



OK  
TC  
reparata

**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**

**Donizete Anderson de Alencar**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: daa@cdtn.br

**Silvério Ferreira da Silva Júnior**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: silvasf@urano.cdtn.br

**Miguel Mattar Neto**

IPEN/USP, Centro de Engenharia Nuclear, Mecânica Estrutural, CENM, Travessa R, 400, Cidade Universitária, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, e-mail: mmattar@net.ipen.br

*Resumo. Um estudo relacionado com a aplicação do ensaio não destrutivo (END) por correntes parasitas (CP) na avaliação da integridade de tubos de geradores de vapor instalados em reatores à água pressurizada (PWR) é apresentado. Os principais tipos de discontinuidades e defeitos encontrados em inspeções reais, como relatado pela bibliografia, e as atuais técnicas e sondas disponíveis para uso prático são descritos. As limitações e dificuldades deste ensaio não destrutivo para avaliar as indicações tais como trincas circunferenciais geradas por corrosão sob tensão (IGSCC) são discutidas.*

*Palavras chave: gerador de vapor, PWR, END, correntes parasitas*

**1. INTRODUÇÃO**

A operação segura e eficaz de uma central nuclear exige a realização periódica de um conjunto de testes e ensaios denominado como Inspeção em Serviço (IS). Neste contexto, prevê-se a aplicação de ensaios não-destrutivos (END) tais como: Ultra-som (US), Raios-X (RX), Correntes Parasitas (CP), Líquido Penetrante (LP), Partículas Magnéticas (PM) e outros. A partir dos resultados obtidos numa IS, análises de integridade dos componentes podem ser desenvolvidas, podendo levar à sua substituição ou adequação operacional.

Um componente que requer muita atenção durante uma IS é o gerador de vapor (GV). Na sua construção, os GVs de usinas nucleares utilizam milhares de tubos fabricados em geral a partir de ligas metálicas não ferromagnéticas tais como *Inconel 600* e *Incoloy 800*. Seu processo de montagem mecânica, assim como suas condições de utilização, impõem sérias restrições de acesso durante as inspeções de serviço. Por trabalhar em condições ambientais bastante severas (temperatura, pressão, vibração e radiação), este componente está sujeito à ação de mecanismos de dano que podem levá-lo à condição de falha.

PRODUÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA  
DO IPEN  
DEVOLVER NO BALCÃO DE  
EMPRESTIMO

756 9

CÓPIA CONTROLADA

O ensaio eletromagnético por Correntes Parasitas (CP) é uma valiosa ferramenta, utilizada no controle da qualidade de componentes nucleares, com destaque para a inspeção de trocadores de calor, condensadores e em especial GVs. Para sua realização, sondas especiais, eletricamente conectadas a equipamentos de testes, percorrem o interior de cada tubo, visando a detecção e a caracterização de descontinuidades localizadas que apresentem perda na sua espessura nominal original.

Este trabalho apresenta os fundamentos básicos do ensaio por Correntes Parasitas, sua aplicação na inspeção de tubos instalados em GVs, os principais tipos de descontinuidades encontradas e as sondas de teste adequadas a cada caso. Apresentam-se ainda as limitações das técnicas de inspeção para a caracterização e dimensionamento de alguns tipos de descontinuidades.

## 2. NOÇÕES DO ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS

O ensaio por Correntes Parasitas consiste basicamente na indução de correntes elétricas em materiais eletricamente condutores, através de um campo eletromagnético variável, gerado por uma bobina alimentada por corrente alternada e na monitoração da interação entre as correntes induzidas e o material (ASNT, 1986), como pode ser visto na Fig. (1).

A formação das Correntes Parasitas depende de três fatores relacionados ao material a ser examinado: geometria, condutividade elétrica e permeabilidade magnética do objeto ou componente sob teste. Diversas possibilidades derivam deste arranjo básico, na medida em que são combinadas variações envolvendo as características construtivas das sondas de teste, o campo de aplicação, os objetivos do ensaio e os processos de medição utilizados. O ensaio é restrito a objetos pouco espessos, devido ao decaimento exponencial da intensidade das Correntes Parasitas circulantes com a profundidade, conhecido como efeito pelicular (Stegmann, 1990).

