

Estudo sobre a viabilidade do uso do ensaio por correntes parasitas para a avaliação da integridade do revestimento dos elementos combustíveis do reator de pesquisas TRIGA IPR-R1 do CDTN

Study on the feasibility of the use of eddy current test for the evaluation of the integrity of the cladding of the fuel elements of the TRIGA IPR-R1 research reactor

Roger Ferreira da Silva¹, Silvério Ferreira da Silva Júnior¹

¹Laboratório de Ensaios Não Destrutivos - LABENDE – SEIES/CDTN/CNEN, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Cidade Universitária, Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG.
e-mail: silvasf@cdtn.br, rfs@cdtn.br

RESUMO

A monitoração da degradação do revestimento de elementos combustíveis usados em reatores de pesquisa do tipo TRIGA é normalmente feita usando-se métodos como o ensaio visual e o teste de *sipping*. Embora forneçam informações importantes sobre as condições do revestimento, estes métodos não permitem determinar a profundidade de uma descontinuidade ou acompanhar o seu crescimento. Neste trabalho, é apresentado um estudo sobre a viabilidade do uso do método de ensaio por correntes parasitas para a caracterização de descontinuidades no revestimento de aço inoxidável AISI 304 de elementos combustíveis usados em reatores do tipo TRIGA. São apresentados os padrões de referência fabricados para uso no ajuste do sistema de ensaio e obtenção das curvas de referência de perda de espessura, os corpos de prova utilizados para a validação da metodologia usada, as sondas externas envolventes e superficiais desenvolvidas para a realização dos experimentos, os acessórios e a metodologia usados. O sistema de ensaio foi capaz de detectar e discriminar as descontinuidades situadas nas superfícies interna e externa dos padrões de referência e corpos de prova. Foram detectadas descontinuidades com diâmetro acima de 0,50 mm e com profundidades acima de 50% da espessura do revestimento, bem como descontinuidades do tipo perda de espessura gradual. Verificou-se também que a sensibilidade apresentada pelas sondas superficiais desenvolvidas foi sensivelmente maior, comparando-se com as sondas envolventes utilizadas.

Palavras-chave: correntes parasitas, TRIGA, elementos combustíveis, ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

Monitoring degradation of the cladding of the fuel elements used in TRIGA type research reactors is typically performed using test methods such as visual test and sipping test. Although provide important information about the condition of the cladding, these methods do not allow determining the depth of the discontinuities detected neither monitoring their growth. In this paper is presented a study on the feasibility of using eddy current method for characterization of discontinuities in the AISI 304 stainless steel cladding of the fuel elements used in TRIGA type reactors. In this study, are described the reference standards for use in setting the test system and obtaining the reference curves of loss of thickness, test specimens used for the validation of the methodology used, the encircling probes and surface probes developed, the accessories and test methodology used. The test system was able to detect the discontinuities located in the internal and external surfaces of the reference standards and test specimens and discriminate discontinuities with different depths. Discontinuities with diameter of 0.50 mm and depths above 50% of the cladding thickness as well as discontinuities simulating gradual loss of thickness were detected. It was also verified that the sensitivity provided by surface probes was considerably higher than the sensitivity of the encircling probes used.

Keywords: eddy currents, TRIGA, fuel elements, nondestructive tests.

1. INTRODUÇÃO

Durante a vida operacional, as estruturas e componentes de reatores de pesquisa estão sujeitos, em maior ou menor grau, à influência de diferentes agentes indutores de falha, como temperatura, tensões de carregamento ou de trabalho, atmosferas agressivas ou presença de radiações. Ao longo do tempo, a ação desses agentes pode resultar em mudanças nas propriedades dos materiais dessas estruturas e componentes, em um processo denominado envelhecimento, sendo o seu acompanhamento essencial para a operação segura desses reatores e para os programas de extensão de vida dos mesmos [1].

Dentre os componentes importantes para a segurança dessas instalações, destaca-se o revestimento do combustível nuclear, que tem a função de isolar, do ambiente externo, o combustível nuclear e os gases e produtos de fissão gerados durante o uso do combustível. Para atender a sua função, a integridade dos revestimentos dos combustíveis nucleares deve ser preservada, devendo ser periodicamente avaliada, para assegurar uma operação segura da instalação. As avaliações são normalmente realizadas por meio de ensaios não destrutivos, em fases distintas da vida do combustível: durante o seu uso no reator, durante o período em que ele permanece armazenado após sua retirada de uso e na preparação desse combustível para envio aos seus países de origem, quando é necessário avaliar a sua integridade antes do seu transporte [2,3].

Dois métodos de ensaios não destrutivos são normalmente usados para essa finalidade: o ensaio visual remoto para o exame da superfície externa do revestimento e o teste de *sipping*, para a identificação de fugas de produtos de fissão referentes a falhas ocorridas no revestimento. Entretanto, esses ensaios apresentam limitações. O ensaio visual remoto, apesar de possibilitar a detecção de descontinuidades superficiais, não fornece informações a respeito da profundidade dessas descontinuidades. Além disso, como a capacidade de detecção de um sistema de inspeção visual é fortemente dependente das condições da superfície em exame, a detecção de descontinuidades em regiões do revestimento com oxidação acentuada ou marcas superficiais pode ser reduzida [4]. O teste de *sipping*, apesar de ser efetivo na identificação de fugas de produtos de fissão, só permite identificar componentes em que a falha já ocorreu. Nesse sentido, já foi apontada a necessidade de se utilizar métodos de ensaio que permitam a detecção de descontinuidades no revestimento e o acompanhamento do crescimento dessas descontinuidades ao longo do tempo, como o ensaio ultrassônico e o ensaio por correntes parasitas [5].

Os elementos combustíveis do reator TRIGA-IPR-R1 possuem revestimento de alumínio 1100-F ou de aço inoxidável AISI 304 [6]. O ensaio visual tem sido empregado para avaliar as condições da superfície desses elementos [7] e a implantação de teste de *sipping* encontra-se em andamento [8], tendo ainda sido realizados experimentos sobre o uso do método de ensaio por correntes parasitas em elementos com revestimento em alumínio [9].

O método de ensaio por correntes parasitas consiste na indução de correntes elétricas no material de interesse e no monitoramento do comportamento dessas correntes, em diferentes regiões desse material. A indução das correntes elétricas é realizada por meio de uma sonda contendo uma ou mais bobinas, nas quais circulam uma corrente elétrica alternada. Quando posicionada sobre uma região específica do material em teste, a bobina apresenta uma impedância característica. Ao serem deslocadas pela superfície do material, caso ocorram mudanças locais na permeabilidade magnética ou na condutividade elétrica do mesmo, como as provocadas por variações na composição química, na microestrutura e pela presença de cavidades, inclusões, poros e trincas, a impedância característica dessas bobinas também muda, sendo detectadas pelo sistema de ensaio. A partir da análise dos sinais gerados, pode-se determinar as características das descontinuidades detectadas. Essas análises podem ser realizadas a partir da amplitude ou ângulo de fase dos sinais. Como diferentes características e propriedades do material influenciam a sua permeabilidade magnética e condutividade elétrica, é necessário o uso de padrões de referência para o ajuste do sistema de ensaio. Esses padrões devem conter descontinuidades representativas das que podem ocorrer no material, de modo a possibilitar a sua caracterização. Da mesma forma, as bobinas sensoras devem ser construídas de maneira que os sinais referentes às descontinuidades de interesse sejam maximizados e os sinais referentes a outras fontes sejam minimizados [10].

