

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGEM

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR CORRENTES
PARASITAS EM TUBOS DE PERMUTADOR DE CALOR

Klevson Ranniet Almeida Barboza

Engenheiro de Materiais

Dissertação para obtenção de título de
*Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de
Inspeção de Equipamentos*

Porto Alegre - RS

2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais – PPGEM

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR CORRENTES
PARASITAS EM TUBOS DE PERMUTADOR DE CALOR

Klevson Ranniet Almeida Barboza

Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos.

Porto Alegre - RS

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Engenharia de Inspeção de Equipamentos e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Dr. Germano Xavier de Pádua, PETROBRAS

Dr. Carlos Eduardo Aguiar Lima Rodrigues, PETROBRAS, UFERSA

Dr. Cristiane Aparecida Barros de M. Retz, PETROBRAS

Prof. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Outubro de 2009

Dedico a meus pais, José do Nascimento e Luíza, a meus irmãos Kleberton e Kleriton,
e à minha esposa Fernanda.

Agradecimentos:

Aos meus familiares e amigos por me apoiarem durante todo o curso de formação e na finalização deste trabalho.

Aos coordenadores do curso de formação de engenheiros de equipamentos inspeção.

A todos da turma do curso de formação de Engenheiros de Equipamentos Inspeção 2008/2009 da Universidade Petrobras.

Aos engenheiros Agildo Moreira e Ricardo de Oliveira Carneval pela colaboração.

Aos tutores durante o vivencial Cristiane Retz e Carlos D'Ávila.

Aos professores da UFRGS e ao orientador Afonso Reguly.

E a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Permutadores de Calor	2
2.1.1 Natureza e Características dos Fluidos.....	3
2.1.2 Classificações de permutadores de calor	4
Permutadores de casco e tubos	5
Projeto de permutadores de casco e tubos	6
2.1.3 Inspeção em Permutadores	6
2.1.4 Deterioração em Permutadores.....	8
Processos de deterioração	9
Incrustação	10
Corrosão.....	11
Depósito	13
2.2 Técnicas de Inspeção	14
IRIS.....	15

Ondas Guiadas	18
2.3 Correntes Parasitas	20
2.3.1 Realização do Ensaio	22
2.3.2 Vantagens e limitações	23
2.3.3 Tipos de sondas utilizadas na inspeção	24
2.3.4 Modos de Operação	25
Modo Absoluto	26
Modo Diferencial	26
Modo Reflexão.....	26
Modo Híbrido.....	26
2.3.5 Automatização do Ensaio	27
2.3.6 Correntes parasitas com saturação magnética	28
Correntes parasitas com saturação magnética total	30
Correntes Parasitas com Saturação Magnética Parcial	30
2.3.7 Correntes Parasitas por Campo Remoto	31
Limitações da técnica de RFEC	32
2.3.8 Variáveis operacionais	33
Condutividade Elétrica.....	33
Permeabilidade Magnética.....	34
<i>Lift-off</i>	35
Efeito Aresta	35
Efeito pelicular	36
2.3.9 Escolha da frequência de operação.....	36
2.3.10 Análise das Correntes Parasitas em tubos de diversos materiais.....	37
2.3.11 Detecção de descontinuidades pelas técnicas de correntes parasitas	39
Capacidade de detecção de trinca	41

	Detecção de Corrosão Uniforme e Medição de Espessura	42
	Análise de descontinuidades nas proximidades da chicana.....	43
	Capacidade de detecção de furo passante	43
	Inspeção em tubos de ligas latão-alumínio/bronze-alumínio.....	43
	Inspeção em tubos de titânio.....	44
3	Considerações Finais.....	47
3.1	Proposta para trabalhos futuros.....	48
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema da troca de calor entre dois fluidos (NETO, 2003)	3
Figura 2.2	Desenho esquemático do sistema de troca de calor em permutadores. (a) os fluidos escoando no mesmo sentido, direção e fluxo, escoamento paralelo, (b) o sentido de escoamento do fluido contra corrente. (NETO 2003)	4
Figura 2.3	Desenho esquemático de um permutador de calor com suas partes descritas e indicações de entrada e saída de fluido. (TROCALOR, 2007).....	6
Figura 2.4	Representação dos principais danos ocorridos em feixes de permutadores de calor (Adaptado de SHULL 2002).....	9
Figura 2.5	Incrustação no interior de tubos de permutador (LOTH, 2009)	11
Figura 2.6	Fotografia do casco de um permutador de calor com corrosão alveolar generalizada (LOTH, 2009).....	12
Figura 2.7	Fotografia do tubo da Figura 2.5 após limpeza. Superfície deteriorada por corrosão sob depósito (incrustação) (LOTH, 2009)	12
Figura 2.8	Corrosão por pite em tubo de permutador de calor (LOTH, 2009)	13
Figura 2.9	Depósito proveniente do fluido do processo sobre os tubos do feixe de um permutador de calor (LOTH, 2009).....	14
Figura 2.10	Cabeçotes utilizados na técnica IRIS, com diferentes centralizadores para diferentes diâmetros de tubo (BIRCHALL, 2007).	16
Figura 2.11	Representação do cabeçote utilizado na técnica IRIS (Adaptado de MKC, 2009).	17
Figura 2.12	Esquema do cabeçote inserido no tubo para inspeção (Adaptado de VOGT, 2006).	18
Figura 2.13	Gráfico demonstrando inspeção de tubo de permutador em forma de U (Adaptado de KWUN et. al. 2005).	19

Figura 2.14	(a) A corrente alternada circula a bobina com uma frequência escolhida gerando um campo ao redor da bobina; (b) quando a bobina posta próxima a um condutor elétrico, correntes parasitas são induzidas no material; (c) caso uma descontinuidade exista no material condutor, esta irá perturbar as correntes parasitas e a união magnética com a bobina será alterada e um sinal de defeito será lido pela medida de variação de impedância da bobina (OLYMPUS CORPORATION, 2009).	21
Figura 2.15	Esquema do ensaio por correntes parasitas (Adaptado de MARTINS, 2003a)....	22
Figura 2.16	Sondas comerciais com aplicações específicas (SHULL, 2002).....	25
Figura 2.17	Monitores utilizados na inspeção por correntes parasitas (NDT, 2009).....	28
Figura 2.18	Em (a) descontinuidades comumente encontradas em tubos de permutador de calor. Em (b) sinais obtidos para cada descontinuidade de (a) utilizando-se saturação de 98%, e em (c) uma saturação de 89% (Adaptado de ASM, 1997).	29
Figura 2.19	Esquema de inspeção por Campo Remoto das Correntes Parasitas (MARTINS, 2003a)	32
Figura 2.20	Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência de ensaio utilizada, para diferentes materiais (Adaptado de ASM 1997).....	37
Figura 2.21	Esquemática dos resultados para ensaio de correntes parasitas em modo absoluto e modo diferencial (Adaptado de NDT, 2009).....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Prazo máximo para inspeção de segurança de vasos de pressão conforme estabelecido pela Norma Regulamentadora N° 13 (Ministério do Trabalho e Emprego - M.T.E - BRASIL, 2000)	7
Tabela 2.2	Relação de materiais de tubos de permutador de calor com técnicas de inspeção recomendadas (MARTINS, 2003b).	38
Tabela 2.3	Capacidade de detecção de discontinuidades de técnicas de inspeção de tubos de permutador de calor.....	39
Tabela 2.4	Aplicabilidade de técnicas de inspeção de tubos de permutador de calor	46

LISTA DE ABREVIATURAS

μ	permeabilidade magnética
ρ	resistividade
ASME	American Society of Mechanical Engineers
GW	Guided Waves (Ondas Guiadas)
IRIS	Internal Rotary Inspection System
NR-13	NR-13 é a norma regulamentadora 13 do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil
RFEC	Remote Field Eddy Current
S	profundidade padrão da penetração da corrente parasita
SPIE	Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos
TEMA	Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association

RESUMO

A manutenção da qualidade do processo com o uso da inspeção não destrutiva em equipamentos é vital para produção, seja em plantas de processo em terra ou em plataformas marinhas. Deve-se destacar a inspeção em permutadores de calor que são responsáveis pela troca térmica entre fluidos durante o processo, representando uma grande economia de energia. A inspeção de tubos de permutadores de calor pode ser realizada por diversas técnicas, cada uma apresentando suas vantagens e desvantagens, entre elas, pode-se destacar a técnica de inspeção por correntes parasitas. Tendo em vista a aplicabilidade desta técnica, este trabalho teve como objetivo estudar suas características, fazendo um detalhamento dos principais fatores que afetam sua realização e, por conseguinte, uma análise da resposta que cada tipo de descontinuidade fornece na inspeção. Permitindo com isso, uma avaliação mais detalhada da viabilidade da inspeção de tubos de permutadores de calor com essa técnica. Sua melhor aplicação encontra-se em materiais não ferromagnéticos e, para os materiais ferromagnéticos, pode-se utilizar outras técnicas que se utilizam das propriedades das correntes parasitas, apresentando bons resultados.

ABSTRACT

Maintaining the process quality with the use of non destructive inspection is vital to production, either on shore or off shore process plants. Of notice is the inspection of heat exchangers which are responsible for heat exchange between fluids in the process, representing in great energy saving. The inspection of tubes of heat exchangers can be performed by several techniques, each presenting its advantages and disadvantages, among them, one can highlight the Eddy current inspection. Focused in the application of this technique, this work aims to study its characteristics, analyze the main factors affecting its performance and, therefore, understand the response to each type of discontinuity during inspection. This work provides a more detailed assessment of the feasibility of non destructive inspection of heat exchanger tubes with this technique. Its best application is with non-ferromagnetic materials while for ferromagnetic materials, one can use other techniques that use the eddy current properties with good results.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente existe um grande número de técnicas de ensaio não destrutivo que podem ser utilizadas na inspeção de tubos de permutadores de calor, e dentre elas é necessário realizar uma avaliação criteriosa para a escolha das melhores técnicas a serem utilizadas. A técnica de correntes parasitas teve seu início na inspeção após a Segunda Guerra Mundial, desde então tem-se realizado avanços na técnica com uma aplicação em tubos de pequeno diâmetro, especificamente tubos de permutador de calor.

Com a necessidade de inspeção de tubos de permutadores de calor, o desenvolvimento de técnicas que utilizam as propriedades de correntes parasitas foi uma questão de tempo, possibilitando a inspeção em diversos materiais. Atualmente é mais comum o uso dessa técnica na inspeção em tubos de materiais diamagnéticos, devido ao seu grau de sensibilidade e confiabilidade nos resultados.

A grande variedade de materiais utilizados nos tubos de permutadores de calor faz com que haja a necessidade de escolha da técnica adequada para a inspeção. Sabe-se que cada técnica possui vantagens e desvantagens na inspeção em diferentes materiais de tubos, surgindo então a necessidade de uma seleção da técnica de inspeção bem definida, possibilitando um aumento de sensibilidade na detecção de descontinuidades usualmente encontradas em tubos de permutadores de calor.

Esse trabalho tem como objetivo realizar uma avaliação da técnica de inspeção de tubo de permutador de calor por correntes parasitas, descrevendo suas características principais e aplicabilidade. Foi realizada uma análise da capacidade de detecção de algumas descontinuidades encontradas em tubos de diferentes materiais utilizados em permutadores de calor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Permutadores de Calor

Nas indústrias de petróleo e petroquímicas existe uma preocupação com a manutenção e integridade dos equipamentos que são julgados cruciais para manutenção da produção. Por isso, profissionais responsáveis pela inspeção e manutenção estão envolvidos diretamente com procedimentos e técnicas de inspeção desses equipamentos. Um dos equipamentos cruciais é o permutador de calor, também chamado de trocador de calor. Na existência de algum tipo de falha, como no feixe de tubos, que possa acarretar um decaimento na eficiência da troca térmica, poderá ser necessário executar uma parada do equipamento, o que poderá levar a uma parada de toda a planta.

Permutador de calor é um dispositivo usado para a transferência de calor, predominantemente por condução, entre duas correntes fluidas. Os fluidos de cada lado da barreira são usualmente líquidos, mas eles podem estar no estado gasoso, tais como vapor, ar, ou hidrocarbonetos vaporizados. A maioria das barreiras entre os fluidos é uma parede de metal, geralmente um tubo de aço. No entanto, este pode ser uma chapa de outro metal, plástico, ou outro material resistente à corrosão (MCGRAW-HILL, 2005). O permutador é caracterizado pela troca de energia entre fluidos de processo, no entanto, quando existem fluidos auxiliares ou desempenhado serviço especial, são dados nomes diferenciados, como resfriador, aquecedor, vaporizador, etc. Permutadores de calor são utilizados em plantas industriais para remover o calor do fluxo do processo, moderar as reações químicas através do controle de suas temperaturas e condensar vapor (condensador de superfície) (SOUZA, 2007). Assim, pode-se dizer que a função básica do permutador é a troca de calor entre fluidos de diferentes sistemas, e por conseqüência disto, favorecer um ganho na eficiência energética de toda a planta de processo, com o aproveitamento de calor para o aquecimento de fluidos inicialmente frios (SABINO, 2008). A Figura 2.1 esquematiza a entrada e a saída de dois fluidos com diferentes temperaturas, ocorrendo a troca de calor entre eles.

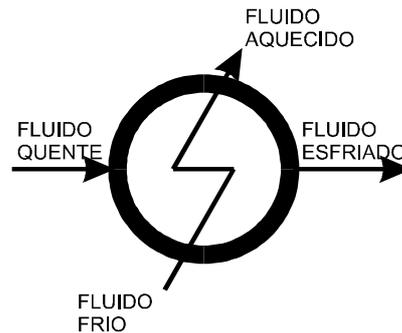


Figura 2.1 Esquema da troca de calor entre dois fluidos (NETO, 2003)

2.1.1 Natureza e Características dos Fluidos

Fluidos diferentes terão comportamentos diferentes em um permutador de calor, pois cada fluido possui propriedades físicas que irão interferir na troca térmica, como condutibilidade térmica, densidade, viscosidade e calor específico. São essas propriedades que também irão influenciar nas características de projeto, além das propriedades geométricas e de operação e como também no desempenho do permutador.

