é o principal método de inspeção empregado (MacDonald, et al., 1996), (US-NRC, 1975). Apresenta-se, a seguir, uma breve revisão dos princípios fundamentais e conceitos relacionados com as correntes parasitas, com base em Stegmann (1987).

Intensidade de um campo magnético ou força magnetizadora H

A formação de um campo magnético, por meio da circulação de uma corrente elétrica contínua, numa bobina de geometria regular, é representada na FIG. 8. Os segmentos de reta que passam pelo interior da bobina, numa mesma distância e em trajetórias paralelas, representam que nesta região o campo é homogêneo. A dispersão verificada a partir das extremidades da bobina, significa que nestas áreas o campo magnético torna-se não homogêneo. Descreve-se o campo magnético por uma grandeza vetorial denominada Intensidade de campo magnético ou força magnetizadora, \vec{H} , calculada como:

$$|\vec{H}| = H = \frac{I n}{l} \quad (1)$$

onde,

$|\vec{H}|$ é o módulo da intensidade do campo magnético ou força magnetizadora (**A/m**),

I é a intensidade da corrente (**A**),

n é o número de espiras da bobina e

l é o comprimento da bobina (m).

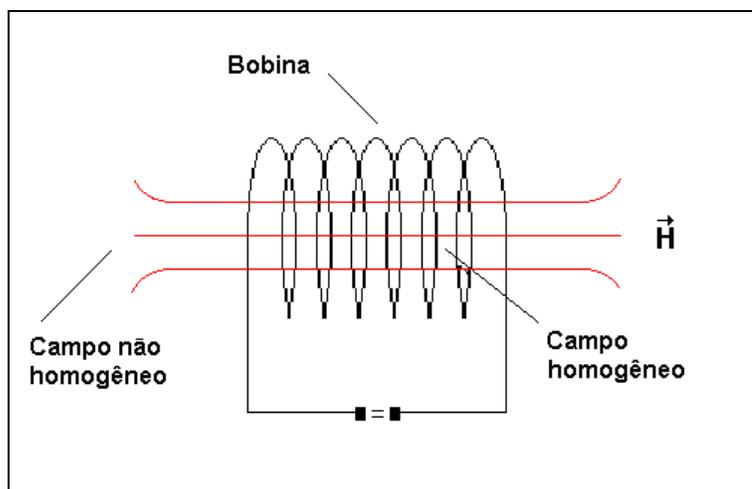


Figura 8. Campo magnético formado em uma bobina.

Fluxo magnético

Pode-se dizer que o fluxo magnético, Φ , é o conjunto de todas as linhas de força existentes no campo magnético de uma bobina, que atravessam uma superfície aberta escolhida como referência.

Lei de indução de Faraday

Se uma bobina composta por n espiras é atravessada perpendicularmente por um fluxo magnético cuja intensidade é variável no tempo, surge uma tensão elétrica, U_{ind} , induzida nos terminais da bobina, que pode ser calculada como:

$$U_{\text{ind}} = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Esta equação define a unidade do fluxo magnético, $V \cdot s$. Se o fluxo magnético total atravessa a seção transversal A da bobina, resulta a densidade de fluxo magnético ou Indução Magnética, \vec{B} , quando esta é homogênea e perpendicular à superfície escolhida, calculada como:

$$|\vec{B}| = B = \frac{\Phi}{A} \quad (3)$$

\vec{B} representa uma grandeza vetorial, pois sua intensidade é função da direção pela qual as linhas de força do campo penetram na seção A. A unidade de densidade de fluxo magnético é expressa em $V \cdot s / m^2$.

Permeabilidade magnética

A densidade de fluxo magnético, \vec{B} , depende da Intensidade do Campo Magnético, \vec{H} , e também das características magnéticas do material atravessado pelo fluxo Φ . Logo:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

onde,

μ é a permeabilidade total ($V \cdot s / A \cdot m$).

Se o material atravessado pelo fluxo magnético é o ar ou o vácuo é válida a expressão:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (5)$$

onde,

\vec{B}_0 é a densidade do fluxo magnético no vácuo e

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

No sistema internacional (SI):

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} H / m \quad (6)$$

onde,

H é a unidade de indutância, Henry, ($V \cdot s / A$).

Utiliza-se frequentemente o conceito de permeabilidade relativa μ_{rel} , equivalente ao quociente entre a permeabilidade total e a permeabilidade no vácuo:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (7)$$

No vácuo e no ar a permeabilidade total μ equivale a μ_0 , logo $\mu_{rel} = 1$. Pode-se então rescrever a equação (4) na forma:

$$\vec{B} = \mu_{rel} \mu_0 \vec{H} = \mu_{rel} \vec{B}_0 \quad (8)$$

2.2.1 Geração de Correntes Parasitas

O método de ensaio por correntes parasitas consiste, basicamente, na indução de correntes elétricas em materiais eletricamente condutores, por meio de um campo eletromagnético variável, gerado por uma bobina alimentada por uma fonte de corrente alternada, e na monitoração da interação entre as correntes induzidas e o material, como pode ser visto na FIG. 9.

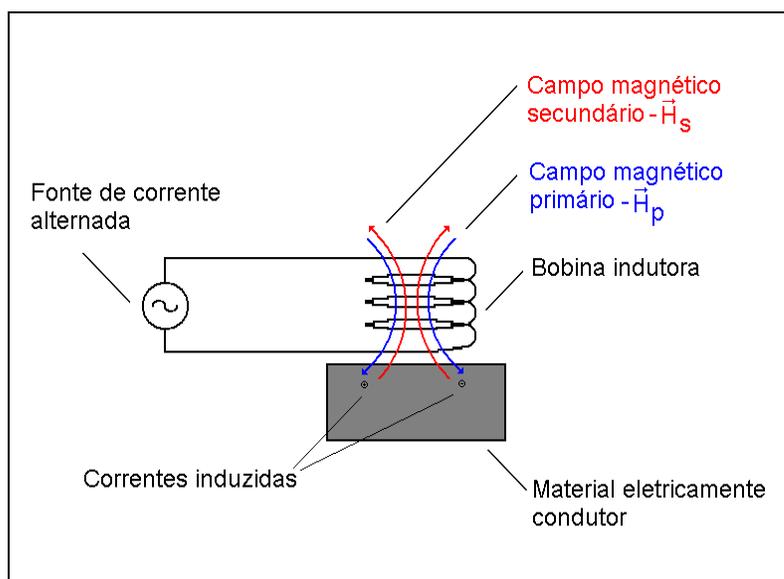


Figura 9. Geração de correntes parasitas.

A formação das correntes parasitas depende de três características do material a ser testado:

- Geometria ou forma;
- Condutividade elétrica (σ);
- Permeabilidade magnética (μ).

Verifica-se que a bobina indutora gera um campo magnético primário \vec{H}_p , que é responsável pela indução de correntes parasitas no material. Estas correntes geram um campo magnético secundário \vec{H}_s , de sentido contrário ao do campo primário. Os dois campos superpõem-se e determinam uma tensão resultante nos terminais da bobina.

A existência de falhas e descontinuidades ou a variação de condutividade elétrica ou de permeabilidade magnética podem ser interpretadas como não homogeneidade do material, e serão diretamente responsáveis pelo comportamento das correntes induzidas. Como fundamentalmente ocorrem induções segundo a lei de Faraday, pode-se afirmar que a indução da tensão de medição efetiva, U_m , na bobina é função da diferença Φ entre o fluxo magnético primário Φ_p e o fluxo magnético secundário Φ_s :

$$\Phi = \Phi_p - \Phi_s \quad (9)$$

Da equação (3), tem-se que $\Phi = B \cdot A$ e da equação (8), sabe-se que $\vec{B} = \mu_{rel} \mu_0 \vec{H}$. Então:

$$\Phi = \mu_{rel} \mu_0 \vec{H} A \quad (10)$$

A tensão de medição U_m , pode ser calculada combinando-se a equação da indução (2), e a equação (10) considerando-se $U_m = U_{ind}$ e desprezando-se o sinal negativo:

$$U_m = n \mu_{\text{rel}} \mu_o A \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (11)$$

Para uma bobina sem material em seu interior, o valor da tensão U_m pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$U_m = \frac{n^2 \mu_{\text{rel}} \mu_o A}{l} \frac{dI}{dt} = L \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

onde,

I é a corrente na bobina e

$$L = \frac{n^2 \mu_{\text{rel}} \mu_o A}{l} \quad \text{é a indutância da bobina.} \quad (13)$$

Modela-se satisfatoriamente uma bobina, como uma indutância L , em série com uma resistência R , cujo valor é função das propriedades físicas do fio que a constitui. A tensão U da bobina quando percorrida por uma corrente I compõe-se de fato do somatório de duas tensões: U_r , em acordo com a lei de Ohm e U_L , em acordo com a equação (12), ou seja:

$$U = R I + L \frac{dI}{dt} \quad (14)$$

Representando-se a tensão como uma função senoidal tem-se:

$$U = U_o \text{ sen } \omega t \quad (15)$$

onde,

U_0 é a tensão máxima (V),

$\omega = 2\pi f$ é a velocidade angular (radiano / s) e

f é a frequência de teste (Hz).

Circuitos elétricos do tipo RL (série) apresentam defasagem entre corrente e tensão. Pode-se expressar esta característica pela relação:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \alpha) \quad (16)$$

onde,

I_0 é o valor máximo da corrente (A) e

α é a diferença de fase entre a corrente e a tensão (radianos ou graus).

Circuitos RL podem ser representados por meio de números complexos e do plano complexo, como ilustrado na FIG. 10. Os números complexos representam-se pela forma:

$$Z = x + jy \quad (17)$$

onde,

Z é o número complexo,

x é a parte real e

jy é a parte imaginária.

Nesta figura o número complexo Z é um ponto do plano. A abcissa (x) equivale à parte real, e a ordenada (y) à parte imaginária de Z . A impedância é representada pelo segmento de reta que vai da origem até o ponto Z . Assim, é possível expressar Z em função do comprimento ou módulo de Z e da fase α , resultando:

$$x = |Z| \cos \alpha; \quad y = |Z| \operatorname{sen} \alpha; \quad |Z| = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (18)$$

Logo: $Z = |Z| (\cos \alpha + j \operatorname{sen} \alpha) \quad (19)$

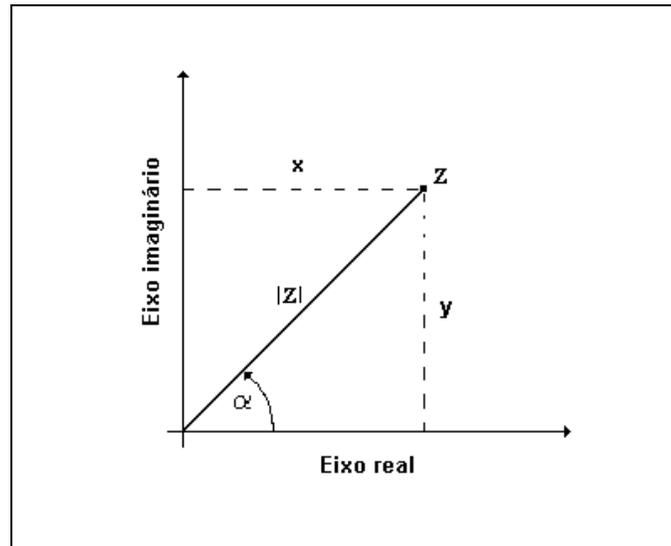


Figura 10. Representação do plano complexo.

Pode-se utilizar a fórmula de Euler:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \operatorname{sen} \alpha \quad (20)$$

Substituindo-a na equação (19), obtém-se:

$$Z = |Z| e^{j\alpha} \quad (21)$$

Na FIG. 11 faz-se $\alpha = \omega t$, o que leva o ponto Z a traçar um círculo, de raio $|Z|$, no plano complexo.

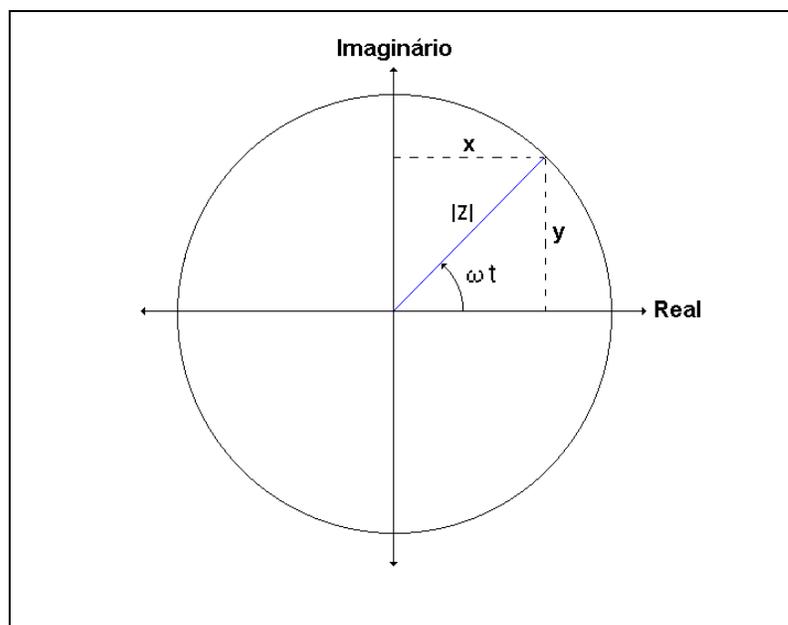


Figura 11. Rotação do vetor Z no plano complexo.

Diz-se que o vetor Z gira com velocidade angular constante. Projetando-se o movimento nos eixos do plano, tem-se:

$$x = |Z| \cos \omega t \quad (22)$$

$$y = |Z| \sen \omega t \quad (23)$$

Rescrevendo as equações (15) e (16), tensão e corrente podem ser representadas de modo análogo:

$$U = |U| e^{j\omega t} \quad (24)$$

$$I = |I| e^{j\omega t} \quad (25)$$

onde,

$$|U| = U_0 \text{ e}$$

$$|I| = I_0.$$

Substituindo as equações (24) e (25) na equação (14) utilizando-se:

$$\frac{dI}{dt} = j\omega |I| e^{j(\omega t - \alpha)} \quad (26)$$

obtem-se:

$$|U| e^{j\omega t} = |I| R e^{j(\omega t - \alpha)} + j\omega L |I| e^{j(\omega t - \alpha)} \quad (27)$$

Logo:

$$\frac{|U|}{|I|} e^{j\alpha} = R + j\omega L = Z \quad (28)$$

onde,

Z é a impedância complexa,

R é a resistência e

ωL é a reatância indutiva.

A representação destas grandezas no plano complexo de impedância pode ser vista na FIG. 12, correspondendo para a impedância Z :

$$Z = |Z| e^{j\alpha} \quad (29)$$

onde,

$$|Z| = \frac{|U|}{|I|} = (R^2 + (\omega L)^2)^{1/2} \quad (30)$$

Para a defasagem tem-se:

$$\text{tg } \alpha = \frac{\omega L}{R} \quad (31)$$

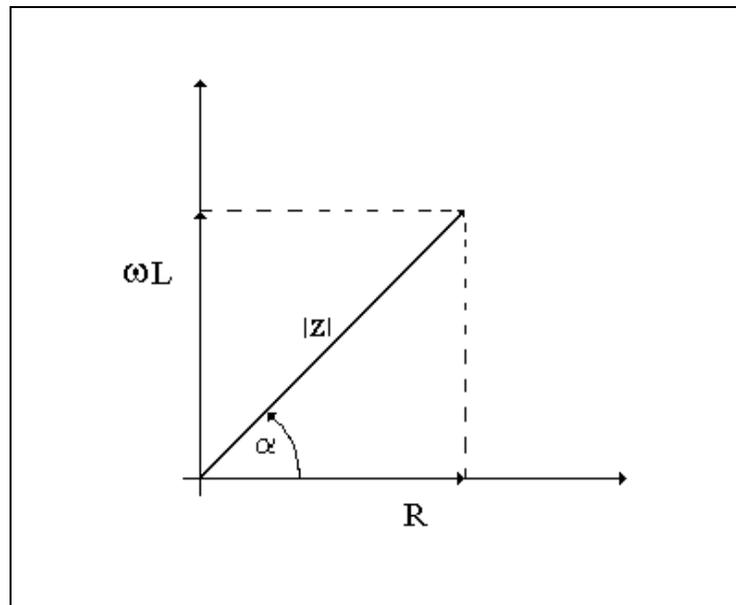


Figura 12. O plano complexo de impedância.

A distribuição das correntes parasitas induzidas num material eletricamente condutor não é uniforme. Na medida que nele penetram, diminui sua intensidade, como representado na FIG. 13. Observa-se que esta circulação é de natureza superficial ou sub-superficial. Este efeito é conhecido como efeito pelicular (*skin effect*). Quando a intensidade decresce para 36,8 % (ou $1/e$), diz-se que esta distância equivale a uma **profundidade de penetração padrão**, calculada como:

$$d = \frac{1}{2\pi (\mu_{\text{rel}} \sigma f 10^{-7})^{1/2}} \quad (32)$$

onde,

d é a profundidade de penetração padrão (mm),

μ_{rel} é Permeabilidade magnética (H/m),

σ é a condutividade elétrica (m / $\Omega \cdot \text{mm}^2$) e

f = Frequência de teste (Hz ou s^{-1}).

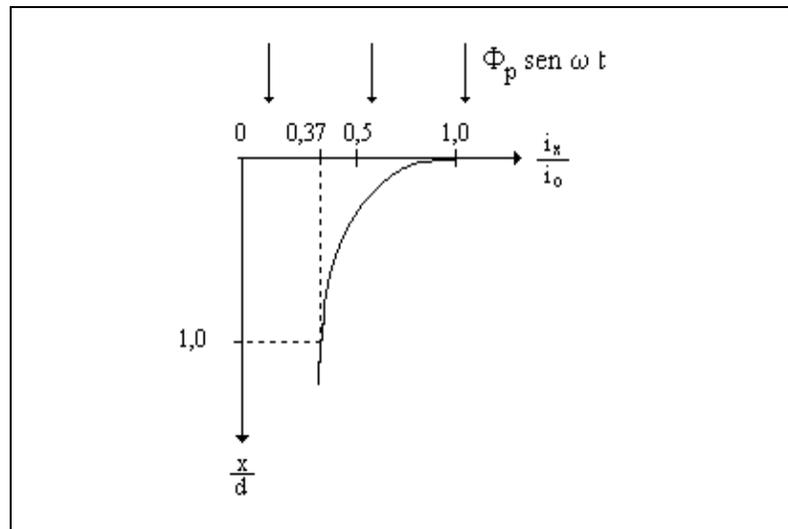


Figura 13. Distribuição de densidade de correntes parasitas com a profundidade.

Ocorre também uma defasagem contínua das correntes induzidas com a profundidade, como representado na FIG. 14. Este efeito é denominado rotação de fase. A rotação de fase, α , entre a corrente na superfície e a corrente numa profundidade x , é calculada pela relação:

$$\alpha = \frac{x}{d} \quad (\text{radianos}) \quad (33)$$

ou:

$$\alpha = 57 \frac{x}{d} \quad (\text{graus}) \quad (34)$$

Quando a distância x é igual a uma profundidade de penetração padrão, d , diz-se que α equivale a uma *rotação de fase padrão*.

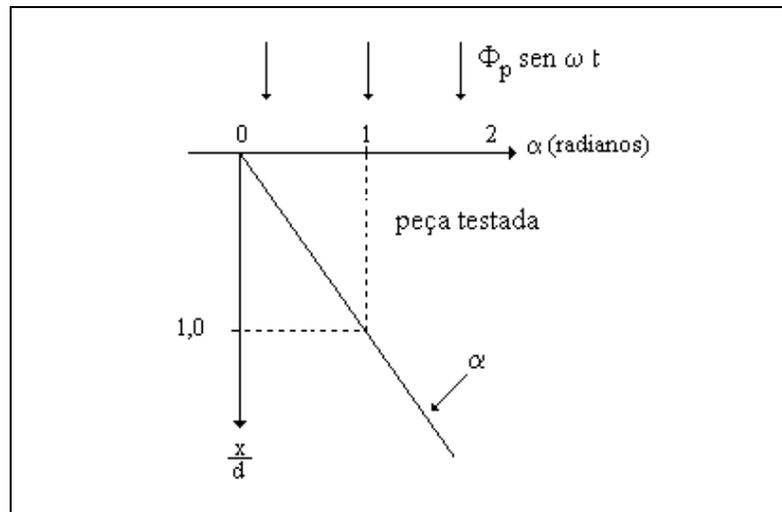


Figura 14. Rotação de fase em função da profundidade.

Analiticamente, a distribuição das correntes induzidas é calculada pela equação diferencial:

$$\nabla^2 i = \sigma \mu \frac{di}{dt} \quad (35)$$

onde,

i é a densidade de corrente,

σ é a condutividade elétrica,

μ é a permeabilidade magnética e

∇^2 é o operador de *Laplace* (segunda derivação de posição).

De acordo com Stegmann (1987), a solução desta equação, para um material eletricamente condutor, de volume semi-infinito, como representado na FIG. 15, é dada por:

$$i_x = i_0 e^{-\alpha} \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (36)$$

onde,

i_0 é a densidade das correntes na superfície do material testado,

i_x é a densidade de corrente no ponto x do material testado,

$\alpha = x / d$ é o valor do ângulo de fase e

d é a profundidade de penetração padrão.

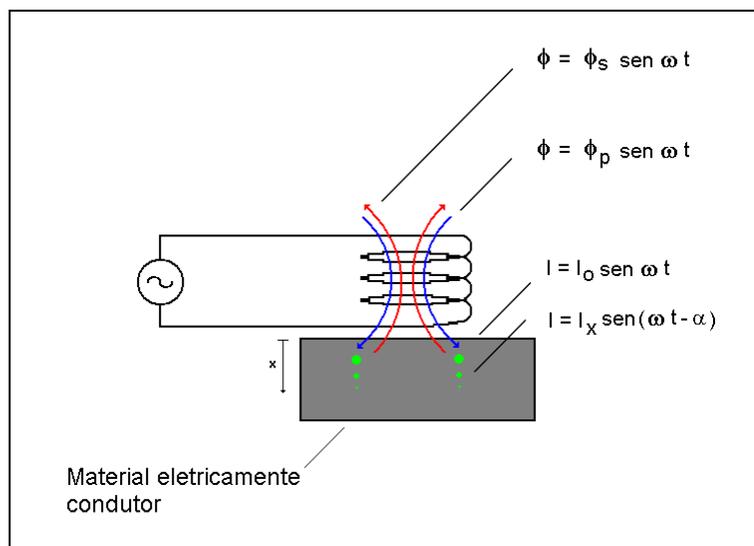


Figura 15. Distribuição de correntes parasitas num material eletricamente condutor.

Analisando-se a equação (36) ficam evidentes:

O enfraquecimento exponencial:

$$\frac{i_x}{i_0} \text{ é proporcional a } e^{-x/d} \quad (37)$$

O aumento do valor da fase:

$$\frac{i_x}{i_0} \text{ é proporcional a } \text{sen}(\omega t - x/d) \quad (38)$$

A ocorrência da rotação de fase é importante para a avaliação de discontinuidades no ensaio por correntes parasitas (ASME,1992). O sinal de medição pode ser representado no plano complexo de impedância. Esta forma de representação está exemplificada na FIG. 16, onde a bobina de uma sonda superficial tem sua impedância registrada em duas situações distintas. O ponto P_0 representa sua impedância, $R_0 + \omega L_0$, no ar. Ao ser aproximada da superfície do material testado a impedância se altera e é representada pelo ponto P_1 equivalente a $R_1 + \omega L_1$.

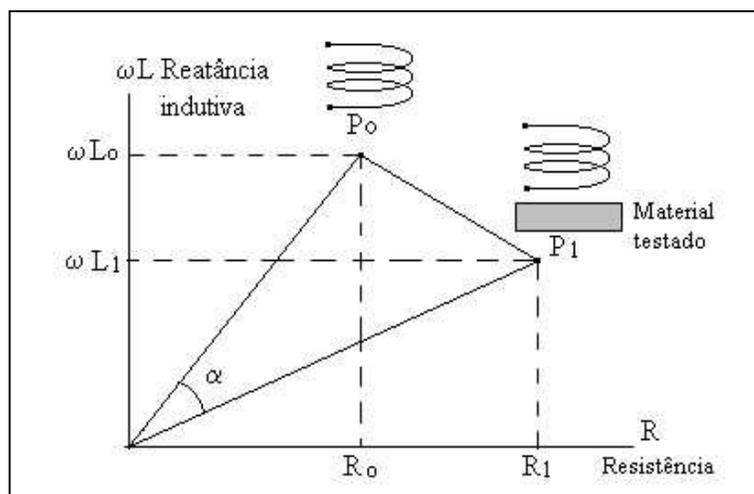


Figura 16. Variações de impedância no plano complexo.

2.2.2 Aplicação de Correntes Parasitas como Método de Avaliação de Integridade

Os sistemas de inspeção por correntes parasitas levam em conta que o valor da impedância complexa da bobina de indução varia conforme as perturbações sofridas pelas correntes parasitas induzidas num material sob teste.

A FIG. 17 ilustra a aplicação deste princípio para a detecção de discontinuidades em materiais. Numa condição inicial, uma sonda é posicionada sobre uma região homogênea de uma peça e assume um valor de impedância representado pelo ponto P_1 no plano complexo. Ao ser deslocada e ao passar por uma região cuja homogeneidade foi perturbada (pela presença de uma falha ou discontinuidade por exemplo), ocorre uma variação de impedância, representada pelo deslocamento do ponto P_1 até um ponto genérico P_2 . Com o deslocamento da sonda, até atingir nova região homogênea, o valor da impedância retorna ao ponto de origem.

A forma da trajetória percorrida pelo ponto no plano complexo dependerá da frequência de ensaio, das propriedades elétricas e magnéticas do material, das características construtivas da sonda de teste e do tipo de descontinuidade detectada.

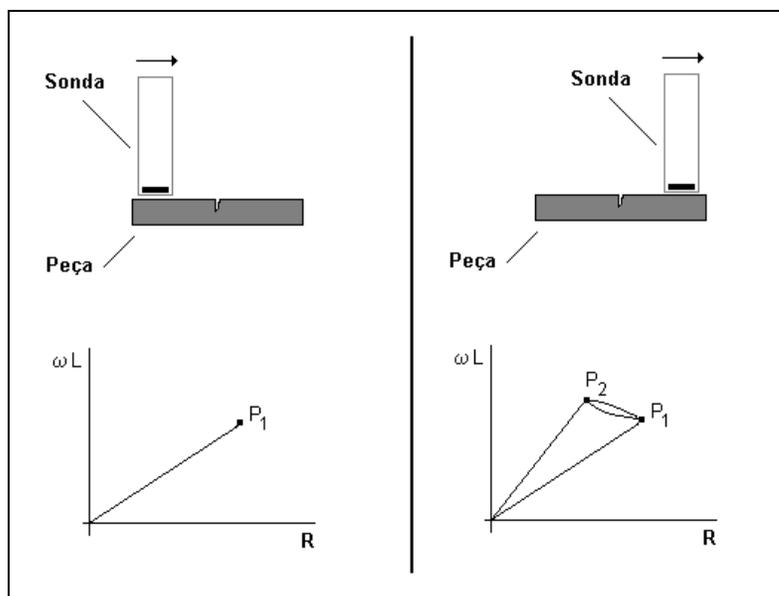


Figura 17. Variação da impedância da sonda pela presença de uma falha superficial.

2.2.3 Sistema Básico de Inspeção

Para sua aplicação prática, o ensaio por correntes parasitas requer o uso de equipamentos especialmente desenvolvidos. Suas características construtivas podem variar de acordo com os objetivos do teste. Para este trabalho, serão focalizados sistemas empregados na inspeção de tubos, barras e chapas metálicas (ECT INC., 1999).

Um arranjo básico, capaz de fornecer as condições elementares de operação, é composto por um conjunto onde um gerador de frequências trabalha como fonte de corrente alternada, alimentando uma sonda de teste cuja impedância complexa é continuamente medida e apresentada num dispositivo ou tela de apresentação, que reproduz o plano complexo de impedâncias.

Na FIG. 18, mostra-se o diagrama de blocos de um sistema de testes simples. Um bloco oscilador ou gerador alimenta uma sonda de teste com correntes alternadas, cuja frequência e intensidade podem ser escolhidas e ajustadas, para valores compreendidos tipicamente entre 50 Hz e 4 MHz. Este bloco fornece ainda sinais de referência para um circuito denominado demodulador síncrono.

Um amplificador de sinais, cujo ganho e sensibilidade podem ser ajustados, amplia os sinais detectados pela sonda, quando deslocada pela superfície interna ou externa do objeto sob teste. Após a amplificação, o circuito demodulador síncrono elimina a componente de frequência do sinal de teste e transforma os sinais detectados em duas componentes de tensão, denominadas como V_x e V_y . Em seguida, um bloco denominado circuito de rotação de fase modifica as inclinações do par, o que resulta noutro, $V_{x'}$ e $V_{y'}$. Por fim, estas componentes são registradas e exibidas na tela de um monitor complexo na forma de figuras de *Lissajous* (ASNT, 1986).

