



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

PAULO JARBAS CAMURÇA

SIMULAÇÃO DO ENSAIO ULTRASSÔNICO PELA TÉCNICA TOFD
UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

FORTALEZA

2014

PAULO JARBAS CAMURÇA

SIMULAÇÃO DO ENSAIO ULTRASSÔNICO PELA TÉCNICA TOFD UTILIZANDO O
MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Marcondes

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C17s Camurça, Paulo Jarbas.
Simulação do ensaio ultrassônico pela técnica TOFD utilizando o método dos volumes finitos / Paulo Jarbas Camurça. – 2014.
97 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2014.
Orientação: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Marcondes.

1. Ultrassom. 2. Volumes Finitos. 3. MPI. I. Título.

CDD 620.11

PAULO JARBAS CAMURÇA

SIMULAÇÃO ULTRASSÔNICA DA TÉCNICA TOFD PELO MÉTODO DOS VOLUMES
FINITOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.

Aprovada em: 19/05/2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcondes (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Flávio Buiochi
Universidade de São Paulo (USP)

À Deus.
À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela coragem, força e perseverança em cada desafio que nos é apresentado.

A meus pais Raimunda Paula Camurça e Roberto Madeiro Camurça por sempre me apoiarem em cada passo da minha vida.

Às minhas irmãs Ana Paula, Juliana Paula e Lady Anne Paula pela união, amizade e motivação na realização de nossos objetivos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Elineudo Pinho de Moura pela oportunidade de realização deste trabalho e pela paciência.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Francisco Marcondes pela grande ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, Janaína Sobreira, Celso Pires, Luis Paulo, Dimitry Barbosa, Joveniano Júnior, e a todos os outros pelo companheirismo e amizade.

Aos integrantes do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Computacional - LDFC/UFC, Paulo Vicente, Edilson Drumond, e em especial Bruno Ramon e Ivens Costa, pela grande ajuda na implementação paralela do programa.

A Engineering Simulation and Scientific Software-ESSS pelo fornecimento da licença de uso do software KRAKEN.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

"Os pequenos detalhes são sempre os mais importantes."

Sherlock Holmes

RESUMO

Técnicas não destrutivas ultrassônicas são amplamente utilizadas no setor industrial com a finalidade de detectar e dimensionar descontinuidades presentes em peças, equipamentos e estruturas. Métodos numéricos podem ser aplicados na solução de problemas reais de ciência e engenharia, a um menor custo e menor tempo. Nessa perspectiva, o presente trabalho tem a finalidade de aplicar modelagem numérica para simular a técnica não destrutiva ultrassônica de tempo de percurso da onda difratada conhecida por TOFD (do inglês *time-of-flight diffraction*). Para isso, a equação bidimensional da onda foi discretizada pelo método dos volumes finitos sendo elaborados dois algoritmos para simular a propagação da onda: um sequencial e outro em paralelo utilizando a biblioteca MPI (do inglês *Message-Passing Interface*). Na modelagem do meio de propagação foram inseridas descontinuidades, tais como: falta de penetração, poro e trinca, a fim de investigar a interação da onda com a descontinuidade. Uma comparação com sinais capturados experimentalmente indica que os sinais A-scan foram satisfatoriamente simulados para as descontinuidades estudadas. Curvas de *speedup* e eficiência para a versão paralela do programa também foram produzidas.

Palavras-chave: Ultrassom. Volumes Finitos. MPI.

ABSTRACT

Nondestructive testing is widely used in industry to detect and size up discontinuities embedded in parts, equipments and structures. Numerical methods can be used to solve several engineering problems at lower costs and shorter times. In this perspective, this work aims to apply numerical modeling to simulate ultrasonic testing using the time of flight diffraction technique known as TOFD. For this, the two-dimensional wave equation was discretized by the finite volume method. Two algorithms (sequential and parallelized using of MPI library – Message Passing Interface) were developed to simulate the wave propagation. Three kinds of discontinuities (lack of penetration, porosity and crack) were embedded into the model material in order to investigate the interaction of the wave with discontinuities. Typical A-scan signals were obtained successfully to all studied conditions. Performance curves for the parallel version of the program were also obtained.

Keywords: Ultrasound. Finite Volume. MPI.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MPI – Message Passing Interface

MDF – Método de Diferenças Finitas

MEF – Método dos Elementos Finitos

MVF – Método dos Volumes Finitos

TOFD - Time of Flight Diffraction

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Apresentação e justificativa	12
1.2	Objetivos	14
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	14
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Propagação de ondas elásticas	15
2.2	Os ensaios não destrutivos por ultrassom	15
2.3	A técnica TOFD	16
2.4	Tipos de descontinuidades em soldas	20
2.4.1	<i>Poros</i>	21
2.4.2	<i>Falta de penetração</i>	21
2.4.3	<i>Falta de fusão</i>	22
2.4.4	<i>Trinca</i>	23
2.5	Equação da quantidade de movimento	24
2.6	Condições de contorno	32
2.7	Métodos numéricos aplicados à propagação de ondas	35
2.8	Obtenção das equações discretizadas pelo MVF	36
2.9	Computação de alto desempenho	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Definição de parâmetros do modelo	43
3.2	Modelagem dos tipos de descontinuidades	44
3.3	Construção do algoritmo	46
3.4	Sinais capturados experimentalmente	49
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
4.1	Introdução	50
4.2	Propagação da onda	50
4.3	Sinais de descontinuidades do tipo 1 (Falta de Penetração)	56
4.4	Sinais de descontinuidades do tipo 2 (Poros)	68
4.5	Sinais de descontinuidades do tipo 3 (Trinca)	78
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e justificativa

Ensaaios não destrutivos são amplamente utilizados no setor industrial com a finalidade de detectar e dimensionar descontinuidades presentes em componentes mecânicos, equipamentos e estruturas, e dessa forma garantir sua qualidade e integridade. Existem vários tipos de ensaios não destrutivos, tais como: líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografia, ultrassom. Cada um dos ensaios possui vantagens e limitações, dependendo do material a ser inspecionado, tipo de descontinuidade, meio em que se encontra o material, etc. (ASM, 1994), (ASNT, 1991, 1996).

Baixo custo e rapidez na execução são as principais vantagens dos ensaios por líquidos penetrantes e partículas magnéticas. Entretanto, eles estão limitados a detectar descontinuidades abertas à superfície e próximas à superfície, respectivamente.

Embora seja amplamente utilizado na detecção e dimensionamento de descontinuidades internas, o ensaio radiográfico requer planos especiais de segurança e dimensiona apenas o comprimento das descontinuidades, o que é insuficiente para a aplicação de uma análise de significância de defeito.

O ensaio por ultrassom apresenta a vantagem de ser rápido e, ao contrário do ensaio radiográfico, não oferecer perigo ao operador. Ele pode ser utilizado tanto na caracterização de materiais quanto na medição de espessura, detecção e dimensionamento completo das descontinuidades. Por esses motivos, procura-se sempre que possível substituir o ensaio radiográfico pelo ensaio por ultrassom.

O ensaio por ultrassom baseia-se na geração, propagação e recepção de ondas mecânicas de alta frequência após sua interação com o meio de propagação. As interações entre a onda mecânica e o meio (reflexão, transmissão, espalhamento, refração, difração) dependem basicamente do comprimento de onda e das variações da impedância acústica do meio. Em última análise, o ensaio ultrassônico é sensível a variações na impedância acústica do meio por onde a onda se propaga. Impedância acústica do meio é determinada pelo produto da velocidade de propagação da onda pela densidade do meio. As ondas refletidas e espalhadas resultantes dessa interação podem ser registradas com a utilização de sensores adequados.

Muitas técnicas ultrassônicas utilizam as posições dos ecos de um sinal, ou seja, o tempo de percurso da onda, para localizar e dimensionar descontinuidades. A técnica de tempo de percurso da onda difratada na ponta da trinca, conhecida como TOFD (do inglês *time of flight diffraction*), é uma das técnicas mais utilizadas (SILK; LIDINGTON 1974).

Essa técnica adéqua-se ao processo de automação da inspeção, aliando rapidez e precisão e possibilitando o registro permanente da inspeção. Diversos trabalhos mostram que a inspeção automatizada de juntas soldadas utilizando a técnica TOFD é eficiente na detecção e dimensionamento das descontinuidades, e que combinada a ferramentas de processamento de sinais e reconhecimento de padrões garante altas taxas de acerto na classificação do tipo de defeitos de soldagem (MOURA, 2004; VIEIRA, 2008).

Entretanto, diferenças tanto na espessura quanto no material empregado na confecção das peças a serem inspecionadas no campo e dos corpos de prova inspecionados para obtenção dos padrões de defeitos de soldagem impossibilita a utilização de tais padrões durante o treinamento de um algoritmo de reconhecimentos de padrões, e exige a criação de um novo conjunto de sinais para treinamento. Construir um conjunto de padrões de sinais de defeitos suficientemente grande para contemplar diferentes espessuras e materiais empregados na indústria envolve tempo e custos elevados. A solução para a geração desse conjunto de treinamento geral pode estar no emprego da simulação numérica do ensaio ultrassônico.

Além disso, a simulação do ensaio ultrassônico pela técnica TOFD representa uma ferramenta essencial para o melhor entendimento da interação da onda com descontinuidades presentes em meios bidimensionais. Nessa perspectiva, o método dos volumes finitos pode ser utilizado para simular a propagação de ondas ultrassônicas em um meio bidimensional modelado. Dessa forma, poder-se-ia simular a realização de um ensaio não destrutivo por ultrassom, tendo total controle das características geométricas e das propriedades físicas do meio, tais como: módulos elásticos, densidade, velocidade de propagação da onda e a presença de descontinuidades no material, a fim de comparar os sinais produzidos pela simulação com sinais capturados durante uma inspeção real por ultrassom.

A proposta aqui apresentada é verificar a viabilidade do emprego da simulação numérica do ensaio ultrassônico empregando a técnica TOFD pelo método dos volumes finitos para produzir sinais A-scan. Propõe-se inicialmente a modelagem de três classes de defeitos: trinca, falta de penetração e poro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho de dissertação consiste na simulação computacional do ensaio ultrassônico realizado pela técnica TOFD, utilizando o método dos volumes finitos para a solução numérica das equações diferenciais que representam o modelo matemático da propagação de uma onda em meios sólidos bidimensionais.

1.2.2 Objetivos específicos

- (1) Modelar meios bidimensionais que levem em consideração as características mais importantes ao ensaio por ultrassom, tais como: densidade do material, velocidade de propagação da onda no meio e presença de descontinuidades macroscópicas (defeitos) no material.
- (2) Resolver numericamente a equação da onda em meios elásticos bidimensionais e paralelizar o algoritmo sequencial utilizando a biblioteca MPI (*Message-Passing Interface*).
- (3) Comparar os sinais ultrassônicos produzidos pela simulação com os sinais capturados experimentalmente por outros autores de modo a validar o algoritmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propagação de ondas elásticas

As ondas elásticas também chamadas de ondas mecânicas são perturbações que se propagam em meios materiais, transportando energia através da oscilação das partículas do meio em relação a sua posição de equilíbrio. Em função da capacidade auditiva do homem as ondas mecânicas podem ser classificadas de acordo com a frequência de vibração: infrassom cujas frequências são inferiores a 20 Hz, som audível que varia de 20 Hz a 20 kHz e o ultrassom para frequências acima de 20 kHz.

As ondas podem ainda ser classificadas em relação ao modo de vibração, como: ondas longitudinais ou ondas p , quando as partículas do meio oscilam na direção da propagação da onda; ondas transversais s , ou cisalhantes quando se tem a vibração das partículas do meio na direção perpendicular à direção de propagação da onda; e ondas superficiais como: Rayleigh, Love, etc. Uma abordagem mais aprofundada sobre a propagação de ondas pode ser encontrada em (GRAFF, 1991), (DAVIS, 2000) e (ROSE, 2004).

2.2 Os ensaios não destrutivos por ultrassom

De acordo com Shull e Tittmann (2001), a propagação de ondas ultrassônicas em sólidos é o fenômeno por trás dos ensaios não destrutivos de ultrassom. Através das características de uma onda ultrassônica como velocidade, atenuação, etc., pode-se identificar os aspectos relevantes de um material, tais como suas propriedades elásticas e espessura.

Os autores acima citados afirmam ainda que a técnica do ensaio ultrassônico iniciou-se por volta de 1930, onde foram apresentados os primeiros trabalhos utilizando o ultrassom para testar materiais, assim como o desenvolvimento de aplicações e métodos de testes ultrassônicos para a detecção de falhas.

O ensaio por ultrassom consiste na utilização de um transdutor, que é um dispositivo composto por um material piezoeletrico que transforma um pulso elétrico em uma oscilação mecânica que caracteriza o sinal ultrassônico.

O pulso emitido pelo transdutor propaga-se no material a ser inspecionado refletindo nas interfaces ou descontinuidades presentes no material. Após sucessivas reflexões a onda retorna ao transdutor e é transformada em pulso elétrico novamente, podendo ser visualizado em um osciloscópio.

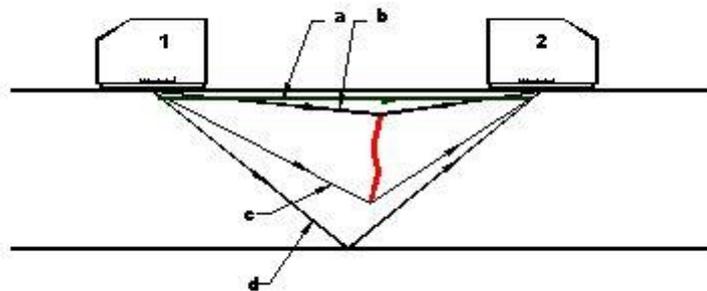
A inspeção por ultrassom possui alta sensibilidade em detectar pequenas descontinuidades internas como trincas, poros e falta de fusão, além de permitir o dimensionamento e interpretação das descontinuidades, não requerendo plano de segurança para realizar a inspeção. Segundo Santin (1996) dentre os métodos e técnicas de inspeção por ultrassom mais utilizados pode-se citar: método do pulso-eco, método da transparência, ressonância, técnica de inspeção por contato e imersão e a técnica do tempo de percurso da onda difratada - TOFD. Como limitação esses ensaios não são adequados para materiais de espessura muito pequena da ordem de milímetros.