Propriedades químicas merecem atenção, pois podem prejudicar a integridade do equipamento. Problemas como corrosividade, toxicidade e inflamabilidade são propriedades que devem ser cuidadosamente avaliadas e acompanhadas, pois uma mudança na temperatura de operação pode ocasionar eventual vazamento. Nesse caso, é importante a correção e mitigação do problema.

A manutenção da temperatura de operação é importante para manter o potencial térmico do permutador. Para efeito de projeto, é usada uma média entre as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, que irá variar de acordo com o projeto. Como a troca térmica é dependente do potencial térmico, é necessário que não haja uma variação alta na temperatura de operação. Desta forma, é previsto uma faixa de tolerância de temperatura para operação do equipamento, sem que prejudique sua integridade ou o processo de troca térmica (PETROBRAS, 2008).

2.1.2 Classificações de permutadores de calor

Há diferentes formas de realizar a classificação de permutadores de calor. NETO (2003) classifica os permutadores de três formas diferentes: quanto ao escoamento do fluido, quanto à função e quanto ao sistema de troca térmica.

Quanto ao escoamento do fluido, este pode ser paralelo ou contracorrente. Nos permutadores de escoamento paralelo os dois fluidos, quente e frio, entram separadamente no equipamento pela mesma extremidade. Há elevada taxa de transferência de calor no início, mas à medida que os fluidos avançam, a mesma diminui assintoticamente, atingindo um valor limite intermediário. No caso do escoamento em contra corrente, os fluidos entram por lados opostos. A transferência de calor é aproximadamente constante em todo o equipamento. Além da maior eficiência, este tipo de arranjo é menos sujeito aos danos causados por choques térmicos. A Figura 2.2 apresenta os resultados das temperaturas no final da troca térmica para os dois processos: fluxo com fluidos escoando em sentidos paralelos, Figura 2.2 (a), e em contra corrente, Figura 2.2 (b).

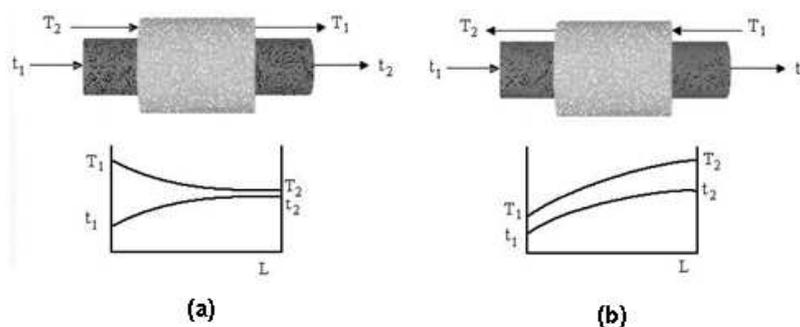


Figura 2.2 Desenho esquemático do sistema de troca de calor em permutadores. (a) os fluidos escoando no mesmo sentido, direção e fluxo, escoamento paralelo, (b) o sentido de escoamento do fluido contra corrente. (NETO 2003)

A última classificação é baseada no sistema de troca térmica, e é subdividida em duas categorias, permutadores de tubos e permutadores de placas. Os permutadores de calor tubulares são representados por permutadores bi ou multi-tubulares e permutadores de casco e tubos. Como os de casco e tubos são os mais utilizados em refinarias e plataformas de petróleo, eles serão abordados com mais detalhes.

Permutadores de casco e tubos

Permutadores de calor tipo casco e tubos são amplamente utilizados em indústrias de petróleo e refino. Eles são virtualmente projetados para alto vácuo até altas pressões (acima de 100 MPa), para criogênicas e altas temperaturas, para qualquer diferença de pressão e temperatura, e para diferentes fluidos. Esses permutadores possuem uma ampla área superficial de transferência de calor, no entanto, ocupam uma grande quantidade de espaço físico e estrutural (SHAH & KENNETH, 1999). Os permutadores de casco e tubos são projetados de acordo com as normas aplicáveis a vasos de pressão, no entanto, são utilizadas normas complementares para partes específicas do permutador. Na classificação e construção de permutadores, é usualmente utilizada a norma TEMA, *Tubular Exchanger Manufacturers Association* e ASME *Boiler and Pressure Vessel Codes* (ASME, 2006).

Um permutador convencional, tipo casco e tubos, apresenta três partes principais: casco, carretel e feixe tubular. O casco (ou corpo) do permutador é um vaso de pressão onde está contido o feixe tubular e por onde circula o fluido externo a este. O produto pode percorrer o casco uma só vez (passe simples) ou mais de uma (passes múltiplos). O casco é um tubo de grande diâmetro, com bocais para entrada e saída do fluido e, normalmente, flanges nas extremidades. Os bocais normalmente são radiais e colocados na vertical. Devido à dificuldade de construção, não é encontrado casco com mais de dois passes. O casco mais utilizado é o de uma passagem, com os bocais nas extremidades.

Os tubos são projetados para efetuar uma maior troca térmica possível, podendo ser lisos ou aletados externamente. Os tubos mais utilizados são os lisos, que no caso são bem mais polidos que os utilizados em tubulações e são especiais para a troca de calor. Estes tubos são fabricados e normalmente padronizados em 20 pés (6,10 m) de comprimento. Tubos aletados apresentam problemas de corrosão e depósitos bem mais significativos que os tubos lisos. Os tubos em forma de U devem obedecer a um raio mínimo de curvatura, para se evitar a ruptura no lado externo ou obstrução da área de escoamento no lado interno. Na Figura 2.3 estão representadas as principais partes de um permutador e o sentido do fluxo dos fluidos.

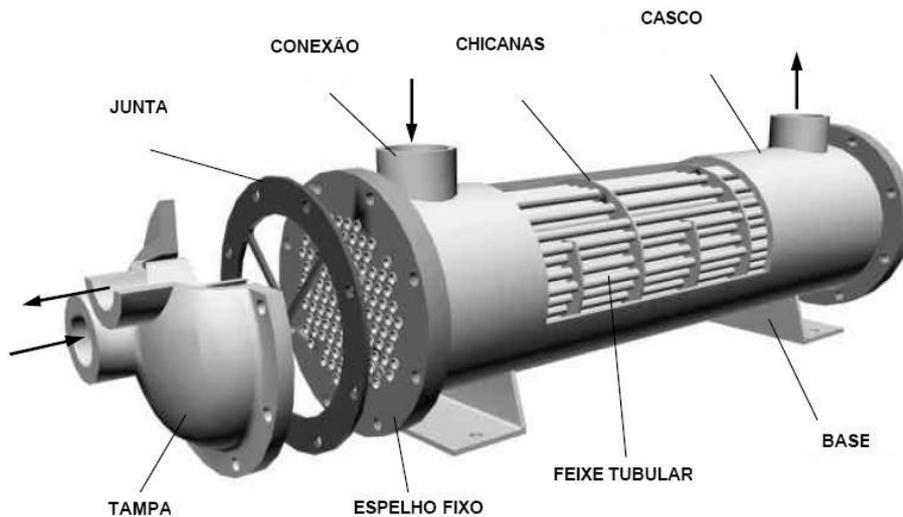


Figura 2.3 Desenho esquemático de um permutador de calor com suas partes descritas e indicações de entrada e saída de fluido. (TROCATOR, 2007)

Projeto de permutadores de casco e tubos

A norma TEMA apresenta três categorias que especificam o projeto, fabricação e materiais a serem empregados:

- Classe R – petróleo e aplicações em processos relacionados;
- Classe C – comercial e aplicações em processos gerais;
- Classe B – serviço em processos químicos.

A norma N-466 (PETROBRAS, 2007), especifica que o projeto mecânico dos permutadores de calor deve seguir, além das normas N-253 (PETROBRAS, 2006), o código ASME (2006), assim como a classe R da norma TEMA.

2.1.3 Inspeção em Permutadores

Equipamentos que são submetidos à pressão, como os permutadores, estão sujeitos a regulamentações estatutárias locais. No Brasil, a regulamentação que rege sobre esses equipamentos é a NR-13 Ministério do Trabalho e Emprego - M.T.E – BRASIL, 2000). Esta norma prevê o prazo máximo para inspeção desses equipamentos, mas geralmente a inspeção é realizada em prazo mais curto e definida pelos grupos de

inspeção ou SPIE – Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, previsto no Anexo II da NR-13. Em geral, a inspeção é realizada para verificar a integridade dos equipamentos, avaliando as condições físicas para permanência no processo. Por isso, é importante a avaliação de corrosão, suas causas e taxas. Os permutadores, na maioria dos casos, são inspecionados de forma corriqueira, seja devido ao prazo de inspeção vencido ou porque foi necessária uma parada extraordinária por motivos de operação. Desta forma, a integridade física é assegurada, mantendo a confiabilidade operacional confortável e satisfatória. As condições físicas observadas, os reparos e ensaios efetuados, bem como os valores de medição de espessura devem ser registrados em Relatório de Inspeção devendo conter no mínimo os requisitos da NR-13. A inspeção de segurança periódica constituída por exame externo, interno e teste hidrostático, deve obedecer aos prazos máximos estabelecidos pela NR-13, dispostos na .

Tabela 2.1 Prazo máximo para inspeção de segurança de vasos de pressão conforme estabelecido pela Norma Regulamentadora Nº 13 (Ministério do Trabalho e Emprego - M.T.E - BRASIL, 2000)

Categoria do Vaso	Exame Externo		Exame Interno		Teste Hidrostático	
	Sem SPIE	Com SPIE	Sem SPIE	Com SPIE	Sem SPIE	Com SPIE
I	1 ano	3 anos	3 anos	6 anos	6 anos	12 anos
II	2 anos	4 anos	4 anos	8 anos	8 anos	16 anos
III	3 anos	5 anos	6 anos	10 anos	12 anos	a critério
IV	4 anos	6 anos	8 anos	12 anos	16 anos	a critério
V	5 anos	7 anos	10 anos	a critério	20 anos	a critério

A inspeção interna prevista pela NR-13 torna necessária a parada do equipamento. Desta forma, é necessária a programação de paradas para manutenção e inspeção desses equipamentos, que geralmente ocorrem em tempo determinado e visando sempre as metas da produção, mas, principalmente a segurança e integridade das pessoas e instalações. Os permutadores são assim inspecionados internamente, com avaliação de suas partes, e em particular o feixe de tubos, onde são utilizados técnicas de ensaios intrusivos, técnicas essas que serão descritas posteriormente. Quando em operação fora do período de parada do processo para inspeções internas, os

equipamentos são inspecionados externamente, e para um permutador de calor, não existe a possibilidade de inspeção do feixe de tubos.

2.1.4 Deterioração em Permutadores

A deterioração é causada basicamente pelos mecanismos de danos que são distintos, e cada tipo ou grupo de danos pode ser avaliado por diferentes técnicas de inspeção. A avaliação das deteriorações é realizada em processos de inspeção desses equipamentos, que podem ou não ser executado em serviço visando evitar as falhas dos equipamentos, as quais poderão prejudicar todo o processo de produção da empresa.

Diz-se que uma falha no equipamento acontece quando existe o fim da funcionalidade, sendo ela anunciada ou não, acarretando um desempenho reduzido do sistema. Quando uma falha ocorre e não existe uma constatação do ocorrido, diz-se que é uma falha oculta. Falhas ocultas causam danos e levam a conseqüências graves, pois existe o aumento do risco de uma falha múltipla. As causas destas falhas podem ser a ausência de sistemas de proteção sem indicação para a falha ou uma função protegida que tende a falhar devido a um sistema de proteção indisponível. Usualmente são utilizados sistemas para evitar ou amenizar as falhas, dentre eles, pode-se citar: alerta de operadores, desarme de equipamentos, alívio de condições anormais, equipamentos reservas e sistemas de prevenção.

As conseqüências de uma falha podem ser brandas ou graves. Podem-se citar algumas das conseqüências derivadas de falhas: qualidade do produto, não atendimento ao cliente, segurança e meio-ambiente e operação afetada. Como forma de reduzir ou extinguir as falhas que dão origem a essas conseqüências, é comum realizar-se um plano de ação para mitigação das falhas, onde os mecanismos que deram origem são atacados para evitar falhas futuras. Mecanismos de deterioração como furos, trincas ou rompimentos são encontrados em permutadores de calor e ocorrem devido aos diversos meios agressivos em refinarias e plataformas de produção de petróleo. Os principais mecanismos de deterioração são (API, 2003): fragilização pelo revenido, erosão, fadiga, cavitação, corrosão microbiológica, perda de espessura uniforme ou em pontos localizados, corrosão puntiforme, corrosão ou fragilização cáustica, corrosão seletiva, corrosão galvânica, corrosão sob-tensão, fragilização por hidrogênio, corrosão por ácido clorídrico, corrosão por ácidos politiônicos, entre outros.

Algumas falhas são provocadas por motivos ou situações provindas da montagem, material incorreto ou até erro operacional. Esses motivos, se permanecerem por longo tempo, podem levar a um aumento na deterioração do equipamento. Uma das principais causas para uma parada do permutador é o vazamento, causado por algum processo de deterioração. O vazamento irá fazer com que os fluidos se misturem, havendo uma contaminação que irá prejudicar a troca térmica e todo o processo que vem em seguida do permutador.

A Figura 2.4 descreve os principais danos encontrados em feixes de permutadores de calor, que são: perda de espessura uniforme e unilateral, danos por vibração, erosão por condensação e por fluxo passante. Além desses danos são encontrados no feixe de tubos, concentrações de detritos e óxidos, que se depositam formando crostas. Esses processos serão vistos posteriormente com mais detalhes. Neste caso, a incrustação irá causar uma redução no fluxo dos fluidos, o que acarreta perda de carga excessiva e troca térmica ineficiente e, conseqüentemente, será necessária a parada do equipamento para realização de limpeza.

