

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Identificação e localização de um defeito típico de corrosão em cascos de navios através de ondas de Lamb

por

Charlie Gross Azevedo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017

Identificação e localização de um defeito típico de corrosão em cascos de navios através de ondas de Lamb

por

Charlie Gross Azevedo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dra Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Co-orientador: M.sc. Eng. Eduardo Becker Groth

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 4 de dezembro de 2017

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Ignácio Iturrioz, pela orientação neste trabalho e durante toda a minha trajetória no curso de Engenharia Mecânica.

Ao co-orientador Eduardo Becker Groth, pela paciência e disponibilidade para me auxiliar na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Zilda e José Lionel, por todo apoio e compreensão durante a minha vida acadêmica e por todos os ensinamentos os quais serei eternamente grato por ter recebido.

Aos meus familiares, Rocheli, Ivanilda, Vinicius, Nadir e Karina, por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos engenheiros Sidnei Baccarin, Cristian Zarichta, Irani Sandi e Jefferson Kühle, por todos os conselhos, ensinamentos e oportunidades na minha vida profissional e também pela amizade construída durante anos de trabalho em equipe.

Ao grande amigo aventureiro Eduardo Bubicz, pelas discussões filosóficas sempre produtivas, sobre questões acadêmicas, viagens e cultura geral.

A todos os amigos, familiares e colegas pelo companheirismo e pelos momentos de diversão, pois foi nestas situações que me fortaleceram para enfrentar os mais adversos desafios de minha vida.

Gross Azevedo, C. **Identificação e localização de um defeito típico de corrosão em cascos de navios através de ondas de Lamb.** 2017. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **RESUMO**

Os navios são construídos a partir de componentes de aço que estão sempre expostos a meios corrosivos. Por isso, é de extrema importância o monitoramento da integridade estrutural de cascos de navios, para garantir a segurança na embarcação. Um dos métodos de inspeção utilizados para estes fins é a emissão convencional de ondas de ultrassom em pontos críticos do casco. Contudo, há estudos que apontam algumas vantagens da utilização de emissão de ondas guiadas como método de inspeção em grandes componentes metálicos, como barras e chapas. Neste trabalho, são realizadas simulações através do método de elementos finitos, da propagação de um tipo de onda guiada em placas: as ondas de Lamb. O guia de onda modelado é uma chapa com um defeito e um enrijecedor típico de cascos de navios. Com a utilização dos sinais obtidos nas simulações, e com a utilização da técnica de subtração do sinal base, foi possível identificar o sinal da onda espalhada pelo defeito e localizar as coordenadas da falha na estrutura. Após observar os resultados obtidos, foi possível concluir que as ondas guiadas podem ser usadas como uma ferramenta na manutenção e inspeção de componentes estruturais metálicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** ondas guiadas, ensaios não destrutivos, elementos finitos, casco de navio.

Gross Azevedo, C. **Identification and localization of a usual corrosion defect in Ship Hulls through Lamb Waves**. 2017. 21 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

Naval vessels are constructed with steel components, which are always exposed to corrosive environments. For this reason, is extremely important to verify structural integrity of ship hulls in order to guarantee the safety in the ship. An inspection method used for this purpose, is the conventional emission of ultrasonic waves in critical regions of ship hull. However, there are some studies that point out the advantages of using guided waves emission as inspection technique in large metal components, such as plates and bars. In order to develop the knowledge required for using guided waves as non destructive testing, this work presents simulations, through finite element analysis, of known guided waves in plates: the Lamb waves. The wave guide modeled is a plate with a defect and a typical stiffener of ship hulls. Using the signals obtained from the simulations, and applying the baseline subtraction technique, was possible to identify the baseline signal of the wave scattered by the defect, and to locate the coordinates of the flaw in the plate. After studying the results obtained, it was possible to conclude that guided waves can be used as a tool in the maintenance and inspection of metallic structural components.

**KEYWORDS:** guided waves, non destructive testing, finite element analysis, ship hull.

## ÍNDICE

1.	Introdução .....	1
2.	Objetivos .....	1
3.	Referencial teórico .....	2
3.1.	Propagação de ondas em um meio infinito.....	2
3.2.	Ondas de Lamb.....	2
3.3.	Ondas de corte.....	4
3.4.	Ondas de Rayleigh.....	4
3.5.	Fenômenos associados à propagação de ondas mecânicas.....	4
3.6.	Subtração de sinal base .....	5
3.7.	Método dos Elementos Finitos e integração explícita .....	6
3.8.	Localização do defeito através do tempo de viagem da onda.....	6
4.	Descrição das análises.....	7
4.1.	Geometria e propriedades mecânicas do modelo.....	7
4.2.	Modelagem do problema .....	8
4.3.	Modelo 1 – Chapa sem enrijecedor .....	8
4.4.	Modelo 2 – Chapa com enrijecedor .....	9
5.	Resultados e discussões .....	9
5.1.	Modelo 1 – Chapa sem enrijecedor .....	9
5.2.	Modelo 2 – Chapa com enrijecedor .....	11
5.3.	Ondas observadas nas simulações .....	12
6.	Conclusões .....	14
	Referências Bibliográficas .....	15

## 1. Introdução

Cascos de navios são estruturas construídas a partir de componentes de aço, como chapas, vigas e reforços, e que estão continuamente expostos a ambientes agressivos e a intempéries climáticas. Esse quadro se agrava quando somado às solicitações dinâmicas inerentes à operação do navio. Conseqüentemente, a corrosão é um dos maiores causadores de degradação dessas estruturas. A Figura 1.1 mostra um exemplo de corrosão em um navio no porto de Go Dau, no Vietnã. Em outros navios que operam neste porto, e que apresentaram corrosão acentuada, fez-se necessária a paralisação da embarcação por 40 dias para realizar manutenção na estrutura e adicionar 16 toneladas de aço em chapas no casco do navio danificado, segundo notícia publicada dia 17 de julho de 2013, no website da seguradora marítima Gard. Este exemplo mostra a importância de inspeções preventivas em embarcações navais para garantir a integridade e segurança da embarcação. Farias (2010) destaca a necessidade de planos de inspeções para avaliar corrosão, fadiga e outros mecanismos que podem prejudicar as estruturas navais.

Com a utilização de ondas guiadas, é possível verificar a integridade de grandes estruturas de maneira rápida e eficiente, pois as ondas guiadas se propagam por longas distâncias em meios como barras esbeltas e chapas. É possível adquirir o sinal da propagação destas ondas com a utilização de sensores adequados para identificar a existência e a localização de defeitos. A principal vantagem da inspeção por ondas guiadas é o fato de que é possível inspecionar regiões maiores em um espaço de tempo menor, com relação às técnicas convencionais de ultrassom [Su e Ye, 2009].

Cascos de navios são estruturas complexas, por isso é adequado estudar o comportamento das ondas guiadas primeiramente em regiões simplificadas. Este estudo avalia o comportamento de ondas de Lamb em uma estrutura composta pela chapa do casco do navio e um enrijecedor longitudinal. A Figura 1.2 apresenta uma estrutura típica de cascos de navios com estes componentes.



Figura 1.1 - Exemplo de corrosão em de navios.

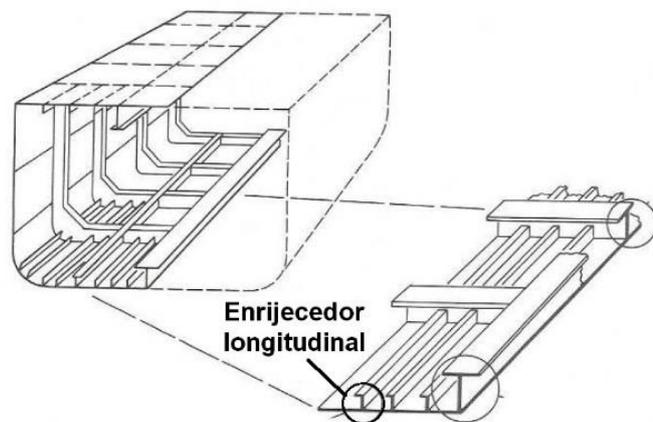


Figura 1.2 - Estrutura comum de cascos de navios.