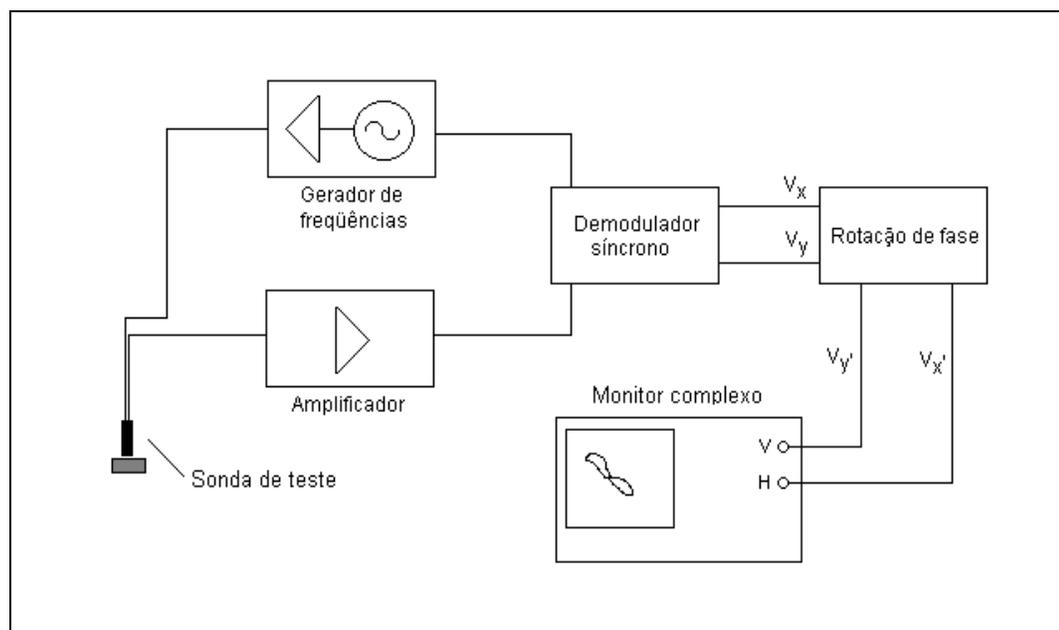


Figura 18. Diagrama de blocos de um sistema básico para a inspeção (ASNT, 1986).

Diversas empresas fabricam e fornecem equipamentos de teste. Podem ser citadas dentre outras: a ZETEC INC. (ZETEC INC., 1992), a EDDY CURRENT TECHNOLOGY INC. (ECT, 1999) e a HOCKING NDT LTD. (HOCKING LTD., 2003). Os sistemas atualmente disponíveis possuem mais de um canal de teste, o que possibilita o uso de frequências múltiplas, processos de filtragem e formas alternativas de apresentação e medição de sinais. São assistidos por computador e os sinais adquiridos podem ser gravados em disco e analisados com rapidez e precisão.

Na FIG. 19 pode-se observar o aspecto de um sistema de ensaio modelo MAD8D, fabricado pela empresa ECT Inc, sobre uma plataforma PC portátil.



Figura 19. Sistema de ensaio MAD8D (ECT INC., 1999).

2.2.4 Sondas de Teste

No ensaio por correntes parasitas, denomina-se como sonda de teste o dispositivo formado por uma ou mais bobinas, construídas com fios, geralmente de cobre esmaltado, adequadamente montadas em uma carcaça ou chassi (Cecco e Sharp, 1989). Para permitir sua conexão aos equipamentos de ensaio, o dispositivo possui ainda cabo(s) de ligação e conector(es). Para seu projeto e construção, levam-se em conta as características dimensionais e as propriedades físico-químicas dos objetos do teste (tubos, barras ou chapas). Partes adicionais podem ser incluídas para melhorar sua estabilidade mecânica, como por exemplo o uso de guias e calços para redução do efeito decolagem (*lift-off*) (Stegmann, 1987). Quanto à *geometria*, as sondas de teste podem ser classificadas em três categorias: *superficiais*, utilizadas principalmente na detecção de descontinuidades presentes em chapas planas, ou, adaptadas para o teste de superfícies curvas, internas e externas, em tubos; *internas*, utilizadas na detecção de descontinuidades presentes em tubos, inclusive instalados, como em trocadores de calor; *externas* (ou envolventes), utilizadas na detecção de descontinuidades presentes em tubos ou barras não instalados.

Segundo os *arranjos* e circuitos de ligação elétrica empregados, as sondas de teste podem ser classificadas como: *absolutas* e *diferenciais* (nome também dado à *técnica* empregada no ensaio). Sondas absolutas empregam somente uma bobina para a detecção dos sinais oriundos do teste, enquanto as sondas diferenciais, empregam duas bobinas,

ligadas em circuito diferencial. Nos dois casos, observa-se que a geração das correntes parasitas no material sob teste pode ser feita usando essas mesmas bobinas ou uma bobina em separado. Neste último caso, diz-se que a sonda induz correntes no material sob teste, no *modo emissor/receptor* (*send/receive*). Outra possibilidade, ainda relacionada como o modo de operação, é a ligação em *ponte*. Trata-se de uma ligação clássica em circuito ponte (Brophy, 1972), onde dois braços são resistores, de valor fixo (em geral 50 ohms) e os outros dois são compostos pelos enrolamentos das bobinas de ensaio.

Na FIG. 20 apresentam-se estes quatro tipos de combinações para sondas de teste operando com as técnicas absoluta e diferencial e nos modos emissor/receptor ou ponte (ECT, 1999). A primeira combinação apresenta uma sonda com enrolamentos emissor e receptores galvanicamente isolados. Os dois receptores são montados de modo a promover um cancelamento recíproco durante a detecção de sinais (técnica diferencial). A operação com a técnica absoluta, apresentada na segunda combinação, utiliza um único enrolamento detector. Para o terceiro caso, os dois enrolamentos são simultaneamente alimentados em tensão alternada e operam em ponte e no modo diferencial. De interesse especial para este trabalho, é a última combinação: circuito em ponte, operando com técnica absoluta, neste caso pseudo-diferencial, uma vez que num arranjo eletricamente diferencial, um enrolamento permanece sempre com um valor de impedância fixo ou de referência e o outro, ativo, detecta os sinais do teste.

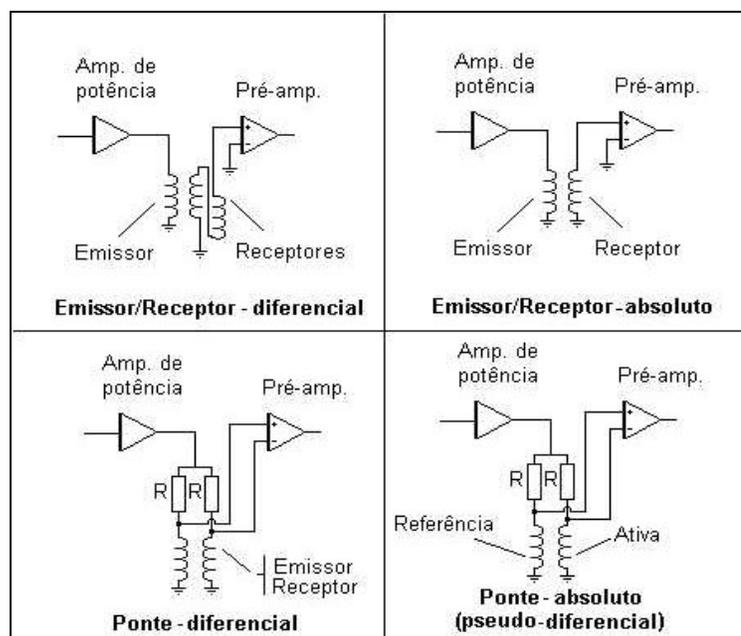


Figura 20. Principais tipos de interconexões de sondas (ECT INC., 1999).

Fabricantes de equipamentos são os principais fornecedores destes sensores, mas podem ser encontrados laboratórios na indústria, universidades e centros de pesquisa, aptos a desenvolver sondas de teste convencionais e especiais. No caso deste estudo, a experiência do autor e a competência disponível no Laboratório de Ensaio não Destrutivos do CDTN, onde trabalha, foram determinantes para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

2.2.5 Padrões de Referência de Calibração

O ensaio por correntes parasitas é um método não destrutivo comparativo. A avaliação das discontinuidades detectadas requer o uso de padrões de referência, métodos de calibração e critérios de correlação. De uma maneira geral, é recomendada a construção de discontinuidades artificiais tais como: sulcos planos e circunferenciais, orifícios de fundo plano, orifícios vazados, perdas de espessura, etc.

Neste contexto, as características geométricas e as propriedades físico-químicas e metalúrgicas dos padrões devem ser as mais próximas possíveis daquelas encontradas nos objetos reais de teste.

Para aplicações clássicas, tais como o exame de tubos instalados em equipamentos de troca térmica, a utilização de normas e códigos é exigida (ASME, 1992). Outra área de aplicação tradicional e que requer a utilização de padrões de referência para calibração é a de equipamentos e componentes aeronáuticos. É apresentado na FIG. 21 um padrão de referência de calibração típico, construído para a avaliação de trincas em chapas metálicas. Podem ser observados três sulcos, usinados com diferentes profundidades.

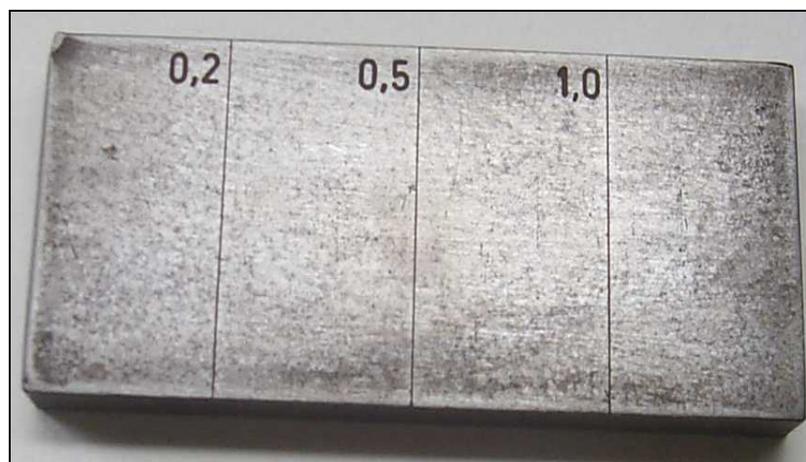


Figura 21. Padrão de referência de calibração típico (sulcos) (Silva Júnior e Alencar, 2003).

Na construção destes padrões de referência, os sistemas de usinagem e corte mais adequados são os que utilizam tecnologia de eletro-erosão (*electric-discharge machining - EDM*), pois praticamente não introduzem tensões ou deformações nos seus materiais constituintes (ELOX INC., 1976).

2.2.6 Metodologias de Calibração e Avaliação

Uma calibração consiste no estabelecimento de condições de operação, tais como: modo de operação da sonda de teste (absoluto ou diferencial), frequência, ângulo de fase, ganho e sensibilidade do sistema de testes, de modo a obter sinais, distintos em forma, resultantes da detecção das descontinuidades que constituem padrões de referência de calibração.

A partir do registro destes dados, são construídas curvas de avaliação que associam, por exemplo, valores conhecidos de profundidade a valores medidos de amplitude ou inclinação. O processo de caracterização de uma determinada descontinuidade detectada é obtido então, pela correlação entre o sinal a ela correspondente e outro, semelhante, encontrado na curva de avaliação aplicável, obtendo-se assim sua *profundidade estimada*.

Para a inspeção de tubos instalados em trocadores de calor, utilizando-se sondas de teste internas (*bobbin coils*), a resposta em variação de fase obtida para diferentes profundidades de descontinuidades existentes é geralmente expressiva (ASME, 1992). Aplicam-se os métodos de análise por fase (*phase based analysis*) (ASME, 1992).

Para revestimentos ou chapas metálicas delgadas, em geral, estes métodos de análise não são eficazes, uma vez que as variações de fase, quando ocorrem, são pequenas. Aplicam-se então os métodos de análise por amplitude de tensão (*voltage based analysis*), muito empregados em inspeções aeronáuticas (HARTZELL, 1994). Na área nuclear, estes métodos têm sido utilizados na caracterização de trincas circunferenciais externas em tubos de geradores de vapor, resultantes de processos de corrosão sob tensão (*ODSCC – Outer diameter stress corrosion cracks*), localizadas junto à região do espelho (US-NRC, 1995).

Na FIG. 22 mostram-se os sinais típicos obtidos para o padrão de calibração visto na FIG. 21 e inspecionado com sonda superficial diferencial. São apresentados: a) o sinal para o sulco de 1,0 mm de profundidade, b) o sinal para o sulco de 0,5 mm e c) o sinal para o sulco de 0,2 mm (Silva Júnior e Alencar, 2003).

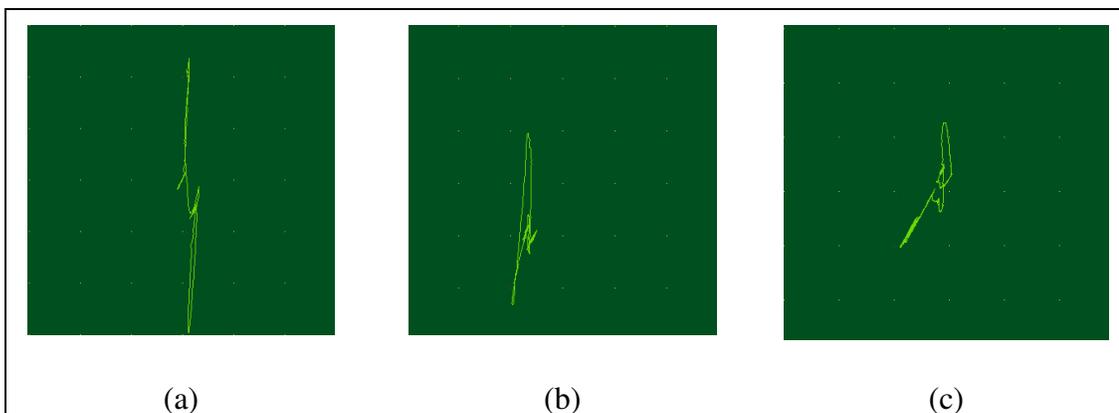


Figura 22. Sinais referentes aos sulcos de 1,0 mm (a), 0,5 mm (b) e 0,2 mm (c) (Silva Júnior e Alencar, 2003).

A curva de avaliação por amplitude de tensão correspondente pode ser vista na FIG. 23. Curvas de avaliação são geralmente obtidas por métodos de ajuste lineares (*linear fitting*), usualmente ligação de pontos (ASME, 1992). Uma vez efetuada a calibração do sistema de testes e levantada a curva de avaliação correspondente, pode-se proceder à inspeção dos objetos reais do ensaio (tubos, barras ou chapas), que evidentemente devem ter características e propriedades físicas e geométricas idênticas às do padrão de referência.

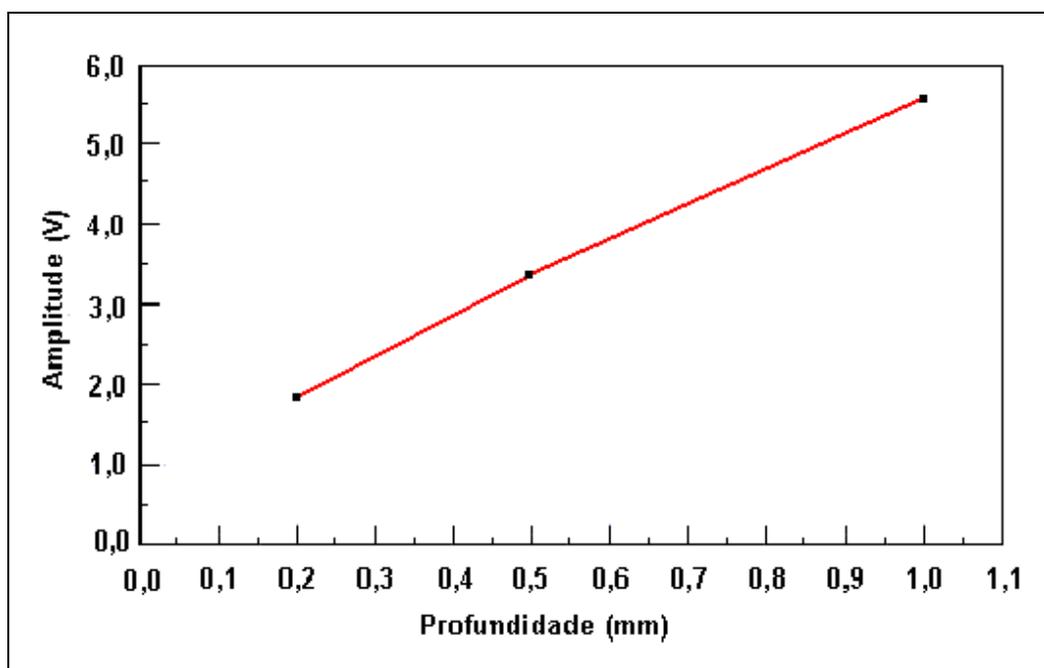


Figura 23. Curva de avaliação típica para sulcos superficiais (Silva Júnior e Alencar, 2003).

Como em outros ensaios não destrutivos, é recomendável a elaboração e aplicação criteriosa de procedimentos de ensaio, descrevendo as ações a serem desenvolvidas nos processos de calibração, execução e análise.

As condições estabelecidas numa calibração deverão, obrigatoriamente, permanecer inalteradas durante a execução real dos ensaios. O estabelecimento de outras condições, como por exemplo, a troca de uma sonda de teste ou de um cabo de conexão, implicará verificar a calibração em uso ou mesmo realizar nova calibração. Recomendações adicionais poderão solicitar ainda a verificação ou realização de novas calibrações em intervalos regulares de tempo.

3 DESENVOLVIMENTO DE PADRÕES, SONDAS E CORPO-DE-PROVA

3.1 Apresentação da Estratégia de Desenvolvimento

Falhas e acidentes podem ocorrer com os combustíveis durante sua fabricação, manuseio ou operação, com reflexos nos revestimentos tais como: alterações geométricas e dimensionais, perdas de espessura localizadas e corrosões superficiais (Silva, 2001). Para este trabalho, considerou-se a possibilidade de ocorrência de falhas volumétricas, passíveis de detecção e caracterização pelo método de inspeção proposto, tais como:

- Pequenas descontinuidades superficiais com diferentes profundidades;
- Pequenas descontinuidades sub-superficiais com diferentes profundidades;
- Trincas superficiais;
- Trincas sub-superficiais;
- Perdas generalizadas de espessura.

Para atingir os objetivos propostos, adotou-se uma estratégia para o desenvolvimento da parte experimental, constituída pelas etapas descritas a seguir:

- Planejamento e construção de dois conjuntos de descontinuidades, específicos para cada tipo de combustível, com geometria e dimensões conhecidas, representativas das falhas reais ou postuladas, que sirvam como padrões de referência para calibração do sistema de ensaio;
- Projeto e desenvolvimento de sondas de teste, elétrica e geometricamente adequadas à inspeção de cada tipo de combustível;

- Desenvolvimento de procedimentos de calibração e obtenção de critérios de avaliação, baseados na análise dos sinais de resposta obtidos para cada tipo de sonda operando conectada ao equipamento de teste e sob parâmetros de ensaio rigidamente estabelecidos, constituindo assim as metodologias aplicáveis de ensaio.
- Planejamento e construção de um corpo-de-prova (do tipo placa) com a finalidade de validar experimentalmente a metodologia de avaliação desenvolvida.

3.1.1 Aspectos Particulares à Inspeção de Reatores de Pesquisa e Teste de Materiais

Algumas particularidades encontradas nas instalações nucleares contempladas neste estudo constituíram desafios. A primeira está relacionada com o ambiente para aplicação real do ensaio, tanto no reator IPR-R1 quanto no reator IEA-R1: a condição submersa. A presença do refrigerante/moderador, neste caso água leve desmineralizada, a despeito de sua baixa condutividade elétrica, exigiu cuidados relacionados com a isolação elétrica das sondas e cabos de conexão, para impedir a ocorrência de interferências ou danos às sondas e ao sistema eletrônico de ensaios.

Outra particularidade é a presença de radiações ionizantes. É esperada a ocorrência de degradação estrutural dos componentes e materiais que constituem as sondas de teste e cabos de conexão, após um tempo de exposição. Neste contexto, duas abordagens podem ser mencionadas como solução: o uso de materiais especiais, mais adequados à utilização sob irradiação, ou a utilização de materiais convencionais, como adotado. Tais materiais, assim como os processos empregados na construção das sondas, são de baixo custo. Deste modo, sua utilização, mesmo com limitação no tempo de vida útil dos sensores, é economicamente vantajosa.

Com relação às condições de acesso para o exame dos revestimentos dos combustíveis, para o reator IPR-R1 não há dificuldades que exijam o desenvolvimento de sensores com características construtivas especiais, salvo sua isolação elétrica otimizada. Para os revestimentos dos combustíveis do reator IEA-R1, a situação é diferente. Vários fatores apresentam-se como limitadores ou dificultadores de acesso para a execução do ensaio. A distância nominal existente entre duas placas adjacentes é de apenas 2,89 mm, valor limite a ser considerado no desenvolvimento das sondas de teste.

Adicionalmente, a presença do pino de sustentação, localizado no topo de cada elemento combustível cria uma “zona de sombra”, onde a introdução da qualquer tipo de sonda é impossibilitada. Em princípio, as quatro placas centrais de cada combustível não poderão ser examinadas. Outras dificuldades, resultantes de deformações, oriundas da operação e manuseio dos combustíveis poderão (caso a caso) limitar a aplicação do ensaio.

Quanto aos materiais que constituem os dois tipos de combustíveis, destacam-se alguns aspectos importantes. Na impossibilidade de obtenção das ligas originais que constituem os revestimentos (Al-1100F para reator IPR-R1 e Al-1060 para o reator IEA-R1), foram utilizadas chapas da liga de Al-1050. Para os objetivos deste trabalho, estas ligas são relativamente similares quanto à condutividade elétrica (ECT, 2000).

Devido a dificuldades de obtenção ou reprodução dos materiais que constituem os núcleos dos combustíveis (U-ZrH para o reator IPR-R1 e U_3O_8 disperso em Al-1100 para o reator IEA-R1), foram empregados materiais alternativos, mantendo-se as dimensões e a geometria adequadas. Para minimizar efeitos das diferenças das propriedades físicas destes materiais (como sua resistividade elétrica) na resposta das sondas de teste, estabeleceram-se valores de frequências de operação tais que, pelo efeito pelicular (Stegmann, 1987), a profundidade de penetração padrão das correntes parasitas ficasse limitada à espessura do revestimento.

Neste contexto, é esperada uma redução na capacidade de detecção de descontinuidades sub-superficiais, mais afastadas da superfície externa do revestimento e do sensor ativo da sonda de teste. Para as descontinuidades superficiais, os sinais correspondentes àquelas mais profundas deverão apresentar poucas diferenças de amplitude.

3.1.2 Infra-estrutura Disponível

Os diversos processos construtivos necessários ao desenvolvimento da parte experimental desta pesquisa foram realizados em laboratórios e instalações do CDTN e do IPEN.

O Laboratório de ensaios não destrutivos do CDTN dispõe de um equipamento de eletro-erosão, marca ELOX, modelo MICRO PS, que constituiu-se como peça fundamental na construção de padrões de referência e cujo aspecto pode ser visto na FIG.

24. Basicamente, o processo de usinagem dá-se pela aplicação controlada de descargas elétricas entre um eletrodo de tungstênio, cobre ou aço inoxidável, e a superfície da peça.

O formato do corte é definido pela forma da seção transversal do eletrodo na região de contato. Durante a execução da etapa, um jato de querosene é continuamente bombeado sobre a superfície de contato eletrodo/peça para refrigerá-la e retirar os materiais arrancados. Introduce-se, também, um leve movimento vibratório entre estas partes, para garantir a formação continuada das descargas elétricas. A profundidade do corte é determinada pela intensidade da corrente elétrica e pelo seu tempo de aplicação.

Os demais serviços de usinagem de precisão, empregando tornos mecânicos, fresadoras, etc. foram desenvolvidos na oficina de mecânica fina do CDTN.



Figura 24. Equipamento de usinagem por eletro-erosão.

A laminação das chapas de alumínio, fornecidas pelo IPEN e utilizadas no desenvolvimento de padrões de combustíveis cilíndricos, foi realizada no Laboratório de Fabricação de Combustíveis do CDTN, onde existe um laminador de precisão, marca SUNDWIG, composto por dois cilindros de trabalho e dois cilindros de encosto. Seu aspecto geral pode ser visto na FIG. 25.



Figura 25. Laminador SUNDWIG instalado no CDTN.

A laminação de chapas de alumínio, empregadas para a construção de padrões de combustíveis tipo placa, foi executada no CCN- Centro de Combustível Nuclear do IPEN. Na FIG. 26 observa-se o laminador em operação.



Figura 26. Laminação de combustível no CCN (IPEN, 2004).

As análises metrológicas dimensionais necessárias, foram realizadas no laboratório de metrologia do CDTN, que dispõe dos equipamentos e recursos adequados para sua realização. Para todas as descontinuidades usinadas, foram emitidos laudos registrando as medições efetuadas (vide o ANEXO A).

É importante ressaltar que na execução desta etapa estabeleceu-se uma base de dados de referência. O desenvolvimento de sondas de teste exigiu, além de recursos de usinagem mecânica, o uso de instrumentação específica para sua caracterização elétrica. O laboratório de ensaios não destrutivos do CDTN, dispõe de equipamentos eletrônicos de boa qualidade e precisão, destacando-se dentre outros:

- Ponte LCR analógica – GENERAL RADIO - modelo 1650-A;
- Ponte LCR digital – POLIMED – modelo PM-1650;
- Fonte de corrente e tensão estabilizada – POLIMED – modelo PM-3005S;
- Fonte de corrente e tensão estabilizada – POLIMED – modelo PM-3020S;
- Multímetro digital 4 ½ dígitos – POLIMED – modelo PM- 2540;
- Multímetro digital 6 ½ dígitos – HP/AGILENT – modelo 34401A;
- Osciloscópio digital – HP/AGILENT – modelo 54622A;
- Gerador de funções – POLIMED – modelo PM- 4400.

Para a execução dos experimentos relacionados com a aquisição de dados utilizou-se um equipamento modelo MAD-8D fabricado pela ECT – USA (ver seção 2.2.3).

3.2 Desenvolvimento de Padrões de Referência para Calibração

3.2.1 Padrões para Combustíveis do Tipo Cilíndrico

Para a definição dos aspectos construtivos dos padrões de referência para calibração, utilizáveis no reator TRIGA - IPR-R1 devem ser conhecidos: o diâmetro nominal externo do combustível (37,6 mm) e a espessura nominal de seu revestimento (0,76mm) (Gulf General Atomic, 1958).

Para a construção dos padrões foram utilizadas chapas da liga de Al-1050, com espessura nominal de 2,0 mm, que foram sucessivamente laminadas e recortadas, até a obtenção de 22 placas planas, com dimensões nominais de: 50,0 x 50,0 x 0,78 mm. Quatro placas, representando padrões de perdas de espessura, foram obtidas apenas por laminação. As demais foram também objeto de usinagem por eletro-erosão. As 18 descontinuidades

usinadas foram: 1 orifício passante (OP), 8 orifícios de fundo plano (OFP), 1 sulco passante (SP) e 8 sulcos de fundo plano (SFP). Para a usinagem dos orifícios, foram utilizados eletrodos de tungstênio, de seção circular e diâmetro nominal de 1,00 mm. No caso dos sulcos, foram preparados eletrodos de aço inoxidável, de seção retangular, com 0,22 mm de largura e 11,68 mm de comprimento.

Após o processo de fabricação, todas as placas foram submetidas a exames de metrologia dimensional, cujos resultados são apresentados na TAB. 1. No ANEXO A encontram-se os relatórios emitidos pelo Serviço de Integridade Estrutural do CDTN, contendo os diagramas de localização e medidas correspondentes a todas as descontinuidades construídas.

TABELA 1 - Caracterização metrológica dimensional das descontinuidades usinadas para combustíveis do tipo cilíndrico

Número	Descrição	Espessura da placa (mm)	Profundidade (mm)
1C	Padrão de perda de espessura	0,78 ± 0,01	-
2C	Padrão de perda de espessura	0,58 ± 0,01	-
3C	Padrão de perda de espessura	0,41 ± 0,01	-
4C	Padrão de perda de espessura	0,22 ± 0,01	-
5C	OP	0,78 ± 0,01	0,78 ± 0,01
6C	OFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,64 ± 0,01
7C	OFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,49 ± 0,01
8C	OFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,33 ± 0,01
9C	OFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,17 ± 0,01
10C	OFP superficial	0,78 ± 0,01	0,61 ± 0,01
11C	OFP superficial	0,78 ± 0,01	0,49 ± 0,01
12C	OFP superficial	0,78 ± 0,01	0,33 ± 0,01
13C	OFP superficial	0,78 ± 0,01	0,16 ± 0,01
14C	SP	0,78 ± 0,01	0,78 ± 0,01
15C	SFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,61 ± 0,01
16C	SFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,50 ± 0,01
17C	SFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,35 ± 0,01
18C	SFP sub-superficial	0,78 ± 0,01	0,17 ± 0,01
19C	SFP superficial	0,78 ± 0,01	0,62 ± 0,01
20C	SFP superficial	0,78 ± 0,01	0,46 ± 0,01
21C	SFP superficial	0,78 ± 0,01	0,33 ± 0,01
22C	SFP superficial	0,78 ± 0,01	0,17 ± 0,01

Em seguida, todas as placas foram conformadas para adquirir formato e curvatura similares aqueles encontrados nos revestimentos dos elementos combustíveis reais. Por fim, os 22 padrões foram identificados e colados em seqüência sobre a superfície de uma barra cilíndrica de PVC, com 35,6 mm de diâmetro e 680 mm de comprimento.

Algumas ferramentas construídas e utilizadas nesta etapa podem ser vistas na FIG. 27. A FIG. 28 ilustra as etapas de laminação, usinagem de descontinuidade e conformação mecânica de um padrão. Na FIG. 29 apresenta-se o aspecto final do conjunto de padrões montado.



Figura 27. Ferramentas construídas e utilizadas na construção de padrões do tipo cilíndrico.

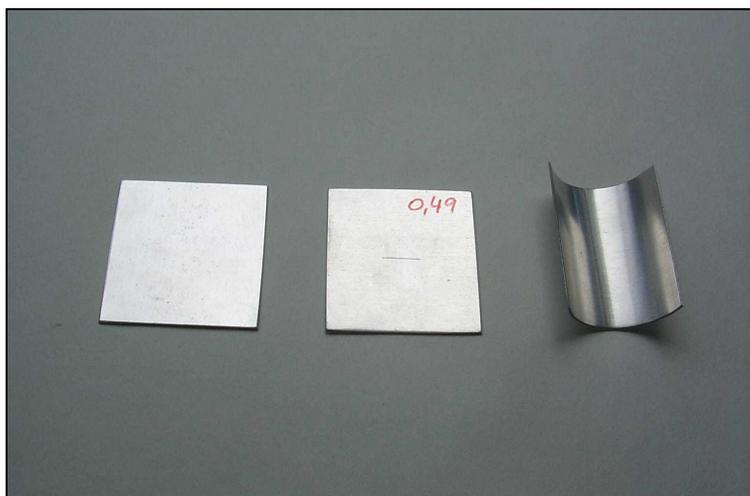


Figura 28. Três etapas: laminação, usinagem de descontinuidade e conformação.



