

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

PPGE3M

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DE TOFD COM  
VISTAS NO MONITORAMENTO DE TRINCAS DE FADIGA EM TUBOS DE AÇO  
SUPERDÚPLEX

**Marcelo de Freitas Lopes**

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2017

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

PPGE3M

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA ULTRASSÔNICA DE TOFD COM  
VISTAS NO MONITORAMENTO DE TRINCAS DE FADIGA EM TUBOS DE AÇO  
SUPERDÚPLEX

MARCELO DE FREITAS LOPES  
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

**Porto Alegre**

**2017**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Banca Examinadora:

Prof.Dr. Fabiano Dornelles Ramos (IF-Caxias do Sul)

Prof.Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha (IF-Caxias do Sul)

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima (FAURGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a minha mãe, Rejane Viegas de Freitas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio e incentivo dado para realização deste trabalho.

Agradeço ao Eng. Felipe Wu pelo auxílio no aprendizado da técnica de TOFD, além das discussões filosóficas que compartilhamos no período que trabalhamos juntos no LAMEF.

Agradeço aos colegas do grupo GEM (Grupo de Ensaio Mecânicos), principalmente o Eng. Vagner Machado da Costa e o futuro engenheiro Lucas Ranzi pelo auxílio dado para elaboração do trabalho.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

Agradeço ao Professor Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke pela orientação e por todas as oportunidades oferecidas.

E, finalmente, agradeço ao LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS) por fornecer os recursos necessários para realização dos testes.

## SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	14
2.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	Aços Inoxidáveis Superdúplex .....	16
2.2	Princípios básicos da técnica de ultrassom .....	17
2.2.1	Difração das ondas sonoras .....	19
2.2.2	Tempo de Voo da Onda Difrata (TOFD - <i>Time-Of-Flight Diffraction</i> ) ....	19
2.2.3	Zonas mortas da técnica de TOFD .....	23
2.2.4	Vantagens do TOFD:.....	24
2.2.5	Limitações do TOFD:.....	24
2.2.6	Monitoramento de crescimento de trinca com a técnica de TOFD .....	24
2.3	O Método da Flexibilidade no Descarregamento ( <i>Compliance</i> ) .....	26
2.4	Retardo de trinca por sobrecarga mecânica .....	28
2.5	Correlação de Pearson .....	30
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
3.1	Caracterização metalúrgica do tubo de aço Superdúplex .....	34
3.2	Corpos de prova dos ensaios de fadiga .....	35
3.3	Equipamento de TOFD:.....	35
3.3.1	Transdutores: .....	36
3.3.2	Sapatas .....	37
3.4	<i>Compliance</i> .....	38
3.5	Ensaio de crescimento de trinca em fadiga .....	39
3.6	Fractografia das amostras após o ensaio de fadiga .....	41
3.7	Tubo padrão com defeito interno.....	42
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1	Caracterização metalúrgica do tubo de aço Superdúplex .....	45
4.2	Ensaio de fadiga monitorados com as técnicas de <i>Compliance</i> , Fractografia e TOFD:.....	47

4.3	Correlação entre os dados obtidos com <i>Compliance</i> e <i>TOFD</i> .....	52
4.4	Inspeção do tubo padrão com o TOFD.....	54
5.0	CONCLUSÕES .....	57
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metalografia do aço Superdúplex UNS S32750. Ilhas de austenita distribuído em uma matriz de ferrita. ....	16
Figura 2 - Inspeção de ultrassom com um transdutor reto .....	18
Figura 3 - Difração de uma frente de onda sônica. (1) onda transmitida, (2) onda refletida, (3) e (4) difrações das pontas da trinca. ....	19
Figura 4 - Inspeção com a técnica de TOFD. (a) posicionamento dos transdutores na superfície do corpo de prova. (b) A Scan da inspeção com o TOFD. ....	21
Figura 5 - (a) defeito aflorando na superfície, (b) defeito aflorando superfície oposta à inspeção. Seta 1 refere-se a onda lateral, Seta 2 a difração da trinca e a Seta 3 ao eco de fundo. ....	23
Figura 6 - Variação do A-Scan durante o monitoramento do crescimento de trinca em fadiga.....	25
Figura 7 - Simulação da reflexão de uma onda sônica em um componente sem defeito (a) e em componente com defeito aflorando na superfície oposta de inspeção (b). ...	26
Figura 8 - Representação gráfica do <i>Compliance</i> .....	27
Figura 9 - Conexão entre a amostra e o <i>clipe-gauge</i> extensômetro para amostras do tipo C(T).....	27
Figura 10 - Retardo de trinca após sobrecargas.....	29
Figura 11 - Comportamento típico de crescimento de trinca após a sobrecarga mecânica.	30
Figura 12 - Diagrama de blocos exemplificando o procedimento experimental.....	33
Figura 13 - Regiões do tubo de onde foram retiradas amostras. ....	34
Figura 14 - Dimensões em milímetro dos corpos de prova utilizado nos ensaios de fadiga. ....	35
Figura 15 - Equipamento de TOFD durante o monitoramento dos ensaios de fadiga. ....	36
Figura 16 - Transdutor Imasonic <sup>R</sup> de 2MHz, dimensões do transdutor em milímetro.....	36



Figura 17 - Dimensões em milímetro das sapatas de ultrassom fabricadas para o trabalho. .....	37
Figura 18 - Sapata usinada a partir de um acrílico de baixa atenuação sônica.....	38
Figura 19 - Conexão entre a amostra e o <i>clip-gauge</i> extensômetro. ....	39
Figura 20 - Configuração do ensaio de fadiga. (A) Transdutores de TOFD (emissor e receptor) e (B) <i>Clip-gauge</i> extensômetro.....	40
Figura 21 - Figura esquemática correlacionando os focos sônicos com a separação dos transdutores. ....	41
Figura 22 - Amostras após as sobrecargas. (A) Regiões da amostra onde as deformações plásticas foram medidas. (B) Deformações causadas pelas sobrecargas antes do rompimento da amostra. ....	42
Figura 23 - Dimensões do tubo padrão em milímetros. ....	43
Figura 24 - Tubo padrão usinado.....	44
Figura 25 - Metalografia do tubo de aço Superdúplex. (A) face transversal, (B) face de topo e (C) face longitudinal.....	45
Figura 26- Crescimento de trinca nos ensaios de fadiga utilizando as técnicas de TOFD, <i>Compliance</i> e os pontos de sobrecarga. ....	48
Figura 27 - Correlação entre os dados obtidos com o TOFD e o <i>Compliance</i> em um mesmo tempo durante o monitoramento dos ensaios da fadiga. No eixo das abscissas é plotado o tamanho de trinca obtido com o <i>Compliance</i> e no eixo das ordenadas o tamanho de trinca obtido com o TOFD. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável Superdúplex UNS S32750. ....	47
Tabela 2 - Velocidade da onda longitudinal nas faces do tubo de aço Superdúplex.....	47
Tabela 3 - Amostras e focos sônicos utilizados no TOFD. ....	48
Tabela 4 - Propagação da trinca no momento em que foram dadas as sobrecargas.....	50
Tabela 5 - Início da propagação e fim da propagação de trinca captado com a técnica de TOFD.....	51
Tabela 6 - Correlação de Pearson entre os dados obtidos com o TOFD e o <i>Compliance</i> ...	54
Tabela 7 - Tamanho de defeitos obtidos com a inspeção do TOFD.....	54
Tabela 8 - Profundidade do foco sônico, distancia o foco sônico até o defeito e o erro de dimensionamento com o TOFD.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

2S	Separação dos transdutores;
a	Tamanho de trinca;
a/W	Razão entre tamanho de trinca e largura do corpo de prova;
C	Velocidade do Som;
C(T)	corpo de prova tensão compacto (compact tension);
CMOD	Crack Mouth Opening Displacements;
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono;
d	Distância da Ponta Superior do Defeito até a Superfície de Inspeção;
da/dN	Fatigue Crack Growth Rate;
EF	Eco de fundo;
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio;
K	Fator intensidade de tensões;
MHz	Megahertz;
MPa.m <sup>1/2</sup>	Unidade do Fator de Tenacidade à Fratura.
OL	Onda Lateral;
P	Carga aplicada;
PCS	Probe Center Separation;
Rx	Transdutor Receptor;

SE(B)	single-edge notched bend;
T1	Difração da Parte Superior da Trinca;
T2	Difração da Parte Inferior da Trinca;
TOFD	Time-Of-Flight-Diffraction;
Tp	Duração do Pulso Sônico;
Tw	Tempo do Percorso Sônico do Eco de Fundo;
Tx	Transdutor Emissor;
W	Largura do corpo de prova;
$\Delta K$	Amplitude do fator intensidade de tensões;

## RESUMO

Este trabalho buscou avaliar a técnica ultrassônica de Tempo de Voo da Onda Difrata (TOFD - *Time-Of-Flight-Diffraction*) para o monitoramento de trincas de fadiga nucleadas no interior de tubos de aço Superdúplex. Para isso, foram fabricados corpos de prova do tipo *single edge bending SE(B)* a partir de um tubo de aço Superdúplex sem costura. Estas amostras foram ensaiadas em fadiga, e o crescimento de trinca foi monitorado com as técnicas de TOFD, de Flexibilidade no Descarregamento (*Compliance*) – durante os ensaios, foram dadas sobrecargas mecânicas que causaram deformação plástica. As deformações serviram de pontos de referência para analisar o crescimento de trinca. Para aferir a validade os resultados obtidos com o TOFD nos ensaios de fadiga e fazer uma correlação com o monitoramento em campo de defeitos em tubos de aço Superdúplex, foi fabricado um padrão que simulou um tubo com defeito interno conhecido. Este padrão foi inspecionado com o TOFD, empregando os mesmos equipamentos e parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga. Foi possível monitorar o crescimento de trinca em fadiga utilizando a técnica de TOFD e houve forte correlação entre os dados obtidos com o TOFD e o *Compliance*. A inspeção no tubo padrão manteve uma diferença entre a medida real e a obtida com o TOFD proporcional às encontradas durante o monitoramento dos ensaios de fadiga.

Palavras-chave: Superdúplex, TOFD, Flexibilidade no Descarregamento, Fadiga.

## **ABSTRACT**

This study aimed to evaluate the ultrasonic technique Time-Of-Flight-Diffraction (TOFD) in monitoring fatigue nucleated cracks within super duplex steel pipes. In order to do it, single edge bending SE (B) specimens were manufactured using a super duplex steel seamless pipe. These samples were tested in fatigue and crack growth was monitored with two different techniques: TOFD and Flexibility in Unloading (Compliance). During the tests, it was used mechanical overloadings so deformation would be caused on the steel pipes. The deformations caused by that served as reference points to analyze the cracking growth. Thus, to assess the validity of the data obtained with the TOFD in fatigue tests, it was made a pattern that simulated a tube with known internal defect. This pattern was inspected with the TOFD, using the same equipment and parameters used in the fatigue tests. A correlation with the monitoring of defects field super duplex steel pipes was also made. The experiment has shown it is possible to monitor the cracking growth fatigue using the TOFD technique. Figures indicate, as well, there is a strong correlation between results obtained with the TOFD and Compliance. The inspection of the standard steel pipe maintained a difference between the actual measurement and obtained measurement. That difference was proportional from TOFD data and those found during the monitoring of the fatigue tests.

**Key words:** super duplex, TOFD, Flexibility in Unloading, Fatigue.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi contratado pelo Centro de Pesquisa da Petrobras (CENPES) para o projeto “Avaliação da integridade de juntas soldadas de aços resistentes à corrosão em meios agressivos diferentes”, aonde, em uma das etapas, seriam realizados ensaios de fadiga em tubos de aços Superdúplex. Os ensaios consistiriam na aplicação de carregamento variável de tração em tubos de 1 metro de comprimento, 170 milímetros de diâmetro e 18 milímetros de espessura. No centro do tubo haveria uma junta soldada, pelo processo TIG, e na raiz da solda seriam colocados defeitos que cresceriam quando o tubo fosse submetido ao processo de fadiga. O Grupo de Ensaios Não Destrutivos (GEND) do LAMEF teve a demanda de avaliar qual técnica seria adequada para monitorar o crescimento de trinca durante estes ensaios. Neste contexto, surgiu o presente trabalho, que tem como objetivo geral validar a técnica ultrassônica de Tempo de Vôo da Onda Difrataada (TOFD) para monitoramento de trincas em tubos de aços Superdúplex e como objetivo específico analisar o melhor foco do feixe sônico para monitoramento dos ensaios, além de mensurar o erro de dimensionamento da técnica.

A aplicação de tubos de aços inoxidáveis Superdúplex na indústria de petróleo e gás vem crescendo nos últimos anos, principalmente, em projetos do segmento *offshore*, devido sua combinação de elevada resistência à corrosão com excelentes propriedades mecânicas. São utilizados em uma série de componentes, tais como: equipamentos de perfuração, corpos de válvulas e tubulações. No ambiente marinho, os tubos ficam suscetíveis a solicitações mecânicas cíclicas, além de sofrer processos metalúrgicos (soldagem e tratamento térmicos) que podem originar fases frágeis que favorecem a nucleação de trincas de fadiga. Através da Mecânica da Fratura é possível calcular o tamanho de defeitos admissíveis e estimar o tempo de operação de um componente de engenharia antes do defeito alcançar o tamanho crítico. Para isso, é necessário o correto dimensionamento do defeito e o controle preciso dos estágios iniciais de propagação.

A técnica ultrassônica de Tempo de Vôo da Onda Difrata (TOFD - *Time-of-Flight Diffraction*) é utilizada para dimensionar descontinuidades com precisão, entretanto, sua utilização no monitoramento de crescimento de defeitos é pouco estudada. Neste trabalho foi analisado o crescimento de trinca em amostras tipo SE(B) – *a single edge bending* usinadas a partir de um tubo de aço Superdúplex. Para estas amostras, correlacionou-se os resultados de crescimento de trinca obtidos com o TOFD com os obtidos com o *Compliance*. Além dos ciclos de sobrecargas utilizados durante o ensaio, os quais ficaram visíveis nas amostras após a fratura. Também, levantou-se as vantagens e limitações da técnica comparando os resultados obtidos nos ensaios de fadiga com a inspeção de um tubo padrão de aço Superdúplex, com tamanho de defeitos conhecido.