## 2. Objetivos

No presente trabalho, espera-se desenvolver uma técnica de ensaio não destrutivo que utilize o fenômeno da propagação de ondas guiadas para a identificação de defeitos causados por corrosão localizada em cascos de navios. Para alcançar esta meta, são desenvolvidos objetivos específicos, que são:

- Modelagem de uma chapa metálica pelo método de elementos finitos para analisar a propagação das ondas guiadas;
- Introdução de um defeito na chapa e análise da interação (reflexão e espalhamento) das ondas com o defeito;
- Adição de enrijecedores no modelo e análise da interação das ondas com o defeito e o enrijecedor;

- Utilização das técnicas de subtração de sinal base e triangulação para localizar o defeito.

### 3. Referencial teórico

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para compreender o estudo apresentado neste trabalho.

#### 3.1. Propagação de ondas em um meio infinito

O conceito de onda mecânica está associado a um conjunto vibrações de partículas que se propagam no meio material. Quando estas oscilações ocorrem em um meio infinito, tem-se uma onda de corpo. Este movimento possui determinada frequência  $f$  e período  $T$ . Quando estas partículas vibram na mesma direção de propagação da onda, tem-se uma onda primária. Porém, se o movimento oscilatório das partículas ocorre no sentido perpendicular à direção de propagação da onda, chama-se esta onda de secundária. A Figura 3.1 ilustra a diferença entre as ondas de corpo primárias (a) e secundárias (b). As ondas primárias estão sujeitas a esforços de tração e compressão e as ondas secundárias sofrem a esforços de cisalhamento.

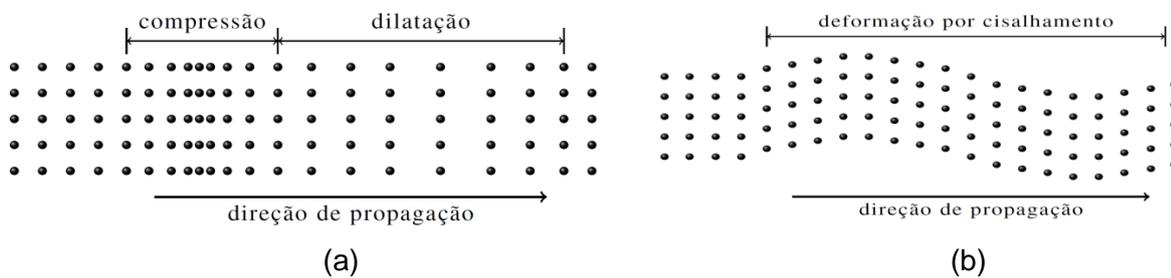


Figura 3.1 – (a) Onda primária; (b) Onda Secundária. [Fonte: Groth, 2016].

Os deslocamentos das partículas de uma onda mecânica em um meio infinito podem ser descritos pela equação de Navier (3.1):

$$(\lambda_L + \mu) \cdot \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + \mu \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

Nesta equação,  $u_i$  representa o deslocamento na direção  $x_i$  (analogamente, para o subíndice "j"),  $\rho$  é a densidade do meio,  $\mu$  é o módulo de cisalhamento,  $\lambda_L$  é a constante de Lamé,  $\lambda_L = \frac{2 \cdot \mu \cdot \nu}{1 - 2 \cdot \nu}$  ( $\nu$  é o coeficiente de Poisson). Auld (1973) mostra que, a partir da equação (3.2), é possível obter a velocidade de propagação da onda primária (a) e da onda secundária (b).

$$(a) \ c_t = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2 \cdot \mu}{\rho}}; \quad (b) \ c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \quad (3.2)$$

As ondas primárias e secundárias são os modos fundamentais das ondas de corpo. Sendo o meio finito, a interação dessas ondas com as fronteiras do domínio resulta em diferentes padrões de propagação comumente chamados de modos. Alguns exemplos de modos de ondas são as ondas de Rayleigh, ondas de torção, ondas de flexão e ondas de Lamb.

#### 3.2. Ondas de Lamb

Uma onda mecânica em um meio finito – com condições de contorno definidas – caracteriza uma onda guiada.

Considerando uma chapa de espessura  $2h$  com as superfícies livres, conforme ilustrado na Figura 3.2, e utilizando a técnica de Helmholtz de decomposição do vetor de deslocamentos, a equação (3.1) pode ser reescrita para se obter as equações (3.3) e (3.4), que descrevem os deslocamentos das ondas primárias e secundárias, respectivamente.



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3.4)$$

Figura 3.2 – Chapa com espessura  $2h$ .  
[Fonte: Rose, 2014]

Assumindo a hipótese de que a solução para estas equações é uma função harmônica, tem-se as equações (3.5) e (3.6).

$$\phi = \Phi(x_3) \cdot \exp[i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)] \quad (3.5)$$

$$\psi = \Psi(x_3) \cdot \exp[i(k \cdot x_1 - \omega \cdot t)] \quad (3.6)$$

A partir da hipótese de estado plano de deformações para a placa, obtém-se as equações (3.7) e (3.8), que descrevem os deslocamentos  $u_1$  e  $u_3$  respectivamente. Também se obtém as equações (3.9) e (3.10), que representam as tensões na placa,  $\sigma_{31}$  e  $\sigma_{33}$  respectivamente.

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \quad (3.7)$$

$$u_3 = \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \quad (3.8)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) \quad (3.9)$$

$$\sigma_{33} = \lambda_L \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + 2\mu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (3.10)$$

Se considerarmos que a placa possui as superfícies livres, tem-se que  $\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0$  em  $x_3 = \pm h$ .

Substituindo as equações (3.7) e (3.8) nas equações (3.9) e (3.10), e realizando algumas manipulações (descritas detalhadamente por Rose, 2014), chega-se às equações (3.11) e (3.12), que descrevem as ondas de Lamb

$$\frac{\operatorname{tg}(q \cdot h)}{\operatorname{tg}(p \cdot h)} = -\frac{4k^2 \cdot p \cdot q}{(q^2 - k^2)^2} \quad (3.11)$$

$$\frac{\operatorname{tg}(q \cdot h)}{\operatorname{tg}(p \cdot h)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 \cdot p \cdot q} \quad (3.12)$$

Onde:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2 \quad (3.13)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2 \quad (3.14)$$

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (3.15)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.16)$$

O termo  $\omega$  representa a frequência angular [ $rad/s$ ] da onda,  $k$  representa o número de onda [ $1/m$ ], e  $\lambda$ , o comprimento de onda [ $m$ ]. A equação (3.11) descreve o comportamento das ondas de Lamb com deslocamento simétrico em relação à linha central da espessura da placa e a equação (3.12) descreve as ondas antissimétricas. Os modos de vibração simétricos são chamados de  $S_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) e os antissimétricos de  $A_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), onde o subíndice “i” indica a harmônica do respectivo modo. Por exemplo, o modo  $S_0$ , representa o modo simétrico fundamental. O comprimento de onda pode ser calculado de acordo com a equação (3.17), onde  $c$  é a velocidade de propagação da onda (Groth, 2010).

$$\lambda = c/f \quad (3.17)$$

A Figura 3.3 mostra o movimento das partículas do modo  $S_0$  (a) e da onda  $A_0$  (b). Também mostra a onda de corte  $SH$  (c), que é descrita no item 3.3.

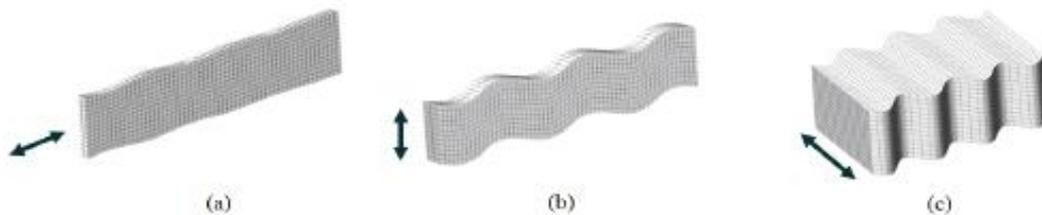


Figura 3.3 – Modos de propagação das ondas guiadas em placas. (a) Modo simétrico; (b) Modo antissimétrico; (c) onda de corte. [Fonte: Menin, 2017]

### 3.3. Ondas de corte (SH)

Em uma placa também podem se propagar as ondas chamadas de  $SH$ , que são as ondas de corte (*Shear Waves*). Neste tipo de onda, as partículas oscilam no plano da chapa, e na direção perpendicular ao sentido de propagação da onda. A Figura 3.3 (c) ilustra o movimento das partículas nas ondas  $SH$ .

