

# X ENCONTRO ACADÊMICO

## MODELAGEM COMPUTACIONAL

### PROGNÓSTICO DE DANO ESTRUTURAL UTILIZANDO ONDAS GUIADAS ULTRASSÔNICAS

**Jorge Franklin Mansur Rodrigues Filho**

Jorge.franklin.m@hotmail.com

**Gláucio Soares da Fonseca**

glauco@metal.eeimvr.uff.br

Universidade Federal Fluminense

Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, 27255-125, Rio de Janeiro, Volta Redonda, Brasil

**Resumo.** As ondas guiadas da família cisalhante horizontal, em seu modo fundamental de propagação, são o objeto de estudo do presente trabalho, dada sua característica não dispersiva e melhor definição de falhas na direção de propagação. Modelos em elementos finitos foram desenvolvidos em Abaqus® para reproduzir o comportamento de propagação, reflexão e difração dessas ondas em uma placa de alumínio. A validade desses modelos foi atestada pela similaridade de seus resultados com dados obtidos experimentalmente em trabalhos recentes com mesmo foco. Foi possível visualizar a característica não dispersiva desta família de ondas tanto quanto verificar a capacidade de excitar apenas este modo e de fazê-lo se propagar de forma onidirecional. Além disso, das análises de interação com uma trinca foram extraídos os padrões de reflexão e difração para diferentes ângulos de incidência das ondas guiadas e a comparação entre as amplitudes de incidência e de reflexão. Também foi observada a conversão do modo cisalhante horizontal para o modo simétrico. Desta forma, todos os resultados dos modelos foram importantes para permitir um estudo mais profundo do fenômeno físico.

**Palavras-chave:** Ondas guiadas ultrassônicas, Elementos finitos, Ondas cisalhantes horizontais, SHM.

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas capazes de realizar um prognóstico de dano estrutural em produtos de engenharia em áreas como a mecânica, a civil e a aeroespacial têm ganhado a atenção dos pesquisadores nos últimos anos. Estes sistemas, baseados nas técnicas de ensaios não destrutivos, têm por objetivo informar, em tempo real, dados sobre a integridade de uma

estrutura, apontando a presença de danos e estimando assim a sua vida. Deste modo, as manutenções podem ser baseadas na condição estrutural, reduzindo custos, tempo e trabalho relativos aos clássicos planos de manutenção.

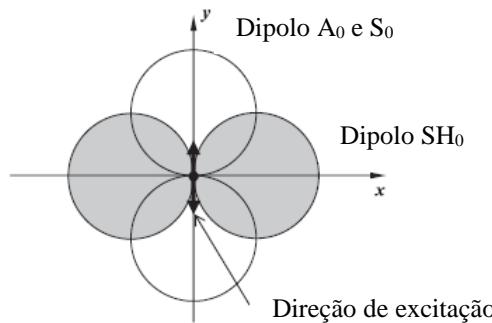
A principal técnica aplicada para realização de prognóstico é o teste por ondas guiadas (GW testing), que oferece um método efetivo de estimar a localização, severidade e tipo de dano, cobrindo uma grande área da estrutura. Outras técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação de danos como por ultrassom clássico, raios-x e líquidos penetrantes não são viáveis para esta aplicação, pois não cobrem grandes áreas, apesar de sua boa precisão na identificação de defeitos.

As ondas guiadas podem ser definidas como ondas de tensão que são forçadas a percorrer um caminho definido pelos contornos de uma estrutura. Dentro os modos de propagação, o cisalhante horizontal é o mais indicado para testes não destrutivos em placas. Isto se deve ao fato de que este modo é não dispersivo em todos os valores de frequência e o movimento das partículas ocorre no plano da placa. Sendo assim, essas ondas podem viajar longas distâncias com atenuação desprezível e ainda manter o formato do sinal inalterado. Além disso, em baixas frequências, este é o único modo cisalhante horizontal que pode se propagar na placa, facilitando o processamento dos sinais (Rose, 2014).

O principal objetivo neste trabalho é desenvolver um estudo de caso sobre uma placa de alumínio na presença de um entalhe retangular. A partir da criação de um modelo em elementos finitos espera-se conseguir estudar o comportamento de reflexão e difração de ondas guiadas da família cisalhante horizontal devido à interação das ondas com o defeito inserido na placa. Portanto, buscam-se conclusões a respeito dos fenômenos que ocorrem no momento da interação, como a direção e amplitude do sinal de resposta e a influência do ângulo de incidência.

