

AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA ULTRASSÔNICA DE CHAPAS DE AÇO COM DESCONTINUIDADES TIPO FENDA UTILIZANDO ONDAS DE LAMB NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Alexandre S. A. de Oliveira¹, Cláudia Teresa Teles Farias², Priscila L. Seixas³

¹Graduando em Eng. Industrial Elétrica- Instituto Federal da Bahia/LEUS/GPEND. Email: alexandresmith@ifba.edu.br

²Professora Dra. Eng.^a Metalúrgica e de Materiais - Instituto Federal da Bahia/LEUS/GPEND. Email: cfarias@ifba.edu.br

³Graduanda em Eng. Industrial Elétrica- Instituto Federal da Bahia/LEUS/GPEND. Email: priscilaleaoseixas@hotmail.com

Resumo: Neste trabalho experimental foi avaliada a interação do modo de propagação S_0 das ondas de Lamb com descontinuidades tipo fenda de diferentes profundidades em chapas de aço carbono de 1,5 mm de espessura. Para garantir o uso do modo fundamental S_0 , foram utilizadas as curvas de dispersão simuladas para a técnica de imersão da velocidade de fase e de grupo, ângulo de incidência, em função da frequência por espessura, escolhendo assim os parâmetros ideais para a inspeção. Os ensaios ultrassônicos foram realizados no método transmissão-recepção. Foram avaliadas as amplitudes dos sinais e os espectros da frequência após a aplicação de janelamento nas regiões com e sem descontinuidades. Entretanto, somente foram observados decréscimos dos picos da amplitude dos sinais nas posições das descontinuidades de 60% e 30% da espessura da chapa. Os resultados obtidos são promissores o qual incentiva a utilização e aprimoramento desta técnica que ainda é pouco utilizada no país na detecção de descontinuidades em placas.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos, Ondas Guiadas de Lamb, Ensaios Ultrassônicos por Imersão, Detecção de descontinuidades

1. INTRODUÇÃO

A utilização das ondas guiadas de Lamb tem sido bastante eficaz na detecção de defeitos em chapas metálicas e materiais compósitos (ARAÚJO, 2011 e FARIAS, 2012). Essas ondas são usadas porque possui sensibilidade a diferentes tipos de falhas, propagação a longas distâncias reduzindo o tempo de inspeção (SIQUEIRA, 2001) e o caráter guia que permite inspecionar locais de difíceis acessos e também de relativamente baixo custo. Ondas ultrassônicas de Lamb possuem natureza multimodal, onde o perfil e velocidade de cada modo de propagação dependem da frequência de excitação e espessura dos materiais. Estes modos de propagação são individuais e são denominados de simétricos (S) e assimétricos (A), como pode ser visto na Fig. 1.

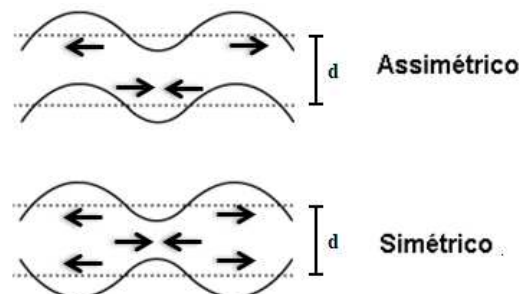


Figura 1- Modos de Propagação das ondas de Lamb em chapas de espessura d .

Estas ondas são de natureza dispersiva, onde as velocidades de fase e de grupo podem variar de acordo com a frequência. O modo de propagação S_0 é usualmente o mais adequado para aplicações em ensaios não destrutivos porque é menos dispersivo e neste modo a velocidade de fase varia muito pouco a baixas frequências (XU, 2010 e SANTOS, 2012). Desta forma, na inspeção de materiais, as

curvas de dispersão são simuladas para determinação da frequência e do ângulo de incidência dos transdutores necessários à geração deste modo de propagação.