### 3.4. Ondas de Rayleigh

Estas ondas estão presentes nas superfícies livres de placas, e a magnitude dos deslocamentos deste modo de onda diminui à medida que aumenta a distância à borda livre da placa, conforme pode ser visto na Figura 3.4, que apresenta, esquematicamente, as ondas de Rayleigh.

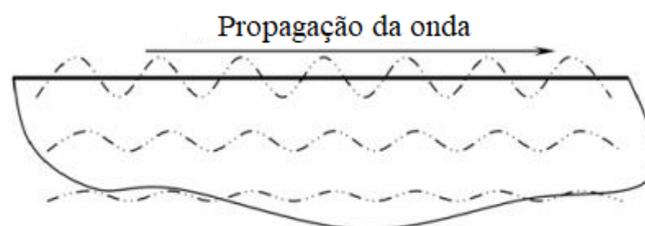


Figura 3.4 – Modo de propagação das ondas de Rayleigh. [Fonte: Su e Ye, 2009]

## 3.5. Fenômenos associados à propagação de ondas mecânicas

A seguir, são descritos alguns fenômenos relacionados com a propagação das ondas em sólidos.

### 3.5.1. Atenuação

É a redução gradativa da amplitude do sinal (deslocamento, velocidade ou aceleração) de uma onda mecânica, à medida que a onda se desloca no guia de onda. Em casos reais, a atenuação ocorre devido ao atrito viscoso, atrito interno e transformação de energia cinética das moléculas, em energia térmica. Segundo Nepomuceno (2002), quanto maior a frequência da onda, maior é a atenuação, sendo as perdas por atrito interno e viscoso. A interação das ondas com discontinuidades ou defeitos também resulta em atenuação do sinal.

### 3.5.2. Transmissão, reflexão e espalhamento

Ao encontrar uma interface entre dois meios de propriedades diferentes ou uma descontinuidade, uma parcela da onda mecânica será transmitida ao segundo meio, se este não for vácuo, e outra parcela pode ser refletida.

Nepomuceno (2002) explica que a interação entre uma onda incidente e um defeito pode resultar nos fenômenos de reflexão e espalhamento. Se o defeito é muito maior que o comprimento da onda incidente, admite-se que ocorre somente o fenômeno de reflexão. Porém, quando o comprimento de onda é muito maior que o defeito, tem-se o espalhamento da onda.

A reflexão ou espalhamento da onda pode resultar na conversão do modo, ou seja, a reflexão/espalhamento de uma onda puramente longitudinal pode gerar uma parcela longitudinal e outra transversal. O mesmo fenômeno ocorre para as ondas transversais. Este fenômeno foi estudado por Radke, em 2016, que mostra que uma onda puramente longitudinal em uma barra esbelta, ao encontrar um defeito, é refletida em duas partes, sendo uma longitudinal e uma transversal.

### 3.5.3. Dispersão das ondas de Lamb

A dispersão das ondas guiadas em placas ocorre pelo fato de que as velocidades de propagação das ondas dependem da espessura da chapa e da frequência da onda que se propaga na placa. Uma excitação genérica viajará sobre a placa como uma superposição de termos associados às ondas que podem viajar nessa geometria. Como cada modo pode viajar com uma dada frequência, numa determinada velocidade, os modos de onda propagam-se em velocidades diferentes, produzindo o fenômeno de dispersão.

A representação gráfica das equações (3.11) e (3.12) são as curvas de dispersão das ondas de Lamb, que mostram a relação da velocidade de propagação com a frequência da onda, em uma chapa com determinada espessura. A Figura 3.5 mostra uma curva de dispersão genérica das ondas de Lamb em uma chapa de alumínio, onde as linhas contínuas são os modos simétricos e as linhas tracejadas representam os antissimétricos. O eixo das abscissas é o produto da frequência da onda pela espessura da chapa, e o eixo das ordenadas representa a velocidade de propagação da onda. As curvas de dispersão podem ser obtidas em placas e em outros tipos de guias de ondas, utilizando diversas metodologias. Groth (2016) realiza uma comparação entre diversos métodos de construção de curvas de dispersão.

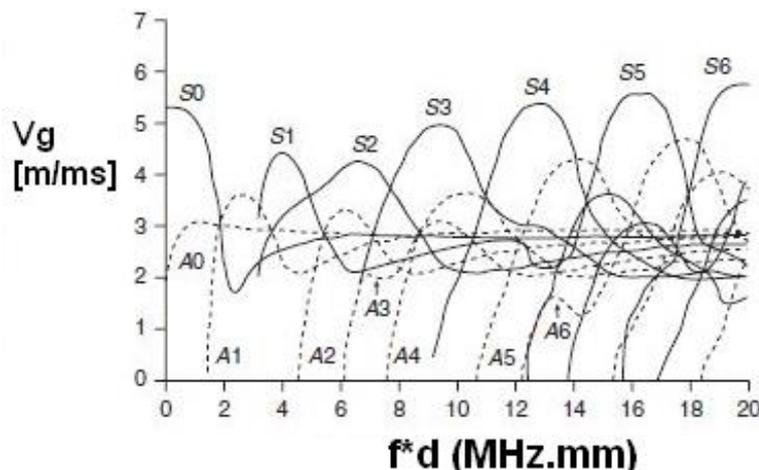


Figura 3.5 – Curva de dispersão genérica para uma chapa de alumínio. [Fonte: Rose, 2014]

### 3.6. Subtração de sinal base

É possível mensurar o nível de vibração de estruturas, com a aquisição de sinais proveniente de transdutores adequados, capazes de medir deslocamento, velocidade ou aceleração. O termo sinal base é designado ao sinal extraído de análises em estruturas sem nenhum dano ou irregularidade, ou seja, é um sinal de referência.

A técnica da subtração do sinal base consiste em subtrair o sinal base do sinal adquirido de experimentos em estruturas danificadas. O resíduo desta subtração indica a existência de defeitos ou avarias no componente analisado. A Figura 3.6 ilustra um exemplo da utilização da subtração do sinal base para identificar a existência de uma falha.

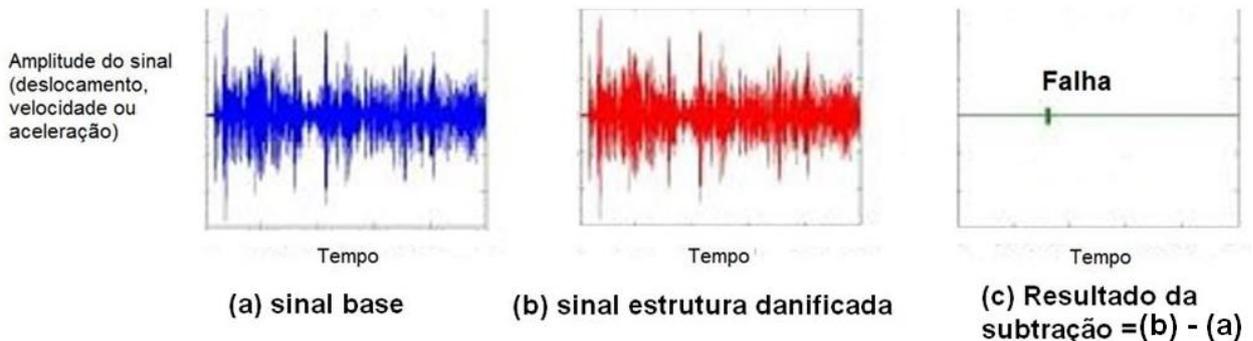


Figura 3.6 – Subtração do sinal base para identificação de defeitos. [Adaptado de: Cicero, 2009]

### 3.7. Método dos Elementos Finitos e integração explícita

O método de elementos finitos (MEF) é um método de análise numérica, e é amplamente utilizado na Engenharia para a resolução de problemas em diversas áreas, como mecânica dos sólidos, transferência de calor e massa, mecânica dos fluidos, métodos de fabricação, etc.