Neste artigo, apresenta-se um estudo inicial sobre a viabilidade do uso do ensaio por correntes parasitas para a avaliação do revestimento de aço inoxidável AISI 304 de elementos combustíveis do reator TRIGA IPR-R1 do CDTN, para a detecção e caracterização de descontinuidades do tipo perda de espessura localizada ou gradual. O desenvolvimento está sendo realizado considerando-se que o ensaio será executado utilizando-se um dispositivo mecânico automatizado, com o elemento combustível submerso. Nesta fase foram fabricados os padrões de referência para ajuste do sistema de ensaio, foram projetadas e fabricadas sondas para a realização dos exames em laboratório e obtidas curvas de perda de espessura em função do ângulo de fase dos sinais obtidos, demonstrando a aplicabilidade desse método de ensaio para essa aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O elemento combustível

O combustível nuclear utilizado no reator TRIGA IPR-R1 é constituído de uma mistura homogênea de urânio-hidreto de zircônio, contendo de 8% a 8,5% em peso de urânio enriquecido a 20%. Ele possui forma cilíndrica e é encapsulado em um revestimento de aço inoxidável AISI 304 ou de alumínio 1100-F, na forma de um tubo. No caso dos combustíveis revestidos em aço inoxidável, o combustível é montado no interior do tubo entre dois cilindros de grafita, que atuam como refletores axiais. Em suas extremidades, o tubo de aço inoxidável possui terminais com geometrias específicas, inseridos no mesmo por processo de soldagem, sendo este conjunto montado denominado elemento combustível. Os terminais possuem geometrias que possibilitam a inserção e a retirada dos elementos combustíveis do núcleo do reator por meio de garras especiais e o seu manuseio para a realização de testes e ensaios diversos.

A função do revestimento nos elementos combustíveis é impedir o contato direto do combustível com a água do poço do reator e reter os gases e os produtos de fissão gerados durante a operação do mesmo, de forma a evitar a contaminação do ambiente externo. No caso dos elementos combustíveis de aço inoxidável, o revestimento consiste de um tubo com diâmetro de 37,6 mm e espessura de 0,51 mm. A geometria do elemento combustível e os seus componentes individuais podem ser observados na Figura 1 (a) [6]. Elementos combustíveis podem ser observados na Figura 1 (b).

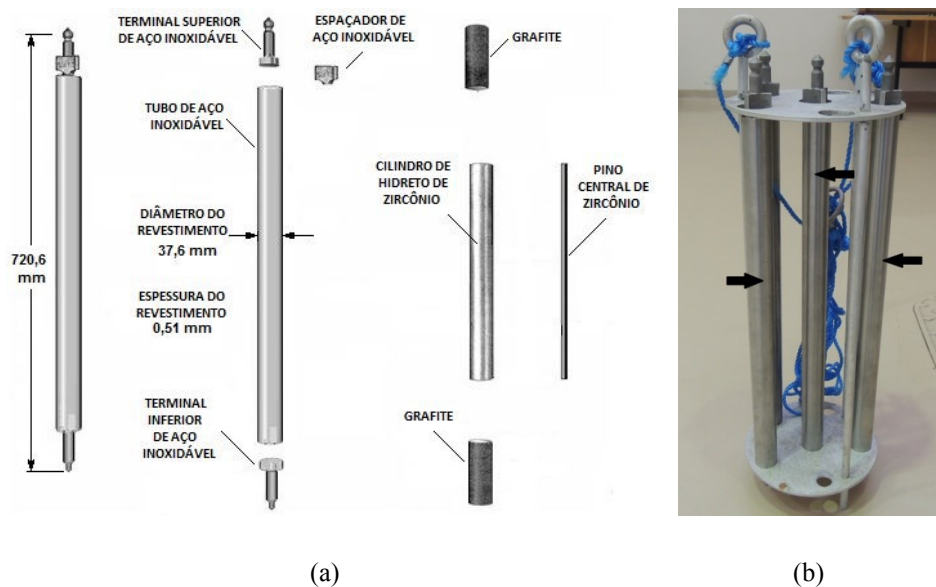


Figura 1: Elemento combustível do reator TRIGA IPR-R1. Geometria e componentes do elemento (a); elemento combustível instrumentado montado (b).

2.2 Padrões de referência

Os padrões de referência, utilizados para o ajuste do sistema de ensaio e obtenção das curvas de perda de espessura localizada, foram fabricados a partir de amostras de tubos de aço inoxidável AISI 304, com as mesmas características físicas e químicas do material do revestimento dos elementos combustíveis, como:

- Características dimensionais: diâmetro $37,66 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$; espessura $0,52 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ – medidas realizadas com instrumentos calibrados com padrões rastreáveis.
- Condutividade elétrica: 1500000 S/m – medida utilizando-se o equipamento Sigmascope SMP350, calibrado com padrões rastreáveis.
- Composição química: compatível com a especificada para o aço AISI 304 – a análise foi realizada com um equipamento OES Foundry Master Xpert.

Na preparação dos padrões de referência, foram usinadas descontinuidades do tipo furo passante e furos de fundo plano, conforme trabalhos anteriores [9], nas superfícies internas e externas das amostras, de forma a simular a geometria de descontinuidades localizadas, do tipo pites de corrosão.

A usinagem foi realizada pelo processo de eletro-erosão, de forma a não introduzir deformações mecânicas nas amostras, as quais podem produzir alterações indesejáveis nos sinais de correntes parasitas.

Foi usada uma máquina de eletro-erosão de bancada Elox e eletrodos de tungstênio para a usinagem. Foram preparadas quatro amostras, com 100 mm de comprimento cada, de forma a permitir a sua montagem na mesa da máquina. Os parâmetros de usinagem foram: tensão elétrica de 2 V, corrente elétrica de 2 A e velocidade de avanço 5.

Foram produzidos quatro padrões de referência, denominados PF1, PF2, PF3 e PF4, contendo descontinuidades com profundidades equivalentes a 50%, 75% e 100% da espessura de parede das amostras e diâmetros de 1,00 mm e 0,50 mm. As características das descontinuidades usinadas em cada padrão são [11]:

- Padrões PF1 e PF2 - um furo passante e dois furos de fundo plano, usinados na superfície externa dos padrões, com profundidades equivalentes a 50% e 75% da espessura de parede dos mesmos e com diâmetros de 1,00 mm e 0,50 mm, respectivamente.
- Padrões PF3 e PF4 - um furo passante e dois furos de fundo plano, usinados na superfície interna dos padrões, com profundidades equivalentes a 50% e 75% da espessura de parede dos mesmos e com diâmetros de 1,00 mm e 0,50 mm, respectivamente.

2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova, utilizados para a validação das curvas de perda de espessura localizada, foram fabricados a partir de amostras similares às dos padrões de referência. As condições e os parâmetros de usinagem utilizados também foram os mesmos.

Foram produzidos quatro corpos de prova, denominados CF1, CF2, CF3 e CF4, contendo descontinuidades do tipo furo de fundo plano, com diâmetros de 1,00 mm e 0,50 mm e diferentes profundidades. As características das descontinuidades usinadas em cada corpo de prova são [11]:

- Corpo de prova CF1 – dois furos de fundo plano, usinados na superfície externa do corpo de prova, com profundidades equivalentes a 59% e 86% da espessura de parede do mesmo e diâmetro de 1,00 mm.
- Corpo de prova CF2 – dois furos de fundo plano, usinados na superfície externa do corpo de prova, com profundidades equivalentes a 57% e 86% da espessura de parede do mesmo e diâmetro de 0,50 mm.
- Corpo de prova CF3 – dois furos de fundo plano, usinados na superfície interna do corpo de prova, com profundidades equivalentes a 55% e 84% da espessura de parede do mesmo e diâmetro de 1,00 mm.
- Corpo de prova CF4 – dois furos de fundo plano, usinados na superfície interna do corpo de prova, com profundidades equivalentes a 57% e 86% da espessura de parede do mesmo e diâmetro de 0,50 mm.