2.3 A técnica TOFD

O desenvolvimento da técnica de tempo de percurso da onda difratada TOFD significou um grande progresso ao ensaio ultrassônico, e vem sendo cada vez mais utilizada por apresentar grandes velocidades de inspeção, confiabilidade no dimensionamento e baixa taxa de falsas indicações (RAAD; DIJKSTRA, 1997, 1998), (VERKOOIJEN, 1995). Ainda segundo os autores acima citados, por incidir no interior do material, um feixe de ultrassom inclinado em relação à superfície de inspeção, supera também as dificuldades encontradas pela radiografia na detecção e dimensionamento de defeitos perpendiculares à superfície da peça. O posicionamento automático dos transdutores aliado à digitalização do sinal possibilita a automação das inspeções e a obtenção de registros permanentes das inspeções, outras grandes vantagens da técnica TOFD.

A técnica TOFD utiliza a posição do sinal fornecido pelas extremidades de uma descontinuidade, ou do atraso ocorrido no sinal devido à sua existência, para dimensioná-la. Por utilizarem o tempo de percurso como único parâmetro de dimensionamento, essas técnicas são pouco sensíveis às variações da amplitude do sinal. A configuração convencional para a técnica TOFD utiliza dois transdutores, um emissor e um receptor, alinhados na superfície do material, um de cada lado do cordão de solda, de modo a cobrir a região de interesse de acordo mostrado na figura 1, (BS, 1993).

Figura 1: Arranjo típico para inspeção pela técnica TOFD: (1) emissor, (2) receptor, (a) onda lateral, onda difratada pela ponta superior (b) e inferior (c) do defeito e (d) eco de fundo.

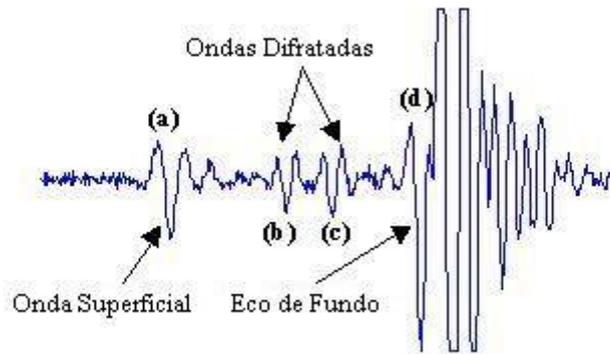


Fonte: BS (1993).

Quando se utiliza a técnica TOFD, o primeiro pulso a alcançar o receptor corresponde à onda lateral, que se propaga abaixo da superfície superior da peça em ensaio. Na ausência de descontinuidades o segundo pulso será o eco de fundo. Quaisquer sinais gerados pelas descontinuidades chegarão entre a onda lateral e o eco de fundo, uma vez que estas duas correspondem, respectivamente, aos percursos mais curto e mais longo entre o emissor e o receptor. Pela mesma razão, o sinal difratado na extremidade superior de uma descontinuidade chegará antes do sinal gerado na extremidade inferior. Segundo a norma BS 7706, a altura da descontinuidade pode ser calculada a partir da diferença do tempo de percurso dos dois sinais difratados. As ondas laterais e de eco de fundo são, normalmente, utilizados como referência para medir o tempo das outras ondas.

As informações coletadas durante um ensaio por ultrassom podem ser apresentadas de diferentes modos, a depender da técnica empregada. O sinal de variação de pressão sônica no tempo é a forma mais simples de apresentação de resultados pelos equipamentos de ultrassom e é comumente chamado de A-scan, como mostrado na figura 2 juntamente com a indicação das ondas que compõem o sinal.

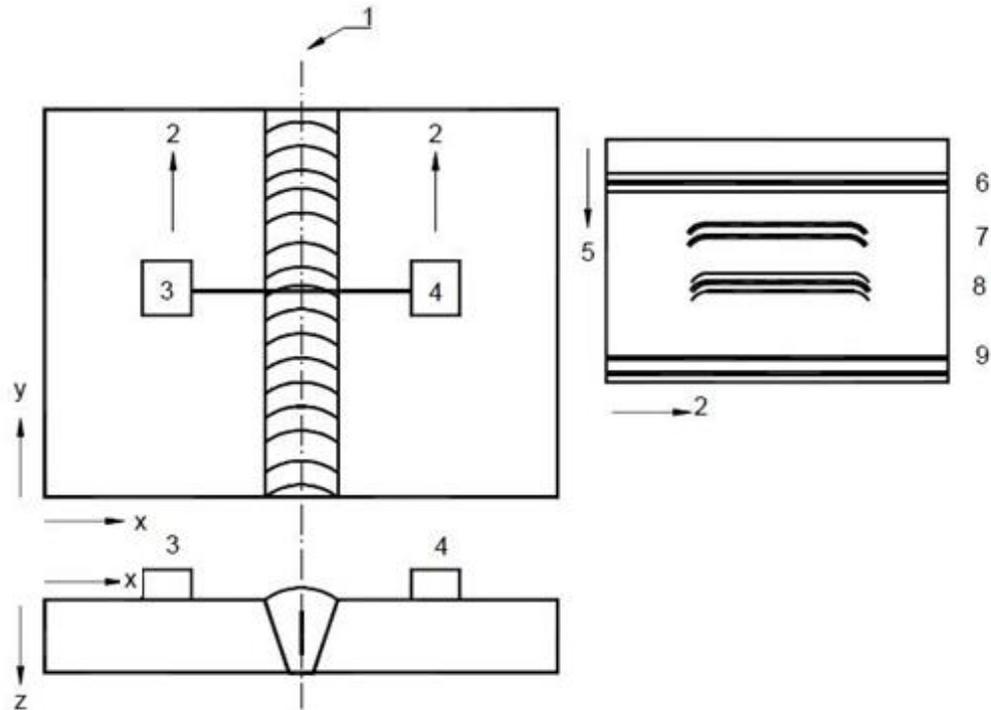
Figura 2: Típico sinal A-scan (amplitude *versus* tempo) obtido durante inspeção ultrassônica pela técnica TOFD.



Fonte: Moura (2003).

Durante uma inspeção diversos sinais A-scan são capturados sucessivamente enquanto os transdutores são movidos na direção perpendicular em relação ao feixe ultrassônico (ao longo do cordão da solda) como mostrado na figura 3. Após a captura, os valores de amplitude dos sinais são convertidos para tons de cinza atribuindo-se a cor preta para amplitudes iguais a zero e a cor branca para 255. Os tons de cinza variam proporcionalmente entre esses valores. Em seguida, esses valores são utilizados na construção de uma imagem denominada D-scan que permite a visualização de uma seção longitudinal da região inspecionada e possibilita detectar facilmente discontinuidades presentes.

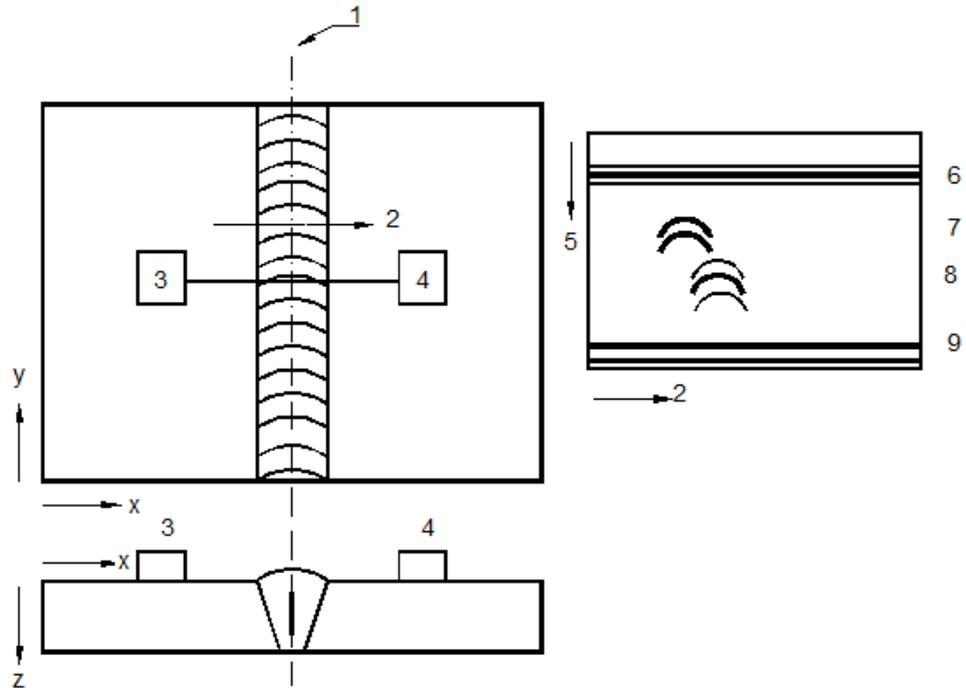
Figura 3: Inspeção por TOFD, com a direção de deslocamento típica (à esquerda) e o D-scan correspondente à direita. (1) linha de referência, (2) direção do deslocamento dos transdutores (direção y), (3) emissor, (4) receptor, (5) tempo de percurso (na direção da espessura), (6) onda lateral, (7) extremidade superior da descontinuidade, (8) extremidade inferior da descontinuidade, (9) reflexão de fundo.



Fonte: Adaptado de ENV (2000).

Dependendo da técnica empregada durante a inspeção, é possível que os resultados sejam mais convenientemente apresentados utilizando outros modos. O modo B-scan mostra uma seção transversal da região inspecionada, produzida pelo registro sucessivo de diversos A-scans obtidos durante o deslocamento paralelo dos transdutores em relação ao feixe ultrassônico, ou seja, a varredura é realizada na direção transversal ao cordão de solda conforme a figura 4. O modo C-scan mostra uma vista plana superior da região inspecionada. Na construção da imagem C-scan cada ponto recebe uma cor de acordo com a posição do eco em relação a um ponto de referência. É possível ainda obter uma imagem tridimensional da região inspecionada.

Figura 4: Inspeção por TOFD, com a direção de deslocamento típica (à esquerda) e o B-scan correspondente à direita. (1) linha de referência, (2) direção do deslocamento dos transdutores (direção x), (3) emissor, (4) receptor, (5) tempo de percurso (na direção da espessura), (6) onda lateral, (7) extremidade superior da descontinuidade, (8) extremidade inferior da descontinuidade, (9) reflexão de fundo.



Fonte: Adaptado de ENV (2000).

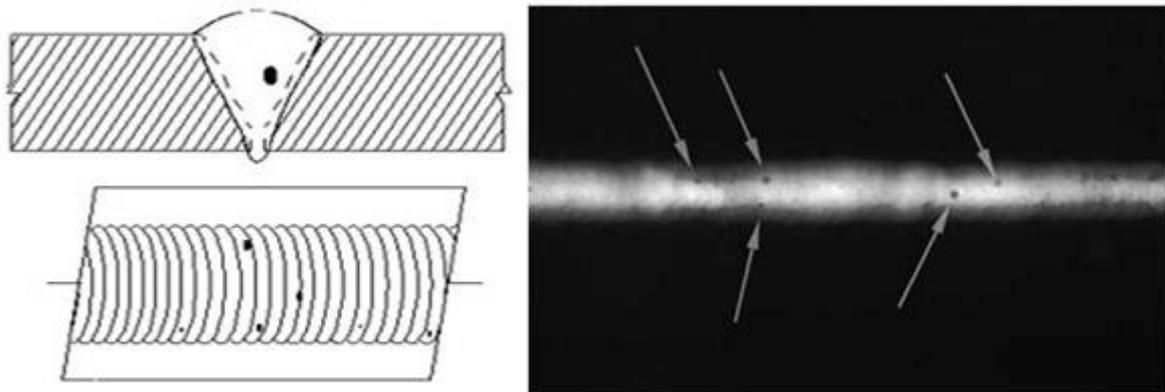
2.4 Tipos de descontinuidades em soldas

É grande a variedade de descontinuidades que pode ser encontrada numa junta soldada. Descontinuidades reais variam em tamanho, forma, localização e severidade. Segundo ASM (1993), defeitos típicos encontrados em juntas soldadas incluem poro, mordedura, sobreposição, falta de penetração, falta de fusão, rechupe ou vazio, trinca de cratera, perfuração, trinca a quente, inclusão de escória, inclusão de tungstênio e defeitos presente no material de base. A norma PETROBRAS N-1738 define quarenta e quatro tipos de descontinuidades em juntas soldadas. Aqui estão descritos e ilustrados apenas quatro casos de descontinuidades: falta de penetração, poro, falta de fusão e trinca.

2.4.1 Poro

São vazios que resultam do gás retido durante a solidificação do metal de solda. A porosidade é geralmente esférica, mas pode apresentar-se alongada devido à movimentação do gás enquanto o metal de solda ainda está no estado líquido. Em geral, a porosidade não é considerada uma descontinuidade crítica a menos que estejam presentes em grandes quantidades, apresente-se alongada ou estejam em um número significativo, alinhadas e relativamente próximas conforme mostrado na figura 5 (CHARLES *et al*, 2002).

Figura 5: Representação de uma descontinuidade do tipo poro.

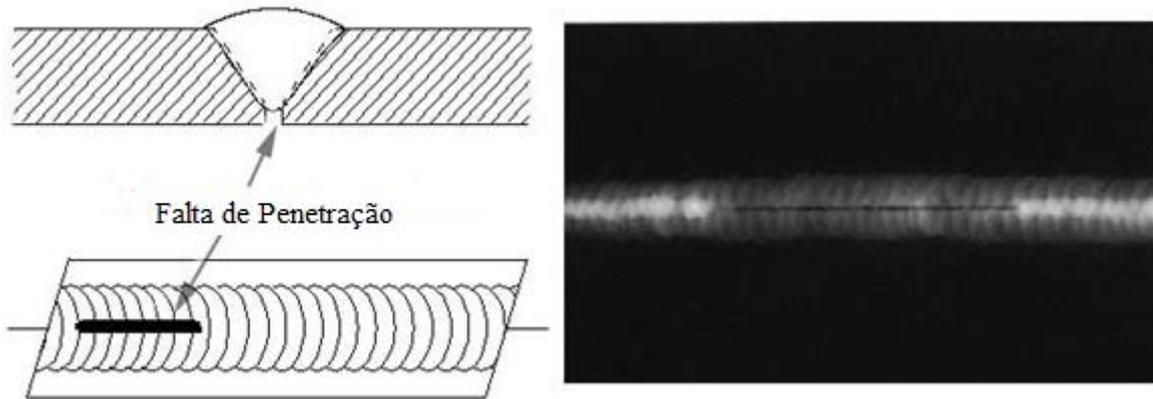


Fonte: Adaptado de <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>

2.4.2 Falta de penetração

Falta de penetração, penetração incompleta ou penetração inadequada é caracterizada pela insuficiência de metal na raiz da solda. Resulta da fusão inadequada do metal de base durante a deposição do passe de raiz. Esse tipo de descontinuidade é considerado mais grave que a porosidade por atuar como um concentrador de tensão. A falta de penetração é geralmente fácil de detectar e identificar radiograficamente devido à sua localização no centro do cordão de solda e sua imagem relativamente simples e bem definida como mostrado na figura 6 (CHARLES *et al*, 2002).

