



Estudo dos modos de propagação das ondas guiadas em estruturas cilíndricas de aço carbono

Lucas B. CARDOSO¹, Cláudia Teresa T. FARIAS², Camila A. TEIXEIRA³, Ygor T. B. SANTOS⁴.

¹Graduando em Engenharia Industrial Mecânica-IFBA/LEUS/GPEND. Bolsista do CNPq. Email: lucascardoso@ifba.edu.br

²Doutora em Engenharia de materiais e metalurgia-IFBA/LEUS/GPEND. Email: cfarias@ifba.edu.br

³Graduando em Engenharia Industrial Mecânica-IFBA/LEUS/GPEND. Bolsista do CNPq. Email: camilaaguaiar@ifba.edu.br

⁴Graduando em Engenharia Industrial Mecânica-IFBA/LEUS/GPEND. Bolsista do IFBA. Email: ygartadeu@ifba.edu.br

Resumo: A presença de defeitos em equipamentos podem gerar sérios riscos e prejuízos às indústrias e ao meio ambiente. Por este motivo a utilização dos ensaios ultrassônicos não destrutivos (ENDs) é de grande importância para prevenção de danos e avaliação da integridade estrutural dos sistemas industriais. Dentre os métodos de inspeção não destrutiva ultrassônica, as ondas guiadas possibilitam propagação em longas distâncias a partir de um único ponto, permitindo a avaliação de grande área inspecionada num espaço de tempo reduzido quando comparado ao ensaio convencional que neste caso é ponto a ponto. Além disso, as ondas guiadas permitem inspecionar áreas de difícil acesso como no caso de tubos enterrados. Este trabalho teve como objetivo apresentar um estudo teórico dos modos de propagação das ondas guiadas em estruturas cilíndricas de forma a possibilitar a compreensão dos fenômenos associados à propagação destas modalidades de ondas. Foram efetuadas modelagens computacionais onde curvas de dispersão foram utilizadas para analisar os deslocamentos dos modos de propagação das ondas guiadas em tubos de aço carbono, bem como comparar a propagação em tubos e chapas para então compreender o comportamento das ondas guiadas em estruturas cilíndricas.

Palavras-chave: curvas de dispersão, ensaios não destrutivos, ondas guiadas, ultrassom.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, linhas de dutos e tubulações fazem o transporte de produtos industriais - principalmente nas áreas petroquímica e nuclear. Em virtude disto, a utilização das ondas guiadas aplicadas a estruturas cilíndricas está se desenvolvendo gradativamente, visando o monitoramento e a detecção de defeitos que podem por em risco a estrutura e conseqüentemente a segurança das indústrias e dos trabalhadores além de graves conseqüências ao meio ambiente.

Apesar de ser um método relativamente novo, ensaios utilizando onda guiada mostram um grande avanço no monitoramento da integridade de estruturas e na detecção de defeitos. A redução da necessidade de retirada do isolamento, inspeção em áreas de difícil acesso, maior rapidez na inspeção, são algumas de uma série de vantagens relacionadas ao custo-benefício e/ou eficácia no ensaio por onda guiada quando comparado ao ensaio convencional.

Como ferramenta de auxílio para o estudo teórico das ondas guiadas foi utilizado o software Disperse - programa computacional criado pela Imperial College. Este software gera curvas de dispersão que são de grande importância para uma inspeção, pois possibilitam a obtenção teórica de alguns parâmetros como velocidade de fase e de grupo, atenuação, ângulo de incidência e número de onda, fazendo com que uma futura inspeção seja otimizada e mais objetiva.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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 chamada de guia de ondas, da mesma forma como a luz em uma fibra óptica. Inspeção de estruturas utilizando ondas guiadas requer o conhecimento de como as ondas se propagam na estrutura. No entanto, a propagação de ondas guiadas em tubos e sua interação com defeitos são complexa, tornando as informações necessárias sobre os defeitos difíceis de extrair dos sinais refletidos (DAVIES, 2008).