Oliveira *et al.* (2012) estudaram a interação do modo S_0 das ondas de Lamb ao interagir com fendas de diferentes profundidades em chapas de alumínio com 1mm de espessura. As amplitudes tanto no domínio do tempo quanto da frequência, foram obtidos e analisados e os resultados mostraram que é possível a utilização do método de imersão e técnica de transmissão-recepção para a detecção das fendas de diferentes profundidades. Porém a avaliação no domínio da frequência não foi possível à identificação devido à conversão de modo para Leaky Lamb, neste material. E a fenda de menor profundidade não houve variação perceptível no domínio do tempo.

O objetivo deste trabalho é detectar discontinuidades tipo fendas de diferentes profundidades em chapas de aço carbono de 1,5 mm de espessura, estudando a propagação do modo S_0 das ondas de Lamb, pela técnica de imersão em método de transmissão-recepção. Técnicas de processamento digital de sinais foram usadas como aplicação de janelamento e FFT (CHEN, 2009; LI, 2008 e SANTOS, 2010) a fim de avaliar a interação das ondas com as regiões das discontinuidades do corpo de prova.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Corpos de Prova (CPs)

Foram utilizados neste trabalho duas chapas de aço carbono SAE 1020 (Composição: C 0,18%-0,23%; Mn 0,30%-0,60%; Cu 0,20%; P - 0,04%; S- 0,05%), dimensões de 300 x 300 mm, 1,5 mm de espessura. O CP₁ não possui defeito. No CP₂, as discontinuidades no formato de fendas foram projetadas e posicionadas conforme Fig. 2.

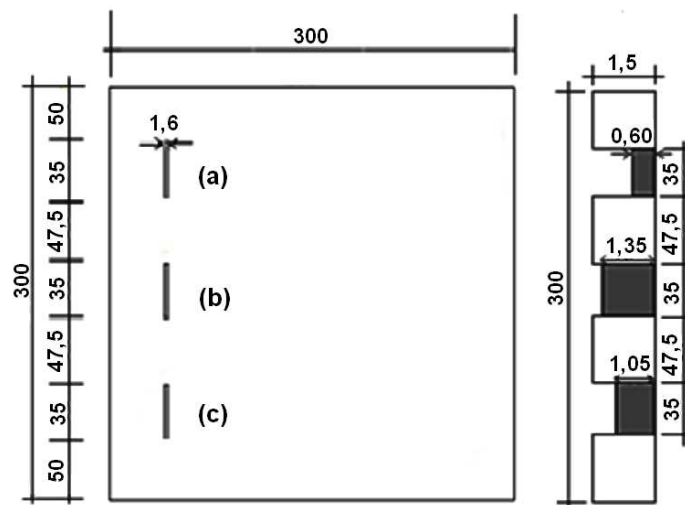


Figura 2- Dimensões (mm) e posições das fendas no CP₂: (a) 60%, (b) 10% e (c) 30% da espessura da chapa de aço carbono.

2.2. Determinação do ângulo de incidência do feixe sônico em função da faixa de frequência

Para traçar as curvas de dispersão, usou-se um programa computacional Disperse® (PAVLAKOVIC B, 2001, 2010). O qual simulou as curvas de dispersão de um material para um sistema ideal, e que foi identificado pela faixa de frequência utilizada, o ângulo de incidência do feixe.

2.3. Inspeções ultrassônicas por imersão na configuração transmissão-recepção

Para as inspeções ultrassônicas dos CPs foram empregados os seguintes equipamentos:

Gerador de pulso Olympus®, modelo 5077PR, transdutores Olympus Panametrics®, modelo V-303-SU, diâmetro 12,7 mm e frequência central de 0,88 MHz imersos e largura de banda 0,52 MHz e

osciloscópio digital Tektronix®, modelo TDS 2024B, com frequência de amostragem de 250 MHz com interface para um microcomputador para armazenagem dos sinais.