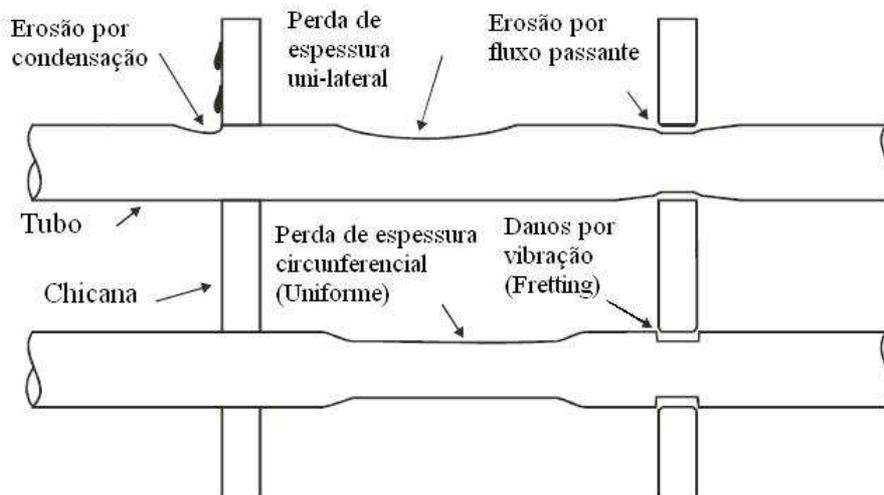


Figura 2.4 Representação dos principais danos ocorridos em feixes de permutadores de calor (Adaptado de SHULL 2002).

Processos de deterioração

Os processos de deterioração na maioria dos casos iniciam e crescem sem serem vistos, e neste caso a prática da inspeção auxilia em sua prevenção e controle. Os serviços de inspeção tentam estimar o período de tempo em que a corrosão irá causar

uma falha catastrófica com o auxílio de medições de perda de espessura em intervalos especificados, marcando locais específicos para serem coletados os dados medidos. Definitivamente, não há garantia de que nos pontos ou áreas inspecionadas está ocorrendo corrosão e irá causar problemas futuros ou se há áreas com corrosão ainda não detectadas. Para que esses problemas não ocorram, é necessário o uso de ferramentas para monitoração da corrosão, com sensores na área ou também ensaios não destrutivos (LIGHT, 2008).

A maioria dos problemas encontrados nos sistemas de permutadores está relacionada com a corrosão, incrustação e depósito, e sempre entre eles existe uma interligação. Durante o processo de corrosão, existe o acúmulo de produto de corrosão que se deposita iniciando um processo de depósito ou incrustação. O processo de corrosão por aeração diferencial pode ser iniciado pela deposição de óxidos que formam a incrustação. Esses são alguns dos casos de interligação entre os processos de corrosão, incrustação e depósito, que serão descritos a seguir.

Incrustação

Incrustação pode ser definida como um crescimento cristalino de uma camada aderente de sais insolúveis ou óxidos. Conhecido também como crosta, apresenta-se em forma de carbonatos, silicatos de cálcio ou magnésio, também podem ser encontrados fosfatos de cálcio ou zinco. Sua formação é dependente de vários fatores, tais como pressão, temperatura, pH, qualidade da água e concentração de sais e óxidos insolúveis. Devido a essa variação de elementos das incrustações, o uso de inibidores deve ser cauteloso e com controle adequado.

O mecanismo de incrustação depende de alguns fatores, que acontecem de forma encadeada. O processo é iniciado com a cristalização a partir de supersaturação da solução, onde o sal apresenta sua solubilidade excedida na água, devido a evaporação e mudanças no pH, pressão e temperatura. Com isso, tem-se início a nucleação, que pode ser homogênea ou heterogênea. A nucleação homogênea ocorre de forma espontânea após a supersaturação na água, enquanto a nucleação heterogênea tem início a partir de alguma partícula precipitada ou suspensa, ou até mesmo um produto de corrosão (FERRAZ, 2007 e SOUZA, 2007). A Figura 2.5 mostra em detalhe incrustações em

tubos de permutadores que foram retirados do feixe e seccionados. Além de prejudicar, e até mesmo impedir o fluxo do fluido, o produto incrustado favorece a corrosão que ocorre sob depósito.

Corrosão

Corrosão é o processo de deterioração de um material devido a reações com sua vizinhança (YANG, 2008). Todo material está sujeito a algum tipo de corrosão, seja metal, cerâmica, polímero e até mesmo nosso corpo. Para o metal, o melhor exemplo de corrosão é devido à exposição à água ou umidade, acarretando em corrosão eletroquímica, onde o produto de corrosão será um óxido, ocasionando uma perda de material.



Figura 2.5 Incrustação no interior de tubos de permutador (LOTH, 2009)

Alguns tipos de corrosão encontrados em permutadores de calor do tipo casco e tubos são:

- Corrosão alveolar

A Figura 2.6 mostra o interior de um permutador de calor de aço carbono com vários alvéolos de corrosão, caracterizando uma corrosão alveolar.



Figura 2.6 Fotografia do casco de um permutador de calor com corrosão alveolar generalizada (LOTH, 2009)

- Corrosão sob depósito

Os tubos recortados mostrados na Figura 2.7 são equivalentes aos da Figura 2.5 sem o produto de incrustação. Percebe-se que o material foi corroído, caracterizando uma corrosão sob depósito.



Figura 2.7 Fotografia do tubo da Figura 2.5 após limpeza. Superfície deteriorada por corrosão sob depósito (incrustação) (LOTH, 2009)

- Corrosão por pite

A mostra claramente um pite localizado em um tubo de feixe de permutador, percebe-se o tamanho e profundidade quando comparado com a caneta ao lado.



Figura 2.8 Corrosão por pite em tubo de permutador de calor (LOTH, 2009)

Depósito

O processo de depósito é causado pela sedimentação dos sólidos que estão em suspensão, podendo ocorrer associação com incrustação. Geralmente, os sólidos que se depositam podem ser partículas de argila, compostos de ferro, produtos de corrosão, matéria orgânica. Geralmente, nos sistemas de refrigeração com circulação de água, é encontrado depósito oriundo de microorganismos. As condições favoráveis como temperatura, teor de oxigênio e pH da água influenciam na proliferação de colônias de microorganismos, causando conseqüentemente a deposição dessa matéria orgânica (SOUZA, 2007).

A Figura 2.9 mostra claramente a quantidade de material que se sedimenta e se deposita sobre o feixe de tubos de um permutador de calor, neste caso petróleo cru passando pela parte externa dos tubos.



Figura 2.9 Depósito proveniente do fluido do processo sobre os tubos do feixe de um permutador de calor (LOTH, 2009)

2.2 Técnicas de Inspeção

Os ensaios não destrutivos são ensaios realizados em materiais acabados ou semi acabados, para verificar a existência ou não de discontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade da inspeção. São utilizados na fabricação, montagem, inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente aplicados em soldas, fundidos, forjados, laminados, plásticos, entre outros, nos setores petróleo/petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico e automotivo.

Um claro entendimento sobre o problema que está ocorrendo no equipamento é o primeiro pré requisito para uma adequada seleção de uma técnica de ensaio não destrutivo (ASM, 1997). No caso de tubos de permutador de calor, é necessário conhecer todo o processo que envolve o permutador, como fluidos que estão percorrendo, temperaturas de entrada e saída, corrosividade, qualidade e pH da água (SOUZA, 2007), tratamento químico da água de refrigeração (FERRAZ, 2007), conhecer o material que foi produzido o permutador, principalmente os tubos, que serão

o alvo principal da inspeção, entre outros. Conhecendo esses parâmetros, ou alguns deles, faz-se necessário conhecer as técnicas de inspeção que poderão ser aplicadas, para então realizar a escolha de uma ou mais técnicas. Atualmente no mundo industrial, as empresas buscam o lucro e a satisfação do cliente ao menor custo, desta forma o custo operacional para execução do ensaio não destrutivo é importante.

Existe um grande número de métodos de ensaios não destrutivos que podem ser usados para o monitoramento e inspeção de permutadores de calor. Entre essas técnicas, podem-se citar algumas consideradas não convencionais como as de correntes parasitas, métodos ultra-sônicos e ondas guiadas. Nesse tópico serão abrangidas essas técnicas aplicadas na inspeção de permutadores de calor, incluindo aplicações e limitações das mesmas. Serão descritas a seguir as principais técnicas de ensaio utilizadas na inspeção de tubos de permutadores.

IRIS

A técnica IRIS (*Internal Rotary Inspection System*) foi desenvolvida pela necessidade de realizar inspeção em tubos de permutadores de calor em refinarias e foi introduzida nos Estados Unidos e na Europa em 1979, enquanto no Brasil essa tecnologia chegou em 1992 (MADUREIRA et al, 2009). Essa técnica utiliza o método ultra-sônico por imersão, técnica de pulso-eco. O transdutor é conectado a um comando de teste, denominado dispositivo centralizador, que é colocado no interior do tubo a ser testado. O transdutor converte o pulso elétrico em ultra-som (US). Devido ao fato da transferência do US do meio sólido para gasoso ser extremamente ineficiente, é utilizada água como meio de transmissão/acoplamento (OLIVEIRA & CARNEVAL, 1993).

Os pulsos ultra-sônicos são emitidos na direção paralela ao tubo, sendo então refletidos por um espelho a 45°, de tal forma que são direcionados radialmente à parede do tubo. Uma pequena parte é transmitida através da parede do tubo, sendo em grande parte refletida na parede externa do tubo em direção à parede interna. Novamente uma pequena parte do sinal é transmitida para a água e retorna ao transdutor. A medida da espessura do tubo é dada pelo intervalo de tempo entre a primeira reflexão da parede

interna e a primeira reflexão da parede externa do tubo (OLIVEIRA & CARNEVAL, 1993 e MADUREIRA et. al., 2004).

A água, utilizada como acoplante no ensaio IRIS, é responsável também pela movimentação da turbina, que pode chegar a uma velocidade de 1800 rpm. A inspeção é normalmente utilizada com a inserção do cabeçote e movimentação manual a uma velocidade aproximada de 2,5 mm/min. Já existem dispositivos de movimentação automática, possibilitando maior precisão e agilidade na inspeção (MADUREIRA, 2004). Na Figura 2.10, são mostrados alguns cabeçotes utilizados na técnica IRIS, com tipos de centralizadores diferentes para diferentes diâmetros de tubo.



Figura 2.10 Cabeçotes utilizados na técnica IRIS, com diferentes centralizadores para diferentes diâmetros de tubo (BIRCHALL, 2007).

A técnica IRIS pode ser utilizada em materiais ferromagnéticos e diamagnéticos, possuindo uma grande precisão na medição de espessura. A sonda utilizada na técnica IRIS, representada na Figura 2.11, é composta por (OLIVEIRA & CARNEVAL, 1993):

- transdutor (cristal piezelétrico), que servirá como emissor e receptor das ondas ultra-sônicas;
- espelho posicionado a 45° em relação à superfície emissora do cristal, de tal forma que os pulsos ultra-sônicos sejam refletidos e incidam perpendicularmente na superfície interna do tubo;

- turbina, que promoverá a rotação do espelho;
- dispositivo centralizador, que evitará choques dos demais componentes com a parede do tubo e permitirá que a distância do transdutor ao tubo permaneça a mesma por toda circunferência, facilitando a interpretação dos resultados;
- conduíte, que permitirá a movimentação da sonda e proteção dos cabos de condução de sinal.

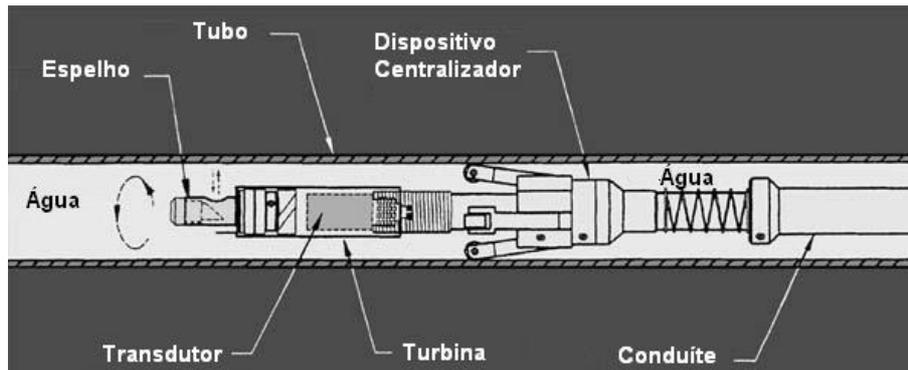


Figura 2.11 Representação do cabeçote utilizado na técnica IRIS (Adaptado de MKC, 2009).

Uma das dificuldades apresentadas no ensaio IRIS é a necessidade de uma rigorosa limpeza interna do tubo, pois a confiabilidade do ensaio está diretamente associada ao acoplamento do transdutor à superfície (SABINO, 2008). Um problema enfrentado nas plataformas de exploração de petróleo *off shore* é o procedimento de limpeza dos permutadores de calor para realização de inspeção com IRIS, pois se exige um grande deslocamento de água tratada para alto mar, tanto para levar a água até a plataforma como para realizar seu descarte, uma vez que não é permitido por leis ambientais o descarte direto em água do mar. Outra limitação da técnica IRIS é a espessura mínima da parede do tubo para inspeção, que pode variar com o material, rugosidade da superfície e frequência do transdutor usado. Geralmente para inspeção de tubos de aço carbono a espessura deve ser superior a 0,6 mm (0,025 in.), considerando o tubo liso, sem rugosidade superficial.

Ondas Guiadas

A técnica de ondas guiadas (*guided waves* – GW) na inspeção de permutadores tipo casco e tubo tem sido realizada em indústrias do setor de petróleo e derivados e, com a alta pressão sobre a produtividade e preservação do meio ambiente, é necessário cada vez mais técnicas de inspeção de baixo custo e confiabilidade. Ondas guiadas têm recebido muito atenção entre as técnicas não destrutivas de ensaio, devido principalmente a sua capacidade de propagação a longas distâncias sem uma atenuação substancial (SIQUEIRA et al, 2004).

Um guia de onda pode ser definido como uma estrutura geométrica capaz de propagar uma energia eletromagnética em uma direção preferencial no espaço e com uma frequência determinada. Estas estruturas são, em geral, cilindros metálicos ocos com seção transversal geralmente constante e com dielétrico interno homogêneo (normalmente ar ou um gás inerte) (KUNDU, 2004). Uma onda elástica que se propaga através deste guia de onda é chamada de onda guiada.

Na inspeção de permutadores do tipo casco e tubo, o cabeçote é inserido no tubo, Figura 2.12, até o primeiro metro a partir do espelho, onde permanece até o final do teste. O cabeçote é pneumáticamente pressionado contra a parede interna do tubo e não é necessário fluido acoplante para a transferência da energia ultra-sônica para o tubo (VOGT et al, 2006).

