

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

USO DE IMAGENS B-SCAN PARA IDENTIFICAR NÃO UNIFORMIDADES EM COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS QUE AFETAM O TEMPO DE PERCURSO DE ONDAS L_{cr} .

Vanessa Vieira Gonçalves, vanessa.vieira@fem.unicamp.br¹

Paulo Pereira Junior, ppj@fem.unicamp.br¹

Auteliano Antunes dos Santos Junior, aute@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Mendeleev, 200, Cidade Universitária, Campinas.

Resumo: Técnicas de inspeções não destrutivas têm sido estudadas para atender as necessidades dos setores industriais que buscam por métodos cada vez mais eficazes e de baixo custo. A técnica de ultrassom têm atendido às expectativas, sendo muito utilizada para a detecção de defeitos, além de se mostrarem capazes de medir tensões em materiais, sejam estas aplicadas ou residuais, fazendo uso da teoria acustoelástica. Tal teoria relaciona a variação de velocidade ou tempo de percurso (TOF) da onda com a variação da tensão no material. Para o emprego da técnica, a onda longitudinal criticamente refratada, onda L_{cr} , mostra-se uma alternativa interessante, pois apresenta maior sensibilidade à variação de tensão, além de se propagar paralela e próxima à superfície do material. Nos materiais compósitos, cujo uso na fabricação de componentes tem crescido em diversos setores, sobretudo no setor aeroespacial, o uso da técnica de ultrassom para medir tensões é afetada por parâmetros que interferem nas medições do tempo de percurso da onda, tais como as não uniformidades no material. Entender a influência dessas não uniformidades no tempo de propagação da onda L_{cr} pode viabilizar o uso da técnica de ultrassom na medição de tensão em materiais em campo. Neste trabalho, utilizou-se um sistema phased array para investigar a relação entre o TOF da onda L_{cr} e as não uniformidades em materiais compósitos carbono/epóxi unidirecionais HexTow® AS4/Hexply® 8552, obtendo imagens de B-Scan para indicar regiões no material com a presença de não uniformidades. Para isso foi utilizada uma sonda de phased array, com 5 MHz e 64 elementos, e para medir os tempos de percurso da onda L_{cr} , dois transdutores com 1 MHz de frequência. O método utilizado permitiu obter as diferenças nos tempos de percurso entre posições diferentes de uma mesma amostra, o que possibilitou identificar posições nas amostras avaliadas com maiores distorções e relacioná-las com as descontinuidades nas imagens de B-Scan obtidas, confirmando que estas influenciam diretamente na propagação da onda L_{cr} .

Palavras-chave: Sistema Phased Array, Ondas L_{cr} , Materiais Compósitos

1. INTRODUÇÃO

Há um anseio na indústria por técnicas de inspeções não destrutivas que sejam cada vez mais precisas e de baixo custo para a inspeção de componentes. No setor aeronáutico, com o crescente uso de materiais compósitos na fabricação de componentes estruturais, houve um aumento do interesse em técnicas de inspeção viáveis para esse tipo de material. Uma técnica que tem se mostrado vantajosa por diversos fatores, como facilidade no manuseio, portabilidade, não oferecer riscos ao operador, bom nível de precisão e baixo custo, é a técnica de inspeção por ultrassom.

Além de ser usada para detectar defeitos, a técnica ultrassônica juntamente com a teoria acustoelástica podem ser usadas para medir as tensões residuais ou aplicadas em componentes mecânicos. Diversos autores têm pesquisado o tema, como Egle e Bray (1976), que aplicaram a técnica em amostras de trilhos ferroviários, enquanto Szelazek (2015) mediu tensão em rodas ferroviárias. Belahcene e Lu (2002) e Javadi et al (2015) utilizaram a técnica ultrassônica para medição de tensão residual gerada por solda.