O CP₂ foi avaliado pela varredura da chapa em relação à direção Y que ocorreu em um passo de 2 mm percorrendo um total de 252 mm, distância suficiente para varrer uma área com e sem discontinuidades. O CP₁, pela varredura de forma semelhante, porém em um passo de 3 mm percorrendo um total de 120 mm. A fim de determinar as velocidades de fase e grupo, em cada passo, foram colhidos sinais em duas posições do transdutor-receptor em relação à direção X, em um intervalo Δx de 2,50 mm. As Figuras 3(a) e 3(b) ilustram a disposição dos equipamentos, dos sensores e do esquema experimental inspeção por imersão na configuração transmissão-recepção.

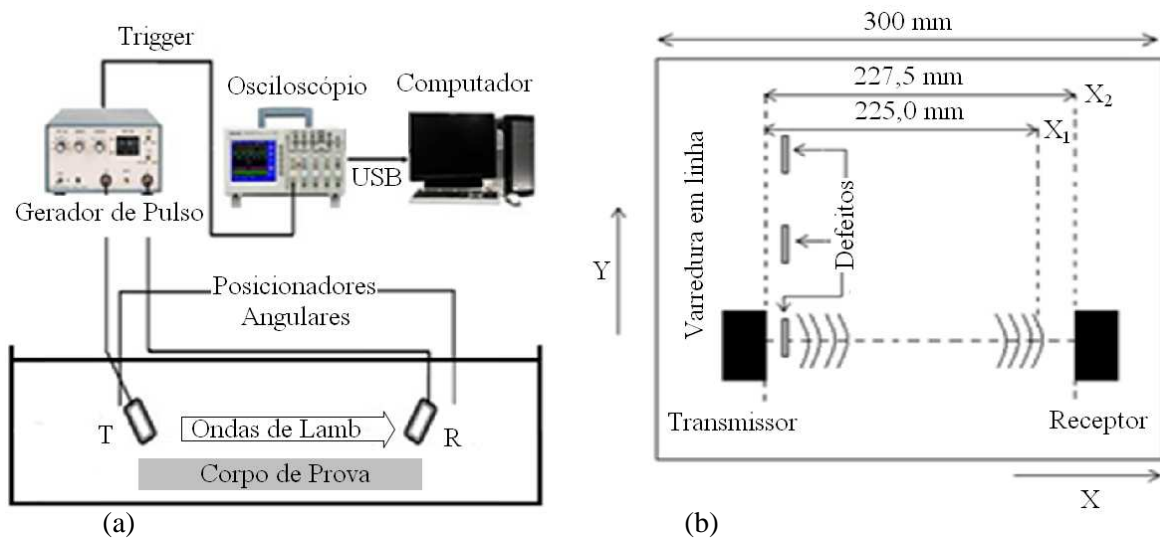


Figura 3- Esquema experimental: (a) geração de ondas de Lamb usando a configuração transmissão-recepção; (b) varredura e posicionamento dos transdutores.

2.4. Processamento Digital dos Sinais Ultrassônicos

Os sinais coletados e armazenados, correspondentes a cada posição de varredura na direção Y e para os respectivos deslocamentos x_1 para x_2 do receptor, foram processados com rotinas desenvolvidas no programa Matlab®, para se determinar os domínios do tempo e da frequência e as velocidades de fase e de grupo experimentais.

A fim de processar o sinal das varreduras dos CPs, as seguintes ações foram contempladas (FARIAS, 2011 e SANTOS, 2004):

- Aplicação de técnica de janelamento;
- Obtenção do espectro de frequência do sinal recebido e determinação do componente da frequência central via Transformada de Fourier Rápida (FFT);
- Obtenção da fase para cada componente espectral e cálculo da velocidade de fase, v_f . No cálculo das fases, o algoritmo limita o traçado entre $-\pi$ e π radianos (redução ao primeiro e quarto quadrantes), o que gera discontinuidades na frequência para múltiplos de 2π na fase. Para resolver este problema foi utilizada a função *unwrap* (consiste na subtração de 2π no valor da fase, para que a função se torne contínua);