No MEF, o domínio contínuo de um problema de Engenharia é subdividido em um número finito de elementos, que são conectados entre si através de pontos discretos, chamados de nós [Alves Filho, 2002]. Um conjunto de equações algébricas é utilizado para descrever o comportamento destes nós. A solução destas equações é obtida através de métodos numéricos, que podem ser realizados com auxílio de computadores e softwares adequados.

Em análises de excitações dinâmicas, como a propagação de ondas em uma placa, a equação (3.18), que é a equação do movimento, é alcançada após realizar a discretização espacial utilizando o método dos elementos finitos.

$$K \cdot u + C \cdot \dot{u} + M \cdot \ddot{u} = F \quad (3.18)$$

Nesta equação (3.18),  $K$  é a matriz de rigidez dos elementos,  $C$  é a matriz de amortecimento,  $M$  é a matriz de massa,  $F$  é o vetor de forças nodais,  $u$  é o vetor dos deslocamentos nodais da estrutura,  $\dot{u}$  é o vetor das velocidades nodais e  $\ddot{u}$  é o vetor correspondente às acelerações nodais do modelo em análise.

Existem dois esquemas básicos para realizar a integração da equação de movimento, os chamados métodos explícitos e métodos implícitos. No caso de estudar problemas governados pela propagação de ondas elásticas em um guia de onda, o esquema mais adequado é o explícito. O MEF permite realizar a integração da equação do movimento utilizando esta metodologia de integração, que entre suas vantagens permite resolver as equações sem necessidade de vincular o modelo. Mais informação sobre estes métodos de integração podem ser encontrados em Bathe (1996).

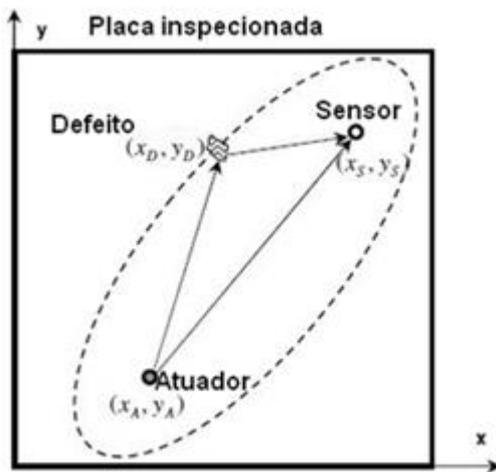
### 3.8. Localização do defeito através do tempo de viagem da onda

É possível localizar um defeito em um domínio com duas dimensões, como a superfície de uma chapa, utilizando um atuador, capaz de gerar uma onda mecânica, e sensores, capazes de registrar o sinal desta onda. Em um determinado instante, a onda original, antes de interagir com o defeito, é detectada pelo sensor. Em um instante posterior, a onda irá encontrar o defeito e o sinal da onda espalhada/refletida é registrado novamente pelo mesmo sensor. Utilizando o tempo que a onda leva para se propagar de um determinado ponto a outro, é

possível triangular o defeito. Este tempo é conhecido como tempo de viagem, ou tempo de vôo, conforme descrito por Su e Ye (2009).

O método de triangulação a ser utilizado no contexto deste trabalho, relaciona a velocidade de propagação da onda; os tempos de viagens registrados pelo sensor; e as coordenadas do atuador, do sensor e do defeito. Todos estes termos são utilizados na equação (3.19). Nesta equação,  $t_{A,D,S}$  é o tempo que a onda incidente leva para atingir o defeito somado ao tempo que a onda espalhada leva para atingir o sensor após interagir com o defeito;  $t_{A,S}$  é o tempo que a onda incidente leva para se deslocar do atuador ao sensor, antes de encontrar o defeito;  $L_{A,D}$  é a distância entre atuador e o defeito;  $L_{D,S}$  é a distância entre o defeito e o sensor; e  $L_{A,S}$  é a distância entre o atuador e o sensor.  $V_1$  e  $V_2$  representam, respectivamente, a velocidade da onda incidente e a velocidade da onda refletida/espalhada pelo defeito. As posições do sensor ( $x_S; y_S$ ) e do atuador ( $x_A; y_A$ ) são conhecidas e as incógnitas são as coordenadas do defeito ( $x_D; y_D$ ) que se deseja localizar.

A solução da equação (3.19) é uma elipse e a localização do defeito é sobre a linha desta elipse, conforme descrito por Su e Ye (2009), e ilustrado esquematicamente na Figura 3.7.



$$t_{A,D,S} - t_{A,S} = \left( \frac{L_{A,D}}{V_1} + \frac{L_{D,S}}{V_2} \right) - \frac{L_{A,S}}{V_1} \quad (3.19)$$

$$L_{A,D} = \sqrt{(x_D - x_A)^2 + (y_D - y_A)^2} \quad (3.20)$$

$$L_{D,S} = \sqrt{(x_D - x_S)^2 + (y_D - y_S)^2} \quad (3.21)$$

$$L_{A,S} = \sqrt{(x_S - x_A)^2 + (y_S - y_A)^2} \quad (3.22)$$

Figura 3.7 – Localização do defeito pelo tempo de viagem da onda, com um atuador e um sensor. [Fonte: Su e Ye, 2009]

#### 4. Descrição das análises

Deseja-se identificar e localizar um defeito circular de 50 [mm] de diâmetro e 6 [mm] de profundidade, em uma placa com um enrijecedor típico de casco de navios, através do método de triangulação pelo tempo de viagem da onda.

Para adquirir o sinal da onda inicialmente emitida na placa e da onda refletida/espalhada pelo defeito, são realizadas análises da propagação da onda em dois modelos de elementos finitos:

- Modelo 1 – Chapa sem enrijecedor, com e sem a existência do defeito.
- Modelo 2 – Chapa com um enrijecedor típico de estrutura de cascos de navios, com e sem a existência do defeito.

##### 4.1. Geometria e propriedades mecânicas do modelo

A chapa em análise possui dois lados iguais de 600 [mm] de largura e 10 [mm] de espessura. As dimensões do enrijecedor modelado são apresentadas no tópico 4.4.

O material da placa e do enrijecedor é aço com comportamento elástico, linear e isotrópico. A densidade do material é de 7850 kg/m<sup>3</sup>, o módulo de elasticidade é igual a 210 GPa e o coeficiente de Poisson é 0,3.

## 4.2. Modelagem do problema

As simulações pelo MEF, a preparação da geometria e a aquisição dos dados são realizadas com o *LS-Dyna*, que é um software comercial amplamente utilizado para a simulação computacional de problemas dinâmicos, como a propagação de ondas mecânicas.

Para analisar a interação das ondas com o defeito, é gerada uma onda com frequência de 75 [kHz] na placa, pois esta é uma frequência usual em transdutores comerciais utilizados em ensaios deste tipo (Nepomuceno, 2002). Com o intuito de verificar a dispersão das ondas de Lamb em uma placa de aço com 10 [mm] de espessura, são geradas, no software *Disperse* (software comercial para o cálculo de curvas de dispersão de estruturas), as curvas de dispersão desta geometria. A Figura 4.1 (a) apresenta uma região desta curva, no domínio velocidade de propagação *versus* frequência. É possível perceber que próximo de 75 [kHz], o modo  $A_0$  apresenta uma declividade, o que caracteriza um comportamento dispersivo. Por outro lado, a velocidade do modo  $S_0$  é praticamente constante. Portanto, por não possuir dispersão considerável nesta faixa de frequências, o modo  $S_0$  é excitado na placa.

Para gerar o modo  $S_0$ , aplicam-se forças nodais de tração e compressão na extremidade da chapa, na direção paralela à placa. Isto induz os deslocamentos relativos ao modo  $S_0$ . A amplitude das forças aplicadas é de 10 [N] em cada nó e são aplicada em 12 nós. A curva da força aplicada é uma função Tone-Burst com cinco ciclos. Este tipo função consiste em uma curva harmônica modulada por uma envoltória que pode ser uma função de Gauss ou um cosseno deslocado [Groth, 2016]. A frequência entre os ciclos da função Tone-Burst é a frequência central. A Figura 4.1 também mostra a função Tone-Burst de 75 [kHz] (b), utilizada nas simulações, e a transformada de Fourier da desta função (c), para visualizar a banda de frequências excitadas.