Os padrões de referência e os corpos de prova podem ser observados na Figura 2.

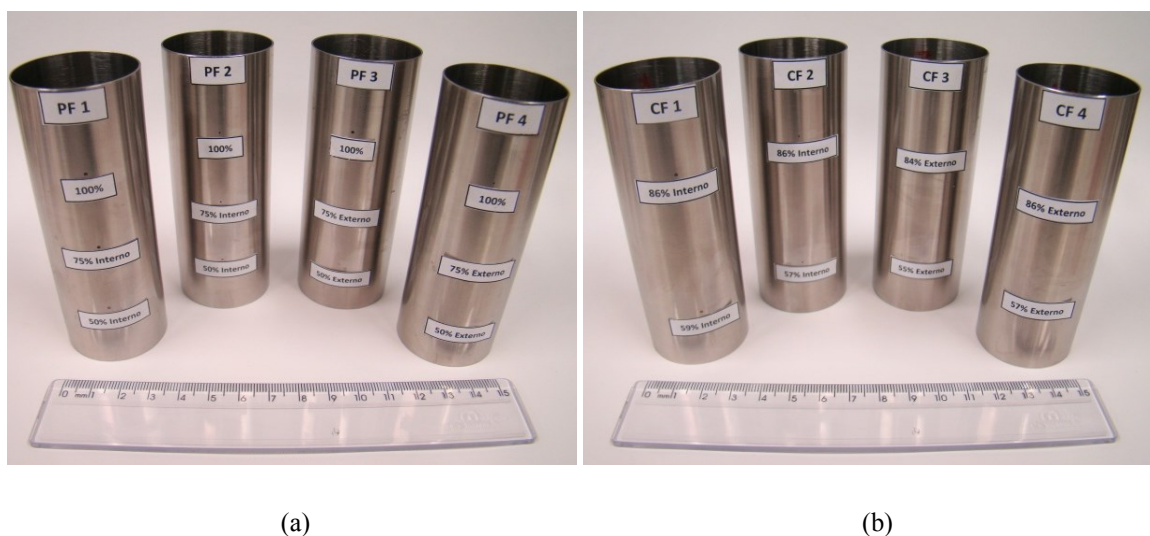


Figura 2: Padrões de referência (a) e corpos de prova (b) usados nos experimentos. Os furos usinados nos padrões PF1/PF3 E PF2/PF4 têm 1,00 mm de diâmetro e 0,50 mm de diâmetro, respectivamente. Os furos usinados nos corpos de prova CF1/CF3 e CF2/CF4 têm 1,00 mm de diâmetro e 0,50 mm de diâmetro, respectivamente.

2.4 Padrões de perda de espessura

Os padrões de perda de espessura, utilizados para a verificação da sensibilidade do sistema de ensaio para a detecção de descontinuidades não localizadas, como perdas graduais de espessura, e obtenção da curva de perda de espessura não localizada, também foram fabricados a partir de amostras similares às dos padrões de referência, sendo usinados em um torno CNC. Após a usinagem eles foram seccionadas ao meio, ao longo de seu eixo longitudinal, para possibilitar um controle melhor da espessura remanescente. Foram preparados quatro padrões, denominados PE1, PE2, PE3 e PE4, apresentando uma região com a espessura original da amostra e uma região com espessura reduzida. Os padrões de perda de espessura podem ser observados na Figura 3. As características de cada um desses padrões são [11]:

- Padrão PE1 – padrão com a espessura original da amostra em toda a sua extensão, para ser usado como referência.
- Padrões PE2, PE3 e PE4 – padrões com uma região com a espessura original da amostra e reduções médias de espessura de 12,7%, 18,6% e 36,7% da espessura original das amostras, respectivamente.

Não foi possível obter-se uma redução de espessura superior à do padrão PE4, devido à ocorrência de deformação das amostras durante a usinagem. Para o ensaio desses padrões, foi necessária a adaptação de uma das sondas superficiais (sonda SS4) para a realização das medições de espessura.

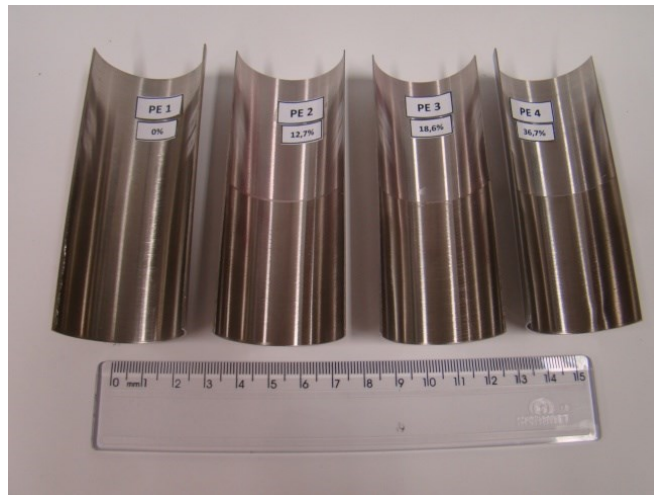


Figura 3: Padrões de perda de espessura usados nos experimentos.

2.5 Sondas externas envoltentes

As sondas externas envoltentes foram construídas em carcaças de polipropileno, com um fator de enchimento de 97% para reduzir o ruído produzido pelo deslocamento da sonda ao longo do elemento combustível. Foram construídas cinco sondas, denominadas SE1, SE2, SE3, SE4 e SE5, com a largura das bobinas sensoras iguais a 0,50 mm e frequências de operação de 1700 kHz, 970 kHz, 670 kHz, 320 kHz e 120 kHz, respectivamente.

As densidades de correntes parasitas na superfície interna dos padrões de referência e corpos de prova produzidas por essas sondas, estimadas por meio da equação de Efeito Pelicular [12], foram equivalentes a 20%, 30%, 37%, 50% e 65% da densidade das correntes na superfície externa dos mesmos, respectivamente. Suas impedâncias, determinadas utilizando-se um medidor LCR Chroma 1075, foram de 50 Ω , 49 Ω , 50 Ω , 51 Ω e 47 Ω , respectivamente. A densidade local das correntes parasitas está diretamente associada à capacidade de detecção do sistema de ensaio. Cada uma das sondas foi montada com duas bobinas sensoras, ligadas ao equipamento de testes em um arranjo diferencial.

Após a realização de testes nos padrões de referência, a sonda externa envolvente SE2, operando a 970 kHz, foi selecionada para o prosseguimento dos experimentos, por apresentar os melhores resultados. Ela pode ser observada na Figura 4(a). A posição da sonda em relação aos padrões de referência, para a aquisição dos sinais, pode ser observada na Figura 4(b).