Figura 6: Representação de uma descontinuidade do tipo falta de penetração.

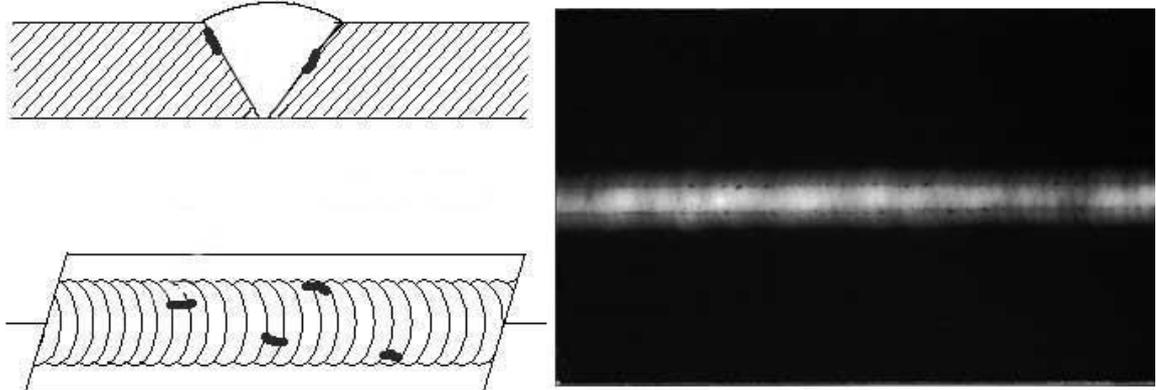


Fonte: Adaptado de <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/RadiographInterp.htm>

2.4.3 Falta de fusão

A falta de fusão, figura 7, é a fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base, ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada na zona de ligação, entre os passes e na raiz da solda, conforme a norma PETROBRAS N-1738. Esse tipo de descontinuidade é decorrente de um procedimento de soldagem inadequado ou má concepção da junta. A falta de fusão é, muitas vezes, estreita e, em alguns casos, inclinadas, de modo que esta descontinuidade nem sempre é facilmente detectada pela radiografia. Segundo Charles *et al.* (2002), a falta de fusão quando observada pode não estar bem definida, mas terá um alinhamento linear revelador, na mesma direção de soldagem.

Figura 7: Representação de uma descontinuidade do tipo falta de fusão.

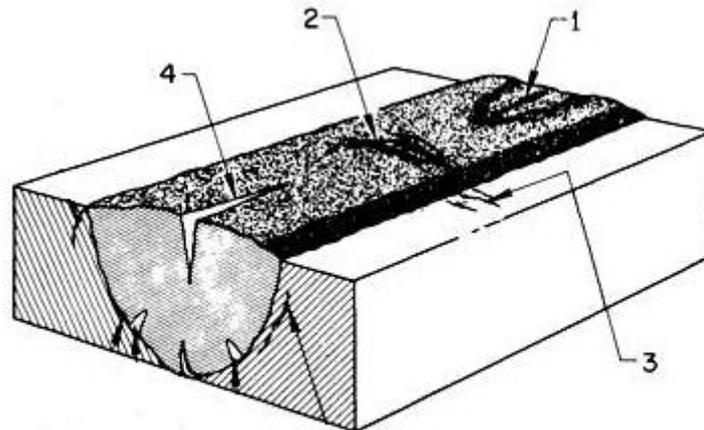


Fonte: Adaptado de <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>

2.4.4 Trinca

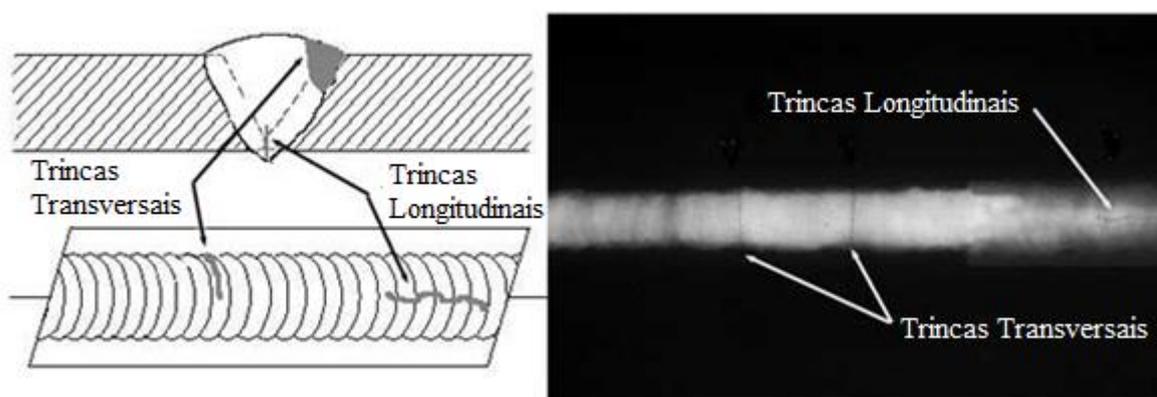
Trinca (ou rachadura, ou fissura) é uma descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material. Há uma grande variedade de trincas associadas a peças soldadas como mostrado nas figuras 8 e 9 (ASM, 1993). Neste trabalho, consideram-se apenas as trincas longitudinais.

Figura 8: Identificação das trincas de acordo com a localização na solda e metal de base: 1) trinca de cratera no metal de solda; 2) trinca transversal no metal de solda; 3) trinca transversal na zona termicamente afetada; 4) trinca longitudinal no metal de solda.



Fonte: Adaptado de ASM (1993).

Figura 9: Representação de uma descontinuidade do tipo trinca.



Fonte: Adaptado de <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>

2.5 Equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento para um meio elástico ou plástico é dada por:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = F_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, t é o tempo, u é o vetor campo de deslocamento; F é a densidade de força por unidade de volume e τ é o tensor de tensões.

Para um meio elástico pode-se empregar a lei de Hooke generalizada, a qual estabelece a relação de tensão (τ) e deformação (ε) através da expressão:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

onde C_{ijkl} e ε_{kl} denotam, respectivamente, o módulo elástico e o tensor deformação. Os índices i, j, k e l podem assumir os valores 1, 2 e 3 e denotam as coordenadas cartesianas x, y e z . O tensor deformação é dado por:

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

Aplicando relações de simetria para $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ e $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk}$, as equações (2) e (3) tomam a forma:

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \quad (4)$$

Substituindo a equação (4) na equação (1) obtém-se a equação da onda para meios elásticos heterogêneos e anisotrópicos:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \quad (5)$$

Desenvolvendo a equação (5) e utilizando a notação de Voigt, onde $ij=m$ e $kl=n$ como mostrado no quadro abaixo, os coeficientes C_{ijkl} assumem a forma C_{mn} .

Quadro 1: Conversão de índices.

$m = 1 \rightarrow i = 1 \ e \ j = 1$	$n = 1 \rightarrow k = 1 \ e \ l = 1$
$m = 2 \rightarrow i = 2 \ e \ j = 2$	$n = 2 \rightarrow k = 2 \ e \ l = 2$
$m = 3 \rightarrow i = 3 \ e \ j = 3$	$n = 3 \rightarrow k = 3 \ e \ l = 3$
$m = 4 \rightarrow i = 2 \ e \ j = 3$	$n = 4 \rightarrow k = 2 \ e \ l = 3$
$m = 5 \rightarrow i = 1 \ e \ j = 3$	$n = 5 \rightarrow k = 1 \ e \ l = 3$
$m = 6 \rightarrow i = 1 \ e \ j = 2$	$n = 6 \rightarrow k = 1 \ e \ l = 2$

Fonte: Rosa Filho (2002).

Utilizando as relações acima, pode-se obter as equações do movimento ao longo de x, y, e z.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = & F_1 + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{12} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{13} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{16} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{16} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{15} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{15} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{14} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{14} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{16} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{26} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{36} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{66} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{66} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{56} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{46} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{46} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{15} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{25} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{35} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{56} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{55} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{55} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{45} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{45} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = & F_2 + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{16} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{26} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{36} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{66} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{66} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{56} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{46} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{46} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{12} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{22} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{23} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{26} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{26} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{25} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{25} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{24} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{24} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{14} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{24} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{34} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{46} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{46} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{45} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{45} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{44} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = & F_3 + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{15} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{25} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{35} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{56} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{55} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{55} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{45} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(C_{45} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{14} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{24} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{34} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{46} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{46} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{45} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{45} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{44} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(C_{44} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{13} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{23} \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{33} \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{36} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{36} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{35} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{35} \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{34} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(C_{34} \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)
\end{aligned} \tag{8}$$

Dependendo da classificação do meio de propagação em homogêneo ou heterogêneo, isotrópico ou anisotrópico, essas equações podem ser consideravelmente simplificadas. Para meios elásticos isotrópicos em que o comportamento das propriedades físicas é o mesmo em qualquer direção, o tensor C_{ijkl} segundo Achenbach (1973, p. 53) pode ser expresso pela equação (9):

$$C_{ijkl} = \lambda(x)\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(x)[\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}] \quad (9)$$

onde λ , μ e δ são, respectivamente, o parâmetro de Lamé, o módulo de cisalhamento e o delta de Kronecker. Desenvolvendo-se a equação (9) obtêm-se as expressões abaixo, conforme obtido em Rosa Filho (2002).

$$C_{1111} = C_{2222} = C_{3333} = \lambda + 2\mu \quad (10)$$

$$C_{1122} = C_{1133} = C_{2211} = C_{2233} = C_{3311} = C_{3322} = \lambda \quad (11)$$

$$C_{1212} = C_{1221} = C_{1313} = C_{1331} = C_{2112} = C_{2121} = C_{2323} = C_{2332} = C_{3113} = C_{3131} = C_{3223} = C_{3232} = \mu \quad (12)$$

Utilizando a notação de Voigt para a redução dos índices nas equações (10), (11) e (12) obtém-se:

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu \quad (13)$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = \lambda \quad (14)$$

$$C_{66} = C_{55} = C_{44} = \mu \quad (15)$$

Para o cálculo dos módulos elásticos C_{mn} , Thomsen (1986) propôs relações que envolvem as velocidades das ondas p e s , e as medidas de anisotropia ε , δ^* e γ dadas por:

$$C_{33} = \rho v_p^2 \quad (16)$$

$$C_{44} = \rho v_s^2 \quad (17)$$

$$\varepsilon \equiv \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (18)$$

$$\gamma \equiv \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (19)$$

$$\delta^* \equiv \frac{2(C_{13} + C_{44})^2 + (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})}{2C_{33}^2} \quad (20)$$

Para meios isotrópicos, que era objeto de estudo do presente trabalho, os valores de ε , γ e δ^* são zero. Desta forma, obtêm-se os seguintes valores das constantes elásticas que serão utilizadas neste trabalho.

$$C_{11} = C_{33} = \lambda + 2\mu \quad (21)$$

$$C_{66} = C_{55} = C_{44} = \mu \quad (22)$$

$$C_{13} = C_{33} - 2C_{44} = \lambda \quad (23)$$

Simplificando as equações (6), (7) e (8) para o caso de meios elásticos heterogêneos anisotrópicos bidimensionais, obtém-se

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = F_{V,x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{11} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{13} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{44} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{44} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (24)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = F_{V,z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{44} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(C_{44} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{13} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(C_{33} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (25)$$

Onde $F_{V,x}$ e $F_{V,z}$ representam a fonte ultrassônica por unidade de volume nas direções x e z , respectivamente.

$$F_{V,x} = \frac{F_x}{V} = \frac{F \cos \theta}{V} \quad (26)$$

$$F_{V,z} = \frac{F_z}{V} = \frac{F \sin \theta}{V} \quad (27)$$

O termo F presente nas equações (26) e (27) é responsável pela propagação da onda ultrassônica no material, através da introdução de um pulso de excitação transiente inserido no topo da superfície do material pelo transdutor. Conforme Baskaran *et. al.* (2007), o pulso normalmente usado em simulação ultrassônica é expresso por uma função analítica e é dada pela equação (28),

$$F(t) = \begin{cases} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{N_c}\right) \right] \cdot \cos(2\pi ft), & \text{para } 0 \leq t \leq \frac{N_c}{f} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (28)$$

onde f é a frequência central de excitação, t é o tempo e N_c é o número de ciclos. Nesse trabalho utilizou-se uma frequência de 5,0 MHz e $N_c = 3$ ciclos. Integrando-se F durante o intervalo de excitação da fonte $0 \leq t \leq \frac{N_c}{f}$, obtém-se a função \mathcal{F} a qual é dada abaixo por:

$$\mathcal{F} = \int_0^t F(t)dt = \frac{\sin(\beta t)}{\beta} - \frac{\sin((\alpha + \beta)t)}{2(\alpha + \beta)} - \frac{\sin((\alpha - \beta)t)}{2(\alpha - \beta)} \quad (29)$$

onde $\beta = 2\pi f$ e $\alpha = \frac{2\pi f}{N_c}$. A integração da equação (28) no tempo é necessária porque as equações aproximadas serão obtidas através do método dos volumes finitos como será mostrado na seção 2.8.

A presença do reforço da solda no material, e sua condição superficial irregular, impedem a utilização de transdutores normais para inspeção da região do metal de solda em juntas soldadas. A solução prática é encontrada com o emprego de transdutores angulares que incidem o feixe ultrassônico obliquamente a partir do metal de base.

Numericamente, o direcionamento do feixe ultrassônico pode ser obtido pela aplicação do princípio de Huygens para a sobreposição de ondas, por meio de um atraso entre a excitação de vários pontos de vibração. Esse é o mesmo princípio de funcionamento dos equipamentos ultrassônicos utilizados pela técnica chamada *Phased Array*.