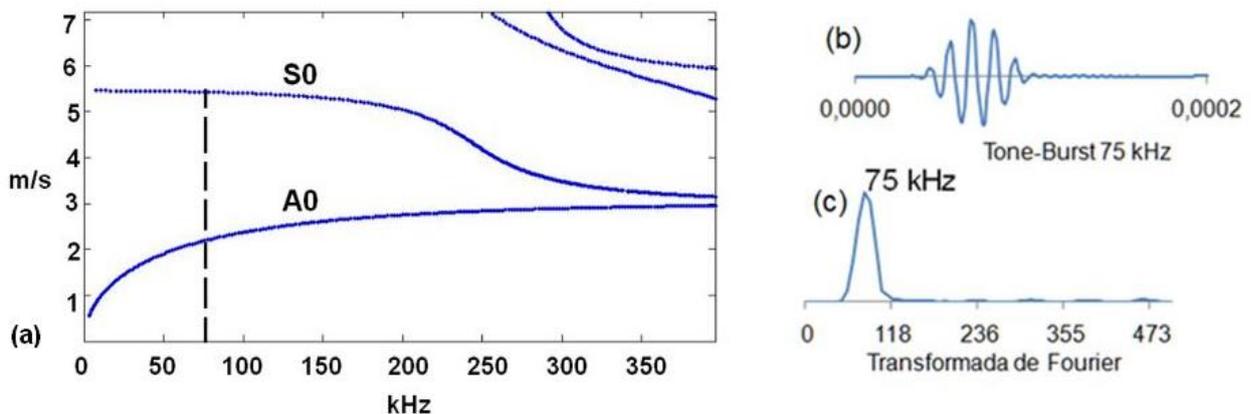


Figura 4.1 – (a) Curva de dispersão para uma chapa de aço de 10 [mm] de espessura; (b) Função Tone-Burst com frequência central de 75 [kHz]; (c) Transformada de Fourier da função Tone-Burst de 75 [kHz].

O método de aplicação da força no modelo de elementos finitos é apresentado na Figura 4.2 (b).

O sinal da aceleração  $\ddot{u}(t)$  é utilizado para analisar o comportamento da onda na placa. O sinal é adquirido em pontos específicos do modelo, que fazem o papel de sensores, capazes de registrar aceleração na direção perpendicular à placa.

A placa não possui nenhuma restrição de deslocamento como condição de contorno.

## 4.3. Modelo 1 – Chapa sem enrijecedor

A geometria da placa é dividida em elementos cúbicos, conforme pode ser visto na Figura 4.2 (b), onde cada elemento possui oito nós, com 6 graus de liberdade cada um. A aresta do elemento é 2 [mm] de comprimento. Este tamanho de elemento é definido de forma que a onda que se desloca na placa seja dividida em, no mínimo 10 elementos. Na frequência de 75 [kHz], o modo com menor comprimento de onda é o  $A_0$ , que possui  $\lambda$  igual a 0,0333 [m]

conforme calculado a partir da equação (4.1). Portanto, esta onda é dividida em aproximadamente 16 elementos da malha. Para se ter uma boa representação das ondas recomenda-se ter, no mínimo, 6 elementos por comprimento de onda, de acordo com Marburg e Nolte (2008).

$$\lambda = \frac{2500 \text{ m/s}}{75000 \text{ Hz}} = 0,0333 \text{ m} \quad (4.1)$$

Para modelar o defeito, são removidos alguns elementos da malha, conforme pode ser visto na Figura 4.2 (c).

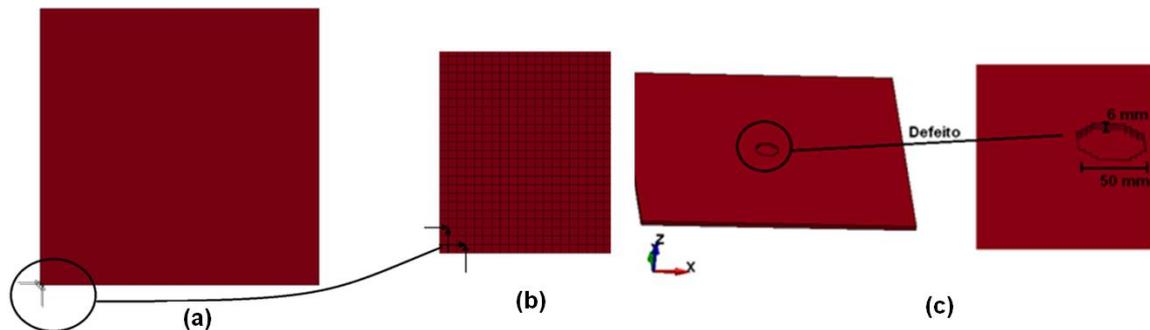


Figura 4.2 – (a) Geometria da chapa; (b) Detalhe da aplicação da força e da malha gerada para a placa; (c) Modelo da placa com defeito.

#### 4.4. Modelo 2 – Chapa com enrijecedor.

O enrijecedor é adicionado na parte inferior da chapa, a 50 [mm] do defeito. No modelo de elementos finitos, a união entre o enrijecedor e a chapa é feita pelo compartilhamento de nós. É feita uma edição na malha, de forma que os nós da base do enrijecedor se unam com os nós da superfície da chapa, na região da superfície de contato entre os dois.

A Figura 4.3 mostra uma vista identificando o enrijecedor e o defeito (a); a seção transversal do enrijecedor discretizado (b); e uma visualização das arestas da geometria em (c), para facilitar a identificação de todos componentes do modelo.

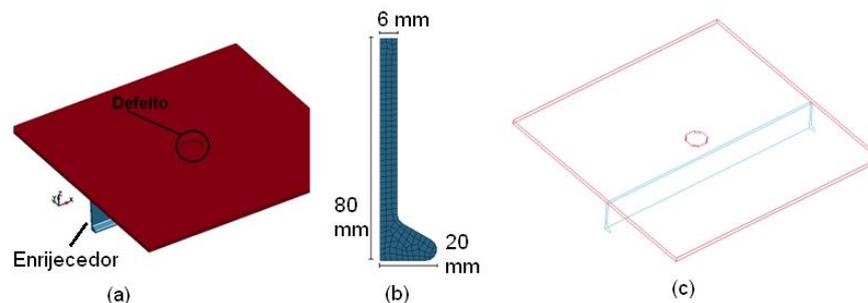


Figura 4.3 – Modelo da placa com defeito um enrijecedor típico de seção bulbo.

## 5. Resultados e discussões

Os resultados e as análises dos modelos descritos em 4.3 e 4.4 são apresentados a seguir.

### 5.1. Modelo 1 – Chapa sem enrijecedor

A Figura 5.1 mostra a aceleração vertical na placa, em dois instantes, após a aplicação da força para gerar a onda simétrica fundamental. É possível perceber a simetria dos deslocamentos das partículas na direção perpendicular à placa, o que caracteriza o modo  $S_0$ . A aceleração diminui à medida que a onda se propaga na placa, isto ocorre devido à atenuação. Também é possível observar que ocorrem deslocamentos próximos às extremidades livres da placa, o que indica a presença de ondas superficiais de Rayleigh. A aquisição dos sinais da onda é realizada em regiões não muito próximas das extremidades, para evitar o sinal das ondas de Rayleigh.

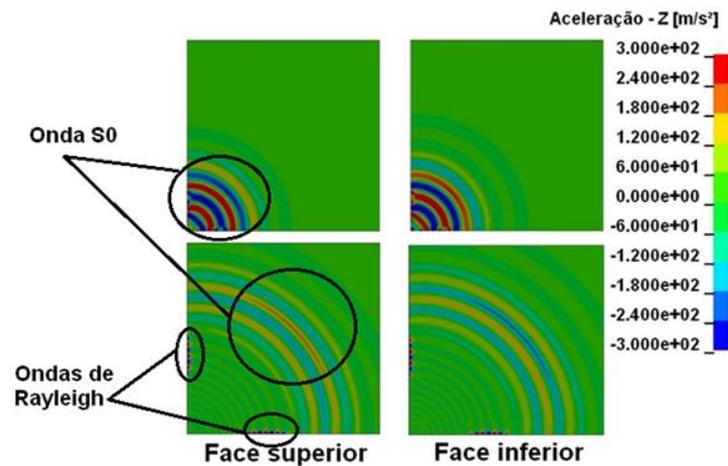


Figura 5.1 – Aceleração nodal na direção perpendicular à placa, em dois instantes.

