



Estudo do Campo de deslocamento das partículas na propagação das Ondas Ultrassônicas de Lamb

Priscila L. Seixas¹ Cláudia Teresa Teles Farias² Alexandre S. A. de Oliveira³ Ygor T. B. dos Santos⁴

¹Graduando em Engenharia Industrial Elétrica-IFBA/LEUS/GPEND. Bolsista do CNPq. Email: priscilaleaoeixas@hotmail.com

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

³Graduando em Engenharia Industrial Elétrica-IFBA/LEUS/GPEND. Bolsista do CNPq. Email: smith.aquer@gmail.com

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

Resumo: Neste trabalho foi realizado um estudo do campo de deslocamento das partículas com a variação do parâmetro frequência versus espessura, para dois modos em particular da onda ultrassônica de Lamb, S_0 e A_0 , propagando em material isotrópico. Foram efetuadas modelagens computacionais na avaliação dos deslocamentos de campo das partículas e, parâmetros tais como velocidade de fase, velocidade de grupo, número de onda também foram determinados por simulação. Esta análise proporcionou a compreensão dos fenômenos associados à propagação das ondas guiadas em placas. Os resultados revelaram a influência da frequência no comportamento dos modos de propagação e nos deslocamentos das partículas em ondas de Lamb.

Palavras-chave: campos de deslocamento, ultrassom, velocidades de fase, velocidades de grupo

1. INTRODUÇÃO

Em 1917 Horace Lamb que foi um matemático e físico britânico inseriu a ideia da camada homogênea de espessura finita e apresentou equações da velocidade de propagação das ondas em chapas contínuas com contornos livres. Já o conceito das ondas de Lamb, como um meio não destrutivo de detecção de danos, só ocorreu em torno de 1960 por Worlton (KESSLER, 2001;2002). Nestas ondas, a movimentação da partícula ocorre tanto na direção de propagação quanto perpendicularmente ao comprimento do material (direção normal à face da placa). O deslocamento das partículas dos vários modos é designado como simétricos e antissimétricos. (OLIVEIRA, 2012)

Nas ondas de Lamb as placas funcionam como guias de ondas, que dão origem a um número infinito de modos de propagação, com o auxílio das curvas de dispersão obtêm-se características como a velocidade de fase, a velocidade de grupo, o deslocamento das partículas, ângulo de incidência, entre outros. (GHOSH, 1998)

A inspeção de equipamentos utilizando ondas de Lamb vem ganhando destaque em relação aos ensaios ultrassônicos convencionais. Como em chapas de pequena espessura, essas ondas apresentam uma propagação a longas distâncias, inspecionando grandes áreas com economia de tempo e eficiência, sensibilidade a diferentes tipos de falhas e de custo relativamente baixo. (FARIAS, 2007)

Este trabalho tem como objetivo estudar as curvas de dispersão e o campo de deslocamento das partículas na propagação das ondas ultrassônicas de Lamb em chapas de alumínio obtidas por simulação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Curvas de Dispersão:

Um dos problemas na utilização das ondas de Lamb é o fato de possuírem caráter dispersivo. Com o aumento da frequência o número de modos existentes também aumenta o que provavelmente dificulta a interpretação dos sinais.

As curvas de dispersão permitem a visualização dos modos e propagação de ondas de Lamb em função da frequência do feixe sônico e da espessura do material inspecionado. Além disso, parâmetros tais como ângulo de incidência, velocidade de fase e de grupo e atenuação devem ser avaliados e selecionados e forma a escolher um modo e propagação numa faixa de frequência x espessura onde há menor dispersão, isto é, onde a velocidade de fase não varie com a frequência. (ARAÚJO, 2011)

FARIAS *et al* (2012) selecionaram o modo de propagação S_0 para inspecionar chapas de alumínio apresentando descontinuidade, devido este modo ser menos atenuante. Apesar da seleção de um modo de propagação das ondas de Lamb menos dispersivo ser utilizado, a presença de fronteiras irregulares, defeitos ou variações na impedância acústica podem causar vários sinais no receptor. (ANDRADE, 2006)