2.1.Deslocamento

A onda guiada se propaga em meios elásticos cujas partículas, depois de serem excitadas, retornam ao estado de equilíbrio. Por conta disso, é necessário e de extrema importância ter o conhecimento de como as partículas se comportam com a propagação da onda, ou seja, estudar o deslocamento das partículas do material. 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_θ), representados na Figura 01.

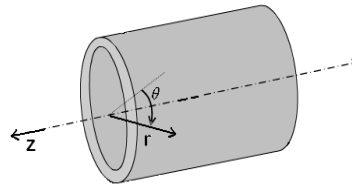


Figura 1- Representação dos três deslocamentos presentes no tubo , onde z representa o eixo do deslocamento axial, r representa o eixo do deslocamento radial e θ o eixo do deslocamento angular.

Estes deslocamentos podem ser expressos pela equação (1) ,

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

onde v é o número de onda angular, $u(r, \theta, z, t)$ é uma função de distribuição radial do deslocamento em r , θ e z , respectivamente (FAN, 2011). A dedução desta equação bem como as que regem separadamente os deslocamentos pode ser encontrada mais detalhadamente em Gazis (GAZIS, 1959).

2.2.Modos de propagação

Existem algumas maneiras de excitação das ondas guiadas e todas elas apresentam a mesma dificuldade: excitar um modo puro. Esta dificuldade é causada pelas ondas guiadas apresentarem carácter multimodos, tendo cada um uma relação Velocidade de Fase X Frequência característica (dispersão).

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 2a) e Torsional (Figura 3a). O modo de propagação Longitudinal, que apresenta semelhança com os modos de Lamb, tem suas partículas se deslocando independentemente do deslocamento angular u_θ .



Figura 2- 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.

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, 1959) comprovarem 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, no caso, com o modo Cisalhante Horizontal (SH). Por serem axialmente simétricos, os modos Longitudinais e Torsionais são os mais utilizados para inspeções (CHEOND, LEE, JUNG, 2004), além do modo de torção apresentar pouca interação com o conteúdo da tubulação.



Figura 3- (a) Representação da propagação do modo Torsional. (b) Destaque em vermelho do deslocamento do modo Torsional (u_θ).

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 4a. 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, pois as partículas apresentam os três deslocamentos u_z , u_r , u_θ representados na Figura 4b. Esta característica faz θ 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.



Figura 4- (a) Representação da propagação do modo Flexural. (b) Destaque em vermelho dos deslocamentos do modo Flexural (u_r , u_z , u_θ).

Por conta desta convergência surgem os denominados “submodos” Flexural-Torsional e Flexural-Longitudinal. O modo Flexural-Torsional apresenta deslocamento angular mais acentuado em relação ao modo Flexural e os deslocamentos radial e axial se sobressaem no modo Flexural-Longitudinal. Estudos feitos por DAVIES, 2008 mostraram que estes submodos são analisados como

se o tubo fosse uma placa enrolada. Logo, o estudo foi baseado na analogia e na similaridade da propagação das ondas em placas com as ondas em tubos. CHEOND, LEE, JUNG, 2004 mostraram que o modo de flexão com uma tensão ao longo da direção circunferencial é sensível e o mais eficiente para detectar descontinuidades axiais nas regiões dobradas do tubo, ou seja, nos cotovelos.

2.3. Velocidade de Fase e de Grupo

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 ω é a velocidade angula e k é o número de onda.

A figura 5 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 ω é a velocidade angula e k é o número de onda.

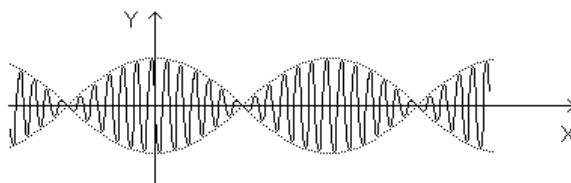


Figura 5 – Representação do envelope da onda o qual é medido a velocidade de grupo.