Para analisar o modo da onda espalhada pelo defeito, observa-se o sinal da aceleração perpendicular à placa (eixo Z) em dois pontos, localizados na mesma região da placa (coordenadas [0.2; 0.2]), um na face superior, onde é modelado o defeito, e outro na face inferior. A partir do sinal da aceleração, na Figura 5.2, é possível identificar que a onda espalhada pelo defeito possui comportamento antissimétrico, o que caracteriza a onda  $A_0$ . Ao subtrair a diferença de tempo entre as duas cristas da onda indicadas na Figura 5.2, percebe-se que o período da onda refletida pelo defeito é igual a 0,013 [ms], que equivale a uma frequência de 76,92 [kHz]. De acordo com a curva de dispersão da placa, na Figura 4.1, a velocidade da onda  $A_0$  para esta frequência é de 2500 [m/s]. E a velocidade da onda  $S_0$  inicialmente excitada é de 5400 [m/s].

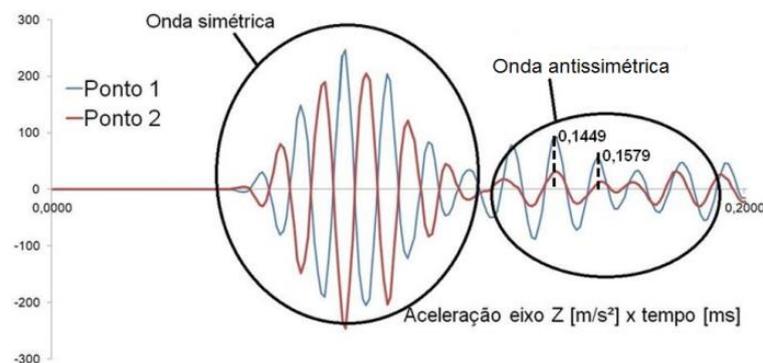


Figura 5.2 – Sinal da aceleração no ponto 1 e no ponto 2.

A Figura 5.3 apresenta, esquematicamente, o modo  $S_0$  incidente no defeito e a onda  $A_0$  resultante da interação entre a onda e o defeito.

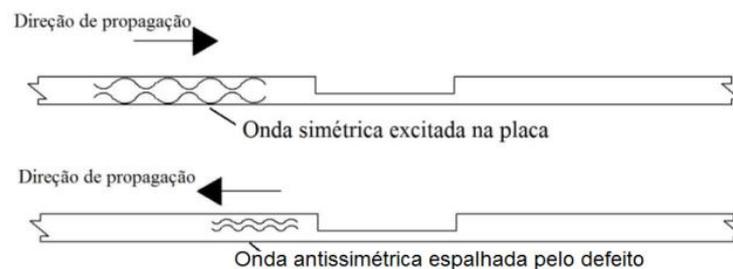


Figura 5.3 – Onda incidente e onda gerada pelo defeito.

A Figura 5.4 mostra a aceleração vertical, após a onda incidente  $S_0$  interagir com o defeito, na face superior e na face inferior da placa. É possível observar que o defeito se comporta como uma fonte emissora de onda na placa.

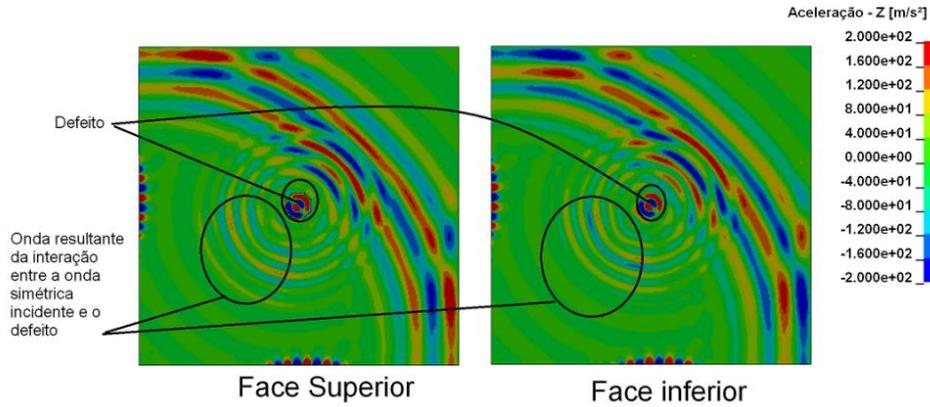


Figura 5.4 – Aceleração nodal na direção perpendicular à placa.

## 5.2. Modelo 2 – Chapa com enrijecedor

Neste modelo se obtém o sinal base da onda na geometria sem o defeito e também o sinal da onda na geometria com o defeito. Os sinais são adquiridos em 3 pontos (sensores), localizados na face superior da placa, mesmo lado onde é modelado o defeito, e indicados na Figura 5.5.

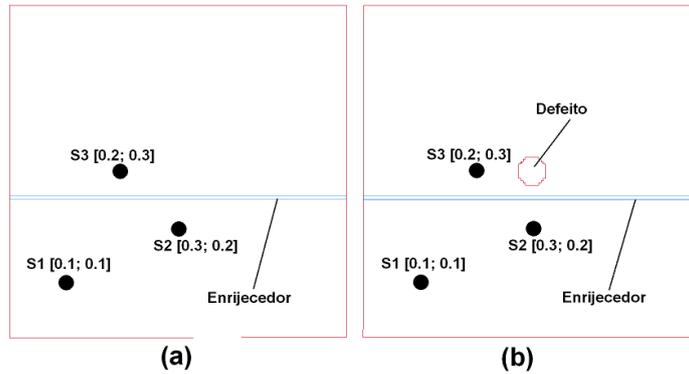


Figura 5.5 – Sensores utilizados para triangular o defeito no modelo 2. (a) placa sem defeito; (b) placa com defeito.

Com a utilização da técnica da subtração do sinal base, obtém-se o sinal da onda espalhada pelo defeito. A Figura 5.6 apresenta o sinal da aceleração, captado pelos sensores, do modelo 2.

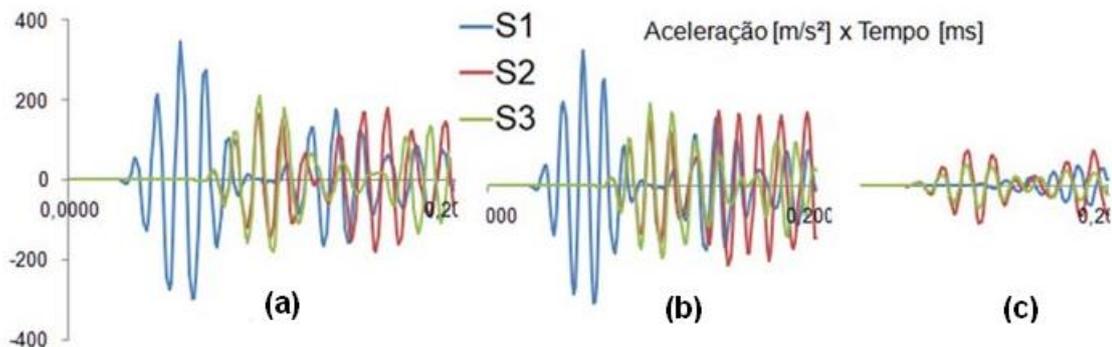


Figura 5.6 – Sinal da aceleração extraído do modelo 2. (a) Sinal base; (b) sinal da propagação da onda na chapa com o defeito; (c) sinal resultante da subtração do sinal base = sinal (b) – sinal (a).

