

# UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS PARA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DO REVESTIMENTO DE COMBUSTÍVEIS DO TIPO PLACA

Donizete A. Alencar<sup>1</sup>, Silvério F. Silva Júnior<sup>2</sup> e Miguel Mattar Neto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN / CNEN)  
Rua Professor Mário Werneck s/n  
30123-970 Belo Horizonte, MG  
[daa@cdtn.br](mailto:daa@cdtn.br)

<sup>2</sup> Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN / CNEN)  
Rua Professor Mário Werneck s/n  
30123-970 Belo Horizonte, MG  
[silvasf@cdtn.br](mailto:silvasf@cdtn.br)

<sup>3</sup> Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)  
Av. Professor Lineu Prestes 2242  
05508-000 São Paulo, SP  
[mmattar@ipen.br](mailto:mmattar@ipen.br)

## ABSTRACT

This paper presents the development of a technological research, carried out in the Nondestructive Testing Laboratory - CDTN, that will permit to check the integrity of plate type nuclear fuels cladding, such as IEA-R1, using eddy current test. The research was partially sponsored by IAEA, by project RLA/4/018 - Management of Spent Fuel from Research Reactors. The main products developed were: test probes, reference standards, calibration conditions and the operating conditions, including data evaluation. The operational performance of the test system, including the computer assisted test equipment, the probes and the reference standards is demonstrated. Some practical results, obtained at laboratory are shown.

## 1. INTRODUÇÃO

O reator IEA-R1 está em operação no IPEN há mais de quatro décadas. Verificações de integridade de seus combustíveis vêm sendo regularmente conduzidas, por meio de testes de Sipping e de Inspeção Visual remota [1]. Este último é importante, mas apresenta restrições técnicas que o limitam à condução de análises qualitativas ou semi-quantitativas e restritas às superfícies externas dos combustíveis. Como método alternativo de avaliação de integridade para estes componentes, foi sugerida, quando da realização de seminário no IPEN em 2001 [2], a utilização do ensaio por correntes parasitas, com significativos avanços, uma vez que possibilitaria fazer avaliações quantitativas de integridade tanto nas superfícies externas quanto internas dos mesmos. Para isto seria necessário o desenvolvimento de sondas, padrões e procedimentos adequados. Para a aplicação prática da tecnologia, também seria necessário adquirir os sistemas de teste e eletro-mecânicos de manuseio. Após a demonstração da aplicabilidade do método para combustíveis do tipo cilíndrico [3], desenvolveu-se então a metodologia que permitirá fazer inspeções de combustíveis do tipo placa. Os resultados alcançados nesta pesquisa são apresentados neste documento.

## 2. O ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS

O ensaio por correntes parasitas é um método de ensaio não destrutivo – END, fundamentado na indução de correntes elétricas em materiais eletricamente condutores [4]. Para sua aplicação uma bobina indutora gera um campo magnético primário, que induz correntes no material. A formação das correntes parasitas depende de três características do material a ser examinado: geometria, condutividade elétrica ( $\sigma$ ) e permeabilidade magnética ( $\mu$ ). A existência de falhas e descontinuidades ou a variação da condutividade elétrica e/ou da permeabilidade magnética podem ser interpretadas como não homogeneidade do material e serão diretamente responsáveis pelo comportamento das correntes induzidas. Consequentemente, refletirão no valor da impedância complexa da bobina, que poderá ser monitorado e analisado. Vários parâmetros podem ser ajustados para a execução do teste, tais como: a frequência de operação, a intensidade do campo magnético primário, o ganho do sistema de medição de impedância e a inclinação ou fase dos sinais visualizados no monitor complexo, conhecidos como figuras de *Lissajous* [5]. A caracterização das descontinuidades detectadas é função dos valores de inclinação e/ou amplitude dos sinais medidos, comparados aos valores registrados para descontinuidades de geometria e dimensões conhecidas. Portanto, a construção de padrões de referência confiáveis é condição fundamental para a aplicação do ensaio.

## 3. CONSIDERAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO

Para a realização do desenvolvimento proposto é necessário conhecer algumas propriedades e características do material a ser testado, tais como:

- A resistividade elétrica do revestimento (liga de alumínio 1060), nominalmente  $2,093 \times 10^{-8}$  ohms-metro [6];
- O valor nominal da espessura das placas, nominalmente 0,38 mm.
- O espaçamento entre placas adjacentes, neste caso 2,89 mm.