Figura 29. Conjunto de padrões do tipo cilíndrico.

3.2.2 Padrões para Combustíveis do Tipo Placa

Projetou-se o desenvolvimento de um conjunto composto por 15 padrões de referência para calibração. Adotou-se um processo de construção por camadas (sanduíche), onde foram representados o núcleo central, com espessura nominal de 0,76 mm e dois revestimentos, com espessura nominal de 0,38 mm. Tal estratégia permitiu a obtenção de padrões com descontinuidades sub-superficiais.

O Centro do Combustível Nuclear – CCN do IPEN, forneceu chapas da liga de Al-1050, já laminadas, nas espessuras de 0,76 mm e 0,38 mm. Estas chapas foram recortadas, até a obtenção de 45 placas, sendo: 30 com dimensões nominais de: 60,0 x 60,0 x 0,38 mm e 15 com as dimensões nominais de: 60,0 x 60,0 x 0,76 mm.

Em doze placas de espessura 0,38 mm foram usinados orifícios e sulcos com diversas profundidades. Para os orifícios, foram utilizados eletrodos de tungstênio, de seção circular e diâmetro nominal de 1,00 mm. Para os sulcos, foram empregadas lâminas de aço inoxidável, de seção retangular, com 0,10 mm de largura por 11,68 mm de comprimento. Duas placas de 0,38 mm de espessura foram laminadas para redução de espessura adicional.

Após a conclusão dos processos laminação e de usinagem, todas as placas foram identificadas e submetidas a ensaios de metrologia dimensional. No ANEXO A encontram-se os relatórios emitidos pelo Serviço de Integridade Estrutural do CDTN, contendo os diagramas de localização e medidas correspondentes a todas as descontinuidades construídas.

A união de cada um dos conjuntos foi feita por colagem, empregando-se resina epóxi. O processo de cura foi feito por prensagem, para garantir a obtenção de películas finas ($< 10 \mu\text{m}$) nas interfaces. A estratégia adotada na montagem de um padrão, contendo uma descontinuidade sub-superficial, é apresentada na FIG. 30.

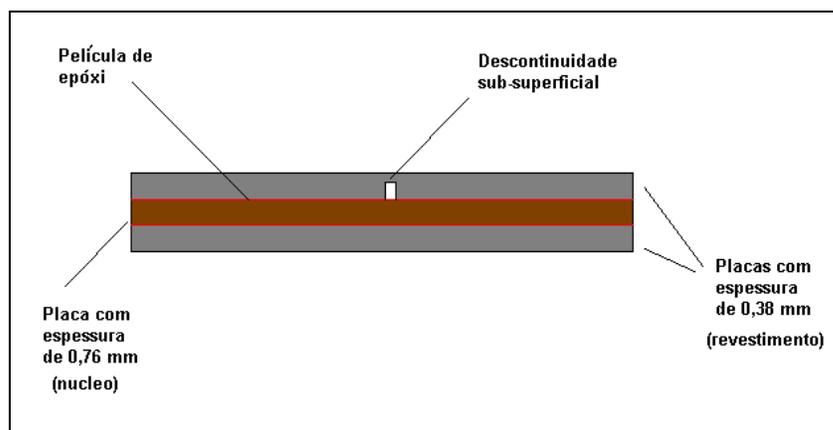


Figura 30. Representação do processo empregado na montagem de padrões do tipo placa.

Na FIG. 31 apresenta-se um conjunto de três placas constituintes de um padrão, antes da colagem. Observe-se o orifício usinado na placa superior. Na FIG. 32 mostra-se o conjunto de padrões obtidos, contendo descontinuidades do tipo sulco. As descontinuidades do tipo orifício podem ser observadas na FIG. 33.



Figura 31. Conjunto de placas antes da colagem.

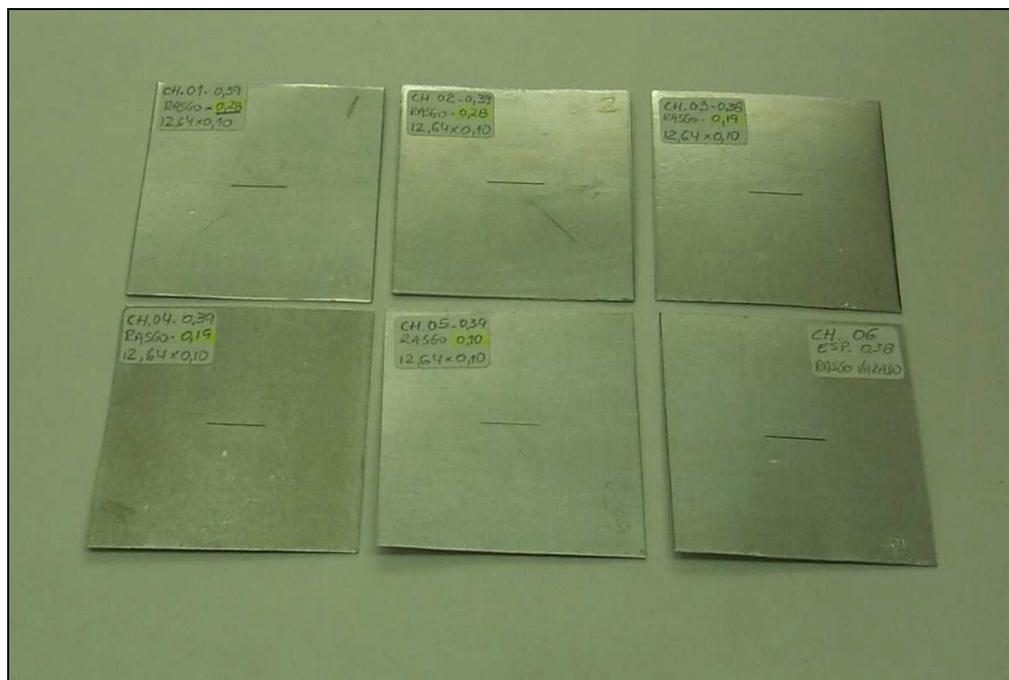


Figura 32. Descontinuidades usinadas do tipo sulco.

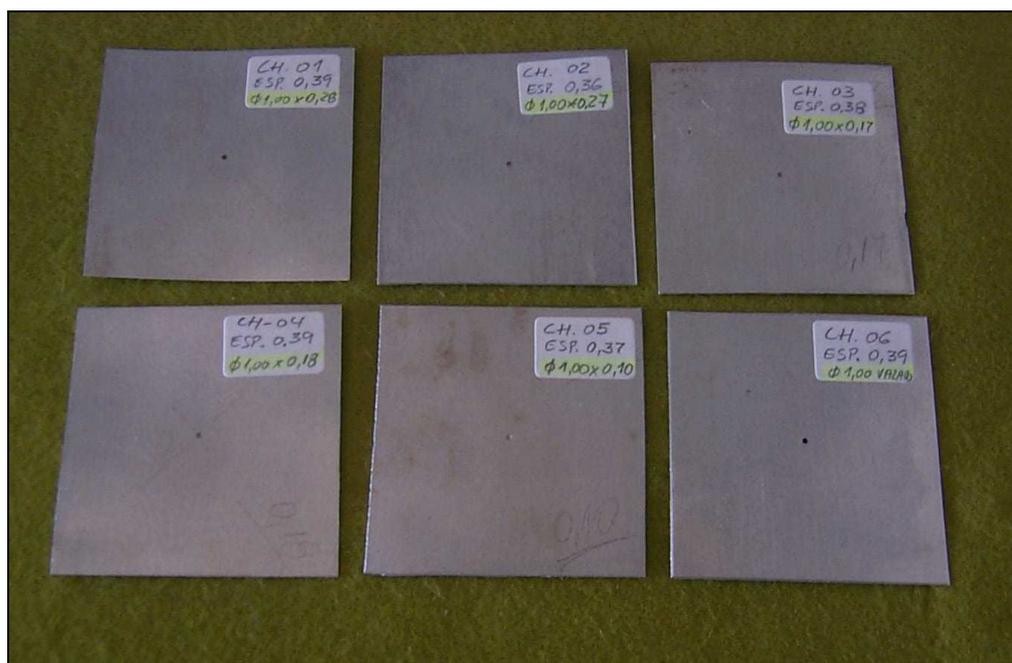


Figura 33. Descontinuidades usinadas do tipo orifício.

As principais características construtivas dos padrões de referência obtidos são apresentadas na TAB. 2. Mais detalhes, relativos a aspectos dimensionais, estão descritos no ANEXO A.

TABELA 2 - Caracterização metrológica dimensional das descontinuidades usinadas para combustíveis do tipo placa

Número	Descrição	Espessura do revestimento (mm)	Profundidade da descontinuidade (mm)
1P	Padrão de perda de espessura	0,38 ± 0,01	-
2P	Padrão de perda de espessura	0,28 ± 0,01	-
3P	Padrão de perda de espessura	0,19 ± 0,01	-
4P	OP	0,38 ± 0,01	0,38 ± 0,01
5P	OFP sub-superficial	0,38 ± 0,01	0,28 ± 0,01
6P	OFP sub-superficial	0,38 ± 0,01	0,17 ± 0,01
7P	OFP superficial	0,38 ± 0,01	0,27 ± 0,01
8P	OFP superficial	0,38 ± 0,01	0,18 ± 0,01
9P	OFP superficial	0,38 ± 0,01	0,10 ± 0,01
10P	SP	0,38 ± 0,01	0,38 ± 0,01
11P	SFP sub-superficial	0,38 ± 0,01	0,28 ± 0,01
12P	SFP sub-superficial	0,38 ± 0,01	0,19 ± 0,01
13P	SFP superficial	0,38 ± 0,01	0,28 ± 0,01
14P	SFP superficial	0,38 ± 0,01	0,19 ± 0,01
15P	SFP superficial	0,38 ± 0,01	0,10 ± 0,01

3.3 Desenvolvimento das Sondas de Teste

Para o desenvolvimento das sondas de teste é fundamental conhecer, além das características geométricas e dimensionais dos combustíveis, a resistividade elétrica do material do revestimento, que para a liga de Al-1050 equivale a $2,9 \times 10^{-8}$ ohm · metro ou 62,0% IACS (ECT, 2000). O valor de sua permeabilidade magnética pode ser desconsiderado.

Em função dos objetivos do ensaio e das características de detecção desejáveis (perdas de espessura, descontinuidades localizadas e trincas), estabeleceu-se que o arranjo de sensores da sonda de teste deve operar pela *técnica absoluta*.

Como o equipamento de ensaios utilizado opera no *modo ponte*, adotou-se para as sondas o *arranjo pseudo-diferencial*. Neste trabalho, a estratégia geral de desenvolvimento de sondas segue as seguintes etapas:

- Em função da geometria dos objetos de ensaio (tubos soltos ou instalados, tubos retos, tubos curvados, barras retas ou curvas, chapas planas ou

curvadas, lâminas, revestimentos, sedes de rebites, etc.) define-se a geometria de cada tipo de sonda;

- Em função das características particulares da superfície de trabalho e das condições de acesso, define-se o formato e as dimensões da carcaça e a extensão do cabo de conexão;
- Em função da resistividade elétrica (ρ) dos material que constituem os objetos de teste, assim como de suas características geométricas e dimensionais, determina-se a *freqüência ótima* de ensaio, f_o . Utiliza-se metodologia empírica (Soares, 1976), traduzida pela equação:

$$f_o = 10 \rho / W^2 \quad (39)$$

onde,

f_o é a freqüência ótima (Hz);

ρ é a resistividade elétrica do material ($\mu\Omega \cdot m$);

W é a espessura do revestimento (polegadas).

- Em função do modo de excitação da sonda pelo equipamento de teste (neste caso ponte), assim como do valor de sua impedância complexa (neste caso 50 ohms por braço) e do valor da freqüência ótima de ensaio - f_o , obtém-se o valor da indutância para as bobinas de teste e de compensação. Utiliza-se a equação:

$$L = X_L / 2 \pi f_o \quad (40)$$

onde,

L é a indutância nominal da bobina (Henry) e

X_L é a reatância indutiva das bobinas em f_o , nominalmente 50 ohms, para casamento de impedâncias (Cutler, 1976) com o equipamento de teste utilizado.

- Levando-se em conta os limites impostos pelas condições de acesso, ou outras necessidades, calculam-se as dimensões e detalhes construtivos dos indutores que compõem as bobinas das sondas de teste.

$$L = X n^2 (D + A) \quad (41)$$

onde,

L é a indutância nominal da bobina (Henry);

n é o número de espiras;

D é o diâmetro interno da bobina (cm);

A é a altura do enrolamento da bobina (cm);

X é o fator de forma da bobina.

Nesta etapa, obtêm-se as dimensões para os carretéis que acomodarão os enrolamentos da sonda, o número de espiras e a bitola dos fios de cobre esmaltado empregados na sua construção.

Utilizou-se o programa CalCOILS (Almeida, 2001) onde esta metodologia está implementada;

- Definem-se a geometria e as dimensões da carcaça das sondas;
- Usina-se a carcaça;
- Montam-se todos os componentes, inclusive os cabos elétricos e conectores e aplicam-se os revestimentos necessários (isolação elétrica);
- Faz-se uma avaliação operacional, conectando a sonda ao equipamento de ensaio e obtendo sinais (com auxílio de padrões de referência).

Na FIG. 34 mostra-se a tela de interface do programa utilizada para dimensionamento de indutores com enrolamentos de camadas múltiplas. Na FIG. 35 podem ser vistos detalhes da formulação empírica empregada.

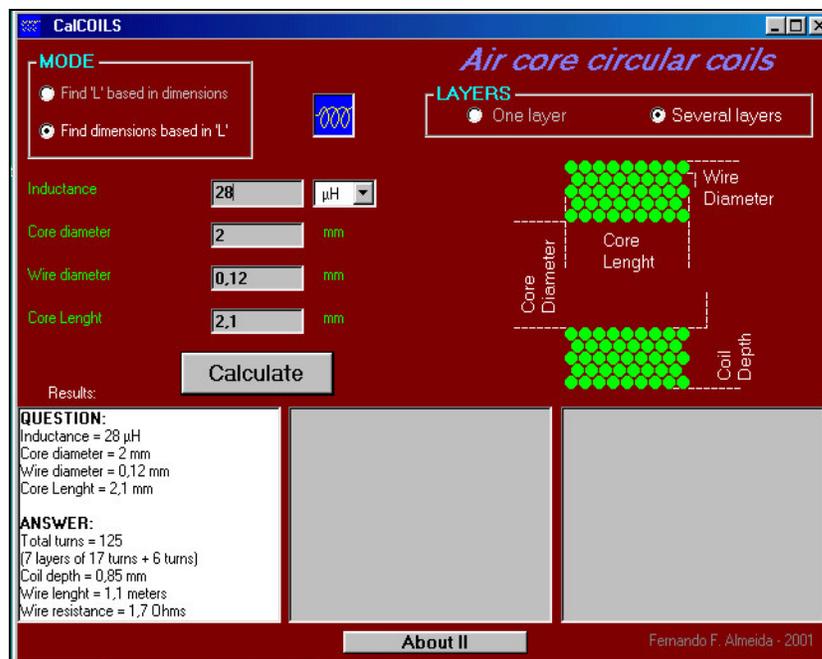


Figura 34. Interface de projeto do programa CalCOILS (Almeida, 2001).

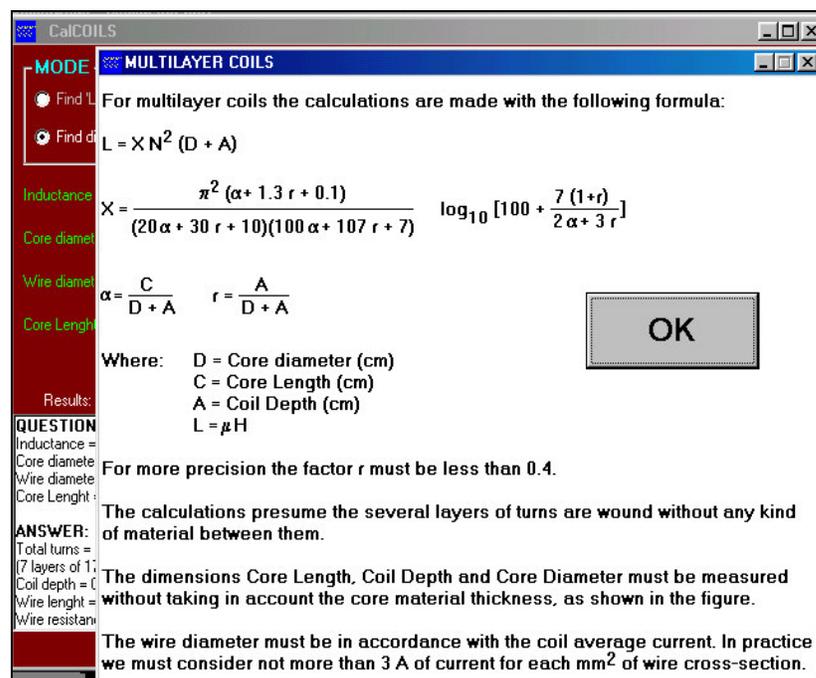


Figura 35. Tela mostrando algumas fórmulas empregadas (Almeida, 2001).

3.3.1 Sondas para Combustíveis do Tipo Cilíndrico

Com base nas estratégias de desenvolvimento apresentadas, um protótipo de sonda foi projetado e construído. No cálculo de f_0 , considerou-se o valor de 0,76 mm para a espessura do revestimento. Os carretéis das bobinas dos sensores (ativo e de compensação) foram usinadas com diâmetro nominal de 8 mm. Após a realização dos primeiros testes operacionais, foram introduzidas 3 modificações no projeto: reduziu-se o diâmetro dos carretéis das bobinas para 6,00 mm, para incrementar a sensibilidade da sonda; adotou-se o formato curvado para a superfície ativa da carcaça da sonda e fixou-se um disco de alumínio, com a mesma espessura do revestimento, na extremidade da bobina do sensor de compensação. Com o sensor ativo posicionado sobre a superfície do combustível, os valores das impedâncias complexas dos dois sensores ficam semelhantes, permitindo obter um melhor balanceamento do circuito em ponte do sistema de inspeção.

Estas alterações foram implementadas num segundo protótipo. Na FIG. 36 apresentam-se de forma esquemática os detalhes construtivos adotados para seu desenvolvimento. Informações adicionais do projeto estão no ANEXO B1. Seu aspecto interno, antes do encapsulamento, pode ser observado na FIG. 37. Na FIG. 38 mostra-se seu aspecto final. A curvatura da superfície de contato, similar à do revestimento do combustível, pode ser notada. Esta característica é útil na redução de variáveis indesejáveis, como o efeito de decolagem (*lift-off*) (Stegmann, 1987). Cuidados especiais, relacionados com a isolação das suas partes elétricas e selagem, garantem sua adequada operação, mesmo na condição submersa. Suas principais características construtivas são:

- Frequência ótima: 80 kHz;
- Impedância nominal (na frequência ótima.): 50 Ω ;
- Resistência elétrica de cada enrolamento: 0,90 Ω ;
- Técnica de operação: Absoluta;
- Tipo de circuito elétrico: Pseudo-diferencial
- Diâmetro do sensor ativo: 6,0 mm.

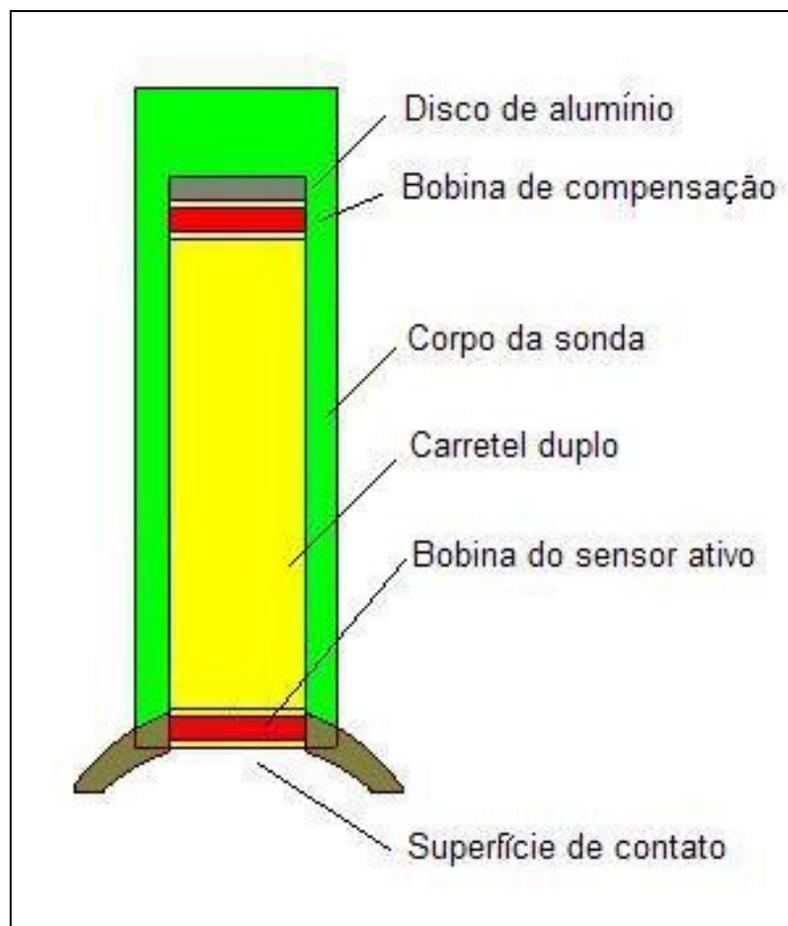


Figura 36. Representação esquemática da sonda desenvolvida (combustível cilíndrico).

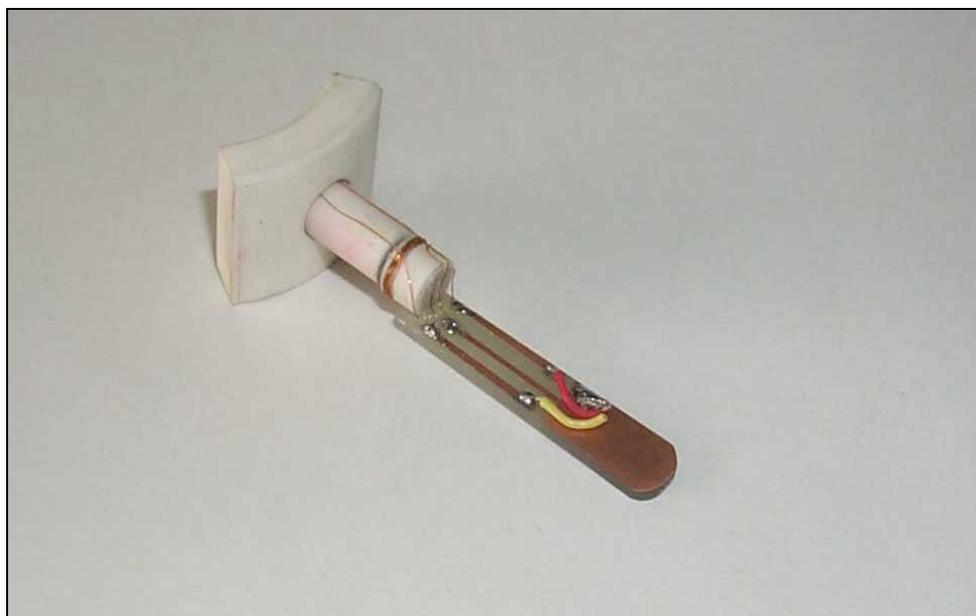


Figura 37. Detalhes internos da sonda desenvolvida antes do encapsulamento.



Figura 38. Aspecto final da sonda desenvolvida.

Materiais similares aos empregados na construção de sondas de teste convencionais foram utilizados. Para os carretéis, empregou-se PVC. Fios de cobre eletrolítico, esmaltados, com diâmetro de 0,10 mm ou #38 AWG (Rezende, 1977), foram utilizados para construir os enrolamentos. Para as soldagens foi usada a liga Pb/Sn 60/40. Adotou-se a montagem em circuito impresso (cobre eletrolítico sobre laminado de fibra de vidro). O encapsulamento final utilizou resina epóxi e tubos de polietileno. O cabo de conexão elétrica é composto por cabos de cobre eletrolítico, estanhados e revestidos em PVC.

O uso de materiais mais adequados à utilização sob irradiação exigiria diversos desenvolvimentos adicionais, implicando maiores tempos e custos de fabricação. Assim, mesmo com a esperada redução na vida útil dos sensores, a relação custo/benefício aponta com vantagens para sua simples substituição quando necessário.

3.3.2 Sondas para Combustíveis do Tipo Placa

A distância entre duas placas adjacentes de um elemento combustível representa um limite para a espessura máxima da sonda (2,89 mm nominais no reator IEA-R1). No cálculo da frequência ótima, considerou-se o valor de 0,38 mm para a espessura do revestimento do combustível. Duas bobinas (ativa e de compensação) foram projetadas e construídas. Em função da limitação de espessura do sensor ativo utilizou-se núcleo ferromagnético. Neste caso a permeabilidade magnética, que age como multiplicador, permitiu elevar o valor da indutância e reduzir o diâmetro externo dos sensores, melhorando a sensibilidade de detecção da sonda.

Um primeiro protótipo de sonda foi projetado e construído para comprovar a eficácia dos métodos construtivos adotados. Para permitir seu manuseio e alcançar as áreas de interesse, o elemento sensor foi montado na extremidade de uma carcaça estruturalmente rígida e delgada. Como a sonda opera em modo pseudo-diferencial, o sensor de compensação foi montado na extremidade oposta.

A FIG. 39 apresenta de forma esquemática os detalhes construtivos adotados para o desenvolvimento. Na parte superior da figura, tem-se uma representação em corte da sonda. A parte inferior da figura representa uma vista inferior da mesma. Não estão representados componentes adicionais como: cabos, sensor de compensação, soldas, etc.

Seu aspecto geral, sem aplicação da isolamento elétrica final, pode ser observado na FIG. 40. Podem ser observados: parte do cabo de conexão (preto); a fiação (colorida) soldada sobre as trilhas de circuito impresso da carcaça em fibra de vidro revestida com cobre eletrolítico; o sensor de compensação (na extremidade próxima à fiação); o sensor ativo (na extremidade em forma de disco); a parede externa (em PVC) do carretel que abriga a bobina ativa e a extremidade externa do núcleo ferromagnético.

A fixação de dois discos de Al-1050, de espessura idêntica à do revestimento (0,38 mm), sobre e sob o carretel do sensor de compensação e de um terceiro, sob o sensor ativo, permitiu a obtenção de melhor balanceamento eletrônico do circuito em ponte do sistema de inspeção. Com o sensor ativo posicionado sobre a superfície de uma placa combustível, os valores das impedâncias dos dois sensores ficam semelhantes.

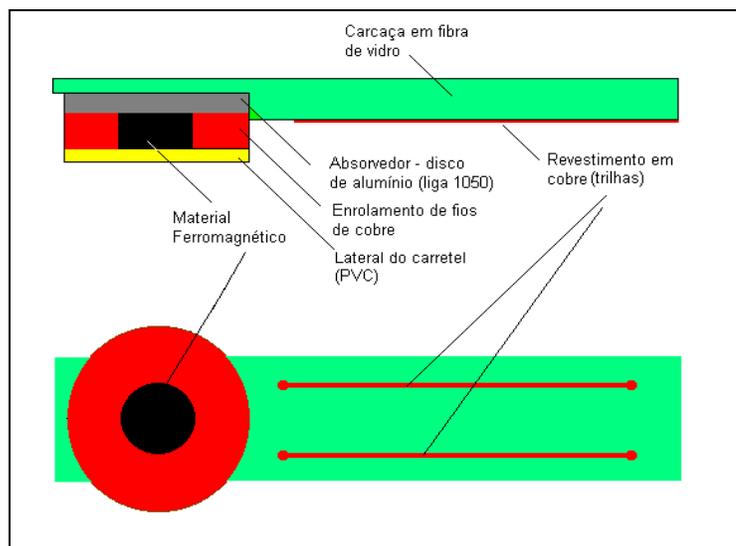


Figura 39. Representação esquemática da sonda para combustíveis do tipo placa.



Figura 40. Detalhes internos do protótipo da sonda (placa).

Adicionalmente, o disco de alumínio localizado sob o sensor ativo, age como um absorvedor de correntes parasitas, que poderiam ser induzidas no revestimento de uma placa adjacente à placa sob teste, em função da proximidade. Esta inovação garantiu a obtenção de excelente imunidade a interferências e grande relação frente/costas (*front-to-back ratio*) (Millman e Halkias, 1972) para o protótipo.

A construção deste protótipo permitiu demonstrar que a metodologia de desenvolvimento proposta e os métodos e materiais escolhidos foram adequados. Observe-se contudo, que o valor obtido para a espessura de inserção da sonda foi de 3,50 mm, superior ao valor limite requerido. Adicionalmente, seu comprimento não permitiria sua completa inserção ao longo da extensão das placas do corpo-de-prova descrito na seção 3.4.

Desenvolveu-se então uma nova sonda, capaz de atender tais necessidades, cujo aspecto interno pode ser visto na FIG. 41. Esta fotografia foi tomada antes da sua interligação ao cabo de conexão e da aplicação da isolamento elétrica final.



Figura 41. Aspecto interno da segunda sonda construída para combustíveis tipo placa.

Podem ser observados os dois sensores localizados em cada uma das extremidades da placa de circuito impresso que serve como chassis para a montagem, sendo: o sensor ativo à esquerda e o de compensação à direita. Informações adicionais são apresentadas no ANEXO B2.