## 2 ONDA GUIADA CISALHANTE HORIZONTAL

O termo que nomeia este modo de propagação é utilizado em função do movimento vibracional das partículas que ocorre em um plano paralelo às superfícies da placa. Para excitar este movimento uma partícula da superfície deve sofrer um deslocamento axial com baixa frequência ultrassônica. A figura 1 mostra o movimento da partícula e quais dipolos de propagação irão surgir. Neste caso têm-se ambos os modos fundamentais de ondas cisalhantes horizontais ( $SH_0$ ) e de ondas simétricas ( $S_0$ ) e antissimétricas ( $A_0$ ). A excitação da mesma partícula em todas as direções equivale ao movimento torcional, o que causa a interferência destrutiva dos outros modos, mantendo apenas o modo cisalhante horizontal ( $SH_0$ ). Isto é positivo para a geração das ondas que terão apenas um modo se propagando em todas as direções, o que facilita o processamento dos sinais (Boivin, G, 2015).



**Figura 1:** Dipolo de propagação de ondas, adaptado de Boivin. G, 2015

Das equações de movimento é possível traçar um diagrama de velocidade de propagação dos vários modos em função da frequência. As curvas de dispersão para uma placa de Alumínio estão descritas na figura 1. É possível verificar que o modo fundamental SH<sub>0</sub> é não dispersivo ao longo do espectro de frequência, dada à invariância na velocidade de propagação. A faixa de frequência de interesse é abaixo de 1MHz, pois possui apenas os modos fundamentais de propagação.

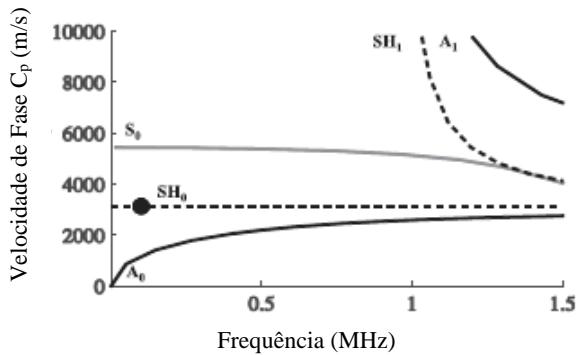


Figura 2: Curvas de dispersão para placa de alumínio, adaptado de Boivin. G, 2015

### 3 METODOLOGIA

O modelo foi desenvolvido utilizando o software Abaqus/CAE®, em seu módulo de análise explícita. As tensões fora do plano podem ser consideradas desprezíveis (Lowe, 2006), logo, para fins de redução do custo computacional, o modelo foi criado com apenas duas dimensões. Consiste de uma placa quadrada com dimensões de 500 mm de lado e espessura de 1.6 mm. A geometria representativa de uma trinca passante é introduzida na placa como um vazio retangular de 20 mm de comprimento e 0.1 mm de espessura.

As propriedades materiais do Alumínio utilizadas foram a densidade de 2700 kg/m<sup>3</sup>, módulo de Young de 70.8 GPa e Poisson de 0.34. O ponto de excitação recebeu um sinal de cinco ciclos em janela Hanning na frequência de 100 kHz para três diferentes posições, mostrados na figura 3, que distam 105 mm do vazio retangular. A posição 1 causa incidência perpendicular na trinca, enquanto a 2 leva as ondas a 45 graus e por ultimo a 3 gera incidência horizontal. Nessas condições, a excitação torcional gera uma onda cisalhante horizontal com comprimento de onda de aproximadamente 31.4 mm. Por isso, a malha foi construída com elementos do tipo CPS4R, quadrados com quatro nós, com dimensão máxima de 1.9625 mm, respeitando a relação de 16 elementos por comprimento de onda.