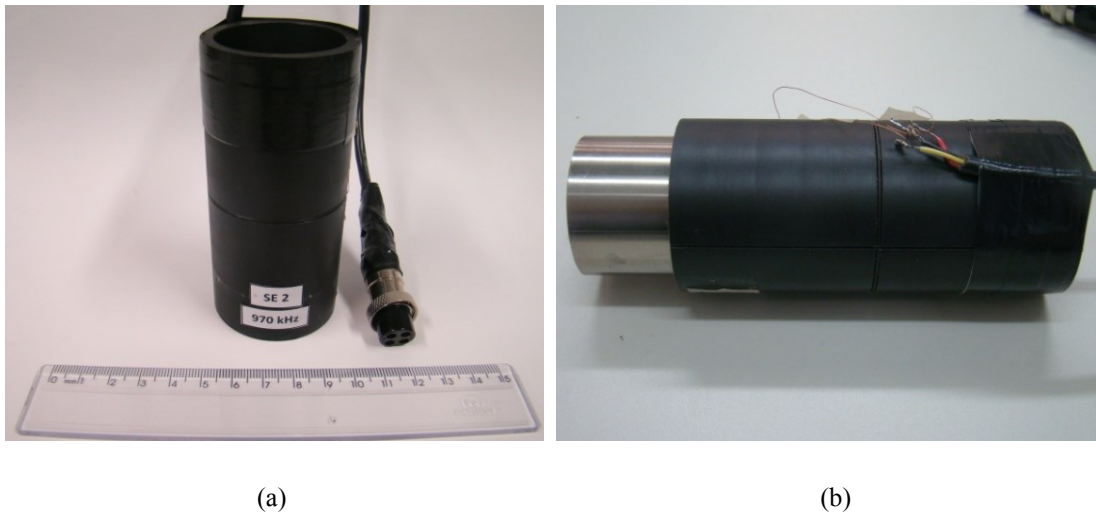


Figura 4: Sonda externa envolvente SE2 montada (a); posição da sonda em relação aos padrões de referência durante a aquisição dos sinais de correntes parasitas para o ajuste do sistema de ensaio (b).

2.6 Sondas superficiais

As sondas superficiais foram construídas em carcaças de PVC, com duas bobinas sensoras situadas em suas extremidades. Durante a realização dos exames, uma das bobinas sensoras é posicionada junto à superfície do revestimento, sendo denominada bobina de teste. A outra bobina, na extremidade oposta da sonda, permanece distante do revestimento em exame. Para aumentar a sensibilidade do sistema de ensaio, uma amostra do material do revestimento foi fixada à sonda, junto à segunda bobina, que atua como uma bobina de referência. Durante o ensaio, compara-se o sinal da bobina de referência com o sinal da bobina de teste. Qualquer descontinuidade presente no revestimento provocará alterações no fluxo local de correntes parasitas produzido pela bobina de testes e será detectada pelo sistema de ensaio. Foram construídas duas sondas, denominadas SS2 e SS4. A sonda SS2 foi utilizada operando na frequência de 320 kHz e a sonda SS4 nas frequências de 670 kHz e 970 kHz. Nessas condições, as densidades das correntes parasitas na superfície do revestimento, oposta à superfície em contato com a sonda, foram de 50%, 37% e 30% e suas impedâncias foram de 47 Ω , 49 Ω e 71 Ω , respectivamente. As bobinas foram construídas utilizando-se fios de cobre esmaltado AWG 39 e AWG 38, respectivamente. Suas dimensões são 2,5 mm de diâmetro interno, 5,0 mm de diâmetro externo e 0,85 mm de largura.

A sonda com as suas bobinas, antes da montagem na carcaça de Nylon, bem como o material de referência posteriormente fixado à sonda, podem ser observados na Figura 5(a). A sonda montada na carcaça de Nylon e a posição do conjunto sonda/carcaça em relação aos padrões de referência para a aquisição dos sinais pode ser observada na Figura 5(b).

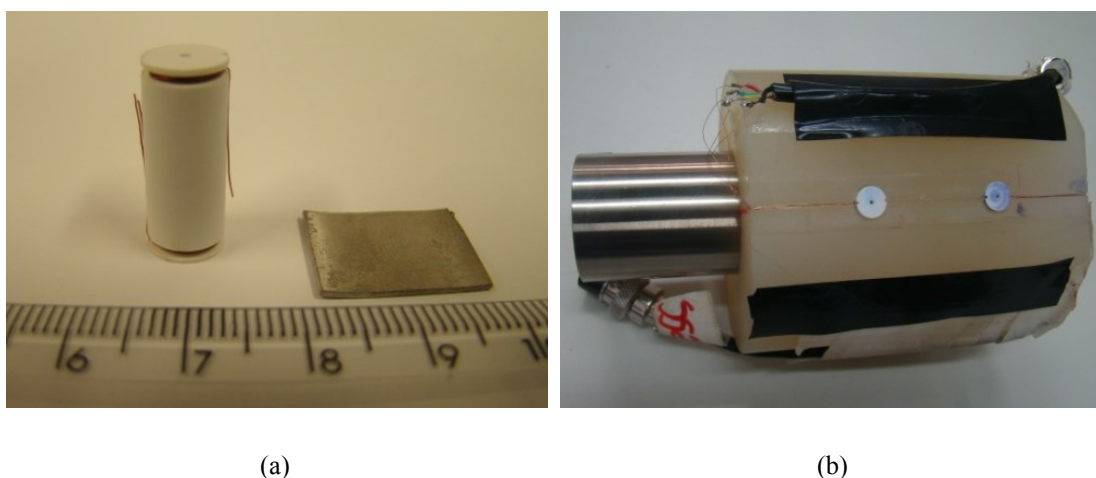


Figura 5: Sonda superficial e material de referência antes da montagem na carcaça de Nylon (a) e após montagem na carcaça de Nylon, indicando a posição de um padrão de referência durante a aquisição dos sinais (b).

2.7 Montagem para testes

Na Figura 6 é apresentada a disposição das sondas a ser utilizada para o exame dos elementos combustíveis durante a realização dos ensaios reais e testes de laboratório.

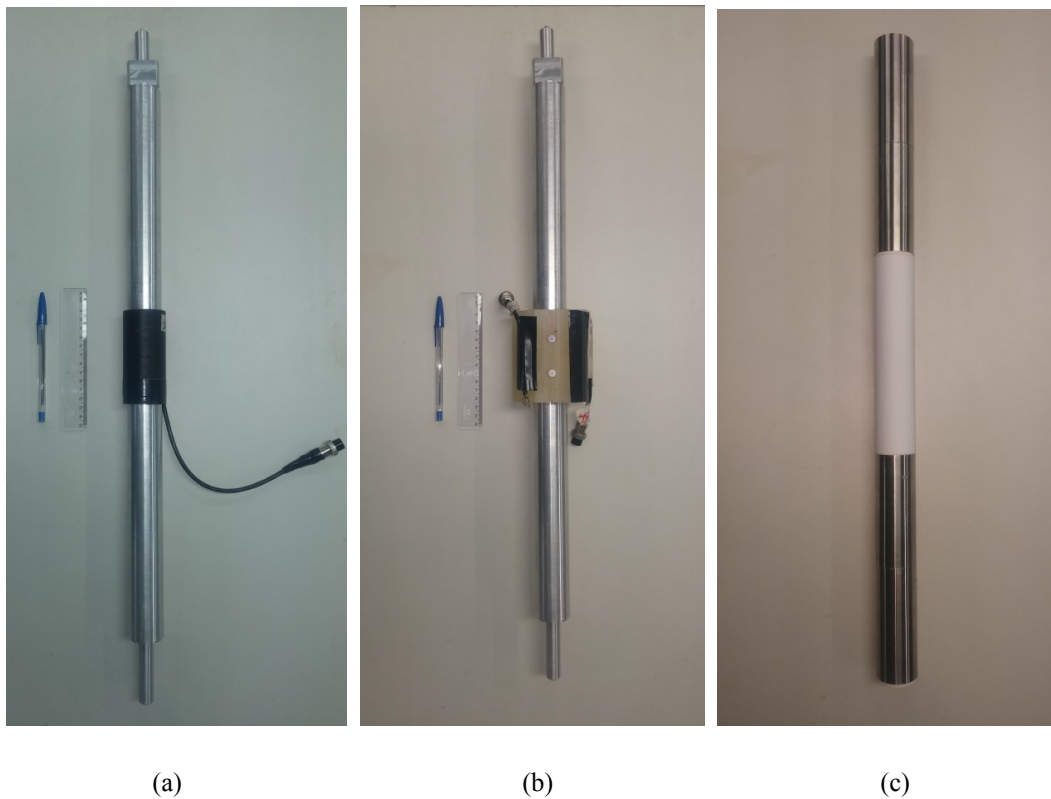


Figura 6: Disposição a ser utilizada para o ensaio dos elementos utilizando sondas envelopantes (a) e utilizando sondas superficiais (b). Montagem para os ensaios dos padrões de referência e corpos de prova realizados em laboratório (c).