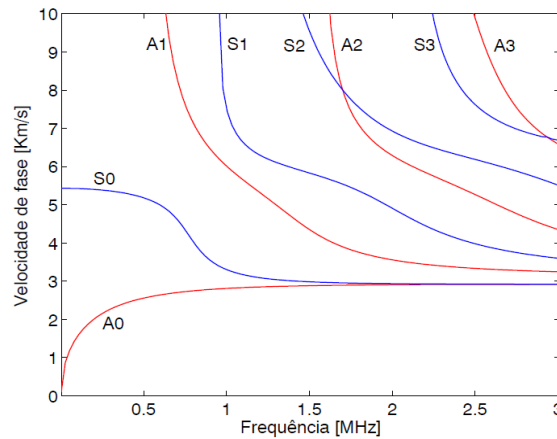


Figura 1. Curvas de dispersão da velocidade de fase para uma placa de alumínio com 3 mm de espessura.

As equações de *Rayleigh-Lamb* determinam a velocidade a que um modo se propaga para uma placa com espessura e constantes elásticas conhecidas (VIKTOROV, 1970). Onde d é a metade da espessura da chapa e k é o número da onda. Cada número de onda k corresponde a um modo de onda de Lamb que pode se propagar em uma chapa.

$$\frac{\tan(qd)}{\tan(pd)} = -\frac{(q^2 - k^2)}{4pk^2} \qquad \frac{\tan(pd)}{\tan(qd)} = -\frac{4pk^2}{(q^2 - k^2)} \quad (1)$$

Estas equações relacionam as constantes de propagação dos vários modos com a frequência, para uma placa com espessura e constantes elásticas conhecidas (VIKTOROV, 1970). Onde d é a metade da espessura da chapa e k é o número da onda. Cada número de onda k corresponde a um modo de onda de Lamb que pode se propagar em uma chapa.

2.2 Estudo do campo de deslocamento das partículas:

A análise do deslocamento das partículas com a variação dos parâmetros frequência *versus* espessura para um modo de propagação em particular é muito relevante ao se trabalhar com ondas de Lamb. O comportamento das curvas de deslocamento das partículas torna-se paulatinamente mais complexo conforme o avanço na frequência.

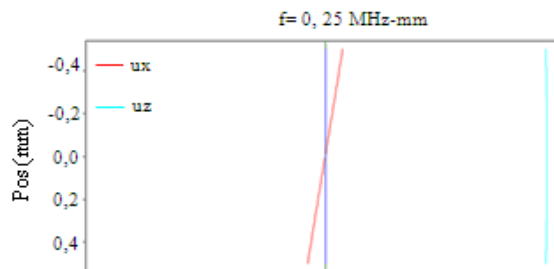


Figura 2. Curva de deslocamento das partículas referente ao modo de propagação S_0 , numa placa de alumínio de 1 mm de espessura, frequência de 0,25 MHz - mm

De modo geral existem dois sentidos de deslocamentos em relação à placa, o out- of- plane (u_x , eixo x) que, por exemplo, deve ser minimizado numa placa imersa num fluido devido a fugas elevadas

para o fluido que podem ocorrer, e o sentido de propagação in-plane (uz , eixo z) que é na placa (SANTOS, 2004). A figura 3 ilustra uma placa com seus eixos x e z .

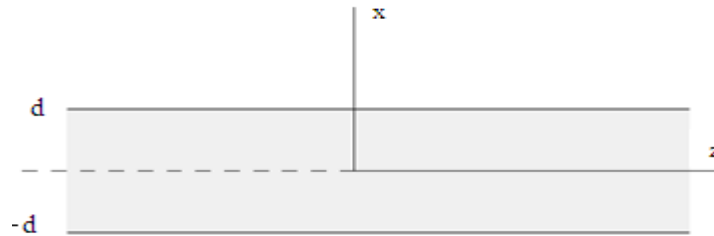


Figura 3. Placa e eixos.

