

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

**Detecção de corrosão em tubos utilizando a técnica não destrutiva por ondas guiadas ultrassônicas.**

Vilander M. F. Kiminami<sup>a</sup>, Ygor T. B. Santos<sup>b</sup>,  
Ivan C. da Silva<sup>c</sup>, Cláudia T. T. Farias<sup>d</sup>

**Abstract**

The presence of defects in equipment and piping can cause serious risks and losses to industries. For this reason the use of non-destructive testing (NDT) is of great importance in preventing failures and monitoring the structural integrity of industrial systems. Among the methods of nondestructive ultrasonic inspection, guided waves allow the evaluation of a large area in a short period of time compared to the conventional assay. From a single point, the guided waves propagate along the tube wall, over long distances, enabling the detection of external or internal thickness loss by providing the position and severity of the indication. This work aims to present a practical study of the use of guided wave of mid-range to the thickness loss detection corrosion in pipes. It was determined the location and extent of the corrosion process. In order to remove the noise signals were processed using, among other techniques, the Wavelet Transform.

**Keywords:** Corrosion, nondestructive testing ultrasonic, guided waves, Wavelet Transform.

**Resumo**

A presença de defeitos em equipamentos e tubulações podem gerar sérios riscos e prejuízos às indústrias. Por este motivo a utilização dos ensaios não destrutivos (ENDs) é de grande importância na prevenção de falhas e no monitoramento da integridade estrutural dos sistemas industriais. Dentre os métodos de inspeção não destrutiva ultrassônica, as ondas guiadas permitem a avaliação de uma grande área em um espaço de tempo reduzido, quando comparada ao ensaio convencional. A partir de um único ponto, as ondas guiadas se propagam ao longo da parede de tubos, por longas distâncias, permitindo a detecção de perdas de espessura internas ou externas, fornecendo a posição e severidade da indicação. Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo prático do uso de ondas guiadas de médio alcance para a detecção de perda de espessura por corrosão em tubos. Foram determinados a localização e a dimensão do processo corrosivo. A fim de remover o ruído, os sinais obtidos foram processados utilizando, entre outras técnicas, a Transformada de Wavelet.

**Palavras-chave:** Corrosão, Ensaio não destrutivo ultrassônico, ondas guiadas, Transformada Wavelet

Graduando em Eng. Química - IFBA Campus Salvador/GPEND/LABIND

<sup>b</sup> Graduando em Eng. Industrial Mecânica- IFBA Campus Salvador/GPEND/LABIND

<sup>c</sup> Dr. Eng. Metalúrgica e de Materiais e - IFBA Campus Salvador/GPEND/LABIND

<sup>d</sup> Dra. Eng. Metalúrgica e de Materiais e - IFBA Campus Salvador/GPEND/LABIND

## **Introdução**

---

A busca por metodologias mais eficientes que promovam a detecção de processos corrosivos em tubulações industriais (com ou sem isolamento) movem pesquisadores das mais diversas áreas. Os ensaios não destrutivos podem vir a diminuir este problema e, a inspeção por ondas guiadas ultrassônicas se mostra bastante promissora.

A utilização do método de ensaio por ondas guiadas em geral, proporciona diversas vantagens quando comparado ao método convencional. Podem se propagar em longas distâncias em um curto espaço de tempo, permitindo a inspeção de locais de difícil acesso com a mesma sensibilidade de uma inspeção em área acessível. Durante a inspeção, é possível atingir aproximadamente 100% do volume da tubulação, além de permitir fazê-lo sem a necessidade de parar a operação da linha.

Como desvantagens este tipo de método possui alta sensibilidade na sua manipulação além do seu caráter dispersivo e conseqüentemente, a interpretação do sinal se torna mais dificultosa, necessitando de mão-de-obra especializada. Devido ao caráter multimodo, o ensaio também se torna mais complexo pela dificuldade de gerar um modo de propagação único com os transdutores disponíveis no mercado, pois vários grupos de modos são muito próximos em determinadas faixas de frequência. (1)

Para facilitar a interpretação e análise dos resultados obtidos na inspeção por ondas guiadas, técnicas de processamento digital dos sinais ultrassônicos coletados são bastantes utilizadas no intuito de se aumentar a relação sinal ruído e, desta forma, aumentar a confiabilidade do sistema diminuindo as possibilidades de erro.

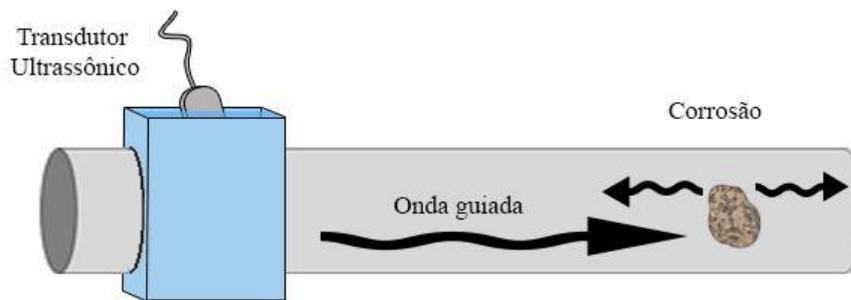
Neste trabalho, ondas ultrassônicas guiadas foram geradas e propagadas através de um tubo de aço inoxidável AISI 304 a fim de detectar a perda de espessura inserida para simular processo corrosivo. A detecção e localização da descontinuidade no tubo foi possível devido a utilização de processamento digital do sinal ultrassônico.

## **Fundamentação Teórica**

---

### ***Propagação das Ondas Guiadas Ultrassônicas em Tubos***

Ondas guiadas ultrassônicas permitem monitorar a perda de espessura de tubulações metálicas, por meio da introdução de um sinal ultrassônico que percorre longas distâncias e, onde parte da energia em forma de onda é refletida, ao interagir com uma descontinuidade (2). Através do tempo de viagem da onda é possível detectar o local da falha, como mostra a Figura 1.