Detalhes construtivos do sensor de compensação, inclusive dois discos de Al-1050, montados nas extremidades superior e inferior, são mostrados na FIG. 42. Na FIG. 43 podem ser vistos: o pequeno carretel que suporta o enrolamento do sensor ativo; seu disco absorvedor em Al-1050, montado na parte inferior e o disco de PVC montado na parte superior. A fotografia foi tomada antes da fixação à placa de circuito impresso.



Figura 42. Detalhes do sensor de compensação.

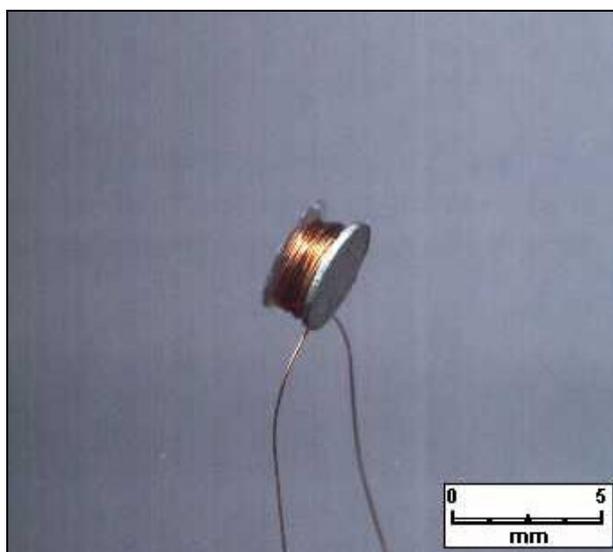


Figura 43. Aspecto do carretel do sensor ativo.

O aspecto externo final da sonda, após a aplicação da isolamento elétrica e conexão do cabo de conexão pode ser visto na FIG. 44.



Figura 44. Aspecto final da sonda para construída para combustíveis do tipo placa.

Principais características construtivas da sonda de teste:

- Frequência ótima: 280 kHz;
- Impedância nominal (na frequência ótima.): 50 Ω ;
- Resistência elétrica de cada enrolamento: 0,47 Ω ;
- Técnica de operação: Absoluta;
- Tipo de circuito elétrico: Pseudo-diferencial;
- Diâmetro do enrolamento do sensor ativo: 3,0 mm;
- Espessura mínima de inserção: 2,70 mm;
- Comprimento útil para inserção: 220,0 mm.

3.4 Obtenção das Curvas de Avaliação para Combustíveis do Tipo Cilíndrico

Para proceder a caracterização das discontinuidades detectadas durante a aplicação do ensaio, é necessária a obtenção de curvas de avaliação. Para revestimentos ou

chapas delgadas, a análise por fase (*phase based analysis*), muito utilizada na inspeção de tubos em trocadores de calor (ASME, 1992), não é aplicável, devido à pequena variação de fase observada. Adotou-se então a análise por amplitude de tensão (*voltage based analysis*).

O conjunto de padrões construído e apresentado na seção 3.2.1 foi dividido em cinco grupos distintos. O primeiro foi composto pelos padrões de referência 1 a 4 (perdas de espessura generalizadas). O segundo corresponde aos padrões de referência 5 a 9 (OP e OFP sub-superficiais). O terceiro foi composto pelos padrões de referência 5 e 10 a 13 (OP e OFP superficiais). O quarto corresponde aos padrões de referência 14 a 18 (SP e SFP sub-superficiais). O quinto foi composto pelos padrões referência 14 e 19 a 22 (SP e SFP superficiais).

Para a obtenção das curvas de avaliação por amplitude, foram adquiridos dados usando o sistema de ensaio operando com parâmetros estabelecidos e otimizados experimentalmente (frequência, ganho, fase, etc.). Para cada um destes grupos foi registrada a amplitude do sinal correspondente à cada descontinuidade (valor médio de 5 medidas). Os erros de medição foram inferiores a 3%. Deste modo, foram geradas cinco diferentes curvas de avaliação. Utilizou-se o programa ORIGIN (MICROCAL, 1999). É importante destacar que esta estratégia é necessária, uma vez que a caracterização por amplitude de tensão é significativamente influenciada pelas características volumétricas das descontinuidades analisadas. Os valores de amplitude e profundidade obtidos para o grupo número 5 são apresentados na TAB. 3. A curva de avaliação correspondente (5C), para f_0 igual a 80 kHz, é mostrada na FIG. 45. No ANEXO C1 são apresentados os parâmetros utilizados no experimento (ganho, frequência, etc.). Os dados adquiridos e as curvas de avaliação para os demais grupos estão disponíveis no ANEXO C2.

TABELA 3 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 5 – Cilíndrico - f_0 : 80 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
14C	SP	0,78 ± 0,01	100	6,49
19C	SFP superficial	0,62 ± 0,01	79,5	4,40
20C	SFP superficial	0,46 ± 0,01	59,0	2,53
21C	SFP superficial	0,33 ± 0,01	42,3	1,65
22C	SFP superficial	0,17 ± 0,01	21,8	1,31

* Valor médio de 5 medidas

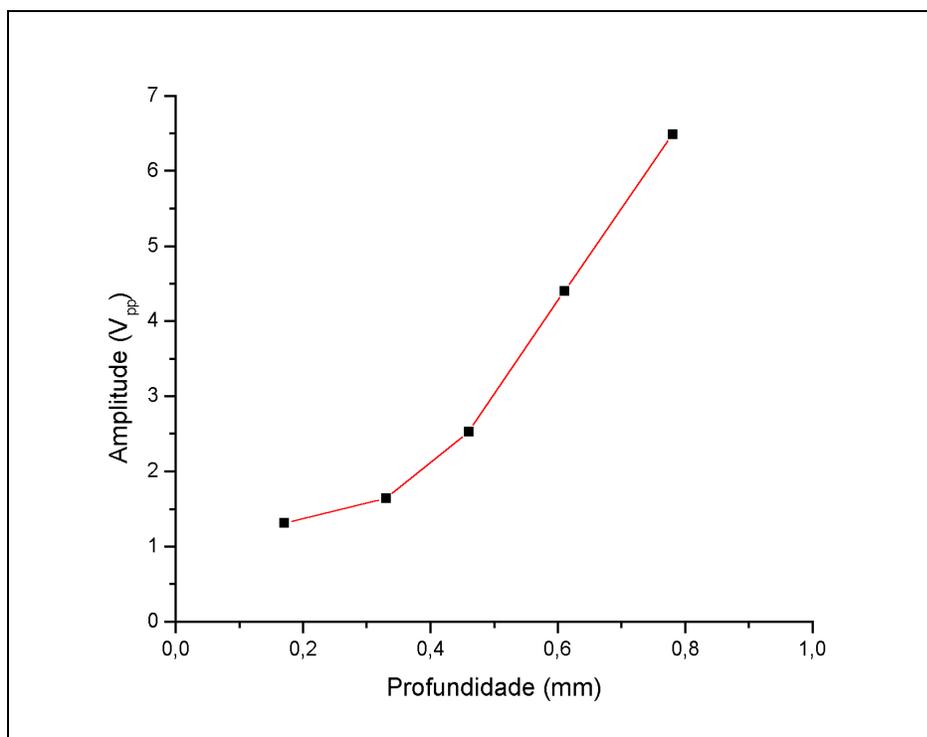


Figura 45. Curva de avaliação 5C (f_o : 80 kHz).

3.5 Obtenção das Curvas de Avaliação para Combustíveis do Tipo Placa

O processo de obtenção das curvas de avaliação por amplitude foi similar àquele aplicado para os padrões de combustíveis cilíndricos. Da mesma forma, a caracterização por amplitude de tensão é influenciada pelas características volumétricas da descontinuidade analisada. Assim, o conjunto de padrões construído e apresentado na seção 3.2.2 foi dividido em cinco grupos distintos.

O primeiro foi composto pelos padrões de referência 1 a 3 (perdas de espessura generalizadas). O segundo corresponde aos padrões de referência 4 a 6 (OP e OFP sub-superficiais). O terceiro foi composto pelos padrões de referência 4 e 7 a 9 (OP e OFP superficiais). O quarto corresponde aos padrões de referência 10 a 12 (SP e SFP sub-superficiais). O quinto foi composto pelos padrões de referência 10 e 13 a 15 (SP e SFP superficiais). Os valores de amplitude e profundidade obtidos para o grupo número 5 são apresentados na TAB. 4.

A curva de avaliação correspondente (5P), para f_o igual a 280 kHz, é mostrada na FIG. 46. No ANEXO C1 são apresentados os parâmetros utilizados no experimento. Os dados adquiridos e as curvas de avaliação para os demais grupos estão disponíveis no ANEXO C3.

TABELA 4 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 5 – Placa - f_0 : 280kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
10P	SP	$0,38 \pm 0,01$	100	6,50
13P	SFP superficial	$0,28 \pm 0,01$	73,6	3,53
14P	SFP superficial	$0,19 \pm 0,01$	50,0	2,28
15P	SFP superficial	$0,10 \pm 0,01$	26,3	1,13

* Valor médio de 5 medidas

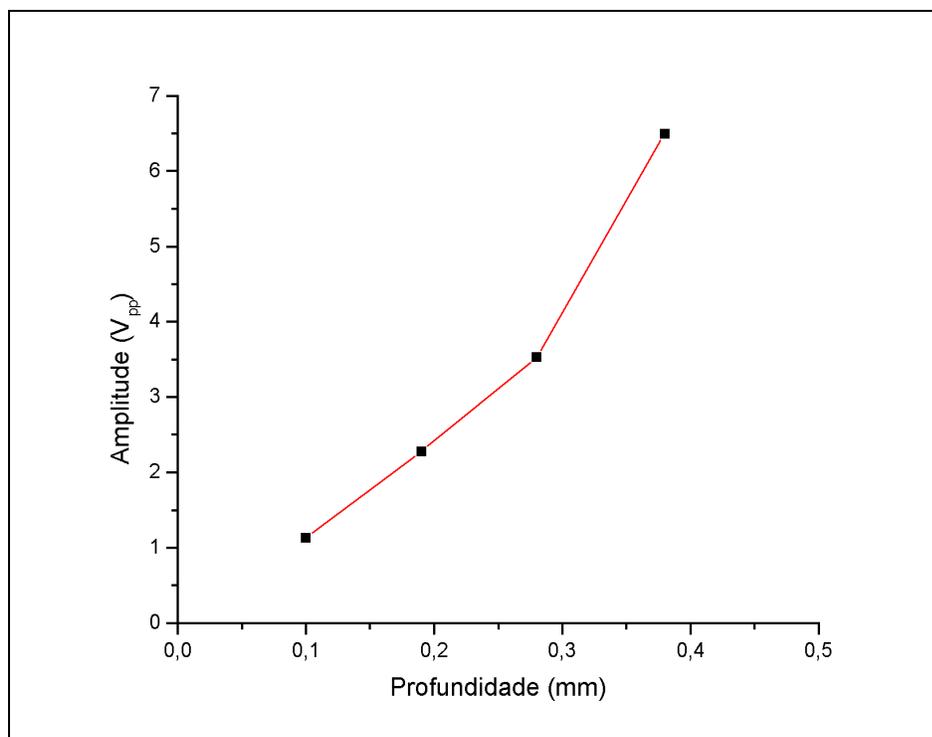


Figura 46. Curva de avaliação 5P (f_0 : 280 kHz).

3.6 Metodologia de Análise Proposta para Caracterização de Descontinuidades

Para proceder à medição de perdas generalizadas de espessura, deve-se utilizar diretamente, conforme o tipo de combustível sob análise, uma das curvas obtidas a partir dos padrões de referência (grupos 1C ou 1P) e apresentadas nos ANEXOS C2 e C3.

Para a caracterização de descontinuidades localizadas, deve-se aplicar a metodologia de análise proposta e descrita a seguir:

- Ao promover a varredura da superfície de um combustível com a sonda de teste e encontrar-se indicação de presença de uma descontinuidade (pela variação do sinal correspondente na tela do sistema de ensaio), deve-se medir sua extensão, E , obtida do próprio sistema de varredura;
- Se a extensão da descontinuidade for pequena (menor ou igual a 3 mm) esta deverá ser caracterizada pelas curvas de avaliação obtidas para os grupos 2 (OP e OFP sub-superficiais) ou 3 (OP e OFP superficiais). O valor 3 mm foi estabelecido em função do diâmetro do sensor ativo da sonda de teste (como discutido no Capítulo 5);
- Se a extensão da descontinuidade for grande (maior que 3 mm) esta deverá ser caracterizada pelas curvas de avaliação obtidas para os grupos 4 (SP e SFP sub-superficiais) ou 5 (SP e SFP superficiais);
- Para determinar se a descontinuidade a caracterizar é superficial ou sub-superficial e qual curva de avaliação é aplicável, utiliza-se outro canal do sistema de ensaio, operando com uma frequência de teste auxiliar, f_a , 3 a 4 vezes superior àquela estabelecida como frequência ótima. Devido ao efeito pelicular, para esta frequência, a penetração das correntes parasitas será significativamente reduzida. Deste modo, neste canal, apenas as descontinuidades superficiais serão detectadas, apresentando amplitudes de tensão superiores a $1,0 V_{pp}$ (valor otido para um OFP com 0,10 mm de profundidade e diâmetro 1,0 mm). As descontinuidades sub-superficiais, próximas da superfície externa do revestimento, se detectadas, apresentarão valores de amplitude de tensão relativamente pequenos, inferiores a $0,30 V_{pp}$ (valor otido para um SFP de 0,33 mm);
- Determina-se a profundidade da descontinuidade utilizando-se a curva de avaliação adequada.

O fluxograma correspondente a esta metodologia, para caracterização de perdas de espessura e de descontinuidades localizadas em revestimentos de combustíveis, pode ser visto na FIG. 47. Neste exemplo, considerou-se sua aplicação para análise em combustíveis do tipo placa.

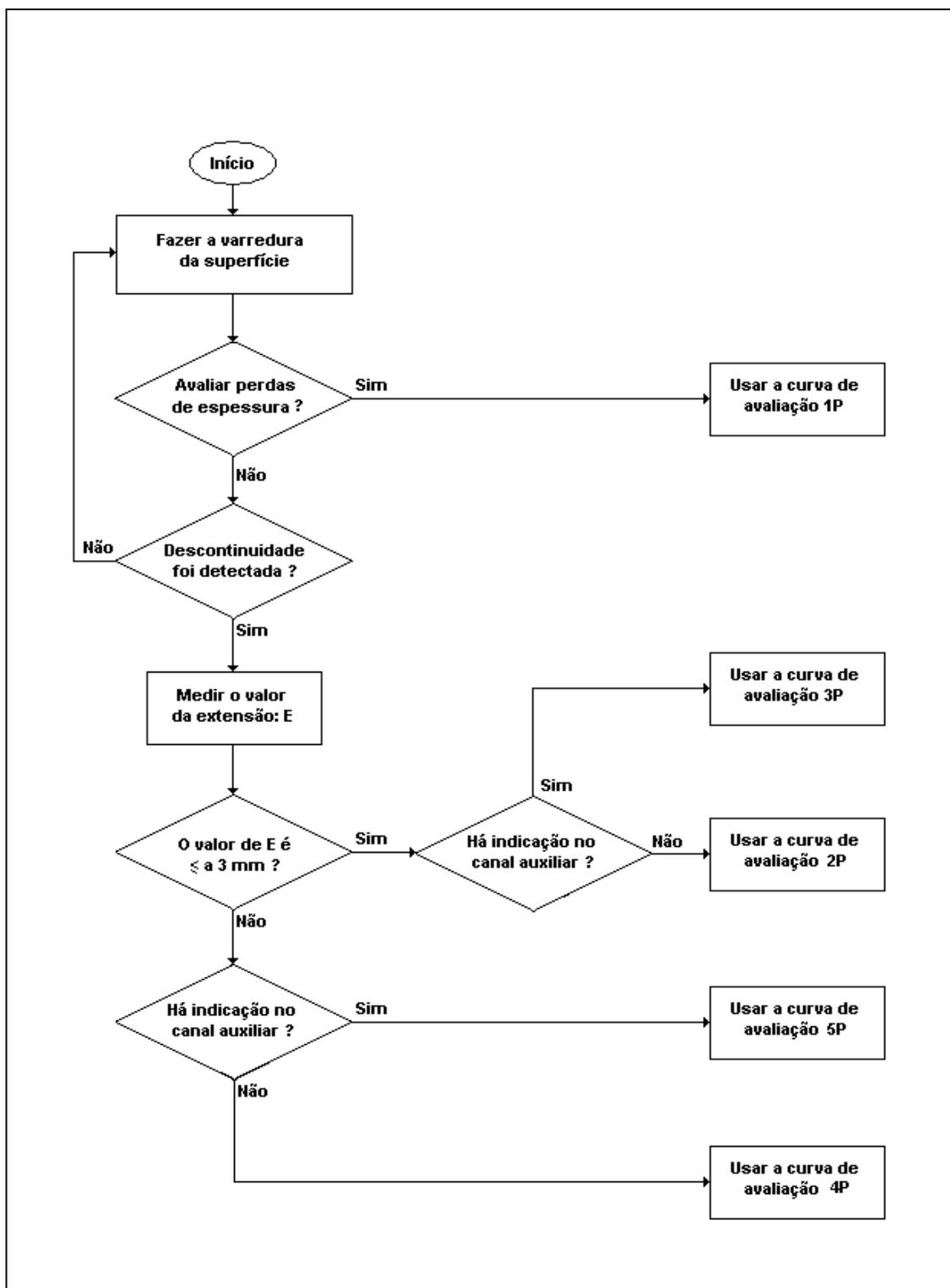


Figura 47. Fluxograma de caracterização para perdas de espessura e descontinuidades.

3.7 Desenvolvimento do Corpo-de-Prova para Validação

Além dos padrões de referência para calibração e das sondas de teste, um corpo-de-prova foi projetado e construído com a finalidade de validar experimentalmente a metodologia de avaliação desenvolvida (ver seção 4.5). Como pode ser observado na FIG. 48, este corpo-de-prova é composto pela montagem de três “placas combustíveis” individuais, paralelas, afastadas entre si de $2,89 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$. Este afastamento é proporcionado por espaçadores colocados nas extremidades laterais das placas. Um total de seis parafusos e porcas, inseridos em orifícios alinhados mantém o conjunto rígido e estável.

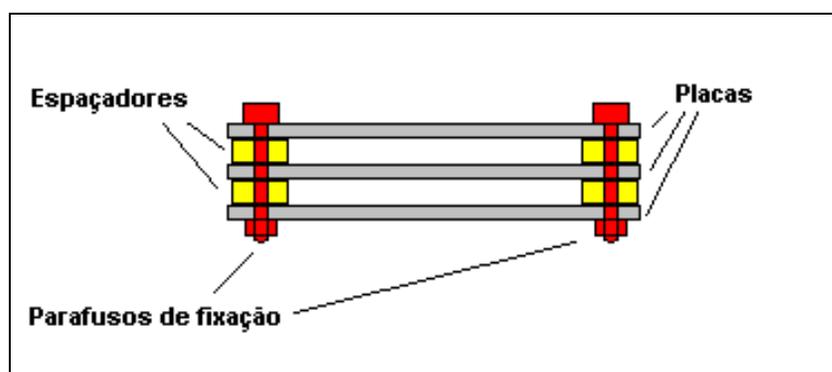


Figura 48. Esquema construtivo do corpo-de-prova.

A exemplo da metodologia empregada no desenvolvimento dos padrões de referência para calibração, cada uma destas placas foi construída pelo processo de camadas (sanduíche), sendo: um núcleo central, com espessura nominal de 0,76 mm e dois revestimentos, com espessura nominal de 0,38 mm.

Foram utilizadas chapas da liga de Al-1050, já laminadas, nas espessuras de 0,76 mm e 0,38 mm, fornecidas pelo Centro do Combustível Nuclear – CCN do IPEN. Estas chapas foram recortadas, até a obtenção de nove placas planas, sendo: seis com dimensões nominais: 200,0 mm x 80,0 mm x 0,38 mm; três com as dimensões nominais: 200,0 mm x 80,0 mm x 0,76 mm.

Para os objetivos deste trabalho, optou-se pela construção de um corpo-de-prova com altura reduzida, comparando-se a um elemento combustível real. Esta estratégia garantiu a obtenção de maior confiabilidade e qualidade na sua construção, principalmente nos processos de usinagem de descontinuidades e colagem das placas.

Numa das placas de espessura 0,38 mm foram usinadas seis discontinuidades superficiais, com diversas profundidades. Para os orifícios foram utilizados eletrodos de tungstênio, de seção circular e diâmetro nominal de 1,00 mm. Para os sulcos foram empregadas lâminas de aço inoxidável, de seção retangular, com dimensões nominais de 0,10 mm de largura por 12,60 mm de comprimento

Após a conclusão dos processos de laminação e de usinagem, todas as placas foram identificadas e submetidas a ensaios de metrologia dimensional. No ANEXO A encontram-se os relatórios emitidos pelo Serviço de Integridade Estrutural do CDTN, contendo os diagramas de localização e medidas correspondentes a todas as discontinuidades construídas, que neste corpo-de-prova, passam a ser denominadas como *falhas*.

Procedeu-se em seguida às etapas de colagem e análise metrológica dimensional de cada conjunto. Na FIG. 49 apresentam-se as três “placas combustíveis” constituintes do corpo-de-prova antes da montagem final. A placa central contém as seis falhas volumétricas usinadas. Observam-se ainda alguns orifícios próximos às bordas laterais, usinados para permitir a montagem final do conjunto.



Figura 49. Partes constituintes do corpo-de-prova antes da colagem.

Na FIG. 50 mostram-se detalhes das demais partes que constituem o corpo-de-prova, antes da montagem do conjunto. Observam-se: dois perfis ou abas em “L”, de alumínio; uma base ou bloco de sustentação, construída em aço carbono; quatro espaçadores laterais de acrílico; parafusos e porcas.



Figura 50. Demais partes que constituem o corpo-de-prova.

A base de fixação, com peso aproximado de 0,8 kg, tem a função de estabilizar a montagem e mantê-la corretamente posicionada durante os experimentos de validação desenvolvidos. O aspecto final do corpo-de-prova, montado sobre a base, pode ser visto na FIG. 51.



Figura 51. Aspecto final do corpo-de-prova construído.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Para a comprovação da funcionalidade e avaliação de desempenho de todos os recursos desenvolvidos, assim como da eficácia da metodologia de análise proposta, foram realizados diversos experimentos, a saber:

- Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico;
- Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo placa;
- Verificação da imunidade às interferências geradas por placa adjacente e medição da relação de sensibilidade frente/costas da sonda desenvolvida para o ensaio de combustíveis do tipo placa;
- Verificação de imunidade às interferências geradas por diferenças de resistividade elétrica do núcleo dos dois tipos de combustível;
- Validação experimental da metodologia de avaliação de integridade proposta, por meio da sua aplicação no corpo de prova construído e descrito na seção 3.7, na condição submersa.

Os detalhes de execução destes experimentos, assim como os resultados alcançados são apresentados a seguir.

4.1 Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico

Para a realização desta primeira série de experimentos, a sonda de teste desenvolvida foi conectada ao sistema de ensaio e os parâmetros de operação adequados foram configurados. A frequência de teste do canal principal foi ajustada para 80 kHz, o ganho para 15, a fase para 340 e as sensibilidades vertical e horizontal para 1 Volt/divisão.

A sonda de teste foi posicionada sobre o padrão de referência número 1C (isento de descontinuidades) e o sistema foi eletronicamente balanceado. O objetivo restringiu-se à demonstração qualitativa da resposta da sonda de teste e do sistema de ensaio frente aos diversos tipos de descontinuidades construídos. Os dados quantitativos medidos e utilizados na construção de curvas de avaliação estão apresentados no ANEXO C2.

Na FIG. 52 exibem-se telas tomadas do sistema de ensaio no modo de apresentação $x \cdot t$, indicado para realizar aquisições de dados. Podem ser observados os sinais registrados correspondentes: a) ao padrão de referência número 14C (sulco passante – 0,78 mm); b) ao padrão de referência número 19C (sulco de fundo plano superficial – 0,62 mm); c) ao padrão de referência número 20C (sulco de fundo plano superficial – 0,46 mm). Nota-se que cada sinal representa um transiente de tensão, partindo de um valor mínimo, atingindo um máximo e mais uma vez retornando ao mínimo. Esta forma corresponde à passagem gradual do sensor ativo da sonda de teste sobre cada descontinuidade (varredura). A amplitude de pico de cada sinal é proporcional à profundidade correspondente, sob a área varrida. Esta relação não é necessariamente linear. Observa-se ainda o nível de ruído (flutuação) do sistema que permite distinguir com clareza os sinais de interesse.

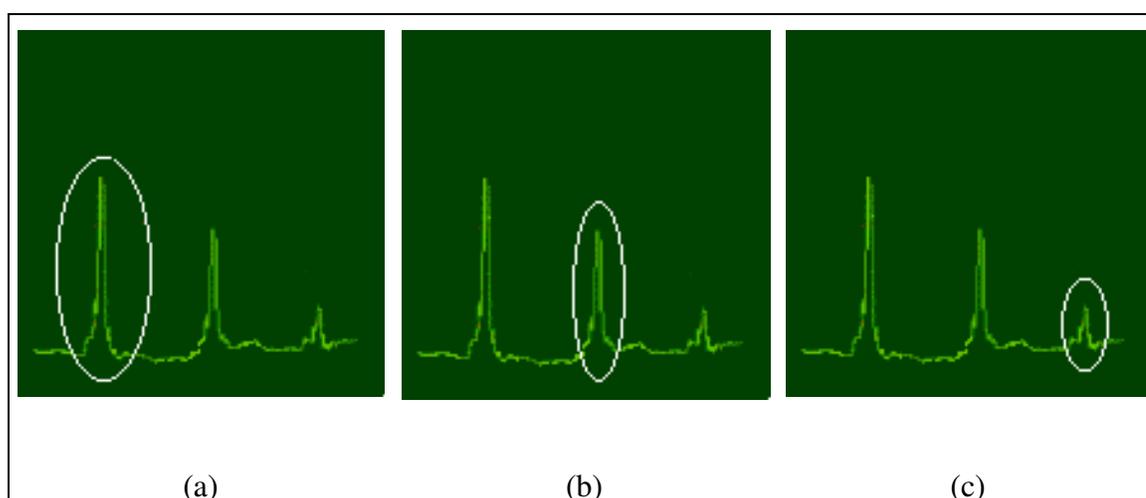


Figura 52. Sinais referentes aos padrões de referência 14C (a), 19C (b) e 20C (c).

Na FIG. 53 podem ser observados os sinais registrados para: a) o padrão de referência número 14C (sulco passante – 0,78 mm); b) o padrão de referência número 15C (sulco de fundo plano sub-superficial – 0,61 mm); c) o padrão de referência número 16C

(sulco de fundo plano sub-superficial – 0,50 mm). Verifica-se que a amplitude dos sinais obtidos para as descontinuidades sub-superficiais detectadas, decresce de modo acentuado, à medida que aumenta sua distância até a superfície externa do revestimento.

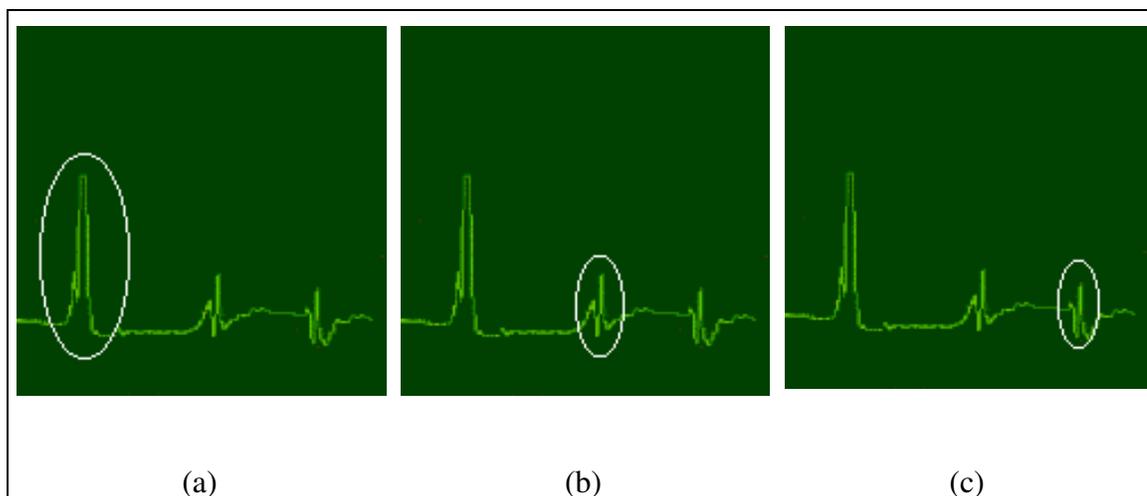


Figura 53. Sinais referentes aos padrões de referência 14C (a), 15C (b) e 16C (c).

Na FIG. 54 podem ser observados diferentes níveis de tensão (DC) registrados com a sonda de teste posicionada sobre padrões de referência representativos de perdas generalizadas de espessura: número 1C (0,78 mm), número 2C (0,58 mm), número 3C (0,41 mm) e número 4C (0,22 mm). O sistema foi balanceado com a sonda posicionada sobre o padrão de referência número 1C. No processo de medição, (vide o ANEXO C2) atribuiu-se como potencial de referência (zero Volt) a tensão registrada para a espessura deste padrão. Afastando-se a sonda de teste da superfície de cada padrão, observa-se que a tensão registrada cresce até alcançar o nível de saturação.

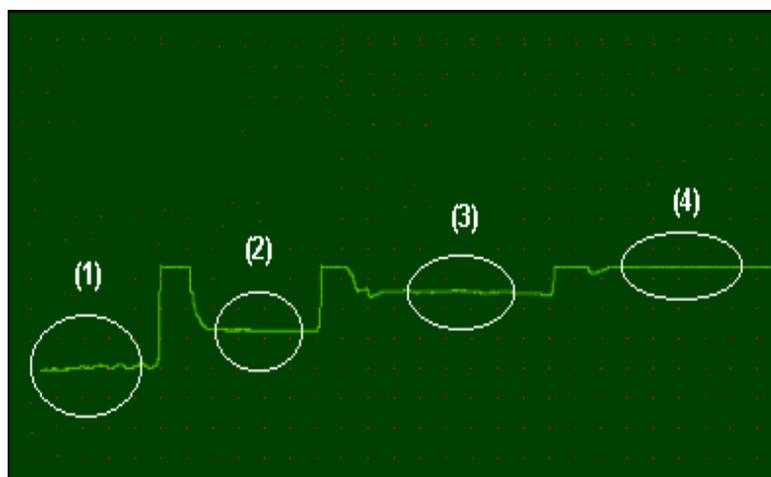


Figura 54. Variação de níveis de tensão contínua em função da espessura do revestimento.