A acustoelasticidade relaciona a velocidade da onda, ou o tempo de percurso, com a variação de tensões no material. Para um caso mais específico de tensões próximas a superfície, que são responsáveis por diversos tipos de defeitos, as tensões podem ser avaliadas usando as ondas longitudinais criticamente refratadas, ondas L_{cr} , que são sensíveis à variação de tensões e se propagam próximas à superfície. No entanto, para o uso da técnica deve-se ter o

conhecimento dos fatores que influenciam a propagação da onda L_{cr} , para que estes não interfiram nas medições. Um desses fatores são as não uniformidades no material.

Esse trabalho visa investigar o efeito de não uniformidades em materiais compósitos unidirecionais no tempo de propagação da onda L_{cr} . Para isso, são avaliadas as diferenças do tempo de percurso da onda (TOF – time of flight) ao longo das amostras quando não há tensão aplicada no material. Para identificar as não uniformidades optou-se por utilizar imagens de B-Scan do material que foram obtidas através de um sistema *phased array* (PAS), que já vem sendo utilizado em diversos tipos de materiais para a detecção de defeitos, por permitir a obtenção de imagens em tempo real. Muitos estudos para aperfeiçoar a capacidade de inspeção com PAS vem sendo realizados atualmente por pesquisadores como Peña-macias et al. (2008) e Humeida et al. (2013), mostrando a relevância desse trabalho para o estado do conhecimento atual.

2. ACUSTOELASTICIDADE

A acustoelasticidade teve origem na teoria da elasticidade, que aborda o problema da deformação de corpos submetidos à aplicação de esforços externos, relacionando a tensão ao deslocamento (SADD, 2005). Hughes e Kelly (1953) formularam expressões matemáticas para a deformação elástica de segunda ordem, relacionando a velocidade da onda com a deformação no meio sólido sobre a tensão. Para isso utilizaram as constantes de Lamé (λ e μ) e de Murnaghan (l, m e n) e relacionaram a variação de velocidades da onda com a variação de tensão no material. A relação simplificada definida por eles para materiais isotrópicos é dada pela Eq. (1).

$$d\sigma = \frac{E(dv_{11}/v_{11})}{L_{11}} \quad (1)$$

No entanto, para medições em que não há variação da distância entre os transdutores, pode-se avaliar a velocidade através do tempo de percurso da onda. Nesse caso, a expressão então passa a ser indicada pela Eq. (2). Isso justifica a avaliação do TOF da onda L_{cr} nesse trabalho.

$$d\sigma = -\frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, $d\sigma$ é a variação da tensão, E é o módulo de elasticidade do material, L_{11} é a constante acustoelastica, dv_{11}/v_{11} é a relação da variação da velocidade pela velocidade de referência, e t_0 é o tempo de referência, ou seja, o tempo de percurso da onda quando não há tensão aplicada no material.

3. TECNICA L_{cr} e SISTEMA PHASED ARRAY

As ondas L_{cr} são ondas que se propagam próximo à superfície, precisando de um meio capaz de refratá-las. Essas ondas são geradas por transdutores colocados em um ângulo de incidência próximo ao primeiro ângulo crítico (ROSE, 1999). Para a obtenção do ângulo crítico é usada a Lei de Snell, que relaciona os ângulos de incidência e refração com as velocidades das ondas nos dois meios, de incidência e de refração. É dada pela Eq.(3). Desse modo, os transdutores são acoplados em sapatas com essa inclinação para assim gerar as ondas L_{cr} , conforme é mostrado na Fig.1.

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\beta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

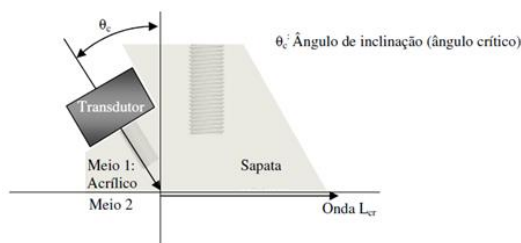


Figura 1. Geração da Onda Longitudinal Criticamente Refratada (PEREIRA Jr, 2011)

O uso de *phased array* é recente e tem sido cada vez mais aplicado nas indústrias para realizar inspeções. O sistema *phased array* exibe imagens dos componentes inspecionados em tempo real, podendo se por A-scan, B-scan, C-scan e S-scan (KUNDU, 2007; RAWLINGS, 2000; OLYMPUS, 2010). O B-scan consiste em uma série de A-scan empilhados; com ele é gerada uma imagem 2-D da seção transversal da amostra, normal à superfície, em que o tempo de percurso é proporcional a sua profundidade.

