



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

INSPEÇÃO DE TROCADOR DE CALOR DE CASCO E PLACA POR CORRENTES PARASITAS

Yan Cavalcante dos Santos Faleiros Freitas

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos
necessários a obtenção do título de
Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Gabriela Ribeiro Pereira
Cesar Giron Camerini

Rio de Janeiro
Março de 2018

INSPEÇÃO DE TROCADOR DE CALOR DE CASCO E PLACA POR CORRENTES
PARASITAS

Yan Cavalcante dos Santos Faleiros Freitas

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinado por:



Gabriela Ribeiro Pereira
Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ – (Orientadora)

Adriana da Cunha Rocha
Adriana da Cunha Rocha, D.Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ

Mônica Patricia Arenas
Mônica Patricia Arenas Correa, M.Sc.
PEMM-COPPE/UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.
MARÇO DE 2018

Freitas, Yan Cavalcante dos Santos Faleiros

Inspeção de trocador de calor de casco e placa por correntes parasitas / Yan Cavalcante dos Santos Faleiros Freitas – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018.

xii, 44 p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Gabriela Ribeiro Pereira

Cesar Giron Camerini

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Engenharia Metalúrgica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 45-47.

1. Correntes Parasitas 2. Trocador de Calor 3. Casco e Placa 4. Aço Inoxidável 5. Entalhes.

I. Pereira, Gabriela Ribeiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Inspeção de trocador de calor de casco e placa por correntes parasitas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Glorinha e Paulo, e à minha irmã, Kim, por serem meu maior exemplo e por sempre me apoiarem e confiarem cegamente em minhas decisões. A todos os meus outros “pais e mães” que me acolheram como filho em suas casas ao longo de todo o tempo que morei fora da minha cidade.

A todos os meus amigo/as da “Metalmat”, do meu antigo curso, Nanotecnologia, e da UFRJ em geral por sempre estarem presentes ao longo desta jornada. Em especial à Patrícia Crisóstomo, Larissa Souza, Maíra Rievrs, Yasmin Watanabe e Gabriel Pereira pelas longas jornadas de estudo saindo além das 21h do fundão.

A minha orientadora Gabriela Pereira, por me dar a oportunidade de realizar este trabalho. Aos demais funcionários e amigos do LNDC, em especial à Iane de Araujo Soares, Clara Johanna Pacheco, Mónica Arenas, César Camerini, e Tibério de Moura Neto, pelos ensinamentos e pela sempre gentil disponibilidade.

Por fim, a Deus que me deu e me dá sempre o direcionamento na vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Metalúrgica

Inspeção de trocador de calor de casco e placa por correntes parasitas

Yan Cavalcante dos Santos Faleiros Freitas

Março/2018

Orientadora: Gabriela Ribeiro Pereira
Cesar Giron Camerini

Curso: Engenharia Metalúrgica

Este trabalho tem como objetivo avaliar se a técnica não destrutiva de correntes parasitas é capaz de detectar entalhes inseridos em corpos de prova provenientes de um trocador de calor de casco e placa (aço austenítico AISI 304). Para isso foi definida uma montagem capaz de detectar estes entalhes e otimizar os parâmetros de operação da técnica. A região de estudo, parte mais sensível a trincas por fadiga, é a área soldada nas placas trocadoras de calor. Para isso, foram usinados por eletroerosão dez entalhes de profundidades e/ou comprimento diferentes em corpos de prova provenientes de uma amostra composta por uma de pilha de placas, sendo que três dos entalhes são internos radiais, seis são externos e transversais e um é externo e radial. Os parâmetros de operação para a detecção dos entalhes com a técnica de correntes parasitas foram: frequência de 120 kHz, alimentação de 4 V, ganho de 40 dB, rotação de 139° e ganho vertical de 5 dB. Os dados adquiridos foram posteriormente tratados com o uso do software MATLAB®. Após todas as inspeções foi comprovado que com a metodologia desenvolvida e com os parâmetros definidos somente foi possível a detecção dos entalhes vazantes com o uso da técnica de correntes parasitas.

Palavras-chaves: Correntes parasitas; trocador de calor; casco e placa; aço inoxidável; entalhes.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

Shell and plate heat exchanger inspection using eddy current technique

Yan Cavalcante dos Santos Faleiros Freitas

March/2018

Advisors: Gabriela Ribeiro Pereira

Cesar Giron Camerini

Course: Metallurgical Engineering

The aim of this work is to evaluate if the eddy current non-destructive technique is able to detect notches in test specimens coming from shell and plate heat exchanger (austenitic steel AISI 304). In this way, it was developed a methodology which allow to detect these notches, as well as optimizing the operational parameters of the technique. The study region, the most sensitive section to fatigue cracks, is the welded region in the heat exchanger plates. For this, ten notches of different depths and/or length were machined via spark erosion in test specimen from a sample of a pile of plates, three of them are internal and radial, six are external and transverse, and one is external and radial. The eddy current technique was employed for the notches detection with the following operational parameters: 120 kHz frequency, 4 V supply, 40 dB gain, 139 ° rotation and vertical gain of 5 dB. The acquired data were post processed with MATLAB® software. After the inspection, it has been proven that the developed methodology and the set parameters allowed only the detection of external notches.

Keywords: Eddy current; heat exchanger; shell and plate; stainless steel; notches.

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	XII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 CORRENTES PARASITAS	2
2.1.1 Princípios físicos.....	2
2.1.2 Plano de impedância	3
2.1.3 Propriedades que influenciam nas correntes parasitas.....	6
2.1.5 Vantagens e desvantagens das correntes parasitas.....	11
2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS	12
2.2.1 Classificação.....	13
2.2.2 AISI 304	13
2.3 TROCADORES DE CALOR	15
2.3.1 Trocador de calor de casco e placa	15
2.4 FADIGA.....	20
2.4.1 Teoria.....	20
2.4.2 Fases do processo	20
2.4.3 Propagação da trinca em trocadores de calor do tipo casco e placa	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 MATERIAL	25
3.1.1 Pilha de placas trocadoras de calor	25
3.1.2 Corpos de prova	26
3.2 SUPORTE PARA OS CORPOS DE PROVA E SONDA	29
3.3 SONDAS TESTADAS	30
3.3.1 Sondas absolutas desenvolvidas.....	30
3.3.2 Sonda absoluta comercial	32
3.4 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	32
3.5 CARACTERIZAÇÃO	33
3.6 CORRENTES PARASITAS E TRATAMENTO DOS DADOS	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 METALOGRAFIA.....	36
4.2 SONDAS	37
4.3 CORPOS DE PROVA.....	38
4.4 CORRENTES PARASITAS	38

5	CONCLUSÃO	43
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: (A) TROCADOR DE CALOR DE CASCO E PLACA. (B) DESENHO ESQUEMATICO DE UMA PLACA TROCADORA DE CALOR RETANGULAR E UMA CIRCULAR. O DESIGN CIRCULAR EVITA A FORMAÇÃO DE CANTOS CONCENTRADORES DE TENSÃO. (TRANTER, 2017) (ADAPTADO).....	1
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA GERAÇÃO DE CORRENTES PARASITAS (NDT RESOURCE CENTER, 1999)	3
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DO PLANO DE IMPEDÂNCIA. (ASM HANDBOOK, 1989) (ADAPTADO).....	4
FIGURA 4: PLANO DE IMPEDÂNCIA RESULTANTE DA INSPEÇÃO POR CORRENTES PARASITAS. (NDT RESOURCE CENTER) (ADAPTADO).....	5
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO ALCANÇADA PELAS CORRENTES PARASITAS. (HANSEN, 2004)	7
FIGURA 6: PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO. (NDT RESOURCE CENTER)	8
FIGURA 7: EFEITO DA ESPESSURA NO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS A) MATERIAL ESPESSO E B) MATERIAL FINO. (PEREIRA, 2007)	9
FIGURA 8: EXEMPLO DE SONDA ABSOLUTA. (NDT RESOURCE CENTER)(ADAPTADO).....	10
FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO DA INSPEÇÃO DE UMA SONDA ABSOLUTA. (A) AS DUAS BOBINAS SE ENCONTRAM FORA DA DESCONTINUIDADE. (B) FORMAÇÃO DO PRIMEIRO LÓBULO APÓS A PASSAGEM DA PRIMEIRA BOBINA. (C) FORMAÇÃO DO SEGUNDO LÓBULO APÓS A VARREDURA DA SEGUNDA BOBINA. (NDT RESOURCE CENTER)	10
FIGURA 10: (A) ARRANJO ESQUEMÁTICO DE UMA SONDA REFLEXIVA ONDE UMA BOBINA ATUA PARA EXCITAÇÃO E OUTRA PARA RECEPÇÃO. (B) ARRANJO UTILIZADO NA INSPEÇÃO SIMULTÂNEA DAS DUAS FACES DE UMA MESMA AMOSTRA. (NDT RESOURCE CENTER).....	11
FIGURA 11: FAMÍLIA DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.(PADILHA; GUEDES, 1994)..	14
FIGURA 12: (A) VISÃO EXTERNA E INTERNA DO TROCADOR DE CALOR. AS SETAS VERMELHAS REPRESENTAM O FLUIDO PRIMÁRIO E AS SETAS AZUIS REPRESENTAM O FLUIDO SECUNDÁRIO. (B) PLACAS TROCADORAS DE CALOR. (SONDEX A/S, 2017) (ADAPTADO).....	17
FIGURA 13: DIREÇÃO DOS FLUIDOS DENTRO DO TROCADOR DE CALOR (A) CONTRA CORRENTE, (B) CORRENTE PARALELA E (C) CORRENTE CRUZADA. (GESMEX GMBH, 2017) (ADAPTADO)	18
FIGURA 14: POSSÍVEIS ARRANJOS DOS CIRCUITOS DOS FLUIDOS (A) UMA PASSAGEM PARA AMBOS OS FLUIDOS, (B) FLUIDOS PRIMÁRIO TEM UMA PASSAGEM E FLUIDO SECUNDÁRIO TEM DUAS PASSAGENS E (C) FLUIDO PRIMÁRIO TEM TRÊS	

PASSAGENS E FLUIDO SECUNDÁRIO TEM DUAS PASSAGENS. (GESMEX GMBH, 2017) (DAPTADO).....	19
FIGURA 15: INÍCIO DA TRINCA. (TRANTER, 2017).	23
FIGURA 16: PROPAGAÇÃO DA TRINCA. (TRANTER, 2017).....	23
FIGURA 17: TRINCA PASSANTE. (TRANTER, 2017).	24
FIGURA 18: VISÃO DA TRINCA SE PROPAGANDO AO LONGO DA REGIÃO SOLDADA. (TRANTER, 2017).	24
FIGURA 19: (A) PILHA APÓS OS CORTES POR ELETROEROSÃO A FIO E (B) PILHA FORMADA POR DUAS PLACAS INDIVIDUAIS E TRÊS PARES DE PLACAS SOLDADAS.	25
FIGURA 20: CORPO DE PROVA CORTADO POR ELETROEROSÃO DE UMA PLACA TROCADORA DE CALOR.	26
FIGURA 21: REPRESENTAÇÃO DO ENTALHE INTERNO NO CP 1 E DISTÂNCIA D (PAREDE REMANESCENTE).	27
FIGURA 22: REPRESENTAÇÃO DO CP 2.2 E SEUS ENTALHES TRANSVERSAIS EXTERNOS DE 0,5 MM, 0,8 MM E 1,0 MM.	28
FIGURA 23: REPRESENTAÇÃO DO CP 2.1 E SEUS ENTALHES TRANSVERSAIS EXTERNOS DE 1,5 MM, 2,0 MM E 3,0 MM.	28
FIGURA 24: REPRESENTAÇÃO DO CP 3 E SEU ENTALHE LONGITUDINAL DE 4,60 MM DE COMPRIMENTO.....	29
FIGURA 25: SUPORTE PARA OS CORPOS DE PROVA EM VISTA SUPERIOR E LATERAL.	29
FIGURA 26: SUPORTE PARA A SONDA EM VISTA FRONTAL.....	30
FIGURA 27: SONDA 1 CONSTRUÍDA COM 700 VOLTAS.....	31
FIGURA 28: SONDA 2 CONSTRUÍDA COM 1000 VOLTAS.....	31
FIGURA 29: SENSOR COMERCIAL UTILIZADO.	32
FIGURA 30: AMOSTRA APÓS A PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.	33
FIGURA 31: RADIOGRAFIA DO CP 1.1 COM $D = 0,54$ MM.....	34
FIGURA 32: RADIOGRAFIA DO CP 1.2 COM $D = 0,86$ MM.....	34
FIGURA 33: RADIOGRAFIA DO CP 1.3 COM $D = 1,54$ MM.....	34
FIGURA 34: MONTAGEM UTILIZADA DURANTE OS ENSAIOS POR CORRENTE PARASITAS.	35
FIGURA 35: IMAGEM FEITA POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE UM PEDAÇO DE UM CORPO DE PROVA APÓS PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA. EM ZOOM PODE-SE VER O DIMENSIONAMENTO DA SOLDA E O PONTO TRIPLO.....	36
FIGURA 36: MONTAGEM UTILIZADA NOS ENSAIOS POR CORRENTES PARASITAS.	37
FIGURA 37: PLANO DE IMPEDÂNCIA DO (A) ENTALHE 4 DE 1,5 MM, (B) ENTALHE 5 DE 2,0 MM E (C) ENTALHE 6 DE 3,0 MM DE PROFUNDIDADE.	39
FIGURA 38: PLANO DE IMPEDÂNCIA DO (D) ENTALHE 7 DE 0,5 MM, (E) ENTALHE 8 DE 0,8 MM E (F) ENTALHE 9 DE 1,0 MM DE PROFUNDIDADE.	40

FIGURA 39: PLANO DE IMPEDÂNCIA DO ENTALHE 10 DE 4,6 MM DE COMPRIMENTO.	40
FIGURA 40: GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA (R) VS. TEMPO (S) E REATÂNCIA INDUTIVA (XL) VS. TEMPO (S) DO ENTALHE 4 DE 1,5 MM, (B) ENTALHE 5 DE 2,0 MM E (C) ENTALHE 6 DE 3,0 MM DE PROFUNDIDADE.....	41
FIGURA 41: GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA (R) VS. TEMPO (S) E REATÂNCIA INDUTIVA (XL) VS. TEMPO (S) DO (D) ENTALHE 7 DE 0,5 MM, (E) ENTALHE 8 DE 0,8 MM E (F) ENTALHE 9 DE 1,0 MM DE PROFUNDIDADE.	41
FIGURA 42: GRÁFICOS DE RESISTÊNCIA (R) VS. TEMPO (S) E REATÂNCIA INDUTIVA (XL) VS. TEMPO (S) DO ENTALHE 10 DE 4,6 MM DE COMPRIMENTO.....	42
FIGURA 43: REPRESENTAÇÃO DE UMA BOBINA DIFERENCIAL PARA POSSÍVEL DETECÇÃO DOS ENTALHES PRESENTES NO GRUPO CP 3.....	44

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: PARAMETRÔS DE OPERAÇÃO USADOS VARREDURAS POR CORRENTES PARASITAS NO OMNISCAN MX.....	38
TABELA 2: DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E O DIMENSIONAMENTO DOS SEUS RESPECTIVOS ENTALHES.....	39
TABELA 3: VALOR MÉDIO (\bar{X}), DESVIO PADRÃO (σ) E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV) DA AMPLITUDE E DA FASE DOS VALORES OBTIDOS PELO OMNISCAN MX NO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS.	42

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AISI	American Iron Steel Institute;
UNS	Unified Numbering System;
CFC	Cúbico de face centrada;
CP	Corpo de prova;
PHE	Plate heat exchanger;
SPHE	Shell and plate heat exchanger;
STHE	Shell and tube heat exchanger;
L	Indutância;
H	Henry;
H _p	Campo magnético primário;
H _s	Campo magnético secundário;
R	Resistência;
S	Siemens;
T	Tesla;
X _L	Reatância indutiva;
X _C	Reatância capacitiva;
Z	Impedância total;
σ	condutividade elétrica;
μ	Permeabilidade magnética;
μ_r	Permeabilidade magnética relativa;

1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são dispositivos usados para promover o fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos a temperaturas diferentes. São usados na produção de energia, refrigeração, ar condicionados, recuperação de calor, entre outras muitas aplicações. Dois dos trocadores de calor mais utilizados na indústria são os trocadores de placas e os trocadores de casco e tubos. Ambos são usados aproximadamente a um século e são muito bem aceitos pelo mercado. No entanto, estes equipamentos apresentam suas limitações em relação à temperatura e pressão máxima em que podem operar, com relação à capacidade de transferência de calor e em relação a seus tamanhos e pesos. Além disso, os trocadores de calor de placas sofrem com fadiga térmica e pressão nas juntas soldadas presentes nas placas quadradas/retangulares. Estas regiões atuam como concentradores de tensão e pontos de iniciação de trincas. O trocador de calor de casco e placas *“shell and plate”* é utilizado a pouco tempo na indústria, cerca de 20 anos, e tem como objetivo unir os benefícios de ambos os trocadores citados em um só equipamento e solucionar o problema da baixa resistência à fadiga térmica e/ou por pressão ao ter o seu design modificado para um formato circunferencial.