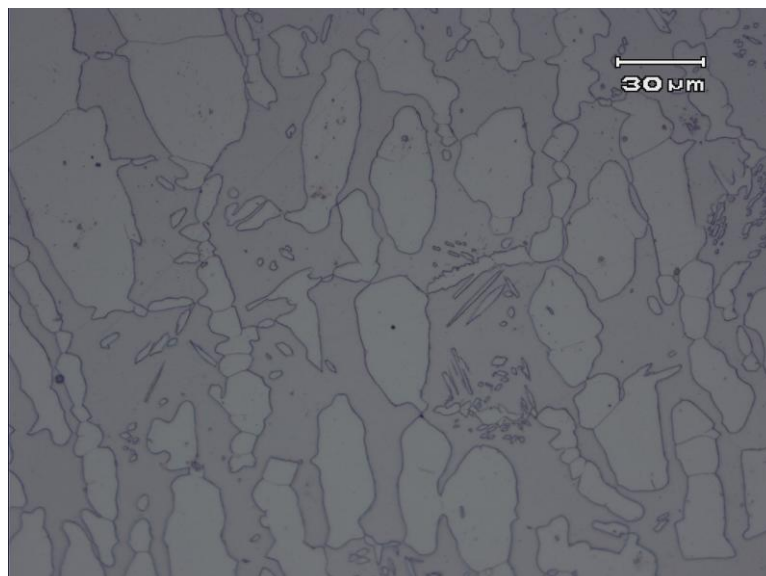


## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços Inoxidáveis Superdúplex

Os aços inoxidáveis Superdúplex são ligas que apresentam uma microestrutura austeno-ferrítica com fração média de cada fase de aproximadamente 50%. Sendo composta por ilhas de austenita distribuídas em uma matriz de ferrita (Figura 2.1). Esta microestrutura é responsável pelas excelentes propriedades mecânicas, unindo alto limite de escoamento e alta tenacidade. Apresenta também elevada resistência a corrosão em ambientes agressivos que contenham, por exemplo, o íon cloreto e os gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Entretanto, pode ser susceptível ao fenômeno de trincamento sob tensão induzido pelo hidrogênio, quando exposta a combinação de proteção catódica e sollicitação mecânica. Ainda, por apresentar um estado termodinâmico metaestável, os aços Superdúplex podem sofrer precipitação de fases frágeis quando expostos a ciclos térmicos de temperaturas elevadas. (MARTINS, 2008).

Figura 1 - Metalografia do aço Superdúplex UNS S32750. Ilhas de austenita distribuídas em uma matriz de ferrita.



Fonte: Cortesia LAMEF.

O principal mercado consumidor de aços inoxidáveis Superdúplex é a indústria de petróleo e gás, onde são utilizados frequentemente em dutos e válvulas que operam em ambientes marinhos. Nesses ambientes é inerente o tensionamento em fadiga. Somado a isso há a proteção catódica e/ou os processos de soldagem que podem originar a nucleação e propagação de trincas. Quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos, os aços Superdúplex têm maior resistência a corrosão sob tensão e corrosão intergranular, além de propriedades mecânicas superiores. (MARTINS, 2004).

## **2.2 Princípios básicos da técnica de ultrassom**

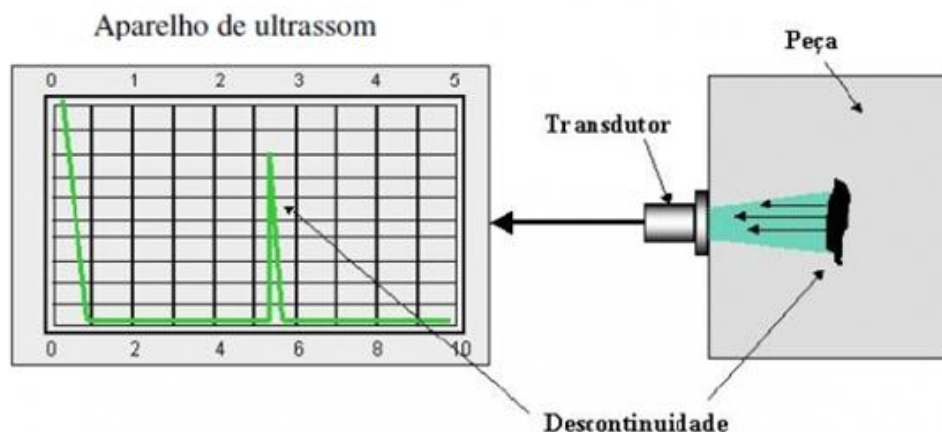
O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado com o objetivo de detectar discontinuidades internas e superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e detectado e analisado para determinar a presença e localização de discontinuidades. As ondas sônicas são quase totalmente refletidas em interfaces metal-gás. Reflexões parciais ocorrem em interfaces metal líquido ou entre um metal e outro sólido, sendo o percentual de energia dependente de certas propriedades físicas dos materiais que compõem a interface. Trincas, laminações, rechupes, poros, falta de fusão e outras discontinuidades que atuam como interfaces metal-gás podem ser facilmente detectadas por ultrassom. Inclusões e outras discontinuidades podem também ser detectadas pela reflexão parcial ou espalhamento do feixe sônico, ou até mesmo pela produção de outros efeitos detectáveis (COSTA, 2011).

A maioria dos aparelhos para o ensaio por ultrassom detecta discontinuidades através da monitoração das reflexões sônicas transmitidas ao material através de um cabeçote acoplado à peça. O aparelho geralmente dispõe de um visor que possibilita determinar a intensidade da energia refletida e a localização das interfaces. Pela análise destas reflexões o inspetor consegue determinar a existência ou não de discontinuidades no material. Mesmo com estas características pode-se dividir em três categorias principais o método de ensaio: convencional, automatizado e técnicas especiais (CARNEVAL, 2007).

O método convencional caracteriza-se pela movimentação ou manipulação manual dos transdutores pelo operador para execução do ensaio, apresentação A-Scan (ecograma amplitude x distância), uso de ondas transversais nos transdutores angulares e longitudinais

nos transdutores normais ou duplo cristal. Este é o método mais utilizado pela indústria para ensaios em soldas. O método automatizado tem características similares ao convencional, mas a movimentação dos transdutores sobre a superfície de ensaio é executada por equipamentos automatizados em velocidade pré-programadas, cabendo ao operador somente a avaliação dos resultados obtidos, podendo ser auxiliado por sistemas automáticos de análise. Este tipo de ensaio é principalmente utilizado no ensaio de chapas. Técnicas especiais compreendem métodos de ensaio que, em geral, envolvem princípios e características diferentes, sendo as mais comuns, o TOFD (*Time-of-Flight Diffraction*), que utiliza transdutores angulares especiais emissores de ondas longitudinais e o *Phased Array*, onde os transdutores apresentam um arranjo de cristais que podem ser excitados individualmente. Além disto, estas técnicas valem-se dos modos de apresentação diferentes (B-Scan, C-Scan, e S-Scan) e podem ainda gerar registro permanente dos resultados de ensaios (COSTA C.C., 2011). A Figura 2 mostra esquematicamente o ensaio de convencional de ultrassom.

Figura 2 - Inspeção de ultrassom com um transdutor reto.



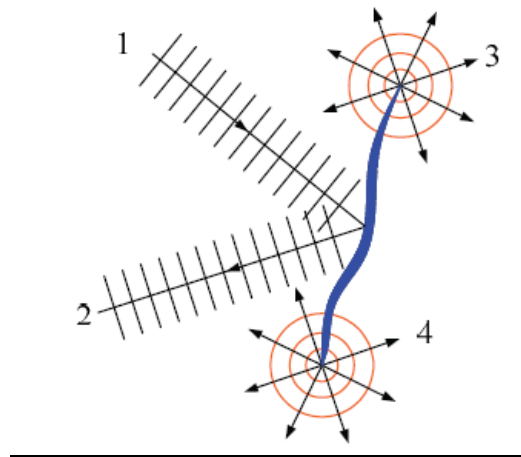
Fonte: (INSPBRASIL).

Devido a suas características e versatilidade, o ensaio por ultrassom é um dos ensaios não destrutivos mais utilizados para detecção e avaliação de descontinuidades internas, detecção de descontinuidades superficiais, medição de espessuras e avaliação de corrosão e, menos frequentemente, para determinar propriedades físicas, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas de materiais (COSTA C.C., 2011).

### 2.2.1 Difração das ondas sonoras

A difração das ondas sônicas é o resultado da interação entre uma frente de onda e uma descontinuidade da ordem de pelo menos metade do comprimento de onda. Quando uma frente de onda sônica encontra descontinuidades lineares no interior do material, como trincas, parte da energia de propagação é refletida com o mesmo ângulo de incidência em relação ao plano normal à descontinuidade. Outra parte da energia passa ser irradiada por uma vasta gama de ângulos nas pontas da trinca, esse fenômeno é conhecido como difração (ZHANG Y., 2008). A Figura 3 exemplifica a difração de uma onda sonora

Figura 3 - Difração de uma frente de onda sônica. (1) onda transmitida, (2) onda refletida, (3) e (4) difrações das pontas da trinca.



Fonte: (ZHANG Y., 2008).

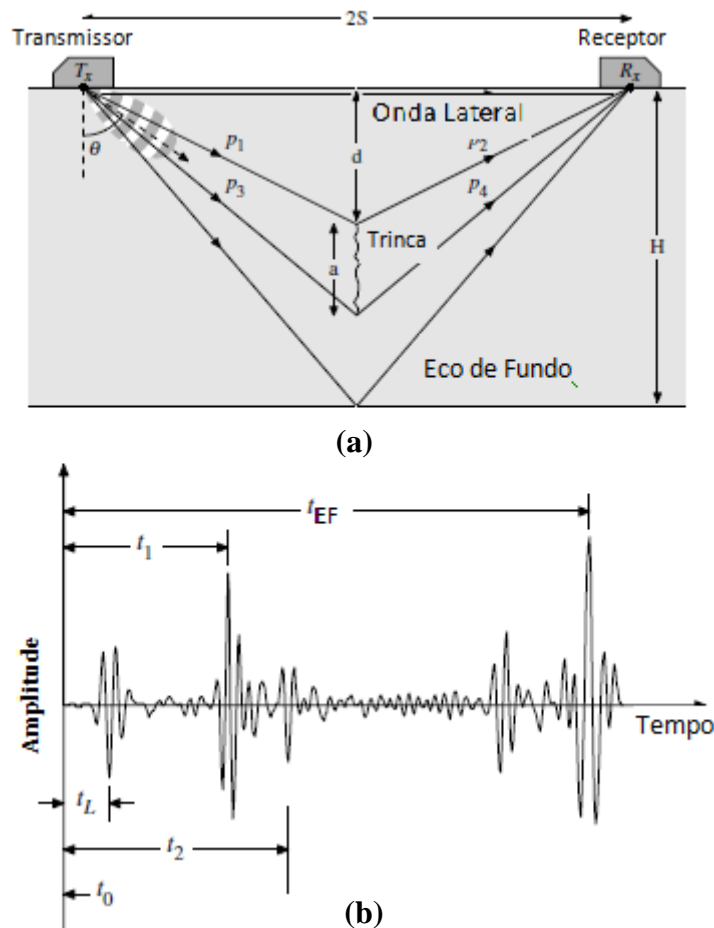
### 2.2.2 Tempo de Voo da Onda Difrata (TOFD - *Time-Of-Flight Diffraction*)

A técnica TOFD foi originalmente desenvolvida para determinação das dimensões, especialmente da profundidade, de defeitos em peças soldadas e foi padronizado pela primeira vez pelo *British Standards Institution* em 1993. O TOFD utiliza a difração nas extremidades de defeitos e é aplicada em vários segmentos industriais devido a sua alta precisão no dimensionamento de falhas. (SPIES M., 2012). Baseia-se no cálculo do tempo de percurso dos ecos difratados em defeitos internos em materiais. Esses ecos podem ser recebidos por transdutores de ultrassom devidamente posicionados na superfície do material. (ZHANG Y., 2008).

O TOFD normalmente utiliza um par de transdutores (um transmissor e um receptor) colocados sobre a mesma superfície do objeto de teste. A separação dos transdutores, também chamada de PCS (*Probe Center Separation* - separação entre o centro dos sensores), é ajustada de acordo com a espessura de parede da amostra e com a região da amostra que se deseja focalizar o feixe sônico (SOUZA, 2009).

Uma situação comum de inspeção é apresentada na Figura 4, na qual um transdutor “Tx” emite uma onda sônica com um determinado ângulo para o interior de um material isotrópico e homogêneo. A energia sônica propaga-se com uma variação angular definida e o transdutor “Rx” recebe os sinais sônicos emitidos pelo transdutor “Tx”. O primeiro sinal que chega ao transdutor receptor é o da Onda Lateral (OL), que se propaga logo abaixo da superfície. Quando a trinca encontra-se orientada em um plano perpendicular entre os dois transdutores de ultrassom – emissor e receptor –, dois sinais de difração chegarão ao receptor: referentes à ponta superior e inferior da trinca, respectivamente. O último sinal que chega ao transdutor receptor é o Eco de Fundo (EF), que é a reflexão do feixe sônico na base do material. O tamanho do defeito pode ser dimensionado através dos sinais de difração emitidos pelas pontas da trinca. Para os cálculos, são feitas algumas simplificações: a frente de onda é tratada como proveniente de uma fonte pontual convergindo para um ponto detector e a propagação é analisada através de retas. Assim, é possível correlacionar a distância através do teorema de Pitágoras (CHARLESWORTH J.P, 2001).

Figura 4 - Inspeção com a técnica de TOFD. (a) posicionamento dos transdutores na superfície do corpo de prova. (b) A Scan da inspeção com o TOFD.



Fonte: Adaptado (CHARLESWORTH J.P, 2001).

O tamanho da descontinuidade é determinado pela diferença de tempos entre a onda lateral e os pulsos sônicos que seguem os caminhos  $P_1 + P_2$  e  $P_3 + P_4$ . Estes caminhos correspondem aos tempos  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente. Sendo a velocidade de propagação do som no material inspecionado “ $C$ ” e a distância entre os dois transdutores “ $2S$ ” conhecidas, o cálculo dos tempos de chegada da onda lateral (OL), da difração da parte superior da trinca ( $T_1$ ), da difração da parte inferior da trinca ( $T_2$ ) e do Eco de Fundo (EF) ao transdutor receptor ( $R_x$ ) e o tamanho de trinca ( $a$ ) são dados através dos equacionamentos numerados de (1) a (6) (CHARLESWORTH J.P, 2001).

$$tL = \frac{2S}{c} \quad (1)$$

$$T1 = \frac{2\sqrt{S^2+d^2}}{c} \quad (2)$$

$$T2 = \frac{2\sqrt{S^2+(d+a)^2}}{c} \quad (3)$$

$$TEF = \frac{2\sqrt{S^2+H^2}}{c} \quad (4)$$

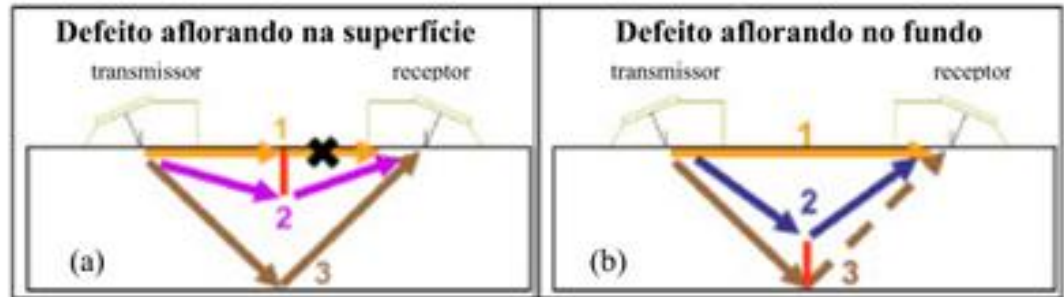
$$d = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t1^2 - 4S^2} \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{C^2 t2^2 - 4S^2} - d \quad (6)$$

A técnica de TOFD pode ser usada para localizar e dimensionar falhas de diversos tamanhos, incluindo falhas subsuperficiais. Os transdutores utilizados para a inspeção geralmente emitem ondas longitudinais com frequência de 2-10 MHz e as medições são realizadas por varreduras na superfície do material (ZHANG, 2000).