O *phased array* consiste em uma sonda com vários elementos piezoelétricos que são controlados por uma unidade computacional. Essa unidade aplica leis de atraso no disparo dos feixes ultrassônicos de cada elemento, permitindo que o *phased array* forme uma única frente de onda capaz de varrer uma área de interesse. De acordo com a Lei de Atraso empregada pode-se ajustar a profundidade do feixe e sua focalização (WOOH, 1999). Como exemplo tem-se um esquema da propagação das ondas ultrassônicas no *phased array* na Fig.2(a). As sondas podem estar disponíveis no mercado em diferentes formas, como linear, matricial e anular. No entanto, a sonda linear é a mais utilizada na indústria, por possibilitar uma variedade maior de tipos de inspeção. Seu funcionamento é demonstrado na Fig.2(b).

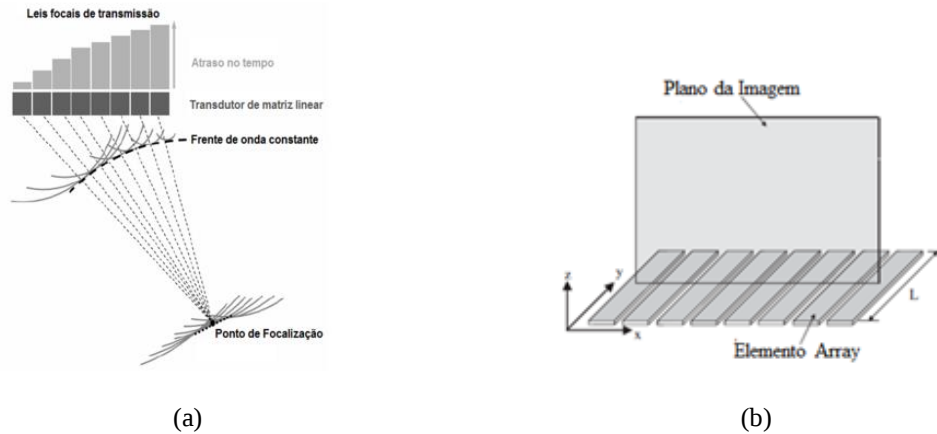


Figura 2. Sonda Linear. (a) Representação de um feixe focalizado (M2M do Brasil), (b) Representação geométrica de uma sonda array linear (adaptado de Drinkwater, 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas três amostras de compósito unidirecional com fibras de carbono (HexTow® AS4) e resina epóxi (HexPly® 8552), nas quais foram aplicadas as técnicas propostas. As amostras têm o formato retangular, com dimensões de 300 mm x 50 mm x 10,2 mm (C x L x H) cada, contendo 53 camadas, nas quais as fibras estão paralelas ao comprimento, sendo por isso, denominadas de amostras a 0° (devido à orientação das fibras).

Para a medição do tempo de percurso da onda L_{cr} nessas amostras foram usados dois transdutores de 1 MHz do fabricante Panametrics, modelo A103 S (Olympus®), e duas sapatas de rexolite com uma inclinação de 15° (ângulo crítico) onde os transdutores foram acoplados. As sapatas foram fixadas a um suporte de alumínio para garantir que a distância entre os transdutores não variasse. A esse conjunto foi dado o nome de *probe*, conforme é visto na Fig. 3(a).