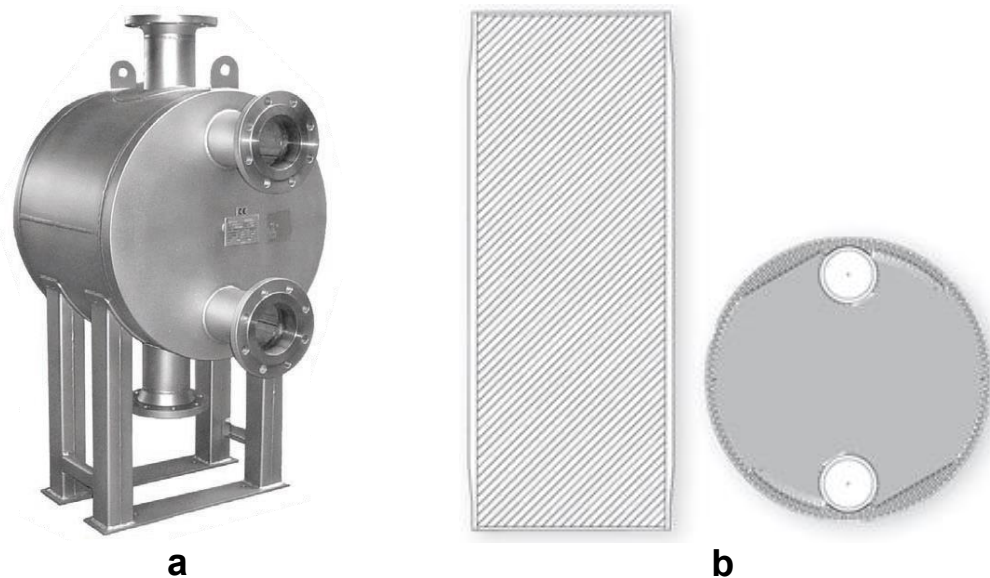


Figura 1: (a) Trocador de calor de casco e placa. (b) Desenho esquemático de uma placa trocadora de calor retangular e uma circular. O design circular evita a formação de cantos concentradores de tensão (Tranter, 2017) (adaptado).

Apesar dos trocadores de casco e placas apresentarem melhor resistência à fadiga, estes equipamentos ainda estão submetidos a trincas por fadiga nas áreas mais susceptíveis à amplificação de estresse que são as regiões soldadas que unem placas individuais formando as placas trocadoras de calor. O reparo destas soldas, apesar de ser de imediata necessidade, pode ser dispendioso, levar a um tempo de inatividade do equipamento não previsto, não ser uma tarefa simples e não ser viável dependendo do local do reparo. A necessidade de técnicas não destrutivas para identificação de possíveis falhas nas juntas soldadas seria uma solução para evitar a paralização do processo industrial por tempo indeterminado.

Portanto, através da indução de entalhes de diversas profundidades e orientações por eletroerosão em corpos de prova retirados de placas trocadoras de calor simulando falhas que poderiam ocorrer no equipamento quando usado em condições reais, este trabalho visa avaliar se a técnica de correntes parasitas é capaz de detectar os entalhes inseridos nos corpos de prova e a definição de parâmetros operacionais e uma montagem capaz de detectar os entalhes através da técnica de correntes parasitas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Correntes parasitas

Também chamadas de correntes de Foucault, induzidas ou do inglês *eddy current*, as correntes parasitas é um dos ensaios não destrutivos (END) que utiliza o princípio da indução eletromagnética. Este princípio se baseia na detecção de uma perturbação no campo eletromagnético no objeto de interesse pela presença de um objeto nesse campo. Esta perturbação pode ser medida e usada para obter espessuras de revestimentos não condutores ou não magnéticos; medir e identificar propriedades físicas e morfológicas; analisar e detectar propriedades de ligas e identificar trincas, inclusões, vazios. É uma técnica muito sensível, versátil e com ampla gama de aplicação(ASM HANDBOOK, 1989; SOARES, 2005).

2.1.1 Princípios físicos

O princípio físico do ensaio é descrito pela alimentação de uma bobina com corrente elétrica alternada fazendo com que a mesma gere um campo magnético

primário perpendicular à superfície da amostra. Ao aproximar a bobina da amostra, se esta for eletricamente condutora, uma parte do campo magnético primário irá penetrá-la induzindo a formação de uma corrente parasita, como descreve a Lei de Lenz e, conseqüentemente, a formação de um campo eletromagnético secundário ou induzido com mesma direção, mas sentido oposto. A interação ou superposição entre os campos, primário e secundário, permitirá a detecção de descontinuidades, mudanças nas propriedades elétricas e magnéticas, alterações na espessura da amostra ou algum outro fator que aumente a resistência ao fluxo das correntes parasitas. Estes fatores irão acarretar em mudanças na impedância da bobina gerando um sinal que permite obter informações base para este tipo de ensaio (ASM HANDBOOK, 1989; SOARES, 2005).

A Figura 2 mostra as etapas do conceito físico da indução eletromagnética. Em um primeiro momento, da esquerda para a direita, tem-se a bobina sem e com alimentação de corrente elétrica alternada. Esta corrente gera um campo magnético primário (H_p) ao redor da bobina que, ao se aproximar da amostra condutora, induz correntes parasitas no material. Esta nova corrente gera um campo magnético secundário (H_s) que, ao interagir com o H_p , muda a impedância da bobina.

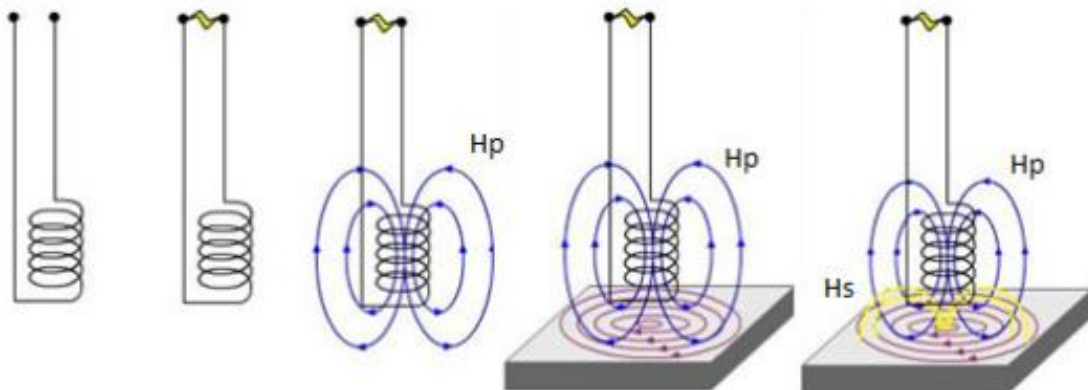


Figura 2: Representação esquemática da geração de correntes parasitas (NDT Resource Center, 1999)

2.1.2 Plano de impedância

Impedância elétrica é a total oposição que um circuito apresenta a uma corrente alternada. É medida em ohms (Ω) e é representada apenas por duas componentes,

reatância indutiva (X_L) e a resistência (R), podendo ser visualizada no diagrama vetorial na Figura 3, onde X_L está no eixo das ordenadas, R no eixo das abscissas e θ é o ângulo de fase. Em ensaios de correntes parasitas, um terceiro componente, a reatância capacitiva (X_C), pode ser desprezada (ASM HANDBOOK, 1989).

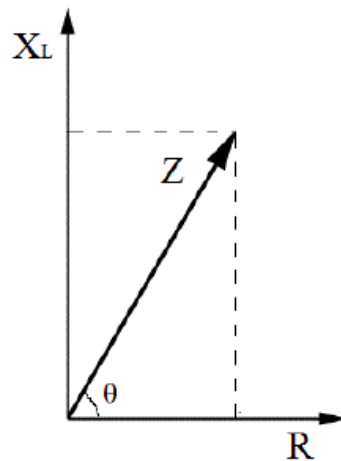


Figura 3: Representação do plano de impedância (ASM HANDBOOK, 1989) (adaptado).

Para o plano de impedância representa na Figura 3, a impedância total (Z) é calculada pelo seu módulo mostrado na Equação 1.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (1)$$

Onde:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (5)$$

Sendo:

f : Frequência [Hz]

L : Indutância [Henrys]

O ângulo de fase também pode ser calculado pelas seguintes relações:

$$\phi = \tan^{-1} \cdot \frac{X_L}{R} \quad (9)$$

$$\tan \phi = \frac{X_L}{R} \quad (13)$$

Pelo diagrama de impedância na Figura 4, pode-se, de uma forma muito útil, exibir dados provenientes de uma inspeção por correntes parasitas. Interpretando alguns pontos importantes do diagrama é possível entender como funciona a impedância elétrica. A aproximação de uma sonda, balanceada no ar, até uma placa de alumínio irá crescer a resistência, pois as correntes parasitas geradas na placa irão retirar energia da bobina aumentando a sua resistência, e irá decrescer a reatância indutiva, pois as correntes parasitas irão criar um campo magnético secundário que é oposto ao campo magnético primário gerando, então, um campo magnético fraco para gerar indutância. Se uma trinca existir na amostra será observada queda na resistência e aumento da reatância indutiva pelo fato da intensidade das correntes parasitas ser menor (NDT Resource Center).

Uma reação diferente é observada ao se aproximar a sonda de um aço. A resistência aumenta pelo mesmo motivo observado ao se aproximar a sonda do alumínio, ou seja, correntes parasitas são formadas e ao retirar energia da bobina aumentam a sua resistência, porém a reatância indutiva irá crescer. Isso se deve ao fato da alta permeabilidade magnética do aço concentrar o campo magnético primário da bobina tornando este campo maior e encobrindo o campo magnético secundário. Na presença de uma trinca é observado a queda da resistência e aumento da reatância indutiva (NDT Resource Center).



Figura 4: Plano de impedância resultante da inspeção por correntes parasitas (NDT Resource Center) (adaptado).

2.1.3 Propriedades que influenciam nas correntes parasitas

2.1.3.1 Profundidade de Penetração Padrão

A densidade de corrente na superfície do material analisado não é a mesma ao longo de toda a sua espessura. É importante saber qual a profundidade de penetração no material de interesse para se verificar se haverá sensibilidade necessária para a identificação de falhas (PEREIRA, 2014). Essas correntes parasitas estarão mais densamente concentradas na superfície do material decrescendo a medida que penetra na amostra chegando a um ponto em que ela não será mais identificada. Este efeito, chamado de efeito pelicular, varia exponencialmente com a profundidade e pode ser visualizado na Figura 5. Além desta relação é possível ver na figura outra que definirá a profundidade de penetração padrão (δ), ou seja, a profundidade onde a densidade de corrente parasita é reduzida a, aproximadamente, 37% ou $1/e$ da densidade encontrada na superfície e que pode ser calculada pela Equação 5 (ASM HANDBOOK, 1989):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (17)$$

Onde:

f é a frequência [Hz];

μ é a permeabilidade magnética [Tm/A];

σ é a condutividade elétrica [S/m].

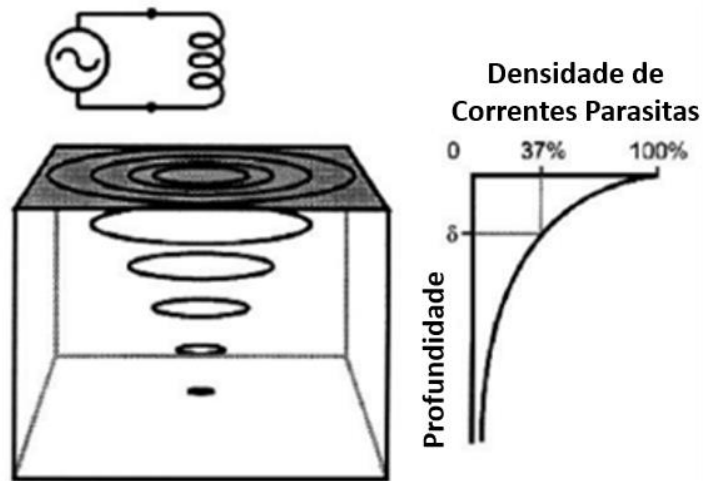


Figura 5: Representação esquemática da profundidade de penetração alcançada pelas correntes parasitas (HANSEN, 2004).

É importante garantir que a amostra sendo analisada tenha uma espessura constante ou mínima para que as correntes parasitas não a atravessem completamente. A região inspecionada deve ter uma profundidade de duas a três vezes a profundidade de penetração padrão garantindo assim que se tenha uma espessura mínima que permita uma resposta significativa das correntes parasitas. O controle da profundidade de penetração e a calibração adequada da instrumentação desta análise irá permitir medidas de espessura (ASM HANDBOOK, 1989).

Conforme observado na Equação 5, a profundidade de penetração está em função da permeabilidade magnética, frequência e da condutividade elétrica. Dependendo da frequência utilizada, pode-se obter maior ou menor sensibilidade da sonda de inspeção. A condutividade elétrica, ou seja, a resistência do material ao fluxo de correntes elétricas deverá ser baixa. Isto porque a técnica das correntes parasitas requer materiais condutores elétricos que são caracterizados por possuírem baixa resistividade. Já a permeabilidade magnética, facilidade do material em ser magnetizado, influenciará bastante na resposta do ensaio. Como pode ser visto na Figura 6, a profundidade de penetração é inversamente proporcional às grandezas desses três parâmetros (ASM HANDBOOK, 1989; CAMERINI, 2012).

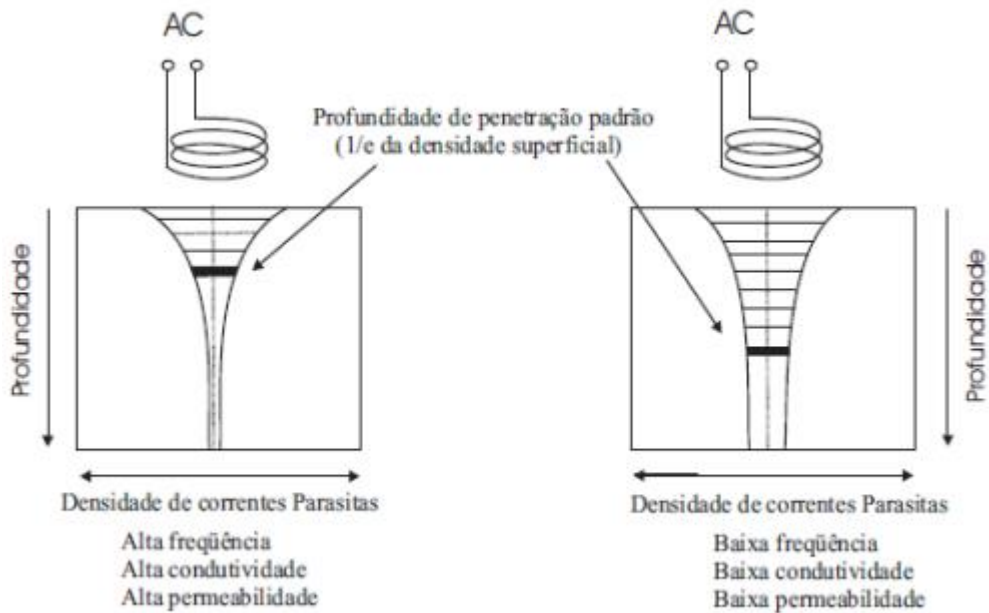


Figura 6: Profundidade de penetração (NDT Resource Center).

2.1.3.2 Lift-off

A distância entre a bobina e o material é chamado *lift-off*. É importante no auxílio à instrumentação das correntes parasitas para medições de espessuras de revestimentos não condutores, como tintas ou camadas anodizadas sob metais. O efeito *lift-off* é muito sensível a pequenas alterações na distância entre bobina e a amostra, pode mascarar alguma informação esperada ou diminuir a sensibilidade do ensaio. Portanto é muito importante manter uma relação compatível entre as formas e os tamanhos da bobina e da peça a ser analisada (ASM HANDBOOK, 1989; HANSEN, 2004).