Através do sinal base é possível obter os valores de  $t_{A,S}$ , indicados na Figura 5.7 (a). Utilizando o sinal resultante da subtração do sinal base, apresentado na Figura 5.7 (b), é possível obter os valores de  $t_{A,D,S}$ .

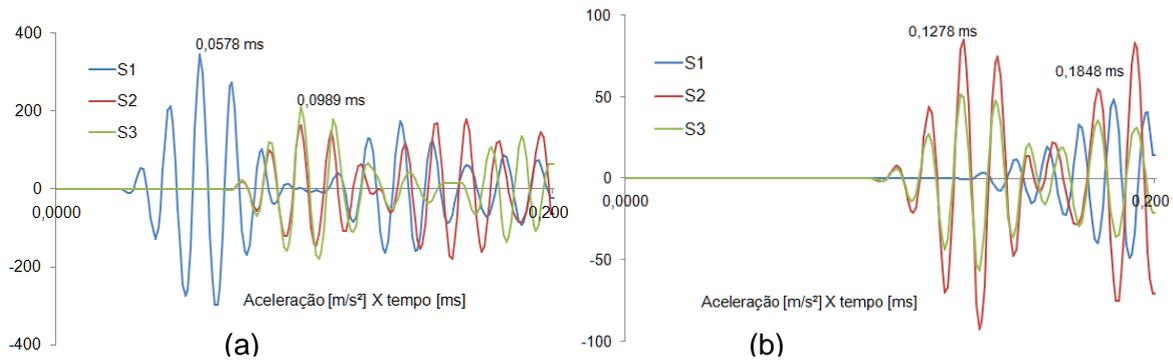


Figura 5.7 – (a) Sinal base da onda no modelo 2.(b)Sinal resultante da subtração do sinal base no modelo 2.

Para triangular o defeito, os valores de  $t_{A-S}$ ,  $t_{A-D-S}$ , as coordenadas dos sensores e do atuador  $[0; 0]$  e as velocidades  $V_1$  e  $V_2$  são substituídas na equação (3.19). Então, obtém-se 3 equações que possuem como incógnitas as coordenadas do defeito  $(x_D; y_D)$ . Para cada sensor, é gerada uma elipse que representa a possibilidade da localização do defeito, que deve estar sobre a linha da elipse. Porém, é a intersecção entre as 3 elipses que indica a localização do defeito. A Figura 5.8 (a) mostra a triangulação do defeito, a partir das elipses geradas com o software *Winplot*, onde os eixos cartesianos,  $x$  e  $y$ , representam o domínio geométrico da chapa. As 3 elipses se cruzam nas coordenadas  $[0.25; 0.25]$ , indicando que o defeito está nesta região, muito próximo do local onde o defeito é modelado nas simulações pelo método de elementos finitos, ilustrado na Figura 5.8 (b).

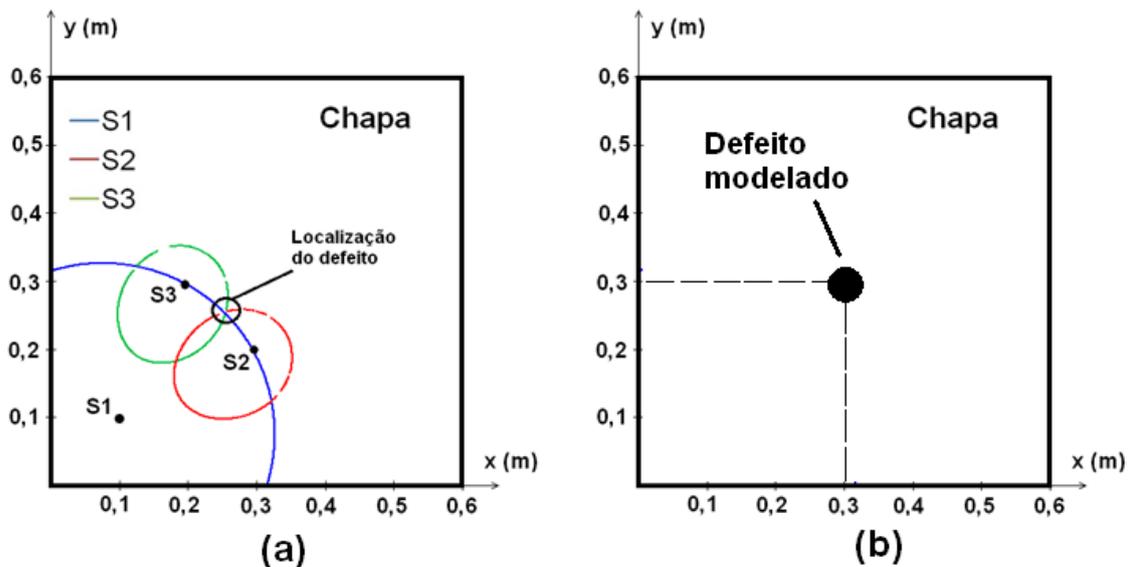


Figura 5.8 – (a) Triangulação do defeito através do tempo de viagem da onda; (b)localização do defeito no modelo de elementos finitos.

### 5.3. Ondas observadas nas simulações

Além onda  $S_0$ , excitada inicialmente na placa, e da onda  $A_0$ , gerada pelo defeito, surgem, também, outras ondas nos modelos. No modelo 1, sem o enrijecedor e sem o defeito, surgem também ondas de corte e ondas de Rayleigh, conforme mostra a Figura 5.9. Esta imagem também mostra os pontos 1 e 2, onde é registrado o sinal da aceleração no plano da placa, nos eixos  $x$  e  $y$ .

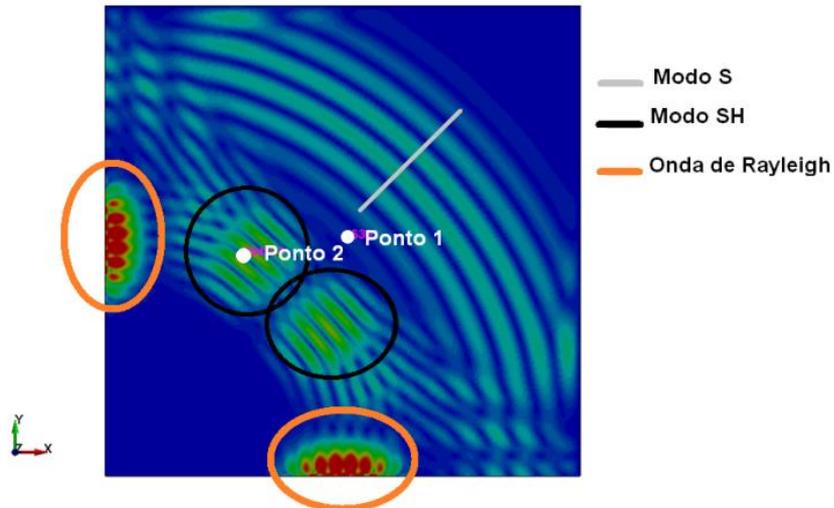


Figura 5.9 – (a) Ondas excitadas no modelo 1.

O sinal adquirido no ponto 1, mostra que a aceleração de x está em fase com a aceleração em y, pois as curvas estão sobrepostas, conforme pode ser visto na Figura 5.10 (a). Porém, o sinal registrado no ponto em 2, na Figura 5.10 (b), mostra que os deslocamentos em x, e em y, estão defasados, o que indica a presença, também, de ondas *SH*.