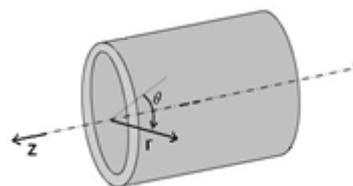


**Figura 1 – Ondas de Lamb em tubo.**

As soluções das equações que descrevem a propagação das ondas guiadas são extremamente complexas e consiste em uma simplificação das equações da elastodinâmica. Um dos métodos frequentemente utilizados na área dos Ensaio Não Destrutivo baseia-se no método da matriz global (3).

A onda guiada pode ser entendida como a superposição de ondas longitudinais e de cisalhamento. A energia transportada pela onda está concentrada entre os limites do material (espessura do tubo), e, é propagada ao longo de toda estrutura (guia de ondas), da mesma forma como a luz em uma fibra óptica. A propagação de ondas guiadas em tubos e sua interação com defeitos é complexa, tornando as informações necessárias sobre os defeitos difíceis de se extrair dos sinais refletidos (4).

As partículas do material deslocadas devido a propagação da onda guiada, depois de serem excitadas, retornam ao seu estado de equilíbrio. Os modos de propagação são definidos considerando as condições de contorno, o deslocamento de campo e as tensões, que devem ser zero nas superfícies internas e externas do tubo. Os deslocamentos das partículas no tubo ocorrem em três direções: axial ( $u_z$ ), radial ( $u_r$ ) e angular ( $u_\theta$ ), representados na Figura 2.



**Figura 2- Representação dos três deslocamentos presentes no tubo, onde  $z$  representa o eixo do deslocamento axial,  $r$  representa o eixo do deslocamento radial e  $\theta$  o eixo do deslocamento angular.**

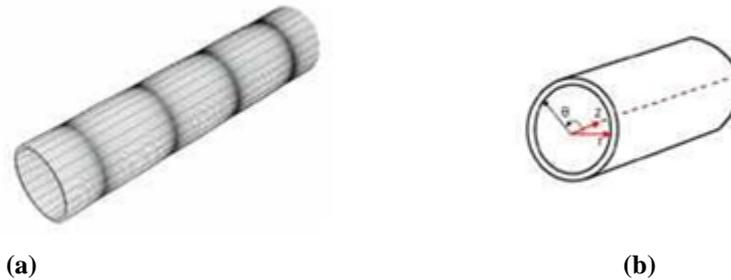
Estes deslocamentos podem ser expressos pela Equação (1),

$$u(r, \theta, z, t) = u(r) e^{i\nu\theta} e^{i(kz - \omega t)} \quad (1)$$

onde  $\nu$  é o número de onda angular,  $u(r, \theta, z, t)$  é uma função de distribuição radial do deslocamento em  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ , respectivamente (5). A dedução desta equação bem como as que regem separadamente os deslocamentos podem ser encontrados mais detalhadamente em Gazis (6).

As ondas guiadas em estruturas cilíndricas se propagam de maneira simétrica e assimétrica em relação ao eixo axial. Quando uma onda axialmente simétrica é refletida por um anteparo também simétrico (tal como uma solda circunferencial), a onda refletida terá as mesmas características da onda incidente. A onda axialmente simétrica tem dois modos distintos de propagação no tubo: modo Longitudinal (Figura 3a) e Torsional (Figura 4a). O modo de

propagação Longitudinal, que apresenta semelhança com os modos de propagação das ondas de Lamb, tem suas partículas se deslocando independentemente do deslocamento angular  $u_\theta$ .



**Figura 3- (a) Representação da propagação do modo longitudinal ou de compressão. (b) Destaque em vermelho dos deslocamentos do modo longitudinal ( $u_r$ ,  $u_z$ ).**

Por conta disto, os modos longitudinais são mais utilizados para detectar falhas na circunferência do tubo e para realizar um exame geral na tubulação. O modo Longitudinal é identificado como  $L(0,m)$  onde  $m$  é um valor inteiro que representa o número do modo e o zero significa que a ordem circunferencial deste modo é nula, logo é um modo de propagação simétrico em relação ao eixo do comprimento do tubo. Um ponto negativo do modo Longitudinal é que ele interage com a substância presente dentro do tubo (7).

O modo Torsional apresenta nomenclatura semelhante,  $T(0,m)$ , porque também tem ordem circunferencial nula e portanto é simétrico em relação ao eixo axial. Entretanto, as partículas do modo Torsional apenas possuem deslocamento angular (Figura 3b), o que levou Gazis (6) comprovar que este modo é mais sensível a falhas localizadas no comprimento do tubo. Assim como o modo Longitudinal, o Torsional também tem semelhanças com os modos de propagação em placas (ondas de Lamb), no caso, com o modo Cisalhante Horizontal (SH). Por serem axialmente simétricos, os modos Longitudinais e Torsionais são os mais utilizados para inspeções (8), além do modo torsional apresentar pouca interação com o conteúdo da tubulação (7).



**Figura4- (a) Representação da propagação do modo Torsional. (b) Deslocamento do modo Torsional ( $u_\theta$ ) (Destaque em vermelho).**

Por outro lado, quando a onda axialmente simétrica é refletida por um anteparo assimétrico (não uniforme em torno da circunferência do tubo), ocorre uma mudança na forma da onda incidente. A conversão de modo faz com que a onda refletida seja uma combinação da onda incidente e dos modos convertidos. Estes modos são assimétricos e são denominados como modos Flexurais e sua propagação no tubo pode ser visualizada na Figura 5a. Estes são identificados como  $F(n,m)$ , onde  $n$  é um número inteiro que representa a ordem circunferencial e  $m$  indica o número do modo. Dentre os três, este é o mais complexo dos modos de propagação, pois as partículas apresentam os três deslocamentos  $u_z$ ,  $u_r$ ,  $u_\theta$ . representados na Figura 4b. Esta característica faz  $\theta$  com que este modo se confunda com os outros em faixas de frequências mais elevadas, tornando ainda mais complexo o estudo destas ondas e mais difícil à interpretação das mesmas (10).