2.1.3.3 Geometria da peça

A geometria da peça influencia diretamente nos resultados da inspeção. No caso de se ter uma peça espessa o campo magnético gerado pode não ser capaz de inspecionar toda a espessura do material ocorrendo o caso de descontinuidade situadas abaixo de uma certa espessura não serem detectadas, como pode ser visto na Figura 7(a). No caso de o campo magnético ser maior que a espessura da peça inspecionada, peça muito fina, um aumento na espessura do material acarretaria em uma resposta

como se houvesse um aumento na condutividade elétrica do objeto, uma vez que se tem maior densidade de corrente, como visto na Figura 7(b) (PEREIRA, 2007).

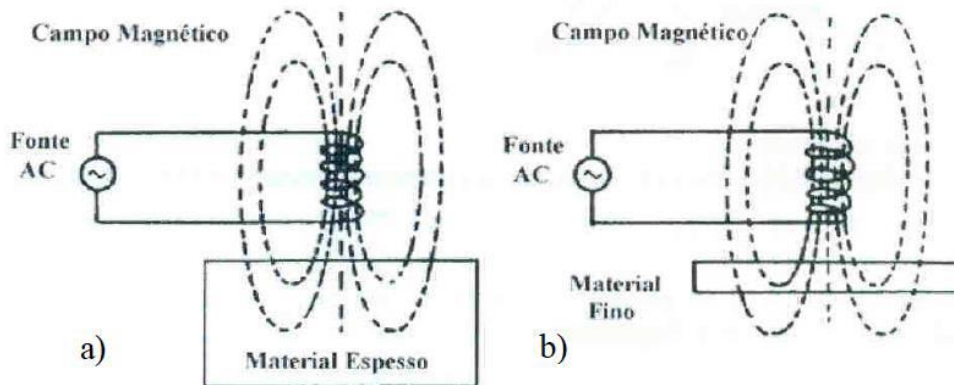


Figura 7: Efeito da espessura no ensaio de correntes parasitas a) material espesso e b) material fino (PEREIRA, 2007).

2.1.3.4 Tipos de sondas

Existem diversos tipos de sondas com tamanhos, formas e arranjos que podem ser selecionados de acordo com a peça que será inspecionada de forma que se tenha o melhor acoplamento entre a sonda e a geometria da peça. As sondas podem ser classificadas quanto à região do campo magnético utilizado, ao arranjo elétrico da bobina e ao modo de detecção do campo magnético. Os arranjos mais comuns são: absoluto, diferencial e reflexão (SOARES, 2005).

- Sondas absolutas

Apresentam apenas uma bobina e a vantagem de serem versáteis e, por isso, são utilizadas para detecção de falhas e medidas de condutividade, *lift-off* e espessuras. No entanto, por serem muito sensíveis à condutividade, permeabilidade magnética, *lift-off* e temperatura, estas sondas necessitam que uma pessoa controle estas variáveis quando elas não forem interessantes no ensaio (NDT Resource Center).

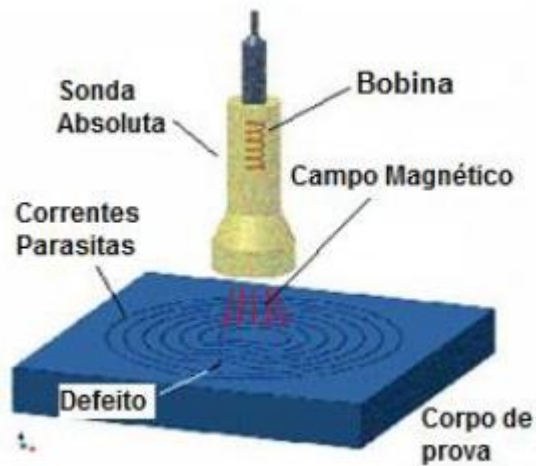


Figura 8: Exemplo de sonda absoluta (NDT Resource Center)(adaptado).

- Sondas diferenciais

As sondas diferenciais são constituídas por duas bobinas que geram um sinal que é a diferença entre elas. Esta diferença é gerada quando uma bobina está em uma região sem e a outra bobina sob uma região com descontinuidades gerando impedâncias diferentes e formando um sinal característico com formato de um “8” no plano de impedância. No entanto, os defeitos na amostra podem estar muito afastados ou próximos de mais fazendo com que as duas bobinas estejam no mesmo defeito. Com isso a diferença entre os campos magnéticos de cada bobina seria zero. Esta desvantagem pode ser solucionada utilizando uma sonda menor para se ter mais precisão da região que está sendo analisada (NDT Resource Center).

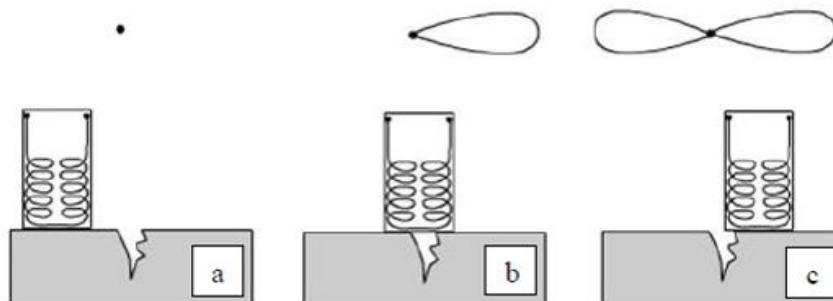


Figura 9: Representação da inspeção de uma sonda absoluta. (a) as duas bobinas se encontram fora da descontinuidade. (b) formação do primeiro lóbulo após a passagem da primeira bobina. (c) formação do segundo lóbulo após a varredura da segunda bobina (NDT Resource Center).

- Sondas reflexivas

Semelhante à sonda diferencial, a reflexiva possui duas bobinas cada uma com uma função diferente. Uma gera correntes parasitas no material a ser inspecionando e a outra é responsável por avaliar as mudanças no material (NDT Resource Center).

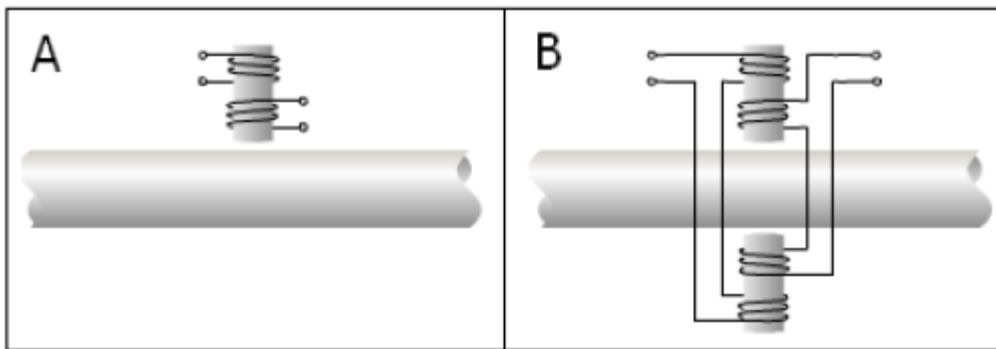


Figura 10: (a) Arranjo esquemático de uma sonda reflexiva onde uma bobina atua para excitação e outra para recepção. (b) arranjo utilizado na inspeção simultânea das duas faces de uma mesma amostra (NDT Resource Center).

2.1.5 Vantagens e desvantagens das correntes parasitas

2.1.5.1 Vantagens

- Ótima sensibilidade na detecção de pequenas discontinuidades e outros defeitos;
- Detecta defeitos de superfície e próximos a superfície;
- As indicações são imediatas;
- Equipamento é portátil;
- Pode ser usado para analisar peças de formato complexos e vários tamanhos;
- É necessária uma preparação superficial mínima das peças e serem ensaiadas;
- A grande versatilidade do método permite que o mesmo possa ser utilizado em inúmeras aplicações e não somente para detecção de falhas;

- h) A sonda de teste não precisa estar necessariamente sempre em contato com a peça.

2.1.5.2 Desvantagens

- a) Inspeção restrita a matérias eletricamente condutores;
- b) Profundidade de penetração das correntes parasitas é limitada;
- c) Materiais ferromagnéticos apresentam maior dificuldade na detecção e avaliação de descontinuidades;
- d) Operador deve possuir treinamento específico e extensivo sobre este método de ensaio;
- e) Necessidade de padrões conhecidos para calibração do aparelho do ensaio, como blocos de calibração;
- f) Pode haver interferência causada por mal acabamento superficial ou rugosidade;
- g) A superfície precisa ser acessível à sonda.

2.2 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas a base de ferro contendo um mínimo de 11,5% de cromo. Existem 57 composições diferentes deste tipo de aço segundo o padrão AISI (*American Iron and Steel Institute*). O fenômeno da passivação, ou seja, a formação de uma camada transparente e não porosa de óxidos (ferro, cromo e outros elementos de liga) somada à dissolução e à impermeabilidade desta camada no meio corrosivo irão controlar a resistência à corrosão do material. Esta resistência é uma medida que leva em conta a perda de peso, área e tempo (SILVA; MEI, 1988).

Esses aços são de grande interesse de estudo na engenharia pelo fato de serem uma das soluções para os altos custos que a corrosão traz. Em alguns países estes custos podem chegar a 3% do PIB. Além disso, estes aços apresentam outras propriedades muito importantes e interessantes, como a alta ductilidade, alta taxa de encruamento, alta dureza e resistência mecânica, alta resistência mecânica e dureza, resistentes a altas ou baixas temperatura e apresentam baixa resposta magnética (apenas os austeníticos). Estas e outras propriedades podem ser otimizadas fazendo um balanço dos elementos de ligas adicionados (STEEL, 2013).

Dentre as suas aplicações, os aços inoxidáveis podem ser usados desde utensílios domésticos até equipamentos da indústria aeronáutica, ferroviária, naval, de papel e celulose, petroquímica, têxtil, frigorífica e hospitalar.

2.2.1 Classificação

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco famílias segundo a composição química que irá determinar a sua microestrutura:

- Aços inoxidáveis austeníticos
- Aços inoxidáveis ferríticos
- Aços inoxidáveis martensíticos
- Aços inoxidáveis duplex

Esses aços são designados por numerações segundo o proprietário da liga ou por organizações internacionais de normatização, como a *Unified Numbering System* (UNS) e a *American Iron Steel Institute* (AISI). A numeração utilizada pela UNS foi desenvolvida para todos os metais comerciais e terras raras e pode se assemelhar à numeração da AISI que é a mais utilizada. Esta utiliza uma classificação baseada em três dígitos podendo os aços inoxidáveis serem das séries 200, 300 ou 400. Os aços austeníticos podem fazer parte da série 200 e 300, os aços ferríticos da série 300 e os aços martensíticos da série 400 (ASM METALS HANDBOOK, 1987; CHIAVERINI, 2005).

2.2.2 AISI 304

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em cinco subgrupos, Cr-Mn, Cr-Ni, Cr-Ni-Mo, austeníticos de alta performance e austeníticos de altas temperaturas (OUTOKUMPU STAINLESS AB, 2013). Levaremos em consideração o grupo ao qual a maioria dos aços austeníticos empregados fazem parte, o subgrupo dos aços ao cromo-níquel. Estes são contidos de 16 a 25 % de Cr, 7 a 20 % de Ni e carbono variando entre 0,02% e 0,15%. Dentro deste subgrupo, a composição química mais comum é de aproximadamente 18%Cr e 8%Ni, como as ligas 304, 316 e 347. Neste caso a presença do níquel melhora a resistência à corrosão e à oxidação a altas temperaturas (SILVA; MEI, 1988; LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

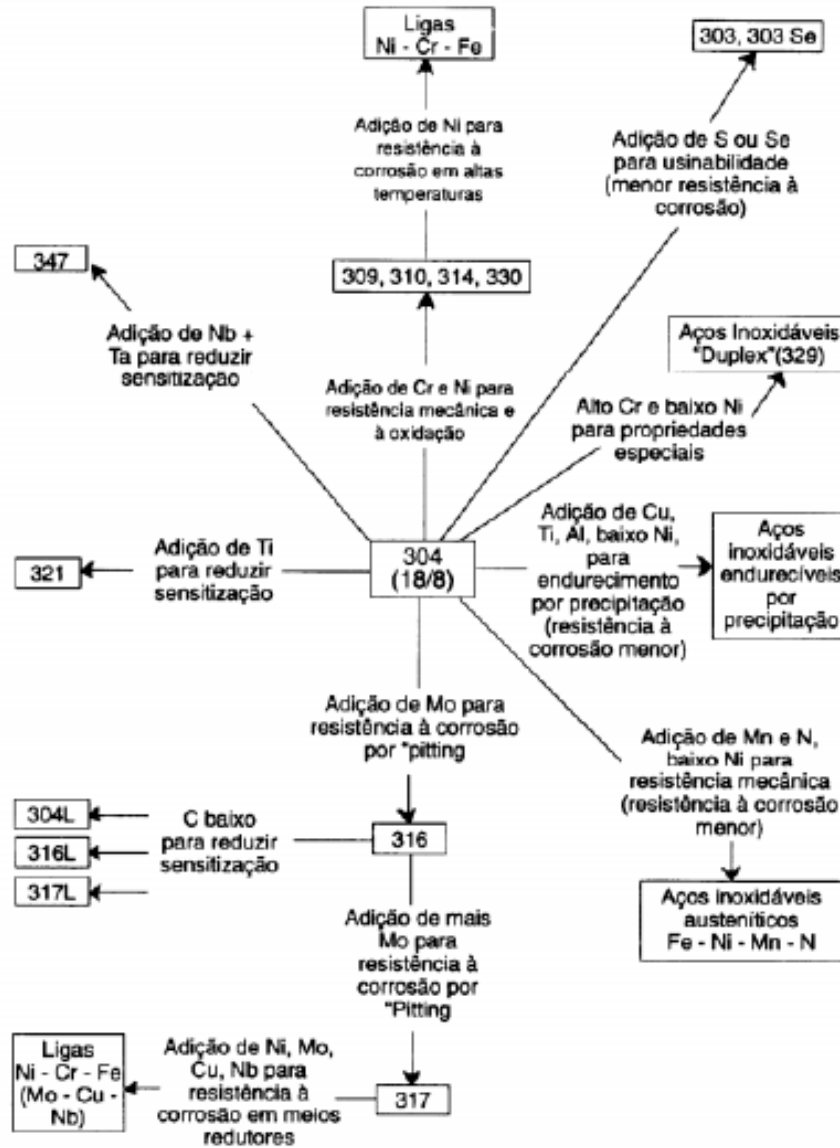


Figura 11: Família de aços inoxidáveis austeníticos.(PADILHA; GUEDES, 1994)

Esses aços além de serem o maior grupo dentre os aços inoxidáveis, são também os mais fabricados deste grupo. Apresentam propriedades metalúrgicas muito desejáveis pelo fato de terem boa ductilidade (tensão de escoamento de 200MPa), mas também atingirem altos limites de escoamento e de ruptura quando são trabalhados a frio, podendo chegar a tensões de escoamento de 2000MPa. Apresentam excelente resistência ao impacto e não sofrem transição dúctil-frágil em altas e baixas temperaturas, uma vez que sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) é muito resistente e dúctil, conseguindo se manter em temperaturas extremas. Possuem ainda boa formabilidade e soldabilidade garantindo o menor custo de produção dentre os aços austeníticos, são paramagnéticos e proporcionam níveis muito previsíveis de

resistência à corrosão acompanhada de excelentes propriedades mecânicas (SILVA; MEI, 1988; LIPPOLD; KOTECKI, 2005; MCGUIRE F., 2008).

2.3 Trocadores de calor

Trocador de calor é um dispositivo usado para promover a troca de energia térmica interna entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas através de uma superfície sólida, entre partículas sólidas ou, se os fluidos forem imiscíveis, a troca pode ocorrer entre os próprios líquidos sem a necessidade de uma parede de separação. Os trocadores podem ter diferentes funções sendo algumas delas bem típicas, como aquecimento, resfriamento, evaporação ou condensação de um fluxo de fluido. Outras funções são esterilizar, pasteurizar, cristalizar, fracionar, destilar, concentrar, rejeitar ou recuperar calor e controlar um processo fluido. Alguns trocadores presentes no dia a dia são radiadores de automóveis e torres de resfriamento, por exemplo. Os trocadores de calor estão presentes na produção de energia; indústrias de alimentos, química e de processos; eletrônicos e em recuperações de calor residual, por exemplo (SHAH; SEKULIĆ, 2003; THULUKKANAM, 2013).