Abaixo estão as expressões para o cálculo dos deslocamentos adquiridas empregando o método dos potenciais com as condições de contorno para uma placa no vácuo. Para modos simétricos:

$$u_x = \frac{q^2 - k^2}{2p} \frac{\text{sen}(qh)}{\text{sen}(ph)} \cos(pz) - q \text{sen}(qz) \quad (2)$$

$$u_z = \frac{q^2 - k^2}{2k} \frac{\text{sen}(qh)}{\text{sen}(ph)} \text{sen}(pz) + k \cos(qz)$$

Para modos assimétricos:

$$u_x = -\frac{q^2 - k^2}{2p} \frac{\cos(qh)}{\cos(ph)} \text{sen}(pz) + q \text{sen}(qz) \quad (3)$$

$$u_z = \frac{q^2 - k^2}{2k} \frac{\cos(qh)}{\cos(ph)} \cos(pz) + k \cos(qz)$$

Utilizando as equações 2 e 3 para determinar os deslocamentos de um modo de propagação é preciso conhecer previamente a velocidade de fase correspondente obtida na curva de dispersão da velocidade de fase em termos da frequência. (SACHSE, 1978) Com esse valor, e com as velocidades de propagação longitudinal e transversal conhecidas é possível traçar os deslocamentos em função da espessura d da placa. Na figura abaixo se visualiza o deslocamento das partículas dos modos simétricos figura 4(a); modos assimétricos 4(b).

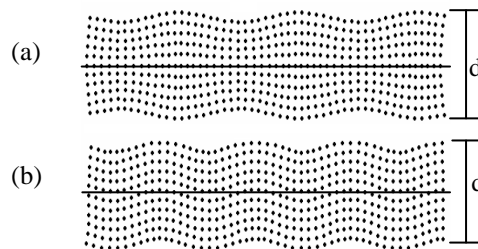


Figura 4. Deslocamento das partículas em chapa de espessura d dos modos de propagação de ondas de Lamb: (a) simétricos; (b) assimétricos.

3. METODOLOGIA

3.1. Simulação das curvas de dispersão

Para o traçado das curvas de dispersão e de deslocamento das partículas foi empregado o programa computacional Disperse® projetado para o cálculo das curvas de dispersão para materiais isotrópicos e anisotrópicos. A simulação através deste software proporcionou a análise das curvas de dispersão e de deslocamento obtendo valores de velocidade de fase e de grupo e número de onda (PAVLAKOVIC, 2000).



Tabela 1- Dados de entrada da simulação computacional.

	Forma	Material	Meio	Espessura	Velocidade longitudinal	Velocidade transversal
Dados de entrada:	placa	alumínio	vácuo	1 mm	6320 m/s	3130 m/s

Tabela 2- Dados de saída da simulação computacional.

Dados de saída:	velocidade de fase	velocidade de grupo	número de onda	Campo de deslocamentos das partículas
------------------------	--------------------	---------------------	----------------	---------------------------------------

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises de curvas de Dispersão

Na simulação foram obtidas as curvas de dispersão dos modos de propagação das ondas de Lamb em chapas de alumínio com 1 mm de espessura, Figura 5.

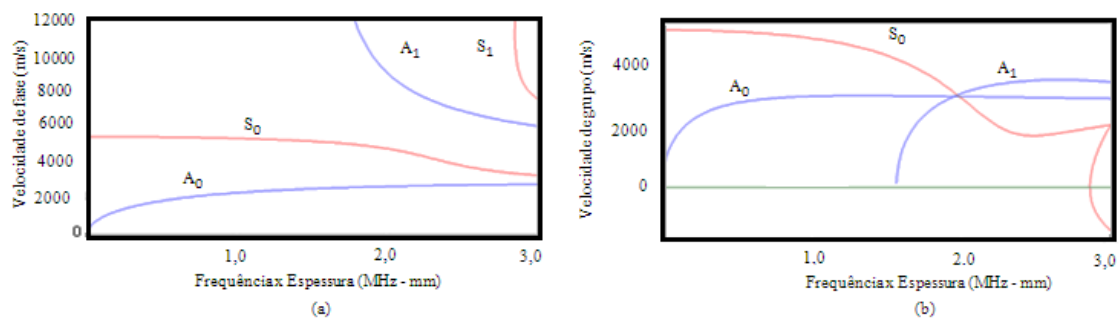


Figura 5 - Curvas de dispersão para uma placa de alumínio com 1 mm de espessura (a); velocidade de fase (b) velocidade de grupo.

Pela figura 5 pode-se justificar que para chapas de alumínio, o modo de propagação S_0 é comumente mais utilizado, pois possuem pouca variação das velocidades de fase e de grupo em baixas frequências.