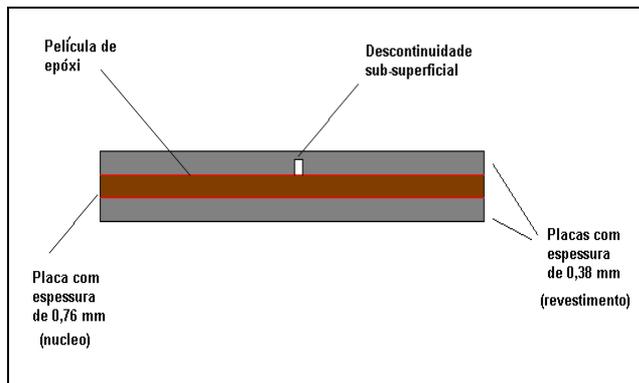
Considera-se ainda os tipos de descontinuidades a serem detectadas, a saber:

- Descontinuidades localizadas, externas ao revestimento;
- descontinuidades localizadas, internas ao revestimento;
- trincas externas ao revestimento;
- trincas internas ao revestimento;
- perdas generalizadas de espessura.

## 4. DESENVOLVIMENTO DOS PADRÕES DE REFERÊNCIA

Foram desenvolvidos 15 padrões de referência para calibração. Adotou-se um processo de construção tipo “sanduíche”, formado por um núcleo central (espessura nominal 0,76 mm) e dois revestimentos (espessura nominal 0,38 mm). O Centro do Combustível Nuclear – CCN do IPEN, forneceu chapas da liga Al-1050, laminadas nas espessuras de 0,76 mm e 0,38 mm. Estas chapas foram recortadas, obtendo-se placas com dimensões nominais de 60,0 x 60,0 mm. Em 12 placas de espessura 0,38 mm foram usinados, por eletro-erosão, orifícios e sulcos com diversas profundidades. 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. 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 (inferiores a 20  $\mu\text{m}$ ) nas interfaces. A estratégia adotada na montagem de um padrão, contendo uma descontinuidade sub-superficial, é apresentada na Fig. 1a. Na Fig. 1b mostra-se o conjunto de padrões que contem descontinuidades do tipo orifício. As características construtivas de todos os padrões são apresentadas na Tab. 1.



**Figura 1a. Processo de montagem dos padrões.**

**Figura 1b. Padrões do tipo orifício.**

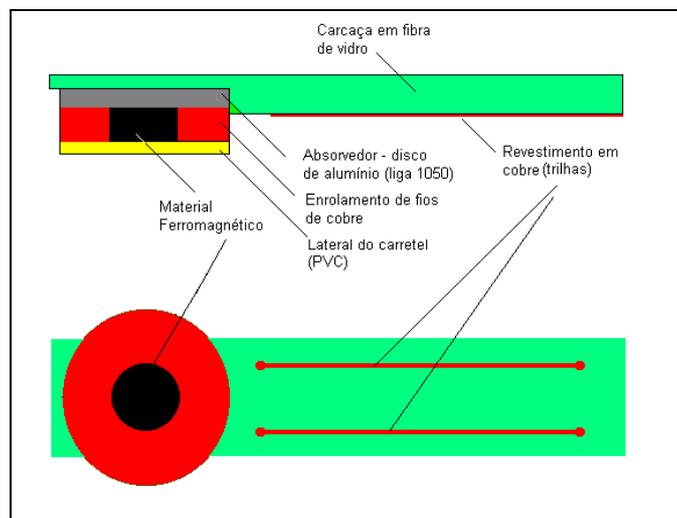
**Tabela 1 - Caracterização metrológica dimensional das descontinuidades usinadas**

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

## 5. DESENVOLVIMENTO DAS SONDAS DE TESTE

A distância entre duas placas adjacentes de um elemento combustível representa um limite para a espessura máxima da sonda (2,89 mm para o reator IEA-R1). Para o cálculo da frequência ótima,  $f_o$ , consideram-se a resistividade da liga Al-1050, e 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 um núcleo de material ferromagnético. A permeabilidade magnética, 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. 2 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. 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 2. Representação esquemática da sonda para combustíveis do tipo 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*) para o protótipo. Desenvolveu-se então uma nova sonda, capaz de atender esta necessidade, cujo aspecto pode ser visto na Fig. 3.