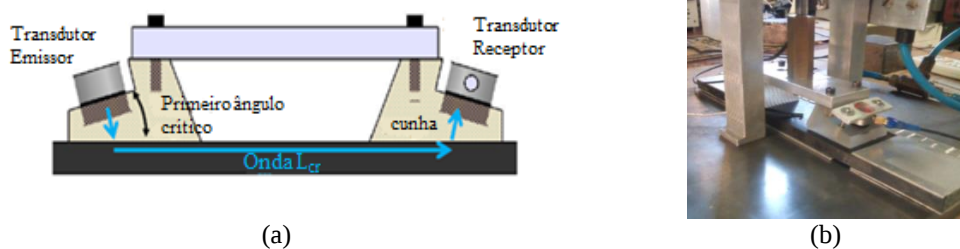


Figura 3. Probe utilizada nas medições do TOF da onda L_{cr} . (a) Desenho representativo do conjunto *probe* (Santos et al, 2014), (b) Probe fixada a um sistema pneumático.

A *probe* foi fixada a um sistema pneumático para ser colocada sobre cada amostra durante a medição do TOF, ver Fig.3(b). Esse sistema permitiu um maior controle da força aplicada sobre a *probe*, visto que essa força pode influenciar nas medições, como já foi estudado por outros pesquisadores (ANDRINO, 2003).

Para gerar as ondas longitudinais foram necessários um pulsador/receptor de sinais ultrassônicos modelo 5072 Panametrics, e também uma placa de aquisição de dados de 250 MHz com taxa de amostragem e 8 bits de resolução para controlar a emissão dos sinais e realizar a conversão de analógico para digital. Ambos foram conectados a um controlador embarcado NI PXI 8108. Os dados foram lidos através da plataforma LabView.

Durante as medições também foi realizado o controle de temperatura através de um aparelho condicionador de ar. O monitoramento desta foi possível com o uso de um termopar tipo K e um módulo condicionador de sinais e conversor analógico/digital, modelo NI 9211 da National Instruments, cuja resolução é de 24 bits. Vale ressaltar que estudos anteriores apontaram que não há influência significativa da temperatura na velocidade de propagação da onda

determinadas regiões de uma mesma amostra. As posições 1 e 3 estão próximas às extremidades da amostra e a posição 2 encontra-se no meio da amostra. Os resultados obtidos são mostrados no gráfico da Fig.7.

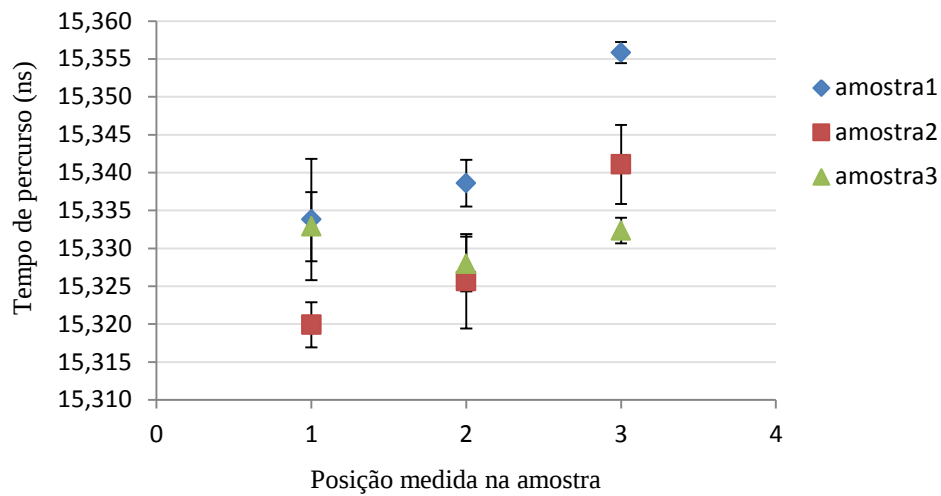


Figura 7. Gráfico do TOF da onda L_{cr} para três posições em cada amostra.

Os resultados mostram que há uma tendência ao aumento do tempo de percurso seguindo da posição 2 para a 3 em todas as amostras. Não é possível afirmar que isso ocorre para todas as posições, pois na Amostra3 há uma queda no tempo entre as posições 1 e 2. Contudo, o gráfico já indica que há divergências entre regiões de uma mesma amostra, visto que o TOF da onda L_{cr} sofreu alterações, e estas podem ser resultantes de não uniformidades do material.