2.3.1 Trocador de calor de casco e placa

O trocador de calor de placas ou do inglês *plate heat exchanger* (PHE) é usado desde 1930 e sua tecnologia e funcionalidade são claros entre os engenheiros tornando-o muito bem aceito entre estes profissionais. Além disso, este equipamento ocupa pouco espaço, é leve, não precisa ser limpo tão frequentemente e apresenta alta taxa de transferência de calor, baixa incrustação de resíduos e baixa variação da temperatura. Contudo, quando usados sob certas circunstâncias não são capazes de garantir total resistência à fadiga térmica e/ou por pressão (GAVELIN; AB, 2009).

O trocador de calor casco e tubo, do inglês *shell and tube heat exchanger* (STHE) está a um século sendo usado e é o trocador mais versátil, uma vez que é utilizado em diferentes tipos de indústrias. Funciona bem em condições de alta temperatura e pressão, não utiliza juntas para vedação e apresenta baixa queda de pressão (MINEA, 2012).

Com a finalidade de unir os benefícios do PHE e do STHE e de solucionar o problema da pouca resistência à fadiga térmica e/ou por pressão, o trocador de calor casco e placa ou do inglês, *shell and plate heat exchanger* (SPHE) foi desenvolvido e

existe a aproximadamente 20 anos, mas está em utilização em processos industriais a apenas uma década (MINEA, 2012). Contudo, o SPHE precisa de mais referências e recomendações reais dos licenciadores de processos para ganhar a confiança e maior adesão (GAVELIN; AB, 2009).

Mesmo com as ressalvas de GAVELIN et al. (2009), o SPHE tem sido cada vez mais aplicado em plataformas de petróleo, em circuitos fechados de resfriamento em navios, em estações de energia. Tem sido usado como evaporador, como parte da instalação de ar condicionado em grandes edifícios, como refrigerador a gás úmido, em instalações de refrigeração e como aquecedor a vapor. Este trocador tem se tornado a melhor opção para situações em que o peso e as dimensões são um limitante ou quando se é empregado materiais resistentes à corrosão, como aço inoxidável e titânio (KIM et al., 2007).

2.3.1.1 Configuração do trocador de calor

O trocador SPHE é constituído, na parte interna, por uma pilha de pares de placas circulares e onduladas. Os ângulos da ondulação de um par em relação ao outro são ajustados de tal forma que se constitui canais para o fluxo dos fluidos primário e secundário.

Os pares de placas apresentam também em suas superfícies duas passagens circulares (uma de entrada e outra de saída) por onde passará um dos fluidos. Os pares de placas trocadoras de calor podem ser vistas na Figura 12(b) e são formadas por duas placas individuais que estão soldadas a laser em dois locais: no círculo interno e ao longo do contorno das placas. Esta pilha se encontra dentro de uma estrutura formada por um casco cilíndrico e duas tampas (uma superior e uma inferior). O casco contém uma entrada e uma saída para o fluxo do fluido secundário (setas azuis na Figura 12(a)) e a cobertura superior contém uma entrada e uma saída (setas vermelhas na Figura 12(a)) alinhadas com as passagens circulares dos pares de placas permitindo, então, o fluxo do fluido primário (MATHUR; FULMER, 2002).

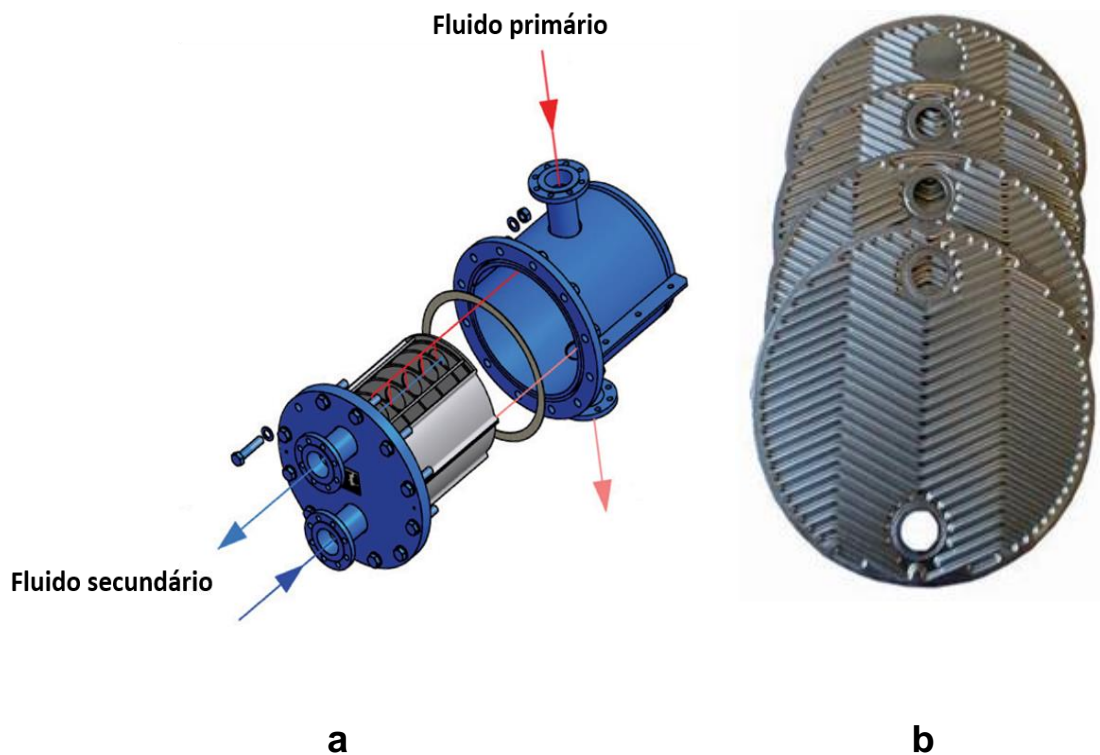


Figura 12: (a) Visão externa e interna do trocador de calor. As setas vermelhas representam o fluido primário e as setas azuis representam o fluido secundário. (b) Placas trocadoras de calor (SONDEX A/S, 2017).

2.3.1.2 Direção, sentido e circuito do fluxo dos fluidos

Este permutador de calor apresenta flexibilidade com relação à direção e sentido do fluxo dos fluidos. Como pode ser visto na Figura 13, o trocador pode operar com (a) contra corrente, (b) corrente paralela ou com (c) corrente cruzada. Diferente do comentado na sessão anterior, **sessão 2.3.1.1**, observa-se agora a presença do fluido primário em azul e o fluido secundário em vermelho. A Figura 13(a) corresponde à disposição mais utilizada, mas apresenta alta queda de pressão. Já na Figura 13(b), os fluxos paralelos fazem com que a queda de pressão diminua além de poder ser usada quando a diferença de temperatura dos fluidos na entrada for máxima. Por fim, a Figura 13(c) mostra a corrente cruzada que pode ser usada no caso de o fluido primário apresentar maior taxa de volume de fluxo comparada com o fluido secundário (MINEA, 2012).

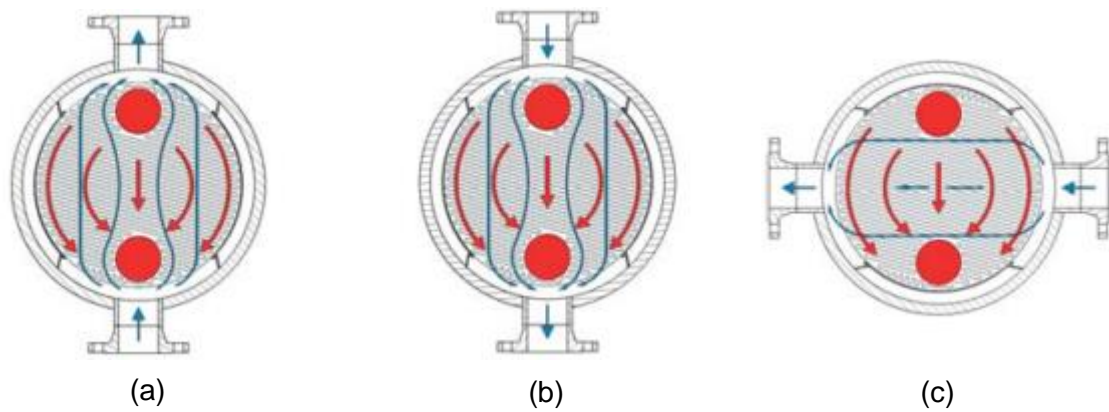


Figura13: Direção e sentido dos fluidos dentro do trocador de calor (a) contra corrente, (b) corrente paralela e (c) corrente cruzada (GESMEX GmbH, 2017) (adaptado).

O SPHE permite diferentes arranjos do circuito pelo qual os fluidos irão percorrer devido à possibilidade de se construir a sua estrutura com diferentes tamanhos e diferentes posições da entrada e saída dos fluidos. O número de vezes que os fluidos irão percorrer as placas irá depender do fluxo de massa, da queda de pressão permitida e do conjunto de temperaturas. A Figura 14 mostra a disposição dos arranjos possíveis. Na Figura 14(a) ambos os fluidos apresentam apenas uma passagem pelo trocador de calor e este arranjo se adequa para os casos de grande volume de fluxo pelas aberturas nas tampas, sendo que o fluido secundário contém uma parte entrando e saindo pela lateral esquerda e outra parte entrando e saindo pela lateral direita. Na Figura 14(b) o fluido primário apresenta uma passagem e fluido secundário duas passagens e este arranjo é adequado para fluxos volumétricos muito diferentes nas aberturas do casco cilíndrico e nas tampas. Na Figura 14(c) o fluido primário faz três passagens e o secundário duas passagens e o arranjo se adequa para a otimização da perda de pressão e da taxa de transferência nas aberturas do casco e das tampas (MINEA, 2012).

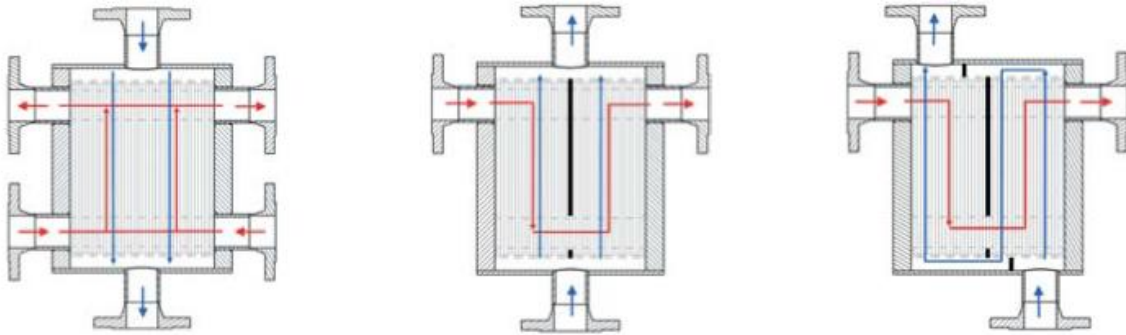


Figura 14: Possíveis arranjos dos circuitos dos fluidos (a) uma passagem para ambos os fluidos, (b) fluidos primário tem uma passagem e fluido secundário tem duas passagens e (c) fluido primário tem três passagens e fluido secundário tem duas passagens (GESMEX GmbH, 2017) (adaptado).

2.3.1.3 Vantagens

Como dito na **seção 2.3.1** os trocadores de calor casco e placa reúnem os benefícios dos trocadores de placa e dos trocadores casco e tubo. Além disso, o design do SPHE é um fator determinante para que algumas de suas propriedades façam prevalecer o seu uso sobre outros trocadores. Mesmo tendo a metade do tamanho de um trocador casco e tubo, o SPHE pode ser usado em tarefas semelhantes e com maior eficiência de transferência de calor devido às ondulações nas placas. Estas ondulações também permitem que as placas fiquem livres de descamação e incrustação por mais tempo do que o fluxo laminar em STHE, pois possibilitam um fluxo turbulento, mesmo a baixas velocidades. A forma circular das placas faz com que o SPHE seja vantajoso quando comparado com os trocadores de calor soldados com placas retangulares/quadradas, pois a não existência de cantos soldados diminui a susceptibilidade de falhas por fadiga. Outra vantagem é a possibilidade do trocador casco e placa poder trabalhar com altas temperaturas e pressões também decorrente de seu design e do mecanismo de solda utilizado nas placas, solda a laser. Este leva à formação de curtas zonas termicamente afetadas e não formação de poros (GAVELIN; AB, 2009; MINEA, 2012).

2.4 Fadiga

2.4.1 Teoria

Segundo DIETER, G.E., 1981, “um metal submetido a uma tensão repetida ou flutuante romperá a uma tensão muito inferior àquela necessária para ocasionar fratura devido à aplicação de uma carga estática. As falhas mecânicas decorrentes destas condições de carregamento dinâmico são chamadas falhas por fadiga, em virtude de serem observadas geralmente após um período de serviço considerável”.

São muitos os fatores causadores de falhas por fadiga, como concentração de tensão, corrosão, sobrecarga, temperatura, tensões combinadas, tensões residuais e estrutura metalúrgica. No entanto, os fatores básicos para a sua ocorrência são:

- Número de ciclos de aplicação da tensão suficientemente grande;
- Tensão de tração máxima suficientemente grande;
- Variação ou flutuação na tensão aplicada suficientemente grande.

2.4.2 Fases do processo

Existem casos em que materiais, equipamentos ou peças possuem a formação de trincas devido a defeitos de fabricação ou pelo uso. Pode-se citar, como exemplos de possíveis causadores destes defeitos, processos de soldagem, forjamento, fundição, tratamentos térmicos inadequados, entre outros. No entanto, no caso de peças sem defeitos oriundos das causas citadas anteriormente, pode ocorrer a nucleação de trincas em regiões com elevadas tensões seguida da propagação da trinca e ruptura da estrutura.

2.4.2.1 Nucleação da trinca

A nucleação de trincas de fadiga tem origem, geralmente, em superfícies livres, mas quando se iniciam no interior do material, surgem em ou próximas a interfaces. A nucleação representa 90% da vida à fadiga e é o processo de acúmulo de deformações

plásticas originando a formação de planos de deslizamento, onde as discordâncias se movimentam sob ação de tensões cisalhantes.

Com a continuação da sollicitação mecânica no objeto de estudo, novos planos de deslizamento se formam para acomodar a novas deformações plásticas que estão acontecendo no material. Um conjunto destes planos irá formar uma banda de deslizamento. Estes deslizamentos cíclicos darão origem a reentrâncias na superfície do material de dois tipos, intrusões e extrusões, formando pontos concentradores de tensão e, conseqüentemente, microtrincas que se propagam no momento em que atingem o tamanho mínimo necessário.

2.4.2.2 Propagação da trinca

Esta etapa pode ser dividida em duas. Na primeira parte a microtrinca, inicialmente, irá se propagar pelas bandas de deslizamento. Neste estágio a trinca possui característica de propagação microscópicas, ou seja, possui dimensões de tamanho de grão, taxa de propagação pequena e é muito sensível às diferentes microestruturas do material, contornos de grão, mudanças de direção dos planos cristalográficos e outros.

Na segunda parte ocorrerá o crescimento da trinca por coalescimento de trincas menores num plano normal ao da máxima tensão de tração no material. A taxa de propagação é maior do que a etapa anterior e é caracterizada pela formação de rugas, estrias de fadiga que representam a posição sucessiva de uma frente de trinca visíveis apenas microscopicamente. Já no nível macroscópico a superfície do material fica caracterizada pelas “linhas de praia” que são marcas devido a alterações no ciclo de tensões.

2.4.2.3 Ruptura da estrutura

A fratura total do material irá ocorrer quando a trinca atinge um tamanho crítico para a continuação da propagação e a seção restante não consegue suportar a carga aplicada.

2.4.3 Propagação da trinca em trocadores de calor do tipo casco e placa

A região de máxima tensão em um trocador de calor do tipo placa soldado é a área soldada que une as placas na região circunferencial interna e na circunferência externa. Estas regiões serão ainda mais propícias à ocorrência de falhas quando a sua geometria é angular levando a maiores concentrações de tensão. Desta forma, trocadores de calor de placas tradicionais cujas placas são retangulares ou quadradas possuem menos resistência a trincas por fadiga do que aqueles que utilizam placas circulares, como o SPHE. Mesmo assim estes trocadores ainda estão submetidos à falha por fadiga térmica e/ou por pressão (GAVELIN; AB, 2009).

Testes feitos pela fabricante Tranter International AB foram realizados para entender a capacidade do trocador casco e placa em suportar variações termomecânicas semelhantes às que ocorrem em campo, localizar as regiões mais fracas no equipamento e identificar o modo de falha. Estes testes só geram resultados das áreas soldadas e, por isso, não são reconhecidos por nenhuma norma, uma vez que não contemplam toda a montagem.