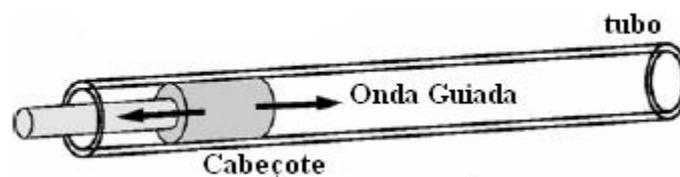


Figura 2.12 Esquema do cabeçote inserido no tubo para inspeção (Adaptado de VOGT, 2006).

Os modos de propagação das GW são dependentes de certos fatores, tais como: frequência, largura de banda, projeto do transdutor, ângulo de incidência e carregamento do sistema. (SIQUEIRA et al, 2004). Essas ondas percorrem todo o tubo e caso haja algum defeito ou componente, como chicanas, essas ondas são defletidas e captadas pelo cabeçote.

Em comparação aos outros métodos não destrutivos de inspeção utilizados em permutadores, o uso da técnica de ondas guiadas apresenta algumas vantagens. Segundo HENRIQUES et al (2007), pode-se garantir que 100% do tubo seja inspecionado. Além de proporcionar uma rápida e completa varredura de todo o tubo, é possível uma análise do feixe em menor tempo. A idéia principal do uso de ondas guiadas é a possibilidade de uma inspeção antes de ser realizada uma limpeza extensiva, que é requerida para outras técnicas. Em algumas ocasiões, as GW podem ser a única ferramenta de inspeção disponível quando a geometria do tubo não favorece o uso de outras técnicas (VOGT et al, 2006) , como por exemplo, para tubos aletados. Outra vantagem é o fato de poder ser utilizado em diferentes tipos de materiais, ferromagnéticos ou não, sendo também muito tolerante em relação à geometria do tubo.

O uso de ondas guiadas em algumas configurações de tubos de permutadores de calor deve ser criterioso. Um exemplo são os tubos de permutadores em forma de U, Figura 2.13. Se o tubo estiver em boa condição, é possível realizar um único teste para varrer as duas pernas. Isso se deve ao fato que as ondas emitidas podem atravessar a curva. No entanto, quando o raio da curva é muito pequeno, as reflexões obtidas podem mascarar defeitos na curva.

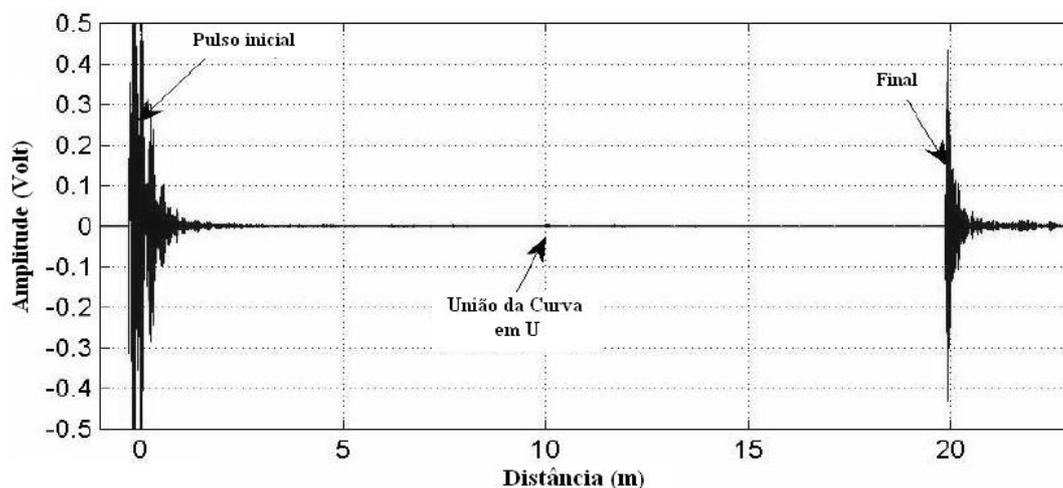


Figura 2.13 Gráfico demonstrando inspeção de tubo de permutador em forma de U (Adaptado de KWUN et. al. 2005).

Pode-se encontrar permutadores de calor do tipo casco e tubos com configurações complicadas e um grande número de chicanas, que pode interferir nos

resultados encontrados. Quando as chicanas não fazem contato com o tubo, não haverá influência nas ondas guiadas, no entanto, caso essas tenham contato, haverá deflexões situadas nas posições das chicanas. Isso pode ser bastante prejudicial à inspeção, pois pode ocorrer uma deflexão quase total da onda ou então muito tênue, o que pode mascarar os defeitos existentes (VOGT et al 2006).

No trabalho de HENRIQUES et al (2007), foi utilizado para a avaliação de tubos de pequenos diâmetros encontrados em permutadores de calor, um sistema que faz uso da tecnologia ultra-sônica por ondas guiadas para avaliação não destrutiva. Nesse trabalho ficou conclusivo que é possível detectar defeitos localizados ao longo dos tubos e fora das chicanas, sendo possível também posicionar com confiabilidade os defeitos existentes, no caso em particular, por vibração mecânica. Um problema encontrado durante a realização dos testes foi avaliar os resultados em permutadores com várias chicanas, devido a altas reflexões obtidas.

De uma forma geral, fica evidente que a técnica de inspeção por ondas guiadas para uso em tubos de permutadores de calor torna a inspeção mais rápida sem perder a confiabilidade nos resultados. Após a identificação dos tubos que estão defeituosos, é possível realizar uma seleção, para que sejam devidamente limpos para a realização de outra técnica de inspeção que forneça dados mais detalhados do problema, objetivando assim uma inspeção rápida e eficaz.

2.3 Correntes Parasitas

As correntes parasitas têm sua origem na descoberta da indução eletromagnética de Faraday. Anos depois, o cientista Hughes descobriu que quando uma bobina eletrizada entra em contato com metais de diferente condutividade e permeabilidade, tem suas propriedades alteradas (NDT, 2009). Mas essa propriedade só foi posta em prática após a Segunda Guerra Mundial com trabalhos mais especializados posteriormente realizados entre os anos 1950 e 1960. Essa técnica é largamente utilizada em indústrias automotiva e aeronáutica, e é também extensivamente utilizada no controle de processo industrial. As propriedades diretamente analisadas pelas correntes parasitas são a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética. É seguindo esse princípio, que detectores de metais sinalizam a presença de metal

enterrado, sem necessidade de perfuração (SHULL, 2002). As correntes parasitas são usadas na identificação ou diferenciação de uma variedade de condições físicas, estruturais e metalúrgicas em metais condutores, ferromagnéticos ou não. São também utilizadas para: identificar condutividade elétrica, permeabilidade magnética, condição de tratamento térmico, dureza, detecção de juntas, trincas, vazios e inclusões, medida de espessura de uma camada não condutora ou metal não magnético sobre um metal condutor, seleção e detecção de diferenças composicionais entre metais dissimilares.

Quando uma bobina é alimentada por uma corrente elétrica alternada, é gerado um campo magnético que induz a peça ensaiada por correntes elétricas, também chamadas de correntes parasitas. A Figura 2.14 mostra uma bobina carregada induzindo correntes parasitas sobre um material a ser examinado. Assim, o ensaio por Correntes Parasitas (*Eddy Current*) baseia-se na Lei de Indução de Faraday e toda variação no fluxo das correntes parasitas geradas na peça ensaiada resultará em variações na impedância da bobina (COMPOENDE, 2009).

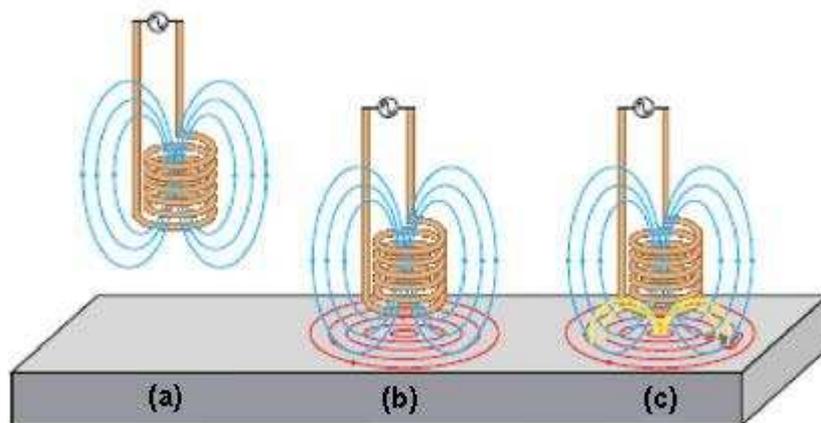


Figura 2.14 (a) A corrente alternada circula a bobina com uma frequência escolhida gerando um campo ao redor da bobina; (b) quando a bobina posta próxima a um condutor elétrico, correntes parasitas são induzidas no material; (c) caso uma descontinuidade exista no material condutor, esta irá perturbar as correntes parasitas e a união magnética com a bobina será alterada e um sinal de defeito será lido pela medida de variação de impedância da bobina (OLYMPUS CORPORATION, 2009).

Correntes parasitas também podem ser usadas para medidas de espessuras, isso para materiais finos, tais como tubo de permutadores de calor. Desta forma, é possível

realizar avaliação da perda de espessura por corrosão e outros tipos de danos. Há formas de medir até mesmo espessuras de pinturas e outros tipos de revestimentos (SHULL, 2002).

2.3.1 Realização do Ensaio

O ensaio procede com a inserção da sonda no tubo que é balanceada no próprio material. Logo depois a sonda é puxada para realização da varredura por todo o tubo, onde a presença de possíveis discontinuidades existentes na peça, que venham a interferir no fluxo das correntes parasitas, serão detectadas através das variações ocorridas na impedância da bobina de ensaio (MARTINS, 2003a). A Figura 2.15 ilustra as bobinas dentro do tubo por meio de um cabeçote. Através de tratamento eletrônico, é possível avaliar a profundidade da discontinuidade, podendo ser estimado o tamanho das discontinuidades detectadas, possibilitando que o inspetor detecte e classifique essa discontinuidade, sendo ela interna ou externa à superfície.

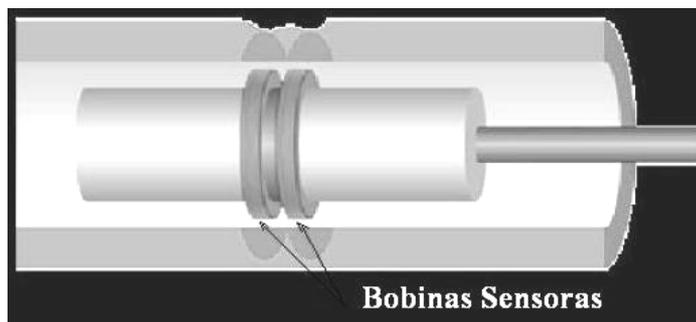


Figura 2.15 Esquema do ensaio por correntes parasitas (Adaptado de MARTINS, 2003a).

Para a realização do ensaio por correntes parasitas é necessária uma calibração da sonda, utilizando-se um tubo padrão do mesmo material, composição química e tratamento térmico e de espessura e diâmetro iguais às daquelas dos tubos a serem inspecionados (PETROBRAS, 2002). A calibração é importante, pois os dados obtidos durante esse procedimento serão utilizados como referência para a inspeção a ser realizada.

Para a realização do ensaio, é necessário observar algumas condições a fim de assegurar bons resultados de inspeção, condições existentes antes, durante e após a execução da inspeção. Antecedendo a execução da inspeção, é necessária a avaliação das características do equipamento, com a leitura de relatórios anteriores, condições atuais do equipamento e local designado para realizar a inspeção. A limpeza dos tubos é de extrema importância, pois uma limpeza incompleta poderá prejudicar a inserção da sonda de inspeção. A limpeza é normalmente realizada com hidrojateamento, com suas devidas condições de segurança, seguido pela secagem dos tubos. Durante a execução, uma amostragem inicial é realizada, para assim verificar ajustes finais de calibração. Após a realização do serviço de inspeção, é entregue ao solicitante um relatório contendo os procedimentos executados e indicações encontradas na inspeção (MOREIRA et al, 2007).

2.3.2 Vantagens e limitações

A inspeção por correntes parasitas possui grande versatilidade e rapidez, possuindo também várias aplicações, que seguem abaixo:

- detecção de trincas, deformações, inclusões, variações de espessura, corrosão, entre outros;
- medição de espessura;
- detecção de falta de homogeneidade em ligas, superaquecimento local, erros de tratamento térmico;

O ensaio por correntes parasitas apresenta ainda mais qualidades pois não é necessário o contato para realização do teste, o que possibilita uma inspeção automatizada, reduzindo o tempo de inspeção. Correntes parasitas é um dos poucos métodos usados para aplicações em altas temperaturas, é portátil e abrange um grande faixa de parâmetros geométrico e de material.

A técnica de correntes parasitas também possui desvantagens. A principal limitação é que o material a ser ensaiado deve ser um condutor, além disso materiais ferromagnéticos apresentam maior dificuldade na detecção e avaliação de discontinuidades devido à variação de permeabilidade magnética. Apesar de possuir a vantagem de inspeção em peças de várias geometrias e materiais, pode ser criada uma

dificuldade significativa durante a interpretação dos resultados. Durante a inspeção, pode ocorrer *lift-off*, que será explicado posteriormente, e também existe a dificuldade de filtrar interferência de sinais, dependendo, na maioria das vezes, da experiência do operador ou de algoritmos sofisticados. No caso do cobre e de ligas de alumínio, por exemplo, a alta condutividade desses materiais pode prejudicar a medição das descontinuidades, pois a profundidade de penetração das correntes parasitas pode ser reduzida à fração de milímetro (COMPENDE, 2009 e SHULL, 2002). Problemas podem ser encontrados com a limpeza do tubo que será inspecionado, pois o mesmo deverá permitir a passagem da sonda. Geralmente, para a limpeza dos tubos de permutadores, é utilizado o hidrojateamento, e nesse caso é necessária a secagem dos tubos, retirando-se toda a água através de secadores, que significa mais uma etapa na inspeção.