Figura 5- (a) Representação da propagação do modo Flexural. (b) Destaque em vermelho dos deslocamentos do modo Flexural ( $u_r$ ,  $u_z$ ,  $u_\theta$ ).

Cada um dos infinitos modos possui uma velocidade de frente de onda a qual denominados de velocidade de fase ( $v_f$ ). A velocidade de fase mostra quão rápida as partículas do material se movem. Como praticamente todos os modos tem característica dispersiva, o estudo da curva de dispersão da velocidade de fase pela frequência se torna de fundamental importância para a utilização e entendimento do comportamento das ondas guiadas. A velocidade de um ponto de fase constante é dada por,

$$V_f = \frac{\omega}{k} \quad (2)$$

sendo  $\omega$  é a velocidade angular e  $k$  é o número de onda.

A figura 6 mostra o envelope de onda é dado pela adição de um grupo de ondas de frequências próxima e a velocidade de grupo ( $v_g$ ) é a velocidade que este envelope possui. É importante o entendimento pois  $v_g$  é a velocidade de transporte de energia da onda. A  $v_g$  é dada por:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = V_g \quad (3)$$

sendo  $\omega$  é a velocidade angular e  $k$  é o número de onda.

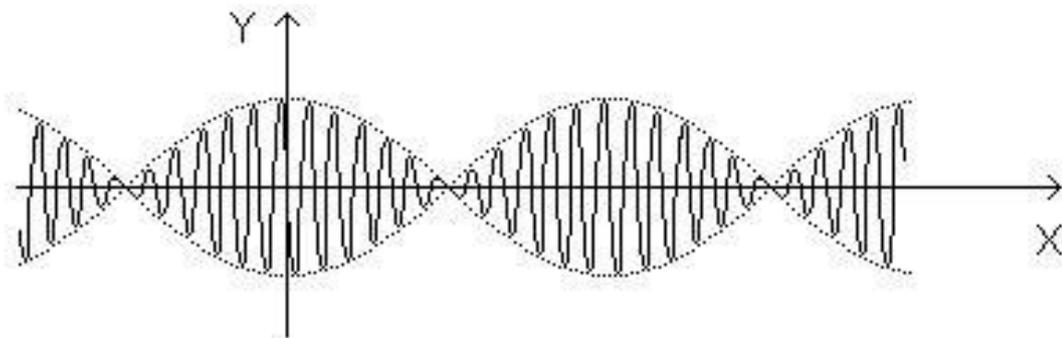


Figura 6 – Representação do envelope da onda o qual define a velocidade de grupo.

O *software* Disperse<sup>®</sup> (9) permite prever as características de propagação das ondas guiadas em estruturas planas ou cilíndricas, gerando as curvas de dispersão. Estas curvas permitem

prever a relação entre a frequência e os modos de propagação gerados, a velocidade de fase, a velocidade de grupo, o ângulo de incidência, etc., como pode ser visto na Figura 7.

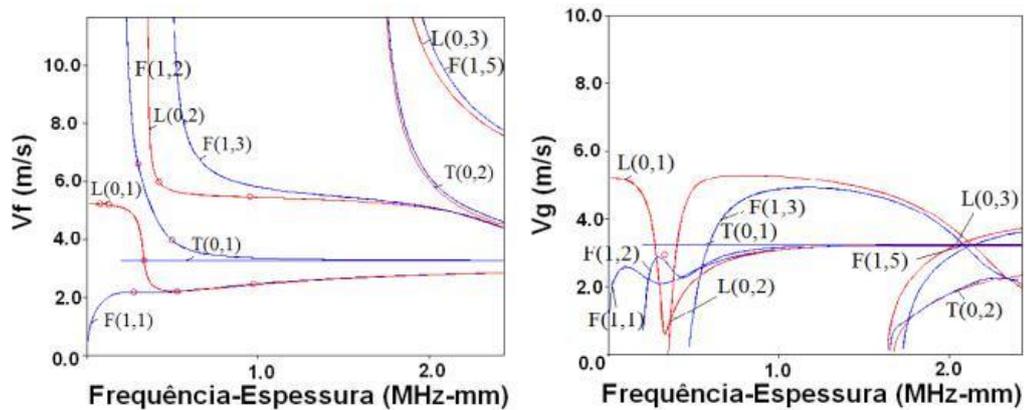


Figura 7 - Curva de dispersão da velocidade de fase e de grupo pela frequência-espessura dos modos de propagação das ondas guiadas para um tubo de aço carbono genérico (10).