4.2 Verificação da resposta operacional da sonda desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo placa

Nesta seqüência de experimentos, a sonda de teste desenvolvida foi conectada ao sistema de ensaios e os parâmetros adequados de operação foram configurados. A frequência de teste foi ajustada para 280 kHz, o ganho para 25, a fase para 194 e as sensibilidades vertical e horizontal para 1 Volt/divisão (para melhor visualização de sinais). A sonda foi posicionada sobre o padrão de referência número 1P e o sistema foi eletronicamente balanceado.

Na FIG. 55 podem ser observados os sinais registrados para: a) o padrão de referência número 4P (orifício passante – 0,38 mm); b) o padrão de referência número 7P (orifício de fundo plano superficial – 0,27 mm); c) o padrão de referência número 8P (orifício de fundo plano superficial – 0,18 mm). Neste caso, exibem-se telas do sistema de ensaio no modo de apresentação x·y, geralmente mais adequado para a realização de análises e medições.

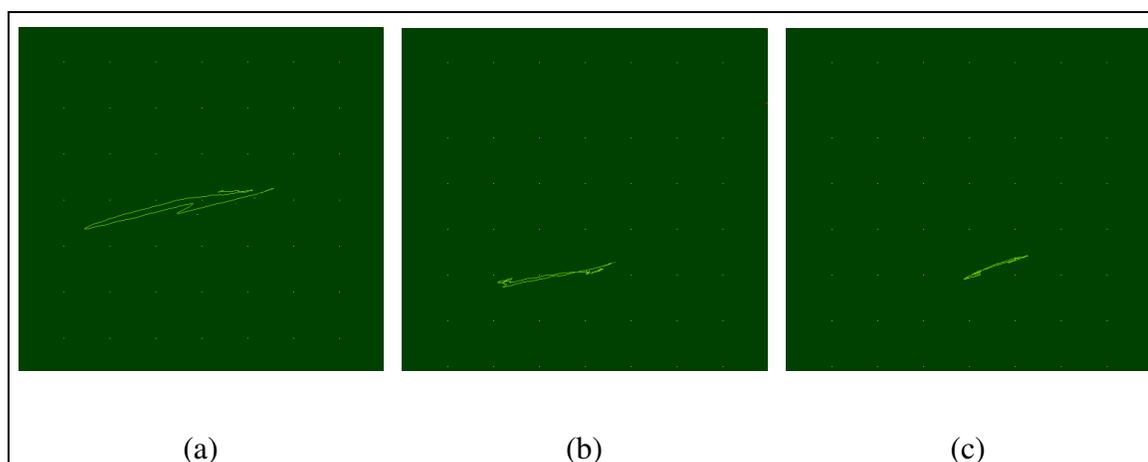


Figura 55. Sinais referentes aos padrões de referência 4P (a), 7P (b) e 8P (c).

Na FIG. 56 podem ser observados sinais registrados (modo de apresentação x·t) para: a) o padrão de referência número 10P (sulco passante – 0,38 mm); b) o padrão de referência número 13P (sulco de fundo plano superficial – 0,28 mm) e c) o padrão de referência número 14P (sulco de fundo plano superficial – 0,19 mm). Observam-se, para todos estes padrões de referência, as diferentes amplitudes dos sinais registrados. A sensibilidade foi ajustada para 2 Volts/divisão. Os dados quantitativos medidos e utilizados na construção de curvas de avaliação são apresentados no ANEXO C3.

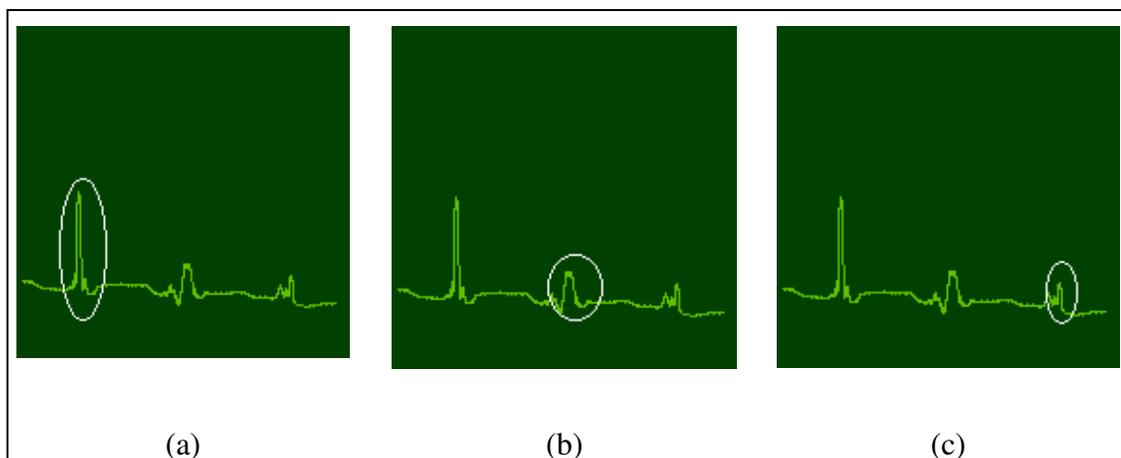


Figura 56. Sinais referentes aos padrões de referência 10P (a), 13P (b) e 14P (c).

4.3 Verificação da imunidade da sonda desenvolvida para combustíveis do tipo placa às interferências geradas por placa adjacente

Como mencionado na seção 3.3.2, para reduzir as interferências ocasionadas pela pequena distância existente entre as placas dos combustíveis MTR, foram introduzidas inovações no desenvolvimento da sonda de teste.

Para demonstrar a eficácia da estratégia empregada, foram realizados dois experimentos. Nos dois casos, a frequência de teste do canal principal do sistema de ensaios foi mantida em 280 kHz, o ganho em 26, a fase em 190. As sensibilidades, vertical e horizontal, no primeiro experimento, foram ajustadas para 2 Volts/divisão.

No primeiro caso, o sensor ativo da sonda foi deslocado sobre um sulco passante (padrão de referência número 10P), adquirindo-se o sinal correspondente. Neste experimento, como representado na FIG. 57 (a), a superfície frontal do sensor permaneceu em contato com a superfície do padrão, como ocorre durante uma operação convencional.

O sinal registrado, conforme aparece na tela do sistema de ensaio, pode ser visto na FIG. 57 (b). Observe-se que o ganho do sistema foi ajustado para permitir a obtenção de um sinal com a maior amplitude possível e isento de saturação.

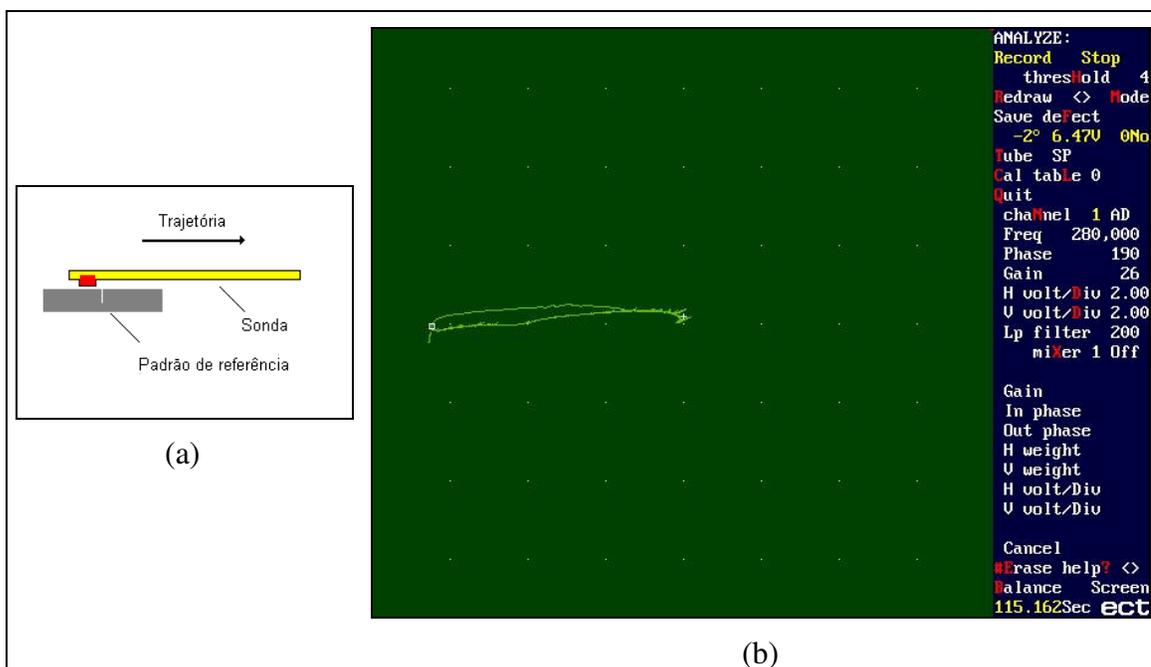


Figura 57. Representação da primeira aquisição de dados (a) e sinal adquirido correspondente (b).

No segundo experimento, o sinal produzido pela sonda foi adquirido de maneira semelhante ao primeiro, mantendo-se inalteradas as condições de operação do equipamento de teste. Como representado na FIG. 58 (a), a posição de contato da sonda foi invertida, deixando a superfície posterior do sensor ativo em contato com a superfície do padrão.

Um pequeno disco de Al-1050, com um diâmetro de 6 mm e 0,38 mm de espessura, foi temporariamente fixado à superfície frontal do sensor ativo, simulando a presença de uma placa isenta de falhas e garantindo ainda um adequado balanceamento do sistema.

O sinal adquirido, conforme aparece na tela do equipamento de ensaio, pode ser observado na FIG. 58 (b). Observe-se que, apenas a sensibilidade do sistema de ensaio precisou ser alterada, de 2 V/divisão para 0,13 V/divisão, para a obtenção de uma figura com amplitude mensurável.

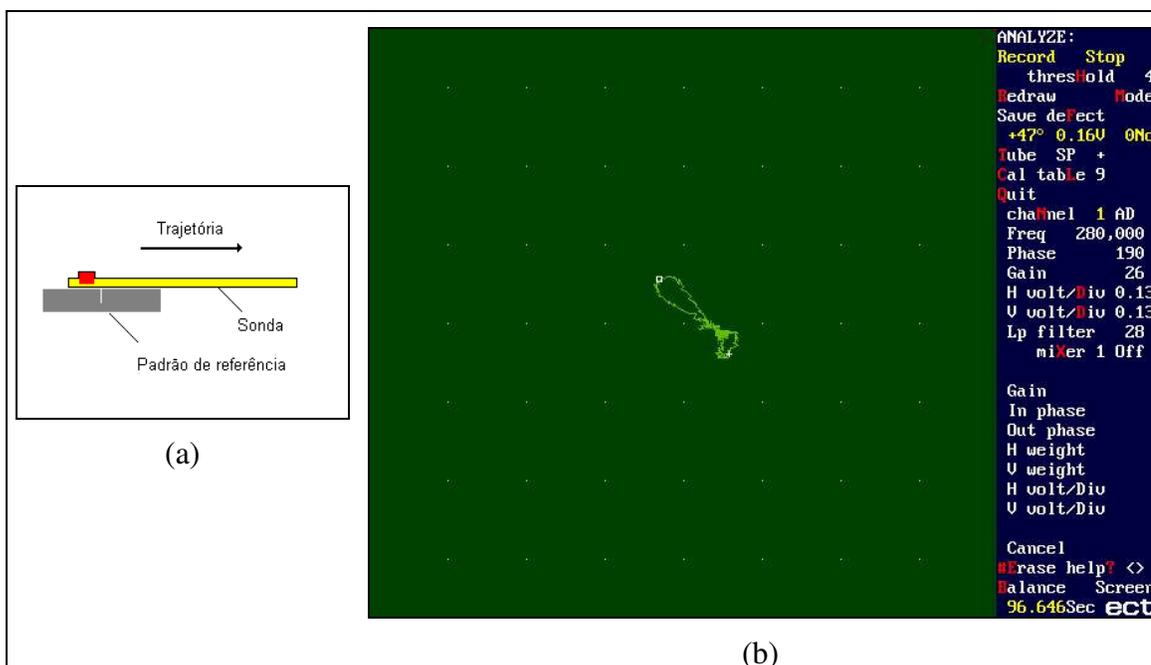


Figura 58. Representação da segunda aquisição de dados (a) e sinal adquirido correspondente (b).

Com auxílio dos recursos de análise do sistema de ensaio, verificou-se que no primeiro experimento a amplitude medida para o sinal adquirido foi de 6,47 V_{pp}. No segundo, a amplitude encontrada foi de 0,16 V_{pp}. Portanto, a razão entre os valores medidos foi de 40,4 : 1. Pode-se expressar esta relação (frente/costas) em decibéis (dB) (Millman e Halkias, 1972), considerando-se que:

$$R_{fc} = 20 \text{Log} \frac{V_f}{V_c} \quad (42)$$

onde,

V_f é a amplitude do sinal para o sensor posicionado de frente, em V_{pp}

V_c é a amplitude do sinal para o sensor posicionado de costas, em V_{pp}

R_{fc} é o valor da relação frente/costas em dB

Aplicando-se à equação (42) os valores medidos nos dois experimentos, encontrou-se o valor de 32,1 dB para a relação frente/costas da sonda desenvolvida. Este valor pode ser considerado apropriado para atender os objetivos deste trabalho.

4.4 Verificação da imunidade das sondas às variações de resistividade elétrica do núcleo combustível

Para minimizar efeitos resultantes das diferenças de resistividade elétrica do núcleo dos combustíveis na resposta das sondas de teste, estabeleceu-se uma frequência de operação, levando-se em conta o efeito pelicular, como discutido na seção 3.1.1. Esta imunidade foi verificada com a realização de dois experimentos.

Utilizando-se a sonda de teste desenvolvida para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico, uma placa de teste da liga Al-1050, com espessura de 0,78 mm, adequadamente conformada (vide seção 3.2.1), contendo uma descontinuidade do tipo SP, foi inspecionada em três condições distintas, registrando-se os sinais correspondentes. A frequência de teste do canal principal foi mantida em 80 kHz, o ganho em 15, a fase em 190 e as sensibilidades vertical e horizontal em 2 Volts/divisão.

Inicialmente a placa foi posicionada sobre um cilindro de Al-1050, com diâmetro 35,6 mm. A seguir, esta placa foi posicionada sobre um cilindro de cobre eletrolítico de igual diâmetro. Por fim, a placa de teste foi posicionada sobre cilindro de PVC. As condições de operação do sistema de ensaio permaneceram inalteradas em todas as condições.

Nos três casos, os sinais obtidos para a descontinuidade existente permaneceram com forma e amplitude inalteradas, apesar das diferenças de resistividade elétrica dos três cilindros: $1,72 \times 10^{-8}$ ohm · m para o cobre eletrolítico; $2,9 \times 10^{-8}$ ohm · m para a liga de Al-1050 e $1,0 \times 10^{12}$ ohm · m para o PVC.

Procedeu-se a um experimento similar, para a sonda de teste desenvolvida para combustíveis tipo placa. Neste caso, empregou-se como meio, uma placa de teste plana da liga de Al-1050, com uma espessura de 0,38 mm, contendo uma descontinuidade do tipo SP. Neste caso, a frequência de teste foi mantida em 280 kHz, o ganho em 25, a fase em 194 e as sensibilidades vertical e horizontal em 2 Volts/divisão. Uma vez mais, observou-se que os sinais obtidos mantiveram a mesma forma e amplitude.

4.5 Validação experimental da Metodologia Desenvolvida

A validação experimental da metodologia desenvolvida, de avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis nucleares de reatores de pesquisa e teste de materiais, foi realizada no Laboratório de Ensaios não Destrutivos do CDTN. Optou-se por sua aplicação aos revestimentos de combustíveis do tipo placa, em função da maior abrangência e da complexidade operacional dos procedimentos envolvidos, quando comparados àqueles utilizados no ensaio de revestimentos de combustíveis do tipo cilíndrico.

Neste experimento, o objeto de ensaio foi o corpo-de-prova construído e descrito na seção 3.7, que foi instalado no interior de um pequeno tanque, abastecido com água destilada. Suas três “placas combustíveis” foram posicionadas verticalmente. Acima da superfície da água, foi montado um dispositivo de movimentação (manual) com dois graus de liberdade (direções X e Y). O uso de um sistema de movimentação, capaz de permitir um correto posicionamento do sensor sobre as superfícies inspecionadas é fundamental para garantir eficácia do processos de caracterização das falhas detectadas.

A sonda de teste foi presa, pela extremidade de seu cabo/suporte, a este dispositivo. A extremidade oposta, onde fica o sensor ativo, foi posicionada dentro do corpo-de-prova, entre a superfície da placa central (lado das falhas usinadas) e a superfície da placa externa adjacente.

Este arranjo, apresentado esquematicamente na FIG. 59, permitiu a realização de varreduras superficiais com uma precisão de $\pm 0,05$ mm. O aspecto real da montagem pode ser observado na FIG. 60.

A sonda de teste foi conectada ao sistema de ensaio, ajustado para operar nas mesmas condições estabelecidas na obtenção das curvas de avaliação. As frequências de teste foram ajustadas para 280 kHz no canal principal e 1,1 MHz no canal auxiliar. Após o balanceamento eletrônico do sistema de ensaio foi realizada a varredura (manual) por toda superfície da placa central.

Para a caracterização das discontinuidades detectadas foi empregada a metodologia proposta e apresentada na seção 3.6. Durante esta execução, ao ocorrer indicação de uma falha, foram registradas:

- As coordenadas, P_x e P_y , correspondentes à posição do centro do sensor ativo da sonda de teste sobre a área ocupada pela descontinuidade;
- A amplitude de tensão, V_p , medida no canal principal, para cada posição registrada;
- A amplitude de tensão, V_a , medida no canal auxiliar para cada posição registrada e sua polaridade ou sentido de formação;
- A profundidade estimada, P_e , para cada posição registrada.

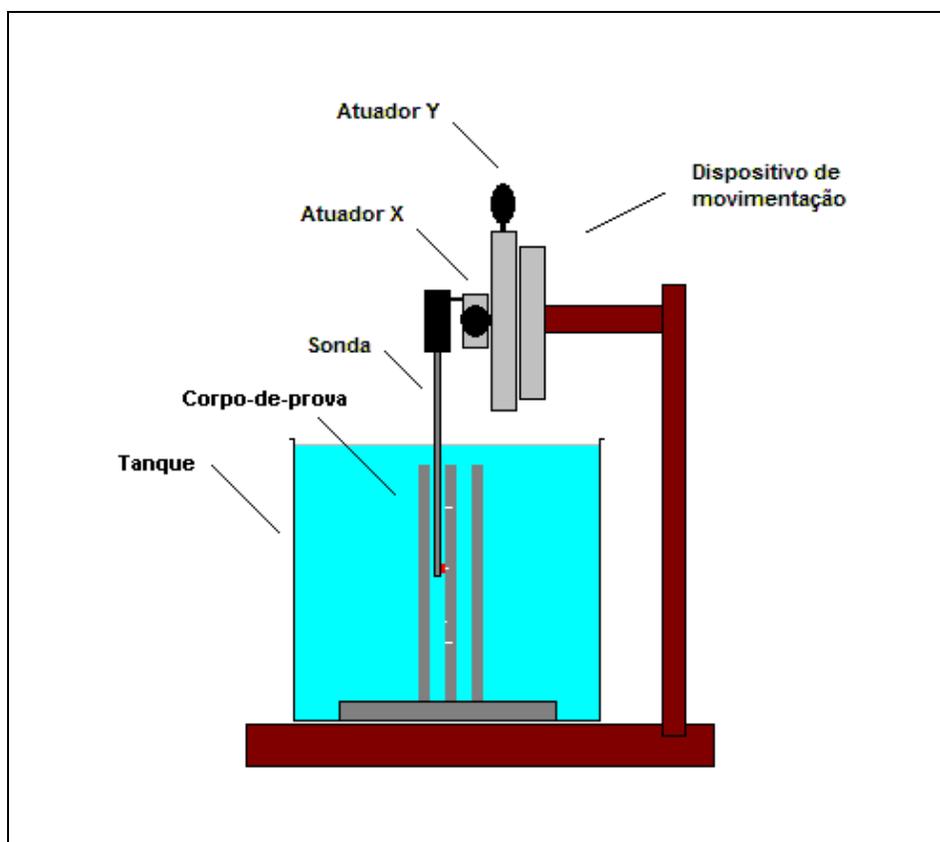


Figura 59. Arranjo empregado na operação de varredura.



Figura 60. Aspecto da montagem empregada nos experimentos de validação.

Os dados obtidos para as seis falhas detectadas foram lançados em tabelas. Gráficos de caracterização foram também construídos. Utilizou-se o programa ORIGIN (MICROCAL, 1999). Na TAB. 5 apresentam-se os dados obtidos para a falha número 1 (SFP superficial – 0,19 mm). O gráfico de caracterização, construído com auxílio da curva 5P, pode ser visto na FIG. 61.

Os dados obtidos para a falha número 6, (OFP superficial – 0,18 mm) são apresentados na TAB. 6. Seu gráfico de caracterização, obtido com auxílio da curva 3P, pode ser visto na FIG. 62. No ANEXO D são apresentados os dados adquiridos e os gráficos de caracterização para as demais descontinuidades detectadas.

Observe-se que não foram representados valores de profundidade menores que aqueles encontrados nas curvas de avaliação. Esta estratégia é adotada em processos de caracterização similares, como por exemplo as recomendações do código ASME (1992) para a inspeção de tubos.

TABELA 5 - Dados obtidos para a falha número 1

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
20,2	42,0	0,0	-	-
20,2	43,0	1,13	0,50	0,100
20,2	44,0	1,26	0,90	0,110
20,2	45,0	1,77	1,87	0,150
20,2	46,0	2,00	2,00	0,168
20,2	47,0	2,15	2,40	0,180
20,2	48,0	2,15	2,40	0,180
20,2	49,0	2,28	3,03	0,190
20,2	50,0	2,24	3,00	0,187
20,2	51,0	2,21	2,59	0,185
20,2	52,0	2,33	3,00	0,195
20,2	53,0	2,50	3,10	0,205
20,2	54,0	2,21	2,60	0,185
20,2	55,0	2,21	2,60	0,185
20,2	56,0	2,10	2,33	0,176
20,2	57,0	1,90	1,95	0,160
20,2	58,0	1,38	0,96	0,120
20,2	59,0	1,00	0,50	-
20,2	60,0	0,0	-	-

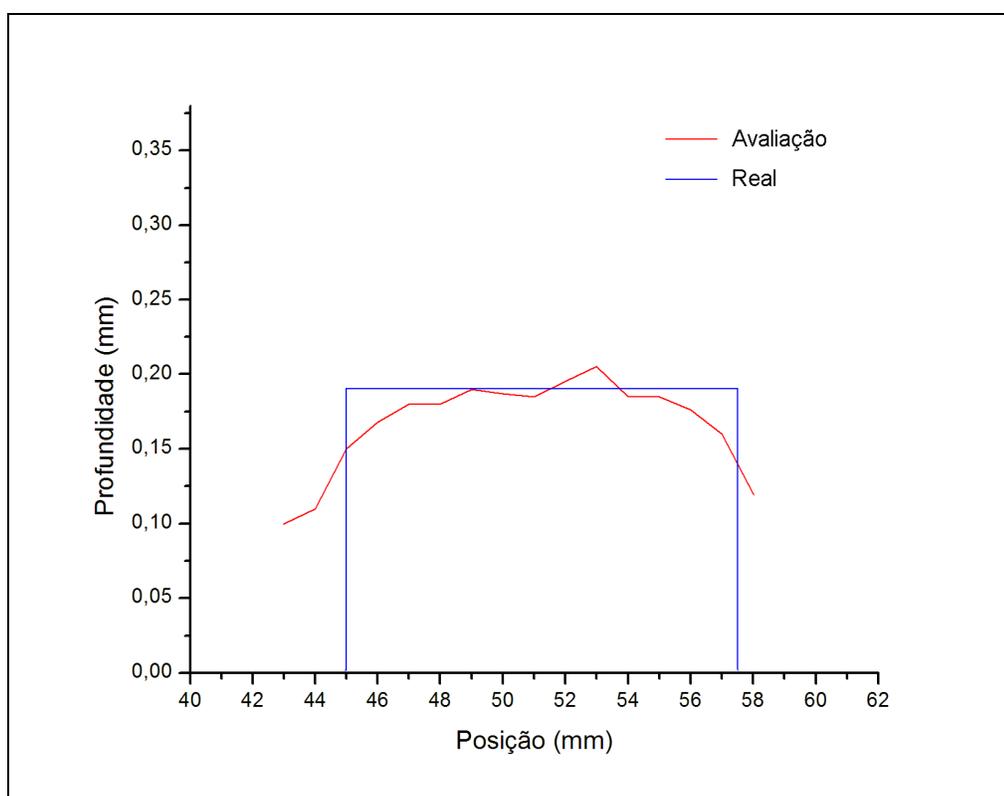


Figura 61. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 1.

TABELA 6 - Dados obtidos para a falha número 6

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
58,0	149,0	0	-	-
58,5	149,0	1,38	-	0,110
59,0	149,0	1,56	1,20	0,155
59,5	149,0	1,64	1,80	0,175
60,0	149,0	1,68	2,48	0,190
60,5	149,0	1,72	2,75	0,195
61,0	149,0	1,66	2,35	0,180
61,5	149,0	1,62	1,76	0,170
62,0	149,0	1,50	1,00	0,140
62,5	149,0	1,34	-	0,100
63,0	149,0	0	-	-

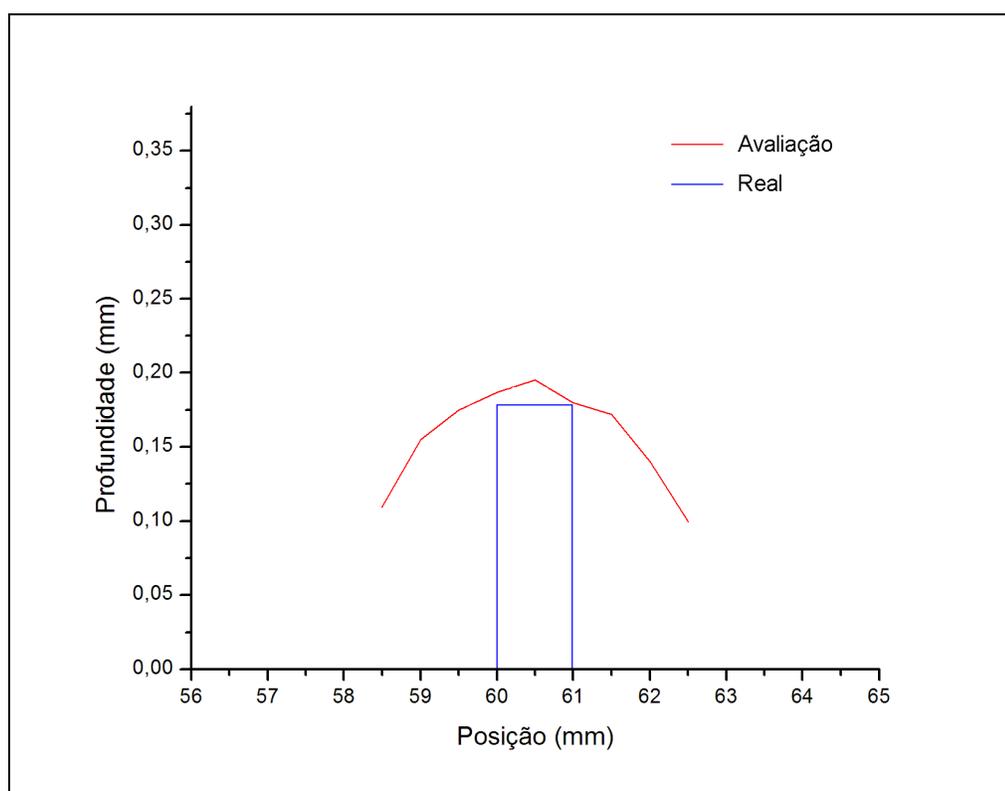


Figura 62. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 6.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As sondas de teste e os padrões de referência para calibração necessários ao desenvolvimento da metodologia de avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores de pesquisa e teste de materiais foram efetivamente construídos. No caso dos sensores para ensaio de combustíveis do tipo placa, as características especiais necessárias para sua aplicação, traduzidas por aspectos dimensionais, funcionais (acesso) e operacionais foram alcançadas pelo emprego de materiais e metodologias construtivas especiais ou inovadoras.

Os sensores desenvolvidos demonstraram capacidade de detecção para descontinuidades volumétricas, com diversas formas, profundidades e localizações, tanto para combustíveis do tipo cilíndrico quanto para os do tipo placa. A relação sinal/ruído verificada em todos os experimentos, permitiu observar e medir os sinais correspondentes às descontinuidades detectadas.

Verificou-se a ocorrência de pequenas flutuações no nível de tensão contínua (tipicamente inferiores a $1,0 V_{pp}$) em regiões livres de descontinuidades volumétricas, que resultam de pequenas flutuações no acoplamento entre o sensor e superfície dos revestimentos (efeito *lift-off*) durante a execução da varredura da sonda. Estas flutuações podem ser causadas: pela rugosidade superficial dos revestimentos, por instabilidade de posicionamento do sistema de varredura empregado ou ainda, por pequenas variações de espessura dos revestimentos.

Para descontinuidades superficiais, verificou-se que quanto maior for a profundidade, maior será a amplitude do sinal correspondente. Para descontinuidades sub-superficiais, quanto mais afastada da superfície externa do revestimento estiver a descontinuidade, menor será a amplitude do sinal correspondente.