2.4. Vantagens e Limitações

A utilização do método de ensaio por onda guiada em geral, proporciona diversas vantagens quando comparado ao método convencional. Podem se propagar em longas distancias em um curto espaço de tempo, permitindo a inspeção de locais de difícil acesso com a mesma sensibilidade de uma inspeção em área acessível. Em sua inspeção é possível atingir aproximadamente 100% do volume do tubo, além de permitir fazê-lo sem a necessidade de parar a operação da linha. Vale ressaltar, que tudo isso pode ser feito a partir de um único ponto, otimizando a inspeção. Todas as vantagens já relacionadas promovem uma considerável redução de custos dos ensaios por ondas guiadas em comparação ao convencional. Esta redução de custos aumenta quando verificamos que o ensaio convencional requer a retirada de todo o isolamento da linha enquanto o ensaio por onda guiada requer apenas a retirada no local onde o anel de transdutores for acoplado.

As ondas guiadas são muito sensíveis e altamente dispersivas, conseqüentemente, a interpretação do sinal se torna mais complicado necessitando de mão-de-obra especializada. Apesar do carácter multimodos destas ondas proporcionar alguns benefícios, também faz com que o ensaio se torne mais complicado pela dificuldade de gerar um modo puro com os transdutores disponíveis no mercado, pois vários grupos de modos são muito próximos em determinadas faixas de frequência. A geometria da tubulação atinge diretamente a distancia de alcance do ensaio. Quanto melhor for a conservação, menos flanges, válvulas e mudanças de direção (curvaturas, cotovelos) o tubo possuir, maior será o alcance do ensaio.

Quando a inspeção é realizada com a linha em funcionamento, o material que está sendo transportado pela linha exerce influência no ensaio. Os gases e líquidos com baixa viscosidade influenciam menos que os conteúdos viscosos e/ou depósitos pesados, porém, todos podem atenuar o sinal. Além disso, o fluxo do fluido passante assim como bombas e compressores, por exemplo, pode gerar ruídos, o que dificulta a análise do sinal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de dispersão analisadas foram geradas por simulação utilizando o software Disperse®, onde são visualizadas as curvas dos modos de propagação das Ondas Guiadas em Estruturas Cilíndricas em dois tubos de aço carbono:

Tabela 1- Dados de tubos utilizados

Nome	Espessura(mm)	Raio interno(mm)
Tubo1	1	2
Tubo2	1	50

Para complementar e comprovar o estudo teórico, curvas de dispersão de diferentes parâmetros para diferentes modos foram geradas. As curvas dos deslocamentos das partículas dos modos de propagação das ondas guiadas em tubos, mostradas na figura 6, apontam os deslocamentos que são presentes em cada modo. Nota-se que quando a curva do deslocamento é uma linha reta vertical localizada exatamente no meio da imagem, o modo não apresenta o deslocamento representado.