Na Tabela 3 é possível observar que o número de onda k aumenta conforme a frequência aumenta. Para o modo S_0 , menos dispersivo, este valor é bem menor que no modo de propagação A_0 . Os valores de velocidade de fase para o S_0 diminuem na medida em que a frequência x espessura aumenta, assim como o A_0 na velocidade de grupo. A velocidade de fase v_f é dada a partir da solução da equação 1 de Rayleigh-Lamb. Onde d é a espessura da placa, $k = \omega / v_f$ é o número de onda, $\omega = 2\pi/f$ é a frequência angular. As variáveis p e q são dados pelas equações 4 e 5:



Tabela 3- Valores do número de onda, velocidade de fase e velocidade de grupo em função das frequências 0,25 MHz-mm, 0,5 MHz-mm, 1,5 MHz-mm e 2,5 MHz-mm, para cada modo de propagação A_0 e S_0 . Considerando a espessura 1 mm.

Modo de Propagação	Frequência X Espessura (MHz-mm)	K (n° de onda) (1/mm)	Velocidade de fase (m/s)	Velocidade de grupo (m/s)
A_0	0,25	0,17	1450,9	2490,62
	0,5	0,27	1906,37	2935,47
	1,5	0,59	2563,38	3163,98
	2,5	0,91	2764,45	3103,15
S_0	0,25	0,05	5432,7	5421,26
	0,5	0,09	5416,88	5372,62
	1,5	0,29	5187,81	4560,8
	2,5	0,65	3833,76	1788,74

$$q^2 = k^2 - k_t^2 \quad (4)$$

$$p = k^2 - k_t^2 \quad (5)$$

k_l o número de onda longitudinal e k_t o número de onda transversal, que dependem das velocidades longitudinais e transversais.

Velocidade de grupo v_g é a velocidade de propagação de um grupo de ondas com frequências próximas, ou seja, representa a velocidade do envelope da onda propagada em um intervalo de tempo Δt e pode ser calculada pela equação 6.

$$V_g = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (6)$$

4.2 Campos de deslocamento das partículas

O deslocamento de campo das partículas de um corpo em torno de seu ponto de equilíbrio gera forças internas que combinada com a inercia das partículas provoca o movimento oscilatório do meio (SANTOS, 2004).

Pela figura 6 observa-se que conforme a frequência aumenta ocorre uma grande variação no comportamento dos deslocamentos, sendo assim, sua análise e interpretação torna-se mais complexa. Na frequência x espessura de 0,25 MHz-mm, o valor mais baixo selecionado, nota-se que o deslocamento in-plane (u_z) é constante mesmo avançando para a frequência de 0,5 MHz-mm, este deslocamento começa a mudar, pois há um maior avanço no valor da frequência. De 1,5 MHz-mm para 2,5 MHz-mm, ocorre uma alteração brusca, o deslocamento u_z passa pelo centro da placa para o outro lado, dificultando sua avaliação. O deslocamento out-of-plane (u_x) está mais concentrado no centro da placa nas frequências mais baixas de 0,25 MHz-mm e 0,5 MHz-mm, embora, nessa faixa de frequência o deslocamento u_x ainda seja mais constante. Com o aumento da frequência para 1,5 MHz-mm e 2,5 MHz-mm seu comportamento torna-se mais complexa a interpretação. Como pode ser visto o deslocamento possui dois tipos de vibrações, nas direções (u_z) in-plane e (u_x) out-of-plane, isso quer dizer que o sentido in-plane é na placa e o out-of-plane é perpendicular à placa, variando de acordo com a frequência e a conversão de modos que também aumenta com a frequência.