Segundo Baskaran *et. al.* (2007), o ângulo de incidência do feixe pode ser calculado em função da velocidade de propagação da onda no meio, v_p , do atraso de tempo entre a excitação dos elementos vizinhos, Δt_{delay} , e do espaçamento entre eles, d , como descrito pela equação (30):

$$\sin \theta = \frac{v_p \Delta t_{delay}}{d} \quad (30)$$

Temple (1983) afirma que melhores resoluções espaciais na direção da espessura podem, para um cálculo teórico, ser alcançadas quanto menor for o ângulo de incidência. No entanto, medidas experimentais apontam para os transdutores de 60 graus como aqueles que produzem os melhores resultados (TEMPLE, 1986).

Conhecida a velocidade de propagação da onda ultrassônica, v_p , no material a ser inspecionado, e definido o ângulo de incidência como sendo igual a 60 graus, a equação 30 reduz-se a uma relação entre o atraso na excitação dos diferentes pontos vibrantes no transdutor, Δt_{delay} , e a distância, d , entre eles.

Um trabalho de modelagem de transdutores chamados *phased arrays*, que são constituídos por N elementos de tamanho a , separados por uma distância d , foi realizada Wooh e Shi (1999) com o objetivo de estudar o direcionamento de feixes produzidos por esse tipo de transdutor. Cada elemento possui M fontes de pressão na superfície do material como mostrado na figura 10. O tamanho do transdutor D é dado por:

$$D = d(N-1)a \quad (31)$$

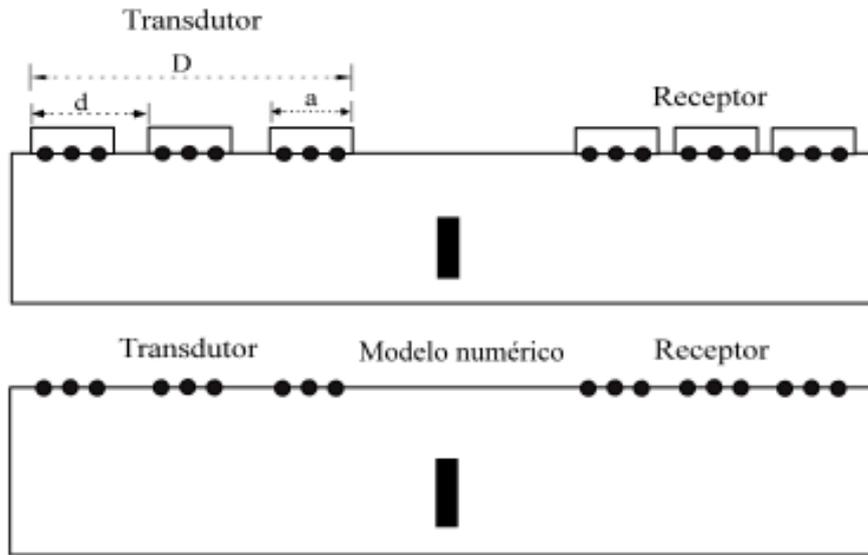
Figura 10: Modelagem da fonte ultrassônica no material.

Figura do próprio autor.

A equação (29) é aplicada a todos os M pontos, de cada um dos N cristais do transdutor, com um atraso temporal de Δt_{delay} entre cada cristal adjacente. Assim, no instante $t = 0$ todos os M pontos do primeiro cristal começam a vibrar e permanecem assim por um tempo igual a $(\frac{N_c}{f})$. Os M pontos do segundo cristal só começam a vibrar após ter sido transcorrido um tempo igual ao definido pelo atraso, Δt_{delay} , e assim sucessivamente.

Wooh e Shi (1999) concluíram que, quanto maior a quantidade de cristais, melhor o direcionamento do feixe e maior sua pressão, e que o direcionamento do feixe melhora com o aumento do espaçamento entre os elementos. Os autores alertam para a existência de um limite superior para a distância de separação entre os cristais. O valor máximo de d sugerido pelos mesmos é dado por:

$$d_{cr} = \frac{\lambda^*}{1 + \sin(\theta_{max})} \quad (32)$$

onde d_{cr} é a distância crítica, λ^* é o comprimento de onda e θ_{max} é o ângulo máximo desejado para direcionamento do feixe.

2.6 Condições de contorno

A modelagem do meio onde será executada a simulação de propagação de onda considera que quando se utiliza a técnica TOFD apenas a região compreendida entre os transdutores emissor (fonte) e receptor é investigada e, por isso, trata a como uma porção de um meio semi-infinito na direção x . É também nessa região que as descontinuidades modeladas são acrescentadas. As condições de contorno abordadas neste trabalho são apresentadas na figura 11.

Figura 11: Condições de contorno.

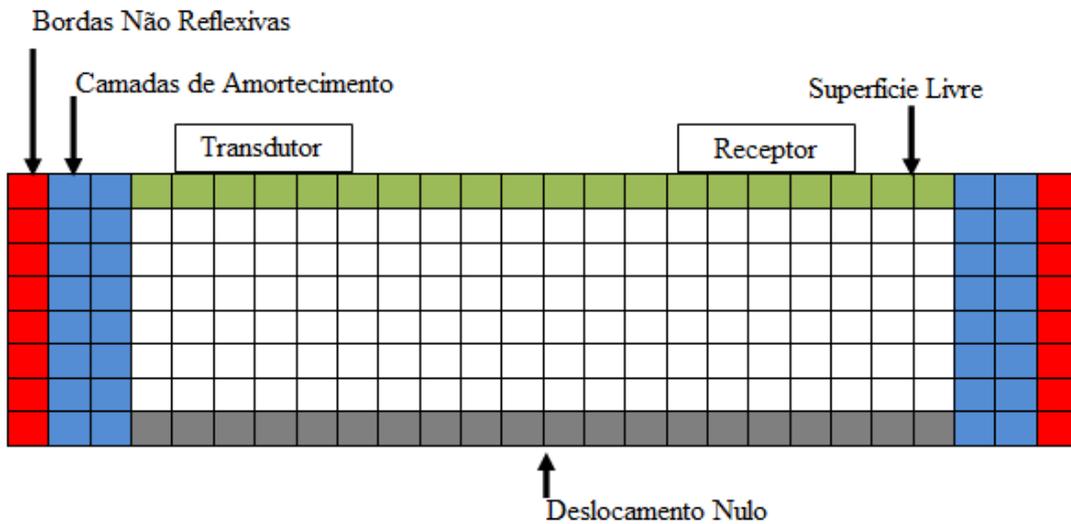


Figura do próprio autor.

Na superfície superior do material tem-se a condição de superfície livre que, de acordo com Landau e Lifshitz (1959, p. 107), determina que as tensões tangenciais e normais são nulas. As equações que representam essas tensões nulas na superfície são dadas por:

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

$$v_p^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} + (v_p^2 - 2v_s^2) \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

Combinando as equações (13), (15), (16) e (17) e substituindo na equação (34), a expressão para a tensão normal é dada por:

$$\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (35)$$

Na superfície inferior do material, oposta à superfície de varredura, a condição de contorno de deslocamento nulo garante a reflexão total da onda ($u_x = u_z = 0$).

Com o objetivo de simular um material semi-infinito na direção x , condições de contorno não reflexivas propostas por Reynolds (1978), combinadas com as camadas de amortecimento estabelecidas em Cerjan *et al.* (1985), são aplicadas nas bordas laterais esquerda e direita do material. Essas condições evitam que as ondas que se propagam na direção das bordas laterais retornem para o interior do material e cheguem ao receptor. Explica-se a seguir, como tais condições foram utilizadas no presente trabalho.

A condição de contorno de bordas não reflexivas assume que as bordas do material estejam suficientemente distantes de forma que as ondas incidentes sejam ondas planas, Ancelme (2011). Essa condição de contorno pode ser alcançada pela equação acústica da onda, dada por:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (36)$$

A equação (36) pode ser fatorada na seguinte forma:

$$\left(\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \right) P(x, z, t) - 2 \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x \partial z} = 0 \quad (37)$$

Desprezando-se as variações ao longo da direção vertical (z),

$$\frac{\partial P(x, z, t)}{\partial z} = \frac{\partial^2 P(x, z, t)}{\partial x \partial z} = 0 \quad (38)$$

a condição de borda não reflexiva é dada por:

$$\left(\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\right) \left(\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\right) P(x, z, t) = 0 \quad (39)$$

Além da condição dada pela equação (39), foi aplicado em uma região na vizinhança das bordas do material um amortecimento da onda. Tal procedimento consiste na redução das amplitudes da onda através da multiplicação do campo de deslocamento por um fator atenuante, tornando-o nulo ao chegar à borda, a fim de evitar a propagação de energia de volta no interior do material. Neste trabalho, foram utilizados 80 volumes de absorção em cada borda lateral do modelo. As camadas de amortecimento estão representadas pela área azul da figura 11, que é a região de redução de amplitude. O fator de atenuação para o lado esquerdo do material, proposto em Cerjan *et al.* (1985), pode ser expresso por:

$$G(i) = \exp(-[\text{fat}(N_{\text{abs}} - i)]^2) \quad (40)$$

em que *fat* é o coeficiente de amortecimento, *N_{abs}* é o número de bordas de absorção ou o número de volumes utilizados para atenuar o campo de deslocamento e *i* é o índice do volume na malha. Na região que será aplicada as camadas de amortecimento, os campos de deslocamentos são calculados pelas equações:

$$u_x = u_x \cdot G(i) \quad (41)$$

$$u_z = u_z \cdot G(i) \quad (42)$$

Um procedimento análogo é realizado para o lado direito do domínio, a única diferença se refere ao fator de atenuação que nesse caso é dado por:

$$G(i) = \exp(-[\text{fat}(i - (N_x - N_{\text{abs}}))]^2) \quad (43)$$

onde *N_x* é o número de volumes na direção x.

2.7 Métodos numéricos aplicados à propagação de ondas

Segundo Maliska (1995) a tarefa do método numérico consiste em resolver uma ou mais equações diferenciais, onde as derivadas existentes na equação são substituídas por expressões algébricas obtendo-se, através de um processo iterativo uma aproximação da solução para um determinado número de pontos.

Dentre os métodos numéricos utilizados para a solução de equações diferenciais, os mais tradicionais são o método de diferenças finitas (MDF), o método dos volumes finitos (MVF) e o método dos elementos finitos (MEF) descritos brevemente a seguir.

- **Método de Diferenças Finitas:** Conforme Ferziger e Perić (2002) é o método numérico mais antigo usado para a solução de equações diferenciais parciais e é também o método mais fácil de usar para geometrias convencionais, por exemplo: cartesianas, cilíndricas e esféricas. No MDF em cada ponto da malha as equações diferenciais são aproximadas pela substituição do operador diferencial pelas aproximações em séries de Taylor.
- **Método dos Volumes Finitos:** o MVF que será a ferramenta usada no presente trabalho pode ser aplicado em qualquer tipo de malha. O domínio de cálculo é dividido em um número finito de volumes de controle, e as equações diferenciais são integradas para cada um dos volumes de controle e no tempo no caso da equação diferencial descrever um processo transiente. Esse processo de integração é equivalente à realização de balanços da propriedade para cada volume elementar conforme citado em (MALISKA, 2004) e (PATANKAR, 1980).
- **Método dos Elementos Finitos:** Assim como no MVF, o MEF pode ser aplicado para qualquer geometria. No MEF o domínio do problema é subdividido em elementos com formas geométricas diversas, que geralmente são não estruturados, sendo em sua maioria triângulos ou quadriláteros para geometrias bidimensionais e tetraedros ou hexaedros para geometrias tridimensionais. A solução aproximada é obtida através da multiplicação das equações por uma função de peso antes da integração ao longo do domínio como descrito em (FERZIGER; PERIĆ 2002).

Para a solução numérica das equações diferenciais, deve-se considerar o tipo de formulação temporal a ser usada: explícita, implícita ou totalmente implícita. No caso da formulação explícita que será abordada neste trabalho, os deslocamentos das partículas são calculados com base nos valores dos deslocamentos no passo de tempo anterior.

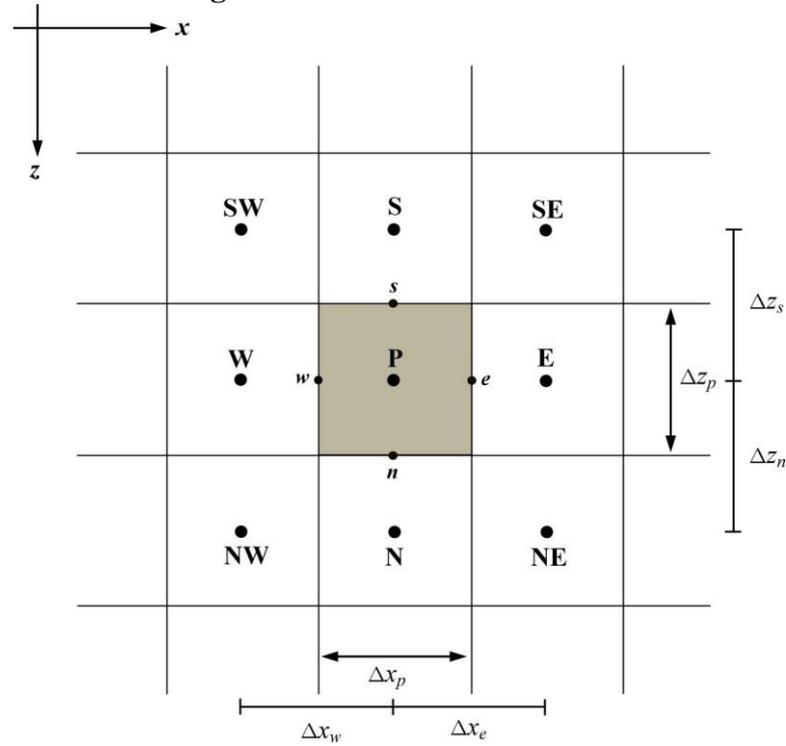
Existem na literatura diversos trabalhos sobre a aplicação de métodos numéricos para a modelagem de propagação de ondas, em meios homogêneos e heterogêneos, principalmente aplicados à modelagem de ondas sísmicas. Kelly *et al.* (1976) utilizou o método de diferenças finitas para a propagação de ondas em meios elásticos homogêneos e heterogêneos bidimensionais. Utilizando também o método de diferenças finitas, Alford *et al.* (1974) propôs a modelagem da equação acústica da onda.

Virieux (1986 *apud* Brenny, 2007) afirma que o método de diferenças finitas apresenta instabilidades quando empregado no estudo de problemas que apresentam mudanças bruscas de velocidade de propagação, como na interface entre sólido e líquido.