### Processamento Digital dos Sinais Ultrassônicos

O uso da *Short Time Fourier Transform (STFT)*, consiste em uma análise espectral dependente do tempo, onde o intervalo de suporte da função é particionado em intervalos menores. Desta forma, o espectro pode ser considerado constante no interior de cada intervalo e uma variação da transformada de Fourier descritas pelas equações 4, 5, 6 é então aplicada (11). Aliado a isso, pode se utilizar um "denoising" via Transformada de *Wavelet* para suprimir o sinal de alta frequência, nesse caso, ruídos indesejáveis (12)

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux} \quad (4)$$

$$W_N^{ux} = e^{-j2\pi/N} \quad (5)$$

$$N = 2^n \quad (6)$$

As *Wavelet's*, reproduzem um sinal transiente de modo mais adequado que as senóides, visto que são capazes de decompor a dinâmica global e local de um sinal. A Transformada Discreta *Wavelet (DWT)* baseia-se na decomposição do sinal em aproximações e detalhes, através de filtros de alisamento (passa-baixa) e outros trazendo informações de detalhes (passa-alta) (13 e 14). Inicialmente, o sinal é subdividido, através de filtro passa-baixa e passa-alta, com frequência de corte variando com a frequência com que o sinal foi amostrado, visto que a largura de banda do sinal digital varia de acordo com o teorema de Nyquist (15). De forma que o modelo da *wavelet* é dado pela equação (7).

$$S(i) = f(i) + \sigma e(i) \quad \text{eq. (7)}$$

O qual  $f(i)$  é o sinal útil,  $e(i)$  é o sinal de ruído,  $S(i)$  para um sinal contendo ruído, a intenção de utilizar a transformada de wavelet é recuperar o sinal útil ( $f(i)$ ) a partir do sinal  $S(i)$ .

## Metodologia

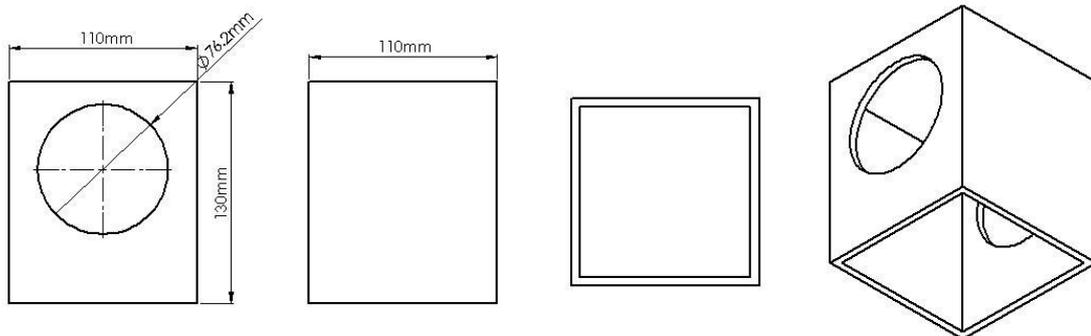
### *Corpo de prova e Sistema de Acoplamento*

Um tubo em aço inoxidável AISI 304 foi utilizado na inspeção ultrassônica. Na Tabela 1 pode-se visualizar as especificações do corpo de prova.

**Tabela 1 – Especificação do corpo de prova.**

Material	Espessura(m m)	Diâmetro nominal (pol.)	Comprimento (m)
Aço inoxidável AISI 304	1,5	3	3

Foi desenvolvido um sistema de acoplamento construído em acrílico (com dimensões em mm, mostrado na Figura 8), para a formação de uma coluna d'água que permitisse a transmissão da onda do transdutor para o tubo. O uso deste dispositivo também permitiu com que se posicione o transdutor na angulação necessária para a excitação do modo de propagação da onda guiada selecionado. Foram utilizados dois sistemas de acoplamento: um para o transdutor-emissor e outro para o transdutor receptor.



**Figura 8 – Vistas do sistema de acoplamento.**

### *Curvas de Dispersão*

Utilizando o software *Disperse*<sup>®</sup> (9), as curvas de dispersão para uma estrutura cilíndrica em aço com espessura de 1,5 mm foram simuladas. A partir das curvas de dispersão foi possível selecionar o modo de propagação da onda guiada, reconhecer a velocidades de grupo e o ângulo de incidência do transdutor para a geração do modo de propagação selecionado e empregado nas inspeções.

### ***Configuração do ensaio experimental***

As inspeções ultrassônicas foram realizadas na configuração transmissão-recepção, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Para a geração da onda ultrassônica e coleta dos sinais digitalizados foram utilizados, respectivamente, o gerador de pulso Olympus® (modelo 5077PR) e o osciloscópio digital Tektronix® (modelo TDS 2024C). A armazenagem e processamento digital de sinais foram realizados em um microcomputador. Dois transdutores de 500 KHz foram utilizados e posicionados conforme Demma (16).

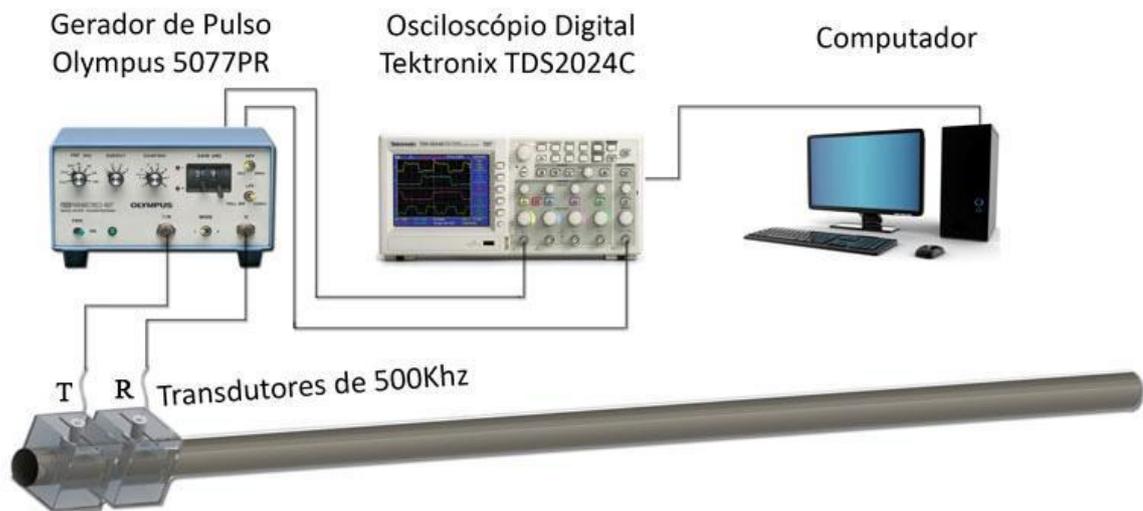


Figura 9 – Configuração do esquema experimental.