Com as divergências no TOF da onda L_{cr} entre as regiões já identificadas, foram realizadas novas análises das imagens de B-Scan obtidas, em especial nas regiões em que houve maior variação do TOF, com a finalidade de encontrar alguma relação entre tais variações. Não uniformidades foram encontradas em determinadas posições das amostras, conforme são destacadas nas imagens indicadas nas Fig. 8, Fig. 9 e Fig. 10. Observando que nessas figuras o item (b) apresenta duas faixas adjacentes em que a sonda foi colocada na parte superior da amostra, enquanto nas imagens em (a) tem-se as mesmas faixas da amostra, mas com a sonda colocada nas superfícies oposta, no fundo do corpo de prova.

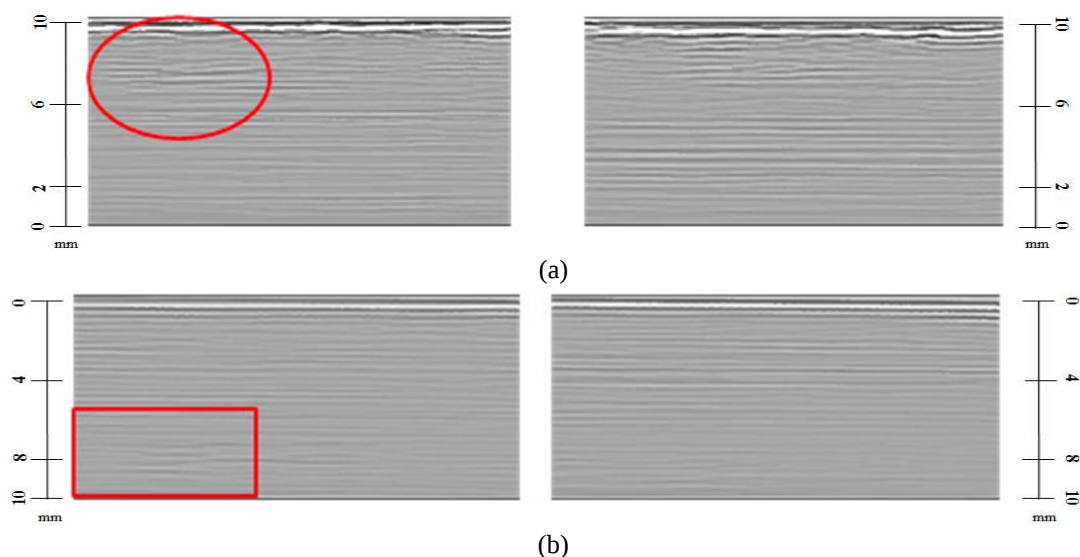


Figura 8. Imagens de B-Scan de um trecho da Amostra1. (a) imagem obtida com a sonda no fundo da peça. (b) Imagem obtida com a sonda na superfície superior da peça.