O elemento combustível apresentado na Figura 6(a) e 6(b) é uma réplica de um elemento real, incluindo o peso, fabricado para uso nas simulações dos testes em laboratório, na avaliação da movimentação das sondas e dos elementos combustíveis reais por um dispositivo mecânico automatizado. Na realização dos testes iniciais de laboratório, para a aquisição dos sinais de correntes parasitas, os padrões de referência e os corpos de prova foram montados em uma barra de PVC, usinada de forma a simular a geometria de um elemento combustível, como indicado na Figura 6(c). Para o ensaio dos padrões de perda de espessura, foi utilizada a sonda SS4, operando a 970 kHz, na montagem mostrada na Figura 7.

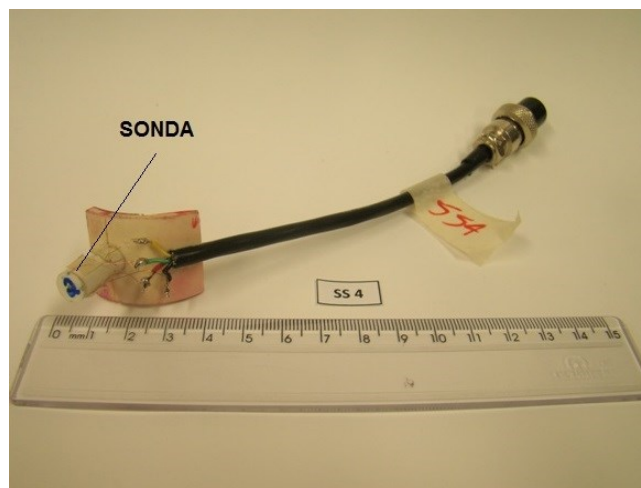


Figura 7: Montagem utilizada para o ensaio dos padrões de perda de espessura.

2.8 Aquisição dos sinais

Os ensaios foram realizados utilizando-se o equipamento de correntes parasitas MAD8D, fabricado pela Eddy Current Technology Incorporated. Nos experimentos realizados, as sondas foram deslocadas manualmente, com velocidade uniforme, tendo sido adquiridos sinais de cada uma das descontinuidades existentes nos padrões de referência e nos corpos de prova. Após a aquisição dos sinais das descontinuidades dos padrões de referência, foram medidas as amplitudes e o ângulo de fase de cada uma das cinco figuras geradas para cada descontinuidade. Com os valores médios obtidos para os ângulos, foram obtidas curvas associando o ângulo de fase do sinal de cada descontinuidade com a profundidade da mesma. Nesta fase também foi possível avaliar cada uma das sondas utilizadas, determinando quais foram as mais efetivas na detecção das descontinuidades presentes nos padrões.

Observa-se que o conceito de descontinuidade interna e externa utilizado no trabalho, durante os experimentos com sondas envolventes, é referente à posição da descontinuidade nos padrões e corpos de prova em relação às sondas de teste. Assim, como as bobinas sensoras das sondas se encontram próximas à superfície externa dos padrões e corpos de prova, uma descontinuidade presente na superfície externa dos mesmos é considerada uma descontinuidade interna para a sonda e uma descontinuidade presente na superfície interna dos mesmos é considerada uma descontinuidade externa para a sonda. Esta observação é importante porque, pela análise do ângulo de fase dos sinais referentes às descontinuidades, é possível determinar se elas se iniciam na superfície interna dos tubos ou em sua superfície externa. No caso das sondas superficiais, as descontinuidades presentes na superfície externa dos padrões e corpos de prova são denominadas descontinuidades superficiais e aquelas presentes em sua superfície interna, subsuperficiais.

3. RESULTADOS

3.1 Sondas envolventes

Após a análise dos sinais das diversas sondas envolventes utilizadas, verificou-se que as sondas SE2, SE3 e SE4, operando às frequências de 970 kHz, 670 kHz e 320 kHz respectivamente, foram capazes de detectar todas as descontinuidades existentes nos padrões PF1 e PF3, ou seja, furos com diâmetro de 1,00 mm, com profundidades equivalentes a 50% e a 75% da espessura da parede dos padrões, situados em suas superfícies interna e externa, bem como o furo passante. Entretanto, as diferenças entre os ângulos de fase obtidos para os sinais das descontinuidades dos padrões foram mais acentuadas para a sonda SE2, operando a 970 kHz, implicando em uma maior resolução nos ensaios realizados com a mesma. Esses sinais podem ser observados na Figura 8. A partir da medição dos ângulos de fase dos sinais das descontinuidades desses padrões, foi obtida a curva de referência (Perda de espessura x Ângulo de fase dos sinais), para as condições de ensaio usadas.

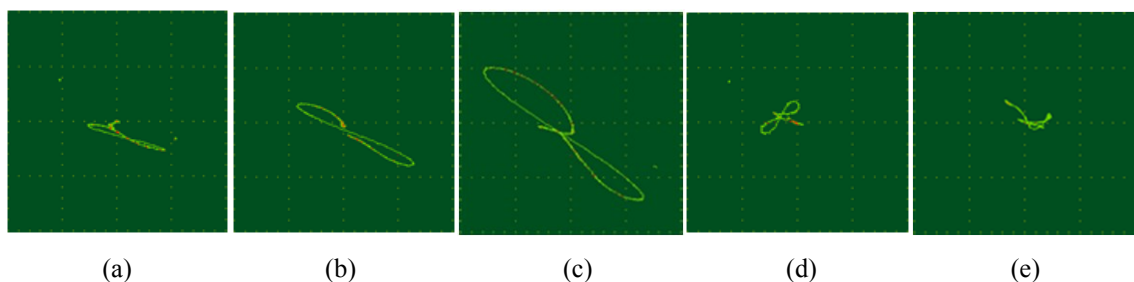


Figura 8: Sinais obtidos com a sonda SE2, referentes aos furos de fundo plano com 1,00 mm de diâmetro, presentes nos padrões de referência PF1 e PF3. Furos com profundidades equivalentes a 50% (a) e 75% (b) da espessura de parede dos padrões, situados na superfície externa dos mesmos. Furo passante (c). Furos de fundo plano com profundidades equivalentes a 75% (d) e 50% (e) da espessura de parede dos padrões, situados em sua superfície interna.

Os sinais adquiridos referentes aos corpos de prova CF1 e CF3 e sonda SE2 podem ser observados na Figura 9. Após a aquisição, os ângulos de fase dos sinais foram medidos, para comparação com a curva de perda de espessura de referência.

Na Figura 10, pode-se observar a curva de perda de espessura de referência. Nela foram inseridos os pontos referentes às descontinuidades presentes nos corpos de prova CF1 e CF3.