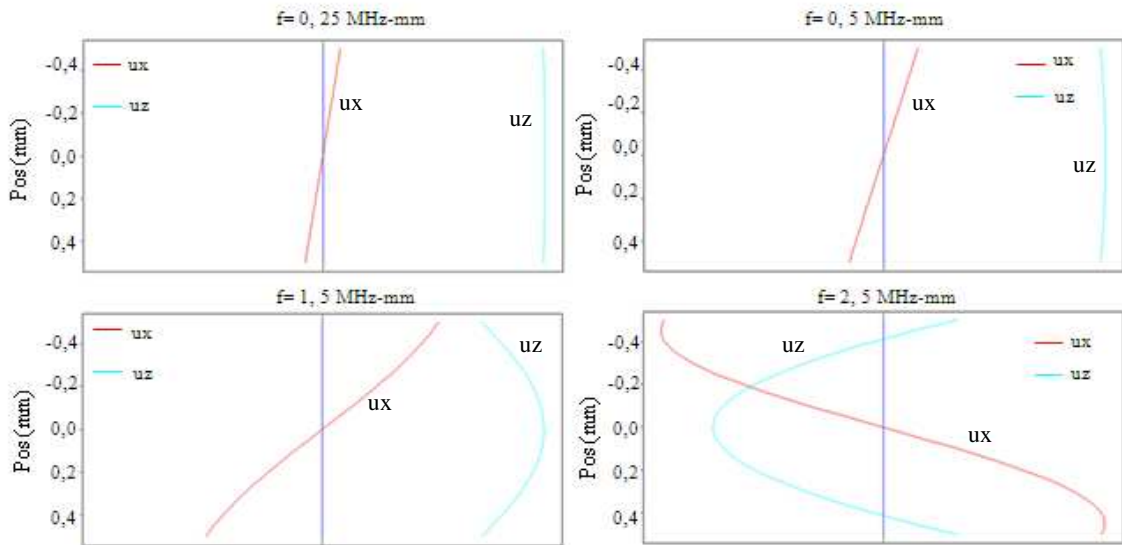


Figura 6 - Deslocamentos referentes ao modo de propagação S_0 em quatro diferentes pontos da sua curva de dispersão.

Na figura 7 observa-se uma maior complexidade nos seus deslocamentos devido ao fato de ser um modo de propagação assimétrico A_0 aparecem, portanto mais alterações no sentido de vibração das partículas. O deslocamento in-plane se encontra no centro da placa para frequências baixas, como a de 0,25 MHz-mm e 0,5 MHz-mm, embora comece a variar bastante a partir de 1,5 MHz-mm. É possível observar claramente que o deslocamento out-of-plane, mesmo se modificando nas frequências maiores não chega nem próximo ao centro da placa, ao contrário do que acontece com o modo de propagação S_0 .

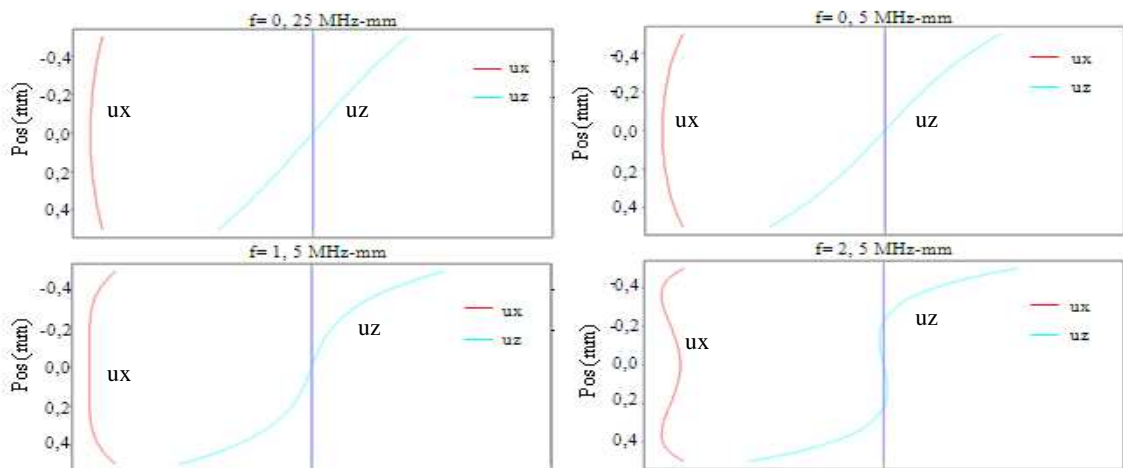


Figura 7 - Deslocamentos referentes ao modo A_0 em quatro diferentes pontos da sua curva de dispersão.