A Figura 5 demonstra outros dois casos comuns de inspeção com o TOFD. No item (a), a trinca aflora na superfície de inspeção. Neste caso, ocorrerá perturbação ou total interrupção da onda lateral e pode não ser possível seu dimensionamento devido ao fundo de escala da técnica. Já no item (b), o defeito é nascente na superfície oposta à inspeção. Também pode não ser possível seu dimensionamento, devido a sobreposições do sinal da difração com o do Eco de Fundo (SOUZA, 2009).

Figura 5 - (a) defeito aflorando na superfície, (b) defeito aflorando superfície oposta à inspeção. Seta 1 refere-se a onda lateral, Seta 2 a difração da trinca e a Seta 3 ao eco de fundo.



Fonte: (SOUZA, 2009).

### 2.2.3 Zonas mortas da técnica de TOFD

Logo abaixo da superfície de ensaio, existe uma região onde pode ocorrer a sobreposição do sinal da difração com a Onda Lateral. O mesmo pode acontecer na superfície oposta à de ensaio, na qual o Eco de Fundo pode mascarar o sinal da difração. A profundidade das zonas mortas superficiais devido à Onda Lateral e a devido ao Eco de Fundo são calculadas através das equações (7) e (8), respectivamente. ( FEHER W.B., 2005).

$$Dds = \sqrt{\frac{C^2 T_p^2}{4 + SCT_p}} \quad (7)$$

Onde “C” é a velocidade do som no material, “ $T_p$ ”, a duração do pulso, e “S” é metade da separação dos cabeçotes.

$$Ddw = \sqrt{\frac{C^2 (T_w + T_p)^2 - S^2}{4}} - w \quad (8)$$

Onde “ $T_w$ ” é o tempo do percurso do Eco de Fundo e “w” a espessura da peça.



#### 2.2.4 Vantagens do TOFD:

- O resultado do ensaio é instantâneo e precisa de pouca preparação da amostra.
- Quando os dados são gravados o registro do ensaio pode ser permanente.
- A detecção de defeitos não depende da orientação.
- O custo é baixo quando comparado com outras técnicas. (MOLES M., 2012).

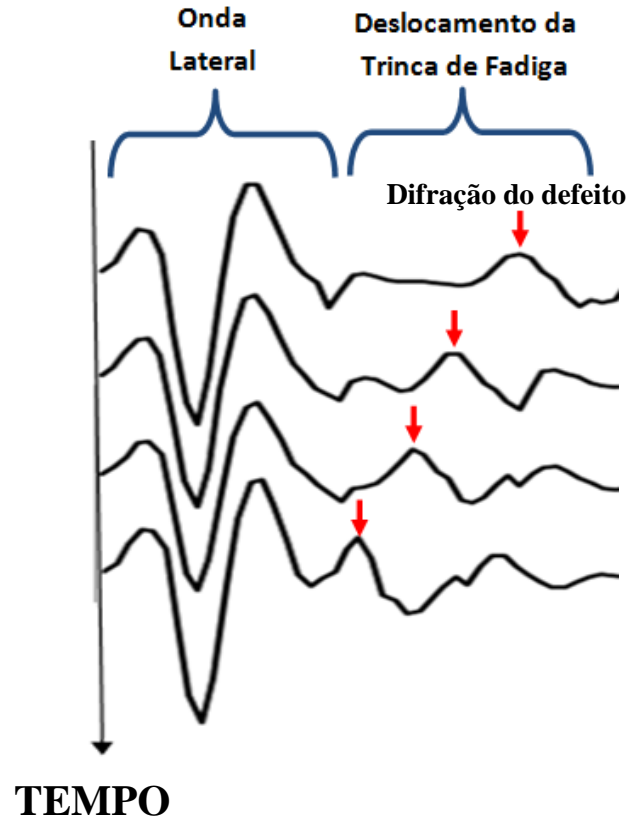
#### 2.2.5 Limitações do TOFD:

- Há duas zonas mortas na técnica de TOFD. Uma logo abaixo da superfície de inspeção devido à interferência da Onda Lateral e outra na superfície inferior do material devido a sobreposições dos sinais de Eco de Fundo.
- Necessário inspetores experientes devido à complexidade da técnica.
- Baixa relação sinal/ruído.
- Existe a possibilidade de ocorrer erros de dimensionamento em função da posição do defeito.
- É de difícil aplicação em materiais com grãos grosseiros. (MOLES M., 2012).

#### 2.2.6 Monitoramento de crescimento de trinca com a técnica de TOFD

Defeitos conhecidos no interior do material podem ser regularmente ou continuamente monitorizados, utilizando transdutores TOFD posicionados estrategicamente na superfície do componente. Quando o defeito for originado na superfície oposta de inspeção seu crescimento poderá ser monitorado até o limite imposto pela zona morta da Onda Lateral. (KOCKELMANN, 1987) A Figura 6 exemplifica este caso, os A-Scans mostram um ensaio de fadiga em uma amostra do tipo  $SE(B)$ . Nota-se que é possível captar o sinal da difração da trinca até que ele se confunda com o sinal da Onda Lateral.

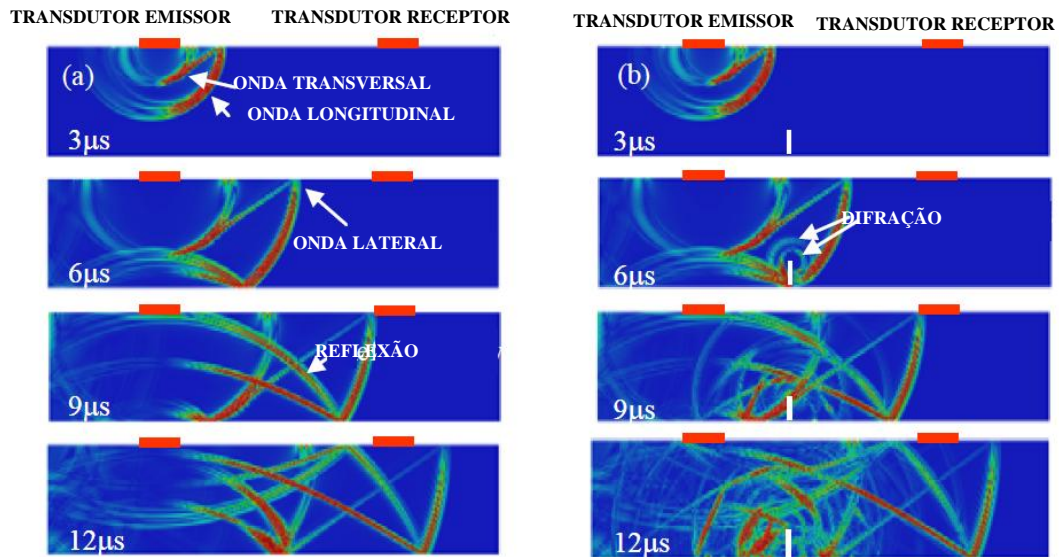
Figura 6 - Variação do A-Scan durante o monitoramento do crescimento de trinca em fadiga.



Fonte: Imagem do autor.

O início da captação do sinal da difração, quando o defeito nucleia na superfície oposta de monitoramento, também pode ser prejudicado devido à zona morta do Eco de Fundo. A simulação exposta na Figura 7 exemplifica a superposição dos sinais quando a frente de onda ultrassônica colide com um defeito. (LIN S., 2006)

Figura 7 - Simulação da reflexão de uma onda sônica em um componente sem defeito (a) e em componente com defeito aflorando na superfície oposta de inspeção (b).



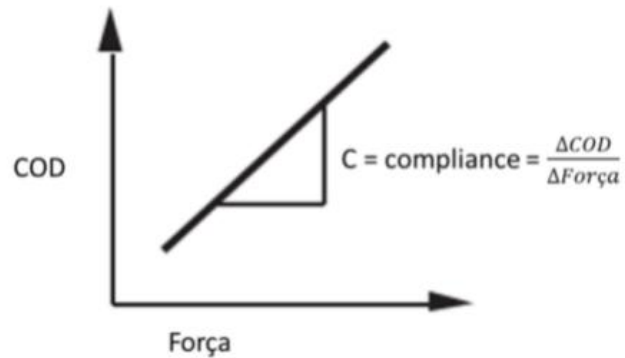
Fonte: Adaptado (LIN S., 2006).

### 2.3 O Método da Flexibilidade no Descarregamento (*Compliance*)

A técnica de *Compliance* (C) baseia-se em medir a variação da força pela variação do deslocamento de abertura na boca do entalhe (COD), sendo esta relação definida com a rigidez do material. O *Compliance* é o inverso de rigidez, ou seja, é a quantidade de deformação por unidade de carga. Ou ainda, a razão entre a deflexão de uma amostra sob uma carga aplicada. A Figura 8 apresenta a obtenção de “C” durante um carregamento cíclico, podendo ser monitorado a cada ciclo do ensaio (MTS CORPORATION SYSTEM, 1998).

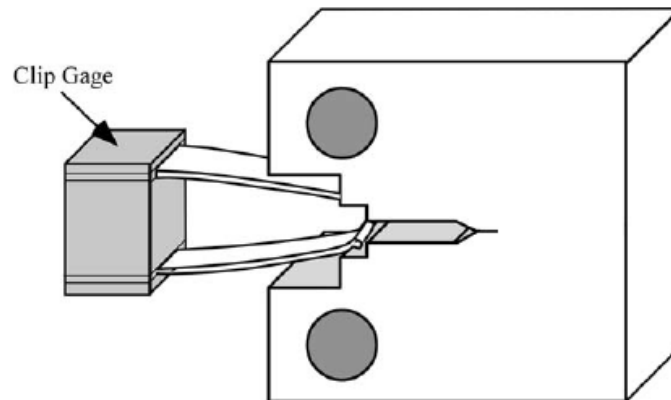
A abertura na boca do entalhe é geralmente tomada com o auxílio de um *clip-gauge* extensométrico conectado ao computador, que é responsável pelos equacionamentos matemáticos para o cálculo do *Compliance* (HAAG J., 2012). A Figura 9 mostra como se dá a conexão entre o *clip-gauge* extensométrico e a amostra.

Figura 8 - Representação gráfica do *Compliance*.



Fonte: (MTS CORPORATION SYSTEM, 1998).

Figura 9 - Conexão entre a amostra e o *clipe-gauge* extensômetro para amostras do tipo C(T).



Fonte: (ANDERSON, 2005).

Através de um equacionamento matemático, determinado para cada configuração de geometria (corpos de prova do tipo C(T) e SE(B), por exemplo), é possível obter o tamanho da trinca instantaneamente, desde que se conheçam as dimensões do corpo de prova (largura, espessura etc.). Sendo esta uma técnica amplamente consolidada, o *Compliance* já está presente em diversas normas internacionais, como a ASTM E647 e a BS ISO 12108. (LOPES M. F., 2013).

Para o dimensionamento do tamanho de trinca com o *Compliance* a norma ASTM E1820 fornece as Equações (9) e (10).

$$\frac{a}{w} = C_0 + C_1u + C_2u^2 + C_3u^3 + C_4u^4 + C_5u^5 \quad (9)$$

Onde  $a/W$  é o tamanho de trinca normalizado e  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_5$  são constantes definidas para cada corpo de prova. O parâmetro “u” é função do Compliance, da espessura da amostra, do módulo de elasticidade e da distância entre os apoios ao corpo de prova. Para corpo de prova do tipo SE(B) o “u” é definido conforme a Equação (10).

$$u = \frac{1}{1+[EBC\left(\frac{4W}{S}\right)]^{1/2}} \quad (10)$$

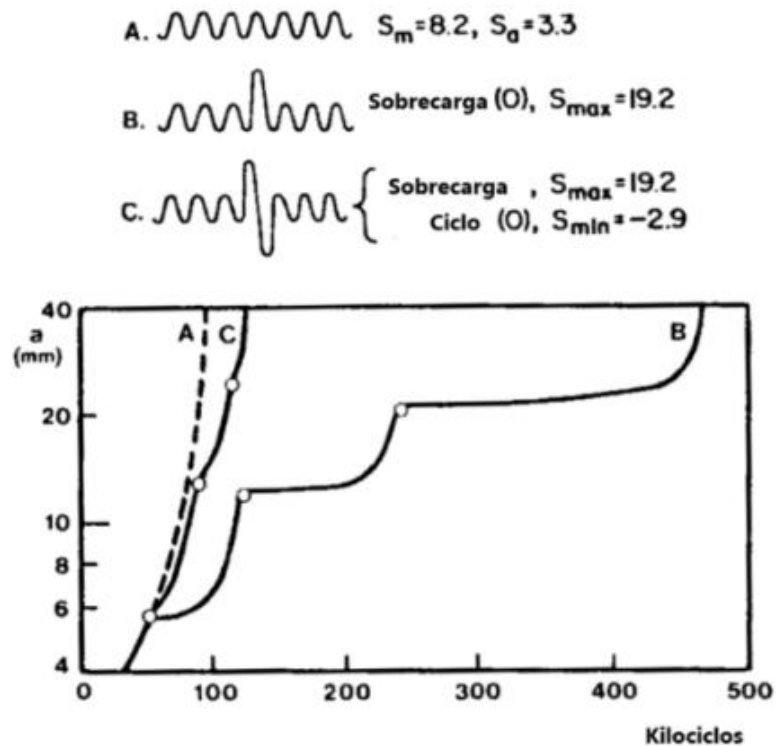
Onde E é o módulo de elasticidade; B é a espessura do corpo de prova; W é a largura do corpo de prova e S é a distância entre os apoios.