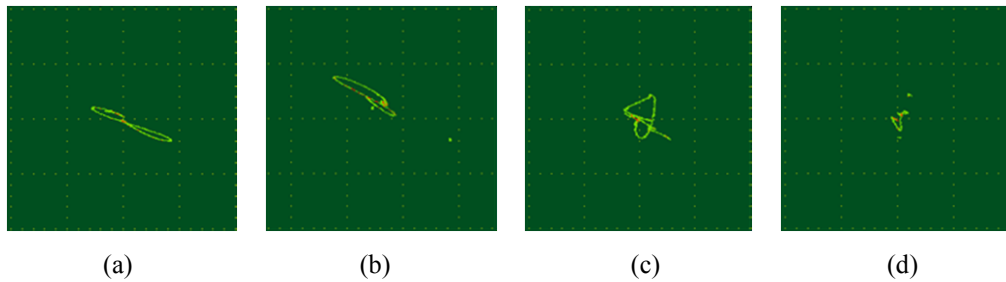


Figura 9: Sinais obtidos com a sonda SE2, referentes aos furos de fundo plano com 1,00 mm de diâmetro, presentes nos corpos de prova CF1 e CF3. Furos com profundidades equivalentes a 59% (a) e 86% (b) da espessura de parede do corpo de prova CF1, situados na superfície externa do mesmo e com profundidades equivalentes a 84% (d) e 55% (e) da espessura de parede do padrão CF3, situados na superfície interna do mesmo.

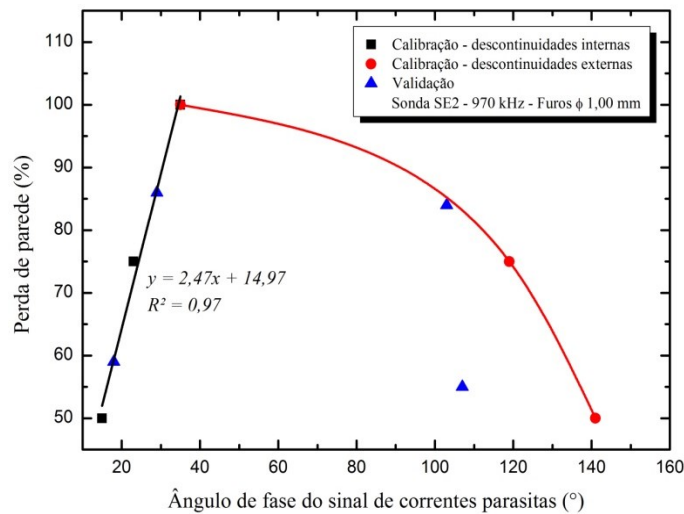


Figura 10: Curva de “Perda de Espessura x Ângulo de Fase dos Sinais” obtida a partir dos padrões de referência PF1 e PF3 e sonda SE2. Os pontos de validação correspondem às descontinuidades presentes nos corpos de prova CF1 e CF3.

Para a detecção dos furos existentes nos padrões PF2 e PF4, com diâmetro de 0,50 mm e profundidades equivalentes a 50%, 75% e 100% da espessura da parede dos padrões, a sonda SE2 apresentou uma baixa sensibilidade, detectando apenas os furos com profundidades acima de 75% de perda de parede.

3.2 Sondas superficiais

Após a análise dos sinais obtidos para as diversas sondas superficiais utilizadas, verificou-se que as sondas SS2 e SS4, operando às frequências de 320 kHz e 970 kHz/670 kHz e respectivamente, foram capazes de detectar todas as descontinuidades existentes nos padrões PF1/PF3 e PF2/PF4. Entretanto, as diferenças entre os ângulos de fase obtidos para as descontinuidades dos padrões foram mais acentuadas para a sonda SS4, operando a 970 kHz.

Os sinais adquiridos com a sonda SS4, operando a 970 kHz, referentes aos padrões e corpos de prova PF1 e PF3, CF1 e CF3, PF2 e PF4, CF2 e CF4, podem ser observados nas Figuras 11 a 14, respectivamente.

Na Figura 15, podem-se observar as curvas de referência de perda de espessura para a sonda SS4, obtidas a partir dos sinais referentes às descontinuidades presentes nos padrões PF1/PF3 e PF2/PF4. São indicadas, também, as descontinuidades presentes nos corpos de prova CF1/CF3 e CF2/CF4.

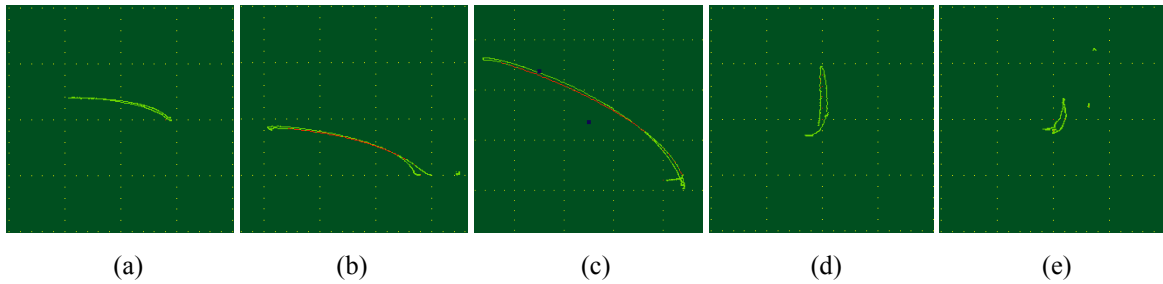


Figura 11: Sinais obtidos com a sonda SS4, referentes aos furos de fundo plano com 1,00 mm de diâmetro, presentes nos padrões de referência PF1 e PF3. Furos com profundidades equivalentes a 50% (a) e 75% (b) da espessura de parede dos padrões, situados em sua superfície externa. Furo passante (c). Furos com profundidades equivalentes a 75% (d) e 50% (e) da espessura de parede dos padrões, situados em sua superfície interna.

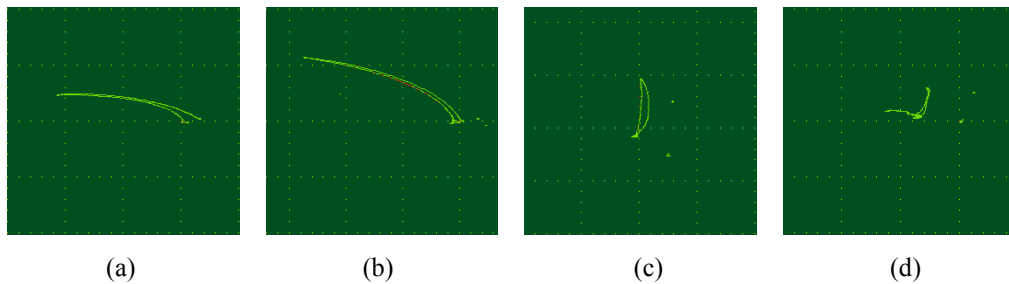


Figura 12: Sinais obtidos com a sonda SS4, referentes aos furos de fundo plano com 1,00 mm de diâmetro, presentes nos corpos de prova CF1 e CF3, com profundidades equivalentes a 59% (a) e 86% (b) da espessura de parede do corpo de prova CF1, situados na superfície externa do mesmo e com profundidades equivalentes a 84% (c) e 55% (d) da espessura de parede do corpo de prova CF3, situados na superfície interna do mesmo.

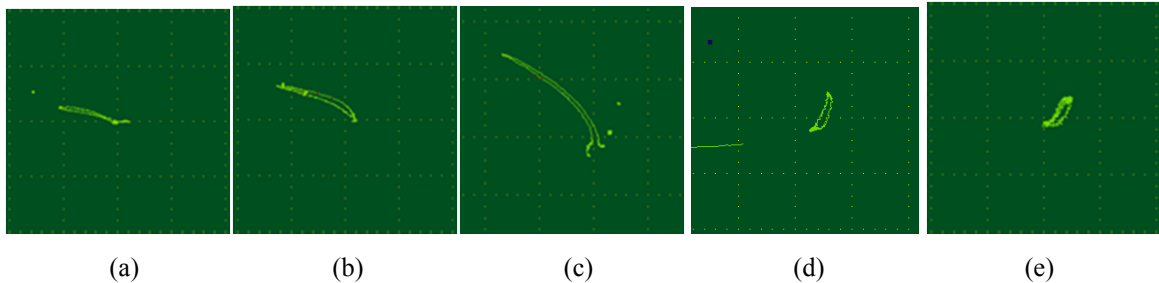


Figura 13: Sinais obtidos com a sonda SS4, referentes aos furos de fundo plano com 0,50 mm de diâmetro, presentes nos padrões de referência PF2 e PF4. Furos com profundidades equivalentes a 50% (a) e 75% (b) da espessura de parede dos padrões, situados na superfície externa dos mesmos. Furo passante (c). Furos com profundidades equivalentes a 75% (d) e 50% (e) da espessura de parede dos padrões, situados na superfície interna dos mesmos.