Para os dois tipos de combustíveis, a redução intencional da sensibilidade de detecção das sondas, pelo uso de frequências de teste mais elevadas (efeito pelicular), permitiu minimizar os efeitos das diferenças de resistividade elétrica existentes entre os núcleos dos combustíveis reais e aqueles utilizados. O experimento de avaliação da

resposta operacional da sonda de teste sob variadas condições de resistividade do meio, permitiu comprovar a viabilidade de uso desta estratégia.

É importante destacar duas conseqüências diretas que foram observadas no desempenho operacional do sistema de ensaio:

- Descontinuidades superficiais, com profundidades da ordem de 90% da espessura nominal do revestimento ou mais, apresentam sinais de resposta com valores de amplitude semelhantes, como ilustrado na FIG. 63;
- Descontinuidades sub-superficiais localizadas a distâncias da superfície externa da ordem de 50% da espessura nominal do revestimento ou mais, podem apresentar dificuldades de caracterização, ou até mesmo não serem detectadas. O principal fator de limitação está relacionado com a amplitude dos sinais correspondentes. Quando as amplitudes têm níveis baixos (tipicamente inferiores a $1,0 V_{pp}$) podem surgir dificuldades em distingui-los das flutuações de nível de tensão contínua oriundas da varredura da sonda de teste.

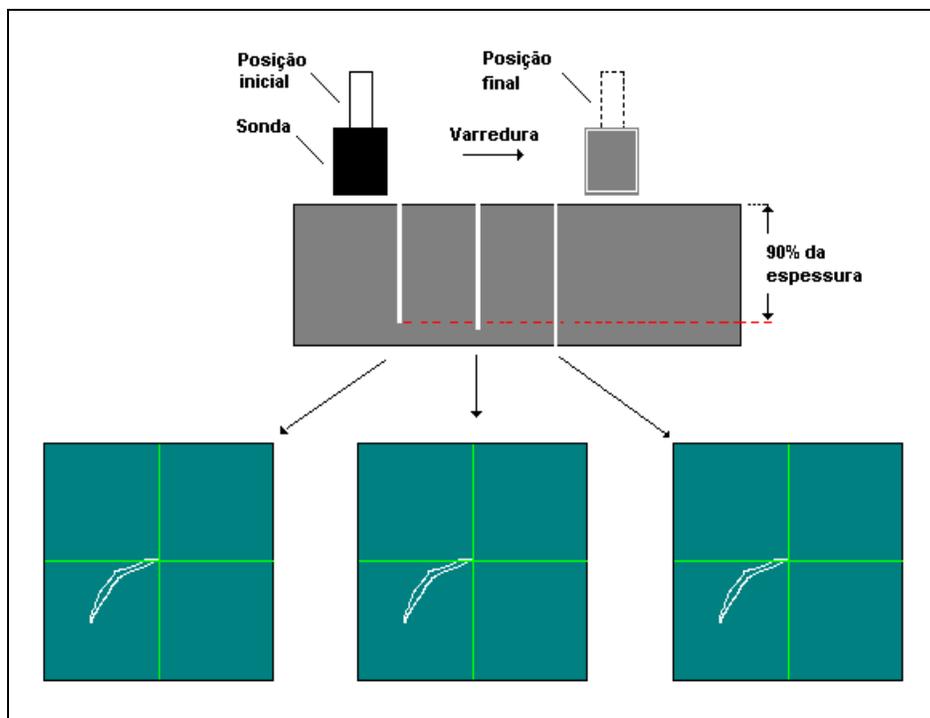


Figura 63. Comportamento do sistema para falhas superficiais afastadas.

A introdução do sistema de absorção de correntes parasitas, realizado pelo disco de Al-1050 montado no lado posterior do carretel da bobina do sensor ativo da sonda de teste desenvolvida para combustíveis do tipo placa, demonstrou ser eficaz para a redução das interferências provocadas pela proximidade de placa adjacente, garantindo ainda a não detecção de quaisquer descontinuidades nela existentes.

Esta característica foi comprovada quantitativamente com a medição da relação frente/costas (para a sensibilidade) da sonda de teste desenvolvida e cujo valor mostrou-se superior a 32 dB.

Na etapa de validação da metodologia de análise proposta neste trabalho verificou-se que o ensaio de correntes parasitas é um método de inspeção não destrutiva capaz de detectar falhas volumétricas em revestimentos de combustíveis nucleares de reatores de pesquisa e teste de materiais. A utilização dos procedimentos propostos para a caracterização das falhas detectadas permitiu avaliar: sua extensão; sua profundidade; seu posicionamento na superfície da placa; e sua localização (superficial ou sub-superficial).

Como em outros métodos não destrutivos, a caracterização de falhas por meio do ensaio de correntes parasitas é obtida de modo indireto (comparativo). Desta maneira, podem ocorrer erros durante a execução do processo de avaliação. Neste trabalho a avaliação de erros foi realizada. Para os sinais medidos nos padrões de referência desenvolvidos para combustíveis do tipo placa os valores máximos foram inferiores a 3 %. Para os padrões dos combustíveis do tipo cilíndrico tais valores não chegaram a 2 %. Assim, optou-se por não apresentar as barras de erros na apresentação de resultados. Verifica-se ainda a existência de algumas limitações e dificuldades, quando da aplicação real do ensaio.

Erros de caracterização relacionados com a extensão de falhas

Procedendo-se a uma comparação entre os dados obtidos nos ensaios de metrologia dimensional e os valores estimados correspondentes, oriundos da inspeção e da correlação empregada no processo de caracterização, para uma determinada descontinuidade, como por exemplo a falha número 1 (SFP superficial – 0,19 mm) existente no corpo-de-prova ensaiado, observam-se diferenças.

Enquanto o valor real da extensão desta falha é de $12,66 \pm 0,01$ mm (vide o ANEXO A4), o valor estimado no procedimento de caracterização mostra-se maior. Esta

diferença é representada por um acréscimo da ordem de 2,0 mm na extremidade inicial da falha e de 1,3 mm na extremidade final, como pode ser observado na FIG. 64.

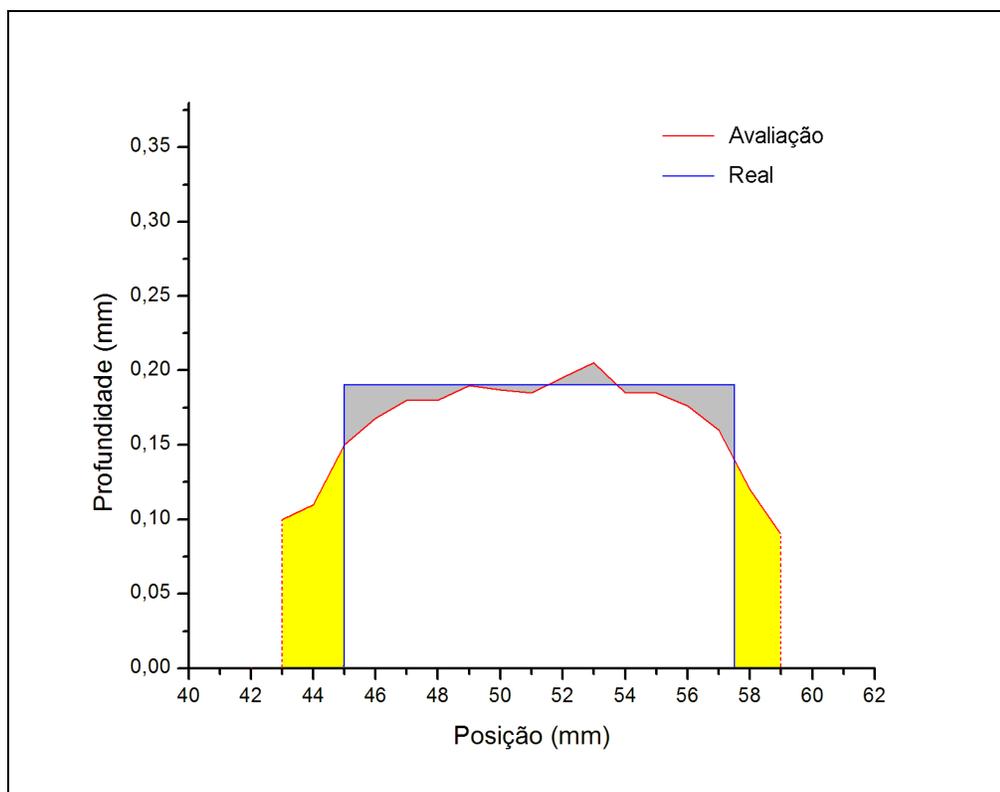


Figura 64. Erros de caracterização para a falha número 1.

A causa deste erro está relacionada com o *campo de sensibilidade* da sonda, que é função do diâmetro do sensor ativo. Verifica-se que, já nas vizinhanças de uma descontinuidade o sistema de ensaio é capaz de evidenciar sua presença. Quanto mais próximo da falha estiver o sensor ativo maior será a tensão medida. Alcança-se um valor máximo, quando todo o campo de sensibilidade do sensor intercepta a descontinuidade, como ilustrado na FIG. 65.

Portanto, a extensão estimada para uma falha, pode apresentar valor maior que sua extensão real. Deste modo, o conhecimento das características construtivas da sonda de teste, em especial o diâmetro de seu sensor ativo, é muito importante e deve ser sempre levado em conta nos processos de caracterização.

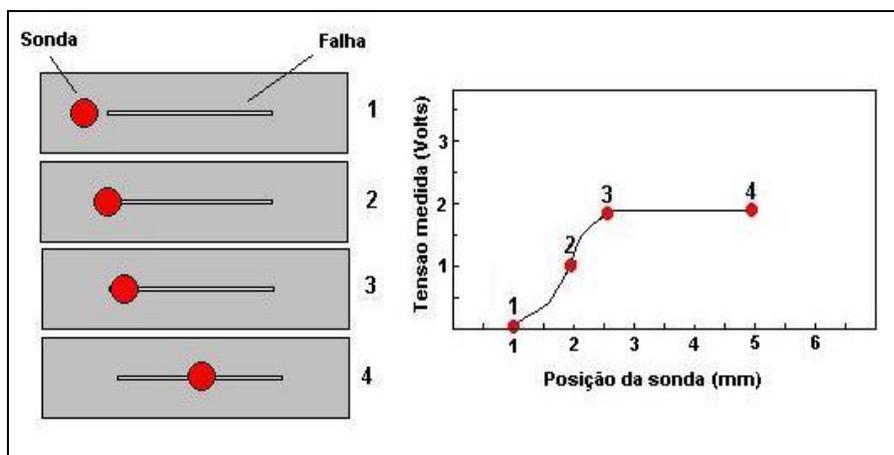


Figura 65. Tensão medida em função da posição relativa sensor-falha.

O campo de sensibilidade da sonda desenvolvida para a avaliação de revestimentos de combustíveis do tipo cilíndrico equivale a um disco com um diâmetro de $6,0 \pm 0,1$ mm. Para a sonda desenvolvida para combustíveis do tipo placa, o campo de sensibilidade equivale a um disco com um diâmetro de $3,0 \pm 0,1$ mm.

Erros de caracterização relacionados com a profundidade de falhas

Recorrendo-se uma vez mais à FIG. 64, observa-se que o valor da profundidade, P1, medido ao longo da extensão da falha, é igual a $0,19 \pm 0,01$ mm (vide o ANEXO A4). Todavia, constata-se variações nos valores estimados no experimento de caracterização. Na região destacada em amarelo, correspondente à extremidade inicial da falha, o sistema de ensaio indica além de sua maior extensão, um incremento contínuo do valor estimado da profundidade, partindo do valor 0,10 mm, na posição 43,0 mm, até atingir o valor 0,18 mm na posição 45,0 mm.

De modo similar, o valor estimado da profundidade decresce de 0,14 mm até 0,10 mm, das posições 57,6 mm até 59,0 mm. A ocorrência destes erros é também devida ao *campo de sensibilidade* do sensor da sonda de teste, como discutido.

Ao longo de toda a extensão da falha, verificam-se flutuações nos valores estimados de profundidade, destacados em cinza na FIG. 64. Por exemplo: na posição 46,0 mm, o valor atinge 0,168 mm, que corresponde a um erro de $- 11,6 \%$, em relação ao valor de profundidade real; na posição 53,0 mm o valor de profundidade estimado foi de 0,205 mm, ou seja, $+ 7,9 \%$ do valor da profundidade real. Estas discrepâncias podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como:

- Variações no acoplamento (distância efetiva) entre a superfície do sensor ativo e a superfície do objeto de ensaio, devidas à presença de óxidos ou impurezas depositadas na superfície do objeto de ensaio;
- Mudanças de alinhamento da sonda ou dispositivo de movimentação que provoquem alterações da inclinação relativa entre o sensor ativo e a superfície do objeto de ensaio;
- Variações de espessura do revestimento da placa ensaiada;
- Alterações de composição química ou metalúrgica do revestimento da placa sob teste;
- Variações de posicionamento dos cursores do sistema de análise do equipamento de ensaio, durante a execução da medição de amplitude de sinais adquiridos.

Limitações para a aplicação do ensaio no corpo-de-prova

Consideram-se como não inspecionáveis duas áreas retangulares, localizadas junto às bordas (superior e inferior) de cada placa do corpo-de-prova, cuja largura equivale ao diâmetro do sensor ativo da sonda de teste. Nestas regiões ocorrem alterações significativas de resistividade elétrica do meio próximo ao sensor da sonda de teste (fronteira alumínio - ar/água), não sendo possível estabelecer critérios confiáveis para caracterização de falhas.

Consideram-se ainda como não inspecionáveis, na superfície de cada uma das placas que constituem o corpo-de-prova, duas áreas retangulares, adjacentes aos espaçadores laterais, cuja largura equivale à metade da largura da sonda de teste, por serem inacessíveis.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Foram apresentados neste trabalho os estudos e desenvolvimentos realizados para o estabelecimento de uma metodologia para avaliação não destrutiva de integridade de revestimentos de combustíveis de reatores nucleares de pesquisa e teste de materiais por meio do ensaio eletromagnético de correntes parasitas.

A pesquisa foi constituída pelo desenvolvimento das sondas de teste, dos padrões de referência para calibração, dos procedimentos utilizados para a obtenção de curvas de avaliação e da metodologia empregada para caracterizar as falhas detectadas pelo sistema de ensaio.

Dois tipos de combustíveis utilizados em reatores de pesquisa foram contemplados neste estudo: os de tipo cilíndrico, tais como aqueles empregados no reator IPR-R1 (TRIGA) e os do tipo placa, tais como aqueles empregados no reator IEA-R1 (MTR).

A realização desta pesquisa exigiu esforços para a superação das dificuldades verificadas durante o desenvolvimento dos recursos necessários à aplicação do ensaio de correntes parasitas aos revestimentos dos combustíveis. Para tanto, foram utilizados processos construtivos e materiais inovadores (não usuais em relação as sondas convencionais), que permitiram a obtenção das características funcionais necessárias à sua utilização prática, em ambiente radioativo e submerso, especialmente para o ensaio de combustíveis do tipo placa, tais como: a capacidade de acesso às superfícies das placas combustíveis, a imunidade às interferências de placas adjacentes e a imunidade às variações de resistividade elétrica dos materiais que constituem o núcleo.

As sondas desenvolvidas, quando conectadas ao sistema de ensaio disponível, apresentaram desempenho adequado e demonstraram efetiva capacidade de detecção de descontinuidades volumétricas superficiais e sub-superficiais para os dois tipos de combustíveis estudados, como verificado quando da obtenção das curvas de avaliação e da realização do ensaio do corpo-de-prova.

A real aplicabilidade da metodologia de avaliação de integridade proposta foi demonstrada com a caracterização quantitativa das falhas presentes num corpo-de-prova construído, representando parcialmente um combustível do tipo placa e incorporando as dificuldades de acesso anteriormente mencionadas e em ambiente não radioativo. Os resultados obtidos permitem afirmar que esta metodologia é funcional, confiável e poderá ser utilizada em combustíveis reais.

Como em outros métodos não destrutivos de avaliação de integridade, a aplicação da metodologia proposta apresenta limitações. A detecção de descontinuidades sub-superficiais afastadas das superfícies externa do revestimento (tipicamente acima de 50 por cento da espessura nominal) pode ser dificultada pelo nível de ruído presente durante a varredura da sonda de teste.

Algumas regiões das superfícies, próximas às bordas externas de placas não podem ser inspecionadas por limitação de acesso ou não homogeneidade da resistividade elétrica do meio próximo ao sensor da sonda de teste (fronteira alumínio - ar/água).

O processo de caracterização de descontinuidades apresenta algumas imprecisões, tanto para o comprimento quanto para a profundidade das descontinuidades detectadas. A razão principal associada é a dimensão do campo de sensibilidade da sonda de teste. O conhecimento desta característica, que deve ser considerada quando da realização das avaliações, é fundamental. Outro fator importante é o nível de ruído gerado durante a varredura da sonda de teste.

A contribuição original deste trabalho foi estabelecer uma nova metodologia de avaliação de integridade para revestimentos de combustíveis de reatores de pesquisa e teste de materiais, que representa real avanço na atual capacidade para detecção e caracterização de falhas existentes, incrementando a confiabilidade e a segurança operacional destes componentes.

6.2 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Um dos objetivos do projeto RLA-4/018, “Gestão de combustíveis queimados de reatores de pesquisa” (*Research reactors spent fuel management*), patrocinado pela IAEA, em andamento, é a utilização imediata da metodologia ora desenvolvida na investigação de falhas em combustíveis reais.

Para isto estão sendo construídas sondas de teste similares às aquelas desenvolvidas para este trabalho, com características elétricas e físicas semelhantes e dimensões adequadas (maior comprimento). Também um sistema de movimentação remota para sondas de teste, com três graus de liberdade e alcances de trajetórias adequados deverá ser construído ou adquirido.

A metodologia de avaliação de integridade proposta e apresentada neste trabalho poderá ser aprimorada. Podem ser sugeridos alguns temas para pesquisa visando aperfeiçoar algumas características das sondas de teste, especialmente aquelas utilizadas na inspeção de combustíveis do tipo placa, melhorando seu desempenho operacional.

Um desafio é a construção de sensores ativos com dimensões mais reduzidas, principalmente o tamanho de seu campo de sensibilidade. Esta redução permitiria tornar mais precisos os processos de caracterização das discontinuidades detectadas. Observe-se que o uso de sondas com sensores ativos menores implicaria maior tempo para promover a varredura das superfícies dos revestimentos. Sugere-se pois a utilização específica destes sensores na caracterização de falhas previamente localizadas por sondas dotadas de sensores ativos maiores.

Para a caracterização específica de discontinuidades volumétricas localizadas (como trincas), sugere-se a realização de estudos que levem ao desenvolvimento de sondas de teste com sensores ativos de dimensões reduzidas e que operem com técnica diferencial. Em princípio, para este tipo de discontinuidade, tais sondas podem apresentar melhores resultados que os alcançados com sondas que operam com técnica absoluta.

Outra sugestão é promover estudos do comportamento do sistema de ensaios operando com frequências elevadas e sondas adequadas para avaliar a possibilidade de desenvolvimento de metodologias de avaliação para discontinuidades superficiais de pequena profundidade e medição de altura em camadas de óxidos não condutores.

A metodologia desenvolvida neste trabalho poderá ser ainda adaptada e empregada como ferramenta para controlar a qualidade de fabricação de combustíveis nucleares de reatores de pesquisa e teste de materiais, tais como aqueles produzidos no CCN do IPEN.

ANEXO A - Relatórios de Metrologia Dimensional

A.1 Relatório referente aos padrões construídos para avaliação de combustíveis do tipo cilíndrico

 MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN		
RELATÓRIO TÉCNICO		
NÚMERO:	RC-EC2-017/2003	
OBJETO:	Medidas Dimensionais	
CLIENTE:	Donizete Anderson de Alencar	
DATA:	17/11/2003	
REFERÊNCIA:		
R. Prof. Mário Werneck, s/n° Cidade Universitária - Pampulha Caixa Postal 941 CEP: 30161-970 Belo Horizonte - MG	Telefone : (031) 3499-3239 Fac-símile: (031) 3499-3390	CGC: 00.402.552/0012-81 Inscrição Estadual: ISENTO

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

2

OBJETIVO

Realizar medidas dimensionais em vinte e duas placas metálicas planas, contendo orifícios circulares ou sulcos de fundo plano.

MATERIAL

Liga de Alumínio 1050

NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA

Vinte e dois (22).

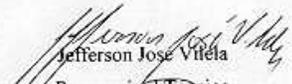
EQUIPAMENTOS USADOS

- Micrômetro milesimal (0,001 mm) Mitutoyo N. 3087114.
- Bloco padrão de 10 mm Mitutoyo grau zero.
- Microscópio Leitz Modelo Metallux (aumento 200 x).

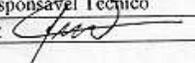
RESULTADOS DOS ENSAIOS

PLACA	Diâmetro ou largura (mm) D	Comprimento (mm) C	Profundidade (mm) P	Espessura média (mm) E
1	-	-	-	0,78 ± 0,01
2	-	-	-	0,58 ± 0,01
3	-	-	-	0,41 ± 0,01
4	-	-	-	0,22 ± 0,01
5	1,02 ± 0,01	-	0,78 ± 0,01	0,78 ± 0,01
6	1,00 ± 0,01	-	0,64 ± 0,01	0,78 ± 0,01
7	1,01 ± 0,01	-	0,49 ± 0,01	0,78 ± 0,01
8	1,00 ± 0,01	-	0,33 ± 0,01	0,78 ± 0,01
9	1,02 ± 0,01	-	0,17 ± 0,01	0,78 ± 0,01
10	1,00 ± 0,01	-	0,61 ± 0,01	0,78 ± 0,01
11	1,02 ± 0,01	-	0,49 ± 0,01	0,78 ± 0,01
12	1,01 ± 0,01	-	0,33 ± 0,01	0,78 ± 0,01
13	1,02 ± 0,01	-	0,16 ± 0,01	0,78 ± 0,01
14	0,23 ± 0,01	11,67 ± 0,01	0,78 ± 0,01	0,78 ± 0,01
15	0,22 ± 0,01	11,70 ± 0,01	0,61 ± 0,01	0,78 ± 0,01
16	0,22 ± 0,01	11,69 ± 0,01	0,50 ± 0,01	0,78 ± 0,01
17	0,23 ± 0,01	11,68 ± 0,01	0,35 ± 0,01	0,78 ± 0,01
18	0,23 ± 0,01	11,67 ± 0,01	0,17 ± 0,01	0,78 ± 0,01
19	0,22 ± 0,01	11,70 ± 0,01	0,62 ± 0,01	0,78 ± 0,01
20	0,23 ± 0,01	11,71 ± 0,01	0,46 ± 0,01	0,78 ± 0,01
21	0,22 ± 0,01	11,68 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,78 ± 0,01
22	0,22 ± 0,01	11,69 ± 0,01	0,17 ± 0,01	0,78 ± 0,01


Antonio Pereira Santiago
Executor/Emitente


Jefferson José Vilela
Responsável Técnico

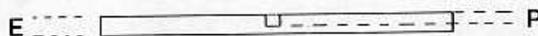
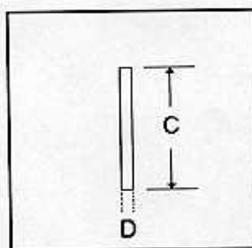
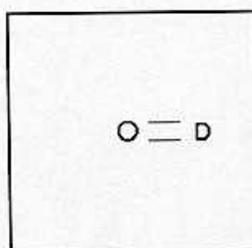
17/11/2003 RC - EC2 - 017/2003

Rev.: 

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

3

DIAGRAMA DE MEDIÇÃO



17/11/2003 RC - EC2 - 017/2003

Rev.: 

A.2 Relatório referente aos padrões construídos para avaliação de combustíveis do tipo placa (antes da colagem)


MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: RC-EC2-018/2003
OBJETO: Medidas Dimensionais
CLIENTE: Donizete Anderson de Alencar
DATA: 17/11/2003
REFERÊNCIA:

R. Prof. Mário Werneck, s/nº
Cidade Universitária - Pampulha
Caixa Postal 941
CEP: 30161 -970 Belo Horizonte - MG

Telefone : (031) 3499-3239
Fac-símile: (031) 3499-3390

CGC: 00.402.552/0012-81
Inscrição Estadual: ISENT0

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

2

OBJETIVO

Realizar medidas dimensionais em quinze placas metálicas planas, contendo orifícios circulares ou sulcos de fundo plano.

MATERIAL

Liga de Alumínio 1050

NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA

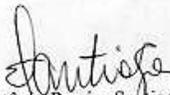
Quinze (15).

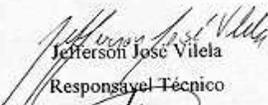
EQUIPAMENTOS USADOS

- Micrômetro milesimal (0,001 mm) Mitutoyo N. 3087114.
- Bloco padrão de 10 mm Mitutoyo grau zero.
- Microscópio Leitz Modelo Metallux (aumento 200 x).

RESULTADOS DOS ENSAIOS

PLACA	Diâmetro ou largura (mm) D	Comprimento (mm) C	Profundidade (mm) P	Espessura média (mm) E
1	-	-	-	0,38 ± 0,01
2	-	-	-	0,28 ± 0,01
3	-	-	-	0,19 ± 0,01
4	1,01 ± 0,01	-	0,38 ± 0,01	0,38 ± 0,01
5	1,00 ± 0,01	-	0,28 ± 0,01	0,38 ± 0,01
6	1,02 ± 0,01	-	0,17 ± 0,01	0,38 ± 0,01
7	1,01 ± 0,01	-	0,27 ± 0,01	0,38 ± 0,01
8	1,01 ± 0,01	-	0,18 ± 0,01	0,38 ± 0,01
9	1,02 ± 0,01	-	0,10 ± 0,01	0,38 ± 0,01
10	0,11 ± 0,01	11,68 ± 0,01	0,38 ± 0,01	0,38 ± 0,01
11	0,11 ± 0,01	11,71 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,38 ± 0,01
12	0,12 ± 0,01	11,70 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,38 ± 0,01
13	0,11 ± 0,01	11,69 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,38 ± 0,01
14	0,12 ± 0,01	11,68 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,38 ± 0,01
15	0,11 ± 0,01	11,70 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,38 ± 0,01


Antônio Pereira Santiago
Executor/Emitente


Jefferson José Vilela
Responsável Técnico

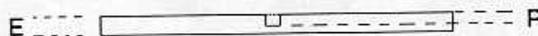
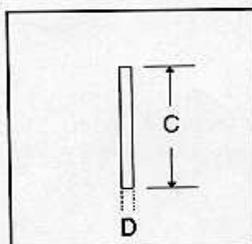
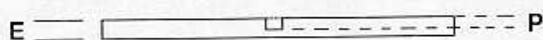
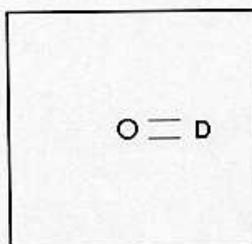
17/11/2003 RC - EC2-018/2003

Rev. 

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

3

DIAGRAMA DE MEDIÇÃO



17/11/2003 RC - EC2-018/2003

Rev. 

A.3 Relatório referente aos padrões construídos para avaliação de combustíveis do tipo placa (após a colagem)



**MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN**

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: RC-EC2-019/2003
OBJETO: Medidas Dimensionais
CLIENTE: Donizete Anderson de Alencar
DATA: 20/11/2003
REFERÊNCIA:

R. Prof. Mário Werneck, s/nº
Cidade Universitária - Pampulha
Caixa Postal 941
CEP: 30161-970 Belo Horizonte - MG

Telefone : (031) 3499-3239
Fac-símile: (031) 3499-3390

CGC: 00.402.552/0012-81
Inscrição Estadual: ISENTO

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

2

OBJETIVO

Realizar medidas dimensionais de espessura em quinze conjuntos (colagem) de placas metálicas planas.

MATERIAL

Liga de Alumínio 1050

NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA

Quinze (15).

EQUIPAMENTOS USADOS

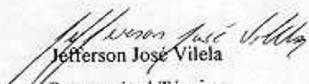
- Micrômetro milesimal (0,001 mm) Mitutoyo N. 3087114.
- Bloco padrão de 10 mm Mitutoyo grau zero.

RESULTADOS DOS ENSAIOS

PLACA	Espessura média (mm) *
1	1,56 ± 0,01
2	1,45 ± 0,01
3	1,36 ± 0,01
4	1,56 ± 0,01
5	1,57 ± 0,01
6	1,57 ± 0,01
7	1,56 ± 0,01
8	1,55 ± 0,01
9	1,57 ± 0,01
10	1,56 ± 0,01
11	1,56 ± 0,01
12	1,57 ± 0,01
13	1,56 ± 0,01
14	1,56 ± 0,01
15	1,55 ± 0,01

* Média de 5 leituras


Antônio Pereira Santiago
Executor/Emitente


Jefferson José Vilela
Responsável Técnico

20/11/2003 RC - EC2-019/2003

Rev.: 

A.4 Relatório referente ao corpo-de-prova



MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: RC-EC2-005/2004

OBJETO: Medidas Dimensionais

CLIENTE: Donizete Anderson de Alencar

DATA: 20/02/2004

REFERÊNCIA:

R. Prof. Mário Werneck, s/n°
Cidade Universitária - Pampulha
Caixa Postal 941
CEP: 30161 -970 Belo Horizonte - MG

Telefone : (031) 3499-3239
Fac-símile: (031) 3499-3390

CGC: 00.402.552/0012-81
Inscrição Estadual: ISENTO

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

2

OBJETIVO

Realizar medidas dimensionais em três conjuntos (colagem) de placas metálicas planas. O conjunto número 3 contém orifícios circulares ou sulcos de fundo plano.