## 2.4 Retardo de trinca por sobrecarga mecânica

Quando um único ciclo de alta tensão é aplicado em um componente com histórico de carregamento de amplitude constante, o crescimento de trinca logo após o carregamento fica muito mais lento quando comparado com o estágio anterior de propagação.

O efeito da sobrecarga pode aumentar a vida em fadiga de componentes de engenharia. A Figura 10 mostra como três sobrecargas individuais aumentam a vida em fadiga em quase cinco vezes (comparação entre A e B), de 100.000 ciclos para 500.000 ciclos, aproximadamente. Após um período de crescimento de trinca lento, a velocidade de propagação gradualmente assume seu valor original. Este fenômeno é conhecido como retardo de trinca. (BROEK, D., 1989).

Figura 10 - Retardo de trinca após sobrecargas



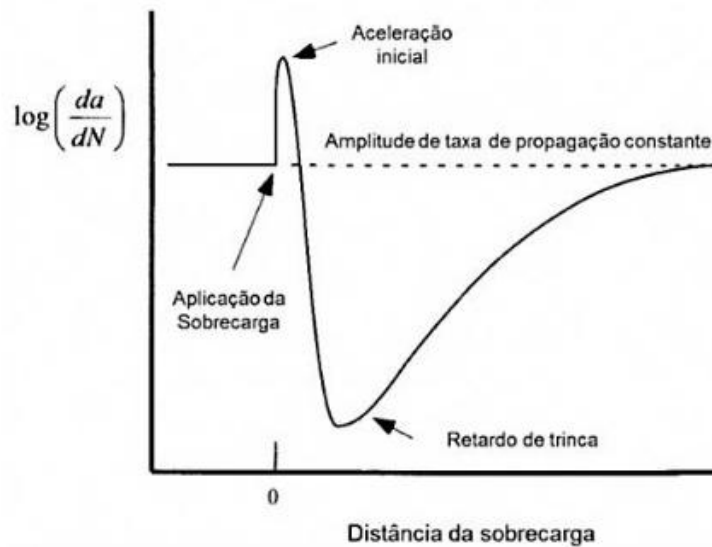
Fonte: (BROEK, D., 1989)

A causa do retardo de trinca devido à sobrecarga pode ser explicada por vários fenômenos, tais como: deflexão e bifurcação da trinca, encruamento do material, encerramento da trinca induzido por plasticidade, rugosidade ou oxidação e tensões residuais de compressão na ponta da trinca. Entre esses mecanismos, o encerramento da trinca induzido por plasticidade e as tensões residuais de compressão na ponta da trinca são os mecanismos mais aceitos (BROEK, D., 1989).

Após a aplicação da sobrecarga ocorre um aumento significativo da dimensão da zona de plástica e durante a sobrecarga existe uma extensão inicial da trinca, em que a taxa de crescimento é maior do que quando a trinca estava sob carga de amplitude constante. O efeito do retardo da trinca ocorre quando a fissura propaga através da zona plástica, alargada devido à sobrecarga (DANESHPOURA S., 2012). Além disso, a tensão cíclica induz uma tensão residual de compressão na ponta da trinca. Quando a sobrecarga é aplicada, o tamanho

da zona de tensão residual compressiva aumenta, o que pode contribuir para diminuição da taxa de crescimento da trinca depois da sobrecarga. Após a trinca passar pela região sob o efeito da deformação plástica e de tensões compressivas, a taxa de propagação volta para o seu patamar inicial. (VASCO-OLMO J.M., 2015). A Figura 11 exemplifica o comportamento da trinca após a sobrecarga mecânica.

Figura 11 - Comportamento típico de crescimento de trinca após a sobrecarga mecânica.



Fonte: (ANDERSON, 2005)

## 2.5 Correlação de Pearson

A correlação de Pearson mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas. Em outras palavras, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) é uma medida de associação linear entre variáveis. A equação (11) mostra como é obtido o coeficiente. As variáveis são “ $x$ ” e “ $y$ ”, “ $r$ ” é o valor numérico do coeficiente, “ $n$ ”, o número de termos, “ $S_x$ ” e “ $S_y$ ” é o desvio padrão das variáveis e “ $X$ ” e “ $Y$ ” são os valores médios das variáveis (FILHO D. B. F., 2009).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left( \frac{x_i - X}{s_x} \right) \left( \frac{y_i - Y}{s_y} \right) \quad (11)$$

O coeficiente de correlação Pearson ( $r$ ) varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento, e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Uma correlação perfeita (-1 ou 1) indica que o escore de uma variável pode ser determinado exatamente ao se saber o escore da outra. Quanto mais perto de 1 (independente do sinal) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis. No outro oposto, quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação. (FILHO D. B. F., 2009).



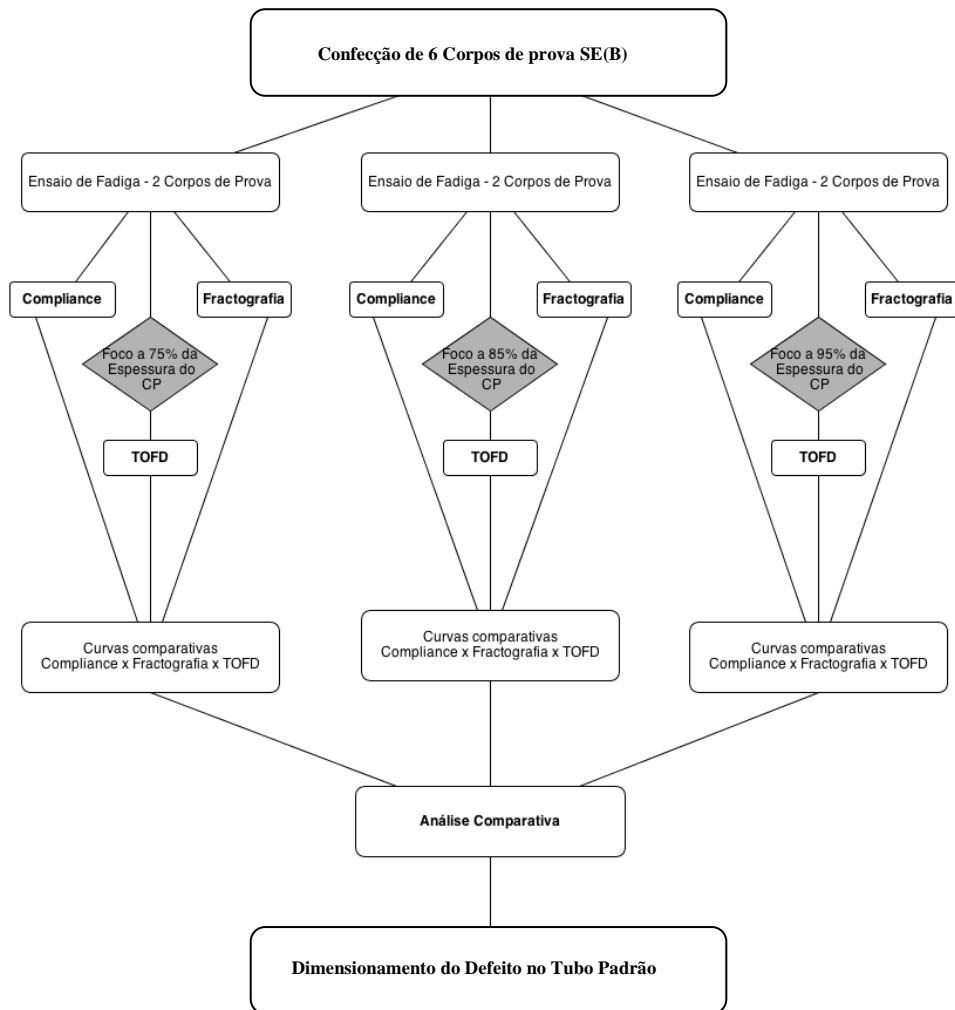
### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho foi dividido em duas etapas, na primeira buscou-se avaliar a influência do foco do feixe sônico da técnica de TOFD durante o monitoramento do crescimento de trinca em ensaios de fadiga, utilizando corpos de prova do tipo SE(B). Na segunda, correlacionou-se os focos sônicos, estudados nos ensaios de fadiga com o dimensionamento de um defeito, usinados em um tubo de aço Superdúplex.

Para o ensaio de fadiga, foram confeccionados doze corpos de prova do tipo SE(B) a partir de um tubo de aço Superdúplex. Entretanto, somente seis corpos de prova tiveram repetibilidade durante os ensaios. O foco do equipamento de TOFD foi colocado em três regiões distintas da amostra – 75%, 85% e 95% da espessura – e para cada foco foram ensaiadas ao menos duas amostras. Os dados de crescimento de trinca obtidos com o TOFD foram comparados com os dados obtidos com o *Compliance* e com os da análise da fratura, visto que durante o ensaio foram dadas sobrecargas que causaram deformação plástica visível nas amostras.

Na segunda etapa do trabalho, foi usinado um padrão, com o mesmo material utilizado para fabricar as amostras dos ensaios de fadiga, que simulou uma trinca nascente no interior do tubo. O tamanho da trinca foi dimensionado com os mesmos parâmetros utilizados nos ensaios da fadiga. A Figura 12 exemplifica o procedimento experimental adotado no trabalho.

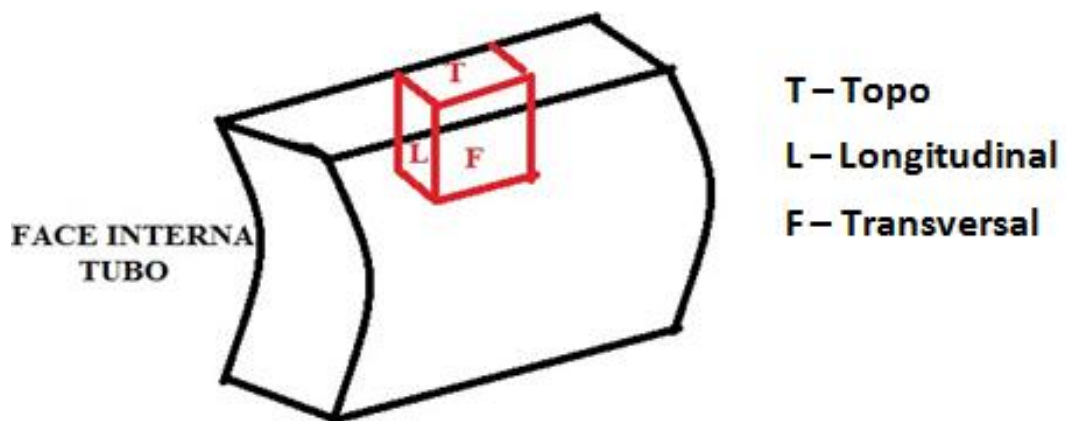
Figura 12 - Diagrama de blocos exemplificando o procedimento experimental.



### 3.1 Caracterização metalúrgica do tubo de aço Superdúplex

As amostras dos ensaios de fadiga e o tubo padrão, em que foi simulado um defeito interno, foram usinados a partir de uma secção de tubo de aço Superdúplex UNS S32750. Levantou-se a composição química do aço com o auxílio de um espectrômetro de absorção atômica. A análise da morfologia teve o objetivo de caracterizar a microestrutura e correlacioná-la com a velocidade da Onda Longitudinal no tubo de aço Superdúplex. Para isso, retiraram-se amostras de três faces distintas do tubo: topo, longitudinal e transversal. E, nestas faces, foram realizadas as revelações metalográficas. A Figura 13 exemplifica as faces do tubo que foram retiradas as amostras.

Figura 13 - Regiões do tubo de onde foram retiradas amostras.

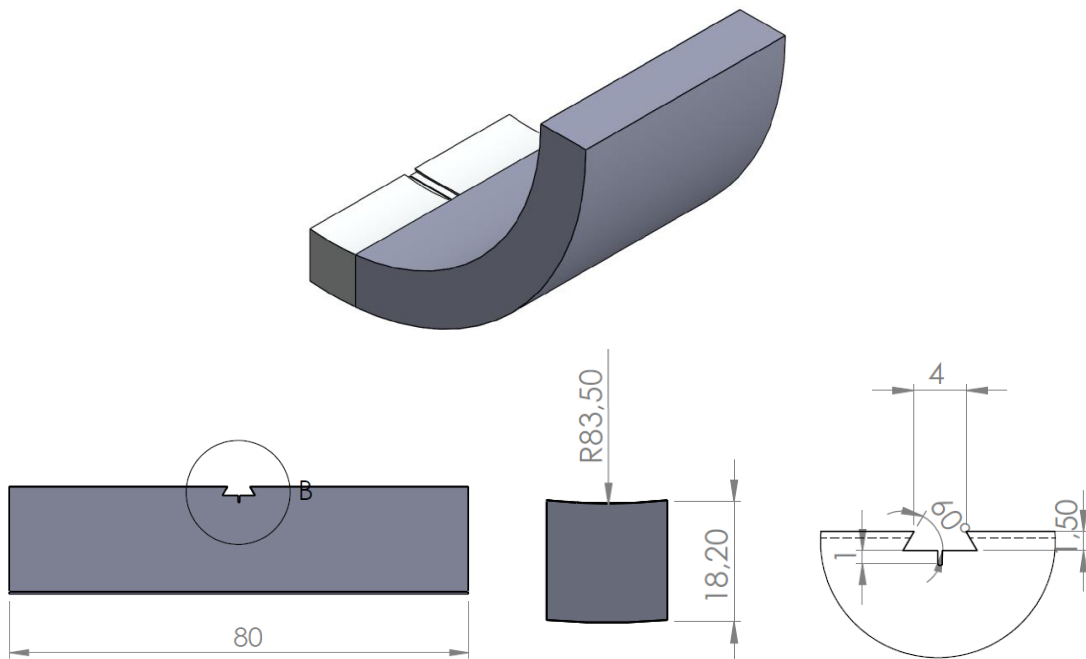


Para analisar a velocidade da onda longitudinal no aço Superdúplex, foi usinado um padrão quadrado (15 mm x 15 mm) que continha as três faces do tubo. Em cada face um transdutor reto de 2 MHz, anexo a um equipamento de ultrassom, emitiu uma frente de onda sônica na superfície do material. Sabendo-se do percurso sônico e da diferença de tempo entre a emissão e recebimento da frente de onda foi possível calcular a velocidade da Onda Longitudinal para cada uma das faces.

### 3.2 Corpos de prova dos ensaios de fadiga

Os corpos de prova para os ensaios da fadiga foram usinados por eletroerosão a fio e seguiram as proporções que constam na norma ASTM E 399 para corpo de provas do tipo *single edge bending* (SE(B)). Entretanto, tiveram como diferença da norma a superfície e a base dos corpos de prova, que seguiram o mesmo raio de curvatura do tubo. A Figura 14 mostra a geometria e as dimensões dos corpos de prova.