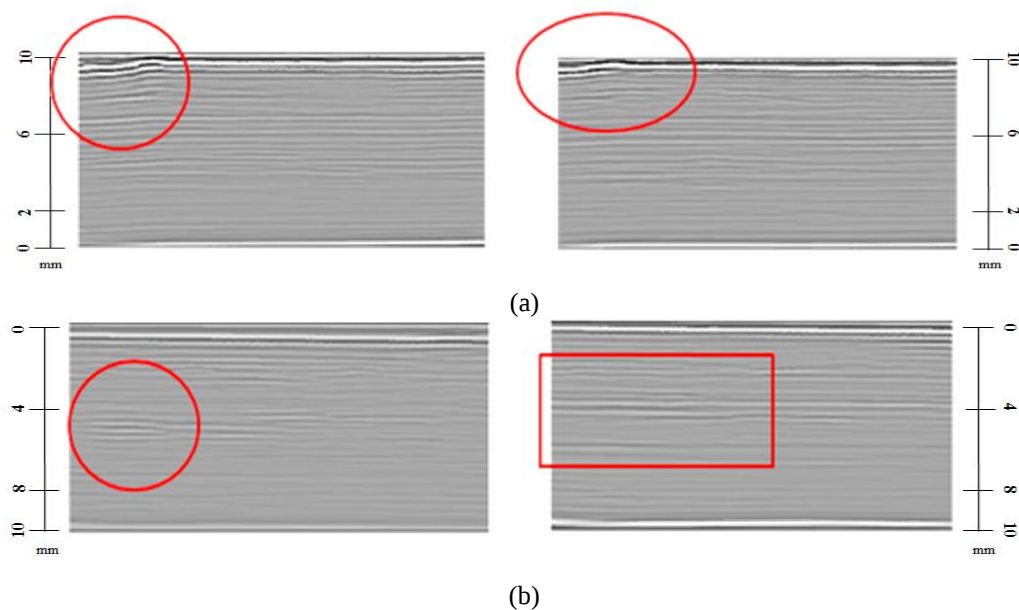


Figura 9. Imagens de B-Scan da amostra 2. (a) sonda colocada na superfície inferior da amostra (b) sonda colocada na superfície superior da amostra.

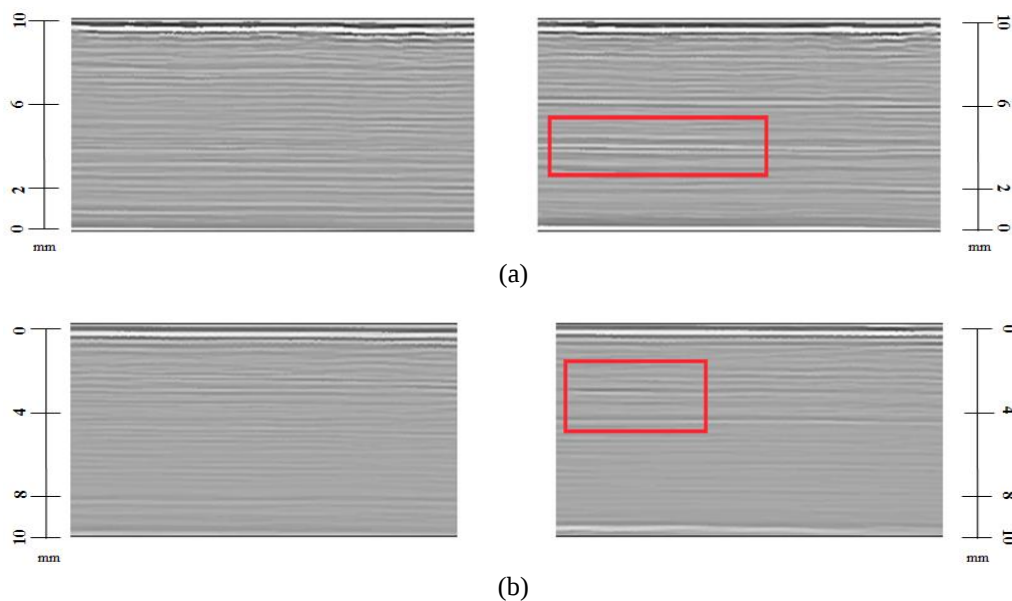


Figura 10. Imagem B-Scan de uma faixa da Amostra3. (a) Imagem feita com sonda sobre o fundo da amostra (b) Imagem feita com sonda na superfície superior da amostra.

Na Fig.8, têm-se imagens de B-Scan para a Amostra1 das posições 2 e 7 indicadas na Fig. 6(b), que correspondem a uma faixa entre as posições 1 e 2 da amostra. Já na Fig.9, as descontinuidades destacadas nas figuras correspondem às posições 3 e 6 da Fig. 6(b), o que equivale a uma parte da posição 2 da Amostra 2. E, por fim, na Fig.9, as imagens correspondem as posições 4 e 5 da Fig. 6(b) para a Amostra3, dentro da posição definida como 3. Como foram feitas várias imagens da mesma posição e essas descontinuidades apareceram em todas, é possível supor que elas estão ligadas realmente às variações na estrutura interna do material, como mostram as imagens.