O teste, portanto, submeteu uma pilha de placas circulares a dezenas de milhares de ciclos com oscilações de pressão relativamente de alta frequência. Além disso o trocador de calor foi exposto a pressões flutuantes e diferenciais de 5 a 10 bar. Os resultados ainda estão sob sigilo do fabricante, mas sabe-se que a maioria dos equipamentos submetidos aos testes podem suportar variações de temperatura de mais de 150° C durante vários milhares de ciclos (GAVELIN; AB, 2009).

Na Figura 15, a seguir, as imagens correspondem ao trocador de calor do tipo casco e placa. A Figura 15 mostra o início de uma trinca na região de solda em uma amostra; a Figura 16 mostra a propagação da trinca já em estado avançado; na Figura 17 pode-se ver a solda totalmente rachada e, na Figura 18, a sua propagação por toda a extensão da solda na região circunferencial externa em uma placa trocadora de calor. As figuras não correspondem à mesma amostra.

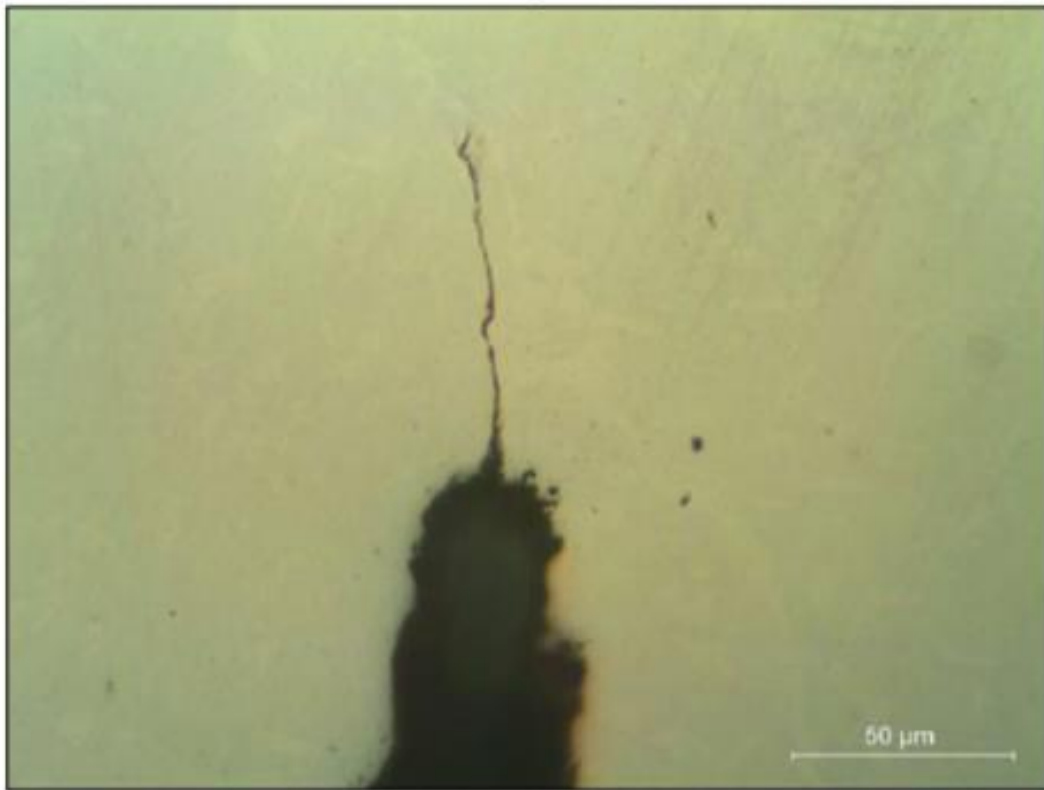


Figura 15: Início da trinca (Tranter, 2017).

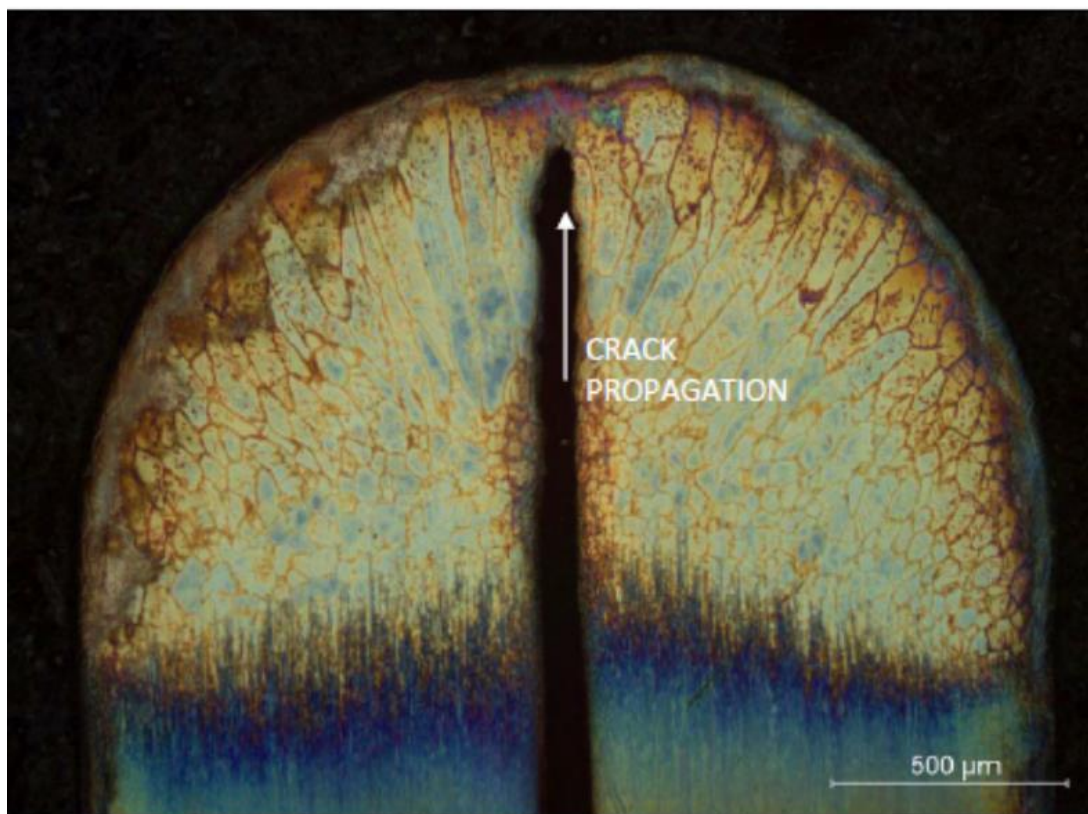


Figura 16: Propagação da trinca (Tranter, 2017).

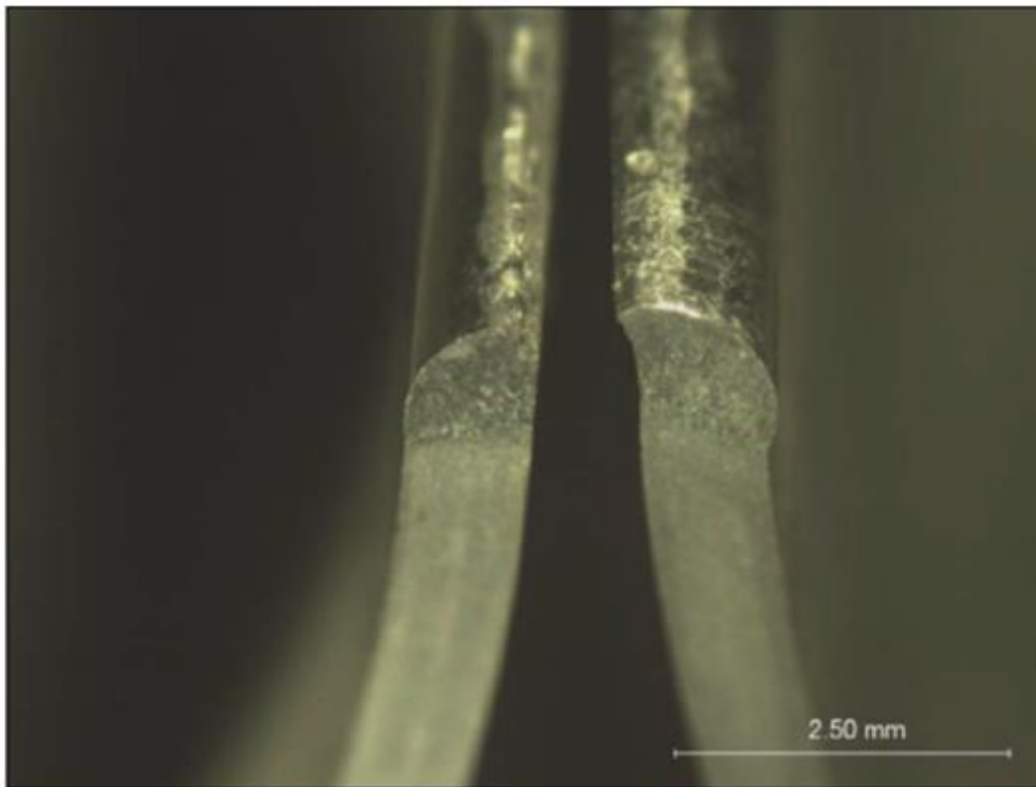


Figura 17: Trinca passante (Tranter, 2017).

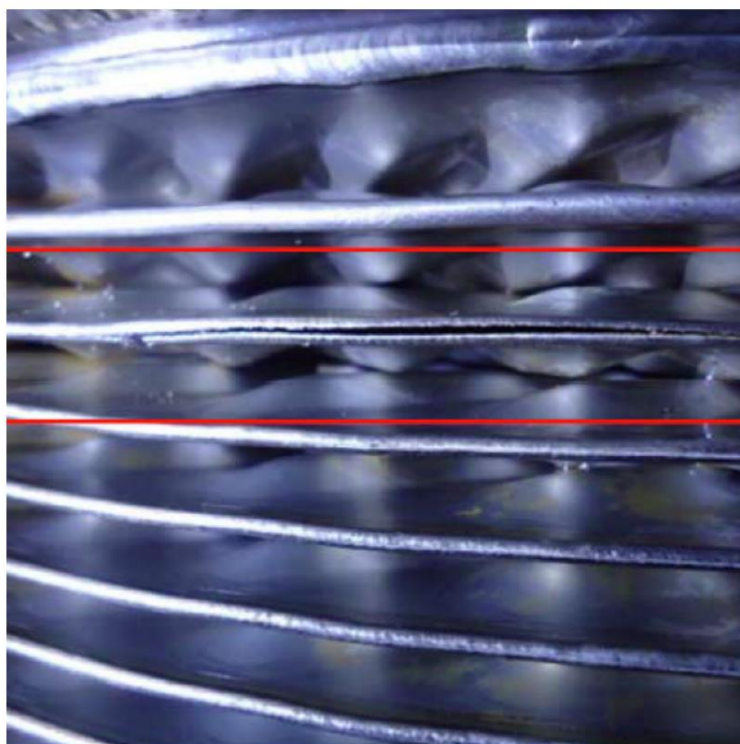


Figura 18: Visão da trinca se propagando ao longo da região soldada (Tranter, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Pilha de placas trocadoras de calor

Uma pilha de placas trocadoras de calor foi doada pela Petrobrás para estudos e realização deste trabalho. As placas contêm diâmetro de 29,5 cm, são de aço AISI 304 e dela foram tirados corpos de prova (CP) para realização da preparação metalográfica, indução de trincas por eletroerosão, caracterização por microscopia óptica e radiografia e, por fim, ensaios por correntes parasitas. A Figura 19(a) mostra a pilha após os cortes por eletroerosão a fio para obtenção dos corpos de prova e pela Figura 19(b) pode-se ver a configuração da pilha formada por duas placas individuais nas extremidades e, entres estas, três pares de placas soldadas.



a



b

Figura 19: (a) pilha após os cortes por eletroerosão por penetração a fio e (b) pilha formada por duas placas individuais e três pares de placas soldadas.

3.1.2 Corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados da pilha de placas por eletroerosão a fio. Foram obtidos 6 corpos de prova de 11 cm de comprimento, 1,46 cm de altura no ponto mais baixo e 2,45 cm de altura no ponto mais alto, como pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: Corpo de prova cortado por eletroerosão de uma placa trocadora de calor.

Os CP's foram divididos em três grupos de acordo com o tipo de entalhe realizado:

3.1.2.1 CP 1 – Entalhes internos

Três corpos de prova com entalhes feitos por eletroerosão por penetração com eletrodo de cobre na parte interna do par de placas que visam simular a propagação da trinca que ocorrem de dentro para fora, como observado na Figura 15 e 16. Se diferenciam pela distância d que é a parede remanescente no CP. A Figura 21 é uma representação geral do CP 1, mas os entalhes e suas respectivas medidas da parede remanescente podem ser vistas e melhor compreendidas na **sessão 3.5.2**.

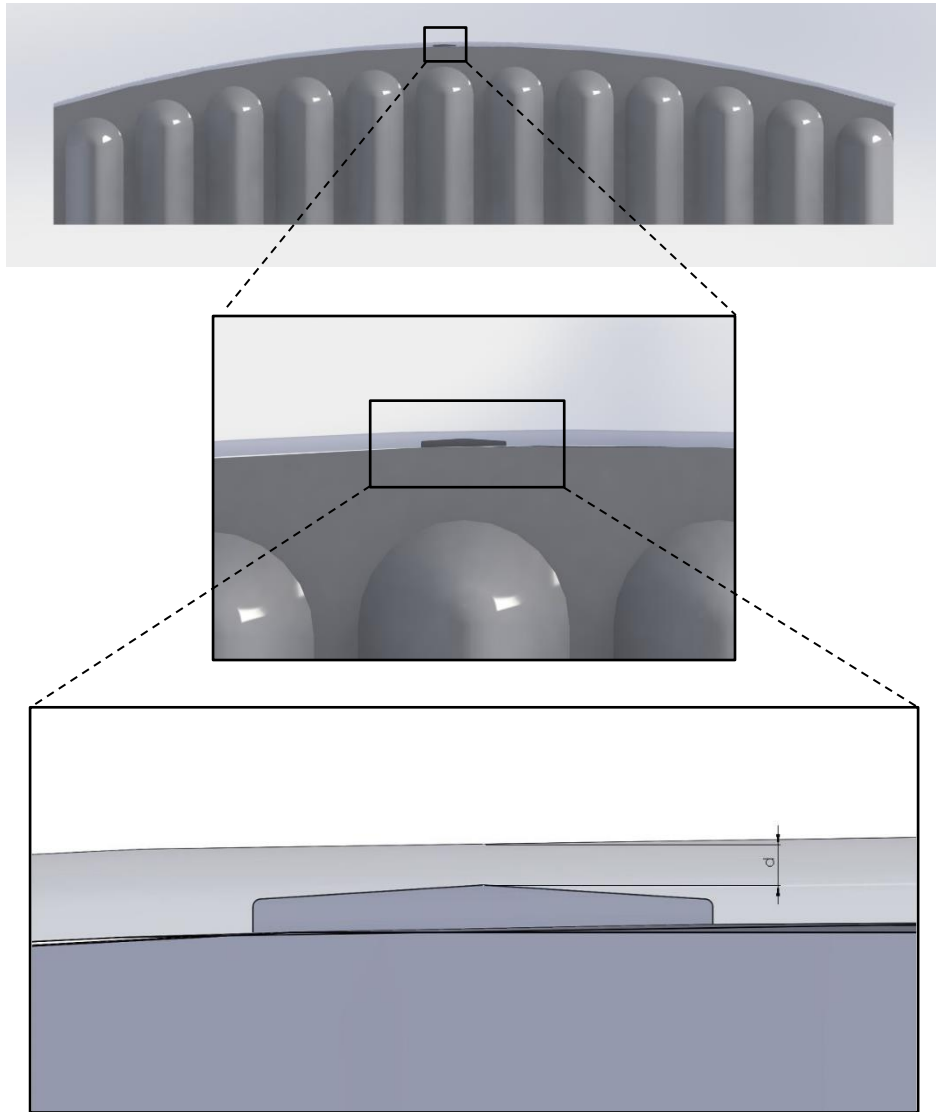


Figura 21: Representação do entalhe interno no CP 1 e distância **d** (parede remanescente).