Figura 14 - Dimensões em milímetro dos corpos de prova utilizado nos ensaios de fadiga.



### 3.3 Equipamento de TOFD:

O equipamento de ultrassom e o *software Usscope*, utilizados para monitorar os defeitos, foram desenvolvidos pelo CPTI/PUC-Rio. Ele trabalha com até 16 canais, sendo possível utilizar até oito pares de transdutores. Permite, além disso, a gravação dos dados durante a aquisição dos sinais. A Figura 15 mostra o equipamento de TOFD em operação.

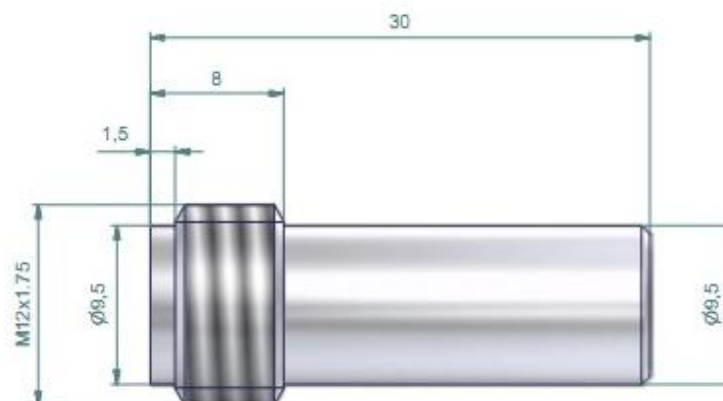
Figura 15 - Equipamento de TOFD durante o monitoramento dos ensaios de fadiga.



### 3.3.1 Transdutores:

Os transdutores de TOFD utilizados neste trabalho foram fabricados pela Imasonic<sup>R</sup> e sua frequência de operação é de 2 MHz. Os cristais piezelétricos têm 6 mm de diâmetro e foram projetados para operar submersos em fluidos. Para isso, os transdutores possuem blindagem externa de aço inoxidável 304L. A Figura 16 mostra as dimensões e configuração dos transdutores.

Figura 16 - Transdutor Imasonic<sup>R</sup> de 2MHz, dimensões do transdutor em milímetro.



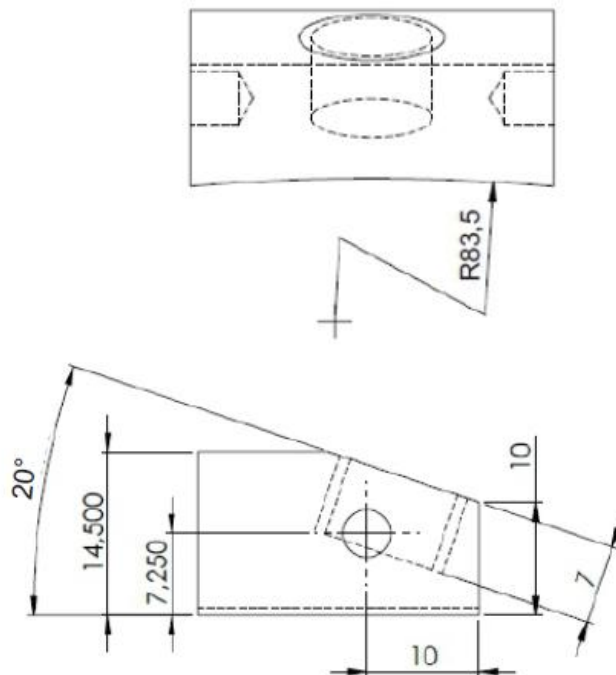
### 3.3.2 Sapatas

As sapatas que anexaram os transdutores do TOFD aos corpos de prova foram usinadas a partir de um bloco de acrílico de baixa atenuação sônica da marca Rexolite<sup>R</sup>. Para melhorar o acoplamento entre as amostras e as sapatas, sua base – que fica em contato com as amostras – seguiu o mesmo raio de curvatura dos corpos de prova.

O ângulo de posicionamento entre os transdutores do TOFD e a superfície da amostra foi calculado através da Lei de Snell, Equação (12), a partir da velocidade da onda longitudinal no aço Superdúplex (~5900 m/s) e no acrílico Rexolite<sup>R</sup> (~2330 m/s). Para uma incidência da onda longitudinal no corpo de prova com ângulo de 60°, o ângulo entre a superfície do corpo de prova e a incidência sônica foi de 20°. A Figura 17 mostra as dimensões das sapatas confeccionadas.

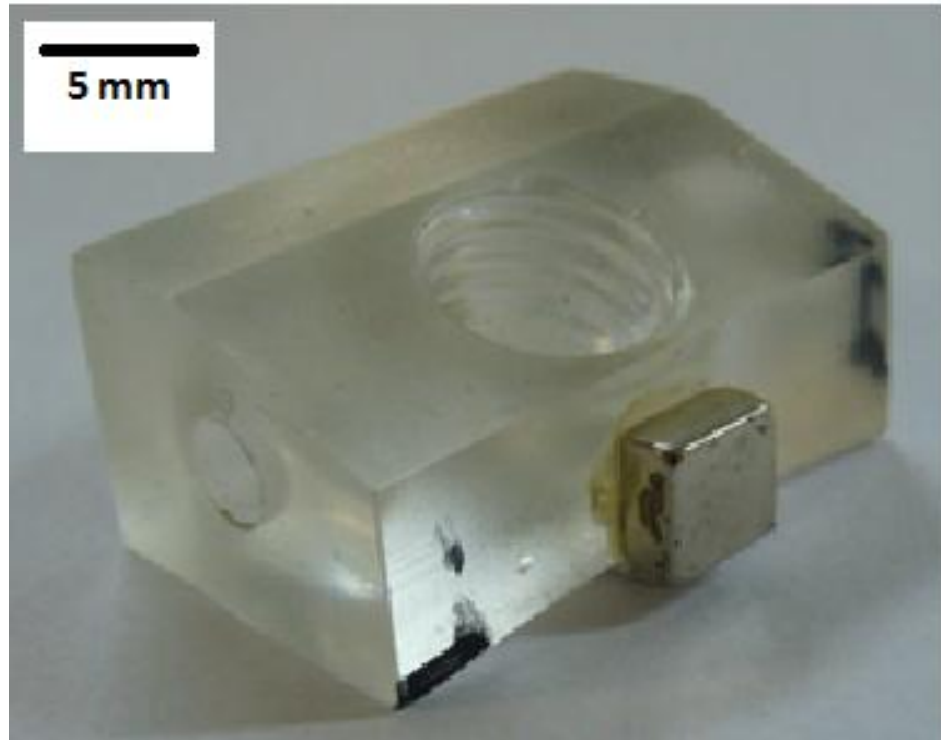
$$\frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \beta} = \frac{V1}{V2} \quad (12)$$

Figura 17 - Dimensões em milímetro das sapatas de ultrassom fabricadas para o trabalho.



Após a usinagem, as sapatas foram polidas com pasta de diamante para suavizar rugosidades que poderiam causar interferência e/ou atenuação no feixe sônico. Para manter as sapatas fixadas nos corpos de prova, foram anexados a elas ímãs, conforme mostra a Figura 18. A força magnética entre o ímã e os corpos de prova manteve as sapatas acopladas nas amostras no decorrer dos ensaios.

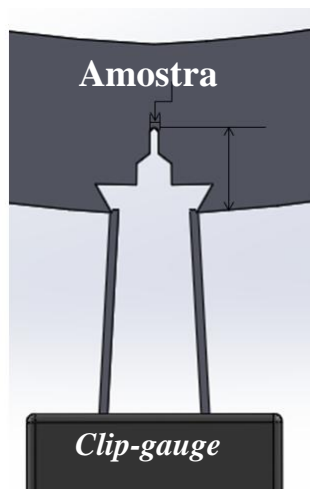
Figura 18 - Sapata usinada a partir de um acrílico de baixa atenuação sônica.



### 3.4 Compliance

Neste trabalho, a técnica de *Compliance* serviu como técnica comparativa de referência em relação à técnica de TOFD. Após a pré-trinca um *clip-gauge* extensômetro foi conectado a um entalhe usinado e o teste foi conduzido em um dispositivo de flexão três pontos. A Figura 19 mostra esquematicamente a conexão entre a amostra e o *clip-gauge*.

Figura 19 - Conexão entre a amostra e o *clip-gauge* extensômetro.



### 3.5 Ensaios de crescimento de trinca em fadiga

Os experimentos de propagação da trinca em fadiga ( $da/dN$ ) e o pré-trincamento das amostras foram realizados em flexão em três pontos, utilizando a frequência de 20Hz em uma máquina servo-hidráulica da marca MTS. O procedimento experimental seguiu a norma ASTM E647-11, sendo  $36 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  a amplitude do fator intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) utilizada e a razão de carregamento mantida constante durante o ensaio ( $R=0,1$ ).

Foi anexada à máquina servo-hidráulica uma cuba de acrílico, com volume aproximado de 3 litros, onde o corpo de prova e os transdutores do TOFD ficaram submersos em água. A água serviu com acoplante sônico entre os sensores e a amostra. Os transdutores do TOFD (emissor e receptor) foram anexados à superfície oposta ao início de propagação da trinca, a fim de captar o sinal ultrassônico difratado pela ponta da trinca. Na Figura 20, é demonstrada a configuração do ensaio.

O *Clipse-Gage* extensômetro, que faz a aquisição da variação de abertura da boca da trinca, foi conectado às amostras de forma que sua parte eletrônica ficasse fora d'água. Apenas entraram em contato com a amostra submersa as extremidades do sensor. Os dados obtidos pelo *Clip-Gage* foram processados pelo software *MTS Fatigue Crack Growth*, que calcula instantaneamente a profundidade da trinca, através da técnica *Compliance*, em função da geometria e das propriedades mecânicas da amostra.

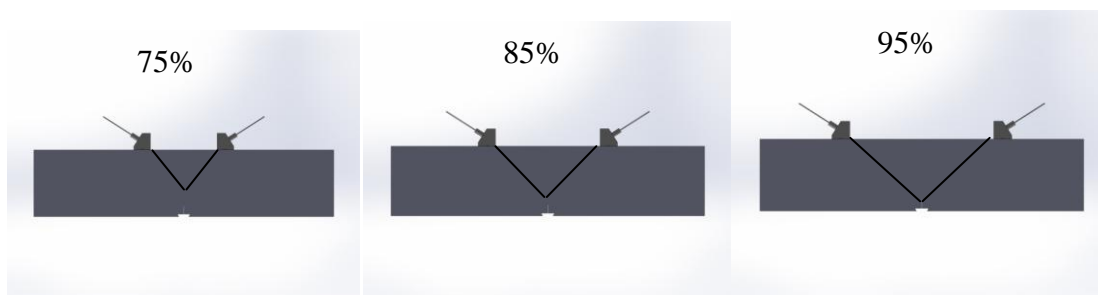


Figura 20 - Configuração do ensaio de fadiga. (A) Transdutores de TOFD (emissor e receptor) e (B) *Clip-gauge* extensômetro.



As distâncias de separação dos transdutores foram definidas para centralizar a energia do feixe sônico a 75%, 85% e 95% da espessura do corpo de prova, conforme exemplifica a Figura 21, para cada foco sônico foram ensaiadas duas amostras.

Figura 21 - Figura esquemática correlacionando os focos sônicos com a separação dos transdutores.

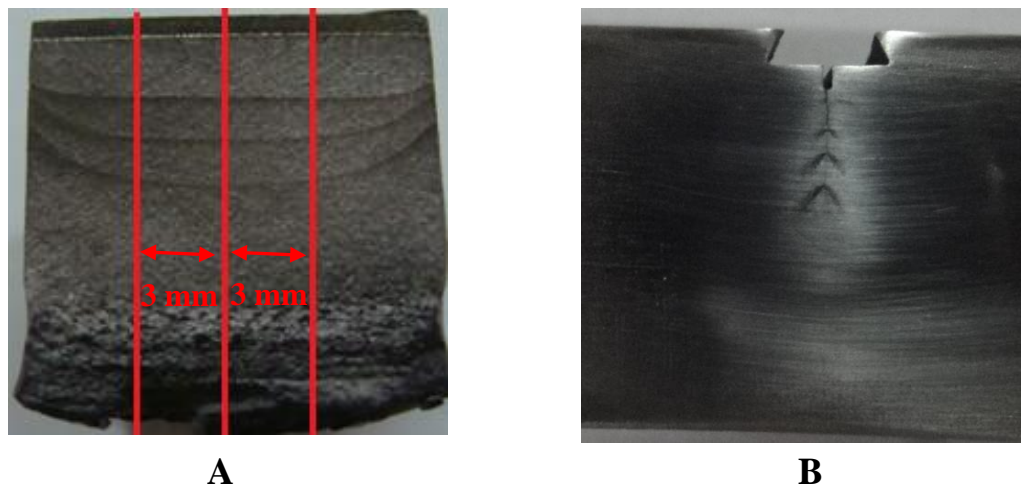


Durante a propagação da trinca, foram realizadas duas sobrecargas para os focos sônicos a 75% e a 95% da espessura e três sobrecargas para o foco sônico a 85% da espessura, quando a trinca encontrava-se ainda antes da metade do corpo de prova. As cargas aplicadas foram ao redor de  $40 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , e o objetivo foi impingir deformação plástica na ponta da trinca. Assim, a região que se encontrava a trinca no momento da sobrecarga ficou demarcada e, após o ensaio, foi possível saber a distância de propagação no momento da sobrecarga.

### 3.6 Fractografia das amostras após o ensaio da fadiga

A análise dos corpos de prova após a fratura foi realizada com o auxílio de uma lupa instrumentada com sistema de medida. Foram medidas as distâncias da superfície dos corpos de prova até as regiões demarcadas pelas sobrecargas. Como a propagação de trinca ocorre sob a forma semi-elíptica, considerou-se a média de três pontos na amostra (centro e em duas faixas distantes 3 mm da região central) a distância de propagação. A Figura 22 mostra a deformação causada pelas sobrecargas e a região onde as deformações plásticas foram medidas.

Figura 22 - Amostras após as sobrecargas. (A) Regiões da amostra onde as deformações plásticas foram medidas. (B) Deformações causadas pelas sobrecargas antes do rompimento da amostra.



### 3.7 Tubo padrão com defeito interno

Foi usinado por eletroerosão um padrão que simulou uma trinca nascente no interior de um tubo de Superdúplex. Para tanto, realizou-se um furo passante nas duas paredes do tubo com o auxílio de uma furadeira industrial. Por esse furo, foi passado o fio da eletroerosão (0,3mm) e se realizou um corte que simulou um defeito na parte interna do tubo. A Figura 23 exemplifica as dimensões do padrão, e, a Figura 24, apresenta o tubo usinado.