- A velocidade de fase, V_f , é encontrada pela equação a seguir onde f é a frequência, ϕ_1 e ϕ_2 são as fases do espectro de frequência do sinal nas posições de varredura x_1 e x_2 e o Δx é a diferença entre x_1 e x_2 do transdutor na configuração do receptor, respectivamente:

$$V_f = \frac{2\pi f \Delta x}{\phi_2(f) - \phi_1(f)} \quad (1)$$

- Obtenção da envoltória do sinal através da transformada de Hilbert para a determinação do atraso Δt que é a diferença entre os instantes da queda de 6dB das duas envoltórias de Hilbert da posição x_1 e x_2 e cálculo da velocidade de grupo, V_g , dado por:

$$V_g = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

As velocidades de fase e grupo encontradas por simulação e experimentalmente foram comparadas para confirmação do modo de propagação. As amplitudes dos sinais e seus espectros de frequência obtidos experimentalmente foram analisados, de forma a verificar a influência das descontinuidades nos valores obtidos para a amplitude em termos da profundidade das fendas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Curvas de dispersão

A partir das curvas de dispersão simuladas foi selecionado o modo de propagação S_0 , pois apesar das velocidades de fase e de grupo terem pequena variação como o modo A_0 vista na Fig. 4(a) e (b), o modo A_0 é bastante atenuante na frequência central determinada, diferentemente do modo S_0 que é pouco dispersivo, Fig. 4 (d). Então, com o modo S_0 escolhido e para a frequência de 0,88 MHz-mm, evidencia-se então que o ângulo de incidência para a geração do modo S_0 é de 16° , Fig.4 (c).