2.3.3 Tipos de sondas utilizadas na inspeção

Na técnica de correntes parasitas são utilizados diversos tipos de sondas, com geometrias e características construtivas que variam de acordo com o objetivo de inspeção. Na inspeção de tubos de permutadores de calor, é comum o uso de sondas internas tipo *bobbin coil*, em arranjo absoluto ou diferencial. Elas são ineficazes na caracterização de alguns tipos de descontinuidades localizadas circunferencialmente. Na inspeção de tubos com curva, são utilizadas sondas com carcaça ou chassis flexível.

Quando não é possível a detecção de descontinuidades, sondas especiais são utilizadas, Figura 2.16, segue então a descrição de algumas delas (COMPOENDE, 2009):

- Sonda *Pancake* Multicanais, possui 4 a 8 bobinas planas distribuídas ao longo da superfície externa da sonda,
- Sonda *Pancake* rotativa, motorizada com uma única bobina plana tipo *pancake* (*Motorized Rotating Pancake Coil - MRPC*). Em operação, é feita uma varredura helicoidal pela superfície interna do tubo inspecionado. O equipamento de teste deve estar sincronizado com o sistema de movimentação da sonda,

- Sonda emissor-receptor multicanais, são ideais para a detecção de trincas circunferências na região do espelho dos permutadores, conhecida como zona de expansão.



Figura 2.16 Sondas comerciais com aplicações específicas (SHULL, 2002)

2.3.4 Modos de Operação

Uma das vantagens da técnica de inspeção por correntes parasitas é o fato das sondas poderem ser projetadas para uma enorme variedade de aplicações. Apesar de existirem várias formas de sondas, podem ser encontrados quatro modos de operação. O modo de operação refere-se à maneira como a bobina ou bobinas estão instaladas e interligadas com o equipamento de ensaio. Existem quatro diferentes modos de operação, que são citados a seguir.

Modo Absoluto

É utilizada apenas uma bobina que é responsável pela geração das correntes parasitas e ao mesmo tempo para captar as mudanças no campo magnético. As sondas no modo absoluto podem ser utilizadas para medição de espessura, detecção de falhas, medição de condutividade e dentre outros (NDT, 2009).

Modo Diferencial

Sondas no modo diferencial têm duas bobinas ativas usualmente com sentidos de enrolamento opostos, apesar delas poderem ter também enrolamentos com sentidos iguais e resultados similares. Quando as duas bobinas estão sobre uma área sem defeito, não existe sinal diferencial desenvolvido entre elas, desde que ambas estejam em materiais idênticos. No entanto, quando uma bobina está sobre um defeito e a outra sobre uma área sem defeitos, um sinal diferencial é produzido. Existem desvantagens no uso de sondas no modo diferencial, onde se uma falha é maior que o espaço entre as duas bobinas, apenas a direção e suas pontas serão detectadas, devido à anulação dos sinais quando ambas as bobinas detectarem igualmente a falha (NDT, 2009).

Modo Reflexão

Sondas no modo reflexão têm duas bobinas similares a uma sonda diferencial, mas uma delas é usada para excitar a corrente parasita e a outra para detectar mudanças no material de teste. A vantagem da sonda reflexiva é que as bobinas, propulsora e receptora, podem ser separadamente utilizadas para propósitos distintos. A bobina emissora pode ser feita de forma que produza um campo de fluxo forte e uniforme nas vizinhanças da bobina receptora, enquanto que a bobina receptora pode ser muito pequena de forma que possa ser sensível a pequenos defeitos (NDT, 2009).

Modo Híbrido

Um exemplo de sonda no modo híbrido é o *split-D*, uma sonda diferencial vista lateralmente. Esta sonda tem uma bobina direcionadora que circunda duas bobinas

receptoras em forma de “D”. É operada no modo de reflexão, mas adicionalmente sua bobina receptora opera num modo diferencial. Este tipo de sonda é muito sensível a trincas superficiais. Outro exemplo de sonda híbrida é uma bobina convencional para gerar correntes parasitas no material e então usar um sensor diferente para detectar mudanças na superfície e no interior do material testado. Sondas híbridas são geralmente utilizadas em aplicações específicas (NDT, 2009).

2.3.5 Automatização do Ensaio

O uso da técnica de correntes parasitas para inspeção em tubos de feixe de permutadores torna-se cada vez mais consistente. Apesar de se conhecer suas vantagens e desvantagens, fazendo com que haja uma seleção da técnica e material a ser empregado, ainda existe uma deficiência quanto ao tempo de inspeção. Mas, atualmente, com a evolução da informática e eletrônica, tem-se possibilitado acelerar o processo de inspeção e emissão de relatórios e conseqüentemente, a tomada de decisão dos procedimentos seguintes a serem realizados no permutador. Trabalhos nessa área, como o de CARNEVAL (2002), têm priorizado o desenvolvimento de ferramentas para facilitar a atividade de inspeção de tubos de feixes de permutadores de calor.

O uso de meios automáticos para coleta de dados durante o ensaio por correntes parasitas podem tornar a inspeção bem mais rápida e confiável. Estão disponíveis instrumentos digitais ou analógicos, comumente classificados pelo tipo de monitor utilizado para apresentar os dados do teste (NDT, 2009). Na Figura 2.17 são mostrados monitores utilizados na inspeção por correntes parasitas. Algumas das vantagens do uso do ensaio automatizado podem ser citadas:

- Repetitividade;
- Minimiza mudanças no *lift-off* resultante do movimento da sonda, superfícies irregulares e má centralização do tubo causado durante fabricação,
- Precisão nas indicações.
- Melhor resolução no mapeamento.



Figura 2.17 Monitores utilizados na inspeção por correntes parasitas (NDT, 2009)

Um das vantagens do uso de correntes parasitas como escolha de ensaio não destrutivo para a realização da inspeção é que o uso da simulação computacional dos sinais está a cada dia se desenvolvendo, e com isso, a análise dos resultados está cada vez mais rápida (YUSA & MIYA, 2008). Aliados à eletrônica e informática, existem diferentes técnicas de correntes parasitas que surgiram para superar algumas das deficiências existentes na técnica convencional. Essas técnicas são para a realização do ensaio por corrente parasita, podendo-se citar correntes parasitas com saturação magnética total, correntes parasitas com saturação magnética parcial e campo remoto das correntes parasitas (MARTINS, 2003a).

2.3.6 Correntes parasitas com saturação magnética

Na inspeção de tubos de material ferromagnético por correntes parasitas convencionais existe a dificuldade de realizar uma avaliação dos defeitos presentes, isso porque os sinais desses defeitos são normalmente mascarados por sinais provindos da variação da permeabilidade. Em materiais ferromagnéticos a permeabilidade pode variar com a composição e história térmica, obtendo-se valores de permeabilidade que chegam a algumas centenas. Uma solução para resolver esse problema é realizar uma saturação magnética do material a ser inspecionado (ASM, 1997). A saturação magnética ocorre quando os domínios de magnetização estão alinhados com o campo aplicado e não ocorre alteração a partir de certo valor, mesmo aumentando o valor do campo magnético (ROLIM, 2002). Com a saturação magnética, os sinais das discontinuidades presentes passam a ter as características de sinais provindos de um material não ferromagnético, podendo-se assim detectar discontinuidades antes não detectadas sem a saturação

magnética. Mas é claro que nem todos os materiais podem ser saturados por completo, fazendo com que sua magnetização seja diferenciada para realização da inspeção por saturação magnética.

Para uma boa identificação das discontinuidades através das correntes parasitas com saturação magnética é necessário um nível alto de saturação do material, caso contrário os sinais obtidos não terão a confiabilidade necessária para distinguir entre o sinal de uma discontinuidade e o sinal de um ruído, como exemplo, o ruído causado pela variação da permeabilidade do aço carbono. Em dados bibliográficos (ASM, 1997), para se alcançar a confiabilidade ideal, é necessária uma saturação mínima de 98%. Para exemplificar a necessidade desse valor, a Figura 2.18 mostra esquematicamente a diferença entre os sinais apresentados durante uma inspeção por correntes parasitas com saturação magnética. Percebe-se que o sinal para a saturação a 89% está impróprio para realização de leitura da discontinuidade, apesar de já ser uma saturação bastante elevada.

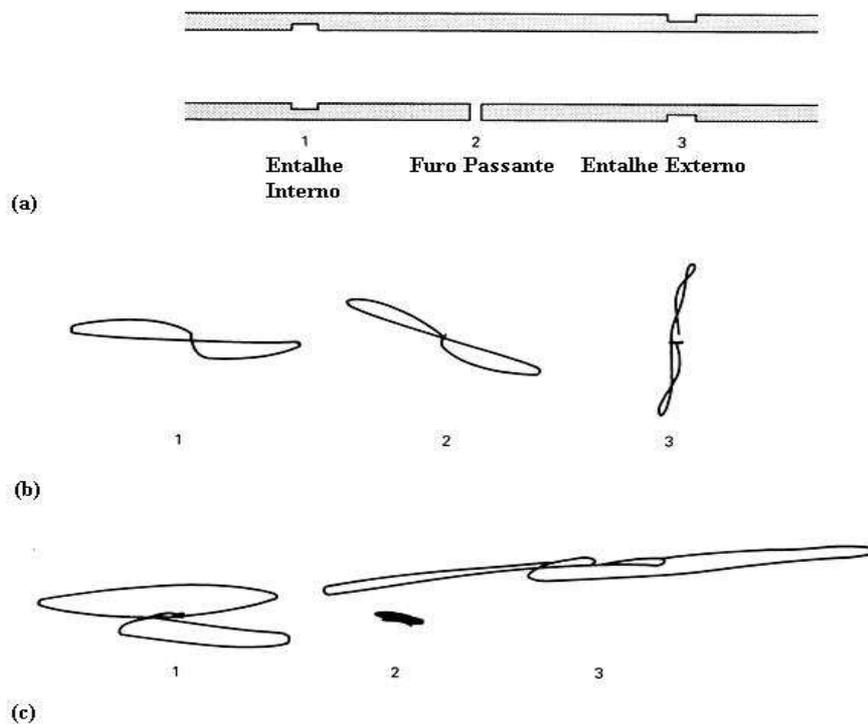


Figura 2.18 Em (a) descontinuidades comumente encontradas em tubos de permutador de calor. Em (b) sinais obtidos para cada descontinuidade de (a) utilizando-se saturação de 98%, e em (c) uma saturação de 89% (Adaptado de ASM, 1997).

O uso da técnica convencional de correntes parasitas em tubos de materiais não ferromagnéticos é recomendado devido a vários fatores, como alta confiabilidade na detecção de descontinuidade, precisão no dimensionamento de pites e detecção de trincas maiores que 50% da espessura (MARTINS & CARNEVAL, 1995), não sendo necessário o uso de outras técnicas de inspeção que se utilizam das propriedades das CP.

Correntes parasitas com saturação magnética total

Técnica usada na inspeção de materiais parcialmente magnéticos e pouco ferromagnéticos. A sonda é composta por bobinas de correntes parasitas e um imã ou eletroímã, que é responsável pela saturação com um campo magnético, promovendo a redução da permeabilidade do material, tornando-o um material com comportamento não ferromagnético, sendo assim possível a aplicação das correntes parasitas. Essa técnica é dependente da espessura e diâmetro do tubo, e da permeabilidade magnética do material. Desta forma, o dimensionamento na parede interna das descontinuidades como pites, é feito simplesmente utilizando como base a amplitude do sinal, pois a profundidade das descontinuidades não provoca alteração na fase.

Correntes Parasitas com Saturação Magnética Parcial

Esta técnica é aplicada na inspeção de tubos ferromagnéticos espessos e são utilizados aparelhos de inspeção por Correntes Parasitas convencional. Como o tubo é de parede espessa, não é totalmente saturada. Assim sendo é realizado monitoramento das variações na impedância causadas pelas alterações na permeabilidade, e isso é encarado como um limitante na detecção da variação da perda de espessura de parede. Essa baixa sensibilidade faz com que pites não sejam detectados, pois é necessária uma grande variação na permeabilidade para identificação da descontinuidade.

2.3.7 Correntes Parasitas por Campo Remoto

A técnica de inspeção de correntes parasitas por campo remoto (*Remote Field Eddy Current – RFEC*) é indicada na inspeção de materiais condutores, e também é utilizada na inspeção de tubos de permutador de calor. Como um dos problemas encontrado na inspeção de tubos de materiais ferromagnéticos por correntes parasitas convencionais, a técnica de RFEC foi aplicada inicialmente com o intuito de suplantar essa desvantagem do método convencional.

Uma de suas vantagens é sua utilização na inspeção tanto de materiais ferromagnéticos quanto de não ferromagnéticos, podendo detectar, com sensibilidade aproximadamente igual, falhas orientadas axialmente e circunferencialmente no tubo de material ferromagnético. Para materiais não ferromagnéticos, RFEC não possui tanta sensibilidade quanto a técnica de CP convencional (ASM, 1997).

A técnica de RFEC está bem estabelecida como um ensaio não destrutivo para a detecção de perda de espessura por corrosão em tubos ferromagnéticos condutores (FUKUTOMI et al 2001), sendo que muitos tentam utilizá-la para detecção de pites usando bobinas de detecção (receptoras) com arranjo diferencial, mas a sensibilidade para detecção de pites é limitada e normalmente inaceitável. A detecção de pites pode ser realizada com clareza em tubos de calibração, mas o ruído produzido pela sujeira nos tubos dos permutadores de calor mascara os sinais de pites e torna a técnica inviável para esta aplicação. É usado particularmente em permutadores de calor e tubulações de pequeno diâmetro.

O fenômeno do campo remoto é baseado na transmissão de um campo eletromagnético através do material do tubo, Figura 2.19. A bobina de excitação gera correntes parasitas a baixa frequência em uma direção circular, o campo magnético é transmitido através da espessura e caminha externamente ao diâmetro do tubo. Uma bobina de recepção é colocada em uma região de campo remoto para detecção do campo excitado que caminhou externamente ao tubo e retorna a uma distância entre duas e quatro vezes o diâmetro do tubo (MARTINS, 2003a).