MATERIAL

Liga de Alumínio 1050

NÚMERO DE CORPOS-DE-PROVA

3 (Três)

EQUIPAMENTOS USADOS

- Micrômetro milesimal (0,001 mm) Mitutoyo N. 3087114.
- Bloco padrão de 10 mm Mitutoyo grau zero.
- Microscópio Leitz Modelo Metallux (aumento 200 x)

RESULTADOS DOS ENSAIOS**Medição de espessuras**

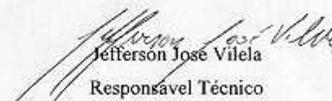
Conjunto	Espessura média (mm) *
1	1,53
2	1,54
3	1,52

Medição de orifícios e sulcos de fundo plano – conjunto 3

AFASTAMENTO (mm)		EXTENSÃO (mm)		PROFUNDIDADE (mm)	
POSIÇÃO	MEDIDA	POSIÇÃO	MEDIDA	POSIÇÃO	MEDIDA
A1	45,02 ± 0,01	C1	12,66 ± 0,01	P1	0,19 ± 0,01
A2	50,08 ± 0,01	C2	0,11 ± 0,01	P2	0,38 ± 0,01
A3	100,04 ± 0,01	C3	0,11 ± 0,01	P3	0,09 ± 0,01
A4	94,02 ± 0,01	C4	12,65 ± 0,01	P4 *	0,19 ± 0,01
A5	149,00 ± 0,01	C5	1,01 ± 0,01	P5	0,38 ± 0,01
A6	149,00 ± 0,01	C6	1,01 ± 0,01	P6	0,18 ± 0,01
B1	20,03 ± 0,01	D1	0,11 ± 0,01		
B2	53,04 ± 0,01	D2	12,67 ± 0,01		
B3	15,02 ± 0,01	D3	12,66 ± 0,01		
B4	61,00 ± 0,01	D4	0,10 ± 0,01		
B5	19,02 ± 0,01				
B6	60,05 ± 0,01				

* Localizado do lado oposto


Antônio Pereira Santiago
Executor/Emitente

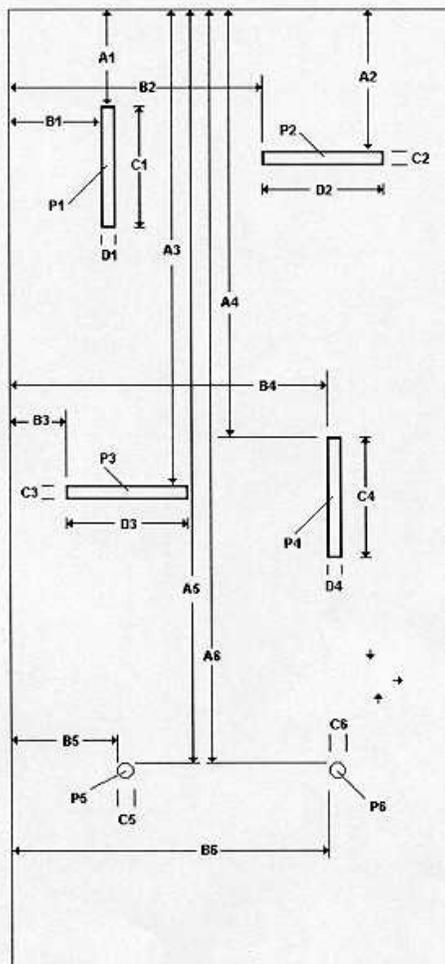

Jefferson José Vilela
Responsável Técnico

20/02/2004 RC – EC2-005/2004

Rev.: 

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

3



20/02/2004 RC - EC2-005/2004

Rev.: *[Signature]*

Observe-se que as posições: P1, P2, P3, P4, P5 e P6, correspondem às falhas identificadas como: 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

ANEXO B – Detalhes construtivos das sondas de teste desenvolvidas

B.1 Sonda de teste para avaliação de combustíveis do tipo cilíndrico

A sonda de teste desenvolvida para avaliação de integridade de combustíveis do tipo cilíndrico foi construída sobre uma carcaça de PVC, constituída de um carretel duplo e um calço-guia. Suas dimensões encontram-se representadas na FIG. 66.

Observam-se no carretel dois rasgos circunferenciais, simétricos, usinados próximos à cada extremidade para acomodar os enrolamentos do sensor ativo e da bobina de compensação. Na extremidade inferior encaixa-se um calço-guia, usinado em PVC, cuja geometria, em curva, promove o acoplamento adequado entre a superfície externa do sensor ativo e a superfície do revestimento do combustível a examinar. O acoplamento entre as duas peças dá-se por meio de um furo existente no calço-guia e colagem.

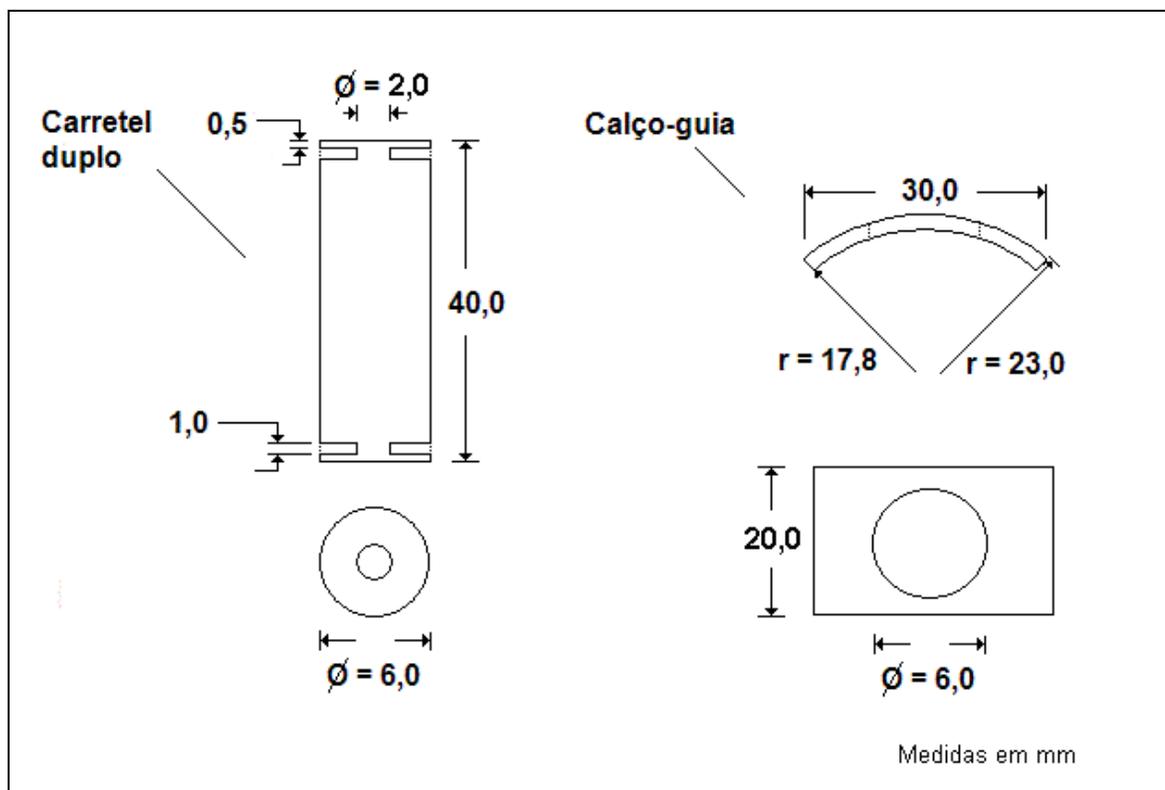


Figura B1. Diagrama contendo as dimensões principais da carcaça para sonda de teste construída para ensaio de combustíveis do tipo cilíndrico.

Esta carcaça foi afixada a uma placa de circuito impresso construída para interligar a fiação dos sensores ativo e de compensação aos cabos de conexão elétrica, cujo diagrama pode ser visto na FIG. 67.

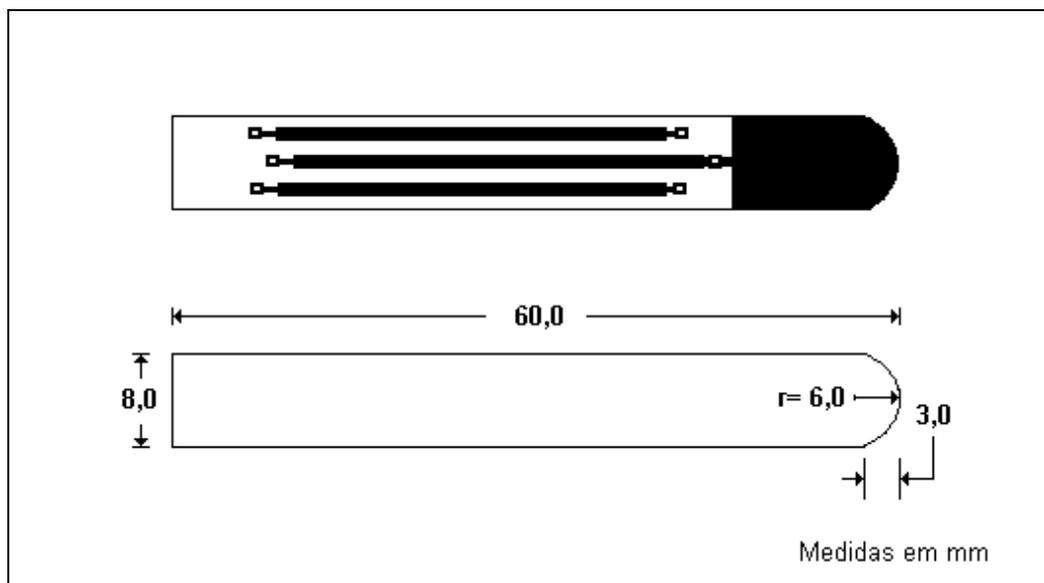


Figura B2. Desenho (*lay-out*) de circuito impresso para a sonda (combustíveis do tipo cilíndrico).

B.2 Sonda de teste para avaliação de combustíveis do tipo placa

A sonda de teste desenvolvida para avaliação de integridade de combustíveis do tipo placa foi diretamente construída sobre uma carcaça ou chassis formado por uma placa laminada de fibra de vidro, com espessura nominal de 1,5 mm e revestida por um filme de cobre eletrolítico, com espessura nominal de 0,1 mm e cujas dimensões de projeto encontram-se representadas na FIG. 68. Observa-se, à esquerda, o furo de 3,5 mm usinado para acomodar o sensor ativo.

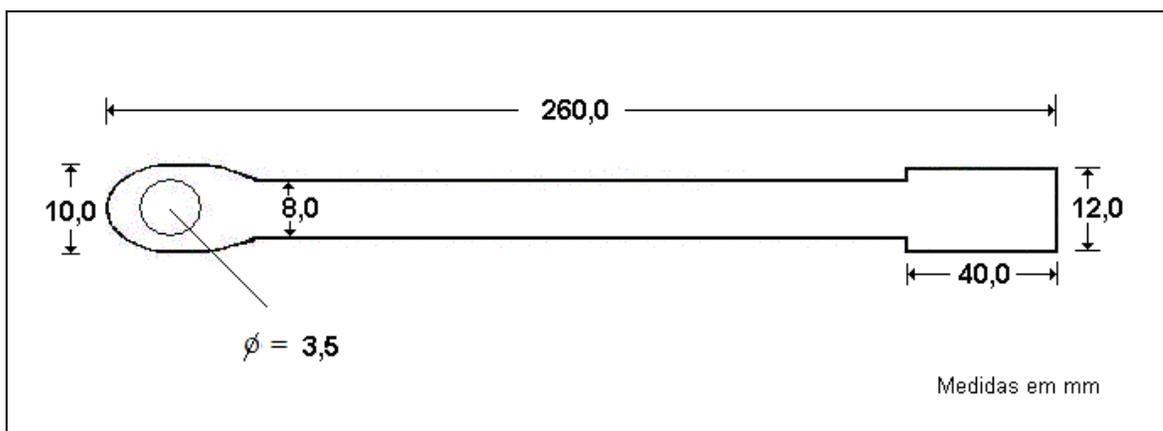


Figura B3. Diagrama contendo as dimensões principais da carcaça para sonda de teste construída para ensaio de combustíveis do tipo placa.

Utilizando-se processos de remoção química do cobre, trilhas e ilhas para soldagem de componentes foram impressas sobre sua superfície, como mostrado na FIG. 69. A bobina de compensação, representada em verde, fica posicionada junto à extremidade direita da carcaça. Observam-se ainda as ilhas impressas para a soldagem dos cabos de conexão elétrica.

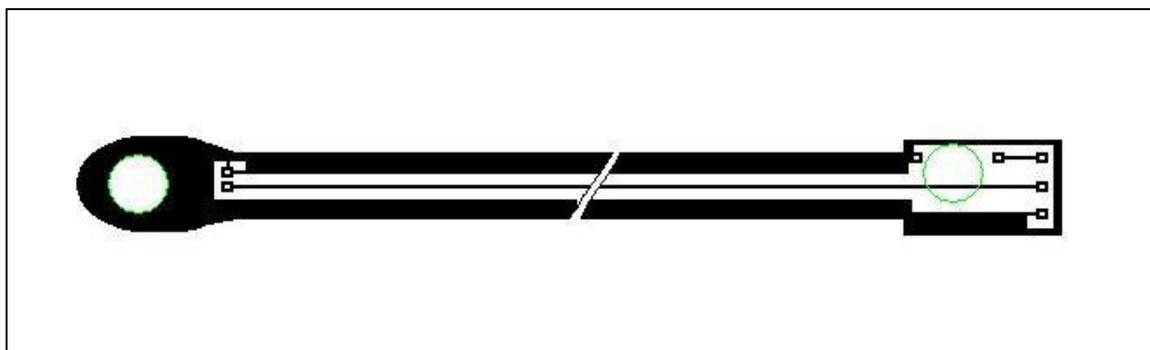


Figura B4. Desenho (*lay-out*) de circuito impresso para a sonda (combustíveis tipo placa).

ANEXO C – Dados e curvas de avaliação obtidas para os padrões de referência construídos

C.1 Parâmetros utilizados na aquisição de dados

Para combustíveis do tipo cilíndrico, canal principal:

- Frequência de ensaio - f_0 : 80 kHz;
- Ganho: 15;
- Ângulo de fase: 174;
- Sensibilidade horizontal: 1 Volt/Divisão;
- Sensibilidade vertical: 1 Volt/Divisão.

Para combustíveis do tipo cilíndrico, canal auxiliar:

- Frequência de ensaio - f_a : 320 kHz;
- Ganho: 18;
- Ângulo de fase: 103;
- Sensibilidade horizontal: 1 Volt/Divisão;
- Sensibilidade vertical: 1 Volt/Divisão.

Para combustíveis do tipo placa, canal principal:

- Frequência de ensaio - f_0 : 280 kHz;
- Ganho: 25;
- Ângulo de fase: 194;
- Sensibilidade horizontal: 2 Volts/Divisão;
- Sensibilidade vertical: 2 Volts/Divisão.

Para combustíveis do tipo placa, canal auxiliar:

- Frequência de ensaio f_a : 1,1 MHz;
- Ganho: 25;
- Ângulo de fase: 112 ;
- Sensibilidade horizontal: 1 Volt/Divisão;
- Sensibilidade vertical: 1 Volt/Divisão.

C.2 Tabelas de dados e curvas de avaliação para combustíveis do tipo cilíndrico

TABELA C1 - Valores de amplitude e espessura (grupo 1 – Cilíndrico - f_0 : 80 kHz)

Padrão	Descrição	Espessura (mm)	Equivalência (%)	Tensão (V) *
1C	Perda de espessura	$0,78 \pm 0,01$	100	0,00 **
2C	Perda de espessura	$0,58 \pm 0,01$	74,3	1,20
3C	Perda de espessura	$0,41 \pm 0,01$	52,5	2,30
4C	Perda de espessura	$0,22 \pm 0,01$	28,2	3,40

* Valor médio de 5 medidas

** Atribuído como valor de referência

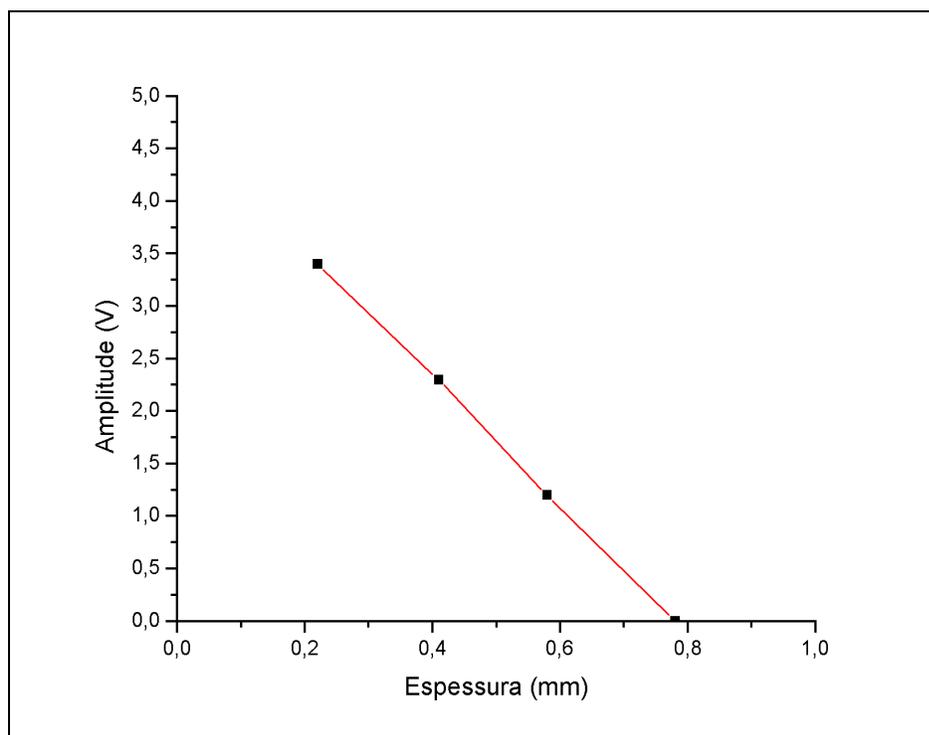


Figura C1. Curva de avaliação 1C (f_0 : 80 kHz).

TABELA C2 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 2 – Cilíndrico - f_0 : 80 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
5C	OP	$0,78 \pm 0,01$	100	2,75
6C	OFP sub-superficial	$0,64 \pm 0,01$	82,0	1,50
7C	OFP sub-superficial	$0,49 \pm 0,01$	62,8	1,04
8C	OFP sub-superficial	$0,33 \pm 0,01$	42,3	0,69
9C	OFP sub-superficial	$0,17 \pm 0,01$	21,8	-

* Valor médio de 5 medidas

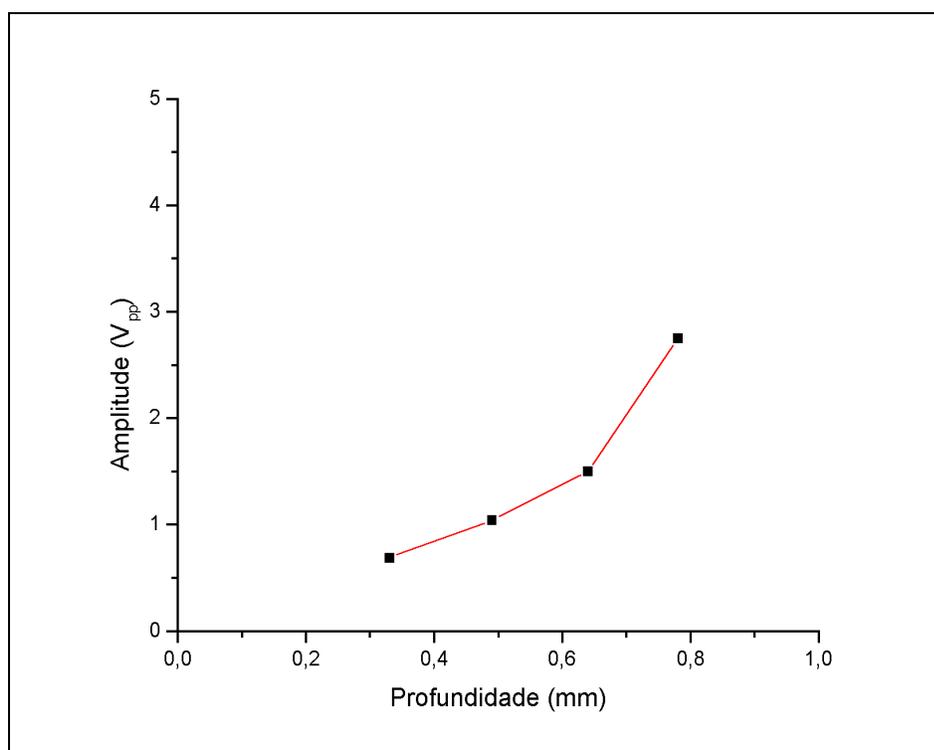


Figura C2. Curva de avaliação 2C (f_0 : 80 kHz).

TABELA C3 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 3 – Cilíndrico - f_0 : 80 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
5C	OP	$0,78 \pm 0,01$	100	2,75
10C	OFP superficial	$0,61 \pm 0,01$	78,2	2,19
11C	OFP superficial	$0,49 \pm 0,01$	62,8	1,80
12C	OFP superficial	$0,33 \pm 0,01$	42,3	1,22
13C	OFP superficial	$0,16 \pm 0,01$	20,5	0,70

* Valor médio de 5 medidas

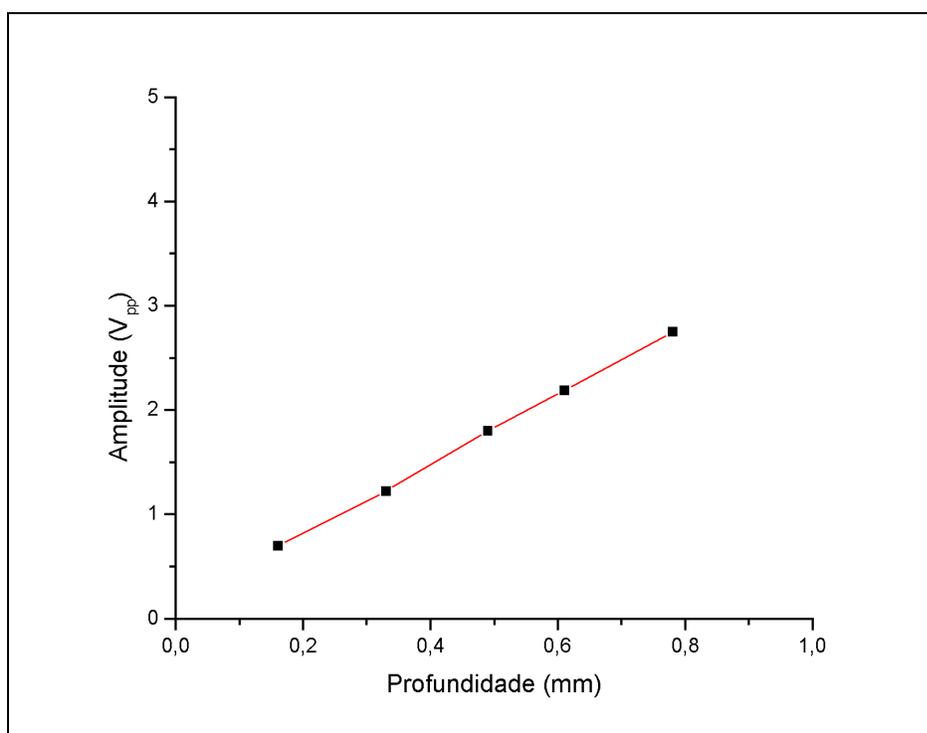


Figura C3. Curva de avaliação 3C (f_0 : 80 kHz).

TABELA C4 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 4 – Cilíndrico - f_0 : 80 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
14C	SP	$0,78 \pm 0,01$	100	6,49
15C	SFP sub-superficial	$0,61 \pm 0,01$	78,2	2,97
16C	SFP sub-superficial	$0,50 \pm 0,01$	64,1	1,56
17C	SFP sub-superficial	$0,35 \pm 0,01$	44,9	0,96
18C	SFP sub-superficial	$0,17 \pm 0,01$	21,8	0,30

* Valor médio de 5 medidas

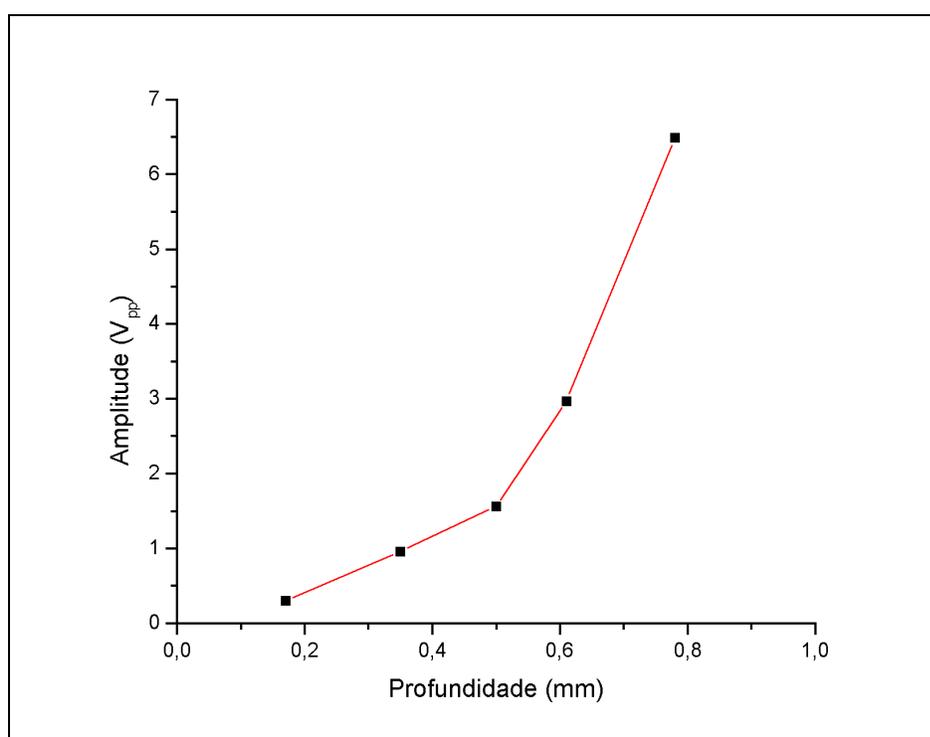


Figura C4. Curva de avaliação 4C (f_0 : 80 kHz).

C.3 Tabelas de dados e curvas de avaliação para combustíveis do tipo placa

TABELA C5 - Valores de amplitude e espessura (grupo 1 – Placa - f_0 : 280 kHz)

Padrão	Descrição	Espessura (mm)	Equivalência (%)	Tensão (V) *
1P	Perda de espessura	$0,38 \pm 0,01$	100	0,00 **
2P	Perda de espessura	$0,28 \pm 0,01$	73,7	1,38
3P	Perda de espessura	$0,19 \pm 0,01$	50,0	2,82

* Valor médio de 5 medidas

** Atribuído como valor de referência

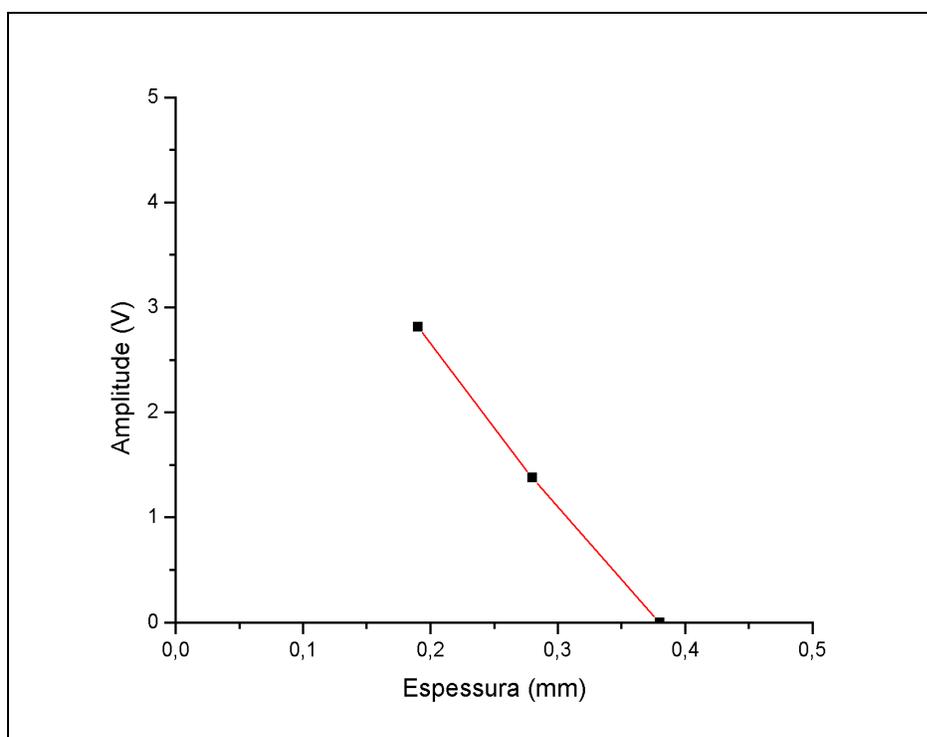


Figura C5. Curva de avaliação 1P (f_0 : 280 kHz).