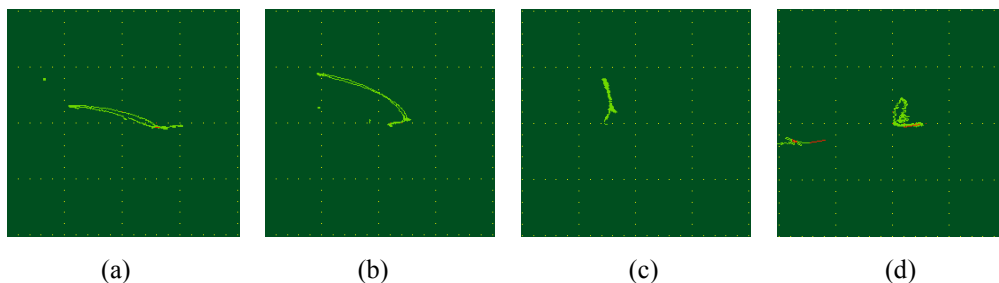


Figura 14: Sinais obtidos com a sonda SS4, referentes aos furos de fundo plano com 0,50 mm de diâmetro, presentes nos corpos de prova CF2 e CF4, com profundidades equivalentes a 57% (a) e 86% (b) da espessura de parede do corpo de prova CF2, situados na superfície externa do mesmo. Furos de fundo plano com profundidades equivalentes a 86% (c) e 57% (d) da espessura de parede do padrão CF4, situados na superfície interna do mesmo.

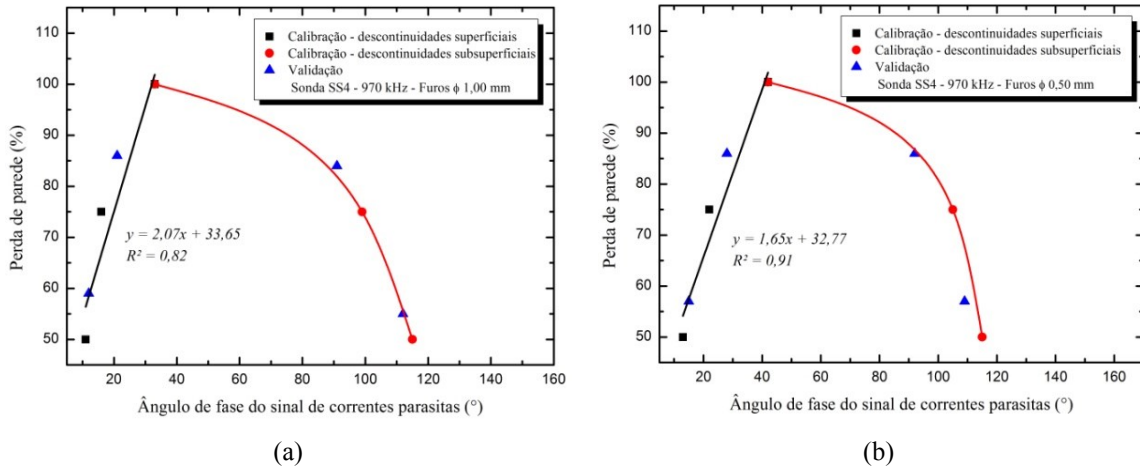


Figura 15: Curvas de “Perda de Espessura x Ângulo de Fase dos Sinais” obtida para a sonda SS4. Curva obtida a partir dos padrões PF1 e PF3 e pontos de validação referentes às descontinuidades nos corpos de prova CF1 e CF3 (a). Curva obtida a partir dos padrões PF2 e PF4 e pontos de validação referentes às descontinuidades nos corpos de prova CF2 e CF4 (b).

Na Figura 16, podem-se observar os sinais obtidos a partir dos padrões PE1, PE2, PE3 e PE4 e a curva de perda de espessura em função da amplitude do sinal de correntes parasitas, em relação à espessura de referência.

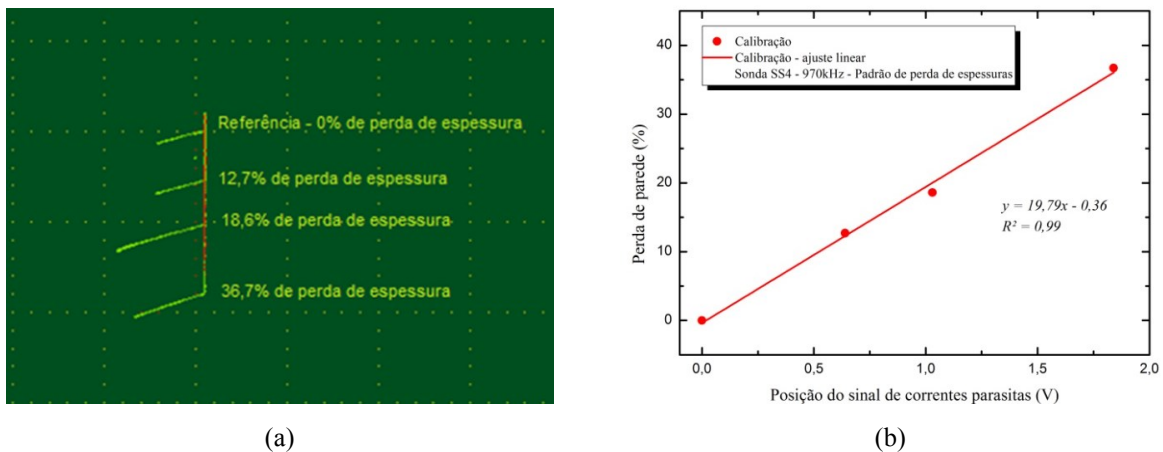


Figura 16: Sinais obtidos com a sonda SS4, operando a 970 kHz, referentes às descontinuidades do tipo perda de espessura, existentes nos padrões PE1, PE2, PE3 e PE4, com perdas de espessura de 0% (referência), 12,7%, 18,6% e 36,7%, respectivamente.

4. DISCUSSÃO

O sistema de ensaio, usando a sonda externa envolvente SE2 operando à frequência de 970 kHz, foi capaz de detectar as descontinuidades do tipo furo de fundo plano com diâmetro de 1,00 mm, usinadas nos padrões PF1 e PF3 e nos corpos de prova CF1 e CF3, ou seja, descontinuidades com perdas de espessura de parede superiores a 50%. Entretanto, das descontinuidades usinadas nos padrões PF2 e PF4 e nos corpos de prova CF2 e CF4, com 0,50 mm de diâmetro, somente foram detectadas aquelas com perdas de espessura de parede maiores que 75%.

Ao se utilizar sondas envoltivas, a região do material examinada corresponde ao volume do material abaixo das bobinas de teste. Uma descontinuidade presente na parede dos tubos produz uma perturbação no fluxo das correntes parasitas que, por sua vez, provoca uma mudança na impedância do sistema de ensaio. Como a geometria das bobinas de teste não muda, descontinuidades com maiores dimensões produzirão maiores alterações no valor dessa impedância, sendo mais facilmente detectadas. Como o volume do material avaliado nesse caso corresponde aproximadamente ao volume de material sob as bobinas de teste, em um

dado instante todo o perímetro do material sob as bobinas de teste é examinado. Pelo fato de se tratar de um volume muito grande de material, pequenas descontinuidades produzirão variações de impedância muito pequenas no fluxo das correntes parasitas e, por consequência, no sistema de ensaio, podendo não ser detectadas.