Nas imagens anteriores as descontinuidades são destacadas tanto em posições que correspondem a regiões próximas ao fundo da amostra quanto a regiões próximas a superfície, e nessas posições há diferenças dos tempos de percurso medidos, o que garante que tais não uniformidades estejam interferindo na forma como essas ondas trafegam e, por isso, a onda L_{cr} estaria viajando ao longo de toda a espessura da amostra.

Embora seja possível perceber as descontinuidades apontadas nas imagens, não é possível afirmar que tipo de defeito pode estar na amostra, podendo ser desalinhamento de fibras, vazios entre as camadas, quebra de camadas, delaminações ou outros. Contudo, o método mostrou que assim como há variações do TOF entre posições de uma

mesma amostra, há também variações nas imagens para essas mesmas regiões, sendo apontadas possíveis não uniformidades no material.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade empregar um método para obter imagens de B-Scan com o uso do sistema *phased array* e analisá-las para investigar descontinuidades em amostras de material compósito unidirecional que afetam de forma significativa o TOF de ondas L_{cr} . Conforme visto, as medições realizadas para obter os TOF's das amostras mostraram que há variações desse parâmetro ao longo de uma mesma amostra, e também apontaram diferenças entre as amostras no comportamento de propagação da onda L_{cr} . As amostras passaram pelo mesmo processo de fabricação e controle de qualidade. Ainda assim, essas divergências no tempo de propagação da onda podem ser resultantes de não uniformidades no material.

No que tange as imagens de B-Scan obtidas, pôde-se avaliar que há variadas descontinuidades em diferentes regiões nas amostras. A análise dessas descontinuidades é importante visto que as mesmas interferem na medição das tensões em componentes usando a técnica acustoelástica. A interferência no tempo de propagação da onda devido a essas descontinuidades foi estudada aqui para as medições em que a amostra não estava sobre efeito de tensão aplicada, já que o problema abordado é de referência para a tensão nula.

O método utilizado mostrou-se capaz de obter imagens B-Scan que apontam regiões de interesse para a localização de descontinuidades. No entanto, o método não é eficiente para descrever o tipo de descontinuidade, tão pouco sua dimensão, já que as distorções nas imagens são resultantes de espalhamentos causados por essas descontinuidades que refletem na imagem toda. Dessa forma, deve-se aprofundar o estudo de imagens nesses materiais para melhor caracterizar essas descontinuidades.

Os resultados obtidos foram satisfatórios no tocante ao objetivo de verificar se há não uniformidades e se essas influenciam nas ondas L_{cr} , o que é um problema para sua utilização na medição de tensões. No entanto, ainda há a necessidade de realizar trabalhos futuros para verificar o TOF das ondas L_{cr} para frequências mais altas, o que pode acarretar em menores comprimentos de onda, de modo que a onda trafegue mais próxima à superfície, visto que a frequência utilizada neste trabalho permitia que a onda percorresse toda a espessura da amostra e não somente regiões próximas à superfície. Além disso, com sondas PA de maior frequência, espera-se aumentar a resolução do método de medição.