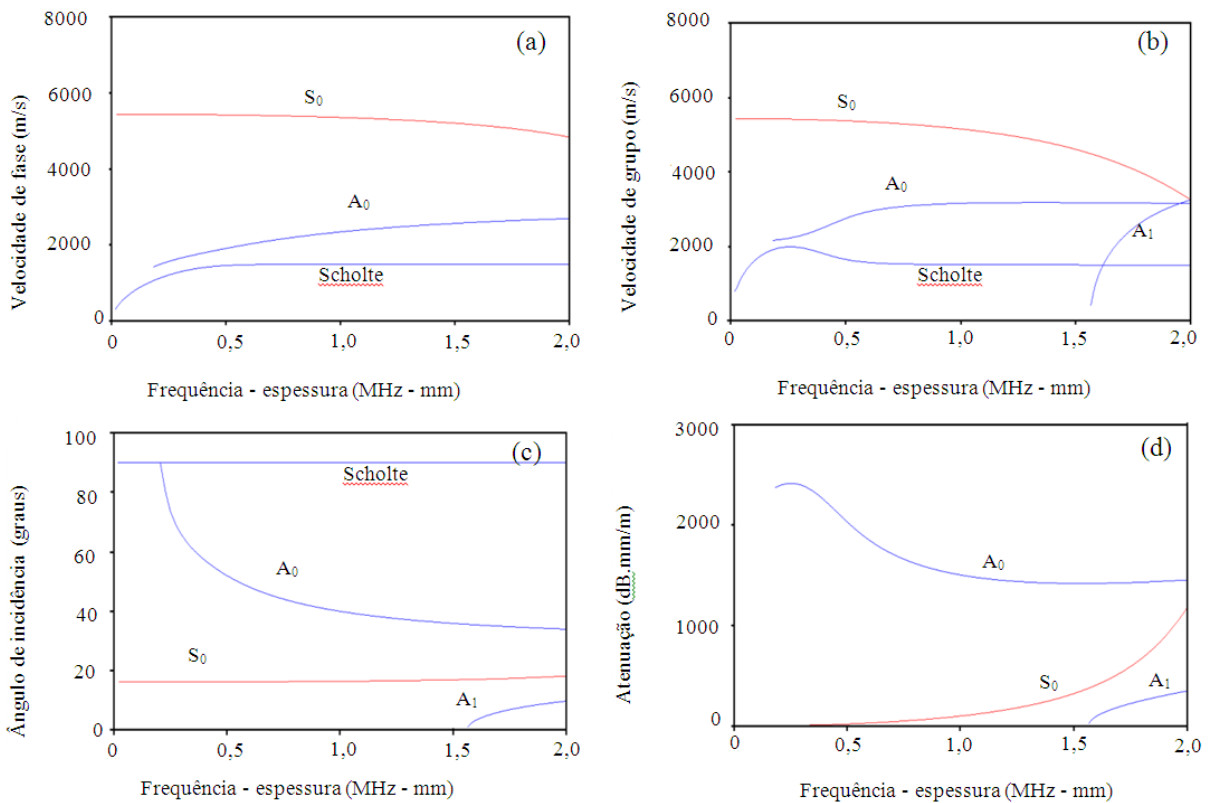


Figura 4- Curvas de dispersão simuladas para chapa de aço carbono com 1,5 mm de espessura em ensaio por imersão: (a) velocidade de fase; (b) velocidade de grupo; (c) ângulo de incidência; (d) atenuação.

3.2. Comparação das velocidades de fase e grupo simuladas e experimentais

A Tabela 1 mostra os valores obtidos para a velocidade de fase e grupo a partir dos dados experimentais realizados em chapa de aço carbono sem descontinuidades e em conformidade com o esquema instrumental da Figura 3. Estes dados foram comparados com os valores simulados.

Tabela 1- Velocidades de fase e de grupo para o modo de propagação S0.

Método / Velocidade	V_g (m/s)	V_f (m/s)
Simulada	5322,0	5415,0
Experimental	$5456,3 \pm 305,6$	$5236,9 \pm 109,2$

Os erros das medidas entre os valores experimentais e simulados, em torno de 2,52% para a velocidade de fase e 3,29% para a velocidade de grupo, devem-se a imprecisões do sistema de varredura adotado, porém dentro dos limites aceitáveis. As Figuras 5(a) e 5(b) estão visualizados estes resultados da velocidade de fase e de grupo obtidos experimentalmente.

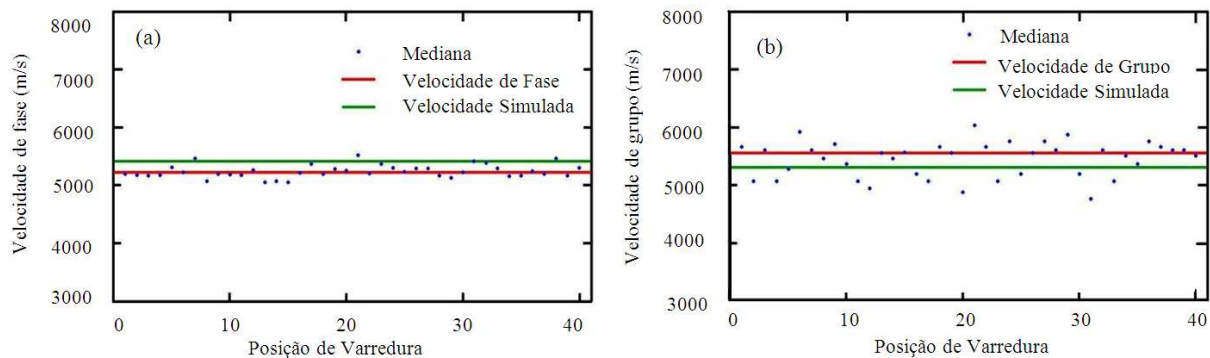


Figura 5- Varredura do CP₁: (a) Velocidades de fase; (b) Velocidades de grupo.