Uma primeira coleta de sinais sem a presença de descontinuidade no tubo foi realizada a fim de comprovar posteriormente o seu posicionamento. Após, foi feito um desbaste de cerca de 50% da espessura do tubo em uma área de  $2\text{cm}^2$  a uma distância de 2,05 metros do transdutor-transmissor. Então, outra coleta de sinais foi realizada para posterior processamento digital do sinal ultrassônico.

### ***Processamento Digital dos Sinais Aplicado ao Modo de Propagação da Onda Guiada***

A fim de detectar e localizar a descontinuidade inserida no corpo de prova, os sinais ultrassônicos coletados foram processados. A seguinte metodologia foi empregada neste processamento:

1º) Remoção do DC *offset*;

2º) Aplicação do *denoising* via transformada de *wavelet* do sinal para suprimir o sinal de ruído e obter um sinal útil mais limpo, como proposto por Yajing(17). Foi utilizado wavelets ortogonais Daubechies de coeficiente 3 (db3) como utilizado por Sun (18);

3º) Transformação dos valores de amplitude em valores absolutos, utilizando uma função modular, eliminando assim, os valores negativos. Posteriormente, esse processamento matemático ajuda na detecção de picos via *script*;

4º) Aplicação da função *moving average* (média móvel) a fim de promover uma suavização no sinal. O principal objetivo da média móvel é fornecer valores médios de um determinado período.

5º) Normalização do sinal a fim de padronizar a amplitude do sinal de 0 a 1;

6º) Detecção de picos a fim de identificar os valores de tempo, os quais possui elevação na amplitude.

Nota-se que esses passos são executados a fim de promover uma melhor identificação do sinal útil utilizando uma rotina de detecção de picos. Para uma segunda análise, foi feita a *STFT* que se aplica a funções cujo espectro varia com o tempo, ao passo que, o sinal refletido vai alterar a frequência no domínio do tempo, o que torna este método muito satisfatório para visualização de alterações de frequência.

## Resultados e discussão

Curvas de dispersão foram geradas pelo *software* Disperse<sup>®</sup> e visualizadas na Figuras 10 (a,b,c). A análise destes gráficos mostra que na faixa de 500 kHz em um tubo em aço com 1,5mm de espessura (0,75Mhz-mm) a melhor escolha entre os modos é o longitudinal (0,1) devido ao seu comportamento menos dispersivo nesta faixa de frequência.

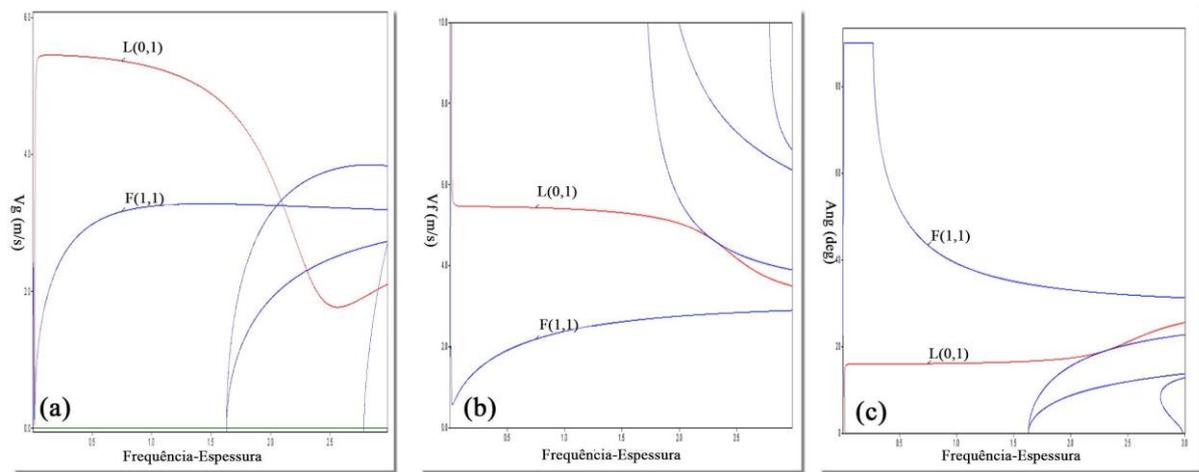


Figura 10 - (a) Curvas de dispersão para tubo em aço com 1,5 mm de espessura (acoplamento em água):

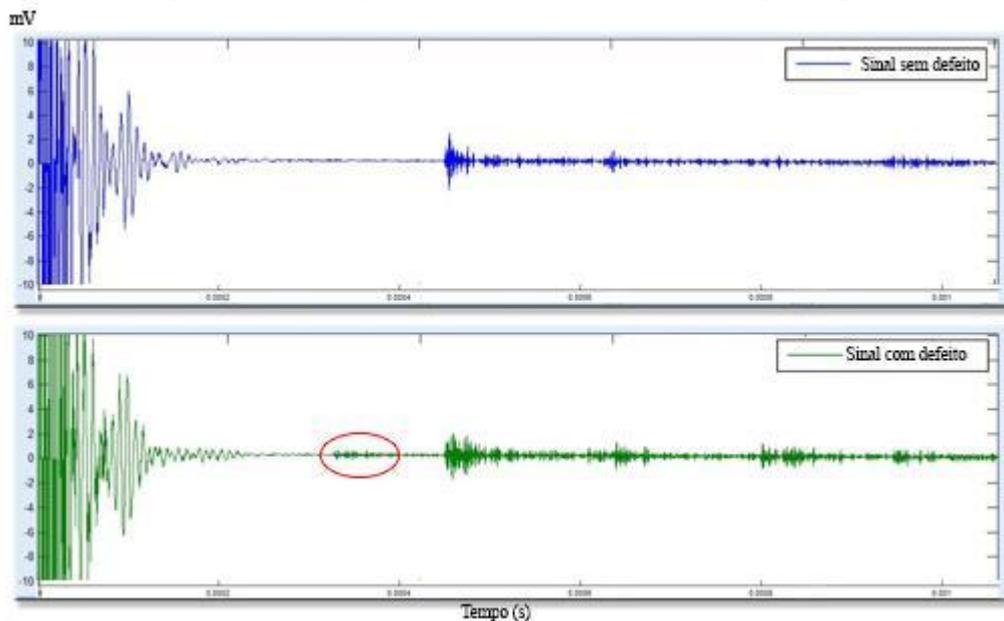
(a) velocidade de grupo. (b) velocidade de fase. (c) Ângulo de incidência (9).