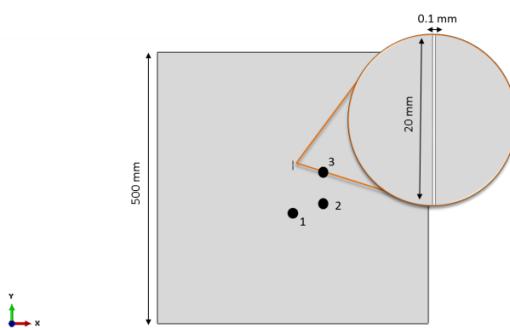
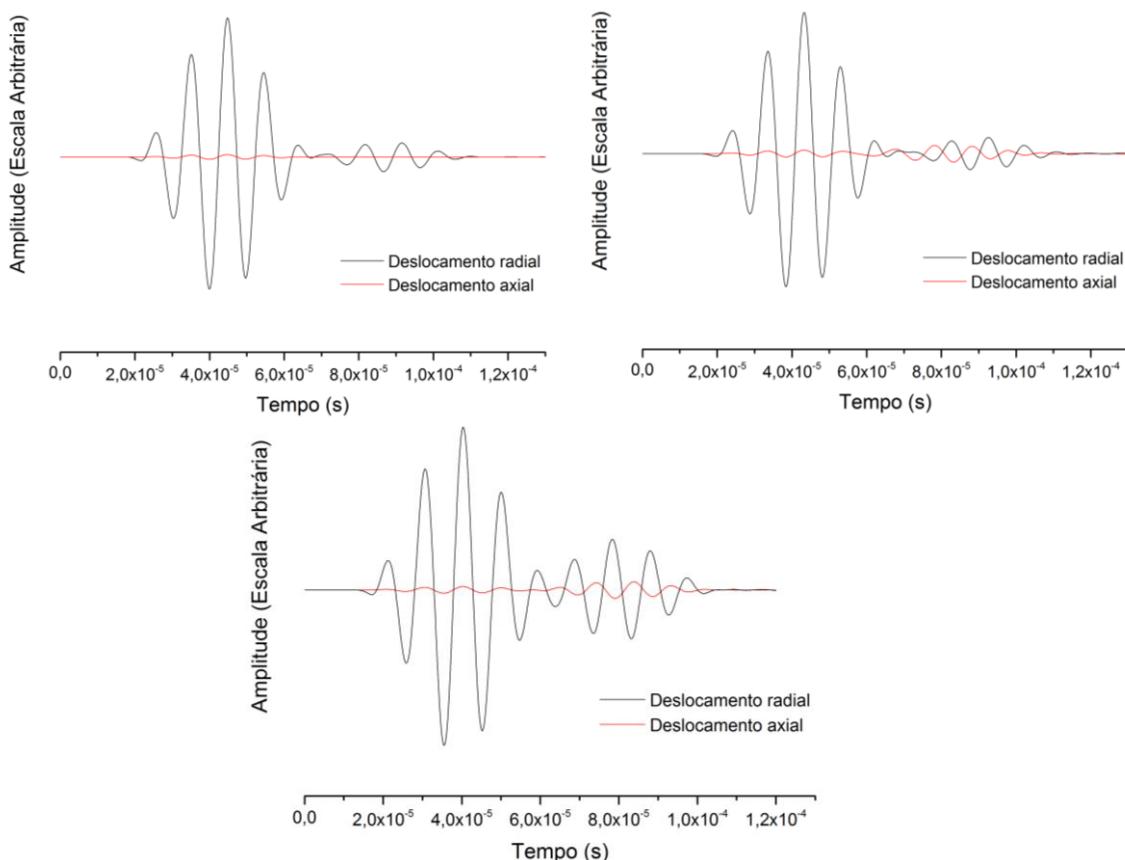


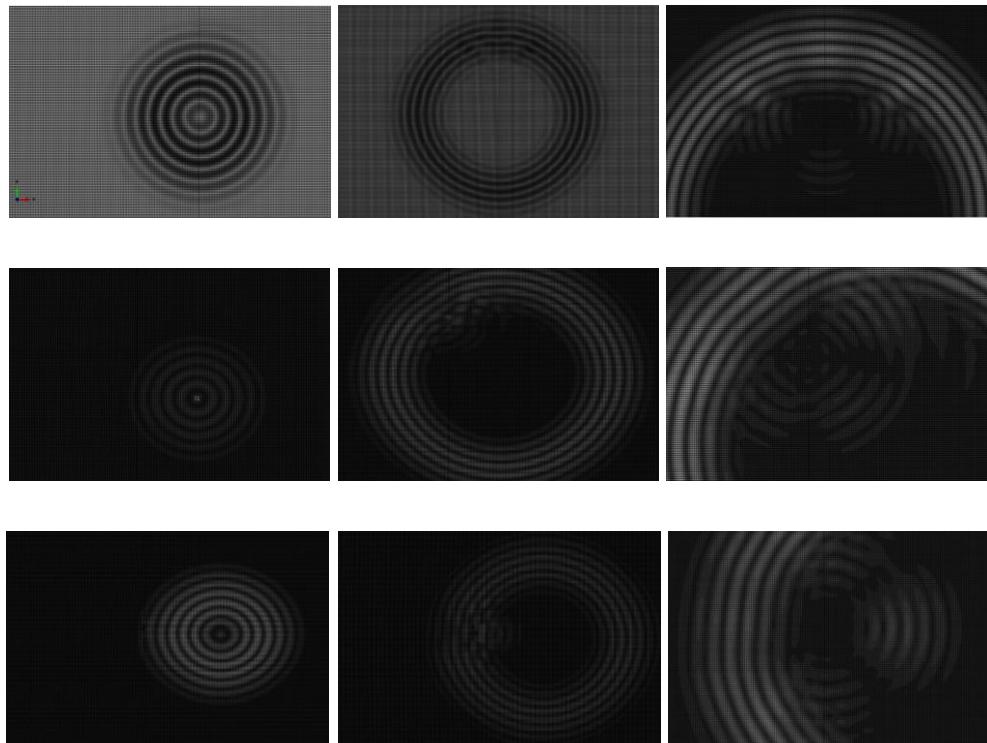
Figura 3: Características geométricas do modelo