3.1.2.2 CP 2 – Entalhes transversais externos

Dois corpos de prova com entalhes transversais externos feitos por eletroerosão por penetração a fio, sendo que cada um possui três entalhes de diferentes profundidades visando simular a propagação da trinca que ocorrem na região soldada. Na Figura 22 a representação do CP 2.1 apresenta os entalhes de números 4,5 e 6 e suas medidas são, respectivamente, 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm de profundidade. Na Figura 23 a representação CP 2.2 apresenta os entalhes de números 7,8 e 9 e suas medidas são, respectivamente, 0,5 mm, 0,8 mm e 1,0 mm de profundidade. Todos os entalhes possuem a mesma largura.

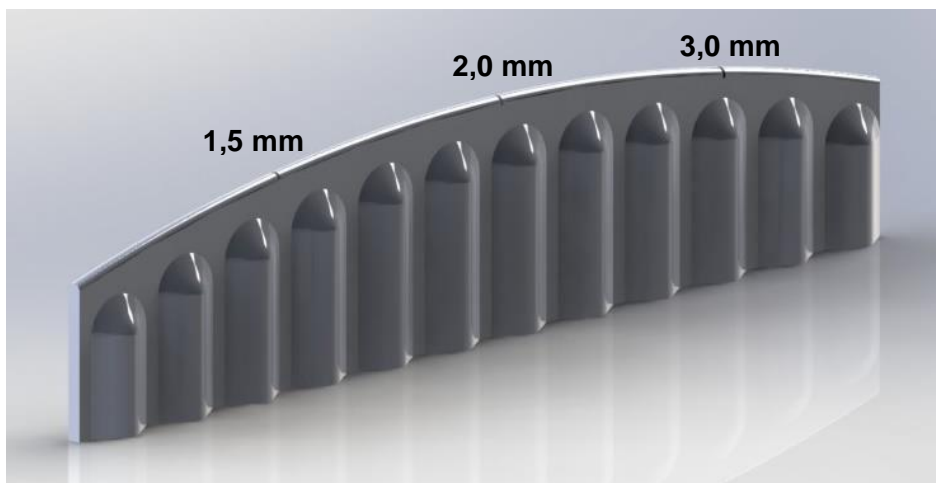


Figura 22: Representação do CP 2.1 e seus entalhes transversais externos de 1,5 mm, 2,0 mm e 3,0 mm.

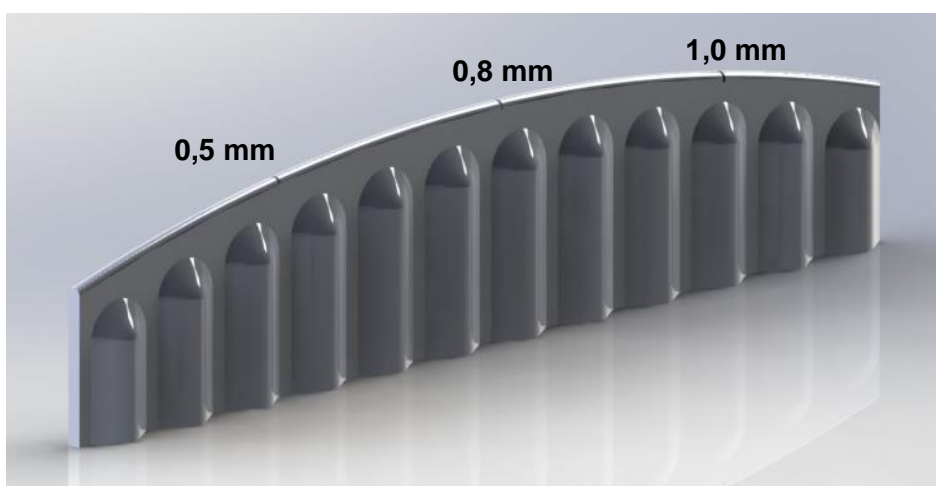


Figura 23: Representação do CP 2.2 e seus entalhes transversais externos de 0,5 mm, 0,8 mm e 1,0 mm.

3.1.2.3 CP 3 - Entalhe longitudinal externo

Um corpo de prova com entalhe longitudinal externo passante feito por eletroerosão por penetração com eletrodo de cobre de comprimento 4,60 mm que visa simular a propagação da trinca que ocorre na região soldada, como observado na Figura 18. Na Figura 24 a representação do CP 3 com o entalhe de número 10 de 4,60 mm de comprimento.

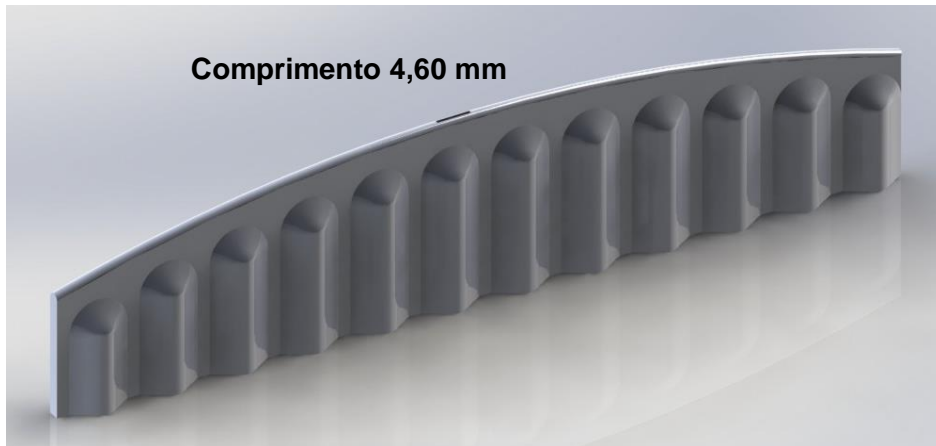


Figura 24: Representação do CP 3 e seu entalhe longitudinal de 4,60 mm de comprimento.

3.2 Suporte para os corpos de prova e sonda

Com o intuito de trabalhar com os corpos de prova todos juntos, um suporte de polímero de filamento PLA, diâmetro de 1,75 mm e temperatura de fundição de 170° a 200°C foi impresso em uma impressora 3D da marca 3D Machine Prusa Air, como pode ser visto na Figura 25. Com este suporte pode-se simular os espaços entre as placas em condições reais e desta forma desenvolver e testar sondas que poderiam ser usadas em inspeções em campo.

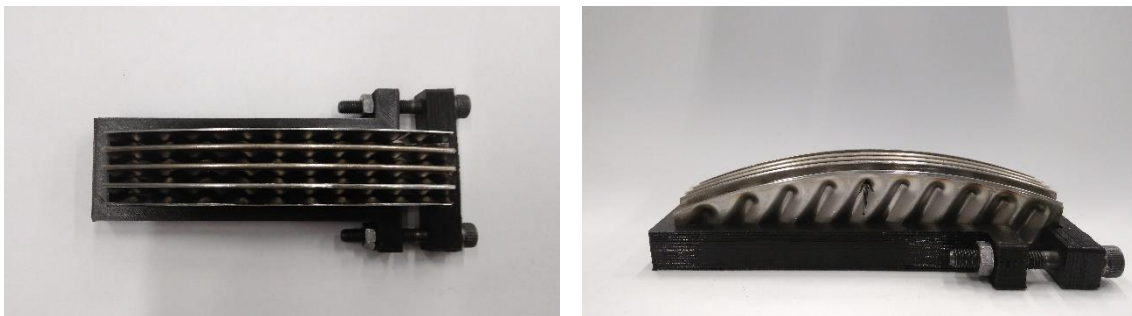


Figura 25: Suporte para os corpos de prova em vista superior e lateral.

Para melhorar a estabilidade e garantir que a sonda ficasse acoplada na direção normal à superfície a ser varrida, um suporte também foi fabricado na mesma máquina 3D e com o mesmo polímero citado acima. A base do suporte contém dentes para facilitar a movimentação sob as placas. O suporte pode ser visto na Figura 26.



Figura 26: Suporte para a sonda em vista frontal.

3.3 Sondas testadas

Foram testadas três sondas absolutas, sendo duas delas fabricadas no laboratório de Ensaios Não Destrutivos (END) no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC) e uma comercial.

3.3.1 Sondas absolutas desenvolvidas

Foram desenvolvidas duas sondas em laboratório que propiciassem a varredura específica de toda a extensão da região da solda dos corpos de prova, ou seja, tanto o topo quanto as superfícies laterais.

3.3.1.1 Sonda 1

A Figura 27 mostra a sonda 1 com 700 voltas, espessura de 2,42 mm, diâmetro de 13,96 mm e fio de cobre AWG 39 da marca Elektrisola embobinado ao redor de um núcleo de ar. Ela foi dobrada manualmente no meio para se conformar com a geometria curva da região soldada do corpo de prova.

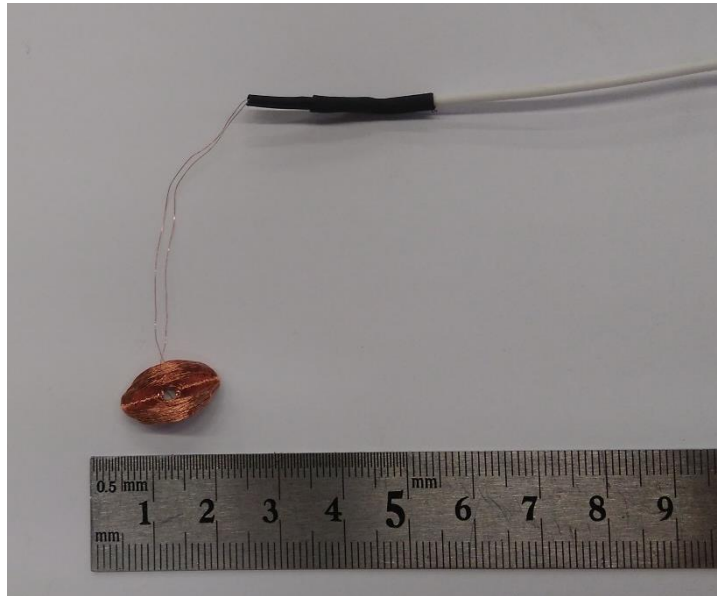


Figura 27: Sonda 1 construída com 700 voltas.

3.3.1.2 Sonda 2

A Figura 28 mostra a sonda 2 com 1000 voltas, espessura de 3,0 mm, diâmetro de 15,75 mm e fio de cobre AWG 39 da marca Elektrisola. A superfície lateral da bobina foi dobrada manualmente para se conformar com a geometria curva da região soldada do corpo de prova.

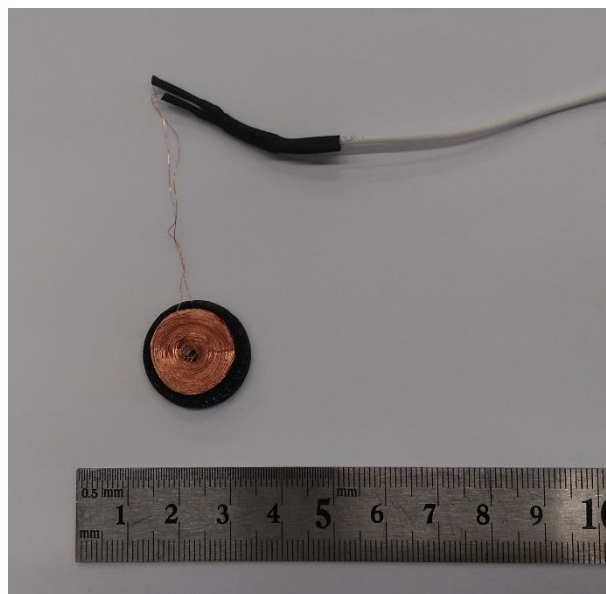


Figura 28: Sonda 2 construída com 1000 voltas.

3.3.2 Sonda absoluta comercial

O sensor comercial testado foi da fabricante ZETEC modelo DT 30PS com faixa de operação de 50-500 kHz. Esta sonda foi escolhida devido ao diâmetro externo da bobina (três mm) que se encaixaria na inspeção das regiões soldadas das placas trocadoras de calor e devido à sua faixa de frequência abranger os valores de frequência que interessavam para a realização dos ensaios.

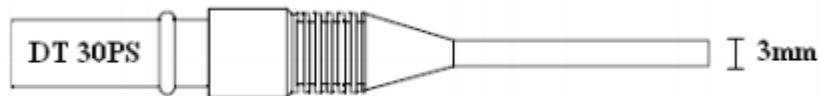


Figura 29: Sonda absoluta ZETEC DT 30PS testada.
Fonte: (CAMERINI, 2012)

3.4 Preparação metalográfica

Com o objetivo de melhor compreensão da região da solda nos CPs, foi utilizado uma amostra retirada da seção transversal de um corpo de prova para a realização de uma preparação metalográfica que pode ser visualizado na Figura 30. A preparação da superfície seguiu as etapas seguintes:

- a) Embutimento: pelo fato da amostra ser difícil manuseio, o seu embutimento foi necessário. A amostra foi embutida em resina com endurecedor epóxi 51 na proporção de 10:1.
- b) Lixamento: foram utilizadas lixas com granulometria decrescente para se atingir uma superfície progressivamente mais plana. As lixas utilizadas em ordem sequencial foram 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500 com rotação de 90° ao mudar de lixa.
- c) Polimento: com a finalidade de eliminar risco e atingir uma superfície espelhada, foi feito polimento mecânico com a utilização de pano 3 μm e pasta de diamante em suspensão 3 μm como abrasivo da marca Struers.
- d) Ataque químico: o ataque teve como finalidade apenas a revelação da região soldada. O eletrólito escolhido para ataque foi uma solução de ácido oxálico 10% e o potencial aplicado foi de 5v por 1 segundo.



Figura 30: Amostra após a preparação metalográfica.

3.5 Caracterização

As técnicas de caracterização foram utilizadas para se ter melhor resolução das regiões de interesse de estudo do material utilizado e dos entalhes posteriormente fabricados.

3.5.1 Microscopia óptica

Após o ataque químico a amostra foi levada ao Microscópio Óptico ZEISS Axio Imager acoplado com capturador de imagens e software de processamento AxioVision SE64 Rel. 4.9.1 que se encontra na sala de microscopia no LNDC. O objetivo foi revelar a superfície da amostra dando-se destaque para a região da solda e o ponto o triplo formado pela região soldada e as duas placas trocadoras de calor que poderá ser visualizada na **seção 4.1**.

3.5.2 Radiografia

Usou-se a caracterização radiográfica a fim de observar o local e as dimensões dos entalhes do grupo CP 1. Como os entalhes não são visíveis a olho nu, a radiografia permitiria confirmar se os entalhes foram usinados conforme as medidas previamente escolhidas. Como mencionado na **sessão 3.1.2.1**, através das radiografias a seguir pode-se compreender como foram feitos os entalhes internos e suas respectivas medidas **d** (parede remanescente). A caracterização foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) na UFRJ.

Na Figura 31 a representação do CP 1.1 apresenta o entalhe de número 1 com seu valor d de 0,54 mm. Na Figura 32 a representação do CP 1.2 apresenta o entalhe de número 2 com seu valor d de 0,86 mm. Por fim, na Figura 33 a representação do CP 1.3 apresenta o entalhe de número 3 com seu valor d de 1,54 mm.

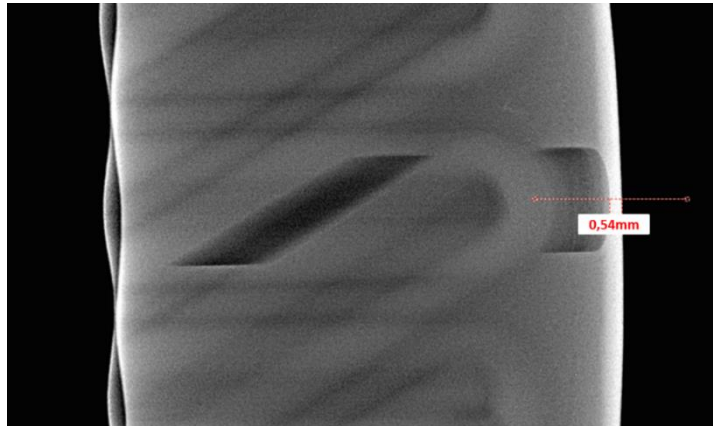


Figura 31: Radiografia do CP 1.1 com $d = 0,54\text{mm}$.