Em acordo com a Figura 10, a tabela 2 mostra os parâmetros do modo de propagação selecionado, L(0,1).

**Tabela 2 – Modo de Propagação Longitudinal (0,1)**

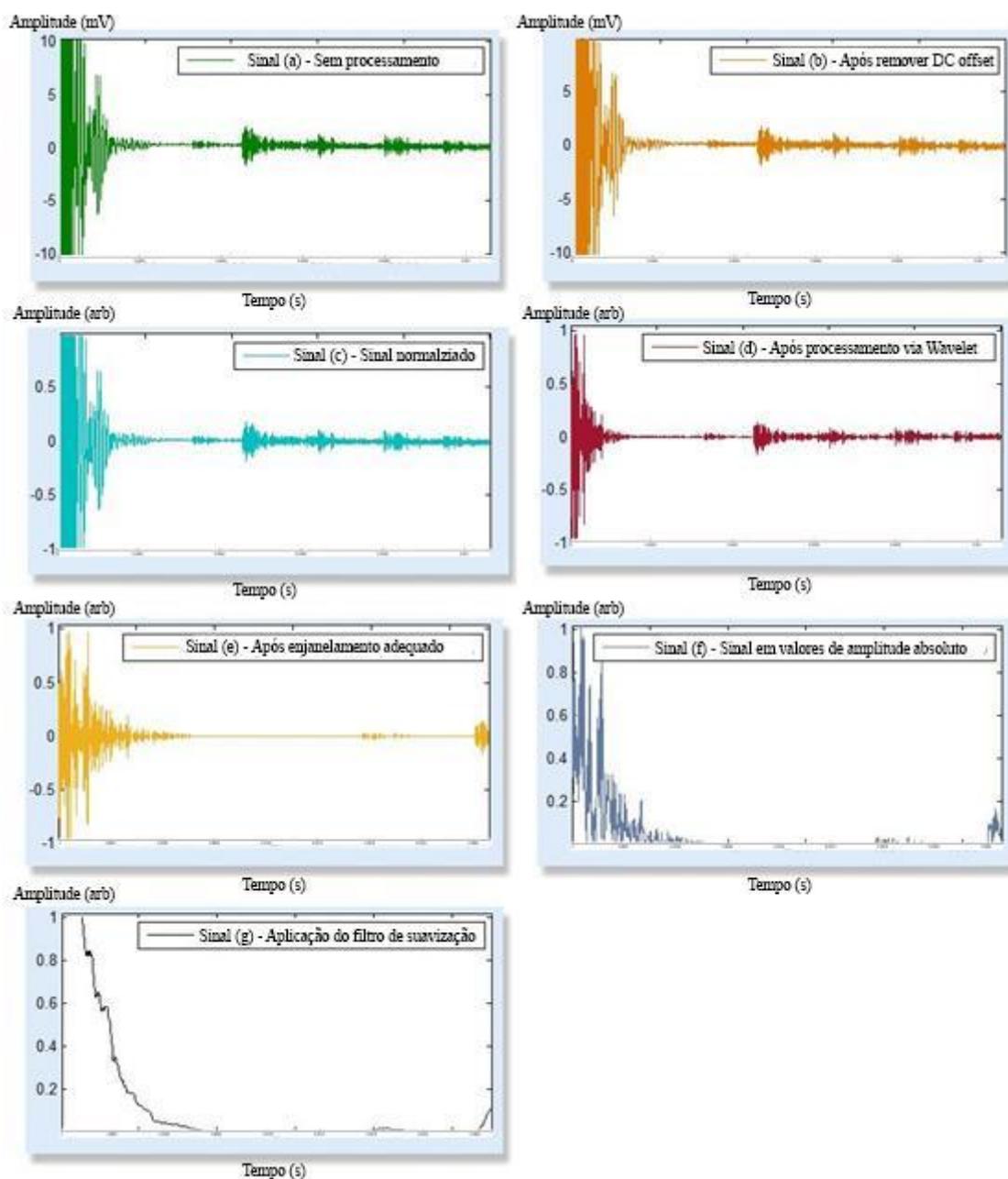
<b>Ângulo de incidência na água(°)</b>	<b>Velocidade de grupo (m/s)</b>	<b>Velocidade de fase (m/s)</b>
16.04	5364	5428

Na Figura 13 pode-se visualizar os sinais no domínio do tempo para o corpo de prova inspecionado com e sem defeito. A região delimitada em vermelho representa a reflexão do sinal do defeito. Em ambas as situações é possível perceber a quantidade de modos de propagação existentes ao longo do sinal dificultando a sua interpretação. Além disso, pelo fato da microestrutura do corpo de prova ser austenítica, a grande heterogeneidade granular ocasiona perdas energéticas (atenuação do sinal) e reflexões ao longo do percurso da onda.