3.3. Domínio do tempo e da frequência

A Figura 6 mostra a amplitude dos sinais obtidos no domínio do tempo ao longo da chapa de aço carbono com descontinuidades. Observa-se que houve uma queda da amplitude nas descontinuidades cujas profundidades possuem 30% e 60% da espessura nominal da chapa, mostrando-se diretamente proporcional à profundidade, quanto maior a profundidade maior a queda. Isso ocorre devido à interação das ondas de Lamb com a geometria das descontinuidades, tendo como consequência o decréscimo da amplitude devido a conversão de ondas Lamb para Leaky Lamb. A fenda de 10% não foi visualizada, pois possivelmente houve pouca conversão para Leaky Lamb o que não foi o suficiente para apresentar uma perda visível da amplitude (DURINCK, 1999 e FARIAS, 2006).

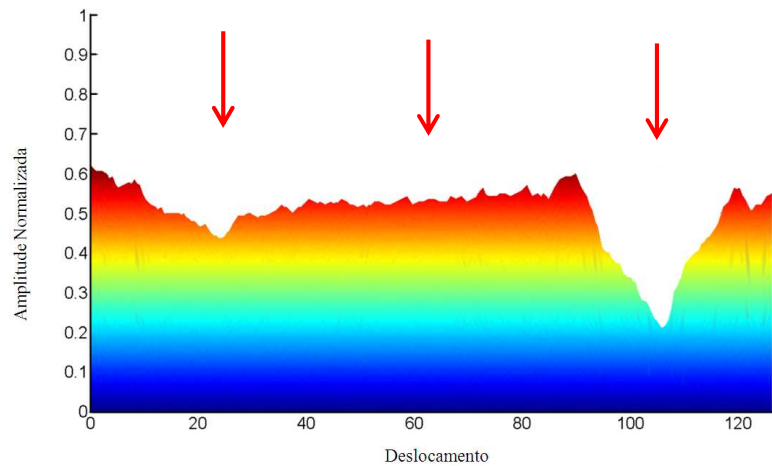


Figura 6- Amplitudes dos sinais obtidos pela varredura de 126 pontos da chapa de aço carbono de 1,5 mm de espessura com descontinuidade (CP_2). As setas verticais mostram a região onde se encontram as fendas: 30%, 10% e 60% de profundidade da espessura da chapa, respectivamente.

A Figura 7 mostra os espectros de frequência (domínio da frequência) dos pontos centrais dos defeitos e de um ponto sem defeito. Os espectros de frequência não mostram variação de amplitude ao longo dos ensaios, principalmente no centro dos defeitos.

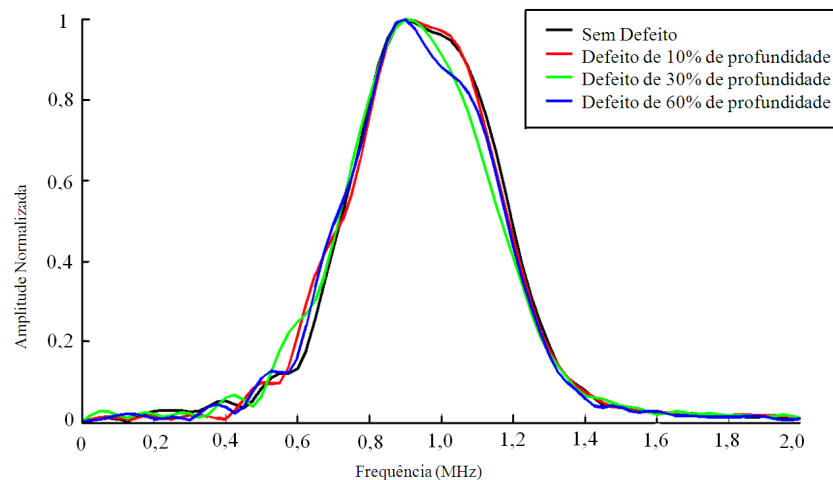


Figura 7- Espectros da frequência para as posições centrais dos defeitos e uma posição sem defeito.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho experimental foi avaliada a interação do modo de propagação S_0 das ondas de Lamb com descontinuidades tipo fenda de 10%, 30% e 60% de profundidade da espessura nominal das chapas de aço carbono de 1,5 mm de espessura. A detecção das descontinuidades foi possível para as fendas de 30% e 60% de profundidade da espessura nominal da chapa utilizando a análise no domínio do tempo para o modo de propagação S_0 das ondas de Lamb. Para a fenda de 10% de espessura, não foi possível a visualização através da metodologia utilizada, possivelmente por ter ocorrido baixa conversão de energia para o meio líquido (efeito *Leaky*).