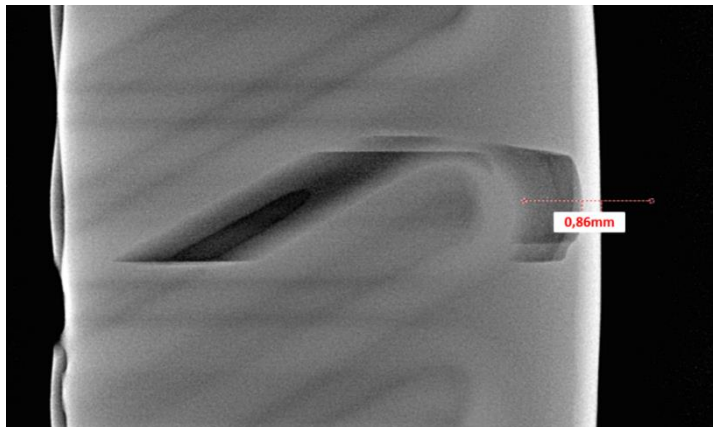


Figura 32: Radiografia do CP 1.2 com $d = 0,86\text{mm}$.

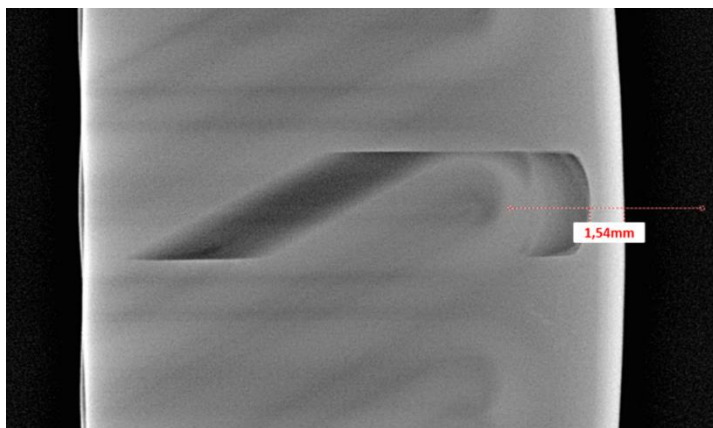


Figura 33: Radiografia do CP 1.3 com $d = 1,54\text{mm}$.

3.6 Correntes parasitas e tratamento dos dados

Através da Equação 5, **sessão 2.1.3.1**, foi definida a frequência para a profundidade que se desejava analisar segundos critérios que serão melhores vistos em Resultados e Discussões. Os valores das constantes utilizadas no cálculo da profundidade são condutividade elétrica (σ) = $1,37 \times 10^6$; permeabilidade magnética absoluta (μ) = $1,25 \times 10^{-6}$ e permeabilidade magnética relativa (μ_r) = 1,025. A calibração foi sempre feita na peça.

A inspeção com correntes parasitas foi realizada no equipamento OmniScan MX ECA da fabricante Olympus. Junto a este equipamento, foi utilizado um osciloscópio para extrair os sinais de varredura dos ensaios realizados. Como os dados digitalizados pelo osciloscópio não possuíam a mesma qualidade dos dados obtidos no OmniScan MX, foi utilizado o software MATLAB® para o tratamento dos dados e para filtrar os ruídos causados pelo osciloscópio.

Juntando-se os arquivos do osciloscópio com os arquivos dos MATLAB® gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (XI) vs. Tempo (s) foram plotados e filtrados com um filtro média móvel para eliminar os ruídos de alta frequência.

A Figura 34 mostra a montagem utilizada durante os ensaios por corrente parasitas.

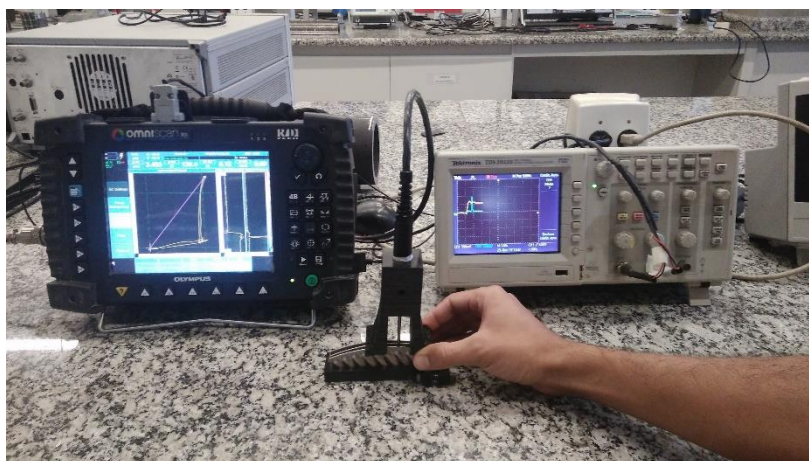


Figura 34: Montagem utilizada durante os ensaios por corrente parasitas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Metalografia

A imagem obtida da preparação metalográfica foi de grande auxílio para o conhecimento sobre a espessura da solda e, conseqüentemente, para a definição das profundidades e comprimentos dos entalhes induzidos nos três grupos de corpos de prova. Procurou-se gerar entalhes que ficassem dentro da região da solda, atravessando toda a sua espessura ou atravessando parte de sua espessura.

Através da Figura 35 pode-se visualizar que a região da solda ficou bem definida após o ataque. Sua espessura na região central é de aproximadamente 0,75 mm, em vermelho na figura. Além disso, a imagem mostra o ponto triplo, ou seja, o ponto da junção final entre as duas placas e o começo da solda onde há concentração de tensão e onde se originam as trincas por fadiga que irão se propagar de dentro para fora, como explicado e visto pelas figuras da **sessão 2.3.1.2**.

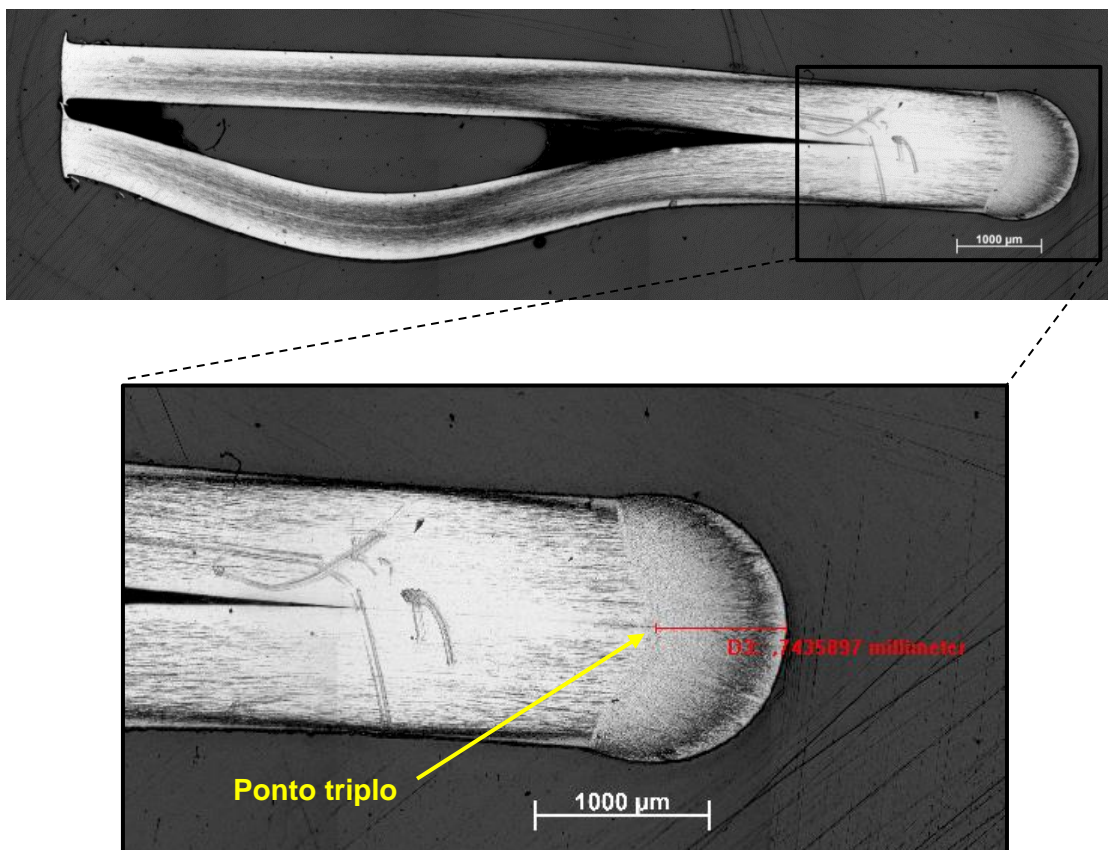


Figura 35: Imagem feita por microscopia óptica da seção transversal da amostra retirada de um corpo de prova após preparação metalográfica. Em zoom pode-se ver o dimensionamento da solda e o ponto triplo.

4.2 Sondas

Devido às características da superfície dos corpos de prova a serem analisados, ou seja, uma superfície curva e com estreita área disponível para ensaio por correntes parasitas procurou-se desenvolver sondas que pudessem ter um razoável acoplamento com essas superfícies.

As duas sondas absolutas desenvolvidas no laboratório (**sessão 3.3.1**) foram construídas com número elevado de voltas, sonda 1 com 700 voltas e sonda 2 com 1000, com a finalidade de se obter elevada indutância, alta resposta em baixas frequências e, por fim, alta profundidade de penetração das correntes parasitas. No entanto, não foi possível conseguir um bom acoplamento e estabilidade durante a varredura dos CPs, conseqüentemente, não foi possível a identificação de nenhum dos entalhes e ambas as sondas fabricadas não foram utilizadas no seguimento do trabalho.

A sonda comercial ZETEC DT 30PS foi, portanto, estudada e utilizada no prosseguimento do trabalho. Sua faixa de frequência (50 – 500 kHz) se adequa às frequências de estudo do projeto, mas ainda não possuía o acoplamento ideal com as superfícies dos CPs. No entanto, foi possível a identificação de ótimos sinais dos entalhes. Para aumentar a estabilidade do conjunto sonda e corpo de prova, o suporte dos CPs e da sonda foram de grande benefício para a obtenção dos resultados. Na Figura 36 é possível ver o conjunto (suportes, sonda comercial e CPs) utilizado na obtenção de todos os sinais por correntes parasitas.



Figura 36: Montagem utilizada nos ensaios por correntes parasitas.

4.3 Corpos de prova

O primeiro grupo de corpos de prova, o CP 1, contém os primeiros entalhes feitos e analisados com o intuito de representar a propagação da trinca em condições reais, ou seja, a propagação de dentro para fora da placa através da solda e com origem no ponto triplo. Estes entalhes foram feitos no primeiro grupo e podem ser visualizados na **sessão 3.5.2**. Tanto as sondas desenvolvidas como a sonda comercial foram utilizadas na varredura do CP 1, porém não houve detecção de nenhum dos três entalhes.

No segundo e no terceiro grupo, CP 2 e CP 3, foram usinados entalhes externos e que pudessem simular a trinca já em estado avançado. Os entalhes transversais e longitudinal passante foram todos identificados com a utilização da sonda comercial e os sinais foram bem nítidos.

4.4 Correntes parasitas

Os parâmetros de operação utilizados nas varreduras por correntes parasitas no OmniScan MX estão apresentados na Tabela 1. Com a utilização da Equação 5 presente na **sessão 2.1.3.1** e das constantes citadas na **sessão 3.6**, a frequência de 120 kHz foi obtida e considerada um valor que pudesse abranger uma profundidade de penetração padrão, 1,23 mm, adequada para a obtenção dos sinais. Na Tabela 2 estão definidos os corpos de prova e o dimensionamento dos seus respectivos entalhes.

Tabela 1: Parâmetros de operação usados varreduras por correntes parasitas no OmniScan MX.

Parâmetros de operação	
Frequência (kHz)	120
Alimentação (V)	4
Ganho (dB)	40
Rotação (°)	139
Ganho Vertical (dB)	5

Tabela 2: Definição dos corpos de prova e o dimensionamento dos seus respectivos entalhes.

Grupo	CP	Entalhes	Valores (mm)	Tipo de medida
CP 1	1.1	1	0,54	d
	1.2	2	0,86	
	1.3	3	1,54	
CP 2	2.1	4	1,50	profundidade
		5	2,00	
		6	3,00	
	2.2	7	0,50	
		8	0,80	
		9	1,00	
CP 3	3	10	4,60	comprimento

Como resultado das medidas no OmniScan MX, as figuras abaixo mostram os planos de impedância dos entalhes descritos na Tabela 2, onde foi possível detectar todos os entalhes externos. As Figuras 37 (a), (b), (c) são do CP 2.1 e ilustram, respectivamente, os planos de impedância dos entalhes 4,5 e 6. As Figuras 38 (a), (b), (c) são do CP 2.2 e ilustram, respectivamente, as dos entalhes 7,8 e 9. A Figura 39 é do CP 3 e ilustra a do entalhe 10. Em todos eles o sinal é bem nítido assim como os picos identificados na componente indutiva.

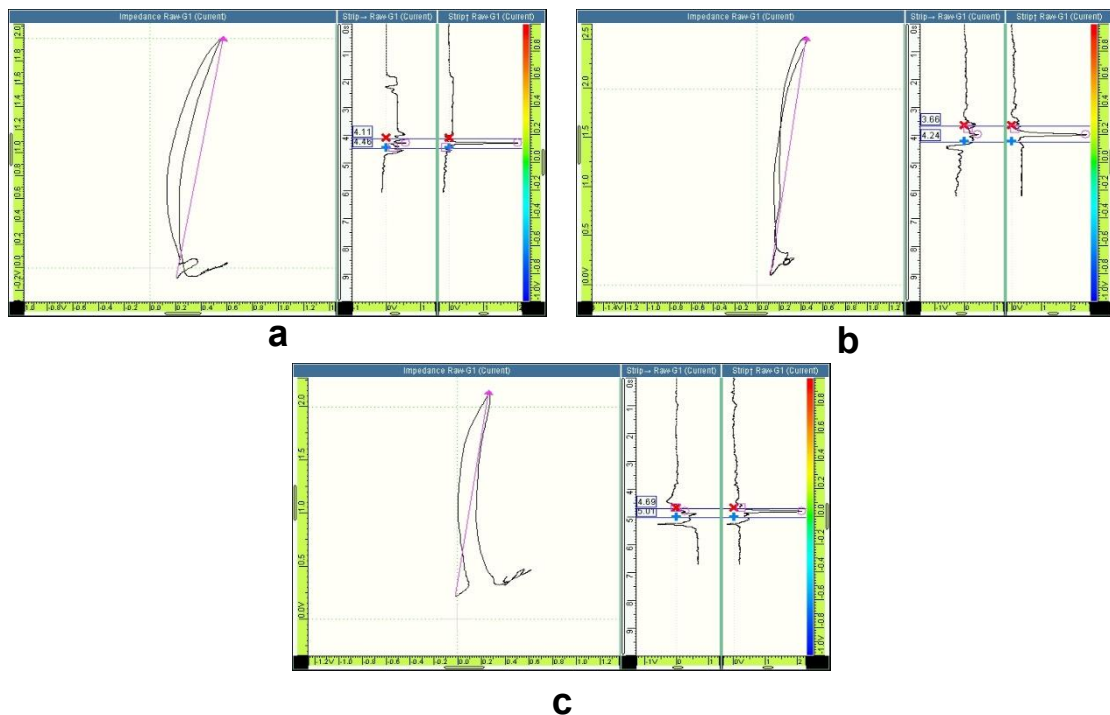


Figura 37: Plano de impedância do (a) entalhe 4 de 1,5 mm, (b) entalhe 5 de 2,0 mm e (c) entalhe 6 de 3,0 mm de profundidade.