**Figura 3. Aspecto final da sonda construída.**

### Características

- Frequência ótima: 280 kHz;
- Impedância em  $f_o$ : 50  $\Omega$ ;
- Resistência elétrica: 0,47  $\Omega$ ;
- Modo de operação: Absoluto;
- Diâmetro do sensor: 3,0 mm;
- Espessura máxima: 2,70 mm.

## 6. OBTENÇÃO DAS CURVAS DE AVALIAÇÃO

No ensaio por correntes parasitas a caracterização por amplitude é influenciada pelas características volumétricas das descontinuidades. Neste contexto, o conjunto de padrões construído foi dividido em cinco grupos distintos como apresentado na Tab. 2. 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). Para cada grupo foi construída uma curva de avaliação.

Tabela 2 - Valores de amplitude e profundidade ( $f_0$ : 280kHz)

Número	Descrição	Profundidade (mm)	Amplitude ( $V_{pp}$ ) *
1	Perda de espessura	-	0
2	Perda de espessura	-	1,38
3	Perda de espessura	-	2,82
4	OP	0,38 ± 0,01	3,31
5	OFP sub-superficial	0,28 ± 0,01	1,12
6	OFP sub-superficial	0,17 ± 0,01	0,72
7	OFP superficial	0,27 ± 0,01	2,20
8	OFP superficial	0,18 ± 0,01	1,31
9	OFP superficial	0,10 ± 0,01	1,06
10	SP	0,38 ± 0,01	6,50
11	SFP sub-superficial	0,28 ± 0,01	1,31
12	SFP sub-superficial	0,19 ± 0,01	0,94
13	SFP superficial	0,28 ± 0,01	3,53
14	SFP superficial	0,19 ± 0,01	2,28
15	SFP superficial	0,10 ± 0,01	1,13

\* Média de 5 medidas

## 7. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Para proceder à medição de perdas generalizadas de espessura, deve-se utilizar diretamente, conforme o tipo de combustível sob análise, a curva obtidas a partir dos padrões de referência (grupo1). Para a caracterização de descontinuidades localizadas, deve-se aplicar a metodologia de análise proposta e descrita a seguir:

- Ao varrer a superfície do combustível com a sonda, encontrando-se indicação de descontinuidade, deve-se medir sua extensão,  $E$ , obtida do sistema de varredura;
- se  $E$  for menor ou igual a 3 mm, deverá ser caracterizada pelas curvas de avaliação dos grupos 2 (OP e OFP sub-superficiais) ou 3 (OP e OFP superficiais);
- se  $E$  for 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 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 obtido 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 obtido para um SFP de 0,33 mm);

## 8. CONCLUSÕES

Realizou-se com sucesso o desenvolvimento de sondas de ensaio, padrões de referência e métodos de calibração para avaliação de descontinuidades detectadas, em conformidade com as metas propostas à AIEA em novembro de 2001. Demonstrou-se a plena capacidade de detecção e caracterização de falhas e descontinuidades volumétricas existentes e ainda que a metodologia de análise proposta permitirá inspecionar revestimentos de combustíveis do tipo placa, superando as difíceis condições acesso.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à AIEA e ao IPEN pelo fundamental apoio oferecido e que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. ALENCAR, D.A., SILVA Júnior, S.F., **Acompanhamento do ensaio de inspeção visual nos combustíveis do reator IPR-R1 - Relatório RD-AT1-004/2000**, Belo Horizonte, CDTN, 2000.
2. ALENCAR, D.A., SILVA Júnior, S.F., **Eddy Current Testing: A New Possibility for Integrity Evaluation of Nuclear Fuels Cladding Used in Research Reactors**. In: IAEA-RLA WORKSHOP ON RESEARCH REACTOR SPENT FUEL CHARACTERIZATION, São Paulo, Nov/2001.
3. ALENCAR, D.A., SILVA Júnior, S.F., **Eddy Current Testing: The Inspection of Nuclear Research Reactor Fuel Cladding Using Eddy Current Non-destructive Testing**. In: IAEA-RLA 2<sup>nd</sup> WORKSHOP ON RESEARCH REACTOR SPENT FUEL CHARACTERIZATION, Buenos Aires, dez/2002.
4. STEGMANN, D., **Curso de correntes parasitas**. São Paulo, ABENDE, 1987.
5. ASNT, **Electromagnetic Testing. v.4**. Columbus, USA, 1986.
6. ECT, **Electrical Conductivity of Materials**, Report ECT R-8418, Virginia Beach, USA, 1999.