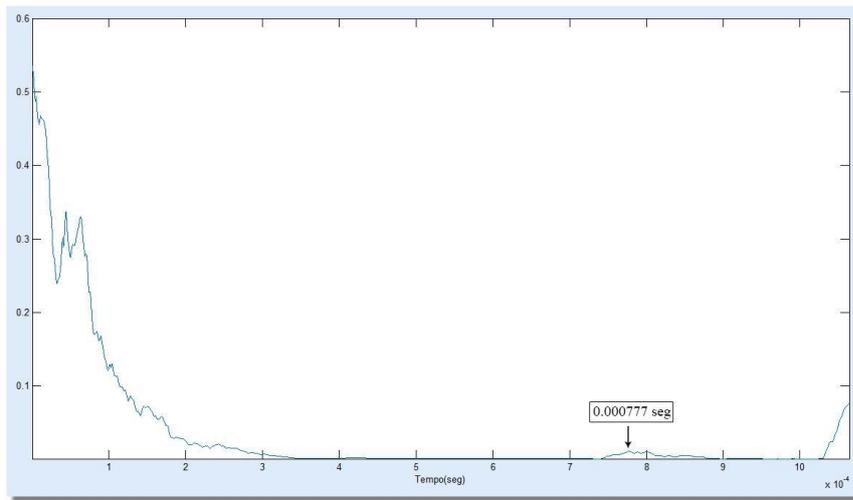
**Figura 13 – Comparação entre os sinais da onda guiada no domínio do tempo.**

Após a coleta dos sinais obtidos na inspeção do tubo com defeito inserido, foi empregada a sequência de técnicas de processamento digital descritas no item 3.4, (ver Figura 14).



**Figura 14 – Etapas do processamento digital de sinal aplicados ao sinal coletado na inspeção do tubo em aço AISI 304 com 1,5 mm de espessura em presença de defeito:(a) sinal sem processamento ;(b) sinal após remoção do *DC offset* ; (c) sinal normalizado ; (d) *Wavelet* aplicado ao sinal ; (e) enjanelamento do sinal ; (f) sinal enjanelado em valores absolutos ; (g) aplicação de *moving average* para suavização do sinal .**

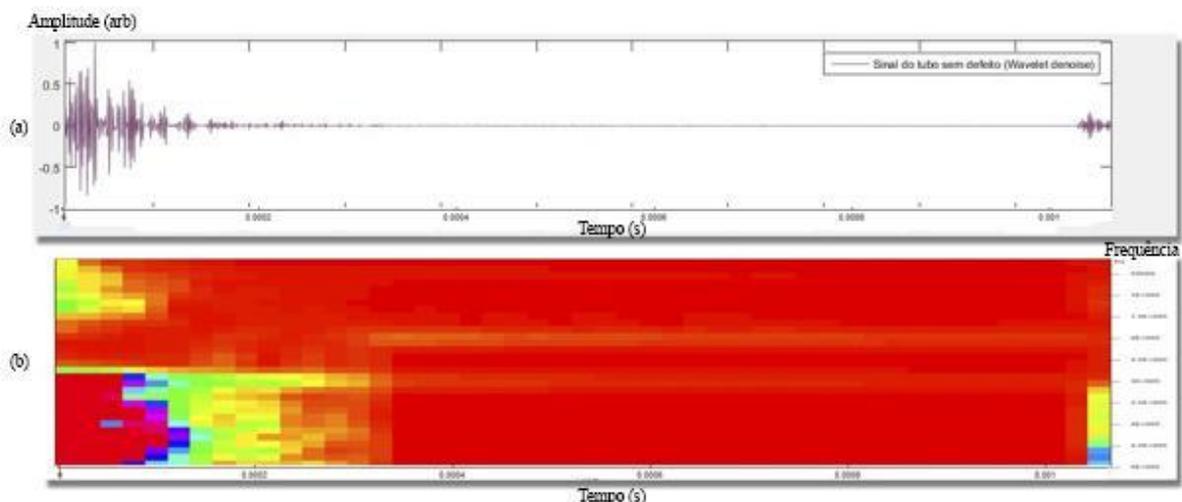
Após, foi aplicado ao sinal visualizado na Figura 14(g) uma rotina computacional em Matlab<sup>®</sup> para detecção de pontos de máximos. Então, foi possível uma pequena melhora na detecção do sinal refletido no defeito em relação ao tempo, como pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15 – Detecção do tempo de reflexão do sinal no defeito.**

Sabendo-se que a velocidade de grupo do modo de propagação longitudinal L(0,1) é aproximadamente 5364 m/s, e, o valor do tempo visualizado na Figura 15, pode-se calcular a distância entre o transdutor-transmissor e o defeito refletido que foi de aproximadamente 2,08 m, valor que está em acordo com a posição de inserção do defeito no corpo de prova (2,10 m).

É possível analisar a alteração da frequência no domínio do tempo utilizando-se a *Short Time Fourier Transform (STFT)*, Como a reflexão do sinal refletido no defeito apresentou uma amplitude muito baixa, aplicou-se a *STFT* ao sinal da Figura 14(e) e ao sinal análogo correspondente ao corpo de prova sem defeito, de forma a possibilitar uma comparação. Como resultado, nas Figuras 16 e 17, pode-se visualizar a resposta para o tubo sem defeito e o tubo com defeito, respectivamente. Observa-se uma alteração da frequência no domínio do tempo caracterizando a presença do sinal refletido.