A figura 8 demonstra os deslocamentos de forma diferente, baseado no fato de que o deslocamento é genericamente elipsoidal para cada ponto da chapa. Conforme a espessura aumenta altera também o sentido da vibração elipsoidal das partículas no deslocamento.

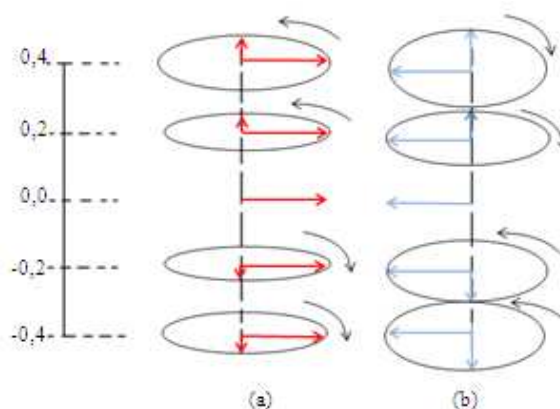


Figura 8 – Representação para diversas profundidades da placa: (a) modo S_0 ($fd= 0,25$ MHz-mm); (b) modo A_0 ($fd= 1,5$ MHz-mm).

Foi feita a normalização referente ao valor máximo de deslocamento para os modos. No modo A_0 verifica-se maior complexidade dos seus deslocamentos e com isso vão surgir mais alterações no sentido da vibração das partículas embora a frequência escolhida ainda seja baixa, já no modo de propagação S_0 percebem-se movimentos contrários da parte superior em relação à parte inferior da placa por causa da alteração de sinal de um dos deslocamentos. (SANTOS, 2004)

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, por meio de simulação computacional, curvas de dispersão e campos de deslocamentos das partículas para o estudo sobre comportamento das ondas de Lamb em placas de alumínio de 1 mm de espessura foi realizado.

Foram obtidos o número de onda, a velocidade de fase e a velocidade de grupo. A comparação destes valores com a variação de frequência e dos modos de propagação S_0 e A_0 , permitiu constatar que a utilização de faixas mais baixas de frequências em inspeção de placas é mais adequada, devido a poucas conversões de modos e menor complexidade dos deslocamentos.

A análise do campo de deslocamento para dois modos de propagação, S_0 e A_0 permitiu a compreensão dos fenômenos associados à propagação destas ondas ultrassônicas através da comparação de curvas com diferentes valores de frequência por espessura, constatando novamente que o aumento do valor da frequência torna os deslocamentos nas direções in-plane e out-of-plane muito complexos de serem interpretados de acordo com as mudanças de direções.

As conclusões tiradas validam os estudos sobre o deslocamento de partículas em ondas de Lamb no que se refere à influência das frequências no comportamento dos deslocamentos e modos de propagação.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ANDRADE, MARCO A. B. **Análise de materiais piezelétricos compósitos para aplicações em transdutores de ultrassom.** Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.



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, October 2011.

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, April 2012.

FARIAS, C. T. T.; MACHADO, J. C.; MOREIRA, R.; REBELLO, J. M. A.; SILVA, I. C. **Deteccção de Danos em Compósitos Laminados Fibra-Metal Utilizando Ondas de Lamb**. 2007.

GHOSH, T., KUNDU, T., KARPUR, P. **Efficient Use of Lamb Waves for Detecting Defects on Large Plates**. Ultrasonics v. 36, May 1998.

JEONG, H., LEE, S. L., BAE, S.M., **Defect Detection and Localization in Plates Using a Lamb Wave Time Reversal Technique**, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Junho 2011.

SANTOS, M. J. F. S. **Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais**. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, Universidade de Coimbra, 2004.

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.

DAVID N. ALLEYNE , CAWLEY ,PETER. **Optimization of Lamb wave inspection techniques**; Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London SW7 2BX, UK. Received 18 May 1992

PAVLAKOVIC B, LOWE M J S, **Manual Disperse**, Imperial College, NDT Lab. London, July, 2000
(SACHSE, W., PAO, Y. -H; **On the Determination of Phase and Group Velocities of Dispersive Waves in Solids**. Journal Applied Physics. 49 (8), August, 1978.

VIKTOROV, I. A. **Rayleigh and Lamb Waves**. 2 ed. New York, Plenum Press. 1970;

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, March 2010.