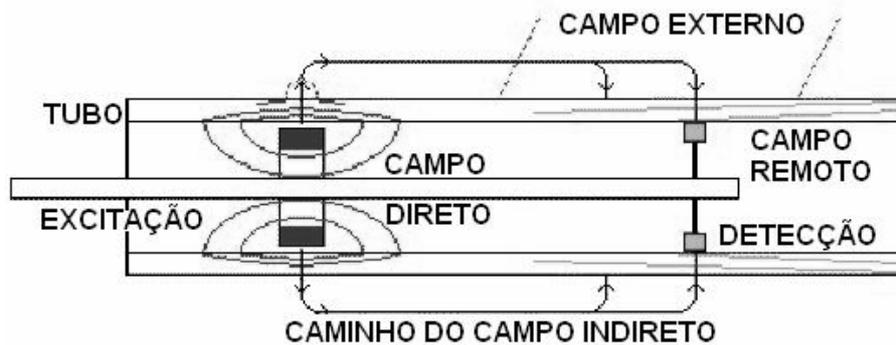


Figura 2.19 Esquema de inspeção por Campo Remoto das Correntes Parasitas (MARTINS, 2003a)

A sonda para inspeção por RFEC consiste de um gerador de sinais e um ou mais elementos sensores. Para que a sonda funcione são necessárias condições: a distância entre o gerador de sinais e o sensor deve ser aproximadamente duas ou três vezes o diâmetro do tubo, e deve ser usada a frequência correta que está de acordo com a espessura do tubo. Essa variação na espessura pode provocar alteração nos resultados apresentados, atrapalhando a análise dos sinais de detecção de trincas, medidas de perda de espessura e pites.

O método de Correntes Parasitas por Campo Remoto apresenta baixa sensibilidade de detecção para pequenas discontinuidades como pites de corrosão e trincas, sendo uma técnica limitada quando é necessária a detecção de trincas em tubos de aço carbono (CARNEVAL, 2001). Desta forma, a seleção do ensaio de correntes parasitas com saturação magnética é quase obrigatória. Sabendo-se que materiais ferromagnéticos quando saturados magneticamente possuem comportamento magnético semelhante aos materiais não ferromagnéticos, pode-se então utilizar-se das propriedades das correntes parasitas para a realização da inspeção e detecção das trincas.

Limitações da técnica de RFEC

A técnica de correntes parasitas por campo remoto apresenta algumas limitações, dentre elas a frequência utilizada na operação, efeito da permeabilidade magnética, dificuldade em distinguir defeitos e o efeito causado pela presença de condutores

externos ao tubo, como as chicanas. A frequência utilizada na operação é um limitante na velocidade de inspeção, pois com uma frequência baixa necessária para a execução da inspeção, tem-se um ganho pequeno de velocidade na varredura do tubo, significando um grande atraso na inspeção de muitos tubos de um permutador de calor. Esse problema é aumentado para tubos com espessuras maiores. Apesar de sua utilização em materiais ferromagnéticos, RFEC apresenta alguns problemas na inspeção desses materiais. A variação da permeabilidade exerce influência nos valores de magnitude e fase do sinal do sensor, fazendo com que a sensibilidade de localização de descontinuidades nesses materiais seja reduzida. Uma das soluções é o uso de um campo magnético maior, na tentativa de saturação do material. Como o campo magnético precisa atravessar o material e caminhar externamente ao tubo, sofre interferência de qualquer material externo próximo a este. Essa propriedade faz com que as áreas próximas a chicanas sejam mais complicadas de inspecionar, e assim descontinuidades presentes no tubo não sejam detectadas (ASM, 1997).

2.3.8 Variáveis operacionais

Condutividade Elétrica

Condutividade elétrica pode ser definida como a indicativa de facilidade com a qual um material é capaz de conduzir uma corrente elétrica, sendo seu inverso denominado de resistividade. Desta forma, todos os materiais possuem características resistivas à eletricidade, e é seguindo esse conceito que é possível classificar os materiais sólidos, como condutores, semicondutores e isolantes.

A condutividade elétrica do material influenciará diretamente na profundidade de penetração das correntes parasitas, reduzindo a sensibilidade para detecção das descontinuidades que se estendam para o interior da peça. Tem-se na Equação 2.1 a relação entre a condutividade elétrica e a profundidade de penetração(ASM, 1997),

$$S = 1980\sqrt{\rho/\mu f} \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde S é a profundidade padrão da penetração da corrente parasita (em polegadas), ρ é a resistividade do material (em ohm por centímetro), μ é a permeabilidade magnética e f a

frequência de operação (em hertz). Como a condutibilidade é o inverso da resistividade, mostrado na Equação 2.2,

$$\sigma = 1/\rho \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde σ é a condutividade elétrica do material, tem-se que:

$$s = 1980/\sqrt{\sigma\mu f} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Assim, de acordo com a Equação 2.3, a profundidade de penetração das correntes parasitas será inversamente proporcional à condutividade elétrica do material.

Permeabilidade Magnética

Permeabilidade magnética pode ser definida como sendo o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético. A permeabilidade não é constante para o material, pois depende da intensidade do campo magnético atuando no mesmo. Assim, pode-se afirmar que a permeabilidade magnética de um material é então a razão entre a intensidade do campo magnético e a quantidade de fluxo magnético do material.

Como as correntes parasitas são induzidas por um campo magnético variante, sua resposta será influenciada pela permeabilidade magnética do material sendo inspecionado. Essa característica é um importante fator na escolha das condições ou método de inspeção, diferenciando entre materiais magnéticos e não magnéticos (ASM, 1997). De acordo com a Equação 2.3, pode-se afirmar que a penetração das correntes parasitas será diretamente proporcional à permeabilidade magnética do material. No caso dos materiais não magnéticos a permeabilidade magnética μ é igual a 1, enquanto em materiais ferromagnéticos esse valor varia com a intensidade do campo magnético, onde quanto maior esse valor, maior será a permeabilidade magnética do material e menor será a penetração das correntes parasitas. Um exemplo é o aço que pode chegar a valores de μ próximos de 6000, caso seja submetido a um campo magnético forte.

No entanto, a elevação da permeabilidade magnética do material pode ser um fator vantajoso na inspeção de materiais ferromagnéticos, já que μ chegará a um valor onde ficará estável, mesmo aumentando o campo magnético exercido. A esse fenômeno

é dado o nome de saturação magnética. Como o material está saturado, a variação da permeabilidade magnética do material ferromagnético ficará muito reduzida, permitindo a realização da inspeção por correntes parasitas com saturação magnética como descrito anteriormente.

Lift-off

Quando uma bobina da sonda de inspeção em operação é energizada no ar, esta irá indicar uma pequena alteração, que será mais intensa ao se aproximar a sonda de um material condutor. A aproximação e o afastamento desse condutor irão alterar a indicação no momento da inspeção, isto é, a distância entre a bobina e o condutor irá interferir na indicação do aparelho, sendo este fenômeno chamado de *lift-off* (ASM, 1997). Quando existe uma variação de espaçamento entre o tubo e a sonda, o efeito *lift-off* será mais intenso, o que poderá acarretar em certa dificuldade na leitura dos resultados, com possibilidade das indicações de descontinuidades do tubo serem mascaradas e, por conseguinte, não identificadas. Uma limpeza bem realizada nos tubos poderá minimizar esse tipo de problema, como também uma sonda com dimensão mais próxima ao diâmetro interno do tubo.

Efeito Aresta

As correntes parasitas possuem a incapacidade de fluírem além de arestas, fazendo com que a leitura de áreas próximas a arestas seja prejudicada apresentando resultados distorcidos. Ao contrário do efeito *lift-off*, pouco pode ser feito com esse problema, a não ser que seja feita uma inspeção utilizando-se uma sonda de menor tamanho de bobina. Esse problema pode ser verificado quando na inspeção, ao aproximar-se das extremidades iniciais e finais do tubo, sendo agravado com a presença do espelho do permutador de calor.

Efeito pelicular

A resposta das correntes parasitas irá variar de acordo com a espessura e geometria da peça. No caso dos tubos de permutador, que normalmente são uniformes em relação ao seu comprimento, apenas a espessura do tubo provocará variação no sinal, isto é, as correntes parasitas não são uniformemente distribuídas através da espessura, uma vez que são mais densas próximas à sonda e reduzindo essa densidade com a espessura. Pode-se dizer então que as correntes parasitas decrescem em magnitude com a profundidade e, aliadas a essa característica, têm-se as correntes parasitas fluindo paralelamente ao plano da bobina que as gerou, originando assim, um comportamento característico chamado de efeito peculiar (MARTINS & CARNEVAL, 1995). Assim, descontinuidades externas ao tubo serão mais difíceis de detectar, tornando-se ainda mais difíceis com aqueles tubos de espessuras maiores.

A profundidade de penetração das correntes parasitas depende da condutividade elétrica, da permeabilidade magnética do material e da frequência utilizada na inspeção. Sabendo-se que a penetração decresce com o acréscimo da condutividade elétrica, permeabilidade ou frequência de inspeção (ASM, 1997), pode-se predeterminar em que materiais utilizados na fabricação do tubo a técnica de inspeção por correntes parasitas irá obter melhores resultados.

2.3.9 Escolha da frequência de operação

Basicamente, a frequência escolhida para realização do ensaio de correntes parasitas está relacionada com o grau de sensibilidade desejado, o tipo de material e espessura do tubo, o grau de penetração da corrente parasita e também do propósito da inspeção. Em geral, utilizam-se frequências que vai de 200 Hz até 6 MHz (ASM, 1997).

O material a ser ensaiado também exerce influência na escolha da frequência de ensaio. Como por exemplo, dois tubos de mesma espessura, um de aço inox e outro de cobre. As frequências utilizadas para se atingir a mesma profundidade serão diferentes. A Figura 2.20 apresenta a variação da frequência de inspeção com a profundidade de penetração da corrente parasita. Observa-se a diferença entre materiais e, seguindo o exemplo citado anteriormente, atribuindo-se um valor de 1 MHz de frequência para o

aço inox, atinge-se décimos de polegada, enquanto para o cobre, tem-se penetração na casa de milésimos de polegada.

A redução da frequência utilizada no ensaio torna possível o acréscimo da penetração da corrente parasita, no entanto, perde-se em resolução do ensaio, perdendo também a capacidade de leitura de pequenos defeitos. O que determina essa sensibilidade de ensaio é a intenção do ensaio, onde é necessário realizar-se uma análise para se saber o tipo de problema que se pretende identificar. Caso escolha-se fazer uma varredura da superfície interna de um tubo, requerendo apenas averiguar as condições de corrosão interna, pode-se usar frequências mais altas, podendo ser na faixa de MHz. Mas se é necessária uma inspeção de toda a espessura do tubo, faz-se necessário o uso de frequências mais baixas.

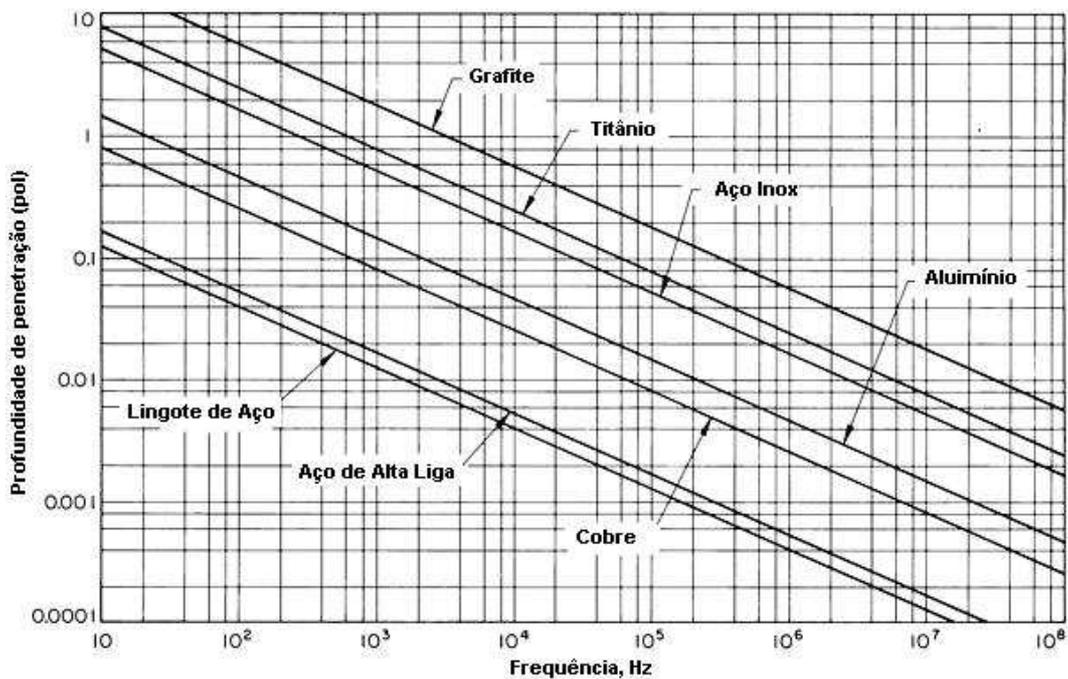


Figura 2.20 Profundidade de penetração das correntes parasitas em função da frequência de ensaio utilizada, para diferentes materiais (Adaptado de ASM 1997).

2.3.10 Análise das Correntes Parasitas em tubos de diversos materiais

De acordo com as variáveis operacionais apresentadas anteriormente, observa-se que as correntes parasitas reagem de maneira diferente para cada material, fato

comprovado que obriga a realizar alteração em algumas variáveis para a realização do ensaio. É comum encontrar-se em plantas industriais permutadores de calor com feixes de tubos de aço inoxidável austenítico, aço carbono e ligas de cobre. Na Tabela 2.2 estão descritos alguns dos materiais de tubos de permutadores de calor encontrados em plantas de processos.

Com relação ao aço inoxidável Duplex, ainda não se tem resultados satisfatórios que comprovem a aplicabilidade da técnica por correntes parasitas. Austenita e ferrita são as fases mais comuns nos aços inoxidáveis duplex e a principal característica dessa liga é que sua microestrutura apresenta genericamente as duas fases bem definidas tendo frações e volumes tais que cada uma delas não é tomada como finamente dispersa na outra (ROSSITI, 2000). Sabendo-se que ferrita e austenita possuem condutividade elétrica e permeabilidade magnética diferentes, e as correntes parasitas são sensíveis a variações nessas propriedades, é provável que esta seja a causa desses resultados não satisfatórios.

Tabela 2.2 Relação de materiais de tubos de permutador de calor com técnicas de inspeção recomendadas (MARTINS, 2003b).