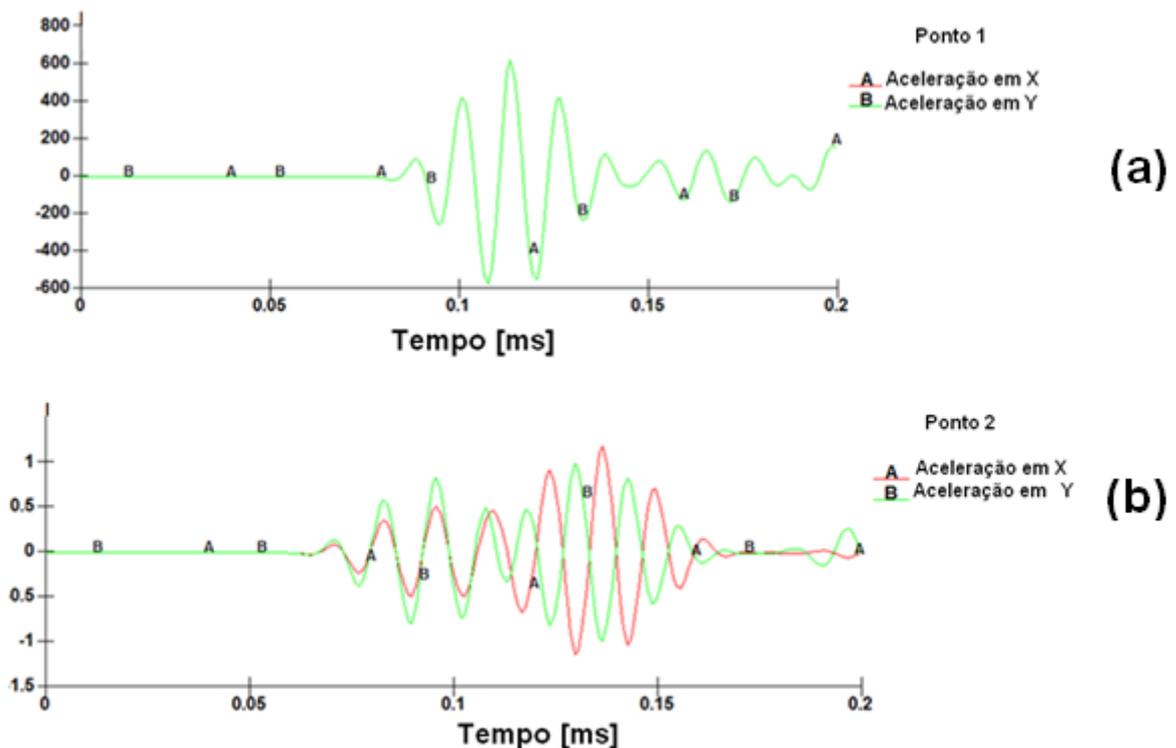


Figura 5.10 – (a) Deslocamento em x e em y, no ponto 1, sinal em fase. (b) Deslocamento em x e em y, no ponto 2, sinal fora de fase.

No modelo 2, sem o defeito, também surgem outras ondas guiadas, conforme apresentado na Figura 5.11. Nesta imagem, percebe-se que o enrijecedor reflete parte da onda incidente, resultando em uma frente de onda com pequena amplitude, destacada em (a). Por outro lado, conforme apresentado em (b), outra parte da onda se propaga pelo enrijecedor, que também funciona como um guia de onda, e absorve parte da energia de excitação inicialmente aplicada na placa.

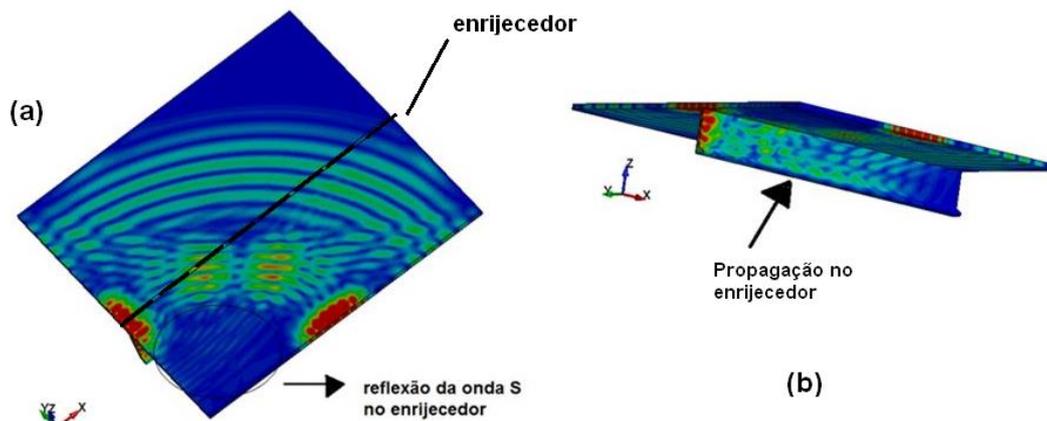


Figura 5.11 – Ondas excitadas no modelo 2.

## 6. Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo da utilização de ondas guiadas para localizar um defeito típico de corrosão em cascos de navios. O modo simétrico fundamental das ondas de Lamb foi escolhido para realizar a análise, e a frequência de 75 [kHz] foi utilizada.

Por meio de análises pelo método de elementos finitos, foi possível identificar o sinal da onda espalhada pelo defeito. Desta forma, foi possível localizar o defeito através do método de triangulação, utilizando o sinal da onda adquirido por 3 sensores, capazes de registrar a aceleração nodal na direção perpendicular à placa. Também se verificou, que além da onda simétrica excitada na placa, e da onda antissimétrica surgida devido ao defeito, outras ondas guiadas se propagam na placa: as ondas *SH* e as ondas de Rayleigh. Além disso, o enrijecedor também se comporta como um guia de onda.

Apesar de este método ter apresentado resultados satisfatórios com relação à triangulação do defeito, é de extrema importância a validação desta metodologia em testes e ensaios para verificar o impacto das características ambientais, de imperfeições geométricas, da complexidade da estrutura inspecionada, e de erros aleatórios, intrínsecos ao processo de aquisição de sinais.

Por fim, também é importante ressaltar que ainda podem ser realizados diversos estudos na área de ondas guiadas. É possível, por exemplo, em trabalhos futuros, utilizar o sinal da onda espalhada pelo defeito para caracterizar este tipo de falha, como identificar tamanho e profundidade do defeito.

### Referências Bibliográficas

- Auld, A. B. **"Acoustic Fields and Waves in Solids" - volume I**. John Wiley and Sons Inc, 1973.
- Bathe, K. J. **"Finite Element Procedures"**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Cicero, T. **"Signal Processing for Guided Wave Structural Health Monitoring"**. Tese de doutorado para obtenção do Título de Doutor em filosofia, London: Imperial College London, 2009.
- Eagle, D.M. **"Acoustic Emission Testing" - Volume XI of Nondestructive Testing Handbook, chapter Fundamentals of Acoustic Emission Testing, pages 143-183**. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005.
- Farias, B. V. **"Inferência Bayesiana de dados de inspeção de estrutura de casco de navio plataforma"**. Tese de mestrado para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, 2010.
- Filho, A. A. **"Elementos Finitos - A base da Tecnologia CAE"**. São Paulo: Erica Ltda, 2002.
- Gard. *Gard News*. 17 de julho de 2013. <http://www.gard.no/web/updates/content/20736182/vessel-corrosion-in-stratified-river-systems> (acesso em 22 de outubro de 2017).
- Groth, E. B. **"Propagação de ondas de tensão em hastes retangulares no intervalo de frequência de (0;100 [kHz])"**. Tese de mestrado para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, Porto Alegre: UFRGS, 2016.
- Mamédio, F. M. P. **"Impacto de erros nos dados de entrada na eficiência de um modelo hidrológico"**. Tese de mestrado, como requisito parcial, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, Porto Alegre: UFRGS, 2014.
- Marburg, S., Nolte, B. **"Computational Acoustic of Noise propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods"**. Springer, 2008.
- Menin, P. D. **"Desenvolvimento de transdutor de modo SH0 omnidirecional utilizando arranjo de cerâmicas piezoelétricas"**. Tese de mestrado para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Porto Alegre: UFRGS, 2017.
- Nepomuceno, L.X. **"Técnicas de Manutenção Preditiva" - Volume 1**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., 2002.
- Okumoto, Y., Y Takeda, M. Mano, e T. Okada. **"Design of Ship Hull Structures - A practical guide for engineers"**. Springer, 2009.
- Radke, E. D. **"Propagação de ondas guiadas em hastes retangulares: estudo de padrões de resposta na interação defeito-onda"**. Trabalho para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Porto Alegre: UFRGS, 2016.
- Rose, J. L. **"Ultrasonic Guided Waves in Solid Media"**. New York: Cambridge University Press, 2014.
- Su, Z., e L. Ye. **"Identification of Damage Using Lamb Waves - From fundamentals to Applications"**. Springer, 2009.