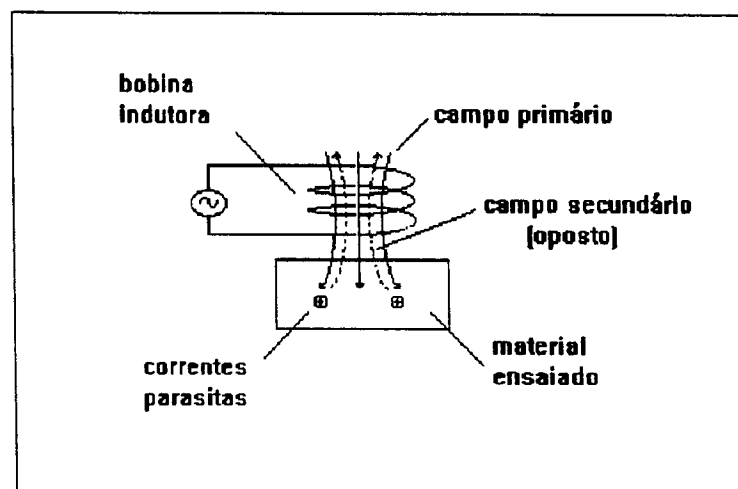


Figura 1. Geração de Correntes Parasitas num material

## 3. A INSPEÇÃO DE TUBOS

A inspeção de tubos por Correntes Parasitas requer a utilização de sistemas de testes que mostrem os resultados pelo sistema vetor-ponto. Neste caso a impedância da sonda de teste é continuamente apresentada na tela de um osciloscópio com memória (*digital storage*), operando em modo XY, que representa o plano complexo de impedâncias. O código ASME, em sua seção V, apresenta os critérios de caracterização por análise de fase das figuras de Lissajous resultantes de indicações geradas pelas descontinuidades encontradas (ASME, 1992).

Todo o processo é baseado em comparações entre as inclinações reais, referentes a descontinuidades detectadas durante a inspeção, com aquelas obtidas na etapa de calibração, a partir de descontinuidades de referência. A Fig. (2) mostra esquematicamente um padrão de calibração

contendo descontinuidades de referência. Este tubo deve ter as mesmas características físicas, químicas e metalúrgicas daqueles que serão inspecionados. Descontinuidades externas (furos de fundo plano) com profundidades de 100%, 80%, 60%, 40% e 20% da espessura são usinadas em sua superfície. Além destas, há dois chanfros (*grooves*) circunferenciais correspondentes a 10% de perda da espessura nominal, sendo um interno e outro externo.

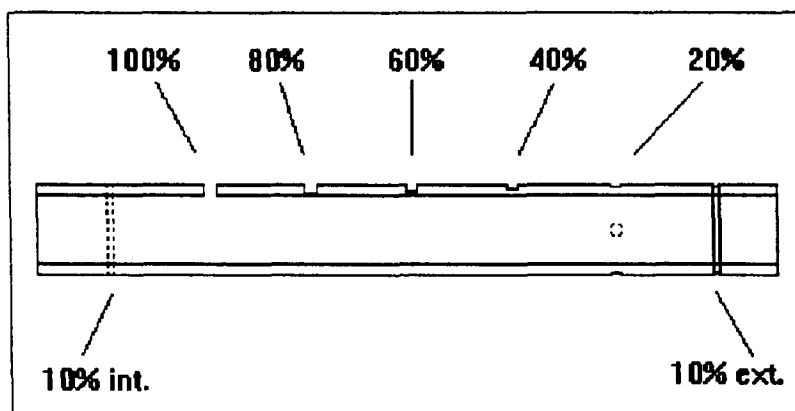


Figura 2. Tubo de referência ou padrão de calibração

A Figura (3) mostra as figuras de Lissajous para um padrão de calibração (ASME, 1992). Observa-se que para cada descontinuidade usinada corresponde uma figura de Lissajous com inclinação própria. Ainda segundo este código, uma curva de avaliação deve ser interpolada de modo a permitir avaliar as descontinuidades reais encontradas durante a inspeção. A Fig. (4) mostra uma curva interpolada típica para avaliar descontinuidades externas ao tubo.