O método dos volumes finitos é bastante empregado em dinâmica dos fluidos. Esse método foi usado por diversos autores, dentre eles Dormy e Tarantola (1995) para a simulação numérica da propagação da onda elástica. Tadi (2004) aplicou o método dos volumes finitos para a propagação de ondas em meios homogêneos bidimensionais, e LeVeque (2002) aplicou para meios heterogêneos.

2.8 Obtenção das equações discretizadas pelo MVF

O processo de discretização da equação da onda, neste trabalho, se dará pelo método dos volumes finitos. Nesse método a obtenção da equação aproximada se dá através da integração das equações diferenciais para cada volume de controle e no tempo. A figura 12 mostra uma malha em duas dimensões, onde o ponto P representa o volume onde se efetua a integração espacial e os símbolos W, E, N e S, NE, NW, SE, SW representam respectivamente os volumes vizinhos oeste, leste, norte, sul, nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste. A malha possui espaçamento Δx na direção horizontal, Δz na vertical.

Figura 12: Malha bidimensional.

Fonte: Figura do próprio autor.

Integrando-se as equações (24) e (25) no tempo e no volume elementar P da figura 12, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
 \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right] dt dx dz &= \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(C_{11} \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right] dx dz dt \\
 + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(C_{13} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] dx dz dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(C_{44} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] dz dx dt \\
 + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(C_{44} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] dz dx dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n [F_{V,x}] dx dz dt
 \end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}
 \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right] dt dx dz &= \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(C_{44} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] dx dz dt \\
 + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(C_{44} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] dx dz dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(C_{13} \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] dz dx dt \\
 + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(C_{33} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] dz dx dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \int_s^n [F_{V,z}] dz dx dt
 \end{aligned} \tag{45}$$

Realizando as integrações das equações (44) e (45) utilizando uma formulação explícita, e aproximações de diferenças centrais para os termos das derivadas, tem-se para a componente x do deslocamento:

$$\begin{aligned}
& \int_s^e \int_w^e \rho \left[\frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_{t+\Delta t} - \frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_t \right] dx dz = \Delta t \int_s^n \left[C_{11}^e \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_e^t - C_{11}^w \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_w^t \right] dz \\
& + \Delta t \int_s^n \left[C_{13}^e \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_e^t - C_{13}^w \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_w^t \right] dz + \Delta t \int_w^e \left[C_{44}^n \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_n^t - C_{44}^s \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_s^t \right] dx \\
& + \Delta t \int_w^e \left[C_{44}^n \frac{\partial u_z}{\partial x} \Big|_n^t - C_{44}^s \frac{\partial u_z}{\partial x} \Big|_s^t \right] dx + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int_w^e [F_{V,x}] dx dz dt
\end{aligned} \tag{46}$$

e para a componente z :

$$\begin{aligned}
& \int_s^e \int_w^e \rho \left[\frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_{t+\Delta t} - \frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_t \right] dx dz = \Delta t \int_s^n \left[C_{44}^e \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_e^t - C_{44}^w \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_w^t \right] dz \\
& + \Delta t \int_s^n \left[C_{44}^e \frac{\partial u_z}{\partial x} \Big|_e^t - C_{44}^w \frac{\partial u_z}{\partial x} \Big|_w^t \right] dz + \Delta t \int_w^e \left[C_{13}^n \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_n^t - C_{13}^s \frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_s^t \right] dx \\
& + \Delta t \int_w^e \left[C_{33}^n \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_n^t - C_{33}^s \frac{\partial u_z}{\partial z} \Big|_s^t \right] dx + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^e \int_w^e [F_{V,z}] dx dz dt
\end{aligned} \tag{47}$$

As derivadas diretas para a componente x do deslocamento são dadas por:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_P^{t+\Delta t} = \frac{u_{xP}^{t+\Delta t} - u_{xP}^t}{\Delta t} \tag{48}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_P^t = \frac{u_{xP}^t - u_{xP}^{t-\Delta t}}{\Delta t} \tag{49}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_e^t = \frac{u_{xE}^t - u_{xP}^t}{\Delta x_e} \tag{50}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} \Big|_w^t = \frac{u_{xP}^t - u_{xW}^t}{\Delta x_w} \tag{51}$$

$$\left. \frac{\partial u_x}{\partial z} \right|_n^t = \frac{u_{xN}^t - u_{xP}^t}{\Delta z_n} \quad (52)$$

$$\left. \frac{\partial u_x}{\partial z} \right|_s^t = \frac{u_{xP}^t - u_{xS}^t}{\Delta z_s} \quad (53)$$

e as derivadas cruzadas:

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_n^t = \frac{u_{zNE}^t + u_{zE}^t - u_{zNW}^t - u_{zW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \quad (54)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial x} \right|_s^t = \frac{u_{zE}^t + u_{zSE}^t - u_{zW}^t - u_{zSW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \quad (55)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial z} \right|_e^t = \frac{u_{zNE}^t + u_{zN}^t - u_{zSE}^t - u_{zS}^t}{2(\Delta z_s + \Delta z_n)} \quad (56)$$

$$\left. \frac{\partial u_z}{\partial z} \right|_w^t = \frac{u_{zN}^t + u_{zNW}^t - u_{zS}^t - u_{zSW}^t}{2(\Delta z_s + \Delta z_n)} \quad (57)$$

As derivadas para a componente z do deslocamento são calculadas analogamente.

Substituindo-se as equações (48) a (56) na equação (46), e similares para a equação (47), obtém-se as seguintes equações evolutivas para o deslocamento da onda horizontal (u_x) e vertical (u_z), com malhas de espaçamento variável, respectivamente.

$$\begin{aligned}
u_{xP}^{t+\Delta t} &= \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x_p} \left[C_{11}^e \left(\frac{u_{xE}^t - u_{xP}^t}{\Delta x_e} \right) - C_{11}^w \left(\frac{u_{xP}^t - u_{xW}^t}{\Delta x_w} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta z_p} \left[C_{44}^n \left(\frac{u_{xN}^t - u_{xP}^t}{\Delta z_n} \right) - C_{44}^s \left(\frac{u_{xP}^t - u_{xS}^t}{\Delta z_s} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x_p} \left[C_{13}^e \left(\frac{u_{zNE}^t + u_{zN}^t - u_{zSE}^t - u_{zS}^t}{2(\Delta z_n + \Delta z_s)} \right) - C_{13}^w \left(\frac{u_{zN}^t + u_{zNW}^t - u_{zS}^t - u_{zSW}^t}{2(\Delta z_n + \Delta z_s)} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta z_p} \left[C_{44}^n \left(\frac{u_{zNE}^t + u_{zE}^t - u_{zNW}^t - u_{zW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \right) - C_{44}^s \left(\frac{u_{zE}^t + u_{zSE}^t - u_{zW}^t - u_{zSW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \right) \right] \\
&+ 2u_{xP}^t - u_{xP}^{t-\Delta t} + \frac{\Delta t \mathcal{F}}{\rho \Delta x_p \Delta z_p} \cos \theta
\end{aligned} \tag{58}$$

e

$$\begin{aligned}
u_{zP}^{t+\Delta t} &= \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x_p} \left[C_{44}^e \left(\frac{u_{zE}^t - u_{zP}^t}{\Delta x_e} \right) - C_{44}^w \left(\frac{u_{zP}^t - u_{zW}^t}{\Delta x_w} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta z_p} \left[C_{33}^n \left(\frac{u_{zN}^t - u_{zP}^t}{\Delta z_n} \right) - C_{33}^s \left(\frac{u_{zP}^t - u_{zS}^t}{\Delta z_s} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x_p} \left[C_{44}^e \left(\frac{u_{xNE}^t + u_{xN}^t - u_{xSE}^t - u_{xS}^t}{2(\Delta z_s + \Delta z_n)} \right) - C_{44}^w \left(\frac{u_{xN}^t + u_{xNW}^t - u_{xS}^t - u_{xSW}^t}{2(\Delta z_s + \Delta z_n)} \right) \right] \\
&+ \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta z_p} \left[C_{13}^n \left(\frac{u_{xNE}^t + u_{xE}^t - u_{xNW}^t - u_{xW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \right) - C_{13}^s \left(\frac{u_{xE}^t + u_{xSE}^t - u_{xW}^t - u_{xSW}^t}{2(\Delta x_w + \Delta x_e)} \right) \right] \\
&+ 2u_{zP}^t - u_{zP}^{t-\Delta t} + \frac{\Delta t \mathcal{F}}{\rho \Delta x_p \Delta z_p} \sin \theta
\end{aligned} \tag{59}$$

Um procedimento análogo ao realizado para a obtenção das equações (58) e (59) que denotam as equações aproximadas para os volumes internos, é realizado para os volumes de fronteiras respeitando as condições de contorno descritas na seção 2.6.

Os módulos elásticos do material no centro de cada volume foram obtidos através das equações (16), (17) e pelas equações (21) à (23). No entanto, das equações (58) e (59) observa-se que os módulos elásticos são necessários na interface de cada volume de controle. Para extrapolar estes valores do centro de cada volume de controle, para cada interface foi utilizado a média harmônica conforme descrito em Patankar (1980). De acordo com a figura 12, a média harmônica $C_{m,n}$ nas interfaces leste, oeste, norte e sul é dada por:

$$C_{m,n}^e = \frac{2(C_P C_E \Delta x_p)}{(C_P \Delta x_p + C_E \Delta x_e)} \quad (60)$$

$$C_{m,n}^w = \frac{2(C_W C_P \Delta x_w)}{(C_W \Delta x_w + C_P \Delta x_p)} \quad (61)$$

$$C_{m,n}^n = \frac{2(C_P C_N \Delta z_p)}{(C_P \Delta z_p + C_N \Delta z_n)} \quad (62)$$

$$C_{m,n}^s = \frac{2(C_S C_P \Delta z_s)}{(C_S \Delta z_s + C_P \Delta z_p)} \quad (63)$$

2.9 Computação de alto desempenho

Devido ao grande esforço computacional requerido pelas simulações de problemas de propagação de ondas, torna-se essencial o desenvolvimento de programas capazes de atender essa exigência em um tempo reduzido. Isso pode ser realizado através do emprego da computação paralela que parte do princípio de que os problemas computacionais podem ser divididos em partes e serem solucionados simultaneamente por diversos processadores.

Existe uma variedade de formas de se paralelizar uma determinada tarefa e cada uma dessas variedades é denominada de paradigma (BULCÃO, 2004).

Não é o foco deste trabalho discutir de forma profunda os aspectos da computação paralela. Neste trabalho utilizou-se o paradigma de troca de mensagens através da interface MPI (Message Passing Interface). Nesse padrão todo o compartilhamento e interação de dados são realizados através do envio e recebimento de mensagens (KIRK; HWU, 2011).

Com a finalidade de avaliar o ganho de tempo no processamento das simulações, medidas de *speedup* podem ser adotadas, sendo que o *speedup* representa quantas vezes o tempo de execução de uma determinada tarefa se reduz em comparação à sua implementação serial. Desta forma o *speedup* do código executado em paralelo com n processadores pode ser expresso por:

$$S_n = \frac{T_1}{T_n} \tag{64}$$

Onde T_1 e T_n são respectivamente os tempos de execução para 1 e n processos.

3 METODOLOGIA

3.1 Definição de parâmetros do modelo

Para a modelagem do meio de propagação de ondas, adotou-se as seguintes características:

- Material isotrópico formado por um semi-plano x-z com dimensões de 19 mm de espessura (z) e 80 mm de comprimento (x).
- Densidade de $7800 \frac{kg}{m^3}$
- Velocidade de propagação das ondas longitudinais de $5900 \frac{m}{s}$.
- Velocidade de propagação das ondas transversais de $3200 \frac{m}{s}$.

Utilizou-se uma malha regular quadrada igualmente espaçada com dimensões $N_x=3300$ volumes e $N_z=783$ volumes. Os valores de Δx e Δz usados foram de $2,4 \times 10^{-5}$ m.

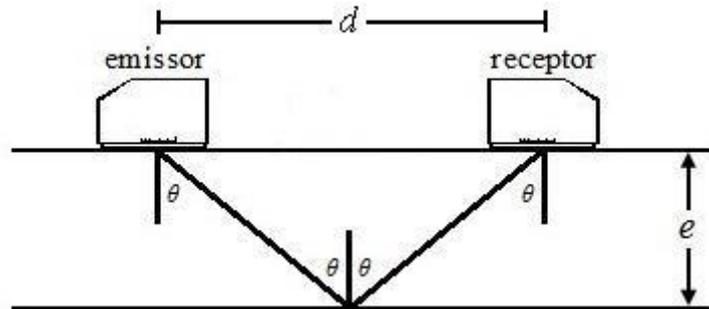
O intervalo de avanço temporal da solução Δt é calculado a partir do critério de estabilidade definido no trabalho de Mufti (1990), em que é relacionado através do máximo valor do espaçamento da malha pela máxima velocidade do modelo dado pela equação a seguir,

$$\Delta t = \frac{\kappa \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)}{\max(v)} \quad (65)$$

onde o termo κ depende da ordem de aproximação das equações diferenciais. No caso proposto $\kappa = 0,6$ fornecendo o valor de $\Delta t = 2,46 \times 10^{-9}$ s.

Utilizando conceitos simples de geometria pode-se demonstrar que a distância ideal entre os transdutores emissor e receptor é dada por: $2.e.tg(\theta)$, onde: “e” significa a espessura do material inspecionado ou modelado (19 mm) e “ θ ” o ângulo de transmissão e recepção do feixe ultrassônico no aço, (60°), como visto na figura 13.

Figura 13: Distância entre transdutores num típico arranjo para inspeção pela técnica TOFD.



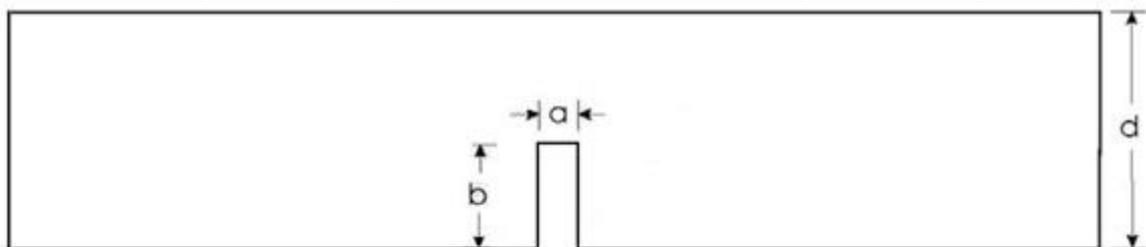
Fonte: Figura do próprio autor.