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os três diferentes estudos foram executados com êxito e mostraram os resultados a seguir. A figura 4 contém os resultados de propagação e reverberação monitorados respectivamente nos pontos 1, 2 e 3. As grandes amplitudes observadas no início das curvas referem-se às ondas incidentes, que são geradas pelo sinal que aplica o movimento de torção da superfície. O movimento das partículas é referenciado pelo epicentro das ondas, por isso são descritos como axial e radial. No caso com incidência perpendicular é possível verificar grande movimento radial das partículas e desprezível movimento axial, mostrando forte propagação do modo SH0. No entanto, a onda refletida possui uma amplitude muito pequena quando comparada à direção de propagação horizontal. É o mesmo que pode ser observado no segundo caso, a 45 graus, que também apresenta uma reflexão mais fraca na direção de incidência. Isto é um provável desdobramento a interação da onda guiada com a geometria do defeito, que passa a agir como um gerador de ondas com características específicas definidas por seus contornos.



**Figura 4:** Respostas de deslocamento nodal nas direções axial e radial para os três diferentes pontos de aplicação/monitoramento respectivamente.



**Figura 5:** Resultados das simulações mostrando a propagação das ondas através da magnitude do movimento das partículas. Estudo realizado a partir de três diferentes pontos de excitação.

Estas características podem ser visualizadas através da figura 5 que ilustra a propagação das ondas para os três casos em sequência, na qual se pode ver a propagação através do epicentro, a interação com o defeito e por fim as ondas de resposta. Claramente nota-se uma reflexão mais intensa no último caso, com incidência horizontal. É possível verificar também que a trinca não reflete e difrata o modo cisalhante horizontal em todas as direções, diferente da fonte de propagação. Ocorre um fenômeno de transformação de modo, no qual o modo simétrico fundamental ( $S_0$ ) passa a se propagar a partir do defeito. Esta ocorrência está prevista, pois existem três modos de propagação ocupando esta faixa de baixa frequência.

Contudo, pode-se visualizar que para fins identificação da posição espacial do defeito a direção de excitação não tem influência sobre os resultados. Apesar de uma redução em sua quantidade de energia dependente da direção de propagação, o sinal de retorno possui o mesmo formato e seu tempo de viagem pode ser utilizado para estimar a posição do defeito.

## 5 CONCLUSÃO

Apesar da simplicidade do modelo apresentado, existe uma riqueza de conceitos aplicados à sua execução e de informações para um melhor estudo dos fenômenos de propagação de ondas guiadas.

A análise dos sinais incidentes e resultantes mostrou que, para a geometria de defeito apresentado, o ângulo de incidência terá papel importante tanto na amplitude, quanto na direção de propagação das ondas refletidas e difratadas. Outro ponto importante é que foi possível a verificação do surgimento de diferentes modos de propagação devido à interação com a trinca.

Os resultados demonstraram similaridade aos encontrados em trabalhos recentes, corroborando as considerações utilizadas para realização das análises. Espera-se que em trabalhos futuros estudos mais profundos possam ser extraídos destes modelos, além da

realização do aperfeiçoamento de suas características, como a adição de defeitos com geometrias complexas. Desta forma, têm-se a visão de que este é um trabalho de inicio ao estudo desta área da engenharia.

## **REFERÊNCIAS**

Rose, J. L. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media. Cambridge University Press. Vol.1, 2014.

Ratassepp, M.; Lowe, M. J. S. E Cawley, P. "Scattering of the fundamental shear horizontal mode in a plate when incident at a through crack aligned in the propagation direction of the mode." *J. Acoust. Soc. Am.* \_2006\_.

Boivin, G; Belangér, P. "Development of a low frequency omnidirectional piezoelectric shear horizontal wave transducer" *IOP- Smart Mater* \_2016

R. Rajagopal; M. J. S. Lowe, "Short range scattering of the fundamental shear horizontal guided wave mode normally incident at a through-thickness crack in an isotropic plate," *J. Acoust. Soc. Am.* \_2007\_.

Ratassepp, M.; Lowe, M. J. S. E Cawley, P. "Angular influence on the scattering of fundamental shear horizontal guided waves by a through-thickness crack in an isotropic plate" *J. Acoust. Soc. Am.* \_2007\_.

Rajagopal, R.; Lowe, M. J. S. "Scattering of the fundamental shear horizontal guided wave by a part-thickness crack in an isotropic plate" *J. Acoust. Soc. Am.* \_2008\_.

Ma, J. E Cawley, P. "Low-frequency pulse echo reflection of the fundamental shear horizontal mode from part-thickness elliptical defects in plates" *J. Acoust. Soc. Am.* \_2010\_.