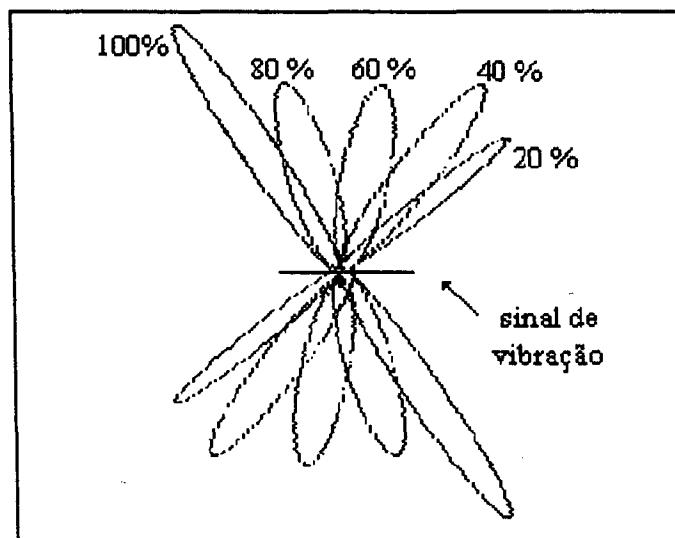


Figura 3. Figuras de Lissajous para um tubo-padrão de referência ASME

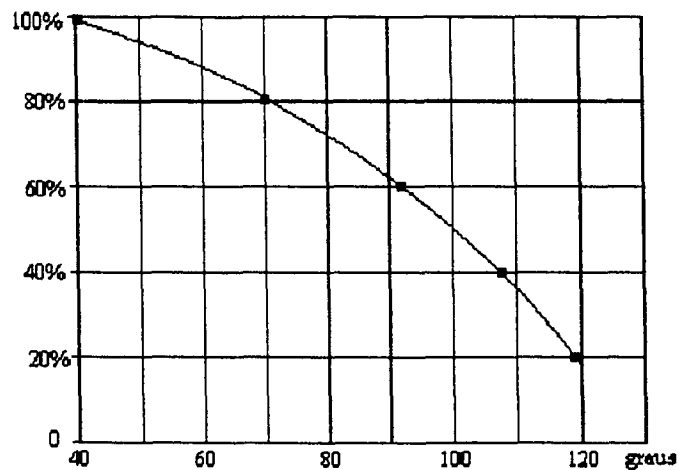


Figura 4. Curva de avaliação típica

#### 4. PRINCIPAIS TIPOS DE DESCONTINUIDADES ENCONTRADAS EM TUBOS DE GVs

Os principais tipos de descontinuidades encontrados durante as IS de GVs são listados a seguir:

- *Pitting* – Perda localizada de espessura causada em geral por mecanismos de corrosão. Pode ser interna ou externa. Pode ocorrer por toda extensão do tubo.
- *Fretting* – Perda de espessura resultante da ação combinada de agentes químicos e mecânicos, em que a superfície de contato de dois corpos sólidos são pressionadas uma contra outra por uma força normal e executam um movimento de deslizamento oscilatório relativo (Collins, 1981).
- *Denting* – É uma redução do diâmetro externo dos tubos, originada pela formação de produtos de corrosão (magnetita) entre a placa suporte e os mesmos.
- Expansão – Variação dimensional numa seção do tubo provocada por assentamento de tensões.
- Trinca longitudinal – Ruptura intergranular, longitudinalmente orientada e resultante de processos de corrosão sob tensão.
- Trinca circunferencial – Ruptura intergranular, circunferencialmente orientada e resultante de processos de corrosão sob tensão.
- Amassamento – Variação dimensional numa seção provocada por falhas de montagem ou de operação.
- Inclusões metálicas – Concentração de materiais constituintes ou contaminantes ainda na fase de fabricação.
- Perda de espessura junto às placas suporte – Causada por mecanismos de corrosão. É devida ao acúmulo de impurezas e produtos de corrosão, entre as placas suporte e os tubos, originários do tratamento da água do secundário.

#### 5. PRINCIPAIS TIPOS DE SONDAS UTILIZADAS NA INSPEÇÃO DE GVs

A inspeção de tubos de GVs requer o uso de diferentes sondas internas, para inspecionar os diversos tipos de descontinuidades que possam existir. Podem ser citadas:

- Sondas tipo *Bobbin* operando em modo diferencial. Este arranjo é particularmente sensível a descontinuidades localizadas como as do tipo pitting e amassamento;

- Sondas tipo *Bobbin* operando em modo absoluto ou referência. Este arranjo é particularmente sensível na detecção de descontinuidades longitudinalmente orientadas, como trincas longitudinais;
- Sondas tipo superficial-rotativa operando em modo absoluto. Indicada para inspecionar as regiões próximas ao espelho do GV. São úteis na detecção de descontinuidades localizadas, longitudinalmente orientadas e ainda nas avaliações de espessura residual de parede ou expansão;
- Sondas tipo *Cross-point* (O'Connor, 1993) indicadas especialmente para a detecção de trincas circunferenciais.
- Sondas tipo *Pankake* ou *Multi-Coil*. Requerem equipamentos de teste especiais com pelo menos oito canais simultâneos e software de análise em tempo real. Indicadas para a realização de perfilometria, especialmente na avaliação de descontinuidades com perdas de espessura não homogêneas (como *denting* e *fretting*).