A fonte foi simulada com ângulo de 60° com 8 elementos e em cada elemento 8 pontos de vibração, e frequência de 5,0 MHz localizada na superfície superior do modelo. O receptor localiza-se do lado oposto do emissor ou fonte a uma distância de 65,8 mm caracterizando o arranjo da técnica TOFD.

3.2 Modelagem dos tipos de descontinuidades

Neste trabalho, foram considerados três tipos de descontinuidades. A descontinuidade tipo 1 é localizada no centro do material e é aberta na superfície inferior, o que corresponde ao defeito de falta de penetração descrito na seção 2.4.2. Este tipo de defeito é mostrado na figura 14. Para isso foram utilizados três valores de largura ($a = 2,0/3,0/4,0$ [mm]) e seis valores de altura ($b = 4,0/5,0/6,0/7,0/8,0/9,0$ [mm]), gerando um sinal para cada uma das 18 combinações.

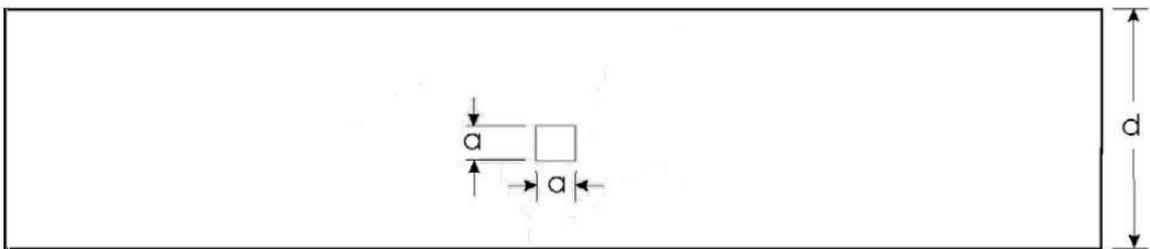
Figura 14: Representação esquemática da descontinuidade tipo 1 (falta de penetração).



Fonte: Figura do próprio autor.

A descontinuidade tipo 2 procura retratar um poro, figura 15. Como descrito na seção 2.4.1, essa descontinuidade é geralmente esférica. No entanto, o uso de malha cartesiana impõe restrições à modelagem da sua geometria, e, por esse motivo todos os poros modelados neste trabalho apresentam a mesma a largura e altura. Foram definidos dois tamanhos para esse tipo de descontinuidade (1,0 mm x 1,0 mm e 2,0 mm x 2,0 mm), e para cada tamanho a localização do poro no interior do material foi modificada aleatoriamente nove vezes, produzindo 18 sinais para essa classe de defeito.

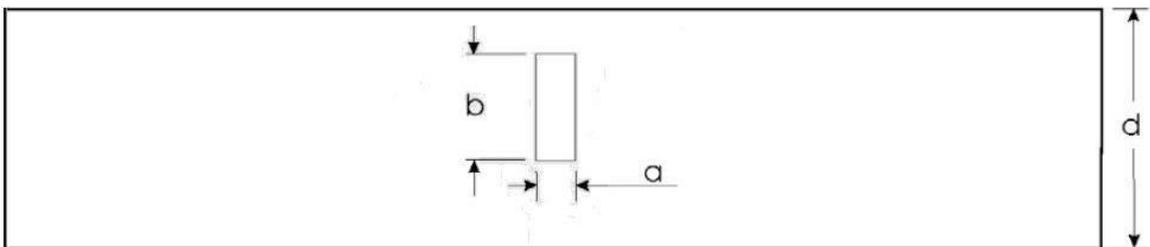
Figura 15: Representação esquemática da descontinuidade tipo 2 (poro).



Fonte: Figura do próprio autor.

Para a descontinuidade tipo 3 foram definidos dois tamanhos (0,3 x 3,0 mm / 0,4 x 4,0 mm), e para cada tamanho a posição do defeito variou aleatoriamente nove vezes, gerando também 18 sinais. É importante destacar que o comprimento dessas descontinuidades foi definido como sendo dez vezes maior que sua largura. Essa terceira classe busca representar tanto uma trinca longitudinal quanto um caso particular de falta de fusão, figura 16, descritos anteriormente nas seções 2.4.3 e 2.4.4, respectivamente.

Figura 16: Representação esquemática da descontinuidade tipo 3 (trinca longitudinal).



Fonte: Figura do próprio autor.

3.3 Construção do algoritmo

O algoritmo para simular a propagação de ondas em meios bidimensionais homogêneos e heterogêneos tanto na versão sequencial quanto a paralela, foi implementado na linguagem de programação FORTRAN®, sob a plataforma LINUX sendo que a visualização dos campos de deslocamento foi realizada nos programas MATLAB® e KRAKEN® da ESSS (*Engineering Simulation and Scientific Software*).

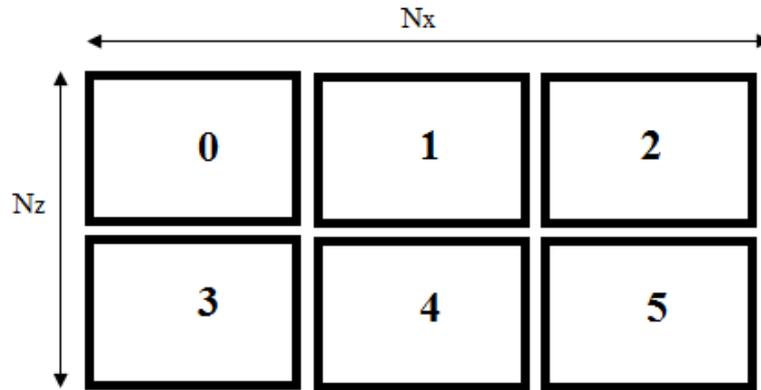
O algoritmo consiste das seguintes etapas:

1. Definir parâmetros do material: dimensões, densidade, velocidade de propagação da onda, etc.
2. Definir o número de volumes nas direções x e z .
3. Definir duração do tempo de execução da simulação.
4. Inserir condições de contorno.
5. Iniciar loop para incremento no tempo.
6. Inserir fonte.
7. Resolução das equações diferenciais.
8. Incremento do passo de tempo.
9. Atualização dos valores.
10. Iterar até que a convergência seja atingida.
11. Exportar resultados para arquivo de dados.
12. Fim do programa.

Para a versão paralela do programa, utilizou-se a técnica de decomposição de domínio 2-D, que consiste na divisão do domínio do problema em diversas partições de tal forma que cada uma delas possa ser processada de forma independente.

Como neste trabalho a coordenada x corresponde à direção horizontal e a coordenada z corresponde à direção vertical, o domínio foi decomposto em subdomínios rotulados a partir do zero, contando-se da esquerda para a direita e de cima para baixo de acordo com a identificação do processo responsável por cada parte do domínio. Assim, se utilizados 6 processos para a solução do problema com N_x volumes na direção x e N_z volumes na direção z , o domínio pode ser decomposto conforme a figura 17.

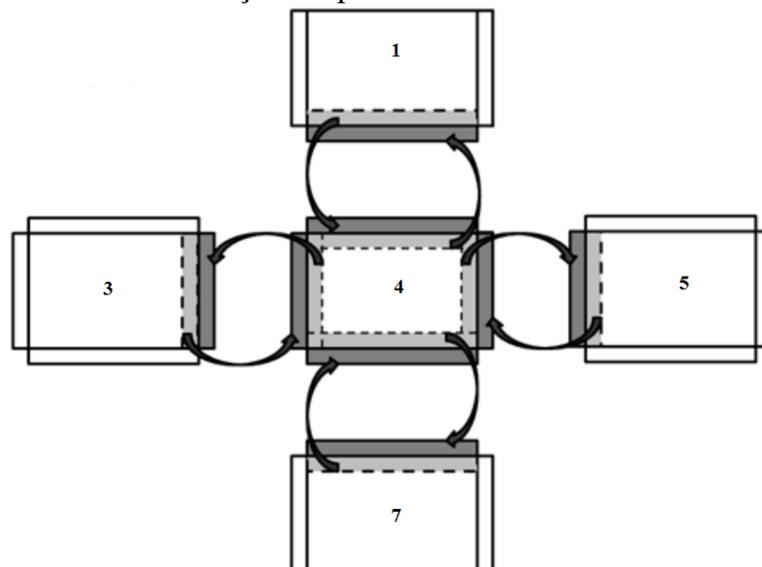
Figura 17: Decomposição de domínio para 6 processos.



Fonte: Figura do próprio autor.

Como cada processador ficará com uma parte limitada do domínio e o cálculo do campo de deslocamento depende de pontos vizinhos, utiliza-se como solução o recurso de zonas-fantasma, que consiste na troca de informações entre os processos a cada passo de tempo. Assim ao final do cálculo do campo de deslocamento para todos os volumes, um processo envia parte que o outro necessita para o cálculo do campo e recebe a parte que precisa em sua zona-fantasma (LARA, 2012). A figura 18 mostra como é realizada a troca de mensagens para uma decomposição utilizando 9 processos, em que o processo do centro se comunica com os seus vizinhos.

Figura 18: Comunicação em paralelo utilizando zonas-fantasma.



Fonte: Adaptado de Lara (2012).

Para a execução do código em paralelo utilizou-se o cluster do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Computacional – LDFC/UFC com as seguintes configurações:

- Cluster SGI. Head Node + 20 Nós
- Rede Infiniband 40Gbps
- Armazenamento de 20TB
- Nó mestre: 16 cores x Intel(R) Xeon(R) CPU X5560 2.80GHz, 48GB RAM DDR3
- Nós de cálculo: 12 x Intel(R) Xeon(R) CPU X5660 2.80GHz, 48GB RAM DDR3

3.4 Sinais capturados experimentalmente

Uma análise qualitativa dos sinais produzidos pela simulação foi executada a partir da comparação com sinais reais capturados durante a inspeção de corpos de prova utilizando ensaio ultrassônico automatizado baseado na técnica TOFD (MOURA, 2005).

Uma dessas inspeções foi realizada por Moura (2005b) em corpo de prova confeccionado a partir de uma chapa de aço AISI 1020 com 18 milímetros de espessura. Nele foram inseridos quatro entalhes por eletroerosão. Todos os entalhes têm exatamente 10 mm de comprimento, mas cada um possui uma profundidade diferente (2,0 / 5,0 / 10,0 / 15,0 [mm]) e estão separados do entalhe adjacente por 10 mm. O processo de eletroerosão garante a precisão nas dimensões dos defeitos inseridos.

O equipamento empregado por Moura (2005b) na inspeção automatizada é constituído por um sistema de controle instalado em um computador conectado ao aparelho de ultrassom, ao sistema eletrônico e ao sistema mecânico. O sistema mecânico, responsável pelo deslocamento dos transdutores ultrassônicos sobre a região inspecionada garantindo um bom acoplamento entre eles, foi planejado e montado com rodas magnéticas para permitir inspecionar estruturas ferromagnéticas em todas as posições, inclusive sobre cabeça.

No trabalho de Moura (2005b) foi utilizado um aparelho de ultrassom convencional, de fabricação Krautkramer, modelo USD15. Os transdutores utilizados são do tipo normal de onda longitudinal, marca Krautkramer, modelo MSW/QC/PC, com 6 mm de diâmetro e frequência central de 5 MHz. Os transdutores foram montados sobre cunhas de acrílico com inclinação necessária para se obter no aço um feixe de ondas longitudinais com ângulo de 60 graus em relação à normal a superfície.

O sistema de controle gerencia a captura de sinais ultrassônicos A-scans de forma sincronizada ao posicionamento automatizado do par de transdutores. Durante o movimento dos transdutores um A-scan é capturado a cada milímetro, tem seus valores de amplitudes convertidos em tons de cinza, e é utilizado na construção de uma imagem denominada D-scan, que permite a visualização de uma seção longitudinal da região inspecionada e a presença dos defeitos. Esses modos A-scan e D-scan são as formas utilizadas pelo programa de controle para apresentação dos resultados. O sistema de controle permite ao operador escolher uma região sobre a imagem D-scan e selecionar o A-scan correspondente àquela região.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Durante a modelagem do material foram considerados três tipos de descontinuidades. A cada simulação a descontinuidade teve seu tamanho e/ou sua posição modificada, a depender de seu tipo, e dezoito simulações foram executadas para cada classe. Detalhes sobre o tipo, as dimensões e a posição das descontinuidades estudadas estão descritos na seção 4.2 - Modelagem dos tipos de descontinuidades.

A simulação da propagação da onda foi executada para todas as combinações de tipo e posição do defeito, e cada simulação gera um grande conjunto de imagens de campo de deslocamento no tempo e um sinal da amplitude de pressão medido pelo receptor.

Serão apresentados os sinais A-scan produzidos para todos os casos estudados, mas, por uma questão de espaço, far-se-á a apresentação da sequência de imagens para apenas um dos casos.

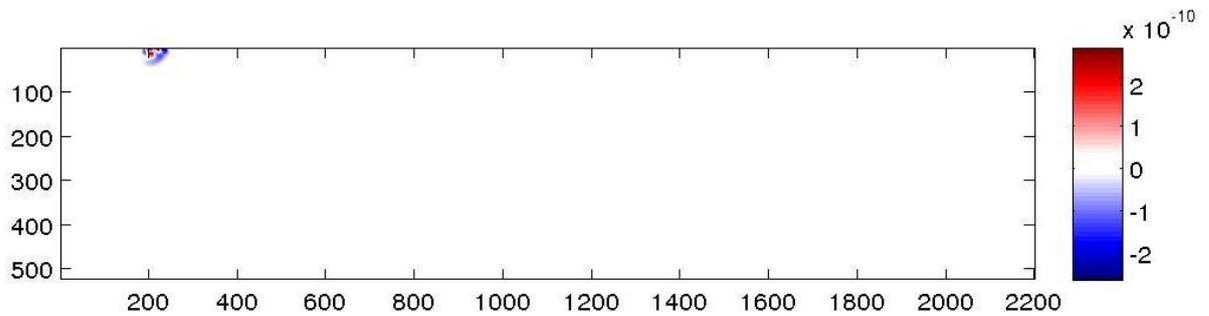
4.2 Propagação da onda

A sequência de imagens apresentada abaixo foi produzida durante a simulação da propagação da onda realizada com os seguintes parâmetros:

- Tipo de descontinuidade: 1 (falta de penetração).
- Largura da descontinuidade: 3 mm.
- Altura da descontinuidade: 5 mm.
- Número de volumes na direção x (N_x): 2200.
- Número de volumes na direção z (N_z): 522.
- Espaçamento da malha da direção x (Δx): $3,63 \times 10^{-5}$.
- Espaçamento da malha da direção z (Δz): $3,63 \times 10^{-5}$.
- $\Delta t = 3,69 \times 10^{-9}$ s.
- Tempo de propagação/simulação: $14,927 \times 10^{-6}$ s.
- Intervalo de tempo entre registro das imagens: $0.36 \mu\text{s}$.