O defeito foi dimensionado com a técnica de TOFD, utilizando os mesmos equipamentos e parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga, ou seja, foco do feixe sônico a 75%, 85% e 95% da espessura e sensor de 2MHz. O objetivo foi relacionar o dimensionamento do defeito com os dados obtidos nos ensaios da fadiga. As medidas com o TOFD foram realizadas na região central do defeito, pois, neste local, o defeito ficou perpendicular em relação à direção de inspeção.

Figura 23 - Dimensões do tubo padrão em milímetros.

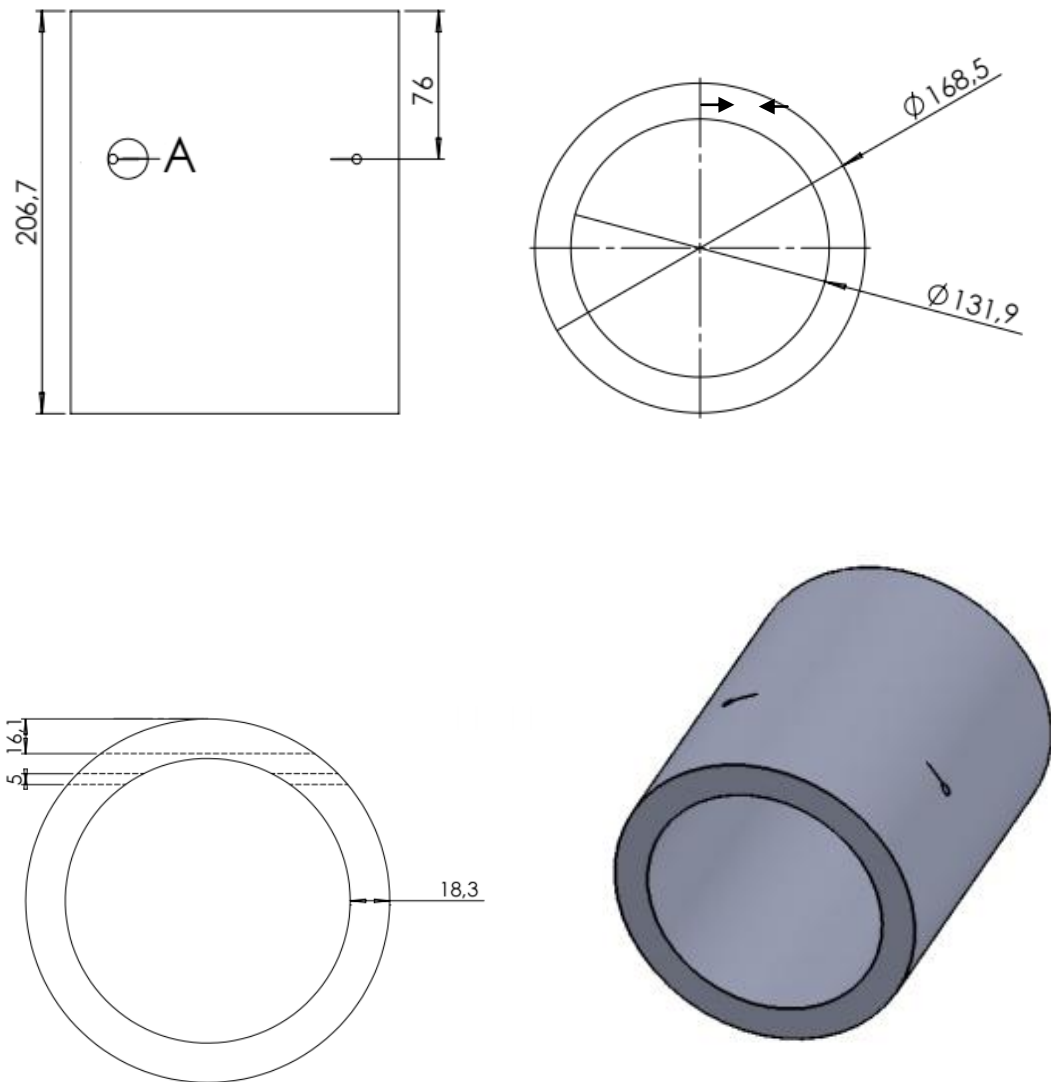


Figura 24 - Tubo padrão usinado.

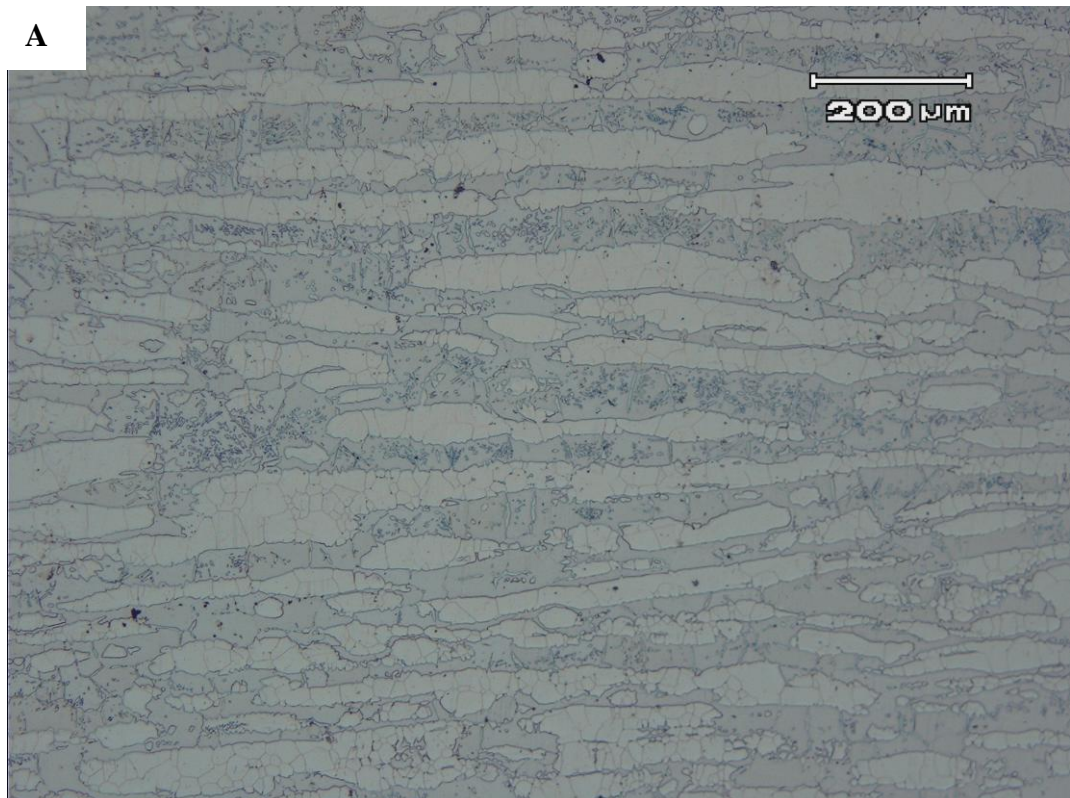


## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

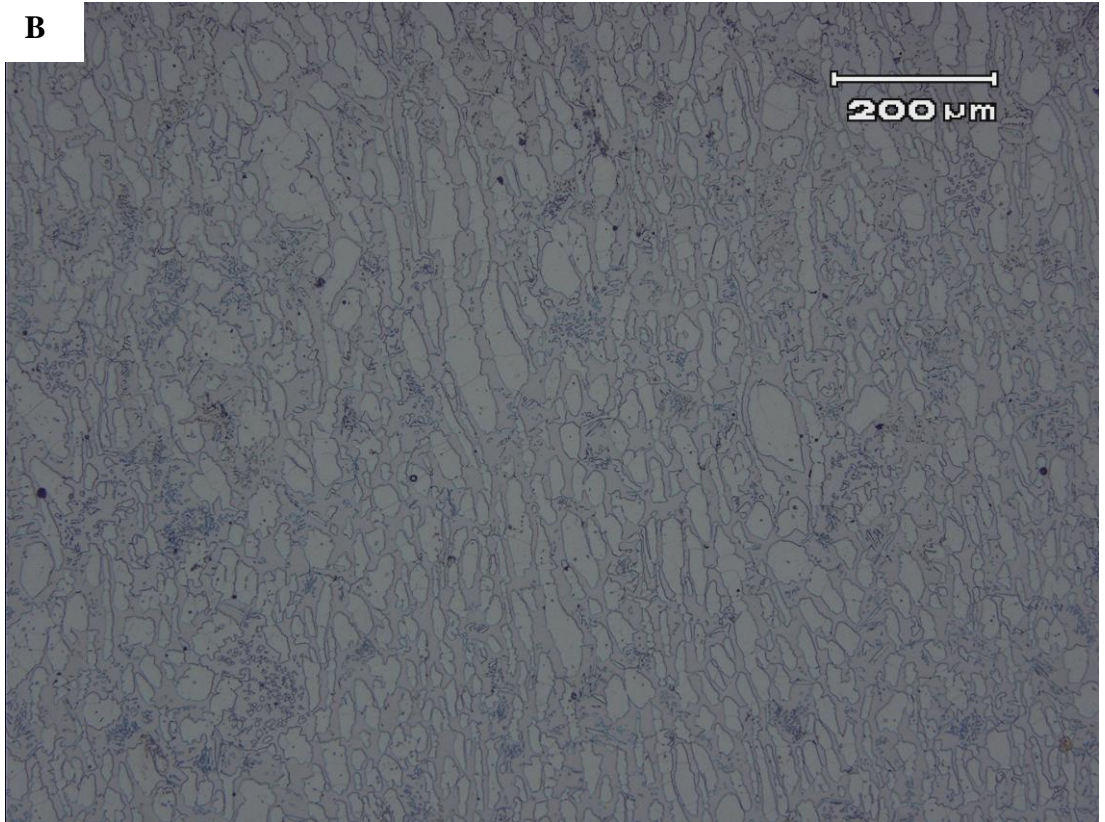
### 4.1 Caracterização metalúrgica do tubo de aço Superdúplex

O aço Superdúplex é caracterizado por apresentar uma microestrutura composta de ilhas de austenita em uma matriz de ferrita. Neste experimento buscou-se analisar se uma possível mudança na morfologia das fases influencia a velocidade da Onda Longitudinal. Para isso, foram analisadas três faces do tubo: topo, longitudinal e transversal. E nelas foram realizadas as revelações metalográficas apresentadas na Figura 25. A composição química do tubo estudado neste trabalho é apresentada na Tabela 1.

Figura 25 - Metalografia do tubo de aço Superdúplex. (A) face transversal, (B) face de topo e (C) face longitudinal.



**B**



**C**

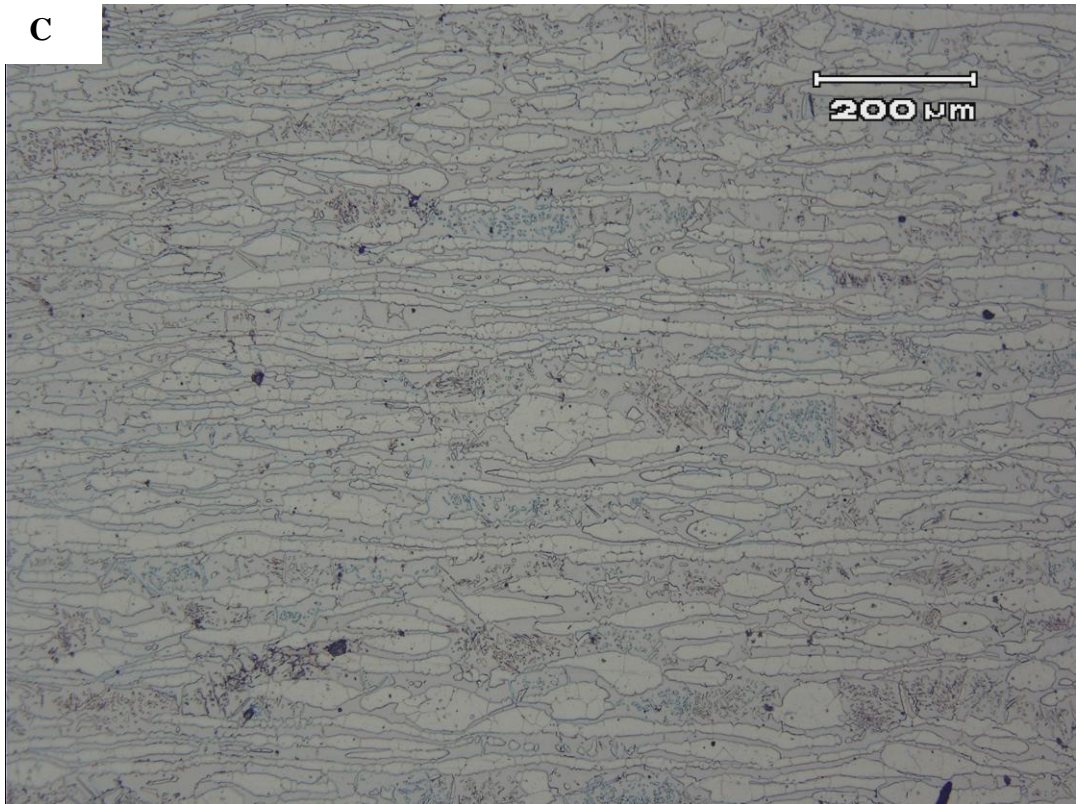


Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável Superdúplex UNS S32750.

C	Cr	Cu	Fe	Mo	Mn
0,028 %	24,2 %	0,4 %	63,1 %	2,8 %	1,1 %
N	Ni	P	S	Si	W
0,25 %	6,8 %	0,001 %	0,01 %	0,3 %	0,8 %

As ilhas de austenita da face transversal do tubo são maiores e mais alongadas quando comparadas com a face longitudinal e a com a face de topo. Provavelmente, a diferença na microestrutura se deve a deformação que o tubo sofre durante o processo de laminação. A Tabela 2 correlaciona às faces reveladas nas metalografias com a velocidade da onda longitudinal. Nota-se que a forma das fases do aço superdúplex influenciou muito pouco na velocidade da onda longitudinal. A maior diferença de velocidade foi 6m/s, entre a face de topo e a face externa. Neste trabalho considerou-se a velocidade de 5900 m/s para a calibração do equipamento de TOFD.

Tabela 2 - Velocidade da onda longitudinal nas faces do tubo de aço Superdúplex.