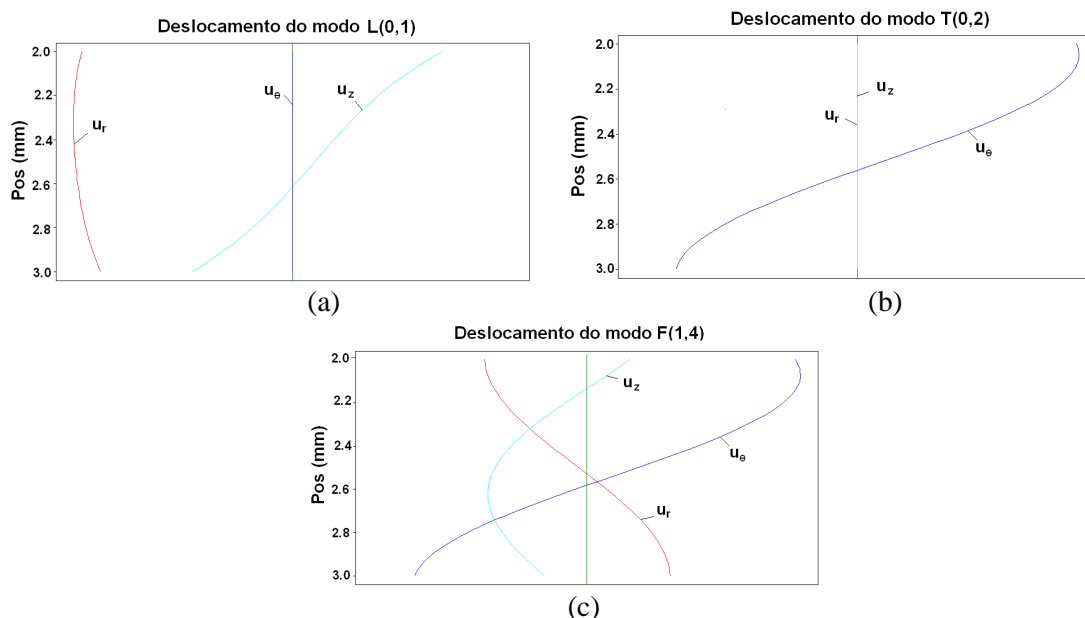


Figura 6- (a) Curva do deslocamento do modo Longitudinal, mais especificamente para o modo L(0,1), mostrando os deslocamentos das partículas que ocorrem nas direções radial(u_r) e axial(u_z). (b) Curva do deslocamento do modo Torsional T(0,2) mostra que este modo apenas possui deslocamento na direção angular(u_θ). (c) Curva dos deslocamentos do modo Flexural F(1,4) que apresenta os três deslocamentos u_r, u_z, u_θ .

Curvas de dispersão teóricas da velocidade de fase e de grupo em função da frequência-espessura foram traçadas para o Tubo1, e foi possível visualizar o quanto difícil é trabalhar apenas com um modo separadamente quando se trata de Ondas Guiadas em Estruturas Cilíndricas pela quantidade de modos existentes simultaneamente em mesma faixa de frequência. A infinidade de modos fica mais

evidente a medida que a frequência é aumentada, percebendo assim, o motivo pelo qual este tipo de onda é apenas utilizado em baixas frequências como pode ser visto na figura 7.

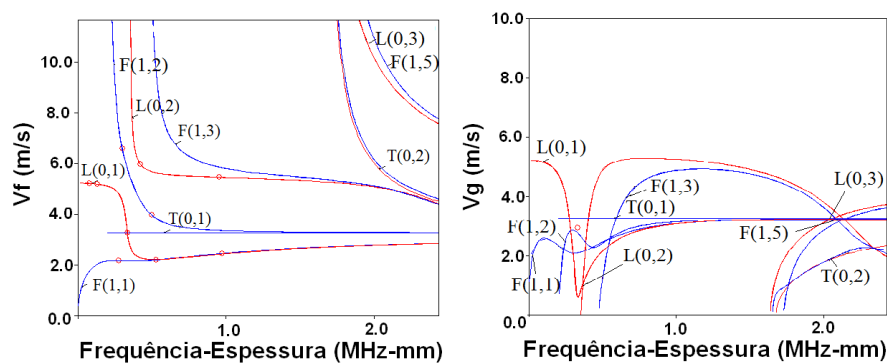


Figura 7- Curva de dispersão da velocidade de fase e de grupo pela frequência-espessura dos modos de propagação das ondas guiadas para um tubo de aço carbono (Tubo 1).

Para análise dos modos de propagação das ondas guiadas foi gerada as curvas de dispersão para o Tubo2. Primeiramente, foi realizada a simulação da velocidade de fase pela frequência-espessura do modo Longitudinal isoladamente no Tubo2 e dos modos de Lamb para uma chapa de 1mm de espessura. Comparando as curvas, o resultado simulado comprova a semelhança da propagação das ondas guiadas em tubos e das ondas de Lamb para determinadas espessuras e raio interno, como pode ser visto na figura 8.