TABELA C6 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 2 – Placa - f_0 : 280 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
4P	OP	$0,38 \pm 0,01$	100	3,31
5P	OFP sub-superficial	$0,28 \pm 0,01$	73,7	1,12
6P	OFP sub-superficial	$0,17 \pm 0,01$	44,7	0,72

* Valor médio de 5 medidas

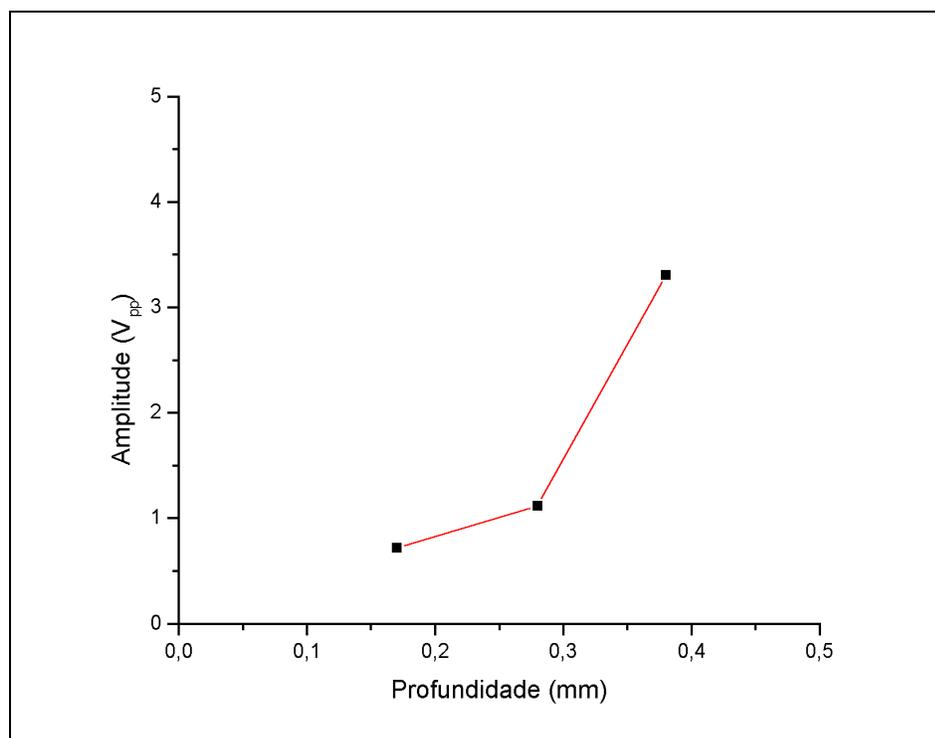


Figura C6. Curva de avaliação 2P (f_0 : 280 kHz).

TABELA C7 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 3 – Placa - f_0 : 280 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
4P	OP	$0,38 \pm 0,01$	100	3,88
7P	OFP superficial	$0,27 \pm 0,01$	71,0	2,20
8P	OFP superficial	$0,18 \pm 0,01$	47,3	1,31
9P	OFP superficial	$0,10 \pm 0,01$	26,3	1,06

* Valor médio de 5 medidas

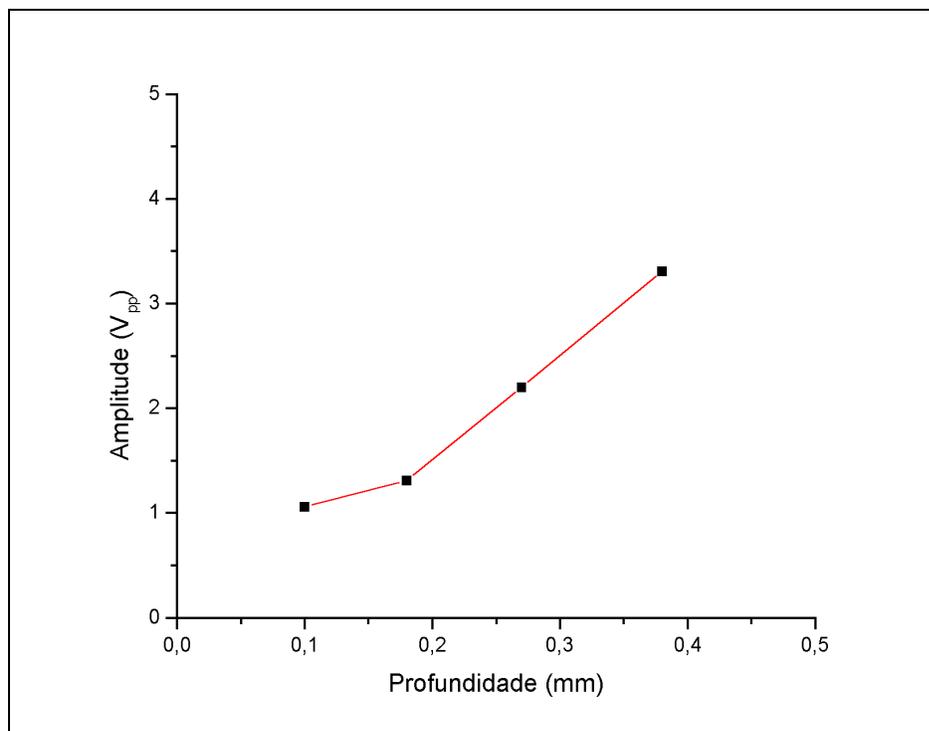


Figura C7. Curva de avaliação 3P (f_0 : 280 kHz).

TABELA C8 - Valores de amplitude e profundidade (grupo 4 – Placa - f_0 : 280 kHz)

Padrão	Descrição	Profundidade (mm)	Perda (%)	Amplitude (V_{pp}) *
10P	SP	$0,38 \pm 0,01$	100	6,50
11P	SFP sub-superficial	$0,28 \pm 0,01$	73,6	1,31
12P	SFP sub-superficial	$0,19 \pm 0,01$	50,0	0,94

* Valor médio de 5 medidas

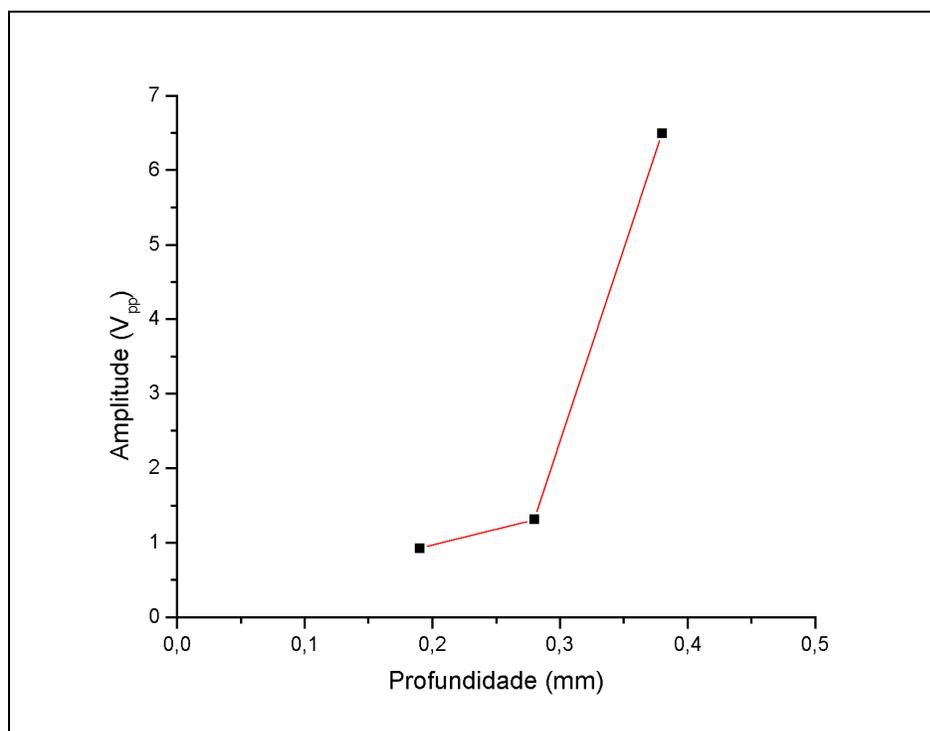


Figura C8. Curva de avaliação 4P (f_0 : 280 kHz).

**ANEXO D – Tabelas de dados e curvas de caracterização para as descontinuidades
existentes no corpo-de-prova**

TABELA D1 - Dados obtidos para a falha número 2

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
50,0	50,2	0	0	-
51,0	50,2	1,13	0,51	0,101
52,0	50,2	1,39	0,96	0,140
53,0	50,2	2,28	3,01	0,190
54,0	50,2	2,87	3,20	0,300
55,0	50,2	6,20	3,84	0,370
56,0	50,2	6,50	4,10	0,380
57,0	50,2	6,50	4,10	0,380
58,0	50,2	6,50	4,10	0,380
59,0	50,2	6,50	4,10	0,380
60,0	50,2	6,50	4,10	0,380
61,0	50,2	6,50	4,10	0,380
62,0	50,2	6,50	4,00	0,380
63,0	50,2	6,35	3,82	0,375
64,0	50,2	3,17	3,36	0,310
65,0	50,2	2,57	3,10	0,200
66,0	50,2	1,43	0,89	0,130
67,0	50,2	1,13	0,50	0,100
68,0	50,2	0	0	-

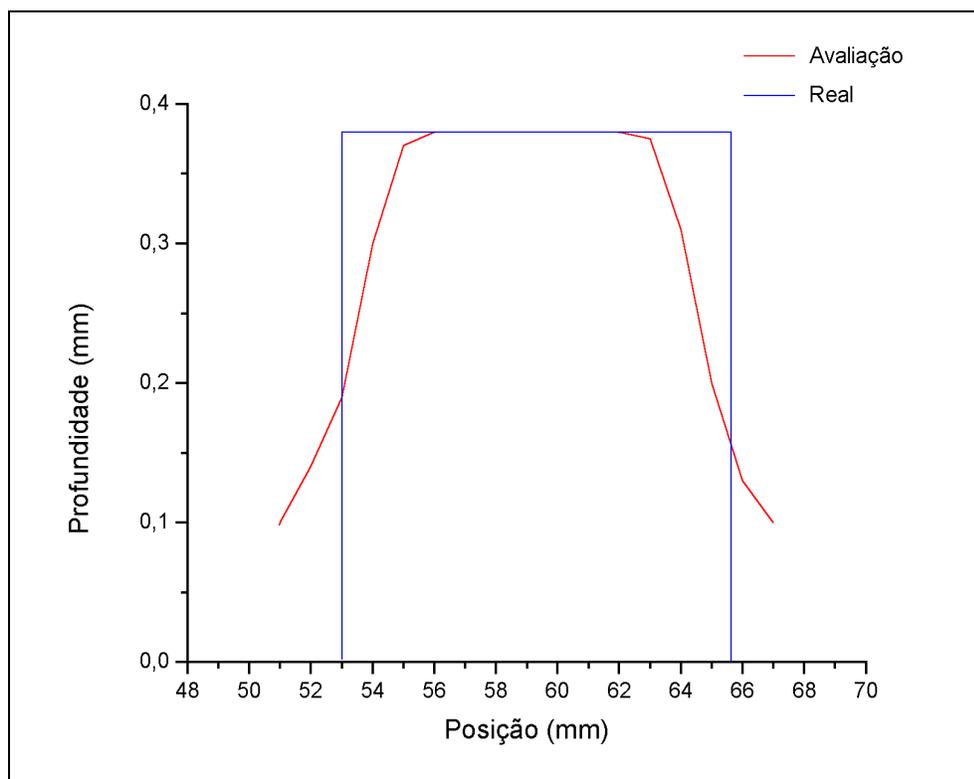


Figura D1. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 2.

TABELA D2 - Dados obtidos para a falha número 3

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
13,0	100,2	0	-	-
14,0	100,2	0,61	-	-
15,0	100,2	0,94	-	-
16,0	100,2	1,00	0,50	-
17,0	100,2	1,13	0,53	0,100
18,0	100,2	1,26	0,91	0,110
19,0	100,2	1,19	0,88	0,105
20,0	100,2	1,13	0,54	0,100
21,0	100,2	1,26	0,90	0,110
22,0	100,2	1,33	1,06	0,115
23,0	100,2	1,26	0,92	0,110
24,0	100,2	1,33	1,05	0,115
25,0	100,2	1,13	0,55	0,100
26,0	100,2	1,00	0,50	-
27,0	100,2	0,94	-	-
28,0	100,2	0,61	-	-
29,0	100,2	0	-	-

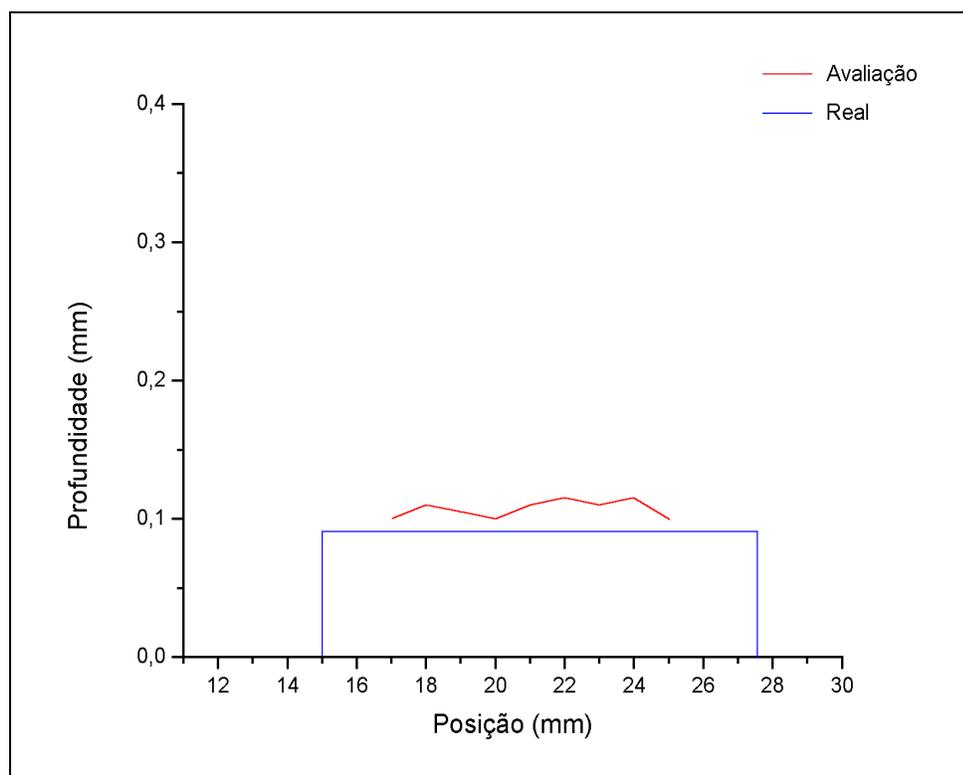


Figura D2. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 3.

TABELA D3 - Dados obtidos para a falha número 4

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
61,5	92,0	0	-	-
61,5	93,0	0	-	-
61,5	94,0	0,55	-	-
61,5	95,0	0,82	-	-
61,5	96,0	0,94	-	0,190
61,5	97,0	0,96	-	0,195
61,5	98,0	1,02	-	0,210
61,5	99,0	1,02	-	0,210
61,5	100,0	1,04	-	0,215
61,5	101,0	1,02	-	0,210
61,5	102,0	0,98	-	0,200
61,5	103,0	1,00	-	0,205
61,5	104,0	0,94	-	0,190
61,5	105,0	0,94	-	0,190
61,5	106,0	0,55	-	-
61,5	107,0	0	-	-
61,5	108,0	0	-	-

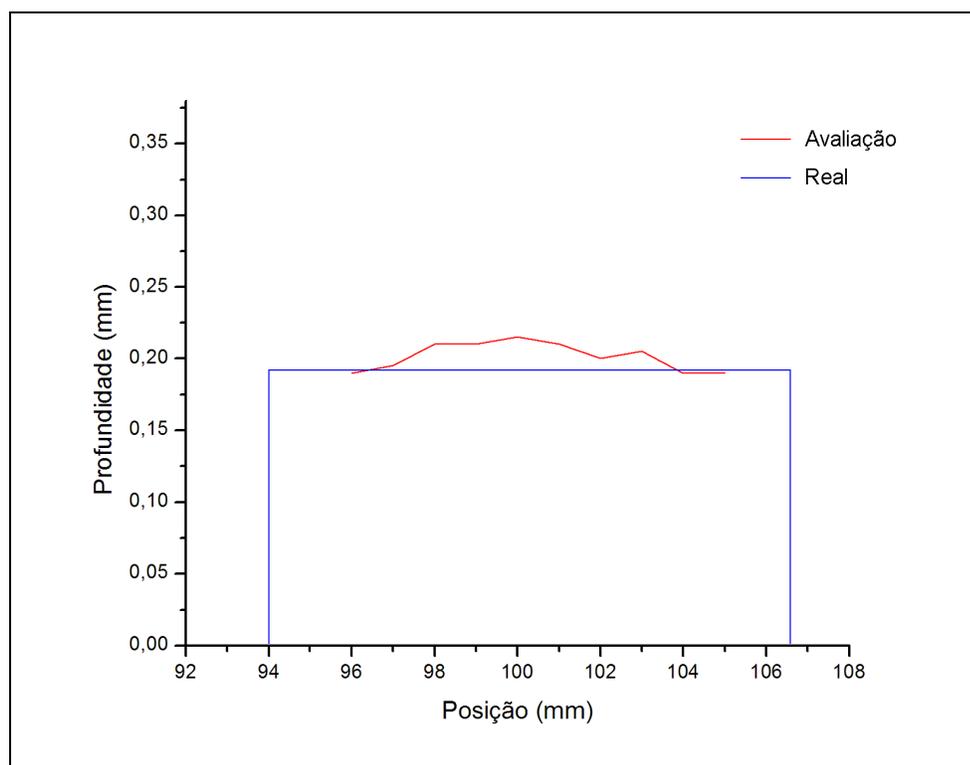


Figura D3. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 4.

TABELA D4 - Dados obtidos para a falha número 5

P_x (mm)	P_y (mm)	V_p (V_{pp})	V_a (V_{pp})	P_e (mm)
17,5	149,0	0	-	-
18,0	149,0	1,51	2,10	0,200
18,5	149,0	2,35	2,78	0,280
19,0	149,0	3,57	3,65	0,360
19,5	149,0	3,88	4,06	0,380
20,0	149,0	3,80	3,98	0,375
20,5	149,0	2,35	2,78	0,280
21,0	149,0	1,61	2,20	0,210
21,5	149,0	0	-	-

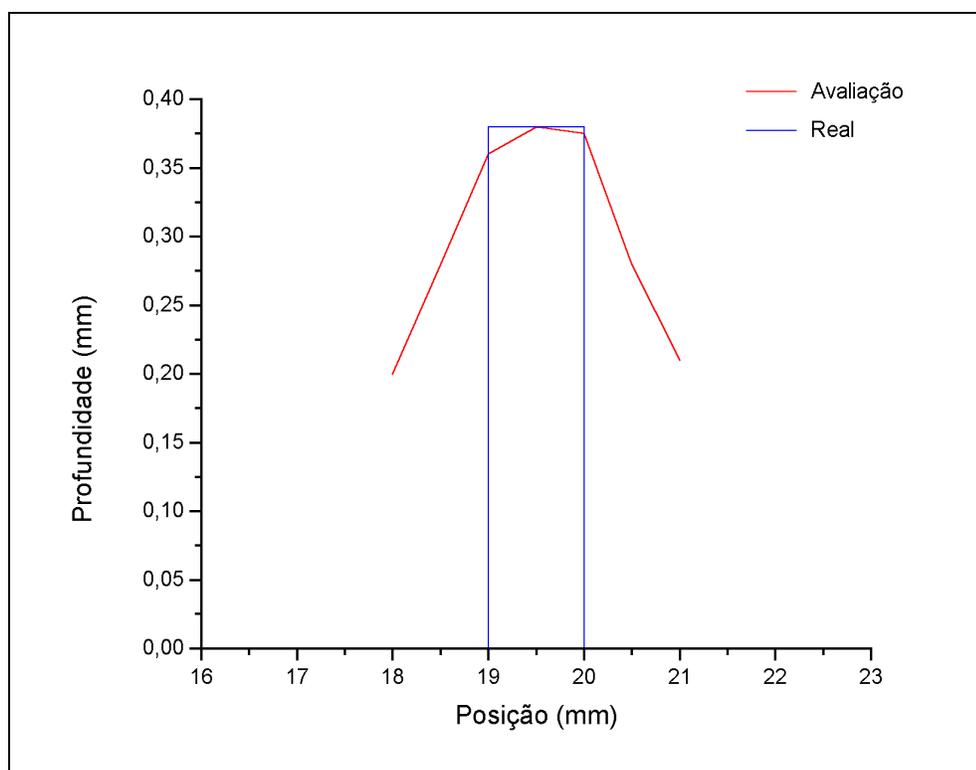


Figura D4. Gráfico de caracterização obtido para a falha número 5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIDA, L. A.; TING, D. K. S. Identificação dos processos de corrosão dos elementos estruturais do reator IEA-R1 através da análise química da água. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 8., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 2000. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JÚNIOR, S. F. Aplicação do ensaio de correntes parasitas na avaliação de integridade de revestimentos de combustíveis nucleares. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 6., 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 1996. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JÚNIOR, S. F. *Acompanhamento do ensaio de inspeção visual nos combustíveis do reator IPR-R1*. Belo Horizonte: CDTN, dez. 2000. (RD-AT1-004/2000).

ALMEIDA, F. F. *Calcoils*, version 1.0: coil project software. 2001. Disponível em: <http://web.tiscali.it/note/download/calcoil.zip>>. Acesso em: 13 maio 2004.

ASNT - AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. *Electromagnetic testing*. v.4. Columbus, 1986.

ASME - AMERICAN SOCIETY OF MECHANICS ENGINEERS. Section V, Article 8, *Boiler and pressure vessel code*. New York: ASME, 1992. p. 127-133.

BROPHY, J. J. *Basic electronics for scientists*. Tokyo: McGraw-Hill-Kogakusha, 1972. 2.ed. p. 23-26.

CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. *Relatório de análise de segurança do reator TRIGA IPR-R1*. Belo Horizonte: CDTN, ago. 2000.

CDTN - CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR. *CTORP- Curso de treinamento de operadores em reatores de pesquisa*. Belo Horizonte: CDTN, jul. 2003.

CECCO, V. S.; SHARP, F. L. Advances in probe design for eddy current testing of heat exchangers. *NDT International*, West Chester, v. 22 n.4, aug., 1989.

CUTLER, P. *Análise de circuitos cc*. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. p. 249-254.

ECT INC. - EDDY CURRENT TECHNOLOGY INC. *MAD-8D operating manual*. Virginia Beach: ECT, 1999.

ECT INC. - EDDY CURRENT TECHNOLOGY INC. *Electrical conductivity of materials*. Virginia Beach: ECT, 2000.

ELOX INC. *Micro-PS electric discharge machine operating manual*. Davidson: ELOX INC., 1976.

FRAJNDLICH, R. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <mmattar@ipen.br> em 18 maio 2004.

GENERAL ATOMICS. *TRIGA nuclear products – fuel elements*. Disponível em: <<http://triga.ga.com/images/FuelRods-1.jpg>>. Acesso em: 25 abr. 2004.

GULF GENERAL ATOMIC. *TRIGA MARK I reactor – mechanical, maintenance and operating manual*. San Diego: GULF GENERAL ATOMIC, 1960.

GULF GENERAL ATOMIC. *Technical foundations of TRIGA*. San Diego: GULF GENERAL ATOMIC, 1958.

HARTZELL PROPELLER INC. *Inspection for cracks in certain three blade “Y” shank aluminum hubs*. Service Bulletin 165E. Piqua: HARTZELL, 1994.

HAUSNER, H. H.; SCHUMAR, J.F. *Nuclear fuel elements*. New York: Reinhold, 1959.

HOCKING NDT LTD. *Phasec –2D: eddy current instrument*. Saint Albans: HOCKING NDT LTD., 2003.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES DE SÃO PAULO. *Centro de combustível nuclear - fabricação de elementos combustíveis*. Disponível em: <<http://www.ipen.br/ccn/lam02.jpg>>. Acesso em 10 fev. 2004.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES DE SÃO PAULO. *Centro de combustível nuclear - fabricação de elementos combustíveis*. Disponível em: <<http://www.ipen.br/ccn/lam03.jpg>> . Acesso em 10 fev. 2004.

IPEN - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES DE SÃO PAULO. Reator de pesquisas reúne comunidade científica. *Órbita on line*, São Paulo, n.3, *Março/Abril 2001*. Disponível em:

<http://www.ipen.br/scs/orbita/2001_03_04/elemcb1.JPG>. Acesso em 26 abr. 2004.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Standardization of specifications and inspection procedure for LEU plate-type research reactors fuels*. Wien: IAEA, 1988. (IAEA-TECDOC-467).

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Management of research reactor ageing*. Wien: IAEA, 1995. (IAEA-TECDOC-792).

KOPELMAN, B. *Materials for nuclear reactors*. New York: Mc Graw-Hill, 1959. p. 207-217.

LAMARSH, J. R; BARATTA, A . J. *Introduction to nuclear engineering*. 3.ed. New York: Addison-Welsley, 2001.

MACDONALD, P. E., et al. *Steam generator tube failures*. Idaho National Engineering Laboratory. (NUREG/CR 6365), 1996.

MACPHEE, M.; OLIVER, D. S.; LLOYD, H.; WARNE, M. A. The manufacture of materials testing reactor fuel elements in the United Kingdom. In: FUEL ELEMENT FABRICATION WITH SPECIAL EMPHASIS ON CLADDING MATERIALS, 1., 1960, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1961. p. 419-442.

MESQUITA, A. Z.; REZENDE, H. C.; TAMBOURGI, E. B. Calibração de potência do reator TRIGA IPR-R1 durante os testes de aumento de potência para 250 kW. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v.4, n.2, p.285-290, ago. 2002.

MICROCAL SOFTWARE INC. *Origin, version 6.0 user's manual*. Northampton: MICROCAL INC., 1999.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C.C. *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*. Tokyo: McGraw-Hill-Kogakusha, 1972. 911p.

PERROTTA, J. A. Estratégia de utilização de combustíveis tipo MTR de alto teor de urânio para operação do reator IEA-R1 a 5 MW In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 6., 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 1996. 1 CD-ROM.

PERROTTA, J. A.; TERREMOTO, L. A. A.; ZEITUNI, C. A. Irradiated MTR fuel assemblies sipping test. In: ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DE REATORES, 11., 1997, Poços de Caldas. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEN, 1997. 1 CD-ROM.

REZENDE, E. M. *Materiais usados em eletrotécnica*. Rio de Janeiro: Interciência, 1977. p. 285.

REZENDE, H. C. *Levantamento de potência térmica do reator TRIGA*. Belo Horizonte: CDTN, jul. 1995.

SANTOS, A. N. *CTORP – Curso de treinamento de operadores em reatores de pesquisa*. Belo Horizonte: CDTN, 1997.

SILVA, A. T., et al. *Inspeção visual de elementos combustíveis do reator IEA-R1*. São Paulo: IPEN, 2001. (PSE.CENC.IEAR1.014.00 RELT.03.00).

SILVA, J. E. R, et al. *Inspeção visual dos elementos combustíveis queimados armazenados nos racks de estocagem da piscina do reator IEA-R1*. São Paulo: IPEN, out. 2001. (PSE.CENC.IEAR1.013 RELT.001.00).

SILVA, J. E. R. **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <daa@ipen.br> em 20 mar. 2003.

SILVA JÚNIOR, S. F.; ALENCAR, D. A. Use of eddy current testing for crack characterization in structures. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCM, nov. 2003. 1 CD-ROM.

SMITH, C. O. *Nuclear reactor materials*. Detroit: University of Detroit, 1967. p. 127-152.

SOARES, A. *Aplicações das correntes de Foucault na detecção de descontinuidades em tubos de zircaloy*. 1976. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STEGMANN, D. *Curso de correntes parasitas*. São Paulo: ABENDE, 1987.

US-DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. *Proposed nuclear weapons nonproliferation policy concerning foreign research reactor spent nuclear fuel*. Washington DC: DOE, mar. 1995. (DOE/EIS-0218D).

US-NRC - NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Inservice inspection of pressurized water reactor steam generator tubes*. (Regulatory Guide 1.83 rev. 1) Washington D.C., jul. 1975.

US-NRC - NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Voltage-based repair criteria for Westinghouse steam generator tubes affected by outside diameter stress corrosion cracking*. (Generic letter 95-05) Washington D.C., ago. 1995.

VELOSO, M. A. *Análise termo-hidráulica do reator IPR-R1 a 250 kW*. Belo Horizonte: CDTN, set. 1999. (NI-CT4-03/99).

ZEITUNI, C. A. *Espectrometria gama em elementos combustíveis tipo placa irradiados*. 1998. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

ZETEC INC. *MIZ 40 operating manual*. Issaquah: ZETEC INC., 1992.

PUBLICAÇÕES

Internacionais

ALENCAR, D. A.; MATTAR NETO, M.; SILVA JUNIOR, S. F. Eddy Current NDT: A Developed Technology for In-use and Spent Fuel Cladding examination of TRIGA and MTR reactors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH REACTOR, 1., nov. 2003, Santiago. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 2003. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; M. SILVA JUNIOR, S. F.; MESSIAS, J. M.; MARTINS, G. A. S.; MARQUES, P. V. Use of Eddy Testing for Crack Characterization in Structures. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., São Paulo, nov. 2003. **Proceedings...** São Paulo: ABCM, 2003. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JUNIOR, S. F. The Inspection of Nuclear Research Reactor Fuel Cladding Using Eddy Current non-Destructive Testing. In: TALLER DE CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES GASTADOS, 2., Buenos Aires, dez. 2002. **Proceedings...** Vienna: CNEA/IAEA, 2002. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JUNIOR, S.F. Desenvolvimento de Padrões de Referência para a Inspeção de Elementos Combustíveis de Reatores de Pesquisa tipo TRIGA por meio do Ensaio de Correntes Parasitas. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC 2002, Rio de Janeiro, ago. 2002. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JUNIOR, S.F. Eddy Current Testing: A New Possibility for Integrity Evaluation of Nuclear Fuels Cladding Used in Research Reactors. In: IAEA WORKSHOP ON CHARACTERIZATION OF SPENT FUEL, 1., São Paulo, nov. 2001. **Proceedings...** Vienna: IPEN/IAEA, 2001. 1 CD-ROM.

Nacionais

ALENCAR, D. A.; MATTAR NETO, M.; SILVA JUNIOR, S. F. Estudo das Limitações do Ensaio não Destrutivo por Correntes Parasitas na Avaliação de Integridade de Tubos em Geradores de Vapor Instalados em Usinas Nucleares Tipo PWR. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2., João Pessoa, ago. 2002. **Anais...** ABCM, 2002. 1 CD-ROM.

ALENCAR, D. A.; SILVA JUNIOR, S.F. Desenvolvimento de Padrões de Referência para a Inspeção de Elementos Combustíveis de Reatores de Pesquisa tipo TRIGA por meio do Ensaio de Correntes Parasitas. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, v.4, n.2, p.129-131, ago. 2002.