FACE DE TOPO	5898 m/s
FACE TRANSVERSAL	5896m/s
FACE LOGITUDINAL	5902m/s

#### 4.2 Ensaios de fadiga monitorados com as técnicas de *Compliance*, *Factografia* e **TOFD**:

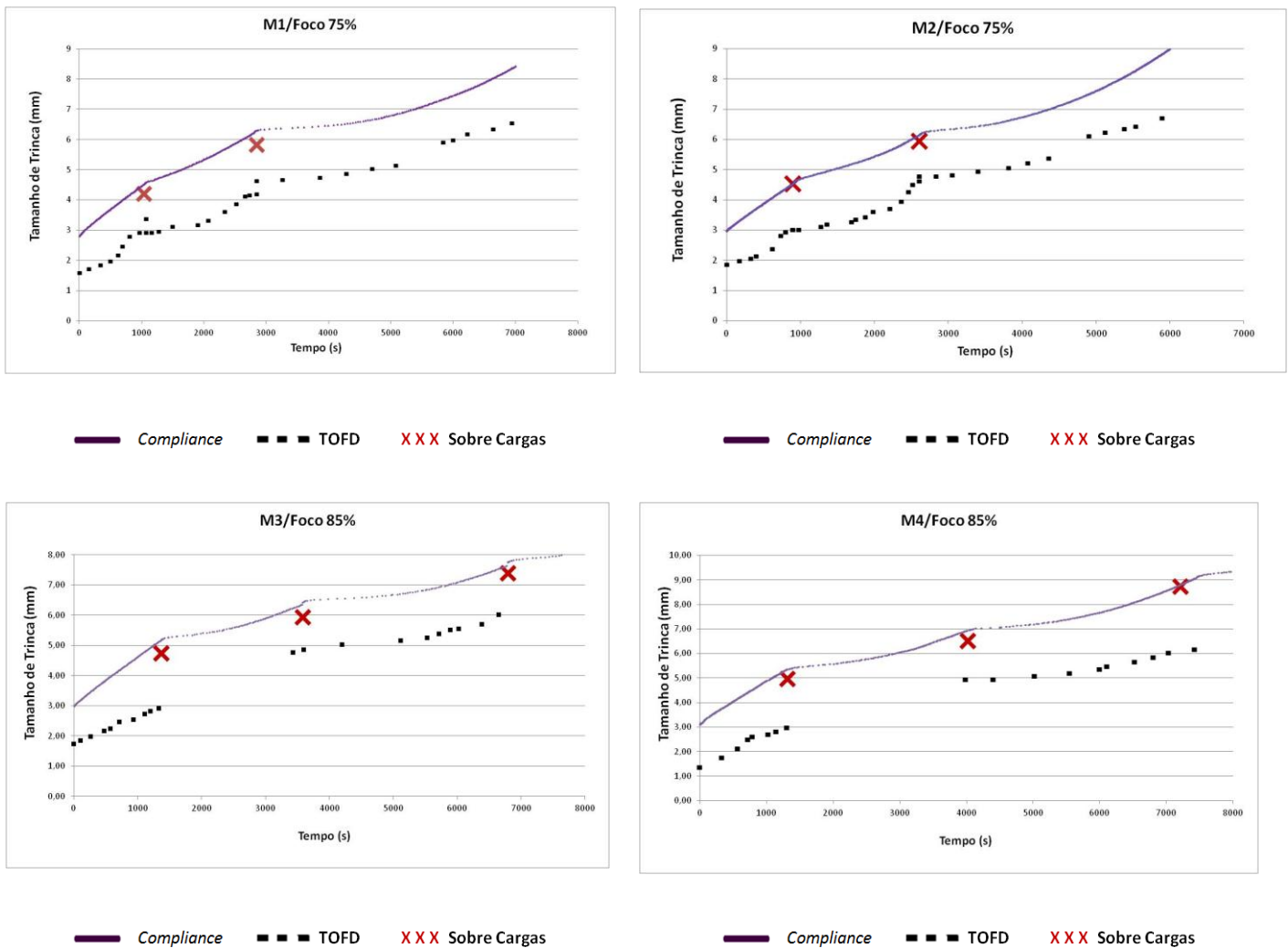
O monitoramento dos ensaios de fadiga com as técnicas de *Compliance*, TOFD e *Fractografia* apontaram uma excelente correlação entre as técnicas. A tabela 3 apresenta as amostras e os focos sônicos utilizados nos ensaios e a Figura 26 mostra os gráficos de crescimento de trinca obtido com as técnicas de TOFD, *Compliance* e os pontos onde foram aplicadas as sobrecargas.

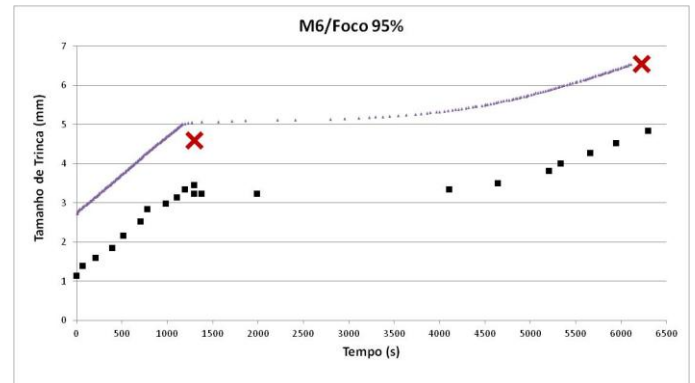
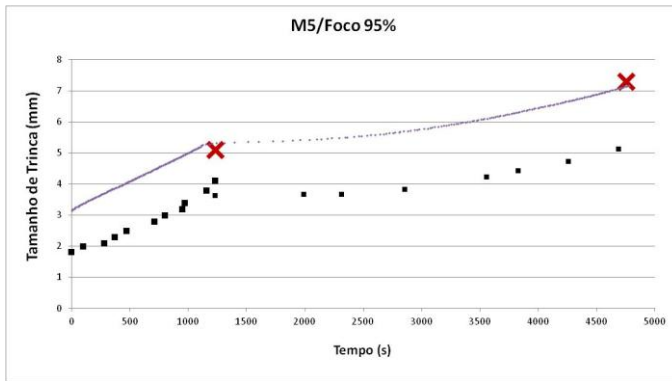


Tabela 3 - Amostras e focos sônicos utilizados no TOFD.

<b>Foco a 75% da Espessura do Corpo de Prova</b>	Amostras M1 e M2
<b>Foco a 85% da Espessura do Corpo de Prova</b>	Amostras M3 e M4
<b>Foco a 95% da Espessura do Corpo de Prova</b>	Amostras M5 e M6

Figura 26- Crescimento de trinca nos ensaios de fadiga utilizando as técnicas de TOFD, *Compliance* e os pontos de sobrecarga.





— Compliance ■ ■ ■ TOFD XXX Sobre Cargas

— Compliance ■ ■ ■ TOFD XXX Sobre Cargas

Comparando-se os dados de crescimento de trinca obtidos com o TOFD e com o *Compliance* nota-se que para todos os focos de feixe sônico o tamanho da trinca medido com o TOFD foi sempre menor do que o medido com o *Compliance*. A diferença entre os valores obtidos com o TOFD e o *Compliance* oscilou entre 1,1 mm e 2,7 mm para as amostras estudadas. A menor diferença entre as duas técnicas ficou entre 1,1 mm e 1,4 mm, quando a trinca se encontrava exatamente sob o foco sônico. À medida que a trinca se aproximou da superfície da amostra (onde se encontravam os sensores de TOFD), a diferença entre os valores medidos com o TOFD e com o *Compliance* aumentou, ultrapassando os 2 mm logo antes do sinal da difração se confundir com o sinal da Onda Lateral.

As demarcações causadas pelas sobrecargas serviram como pontos de referência para analisar a assertividade dos dados de crescimento de trinca obtidos com as técnicas de TOFD e *Compliance*. A Tabela 4 demonstra as distâncias de propagação da trinca medidas com as respectivas técnicas e os pontos de sobrecarga.

Tabela 4 - Propagação da trinca no momento em que foram dadas as sobrecargas.

		Tempo (s)	Fractografia (mm)	Compliance (mm)	TOFD (mm)
Foco 75%	M1	0	2,81	2,81	1,59
		1032	4,22	4,76	3,37
		2848	5,84	6,31	4,2
	M2	0	2,97	2,97	1,86
		895	4,53	4,55	3,02
		2609	5,93	5,14	4,78
Foco 85%	M3	0	2,99	2,97	1,73
		1360	4,74	5,19	2,92
		3577	5,94	6,42	4,76
	M4	6790	7,40	7,77	6,02
		0	3,10	3,10	1,36
		1312	4,97	5,36	2,97
Foco 95%	M5	4015	6,54	6,95	5,1
		7212	8,75	8,91	6,17
		0	3,15	3,15	1,82
	M6	1230	4,97	5,32	4,1
		5231	7,31	7,34	5,34
		0	2,72	2,72	1,14
		1297	4,60	5,05	3,45
		6299	6,56	7,35	4,84

Em todos os casos, a técnica de *Compliance* obteve valores de tamanho de trinca mais próximos das sobrecargas. Entretanto, é importante frisar que os dados de crescimento de trinca obtidos com o *Compliance* foram corrigidos com a distância inicial e final de propagação. As medidas serviram para a correção dos valores obtidos com o *Compliance*, conforme consta na norma ASTM E647-11. Caso os dados obtidos com o TOFD também tivessem seguido uma metodologia para correção, provavelmente convergiriam para valores mais próximos dos obtidos com o *Compliance*. Contudo, neste trabalho, optou-se por avaliar os dados brutos de TOFD visando a uma futura utilização da técnica para monitorar trincas de fadiga em tubos de aço Superdúplex, onde não se tem o controle do início e fim da propagação. Observa-se também que a diferença entre as medidas obtidas com o TOFD e os pontos de sobrecarga aumentaram com o decorrer do ensaio. Já a diferença entre distância de propagação obtida com o *Compliance* e as das sobrecargas teve pouca variação.

Também pode se inferir a partir da avaliação dos gráficos que após as sobrecargas ocorreu o fenômeno de retardo de crescimento da trinca. Ou seja, houve um decréscimo na taxa de crescimento de trinca. Depois que a trinca passou pela região que sofreu deformação plástica e que ficou sob o efeito de tensões residuais compressivas, a taxa de propagação voltou para o seu patamar inicial. As sobrecargas também influenciaram negativamente o sinal de difração da trinca recebido pelo TOFD. Para que ocorra a difração da frente de onda sônica, é necessário que a ponta da trinca seja aguda, na casa do comprimento de onda. Com a deformação plástica, possivelmente, o raio de curvatura da ponta da trinca aumentou, o que pode ter acarretado a diminuição da amplitude do sinal da difração da trinca.

A Tabela 5 mostra o início e o fim da propagação da trinca com o TOFD nos diferentes focos sônicos estudados. Com o foco do feixe sônico a 75% da espessura da amostra, foi possível monitorar o crescimento da trinca até 6,68 mm para a amostra M1 e 6,71mm para a amostra M2. Quando o foco do feixe sônico ficou a 85% da espessura, foi possível monitorar até 6,2 mm para a mostra M3 e 6,17 para a amostra M4. Já para o foco sônico mais distante da superfície da amostra (95% da espessura), foi possível monitorar apenas 5,13 mm e 4,84 mm para as amostras M5 e M6, respectivamente. Esta limitação na distância de monitoramento da trinca se deve ao efeito de fundo de escala da Onda Lateral.

Tabela 5 - Início da propagação e fim da propagação de trinca captado com a técnica de TOFD.

<b>Amostra</b>	<b>Foco Sônico</b>	<b>Início da Propagação</b>	<b>Fim da Propagação</b>
<b>M1</b>	<b>75%</b>	<b>1,59 mm</b>	<b>6,68 mm</b>
<b>M2</b>	<b>75%</b>	<b>1,86 mm</b>	<b>6,71 mm</b>
<b>M3</b>	<b>85%</b>	<b>1,73 mm</b>	<b>6,02 mm</b>
<b>M4</b>	<b>85%</b>	<b>1,36 mm</b>	<b>6,17 mm</b>
<b>M5</b>	<b>95%</b>	<b>1,82mm</b>	<b>5,34 mm</b>
<b>M6</b>	<b>95%</b>	<b>1,6 mm</b>	<b>4,84 mm</b>

Esperava-se que os focos mais próximos do entalhe usinado para nuclear a trinca (Rabo de Andorinha) captassem antes o início da propagação da trinca. Entretanto, houve dispersão semelhante da captação do início da propagação de trinca para os três focos sônicos. Ou seja, o foco sônico não influenciou o fundo de escala devido a sobreposições de sinais e conversão de módulos quando a frente de onda colide com o entalhe usinado. Já o ponto final

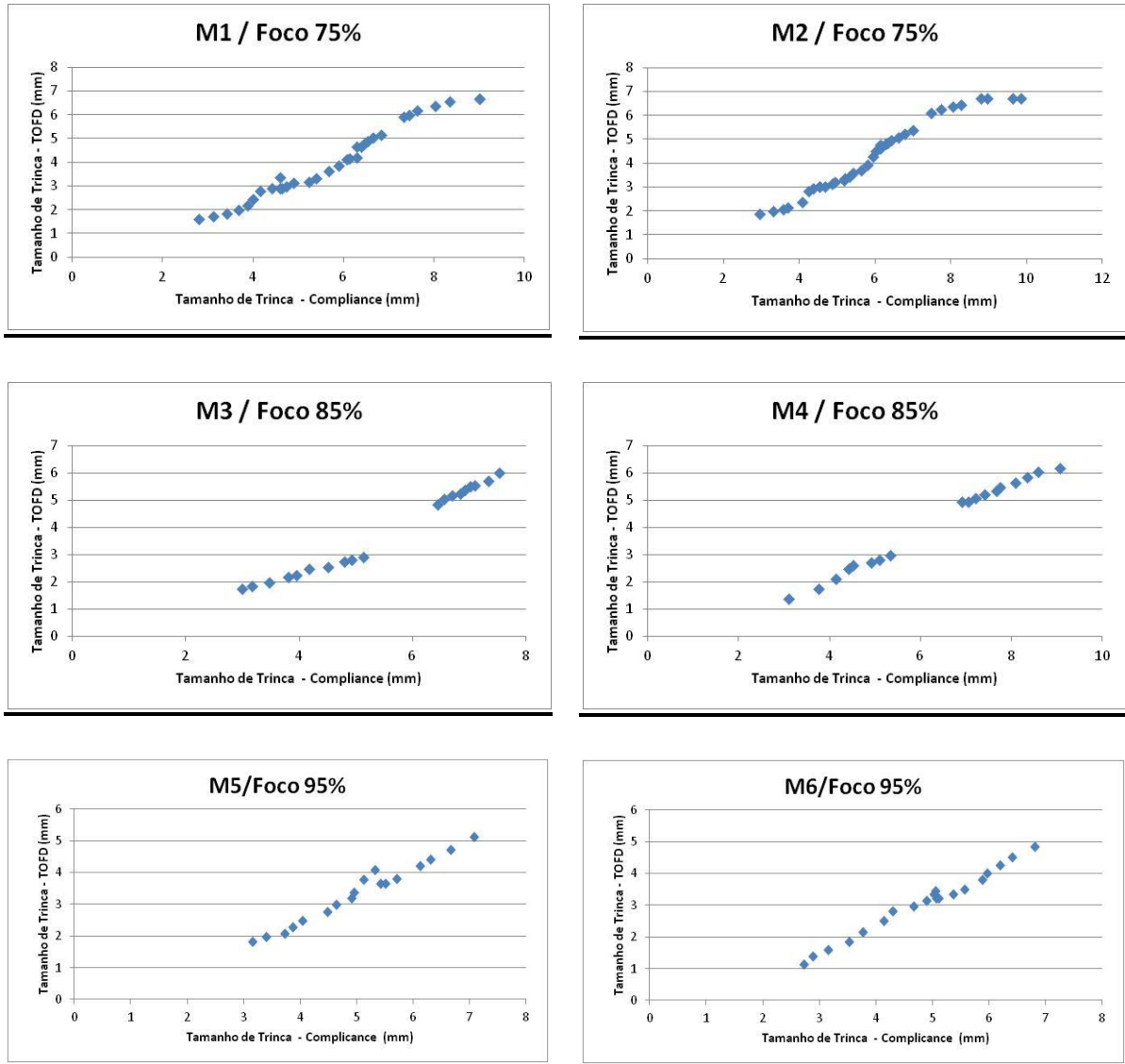
de monitoramento da trinca com o TOFD teve relação direta com o foco sônico empregado. Os focos mais próximos da superfície da amostra (75% e 85% da espessura) captaram uma maior distância de propagação.