Material	Característica Magnética	Técnica de Inspeção Recomendada
Aço Inoxidável Austenítico	Não Ferromagnético	Correntes Parasitas, IRIS
Ligas de Cobre		
Ligas de Titânio		
Aço Carbono	Ferromagnético	Correntes Parasitas com Saturação Magnética, IRIS
Aço Inoxidável Duplex	-	-

Toda técnica de inspeção apresenta vantagens e desvantagens na detecção de descontinuidades, a Tabela 2.3 descreve um resumo da capacidade de detecção das técnicas de inspeção descritas nesse trabalho, IRIS, ondas guiadas e correntes parasitas. A técnica de correntes parasitas foi generalizada, pois como apresentado anteriormente, existem diferentes técnicas que se utilizam das propriedades das correntes parasitas.

Tabela 2.3 Capacidade de detecção de descontinuidades de técnicas de inspeção de tubos de permutador de calor.

Descontinuidade	Capacidade de detecção da técnica de inspeção		
	Correntes Parasitas	IRIS	Ondas Guiadas
Trinca	sim	não	sim, sem diferenciação
Pite	sim	sim	sim, sem diferenciação
Corrosão uniforme	sim	sim	Sim, mudança de geometria
Próximo à chicana	sim	sim	Sim, chicana não deve estar apertada ao tubo
Curva em U	sim, com sonda adequada	não	sim

De forma geral, a técnica de ondas guiadas não se apresenta como técnica para detecção e diferenciação de descontinuidades. A técnica IRIS é muito utilizada na inspeção de tubos de permutadores, podendo ser aplicada praticamente em todos os materiais, mesmo com redução na detectabilidade em aço inoxidável. No entanto, além da dificuldade na inspeção em tubos curvados, pois a sonda não permite a curva em “U”. A técnica IRIS apresenta também dificuldade na detecção de trincas.

Para as correntes parasitas, basicamente pode-se utilizar de suas propriedades para detecção de todas as descontinuidades, tendo-se que realizar uma avaliação prévia para a escolha da técnica que se adéque ao problema em questão.

2.3.11 Detecção de descontinuidades pelas técnicas de correntes parasitas

Toda alteração no fluxo normal das correntes parasitas pode ser detectada, assim qualquer descontinuidade seria detectada durante a inspeção por correntes parasitas. Mas é óbvio que existem alguns casos em que a identificação da descontinuidade é claramente prejudicada. Como por exemplo, duas descontinuidades do mesmo tamanho, localizadas abaixo da superfície e situadas a profundidades diferentes, verifica-se a dificuldade de detecção da presente em uma maior profundidade, podendo até ser necessário o uso de um equipamento mais especializado para uma melhor descrição da

descontinuidade. Outro problema que pode ser citado é a orientação da descontinuidade dentro do tubo, quando uma descontinuidade planar está orientada perpendicularmente ao eixo do tubo pode não alterar o fluxo das correntes parasitas o bastante para ser detectada (ASM, 1997).

A escolha da técnica de inspeção a ser realizada em tubos de permutadores sofrerá influência das condições de aplicação da técnica. Correntes parasitas também possuem condições para sua aplicação. Em trabalhos realizados por MOREIRA et. al. (2007), encontra-se um resumo do conjunto de condições que são necessários no uso das correntes parasitas como técnica de inspeção em tubos de permutadores de calor.

Como os ensaios não destrutivos são técnicas de inspeção meramente comparativas, julga-se necessário o uso de um ajuste de forma que não sejam aceitas descontinuidades reprováveis, e nem rejeitadas peças em perfeitas condições (CARNEVAL, 2001). Assim, antes do ensaio, é necessário realizar a calibração da aparelhagem, sendo um tubo padrão para a calibração, fabricado com o mesmo material e dimensões dos tubos a serem inspecionados (PETROBRAS, 2002). Desta forma, é produzida uma amostra com algumas descontinuidades conhecidas e que servirão de referência para toda a inspeção. Para isso, é necessária a escolha da descontinuidade a ser reproduzida na amostra de forma fácil, com dimensões definidas e que sejam muito parecidas com as descontinuidades encontradas na forma natural (ASM, 1997).

Com o uso da técnica de inspeção por correntes parasitas, é possível a detecção de corrosão, erosão, trincas e outras descontinuidades em tubos de permutadores de calor. Na passagem da sonda sobre o início do defeito, um loop é visto na tela do aparelho. A Figura 2.21 mostra como é representado no painel do aparelho para inspeção por correntes parasitas, indicando para cada tipo de descontinuidade um sinal característico ao mesmo. Nota-se que a sonda absoluta é mais sensível a afundamentos e produtos de corrosão na parte externa do tubo.

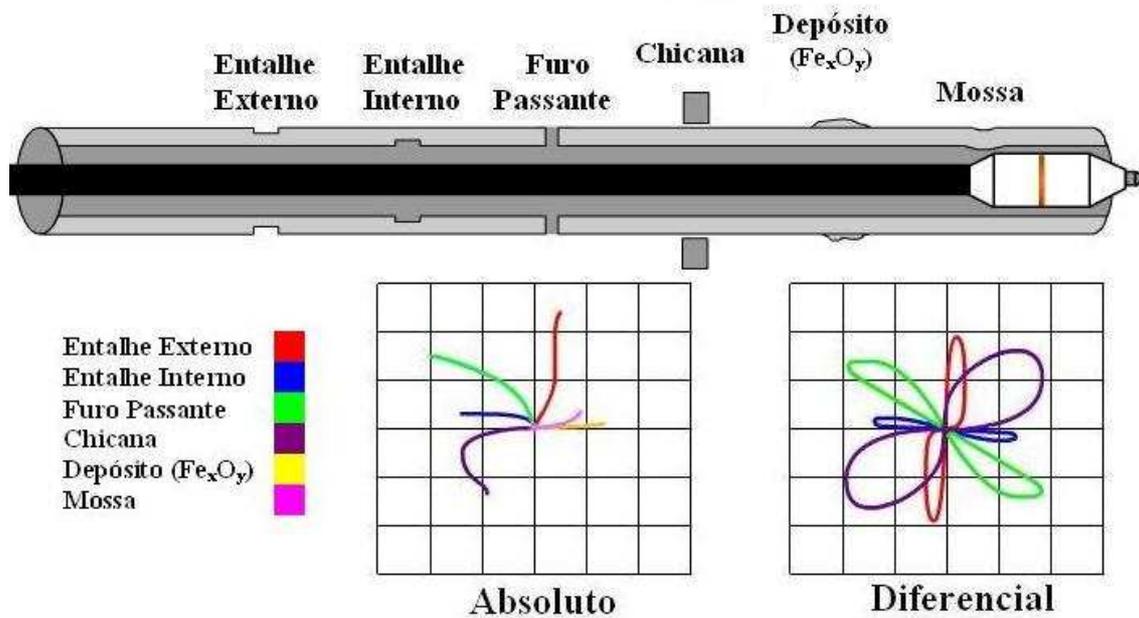


Figura 2.21 Esquematização dos resultados para ensaio de correntes parasitas em modo absoluto e modo diferencial (Adaptado de NDT, 2009).

Capacidade de detecção de trinca

Existe uma variedade de técnicas de inspeção para tubos de permutadores de calor e cada uma delas se sobressai dentre as outras em determinadas características e propriedades. Essas características são importantes na escolha da técnica a ser utilizada, onde os principais fatores que influenciam na escolha são o custo e o tempo de inspeção. Mas deve-se levar em consideração não apenas esses dois parâmetros para uma escolha bem feita, pois fatores como necessidade de detecção de defeito e sensibilidade da técnica na detecção de discontinuidades podem também influenciar. Existem alguns fatores que serão detalhados posteriormente os quais podem auxiliar na escolha da técnica de inspeção mais adequada para as condições encontradas no permutador de calor.

Quando se deseja realizar a inspeção nos tubos de um permutador, deve-se ter em mente quais tipos de discontinuidades podem ser encontradas, se corrosão interna ou externa dos tubos ou se trincas geradas por corrosão sob tensão. Neste último caso, a escolha da técnica de inspeção deve ser direcionada para aquela que atenda ao requisito de identificação de trincas com possibilidade de dimensionamento da mesma. Considerando as características da técnica por correntes parasitas, pode-se dizer que esta

é capaz de identificar uma trinca, desde que seja atendido o pré-requisito de reproduzir a descontinuidade em um tubo padrão.

Para a detecção de trincas por correntes parasitas e determinação da morfologia da mesma, existe a necessidade da obtenção de trincas reais no tubo padrão, sendo este um dos principais problemas encontrados no ensaio por correntes parasitas. Estudos têm sido realizados nessa área, como em (YUSA & MIYA, 2008), que introduziram trincas artificiais para avaliação por correntes parasitas, conseguindo analisar trincas provenientes de corrosão sob tensão em aço inoxidável.

O grupo dos materiais ferromagnéticos é fortemente representado pelo ferro, em particular o aço carbono, que é o material ferromagnético mais usado em tubos de permutador de calor. Em aço carbono, a detecção da trinca por corrente parasita convencional é complicada, pois, como já mencionado, o distúrbio do sinal, causado pelas variações da alta permeabilidade do aço carbono, confunde-se com os sinais das descontinuidades existentes. Nesse caso, pode-se utilizar uma frequência de excitação mais alta, de forma a ganhar sensibilidade, mas perdendo em profundidade de penetração das correntes parasitas, tornando o método convencional não habilitado para detecção de trincas. Também existe a possibilidade de redução do campo de atuação da sonda, sendo assim possível detectar trincas superficiais localizadas no mesmo lado ao de passagem da sonda. Essa redução pode ser realizada com a redução do enrolamento da sonda ou da excitação desta com correntes de maior frequência.

Detecção de Corrosão Uniforme e Medição de Espessura

Na medição de espessura em materiais não ferromagnéticos, como o latão, é totalmente possível obter resultados satisfatórios. Para a realização da medição de espessura utilizando o princípio das correntes parasitas é necessário um ajuste em parâmetros de calibração, como frequência, ângulo de fase e sensibilidade, de forma que os sinais correspondentes aos degraus de perda de espessura se posicionem horizontalmente e que a diferença entre o degrau de maior e o de menor espessura ocupe 80% da escala do aparelho. Assim pode-se construir uma curva de calibração para estabelecer a partir do ângulo de fase das indicações, e, por conseguinte, a redução de espessura propiciada pelas descontinuidades apresentadas (PETROBRAS, 2002)

Análise de descontinuidades nas proximidades da chicana

Um dos grandes problemas de algumas técnicas utilizadas na inspeção de tubos de permutadores, como correntes parasitas, é a inspeção do tubo na região próxima à chicana. Chicanas são chapas defletoras confeccionadas geralmente do mesmo material dos tubos, responsáveis por garantir a orientação e circulação do fluido em regime turbulento, e possuem furos por onde passam os tubos, dando-os suporte (TROCALOR, 2007).

Problemas maiores são encontrados na realização da inspeção em tubos de material ferromagnético suportados por chicanas também de material ferromagnéticos. A sonda responsável pela magnetização do tubo geralmente não consegue realizar a saturação necessária próxima da chicana, isto porque o fluxo magnético toma o caminho de menor resistência que se encontra próximo, que no caso é a chicana, ao invés de percorrer o tubo. Mas esse problema pode ser solucionado com o uso de um magnetizador radial, onde o fluxo quase não é alterado.

Capacidade de detecção de furo passante

Em equipamentos que operam sob pressão, como é o caso de permutadores de calor, a presença de algum tipo de descontinuidade pode provocar um sério prejuízo. Um dos sinais que indicam a presença de algum problema no permutador de calor é a presença de mistura entre os fluidos da troca térmica. Nesse caso, existe a possibilidade da presença de algum tubo do feixe com furo passante. Esse tipo de descontinuidade é normalmente detectado por qualquer método de inspeção utilizado em tubos de permutadores, inclusive correntes parasitas.

Inspeção em tubos de ligas latão-alumínio/bronze-alumínio

A alta condutibilidade dos materiais das ligas de latão ou bronze e alumínio é um dos fatores que dificulta a leitura dos sinais, o que torna difícil a identificação das descontinuidades presentes do tubo.

A condutibilidade reduz a capacidade de penetração das correntes parasitas no material, tornando a inspeção superficial. Com isso, existirá dificuldade na interpretação dos sinais provenientes de corrosão encontrada externamente ao tubo, trincas de corrosão sob tensão e corrosão alveolar, além da determinação precisa do valor de redução de espessura. A presença de produto de corrosão na região interna dos alvéolos e na região das trincas faz com que a leitura torne-se falsa, com indicações que podem propiciar uma morfologia complexa e não reproduzível das descontinuidades

Em trabalhos realizados por MARTINS & CARNEVAL (1995), na inspeção de tubos de ligas de bronze-alumínio e latão-alumínio, encontrou-se problemas com a limpeza dos tubos, seja por uma má realização ou pela presença de material proveniente da corrosão da liga, sendo esta difícil de ser retirada por limpeza com hidrojateamento. A inspeção de tubos desse material fica comprometida com a presença de incrustação nos tubos, tornando-a demorada e cara. Neste caso, o uso de limpeza química para retirada do produto de corrosão tornaria ainda mais alto o custo da inspeção em plantas de processos *on shore*, e muito mais em plantas *off shore*.

Inspeção em tubos de titânio

Devido a sua alta resistência à corrosão e ao ataque químico, até dos ácidos sulfúricos e clorídricos, além da maioria dos ácidos orgânicos, as indústrias química e naval empregam esse material para construção de diversos equipamentos. Um deles é o permutador de calor, onde o titânio é utilizado na fabricação de placas ou tubos. Atualmente o uso desse material em tubos de permutador de calor não é facilmente encontrado, devido ao seu custo e à presença de outros materiais que atualmente englobam a maioria dos mercados de permutadores de calor.

Seguindo as normas apropriadas, como a norma Petrobras N-2254 (PETROBRAS, 2002), é necessária a realização de calibração do aparelho com o uso de amostra de tubo de titânio com descontinuidades produzidas. Essa calibração é fundamental para obtenção de bons resultados, não apenas para tubos de titânio, mas para qualquer material que se deseje realizar a inspeção por correntes parasitas. Com uma boa calibração, é possível obter bons resultados de medidas de espessura, detecção de trincas e corrosão. Neste caso, um bom estudo através da análise de detecção de

descontinuidades com o intuito de se descobrir o menor tamanho de trinca possível de ser detectada seria de grande valia para o campo de informações das correntes parasitas.