## 6. LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS DE INSPEÇÃO

Em princípio, com as sondas citadas, é possível detectar praticamente todos os tipos de descontinuidades que possam existir em tubos de GVs. Entretanto, verifica-se que para alguns tipos ocorrem problemas relativos à sua caracterização ou dimensionamento. Tais dificuldades decorrem de fatores como:

- Falta de sensibilidade do teste para descontinuidades de pequeno volume e/ou afastadas do campo de detecção da sonda (perdas de espessura externas e inferiores a 20% da nominal);
- Influência de partes mecânicas constituintes do GV tais como as placas de suporte e o espelho. Neste casos recorre-se ao uso de equipamentos que operam com multifrequência e que eliminam ou minimizam tais efeitos;
- Falta de condição operacional em regiões de extremidade, próximas ao lado externo do espelho;
- Influência de irregularidades na geometria de descontinuidades (principalmente variações de profundidade). Esta influência é um fator limitante para a utilização de sondas tipo *Bobbin*;
- Influência da orientação descontinuidades, particularmente trincas circunferenciais. Este caso é bastante crítico, uma vez que as trincas estão orientadas exatamente na direção de formação das Correntes Parasitas por sondas tipo *Bobbin* (USNRC, 1997). A detecção exige o uso de sondas tipo *Cross-point* ou *Pankake*, mas sua caracterização é bastante crítica, em função principalmente da falta de sensibilidade.

Verifica-se ainda que geralmente ocorrem combinações de dois ou mais fatores limitantes. Exemplificando, nas regiões adjacentes e/ou sob as placas de suporte podem ocorrer descontinuidades como trincas circunferenciais. Neste caso as dificuldades de caracterização tornam-se ainda maiores.

Assim, o estabelecimento de critérios de avaliação confiáveis para todas as situações de teste, principalmente ao utilizar-se as recomendações do código ASME fundamentadas na análise de ângulos de fase, não é diretamente aplicável. Um critério proposto (USNRC, 1995), em particular para a análise de sinais relativos às trincas circunferenciais, é o de caracterização por amplitude de sinal (*Voltage Based Repair Criteria*). Neste caso, estabelecem-se condições de calibração para trincas de geometria e profundidade conhecidas. Por comparação das amplitudes avaliam-se as trincas reais detectadas durante as inspeções.

## 6. CONCLUSÕES

O ensaio por Correntes Parasitas é extensamente utilizado como método de avaliação de integridade para tubos de geradores de vapor de centrais nucleares tipo PWR. Apesar de ser capaz de detectar com relativa confiabilidade a maioria dos tipos de discontinuidades conhecidas, existem algumas situações, principalmente envolvendo a caracterização de trincas circunferenciais, onde o atual estado de desenvolvimento tecnológico ainda não é suficiente para avaliá-las com precisão.

## 7. REFERÊNCIAS

- ASME - American Society of Mechanics Engineers, Section V, Article 8; "Boiler and Pressure Vessel Code". New York, 1992. pp. 127-133.
- ASNT - American Society for Nondestructive Testing, "Electromagnetic testing", v. 4. Columbus, 1986. 187p.
- Collins, J.A., "Failure of Materials in Mechanical Design". New York, 1981. pp 479-480.
- O'Connor, H.M., "Detection of Circumferencial Cracks in Heat Exchanger Tubes", ECT Report, Virginia Beach, 1993. 8p.
- Stegmann, D., "Fundamentos do método de correntes parasitas", ABENDE, São Paulo, 1990. 98p.
- USNRC, "Circumferencial Cracking of Steam Generator Tubes", Washington, D.C., 1997 (NUREG-1604).
- USNRC, "Voltage-Based Repair Criteria for Westinghouse Steam Generator Tubes Affected by Outside Diameter Stress Corrosion Cracking", generic letter 95-05, Washington, D.C., 1995.

## A STUDY RELATING TO THE USE OF EDDY CURRENT TESTING AS A NONDESTRUCTIVE METHOD FOR STEAM GENERATORS TUBES INTEGRITY EVALUATION

### **Donizete Anderson de Alencar**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: daa@cdtn.br

### **Silvério Ferreira da Silva Júnior**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil, e-mail: silvasf@urano.cdtm.br

### **Miguel Mattar Neto**

IPEN/USP, Centro de Engenharia Nuclear, Mecânica Estrutural, CENM, Travessa R, 400, Cidade Universitária, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil, e-mail: mmattar@net.ipen.br

***Abstract.** A study relating to the use of eddy current testing as a nondestructive method for steam generators tubes evaluation in Nuclear Power Plants is presented. The main types of discontinuities and defects found in the inspections of these equipment are described as well as the actual probes and techniques available for this purpose. The limitations of this nondestructive method in the evaluation of discontinuities such as circumferencial cracks induced by stress corrosion cracking (IGSCC) are discussed.*

*Keywords: steam generators, PWR, NDT, eddy current*

**CÓPIA CONTROLADA**