CARNAVEL estudou a técnica de TOFD para dimensionar trincas de fadigas em chapas de aço ao carbono, utilizando sensores de 5 MHz e sapatas com 70 graus. O erro da técnica variou de 0,9 a 2,3 mm, para as amostras com profundidade de trinca entre 1,1 a 7,5 mm, semelhante aos obtidos nos ensaios de fadiga, e o tamanho de trinca dimensionado foi sempre menor que o tamanho real do defeito. Além disso, não foi possível dimensionar trincas menores que 1,1 mm, provavelmente devido ao efeito de fundo de escala do Eco de Fundo (CARNEVAL, 2007). NATH estudou o dimensionamento de trincas de fadiga com o TOFD em estruturas com geometrias complexas. O erro de dimensionamento para as trincas de 5 mm, 7,5 mm e 10 mm, variou de 0,7mm a 1,7 mm (NATHA S.K., 2010). Proporcional ao erro de dimensionamento encontrado durante os ensaios de fadiga estudados no presente trabalho.

#### **4.3 Correlação entre os dados obtidos com *Compliance* e TOFD**

Os resultados dos dados obtidos com as técnicas de *Compliance* e TOFD apresentaram diferença de valores e a correlação dos dados explicita a amplitude da diferença entre as técnicas. A Figura 27 mostra a correlação entre os dados de crescimento de trinca obtidos com as técnicas de TOFD e de *Compliance*. No eixo abscissas estão os valores obtidos com o *Compliance* e no eixo das ordenadas os valores obtidos com o TOFD, medidos em um mesmo tempo.

Figura 27 - Correlação entre os dados obtidos com o TOFD e o *Compliance* em um mesmo tempo durante o monitoramento dos ensaios da fadiga. No eixo das abscissas é plotado o tamanho de trinca obtido com o *Compliance* e no eixo das ordenadas o tamanho de trinca obtido com o TOFD.



Nota-se que houve relação linear entre os dados obtidos com o TOFD e com *Compliance*. A diferença média entre as duas técnicas manteve-se entre ao redor de 1,7 para todos os casos estudados. Entretanto, quando a trinca chegou próximo ao fundo de escala da técnica de TOFD, a diferença das medidas obtidas com as duas técnicas aumentou. Caso apenas a técnica de TOFD fosse utilizada para monitorar crescimento de defeitos em tubos de

aço Superdúplex, o segmento de reta formado entre os dados obtidos com o TOFD e o *Compliance* poderia ser utilizado para corrigir os dados obtidos com o TOFD.

A Tabela 6 mostra os coeficientes de correlação de Pearson obtido entre os dados de crescimento de trinca do TOFD e do *Compliance*. A correlação entre as duas técnicas foi muito forte. O Coeficiente de Correlação Pearson foi sempre maior que 0,96 para todas as amostras analisadas.

Tabela 6 - Correlação de Pearson entre os dados obtidos com o TOFD e o *Compliance*.

<b>Amostra</b>	<b>Correlação de Pearson</b>
M1	0,986
M2	0,994
M3	0,987
M4	0,981
M5	0,963
M6	0,980

#### 4.4 Inspeção do tubo padrão com o TOFD

A inspeção do tubo teve o objetivo de fazer um comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios de fadiga com uma inspeção de um defeito real nascente na raiz de um tubo de aço Superdúplex. Também foi analisada a possibilidade do monitoramento deste defeito caso o tubo estivesse submetido a cargas cíclicas. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos com a inspeção do TOFD, utilizando os mesmos parâmetros – foco de 75%, 85% e 95% da espessura, transdutor de 2MHz – e com as mesmas sapatas utilizadas nos ensaios de fadiga.

Tabela 7 - Tamanho de defeitos obtidos com a inspeção do TOFD.

	<b>Profundidade do defeito (mm)</b>	<b>Profundidade da medida com o TOFD (mm)</b>
<b>FOCO 75% da superfície</b>	16,10	14,49
<b>FOCO 85% da superfície</b>	16,10	14,99
<b>FOCO 95% da superfície</b>	16,10	14,71

A espessura da parede do tubo é 18,3 mm e o defeito usinado distava 16,10 mm da superfície. Os três focos sônicos utilizados na inspeção com o TOFD indicaram um tamanho de trinca menor do que o real. A Tabela 8 mostra que para os focos sônicos mais distantes da região onde se encontra o defeito, maior foi a diferença entre o tamanho real do defeito e o dimensionado com o TOFD.

Tabela 8 - Profundidade do foco sônico, distancia o foco sônico até o defeito e o erro de dimensionamento com o TOFD.

	<b>Profundidade do foco sônico (mm)</b>	<b>Distância do foco sônico até o defeito (mm)</b>	<b>Erro de dimensionamento com o TOFD (mm)</b>
<b>FOCO 75% da espessura</b>	13,73	2,37	1,61
<b>FOCO 85% da espessura</b>	15,56	0,54	1,11
<b>FOCO 95% da espessura</b>	17,39	1,29	1,39

O foco sônico de 75% da espessura foi o que teve a maior diferença entre o dimensionamento do defeito e o tamanho real de trinca (1,61 mm). Também foi o foco que estava mais distante do defeito (2,37 mm). Já o foco a 85% da espessura foi o mais próximo do defeito (0,54 mm) e com o menor erro no dimensionamento (1,11 mm). O foco mais distante da superfície (95% da espessura) estava a 1,29 mm do defeito e seu erro de dimensionamento foi de 1,39 mm. Caso o tubo fosse submetido a um processo de fadiga, provavelmente a captação do sinal da difração da trinca se daria de maneira similar ao encontrado nos ensaios de fadiga. O erro no dimensionamento do defeito com os três focos sônicos estudados foi semelhante ao encontrado durante o monitoramento dos ensaios de fadiga com o TOFD.

Caso ocorresse processo de crescimento da trinca o foco a 75% da espessura captaria a maior distância de propagação. Para este foco, o erro inicial seria de 1,61 mm no início de propagação e quando a trinca se aproximasse do local onde se encontra o foco sônico (13,73mm de profundidade) o erro de dimensionamento provavelmente ficaria próximo de 1,1mm. Sendo possível monitorar até próximo dos 12,3 mm de profundidade (6 mm de trinca), com um erro entorno de 2 mm logo antes do sinal de difração se confundir com a



Onda Lateral. Também, os dados comparativos entre o TOFD e o *Compliance*, obtidos nos ensaios de fadiga, poderiam servir para corrigir os dados da técnica ultrassônica, e assim determinar com maior precisão a profundidade da trinca durante o monitoramento do defeito com o TOFD.

## 5.0 CONCLUSÕES

Foi possível realizar o monitoramento dos ensaios da fadiga utilizando a técnica de TOFD nos focos sônicos estudados. A distância final de monitoramento teve relação com os focos sônicos empregados. Onde, nos focos mais próximos da superfície captou-se uma maior distância de propagação.

O efeito de fundo de escala da Onda Lateral foi o fator limitante no monitoramento dos ensaios de fadiga. A maior distância de monitoramento da trinca foi para frente de onda sônica focada a 75% da espessura do corpo de prova.

As sobrecargas causaram retardo de trinca e a redução da amplitude do sinal de difração da trinca. A correlação da sobrecarga com o ciclo aplicado ficou mais próximo dos dados de crescimento de trinca obtidos com o *Compliance* do que dos obtidos com o TOFD.

Houve correlação muito forte entre o crescimento de trinca obtido com o TOFD e o medido com o *Compliance*. A diferença média entre as técnicas ficou próxima a 1,7 mm para todos os casos analisados.

A inspeção no tubo padrão manteve uma diferença entre a medida real e a obtida com o TOFD proporcional às encontradas nos ensaios da fadiga.

## 6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no desenvolvimento deste trabalho e dos resultados obtidos nos ensaios realizados, sugere-se como trabalhos futuros:

Utilização do tempo de vôo da onda transversal difratada (S-TOFD) no monitoramento do crescimento de trinca de fadiga.

Realizar o processamento do sinal dos dados obtidos com o TOFD durante o monitoramento de ensaios de fadiga para reduzir o efeito do fundo de escala da técnica.

Utilizar o equipamento de Phased Array na modalidade TOFD para captar o sinal difratado durante o crescimento de trinca.

Analisar a utilização da técnica de TOFD para monitorar o crescimento de trinca em fadiga em escala real.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1820**: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. Pennsylvania, 2016. v. 03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E2373 / E2373M – 14** : Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique. Pennsylvania, 2014. V.03.

ANDERSON T. L. **Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications**. New York: CRC Press, 2005. v. 3, cap. 10, p. 499-500.

BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics**. Galena: Kluwer Academic Publishers, 1989. v. 1, cap 4, p 77-88.

BRITISH STANDARD. **BS EN 583-6:2008**. Non-destructive testing. Ultrasonic examination. Time-of-flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities, Londres. 2010.

CARNEVAL R.O et al. Definição de Técnicas Não-Destrutivas para Inspeção de Parafusos Estoijos quanto a Presença de Trincas. **V Conferencia Panamericana de END**, Buenos Aires. 2007.

CHARLESWORTH J.P., TEMPLE J.G. **Engineering Application of Ultrasonic Time-Of-Flight Diffraction**. Reserch Studies Press LTD, Michigan. 2001. p 15-245.

COSTA A.C. **Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Metalúrgica e Minas. Belo Horizonte, 2011.

DANESHPOURA S. at al. Crack retardation mechanism due to overload in base material and laser welds of Al alloys. **International Journal of Fatigue**. v. 42. p. 95-103. 2011.

DIETER G. E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan S.A, 1981. v 2, p. 105-111.

FILHO D. B. F. JUNIOR J. A. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson. **Revista Política Hoje**. Editora da UFPE, Recife, 2009, V.18.

HAAG J. **Propagação De Trincas Por Fadiga Em Arames De Alta Resistência Mecânica**. 2012. f. 25-30. Trabalho de conclusão (Graduação) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Metalurgia, Porto Alegre, 2012.

INSPEBRASIL. **Inspeção por Ultrassom (técnica pulso-eco)**. Disponível em: < [http://www.inspbrasil.com.br/index.php?menu=detalhes\\_sv&id=6](http://www.inspbrasil.com.br/index.php?menu=detalhes_sv&id=6) >. Acesso em 10 mar. 2016.

KOCKELMANN H. et al. Crack depth measurements on fracture mechanics specimens by the ultrasonic amplitude modulation method. **Nuclear Engineering and Design**, Netherlands, v. 102, p. 331-339, 1987.

LIN S. FUKOTOMI H. OGATA T. Analysis Of Wave Propagation For The Tofd Method By Finite Element Method: Optimization Of Test Configuration And Proposal Of A New Tofd Method. **Materials Science Research Laboratory**, Tokio, 2006.

LOPES M. F. YEH F. W. T., HAAG J., ABREU E. L. E, CLARKE T. R. Análise comparativa das técnicas de TOFD, queda de potencial e compliance no monitoramento de crescimento de trinca em uma solda em um aço inoxidável superduplex UNS S32750. **CONGRESSO ABM INTERNACIONAL**, 68, 2013. Belo Horizonte, Editora ABM, 2013. p. 2561-2567.

MARTINS C. *et al.* Microstructural characteristics and corrosion behavior of a super duplex stainless steel casting. **Materials Characterization**, v. 60, p. 150-155, Fev. 2009.

MOLES M. ROBERTSON L., SINCLAIR T. Developments In Time-Of-Flight Diffraction. **World Conference On Nondestructive Testing**, 18. Durban, 2012.

MTS CORPORATION SYSTEM. **Fatigue Crack Growth**. Fatigue and Fracture test Applications, 1998.

NATHA S.K. KRISHNAN B., RISHNAMURTHYB C.V., NARAYANAA B.H. Reliability assessment of manual ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) inspection for complex geometry components. **NDT & E International**. v.43. p. 152-162, 2010.

SOUZA R.R. **Desenvolvimento de metodologia e estudo do potencial da técnica TOFD visando a inspeção e o monitoramento de equipamentos**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Metalúrgica, Minas e Materiais. Porto Alegre, 2009.

SPIES M. RIEDER H., DILLHÖFER, A. Synthetic Aperture Focusing and Time-of-Flight Diffraction - Ultrasonic Imaging—Past and Present. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 31, p. 310-323, dez. 2012.

STASZCZAK E. J. CARVALHO M. B. Análise Da Inspeção Ultra-Sônica De Tubos De Aço Hk 40 Utilizados Em Fornos De Plantas De Processamento De Petróleo. **Pan American Conference For Nondestructive Testing**, 3, Rio de Janeiro. 2003.

VASCO-OLMO J.M. DÍAZ F.A. A , PATTERSON E.A. B. Experimental Evaluation Of Shielding Effect On Growing Fatigue Cracks Under Overloads Using ESPI **International Journal of Fatigue**. v. 83, p. 117-126, fev. 2015.

ZHANG Y., at al. Crack Measurement In Steel Plates Using Tofd Method . **Journal Of Performance Of Constructed Facilities**. v. 14, mai. 2000.