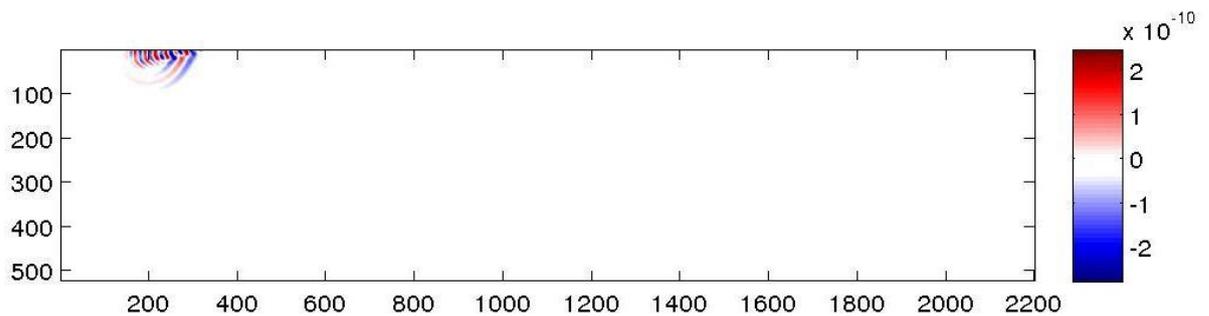
Nas figuras 19, 20 e 21 podemos visualizar as ondas geradas pela vibração da fonte ultrassônica. Nesse lapso de tempo ainda não é possível distinguir claramente as ondas longitudinal e transversal.

Figura 19: Campo de deslocamento u_z logo após o instante inicial: $0,36\mu\text{s}$.



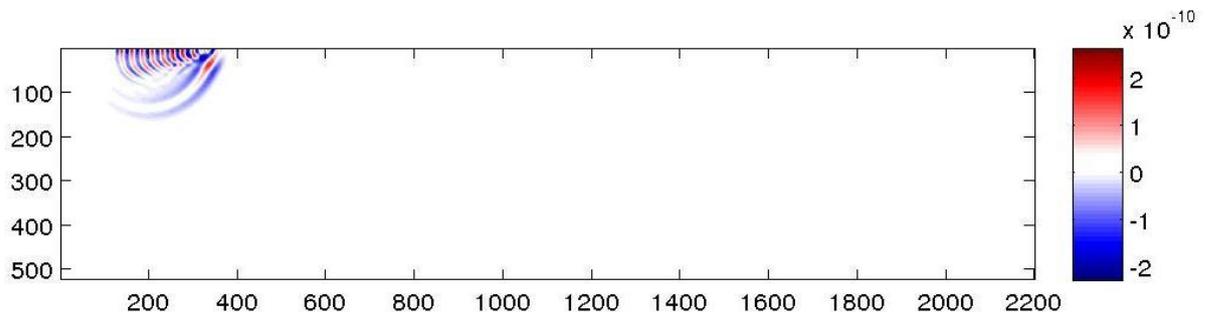
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 20: Campo de deslocamento u_z no instante $0,73\mu\text{s}$.



Fonte: Figura do próprio autor.

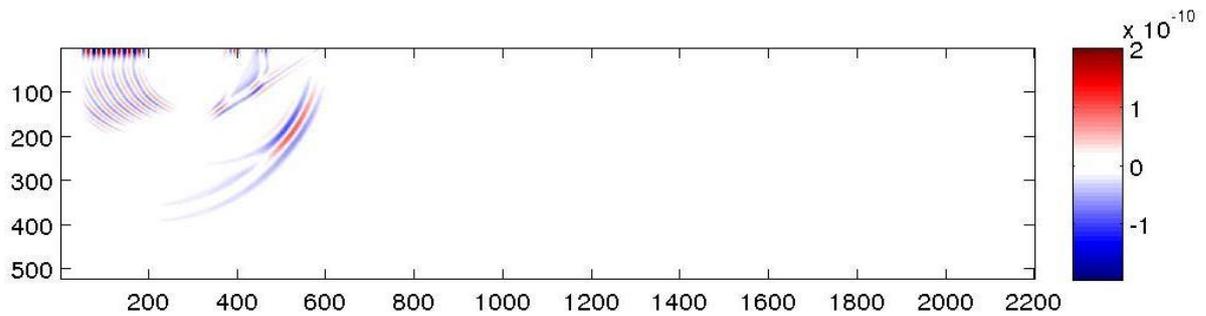
Figura 21: Campo de deslocamento u_z no instante $1,10\mu\text{s}$.



Fonte: Figura do próprio autor.

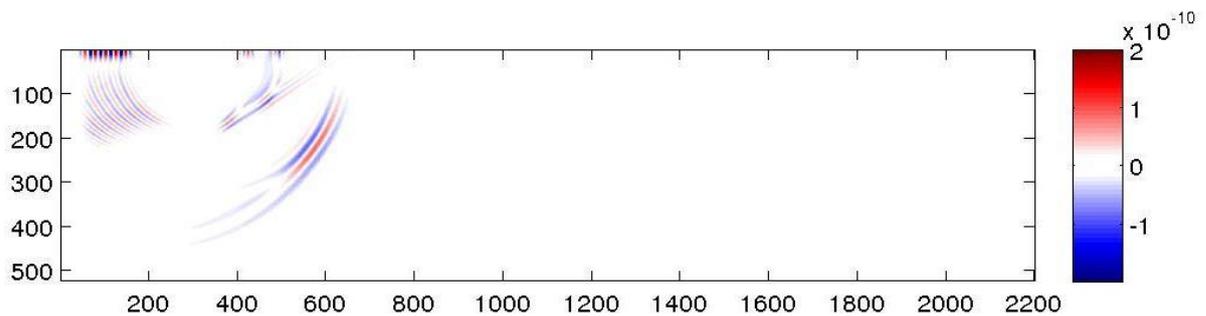
Nas figuras 22 e 23, correspondentes aos instantes de 2,58 μs a 2,95 μs , é possível distinguir claramente as ondas longitudinal e transversal que propagam através do material. A velocidade de propagação da primeira onda é aproximadamente o dobro da segunda.

Figura 22: Campo de deslocamento u_z no instante 2,58 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

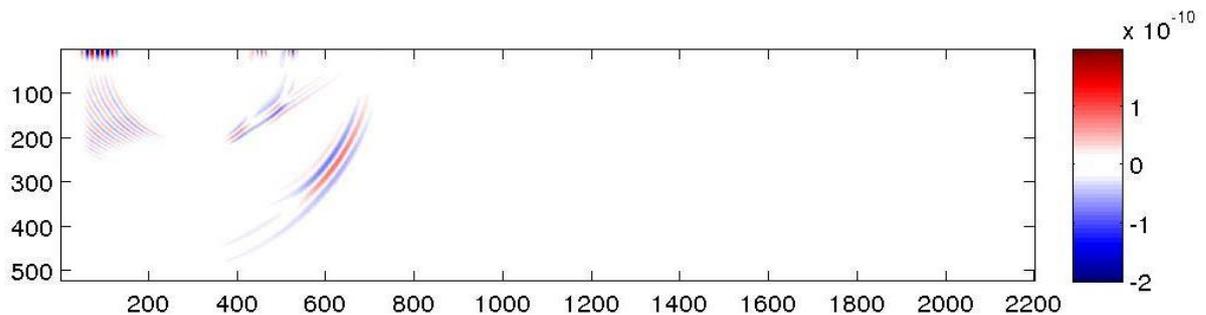
Figura 23: Campo de deslocamento u_z no instante 2,95 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

Na figura 24, correspondente ao instante de tempo igual a 3,32 μs , vemos que a onda longitudinal está na iminência de alcançar a superfície inferior (*backwall*).

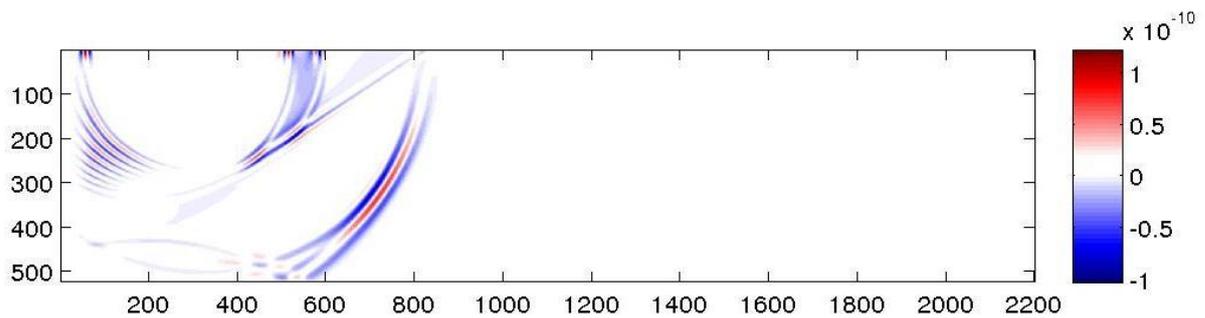
Figura 24: Campo de deslocamento u_z no instante 3,32 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

Na figura 25, tempo igual a $4,05 \mu\text{s}$, a onda longitudinal já alcançou a superfície oposta onde refletiu. De imediato não é fácil visualizar que além da onda longitudinal existe uma onda transversal, chamada modo convertida, resultante da interação da onda com a superfície oposta.

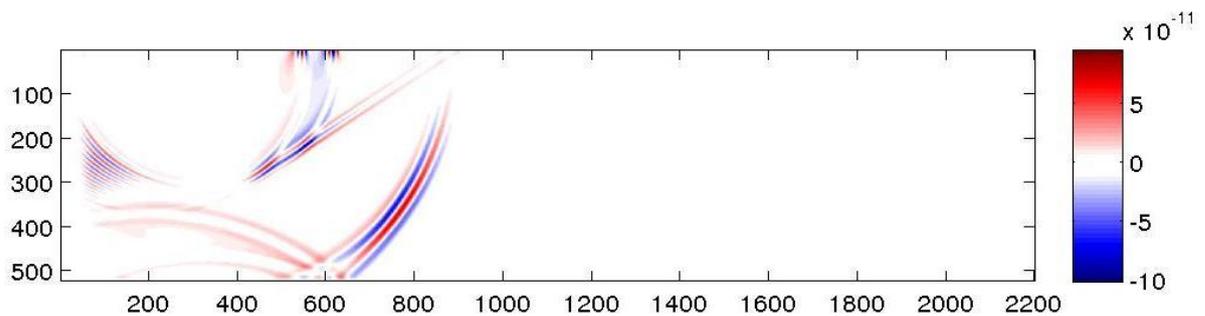
Figura 25: Campo de deslocamento u_z no instante $4,05 \mu\text{s}$.



Fonte: Figura do próprio autor.

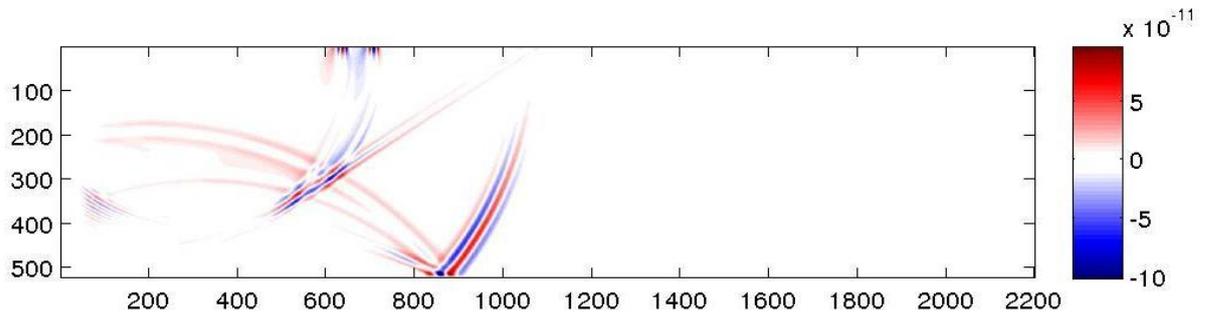
Nas figuras 26, 27 e 28, que compreende o intervalo entre $4,42 \mu\text{s}$ e $5,90 \mu\text{s}$, é fácil perceber a presença da onda modo convertida. A onda transversal gerada no instante inicial aproxima-se da superfície oposta.

Figura 26: Campo de deslocamento u_z no instante $4,42 \mu\text{s}$.