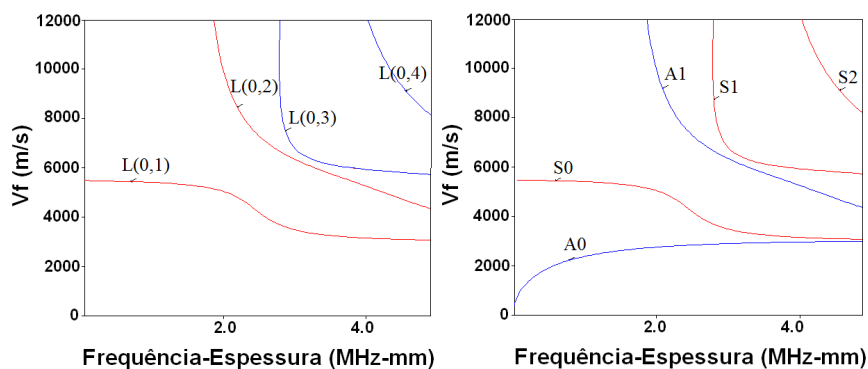


Figura 8- Curva de dispersão da velocidade de fase pela frequência-espessura dos modos de propagação das ondas de Lamb para uma chapa de aço carbono de 1mm de espessura e dos modos longitudinais para o Tubo 2 de aço carbono.

O mesmo procedimento foi feito para o modo Torsional porém, a comparação da propagação deste modo isoladamente foi em relação ao modo cisalhante em chapas de 1mm de espessura. Assim como ocorreu com o modo Longitudinal, a simulação comprovou a semelhança na propagação das ondas guiadas em chapas e em tubos, também dependendo dos parâmetros utilizados para a chapa e o tubo. A semelhança das curvas pode é mostrada na figura 9.

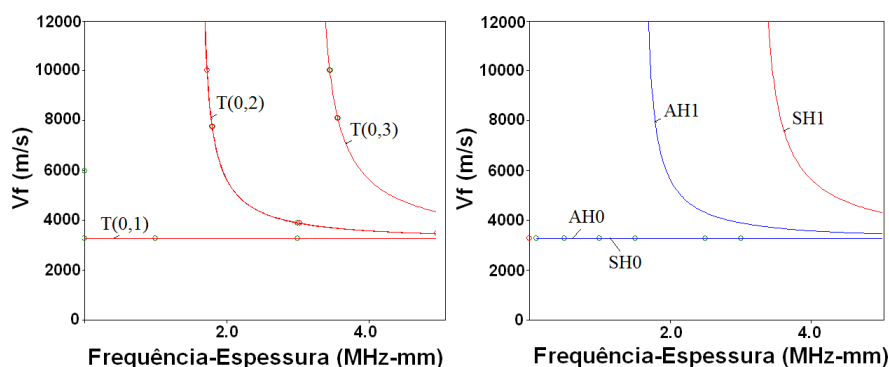


Figura 9- Curva de dispersão da velocidade de fase pela frequência-espessura dos modos torsionais de propagação das ondas guiadas para um tubo de aço carbono (Tubo 2) e dos modos cisalhantes para uma chapa de aço carbono de 1mm de espessura..

A partir da curva de dispersão da velocidade de fase dos modos de propagação em função da frequência-espessura, foi capaz a visualização de uma das principais características do modo Flexural que o torna mais complexo em relação aos outros: a convergência, que pode ser observada na Figura 10. Observa-se que esta convergência e consequente sobreposição dos modos é mais acentuada quanto maior é a frequência, logo, maior será a dificuldade de trabalhar com um modo puro. É baseado nesta característica do modo Flexural que alguns autores, a exemplo de DAVIES, 2008, estudam os denominados “submodos” Flexural-torsional e Flexural-longitudinal.