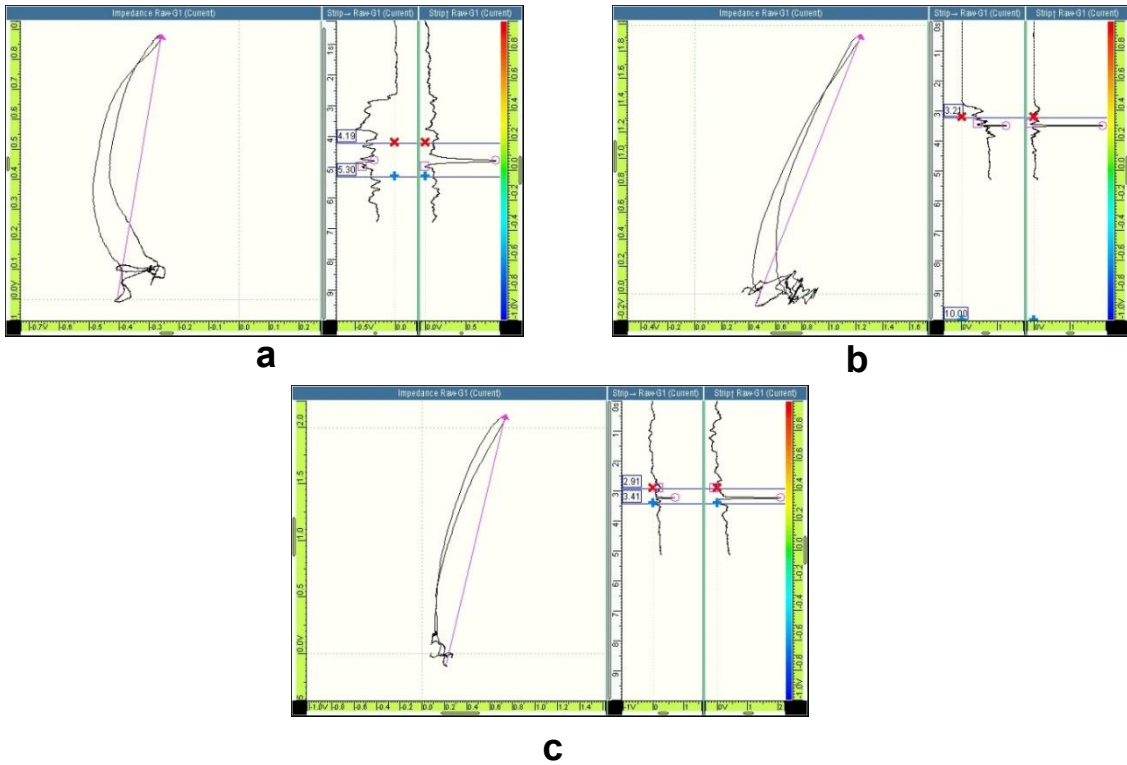


Figura 38: Plano de impedância do (a) entalhe 7 de 0,5 mm, (b) entalhe 8 de 0,8 mm e (c) entalhe 9 de 1,0 mm de profundidade.

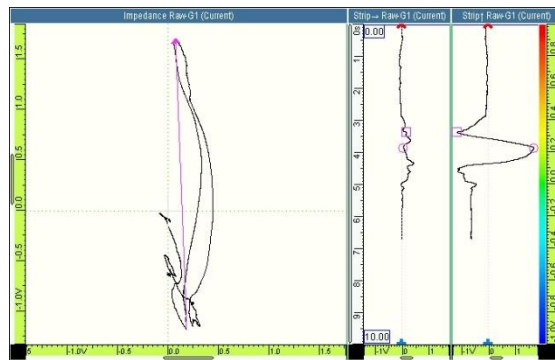


Figura 39: Plano de impedância do entalhe 10 de 4,6 mm de comprimento.

Os gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (X_L) vs. Tempo (s) gerados pelo OmniScan MX tiveram os ruídos filtrados e podem ser vistos abaixo. As Figuras 40 (a), (b), (c) correspondem, respectivamente, aos entalhes 4,5 e 6. As Figuras 41 (a), (b), (c) correspondem, respectivamente, aos entalhes 7,8 e 9. A Figura 42 corresponde entalhe 10.

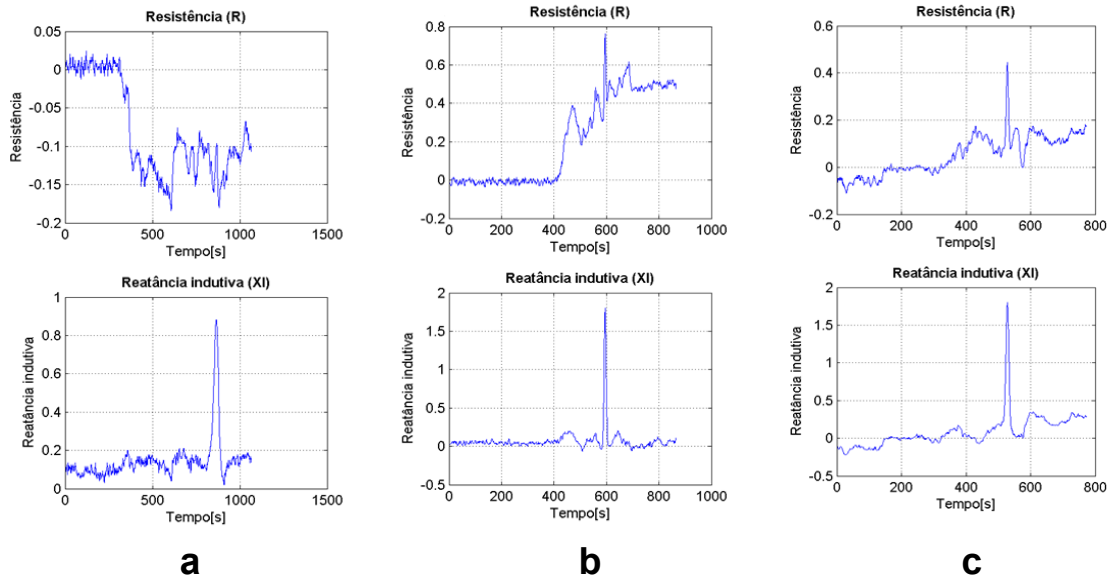


Figura 40: Gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (XI) vs. Tempo (s) do entalhe 4 de 1,5 mm, (b) entalhe 5 de 2,0 mm e (c) entalhe 6 de 3,0 mm de profundidade.

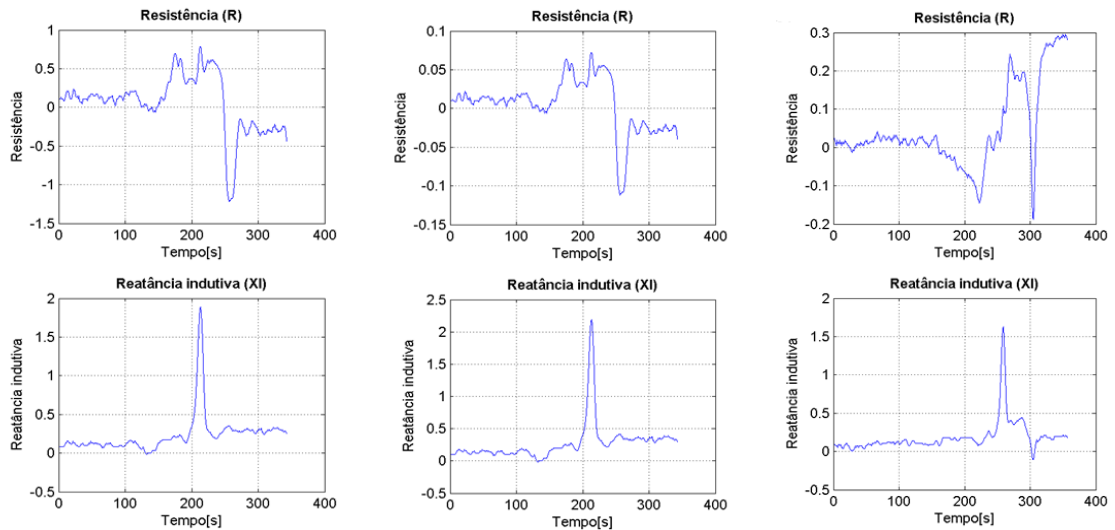


Figura 41: Gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (XI) vs. Tempo (s) do (a) entalhe 7 de 0,5 mm, (b) entalhe 8 de 0,8 mm e (c) entalhe 9 de 1,0 mm de profundidade.

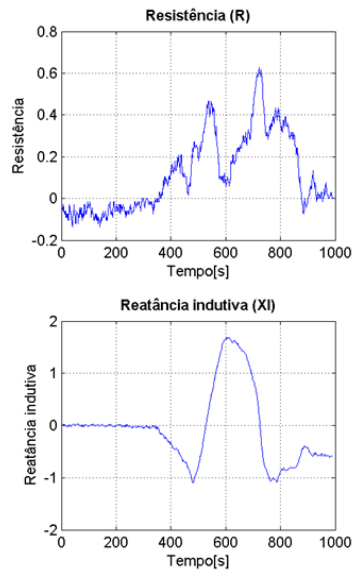


Figura 42: Gráficos de Resistência (R) vs. Tempo (s) e Reatância Indutiva (XI) vs. Tempo (s) do entalhe 10 de 4,6 mm de comprimento.

Através dos dados de amplitude e fase adquiridos foram calculadas as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação oriundos de 5 ensaios em cada entalhe. Contudo, somente serão apresentados os cálculos para os grupos de corpos de prova CP 2 e CP 3, como explicado na **sessão 4.3**. A Tabela 3 apresenta os resultados da inspeção por correntes parasitas.

Tabela 3: Valor médio (X), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) da amplitude e da fase dos valores obtidos pelo OmniScan MX no ensaio de correntes parasitas.

		Correntes parasitas convencional					
		Amplitude			Fase		
Grupo	Entalhes	X (V)	σ (V)	CV (%)	X (°)	σ (°)	CV (%)
CP 2	4	2,109	0,026	1,21	99,900	1,100	1,10
	5	2,173	0,183	8,44	99,140	2,298	2,32
	6	2,023	0,051	2,53	96,040	2,150	2,24
	7	0,913	0,042	4,57	99,080	3,140	3,17
	8	2,074	0,063	3,05	110,320	0,716	0,65
	9	2,226	0,069	3,11	108,260	3,180	2,94
CP 3	10	2,931	0,039	1,33	87,03	0,807	0,93

Os resultados não mostraram diferenças significativas entre os valores de amplitude e entre os valores de fase e nem uma sequência dependente ou proporcional aos valores dos entalhes que nos permitissem obter dados para dimensionamento dos entalhes.

5 CONCLUSÃO

O trabalho consistiu de uma pesquisa pioneira com relação à detecção de descontinuidades neste tipo de trocador. A dificuldade de encontrar referências sobre este tipo de pesquisa na literatura se tornou um grande desafio para o entendimento e formulação de uma técnica para detecção das trincas bem como para o entendimento do funcionamento do equipamento trocador de calor. No entanto, conclusões relevantes foram obtidas deste trabalho.

A análise metalográfica da amostra retirada de um dos corpos de prova viabilizou a escolha do local, profundidade e comprimento dos entalhes que deveriam ser feitos na região da solda a fim de simular as falhas que ocorrem em situação real bem como a visualização do ponto triplo, onde se forma trincas levando à falha do equipamento por fadiga térmica e/ou por pressão.

As sondas desenvolvidas em laboratório não possibilitaram bom acoplamento entre a sonda e a geometria da peça. A dificuldade de fabricação da bobina por possuírem pequeno diâmetro e espessura foi um limitante para se conseguir bons resultados e uma varredura homogênea dos CPs. No entanto, com a sonda comercial DT 30PS foi possível identificar todos os sinais dos entalhes externos.

Ficou constatado que com a montagem final desenvolvida (suportes construídos, sonda comercial e corpos de prova) e com os parâmetros de operação definidos a técnica de correntes parasitas permite a detecção de entalhes externos em trocadores de calor do tipo casco e placa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar o suporte da sonda permitindo contato mais estável com o corpo de prova.
- Estudar a microestrutura da região soldada para compreender melhor sobre a propagação da trinca em trocadores de calor do tipo casco e placa.
- Desenvolver uma sonda que tenha melhor acoplamento com a geometria do corpo de prova e que permita detectar os defeitos do grupo CP 1.
- Testar o uso da bobina diferencial mostrada na Figura 43 para detecção do entalhe longitudinal externo do grupo CP 3. Durante a inspeção o corpo de prova seria varrido por entre as bobinas e o entalhe estaria perpendicular à densidade do campo magnético possibilitando uma provável identificação do entalhe. No entanto, a distância entre as bobinas precisaria ser estudada para se adequar à geometria do CP.

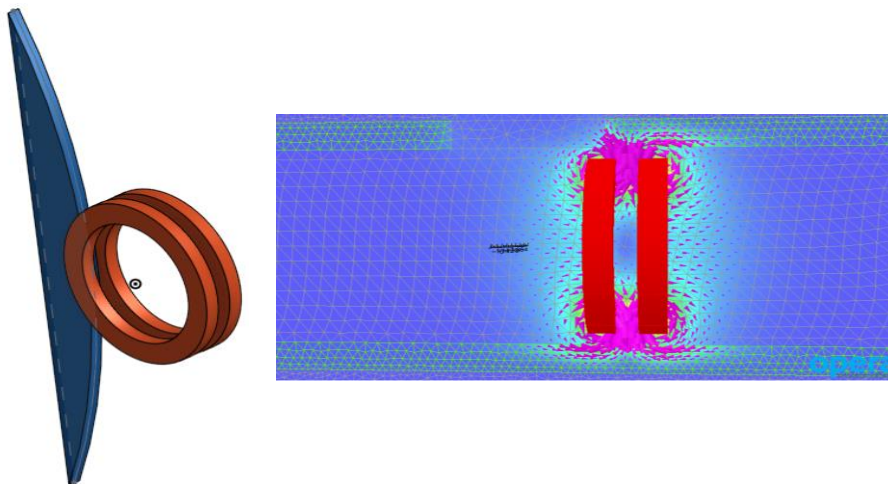


Figura 43: Representação de uma bobina diferencial para possível detecção dos entalhes presentes no grupo CP 3.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. **Nondestructive Evaluation and Quality Control**. ASM Metals Handbook, 1989.

ASM METALS HANDBOOK. **Corrosion**. 9th ed. Materials Park, Ohio, 1987.

CAMERINI, C. G. **Desenvolvimento de Sondas de Correntes Parasitas para Detecção e Quantificação de Fase Sigma em Aço Inoxidável Duplex**. Tese de M. Sc - UFRJ, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. Associação Brasileira de de metais, 2005.

GAVELIN, S.; AB, T. I. Shell and plate, worth the wait. **HYDROCARBON ENGINEERING**, p. 3, 2009.

HANSEN, J. The Eddy Current Inspection Method. **Insight**, v. 46, 2004.

KIM, I.-K.; PARK, J.-H.; KWON, Y.-H.; KIM, Y.-S. Experimental Study on R-410a Evaporation Heat Transfer Characteristics in Oblong Shell and Plate Heat Exchanger. **Heat Transfer Engineering**, v. 28, n. 7, p. 633–639, 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01457630701266454>>. .

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

MATHUR, A. P.; FULMER, J. M. Shell and Plate Heat Exchanger. , 2002. United States.

MCGUIRE F., M. **Stainless Steels for Design Engineers**. 2008.

MINEA, A. A. **Advances in Industrial Heat Transfer**. 1st ed. CRC Press, 2012.

NDT RESOURCE CENTER. Introduction to Eddy Current Testing. Disponível em: <www.ndt-ed.org>. Acesso em: 07/02/2017.

OUTOKUMPU STAINLESS AB. **Handbook of Stainless Steel**. Avesta Research Centre, Sweden: Outokumpu Oyj, 2013.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: Microestrutura e Propriedades**. São Paulo, 1994.

PEREIRA, L. B. **Análise da influência da representação de trincas de fadiga a partir de entalhes de eletroerosão nos sinais de inspeção por correntes parasitas**. Projeto de Graduação - UFRJ, 2014.

PEREIRA, P. A. DE S. **Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis**, 2007. UFRJ.

SHAH, R. K.; SEKULIĆ, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª ed. Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed. Guanabara Dois, 1981.

SOARES, A. **Correntes Parasitas**. 1ª ed. São Paulo: ABENDE, 2005.

STEEL, A. **The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels**. Atlas Steels Technical Department, 2013.

THULUKKANAM, K. **Heat Exchanger Design Handbook**. 2ª ed. CRC Press, 2013.

VAHTERUS. Vahterus Plate & Shell Exchangers.

MORAES, G. B. D. **Avaliação do método de correntes parasitas convencional E SLOFEC para detecção de trincas em aço HP**, 2016, UFRJ.

MÉDIA MOVEL. WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikimedia, 2017. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Média_Móvel>. Acesso em: 10/11/2017.

OLYMPUS. **Detectores de Defectos – OmniScan MX ECA/ECT**. 2006. Disponível em: <www.olympus-ims.com/es/omniscan-eca/>. Acesso em: 12/07/2016.

NELLIGAN, T., CALTERWOOD; C. **Introduction to Eddy Current Testing**. Disponível em: <www.olympus-ims.com/en/eddycurrenttesting/> Acesso em: 12/07/2016.

TRANTER INTERNATIONAL AB. Disponível em:
<<https://www.tranter.com/literature/products/Shell%20and%20Plate%20article%20Sept%202009%20HCE.pdf>> Acesso em 10/05/16

SONDEX A/S. Disponível em:
<<http://www.sondex-usa.com/Files/Billeder/PDF/SAW%20SPS%20enkelt%20sidet2.pdf>>.
Acesso em 23/03/17

GESMEX Gmbh. Disponível em:
< http://www.gesmex.com/files/gesmex_xps_2_e.pdf > Acesso em 23/03/17