Em estudos realizados por CARNEVAL & COBUCCI (1989), foi possível a identificação de trincas existentes em tubos de titânio com costura, trincas estas provenientes do processo de soldagem. Em contrapartida, algumas trincas detectadas pelo método de ensaio não destrutivo por líquidos penetrantes não foram identificadas pelas correntes parasitas. Como explicitado ressaltado anteriormente, existe nesse caso a necessidade de um estudo para identificação das menores trincas detectadas por correntes parasitas. Em geral, a inspeção por correntes parasitas de tubos de titânio segue os mesmos padrões da inspeção de materiais não ferromagnéticos.

A Tabela 2.4 apresenta a aplicabilidade da técnica de inspeção de tubos de permutador de calor por correntes parasitas convencional, por saturação magnética e por campo remoto, quanto a sua capacidade de detecção de algumas descontinuidades que podem ser encontradas em tubos de permutador, para materiais ferromagnéticos e não ferromagnéticos. Para comparação, foi utilizado o método IRIS. Observa-se ainda na Tabela 2.4, que IRIS pode ser utilizado para ferromagnético e diamagnético. Apesar de ser uma técnica com boa sensibilidade, a detecção de trincas é muito difícil. Correntes parasitas convencional (CP-C) é indicada para inspeção de tubos não ferromagnético, como por exemplo, o aço inoxidável. O mesmo não se observa para ferromagnéticos, sendo possível apenas a detecção de algumas descontinuidades internas ao tubo presentes na superfície.

Para correntes parasitas por campo remoto (RFEC), tem-se o problema de detecção de descontinuidades próximas às chicanas, pois o campo precisa percorrer a parte externa do tubo até atingir a área remota onde é detectado o sinal da descontinuidade e, devido à interferência da chicana, o sinal característico da descontinuidade sofre interferência com o sinal da chicana. A técnica de correntes parasitas por saturação magnética (CP SM) foi desenvolvida para a inspeção de materiais ferromagnéticos.

Tabela 2.4 Aplicabilidade de técnicas de inspeção de tubos de permutador de calor

Descontinuidade	IRIS		CP-C		RFEC		CP SM.	
	F	NF	F.	NF	F.	NF	F.	NF
Trinca	N	N	N	A	A	A	A	N
Entalhe Interno	A	A	Área Interna	A	A	A	A	N
Entalhe Externo	A	A	N	A	A	A	A	N
Corrosão Uniforme	A	A	Área Interna	A	A	A	A	N
Próximo Á Chicana	A	A	N	A	N	N	A	N

F: Ferromagnético

NF: Não Ferromagnético

CP-C: Correntes Parasitas Convencional

RFEC: Sigla em inglês para Correntes Parasitas por Campo Remoto

CP SM : Correntes Parasitas por Saturação Magnética

A: Aplicável

N: Não aplicável

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante todo o trabalho foram apresentadas as características das técnicas inspeção de tubos de permutadores de calor, especificamente com o uso de correntes parasitas como método de ensaio não destrutivo. Pôde-se então realizar uma avaliação comparativa com outros métodos de inspeção que foram resumidamente apresentados, como também uma avaliação de propriedades na inspeção por correntes parasitas de tubos de diferentes materiais, como aço carbono, aço inox, cobre e aço duplex.

Foram discutidas as principais vantagens das correntes parasitas na inspeção de tubos de permutador de calor, visto que existem muitas técnicas utilizadas para este fim. O objetivo foi focado na avaliação do comportamento das técnicas que se utilizam das propriedades das correntes parasitas para inspeção em tubos de permutador de calor e, desta forma, facilitar a avaliação e escolha da melhor técnica de inspeção a ser utilizada, tendo em vista a filosofia de redução de custo e minimização de tempo de inspeção que ocorre na maioria das vezes em paradas programadas das plantas de processo.

A inspeção por correntes parasitas abrange uma variedade de materiais, nos quais alguns ajustes realizados em parâmetros de operação podem possibilitar a inspeção. No entanto, alguns desafios surgem atualmente, demandando estudos mais aprofundados no intuito de aprimorar a técnica objetivando a obtenção de resultados confiáveis. Um exemplo que pode ser citado é o caso de tubos dos aços inoxidáveis duplex e superduplex, que por possuir uma microestrutura caracteristicamente única e diferenciada dos demais materiais, torna a inspeção de tubos de permutador de calor por correntes parasitas até hoje complicada.

A aplicação das correntes parasitas em materiais não ferromagnéticos está mais definida e se consegue obter resultados mais confiáveis do que em materiais ferromagnéticos. Apesar disso, a capacidade de detecção de trincas em ambos os materiais ainda não é satisfatória, requerendo um nível de estudo mais detalhado.

3.1 Proposta para trabalhos futuros

Apesar da técnica de correntes parasitas ter um longo acervo bibliográfico e tecnológico, o surgimento de novos materiais e condições de aplicação para os mesmos, faz com que exista uma grande necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para a inspeção com essa técnica.

Visto que, atualmente, surgiu a necessidade do uso do aço inoxidável duplex em permutadores de calor, surge também a necessidade de sua inspeção. Correntes parasitas é uma das alternativas como solução de inspeção de tubos desse material, necessitando a busca de novos estudos desta técnica e de resultados satisfatórios. Assim, para trabalhos que venham a ser realizados posteriormente a este, a realização de estudos por correntes parasitas em tubos de permutadores de calor de aço duplex deve ser proposta como trabalhos futuros.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-QADEEB, F. E., 2005, **Tubing Inspection Using Multiple NDT Techniques**. 3º MENDT, Manama. Acesso em 02 de fevereiro de 2009, disponível em: <http://www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/p18.pdf>
- API, **API RP 571 – Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**, 1ª ed, American Petroleum Institute, Washington, 2003
- ASM, **Nondestructive Evaluation and Quality Control**. ASM Metals Handbook, 1997
- ASME, **ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Div. 1**, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2006
- BIRCHALL, M.. **Internal Ultrasonic Pipe & Tube Inspection – IRIS**, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007
- Ministério do Trabalho e Emprego, **Norma Regulamentadora Nº 13 – Caldeiras e Vasos de Pressão**, 1998. Acesso em 16 de fevereiro de 2009, disponível em: www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_13.pdf
- CARNEVAL, R. O. , COBUCCI, J. C. S., XAVIER, M. B. **Análise de Inspeção por Correntes Parasitas em Tubos de Titânio**. 11ª. Mesa Redonda de Materiais, Inspeção de Equipamentos e Controle de Corrosão – CENPES – Petrobras, 1989.
- CARNEVAL, R. O. **Desenvolvimento de procedimento para inspeção dos tubos do trocador de calor 115-C da FAFEN Aracaju por correntes parasitas**. Rio de Janeiro: Petrobras – CENPES, 2001
- CARNEVAL, R. O. **Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Dados para Agilizar o Emprego do Ensaio de Correntes Parasitas em Trocadores de Calor**, XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, Salvador, 2002.

- COMPOENDE, **Ensaio não destrutivo: Correntes Parasitas**. Compoende Aeronáutica Ltda 2009. Acesso em 23 de janeiro de 2009, disponível em: <http://www.compoende.com.br/correntes.doc>
- FERRAZ, R. C. **Avaliação de Sistema Alternativo de Proteção Contra a Corrosão em Circuito de Água de Refrigeração**. Dissertação. Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007
- FUKUTOMI, H., TAKAGI, T., NISHIKAWA, M. **Remote Field Eddy Current Technique Applied to non-Magnetic Steam Generator Tubes**, NDT & E International 34, pgs. 17-21, 2001
- GEAQUINTO, R. **Descrição Geral de Permutadores**. Rio de Janeiro: Programa de Formação Petrobras, 2008.
- HENRIQUES, P. C. F. et al. **Avaliação do Potencial de Aplicação da Técnica de Ondas Guiadas na Inspeção dos Tubos Permutadores de Calor**. 9ª CONTEQ, 2007
- HERKENHOFF, R. G., **Descrição Geral de Permutadores de Calor**, Programa de Formação Petrobras, Universidade Petrobras, 2008
- LIGHT, G. **Techniques for corrosion monitoring: Nondestructive evaluation technologies for monitoring corrosion**, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas, USA, Woodhead Publishing Limited, 2008
- LOTH, A. L. Engenheiro de Equipamentos, Petrobras – REDUC/IE
- KUNDU, T. **Ultrasonic Nondestructive Evaluation – Guided Waves for Plate Inspection**. CRC Press LCC, Cap. 4, 2004
- KWUN, H, CRANE, J. F., KIM, S. Y., PARVIN, A. J., LIGHT, G. M. **A Torsional-mode Guided-wave Probe for Long-Range, in-bore Heat Exchanger Tubing Inspection**, 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, 2005
- MADUREIRA, C., SEVCIUC, N., BIRCHALL, M. **Ensaio IRIS: Uma Ferramenta para Avaliação da Integridade Estrutural e Avaliação da Vida Útil de Trocadores de Calor e Caldeiras**. BBL Bureau Brasileiro, 2004. Acesso em 02

de fevereiro de 2009, disponível em www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/ensayoiris.pdf

MARTINS, M. V., & CARNEVAL, R. . **Inspeção por Correntes Parasitas em Tubos de Permutador de Calor da REFAP**. Comunicação Técnica. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, 1995

MARTINS, M. V. **Implantação de Técnicas Não-convencionais para Inspeção de Tubos de Troca Térmica**. Rio de Janeiro: CENPES/PETROBRAS, 2003a

MARTINS, M. V. **Instruções para Seleção das Técnicas para Inspeção de Tubos de Permutadores de Calor e Processo de Certificação e Qualificação em Correntes Parasitas e Iris**, Tecnologia de Materiais, Equipamentos e Corrosão, Rio de Janeiro, 2003b

MCGRAW-HILL, **Heat Exchanger**. Concise Encyclopedia of Science and Technology. 5th ed. New York, 2005

Ministério do Trabalho e Emprego - M.T.E - BRASIL. **Norma Regulamentadora N° 13 - Caldeiras e Vasos de Pressão** (2000). Acesso em 18 de maio de 2009, disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_13.pdf

MKC, **Informações institucionais, técnicas, notícias, publicações e serviços**. Acesso em 02 de fevereiro de 2009, disponível em <http://www.mkc-china.com/products/iris/iris.htm>

MOREIRA, A. B., CARNEVAL, R. D., & SOLDATE, A. **Guia de boas práticas para execução de ensaio por correntes parasitas em tubos instalados de equipamento de troca térmica**. Grupo Tecnológico de Inspeção – Petrobras, 2007

NDT, **Introduction to Eddy Current Testing**. NDT Resource Center. Acesso em 13 de Fev. 2009, disponível em: <http://www.ndt-ed.org>

NETO, M. N. (2003). **Permutadores de Calor**. Rio de Janeiro, RJ: REDUC/PETROBRAS.

- OLYMPUS CORPORATION. **Introduction to Eddy Current Testing**. OLYMPUS - Inspection e Maintenance Systems. Acesso em 21 de Maio de 2009, disponível em: <http://www.olympus-ims.com/fr/eddycurrenttesting>, 2009
- OLIVEIRA, R. V., CARNEVAL, R. O. **Inspeção de Tubos Ferromagnéticos de Permutadores de Calor**, Anais do XII Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, pp 139-159, São Paulo, 1993.
- PETROBRAS, **N-253 – Projeto de Vaso de Pressão**, Rev. J, Comissão de Normas Técnicas – Petrobras, Rio de Janeiro, 2006
- PETROBRAS, **N-466 – Projeto de Trocador de Calor Casco e Tubo**, Rev.H, Comissão de Normas Técnicas - Petrobras, Rio de Janeiro, 2007
- PETROBRAS, **N-2254 – Inspeção de Tubos Não-Ferromagnéticos por Correntes Parasitas**, Comissão de Normas Técnicas, 2002
- PETROBRAS, **Condições de processo num trocador de calor**. Curso de Formação de Engenheiros de Equipamentos – Inspeção, 2008.
- SABINO, R. S. **Inspeção de Feixes Tubulares de Trocadores de calor**, 2008
- ROLIM, L. G. **Eletrotécnica Geral - Mecânica**. Departamento de Engenharia Elétrica - UNESP Guaratinguetá, 2002. Acesso em 27 de maio de 2009, disponível em: http://dee.feg.unesp.br/Disciplinas/SEL4001/Capitulo_7.pdf
- ROSSITI, S. M. **Efeito do Nióbio na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas do Aço Inoxidável Superduplex Fundido**. São Carlos - SP: Dissertação, 2000
- SHAH, R. K. e KENNETH, J. B., **Heat Exchangers**. Mechanical Engineering Handbook, CRC, Boca Raton, 1999
- SHULL, P. J. **Eddy Current**, Non-destructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications, capítulo 5, The Pennsylvania State University, Altoona, Pennsylvania, Marcel Dekker Books, 2002.
- SILVA, A. F. O., ALENCAR, D. A. **Sondas para Inspeção de Trocadores de Calor Instalados em Usinas Nucleares Tipo PWR pelo Método de Correntes**

- Parasitas**, International Nuclear Atlantic Conference - INAC, Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN, 2007
- SIQUEIRA, M.H.S. et al. **The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection**. Ultrasonics 41 (2004) 785–797, 2004
- SOUZA, E. A. **Avaliação de Inibidores de Corrosão para Sistemas de Resfriamento industrial Operando com Ciclo Elevado de Concentração**. Dissertação Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007
- TROCALOR, **TroCalor Indústria Mecânica Ltda** (2007). Acesso em 19 de maio de 2009, disponível em: <http://www.trocalor.com.br/pdf/cascotubo-rev4-2.pdf>
- VOGT, T. et al. **Application of Guided Wave Technology to Tube Inspection**. Guided Ultrasonic Ltd; ECNDT, Berlim, 2006
- YANG, L. **Techniques for Corrosion Monitoring**. Corrosion Monitoring. San Antonio, Texas, USA: Material and Planetary Sciences - Southwest Research, Woodhead Publishing Limited, 2008
- YUSA, N., & MIYA, K. **Discussion on the equivalent conductivity and resistance of stress corrosion cracks in eddy currents simulations**. NDT&E International , pp. 9-15, 2008