A vantagem apresentada ao se utilizar esse tipo de sonda durante uma inspeção consiste no tempo de inspeção. Apenas com o deslocamento da sonda ao longo do material sob teste o material pode ser examinado. Adicionalmente, o dispositivo mecânico automatizado usado para execução do ensaio utilizando esse tipo de sonda necessita realizar apenas o deslocamento da sonda ao longo do tubo, sendo mais simples.

Com o uso de sondas envoltivas foi possível discriminar descontinuidades com profundidades diferentes e identificar descontinuidades internas e externas.

A curva que descreve a relação entre a perda de espessura em função do ângulo de fase dos sinais das descontinuidades presentes nos padrões de referência, obtida para a sonda SE2, apresentou um aspecto similar ao das curvas usadas na avaliação de tubos instalados em trocadores de calor utilizando-se sondas internas. Na região de descontinuidades internas, a relação obtida foi aproximadamente linear. Na região de descontinuidades externas, um ajuste polinomial de terceiro grau foi usado para descrever essa relação.

O sistema de ensaio, usando a sonda superficial SS4 operando à frequência de 970 kHz, foi capaz de detectar todas as descontinuidades do tipo furo de fundo plano e furo passante, com diâmetros de 1,00 mm e 0,50 mm, com valores de ganho do sistema de ensaio bem inferiores aos usados nos experimentos com as sondas externas envoltivas. Nas sondas superficiais, como elas possuem um pequeno diâmetro, o volume do material sob a influência da bobina de teste é bem menor do que no caso das sondas envoltivas. Dessa forma, uma mesma descontinuidade produz alterações bem maiores no fluxo das correntes parasitas ao se utilizar esse tipo de sonda do que no caso das sondas envoltivas, pois a razão entre o volume da descontinuidade e o volume do material no qual circulam as correntes é maior. Entretanto, para o exame de todo o tubo usando esse tipo de sonda, são necessários dois movimentos: um movimento de rotação do tubo para que a sonda examine todo o perímetro do mesmo e um movimento de translação da sonda ao longo do comprimento do tubo, de forma a examinar toda a região de interesse.

Assim, o dispositivo mecânico usado para a execução do ensaio utilizando esse tipo de sonda necessita realizar tanto o deslocamento da sonda ao longo do tubo como o movimento de rotação do mesmo, aumentando apreciavelmente o tempo de inspeção, quando comparado às sondas externas envoltivas.

Também nesse caso, foi possível separar os sinais das descontinuidades presentes na parede interna dos padrões e corpos de prova daquelas presentes na parede externa dos mesmos. As curvas de perda de espessura em função do ângulo de fase obtidas apresentaram o mesmo comportamento característico obtido para as sondas envoltivas. Na região de descontinuidades superficiais, a relação obtida foi aproximadamente linear. Na região de descontinuidades subsuperficiais, um ajuste polinomial de terceiro grau também foi usado para descrever essa relação.

O sistema de ensaio, utilizando a sonda superficial SS4 operando à frequência de 970 kHz, foi capaz de detectar diferenças de espessura na parede dos padrões de perda de espessura de até 36,7%, com uma boa resolução. Perdas de espessura maiores não puderam ser detectadas devido à não disponibilidade de padrões para comparação.

5. CONCLUSÃO

Os experimentos realizados indicaram a aplicabilidade do método de ensaio por correntes parasitas para a inspeção dos tubos de aço inoxidável que compõem o revestimento dos elementos combustíveis do reator TRIGA IPR-R1.

O uso de sondas envoltivas, operando nas condições usadas neste trabalho, pode ser considerado para a detecção e monitoramento de descontinuidades com diâmetro acima de 0,50 mm e profundidades superiores a 75% da espessura desses revestimentos. Nesse caso a preparação de padrões de referência adicionais deve ser considerada, para refinar as curvas de perda de espessura já obtidas.

O uso de sondas superficiais, operando nas condições usadas neste trabalho, pode ser considerado para a detecção e monitoramento de descontinuidades com diâmetro acima de 0,50 mm e profundidades superiores a 50% da espessura desses revestimentos, bem como para a verificação de perdas graduais de espessura, de até 36,7%. Também nesse caso, a preparação de padrões de referência adicionais deve ser considerada, para refinar as curvas de perda de espessura obtidas.

Com os resultados obtidos, a seqüência do trabalho consiste na verificação da influência da presença do material fissil junto ao revestimento nos resultados do teste, na adaptação das sondas para serem usadas no

interior do poço do reator em inspeções submersas e na finalização do desenvolvimento do dispositivo mecânico automatizado para a realização do ensaio.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (Projeto 00559-13 – PPM VII) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo 310738/2012-1 – DT-II) pelos recursos fornecidos para o desenvolvimento apresentado.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Ageing Management for Research Reactors – IAEA Safety Standards* – PUB 1447, Vienna, IAEA, 2010.
- [2] RAVNIK, M.,” Return of spent TRIGA fuel”, In: *Proceedings of IAEA Technical Meeting on Return of Research Reactor Spent Fuel to the Country of Origin: Requirements for Technical and Administrative Preparations and National Experiences*, pp. 175-180, Vienna, Aug. 2006.
- [3] PARK, S.J., JUN, B.J., “The experience on the return of research reactor spent fuels of Korea”, In: *Proceedings of IAEA Technical Meeting on Return of Research Reactor Spent Fuel to the Country of Origin: Requirements for Technical and Administrative Preparations and National Experiences*, pp. 129-132, Vienna, Aug. 2006.
- [4] CUMBLIDGE, S. E., ANDERSON, M. T., DOCTOR, S. R., *An Assessment of Visual Testing*, Report NUREG/CR-6860, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA, 2004.
- [5] JEFIMOFF, J., ROBB, A. K., WENDT, K. M., “Results of the Indonesian TRIGA SNF to be shipped to INEEL”, In: *Proceedings of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Jackson, Wyoming, Oct. 1997.
- [6] CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR, Relatório de análise de segurança do Reator TRIGA IPR-R1, RASIN/TRIGA-IPR-R1/CDTN, Belo Horizonte, 2000.
- [7] ALENCAR, D. A., SILVA JR., S. F., “Using Visual Inspection NDT to Check Integrity of TRIGA Mark I Fuel Rods”, In: *Proceedings of the III World TRIGA Users Conference*, Belo Horizonte, 2006.
- [8] ALENCAR, D. A., SILVA JR., S. F., OLIVEIRA, P. F., *et al.*, “Nondestructive Inspections and Studies Applied in the Integrity Evaluation of IPR-R1 Triga Reactor”, In: *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference 2007*, Santos, 2007.
- [9] ALENCAR, D. A., SILVA JR., S. F., MATTAR NETO, M. “Using Eddy Current NDT to Check Integrity of TRIGA Mark I Fuel Rods Cladding”, In: *Proceedings of the III World TRIGA Users Conference*, Belo Horizonte, 2006.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, *Nondestructive Testing Handbook: Electromagnetic Testing*, 3 ed., Columbus, ASNT, 2004.
- [11] SILVA, R. F. Avaliação da integridade do revestimento de elementos combustíveis do reator TRIGA MARK 1 pelo método de correntes parasitas, Dissertação de M.Sc., PPGCDTN/CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.
- [12] CEECO, V. S., DRUNEN, V. G., SHARP, F. L. *Eddy current manual*, Chalk River, Atomic Energy of Canada Limited, 1983.