Com relação ao uso do domínio da frequência, não foi possível avaliar nenhuma fenda projetada devida a pouca variação visível no espectro.



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.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. S., FARIAS, C. T. T., SANTOS, E. T. F., MENEZES, I. J. R. S., SANTOS, Y. T. B. S., OLIVEIRA, M. A., “**Análise do Espectro de frequência do modo S_0 das ondas de Lamb em chapas de alumínio com furos circulares de diferentes diâmetros**”, 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico, 2-6 October 2011.

CHEN, K. F.; CAO, X.; LI, Y. F., “**Sine wave fitting to short records initialized with the frequency retrieved from Hanning windowed FFT spectrum**”, Measurement 42, 127–135, 2009.

DURINCK, G., THYS, W., REMBERT, P., IZBICKI, J.L., “**Experimental observation on a frequency spectrum of a plate mode of a predominantly leaky nature**”, Ultrasonics, 37, 373–376, 1999.

FARIAS C. T. T., “**Utilização das Ondas Ultrassônicas de Lamb na Inspeção de Materiais Compósitos Laminados Fibra-Metal**”, Tese de doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2006.

FARIAS, C. T. T., FILHO, E. F. S., SANTOS, Y. T. B., ARAÚJO, M. S. S., RIBEIRO, I. S., “**Spectral Analysis of the propagation of Lamb Waves on Fibre-Metal Laminated Plates to detect and evaluate different defects**”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.

FARIAS, C. T. T., PARANHOS R. S., SILVA, I. C., SIMAS FILHO, E. F., MENEZES, I. J., DIAS, J. C., “**Estudo da propagação das ondas de Lamb em chapas de alumínio com furos de diferentes profundidades**”. 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico, 2-6 October 2011.

LI, Y. F., CHEN, K. F., “**Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform**”, Computer Physics Communications 178, 486–491, 2008.

OLIVEIRA, A. S. A.; DIAS, J. C.; FARIAS, C.T.T.; SEIXAS, P. L.; SANTOS, Y. T. B., TEIXEIRA, C. A.; CARDOSO, L. B., “**Avaliação não destrutiva ultrassônica de chapas de alumínio com diferentes descontinuidades utilizando ondas de Lamb**”, XXX CONAEND & 16 IEV, São Paulo, 2012.

PAVLAKOVIC B., LOWE M. J. S., **Disperse™ – A System for Generating Dispersion Curves**, Version 2.0.16b, Imperial College, NDT Lab., London, July, 2010.

PAVLAKOVIC B., LOWE M. J. S., “**Manual Disperse**”, Imperial College, NDT Lab. London, July, 2001.

SANTOS, A. X., “**Estudo de uma nova técnica de medida do tempo de percurso da onda ultrassônica usando o espectro de frequência**”, Dissertação de mestrado em Engenharia Nuclear, CNEN, Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, M. J. S. F., “**Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais**”, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, D.Sc, Portugal, May 2004.

SANTOS, Y.T.B., FARIAS C. T. T., SOBRAL, M.D.C., OLIVEIRA, M., ARAÚJO, M. S. S., “**Spectral Analysis of Ultrasonic Lamb waves applied to the study of the Intermetallic phase presence on plates of AISI 430 Ferritic Stainless Steel submitted to Isothermal Treatments**”, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.



SIQUEIRA, M.H. S., “**Inspecção em grandes distâncias utilizando ondas ultrassônicas guiadas e inteligência artificial**”, Tese de doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Novembro 2001.

XU, H., XU, C., ZHOU, S., “**Study of Lamb wave propagation in plate for UNDE by 2-D FEM model**”, International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha, China, 13-14 March 2010.