**Figura 16 – Tubo sem defeito:(a) processamento de *denoise* via transformada *Wavelet*; (b) *STFT*.**

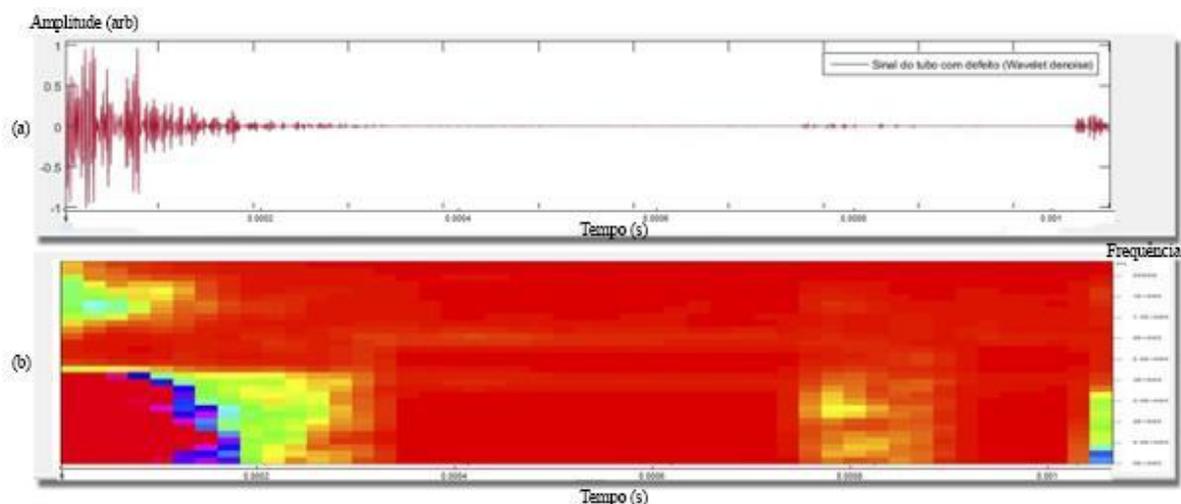


Figura 17–Tubo com defeito:(a) processamento de *denoise* via transformada *Wavelet*; (b) *STFT*.

## Conclusões

Foi realizado um estudo da propagação das ondas guiadas a média distância em tubo de aço AISI 304 com 1,5 mm de espessura, apresentando defeito tipo perda de espessura por corrosão. A partir da simulação das curvas de dispersão, foi selecionado o modo de propagação L(0,1) para inspeção do tubo e conhecido os parâmetros necessários à sua geração. Após a inspeção ultrassônica do tubo na configuração transmissão-recepção, a sequência de processamento digital aplicada aos sinais coletados e detalhada neste trabalho, se mostrou eficaz na detecção e localização da perda de espessura.

## Agradecimentos

Ao IFBA e a FAPESB, pelo apoio financeiro.

---

**Referências bibliográficas**

---

- (1) FARIAS C. T. T., Utilização das ondas ultrassônicas de Lamb na inspeção de materiais compósitos laminados fibra-metal, COPPE/UFRJ, Tese de doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.
- (2) SANTIN, J. L. Ultrassom, técnica e aplicação. artes gráficas e editora, 2003
- (3) KNOPOFF, L., A matrix method for elastic wave problems. Bulletin of Seismological Society of America, v. 54, n.1, p.431-438. Fevereiro 1964.
- (4) DAVIES J. O., Inspection of pipes using low frequency focused guided waves, Imperial College London, London SW7 2AZ, Abril 2008.
- (5) FAN Z., Applications of guided wave propagation on waveguides with irregular cross-section, Junho 2010.
- (6) GAZIS, D., Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders, J. Acoust. Soc. Am., 1959.
- (7) LIU Y, KHAJEH E, LISSENDEN CJ, ROSE JL. Interaction of torsional and longitudinal guided waves in weakly nonlinear circular cylinders. Department of Engineering Science and Mechanics, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, EUA, Maio 2013.
- (8) CHEONG Y., LEE D., JUNG H., Ultrasonic guided wave parameters for detection of axial cracks in feeder pipes of PHWR nuclear power plants, Korea Atomic Energy Research Institute, Fevereiro 2004.
- (9) PAVLAKOVIC B, LOWE M J S, Disperse TM - A System for Generating Dispersion Curves. Version 2.0., Imperial College, NDT Lab, London, July, 2001.
- (10) CARDOSO, L.B ., FARIAS, C. T. T, TEIXEIRA, C.A, SANTOS, Y. T. B, Estudo dos modos de propagação das ondas guiadas em estruturas cilíndricas de aço carbono, VII CONNEPI, 2012.
- (11) SHENG Y. Wavelet Transform in A. Poularikas (org) - The Transforms and Applications Handbook, 2nd. edition, Boca Raton: CRC, Cap. 10, p. 868, 2000.
- (12) CHANGHUA H., JUNBO Z., MATLAB-based system analysis and design-wavelet analysis, Xi'an Electronic Science and Technology University Press, Xi'an, 2000.
- (13) DINIZ, P., SILVA, E. A. B., NETTO., S. L., Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas, Bookman, Porto Alegre RS, 2004.
- (14) CHEN, C. H., Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization, World Scientific Publishing Company, 1 edition, 2007.

(15) MISITI, M., MISITI, Y., Oppenheim, G., Poggi, J. "Wavelet Toolbox for Use with MATLAB®. User's Guide, version 2, The MathWorks, 2002.

(16) DEMMA A, Medium Range and Long Range Guided Waves: comparison of capabilities and limitations, COTEQ-205, 2015

(17) YAJING S.; BO D., Research on ultrasonic guided wave testing pipeline corrosion based on wavelet transform, Control and Decision Conference (CCDC), 25th Chinese, IEEE, 2013.

(18) SUN Q., LI H., LIU M., Research on electromagnetic guided wave signal noise reduction technology based on lifting wavelet transform, Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2013 IEEE International Conference on, Beijing, p. 399-402, 2013.