7. REFERÊNCIAS

- Andrino, M. H., 2003, Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Belahcene, F.; Lu, J., 2002, Determination of residual stress using critically refracted longitudinal waves and immersion mode. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 37, n. 1, p. 13–20.
- Drinkwater, b.; Wilcox, P., 2006, Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. *NDT & E International*, v. 39, n. 7, p. 525–541.
- Egle, D.M.; Bray, D. E., 1976, Measurement of Acoustoelastic and Third-Order Elastic Constants for Rail Steel. *J. Acoustic Society of America*, v. 60, n.3.
- Humeida, Y.; pinfield, V. J.; Challis, R. E.; Wilcox, P. D.; LI, C., 2013, Simulation of ultrasonic array imaging of composite materials with defects. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, v. 60, n. 9, p. 1935–48.
- Javadi Y., Hasani M. and Sadeghi S., 2015, “Investigation of clamping effect on the welding sub-surface residual stress and deformation by using the ultrasonic stress measurement and finite element method”, *Journal of Nondestructive Evaluation* Vol. 34, No. 3, pp. 1-11.
- Kundu, T., 2007, *Advanced Ultrasonic Methods for Material and Structure Inspection*. ISTE Ltd.
- Matthews, F. L.; rawlings, R.D., 2000, *Composite Materials: Engineering and Science*. CRC Press LLC.
- M2M do Brasil. A Tecnologia Phased Array. Disponível em: < <http://www.m2mdobrasil.com/technology/technology.htm> >.
- Olympus., 2010, *Phased Array Testing - Basic Theory for Industrial Applications*. Waltham: Olympus NDT. 113p.
- Peña-macias, J. Pérez, M.C.; Martínez-oña, R.; Gómez-ullate, Y.; Espinosa, f. m.; Kawiecki, G., 2008, Phased-array transducers for damage detection in aircraft structures*. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 31, n. 12, p. 1019–1030.
- Pereira Jr, Paulo., 2011, Influência da anisotropia gerada por laminação sobre a medição de tensões por ultrassom em ligas de alumínio 7050. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Rose, J. L., 1999, *Ultrasonic waves in solid media*. New York: Cambridge University Press.
- Sadd, M. H. *Elasticity*, 2005, Theory, Applications and Numerics. Burlington: Elsevier Inc. 461p.
- Santos, A.A., Ambiel, L.B., Garcia, R.H. e Rodovalho, T.G., 2014, Stress analysis in carbon/epoxy composites using L_{cr} wave. *Journal of composite materials*, 48(27), p.p 3425-3434.
- Szelazek J., 2015, “Ultrasonic evaluation of residual hoop stress in forged and cast railroads wheels — differences”, *Journal of Nondestructive Evaluation* Vol. 34, No. 1, pp. 1-13.

Wooh, Shi-Chang; SHI, Yijun, 1998, Optimum beam steering of linear phased arrays, NDT&E International.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

USE OF B-SCAN IMAGES TO IDENTIFY NON-UNIFORMITIES IN UNIDIRECTINAL COMPOSITES THAT AFFECT THE TIME-OF-FLIGHT OF L_{CR} WAVES.

Vanessa Vieira Gonçalves, vanessa.vieira@fem.unicamp.br¹

Paulo Pereira Junior, ppj@fem.unicamp.br¹

Auteliano Antunes dos Santos Junior, aute@fem.unicamp.br¹

¹Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Sistemas Integrados da Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Mendeleyev, 200, Cidade Universitária, Campinas.

Abstract. *Non-destructive inspection techniques have been studied to address the needs of industries that crave methods increasingly effective and low cost. The ultrasound technique has serviced the expectations being widely used for the detection of defects and have been shown to be able to measure applied or residual stress in materials, using the acoustoelastic theory. This theory relates the ultrasonic wave velocity variation, or time-of-flight (TOF) variation, with stress variation. For the employment of the technique, the critically refracted longitudinal wave, L_{cr} wave, is an interesting option since it is more sensitive to stress variation, besides it propagates parallel and near to the surface of the material. In composite materials, whose use in the manufacture of components has been growing in various industries, especially the aerospace, the use of ultrasound technique for measuring stress is affected by parameters which affect the TOF measurements, such as non-uniformities of the material, especially when there is no stress applied to it. Understanding the influence of these non-uniformities in the TOF of the L_{cr} wave permits the use of ultrasound technique for measuring stress in materials. In this work, it was used an phased array system to investigate the relationship between TOF of the L_{cr} wave and no uniformities in composite carbon material / epoxy unidirectional HexTow® AS4 / Hexply® 8552, by getting B-scan images to indicate regions in the material with the presence of non-uniformities. For this, we used a phased array probe with 5 MHz and 64 elements, and to measure the TOF of the L_{cr} wave, transducers with 1 MHz frequency were used. The method allowed to get differences in TOF between different locations of the same sample, which enabled us to identify positions in the evaluated samples with higher distortion and relate them to the discontinuities in B-Scan images obtained, confirming that these are directly influencing the propagation of the L_{cr} wave.*

Keywords: *phased array system, L_{cr} waves, composite materials.*