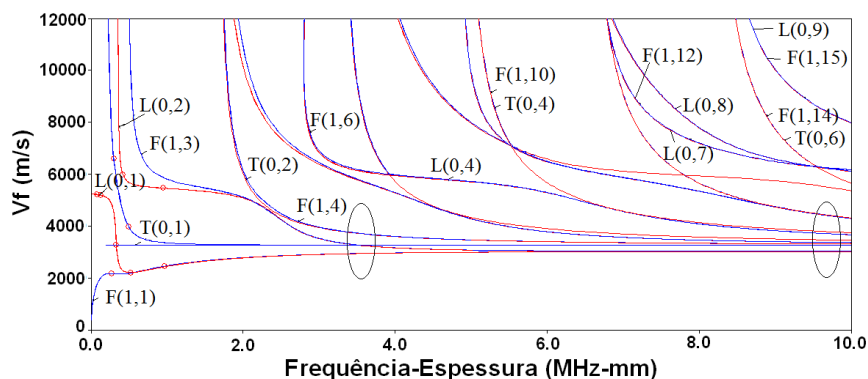


Figura 10- Curva de dispersão da velocidade de fase pela frequência-espessura dos modos de propagação das ondas guiadas para um tubo de aço carbono (Tubo 1) mostra a convergência dos modos.

4.CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico das ondas guiadas propagadas em tubos por meio de simulação utilizando um software computacional. Foram obtidas as curvas de deslocamento, velocidade de fase e de grupo dos modos de propagação das ondas guiadas em tubos. A comparação dos modos de propagação das ondas e em placas mostrou semelhança entre a propagação destas em baixa frequências possibilitando que o estudo da propagação do tubo fosse com em placa. A curva de velocidade de fase dos modos de propagação permitiu afirmar que é mais adequado trabalhar com baixa frequências pois a medida que a frequência aumenta, mais modos surgem. Além disso, esta curva possibilitou identificar uma das principais características do modo flexural que é a conversão para os outros modos. Este modo é mais utilizado em falhas localizadas na curvatura de tubos. Já o modo longitudinal é mais usado para detectar defeitos na circunferência do tubo mas é um modo que interage com o conteúdo, diferentemente do modo torsional que quase não interage com a substância presente internamente ao tubo e é mais sensível a falhas localizadas no comprimento da estrutura. Este



conhecimento teórico é de fundamental importância para a utilização prática do método de inspeção por ondas guiadas em tubos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Ensaios Ultrassônicos – LEUS do Instituto Federal da Bahia – IFBA, pela utilização da infraestrutura. Ao Laboratório de Ensaios Ultrassônicos /Grupo de Pesquisas em Ensaios Não Destrutivos – GPEND, pelo apoio técnico. Ao IFBA, FAPESB e CNPq, pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

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, (Feb) 2004

Davies J. O., “**Inspection of pipes using low frequency focused guided waves**”, Imperial College London, London SW7 2AZ, (Abril) 2008.

Demma A., Alleyne D., “**Inspection of pipes using Guided Waves: state of art**”, 5th Pan American Conference for NDT, (Oct) 2011.

Fan Z., “**Applications of guided wave propagation on waveguides with irregular cross-section**” (Jun) 2010.

Gazis, D., “**Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders**”, J. Acoust. Soc. Am., 31 (5), 1959.

Kim J. Y., Lee D. H., Park K. S., Jo Y. D., Choi S. C., Lee C. H., Song S. J., Cheong Y. M., “**Long Range Inspection of City Gas Pipeline Using Ultrasonic Guided waves**”, (Nov), 2006

Lowe, M., “**Matrix techniques for modelling ultrasonic waves in multilayered media**”, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control, 42, (4), 525-542, 1995.

M. G. Silk and K. F. Bainton, **The Propagation in Metal Tubing of Ultrasonic Wave Modes Equivalent to Lamb Waves**, *Ultrasonics*, 17(1):11-19, 1979

Pavlakovic B., Lowe M. J. S., “**Manual Disperse, Imperial College**”, NDT Lab. London, (Jul) 2001.

Rose J. L., “**Pipe Elbow Inspection with Guided Waves**” 15th WCNDT, Roma 2000.

Rose J. L., “**Successes and Challenges in Ultrasonic Guided Waves for NDT and SHM**”, Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE 10-12 (Dec) 2009.