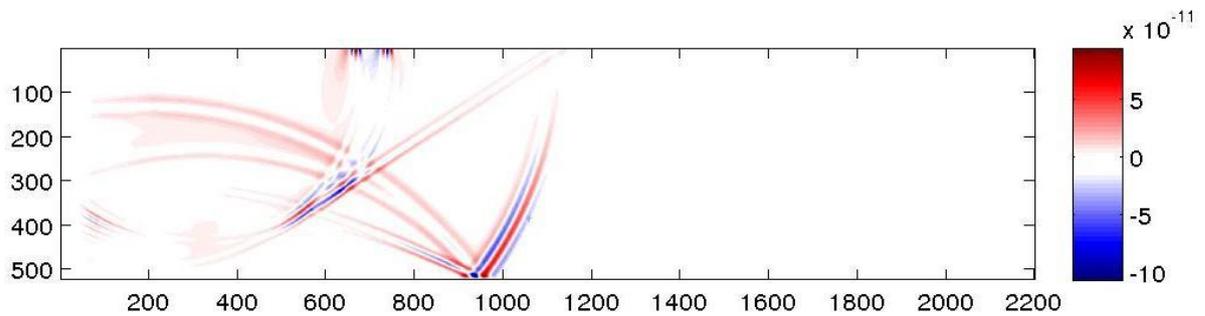
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 27: Campo de deslocamento u_z no instante 5,53 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

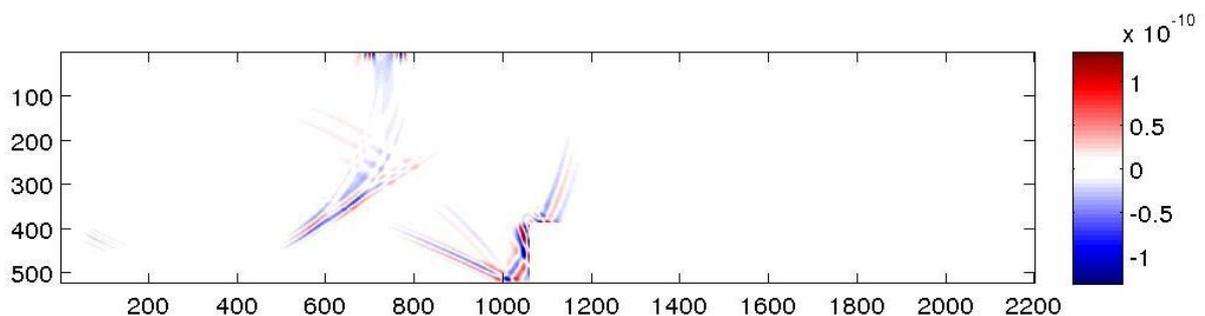
Figura 28: Campo de deslocamento u_z no instante 5,90 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

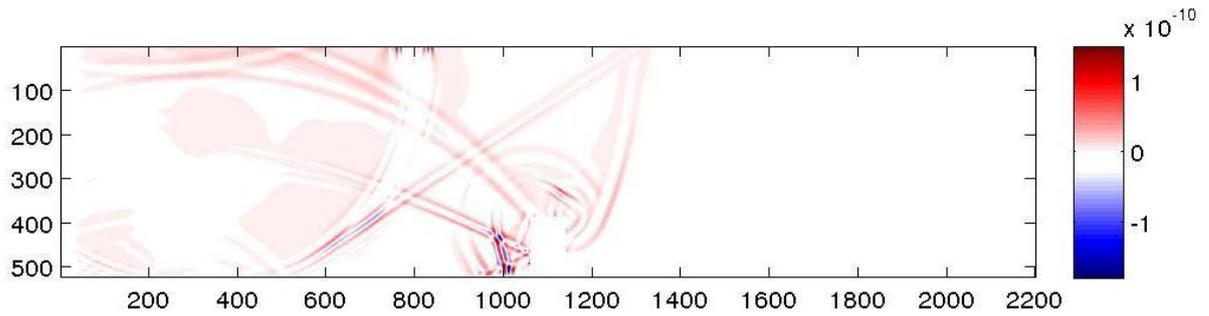
A seguir, na figura 29, passados aproximadamente 6,27 μs , observa-se que a onda longitudinal viaja a frente das demais e alcança uma descontinuidade, representada neste exemplo por uma falta de penetração. Como na primeira reflexão, além da onda longitudinal refletida, tem-se a geração de uma onda transversal (modo convertida). Nesse instante a onda transversal produzida ainda durante a vibração da fonte está na eminência de alcançar a superfície oposta. A figura 30 mostra o reflexo da onda transversal na superfície oposta.

Figura 29: Campo de deslocamento u_z no instante 6,27 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

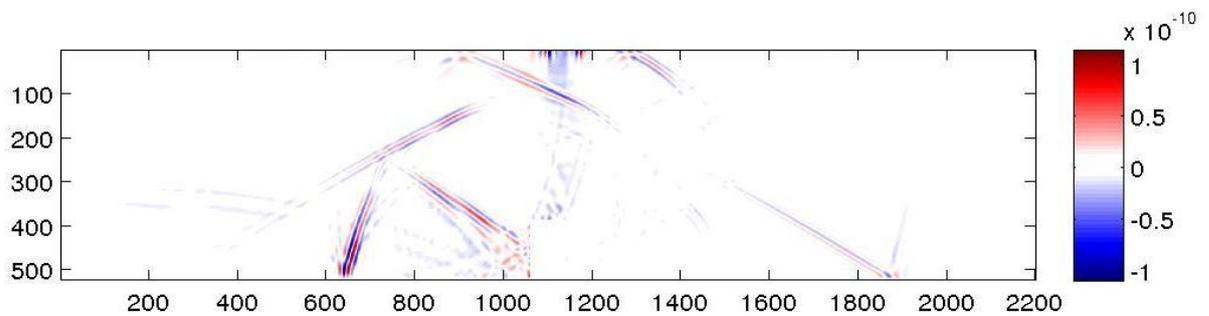
Figura 30: Campo de deslocamento u_z no instante 7,01 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

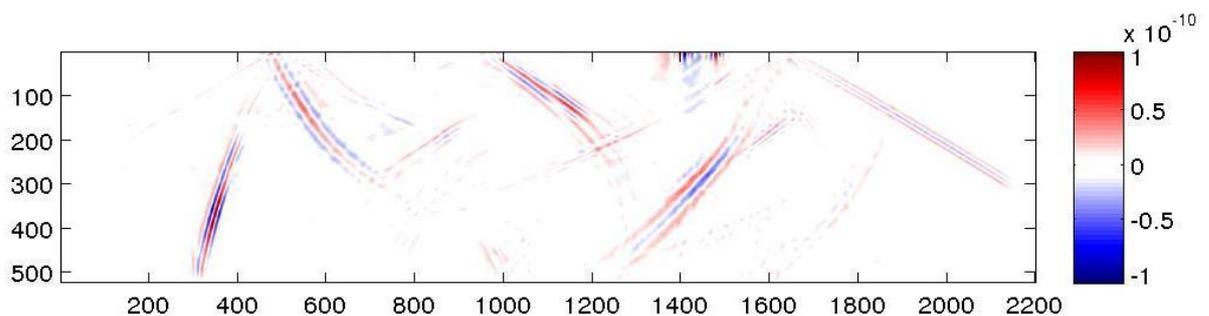
As figuras 31 e 32 exibem o resultado das múltiplas interações das ondas com o meio, tendo a onda lateral à frente, seguida pelas ondas longitudinal refletida no topo da descontinuidade, da onda modo convertida que surgiu dessa interação, a onda longitudinal refletida na superfície oposta, também seguida de uma modo convertida correspondente, uma frente de onda transversal original. Tendo cada um desses eventos ocorrido em momentos distintos, a chegada e registro da chegada das ondas longitudinais e transversais, que propagam com velocidades diferentes, ocorrem em tempos diferentes.

Figura 31: Campo de deslocamento u_z no instante 11,07 μs .



Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 32: Campo de deslocamento u_z no instante 14,76 μs .



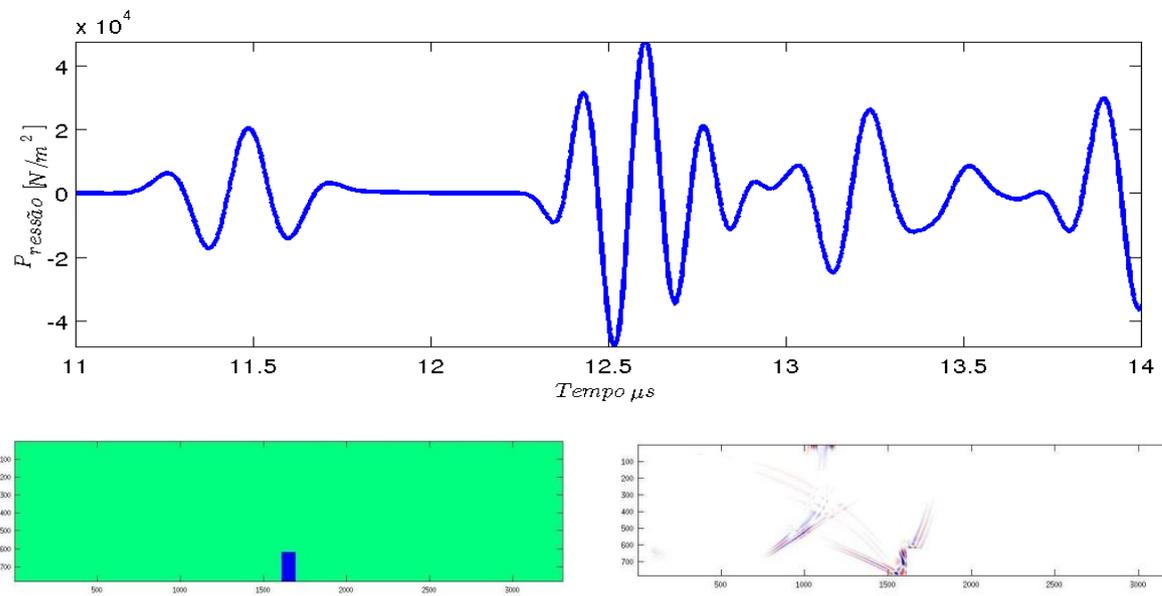
Fonte: Figura do próprio autor.

4.3 Sinais de descontinuidades do tipo 1 (Falta de Penetração)

As figuras exibidas a seguir exibem o resultado das simulações. Todas elas mostram os sinais A-scan simulados (região superior) com a variação da pressão sônica lida na posição do receptor, o tipo, tamanho e posição da descontinuidade inserida no meio bidimensional modelado (canto inferior esquerdo) e o campo de deslocamento na direção z , no instante em que a frente de onda alcança o defeito (canto inferior direito).

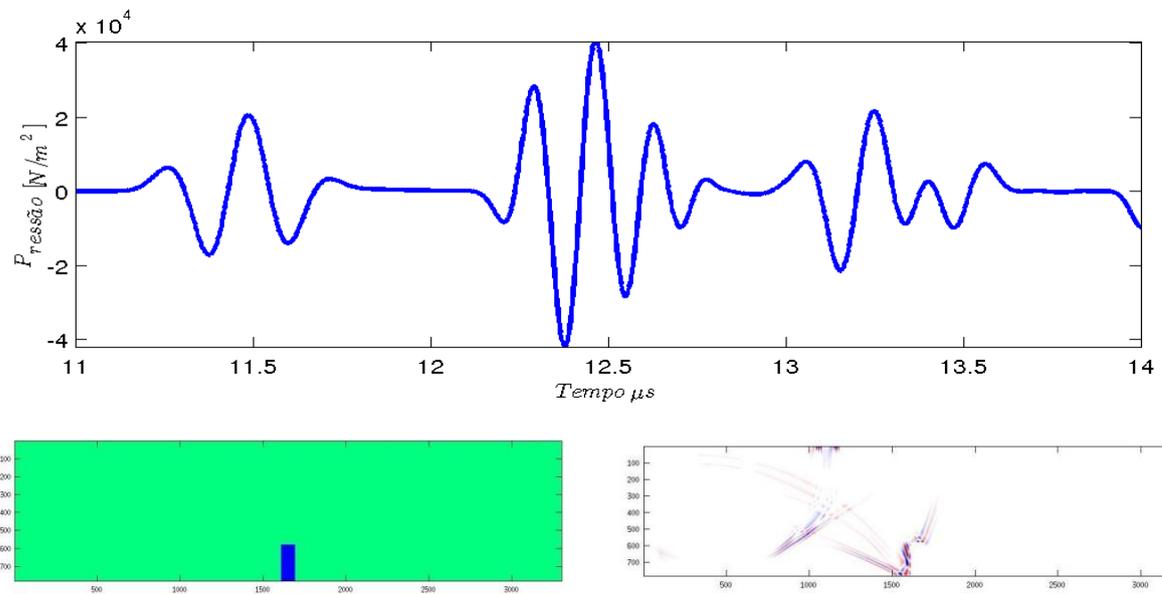
As primeiras dezoito figuras se referem às descontinuidades do tipo 1, correspondente a falta de penetração. Os resultados apresentados por essas figuras merecem alguns comentários: Em primeiro lugar, fica evidente nas figuras 33 a 50 o surgimento do eco refletido no topo da falta de penetração. Em seguida, é possível perceber uma mudança da posição do eco refletido no topo da falta de penetração à medida que a descontinuidade cresce e se aproxima da superfície. A partir de certo tamanho pode-se perceber ainda o registro da onda modo convertida. Observa-se também que o aumento da largura do defeito resulta na queda de amplitude do eco de fundo em virtude de uma maior quantidade de energia ultrassônica ser refletida pelo topo da falta de penetração. Esses sinais simulados foram comparados aos sinais experimentais obtidos por Moura (2005b), durante a inspeção com a técnica TOFD de um corpo de prova contendo quatro entalhes abertos à superfície oposta a de inspeção.

Figura 33: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2\text{ mm}$, $H=4\text{ mm}$.



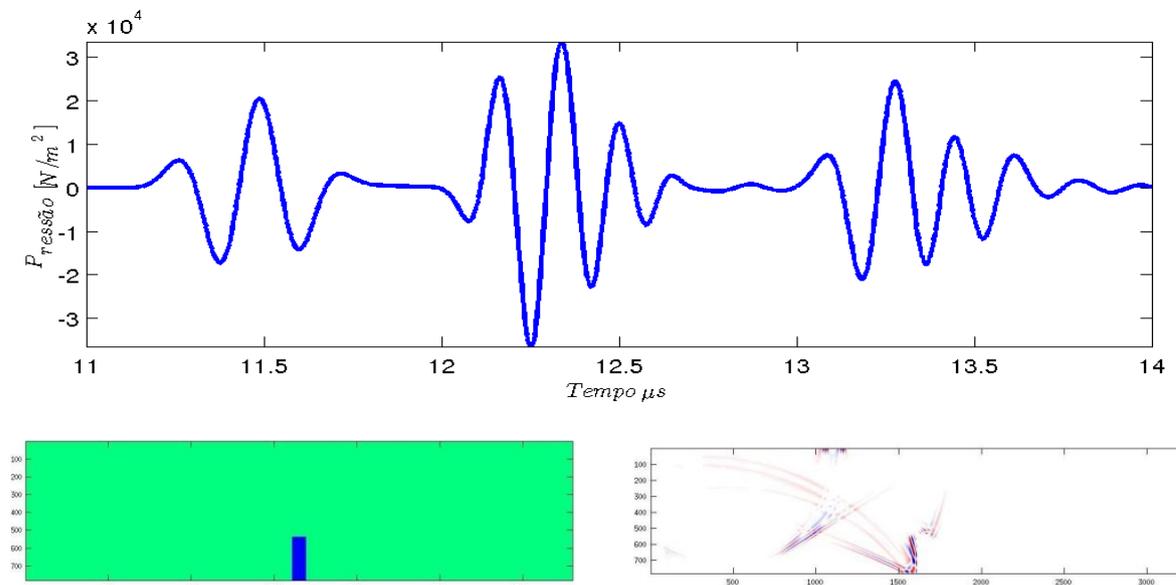
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 34: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2\text{ mm}$, $H=5\text{ mm}$.



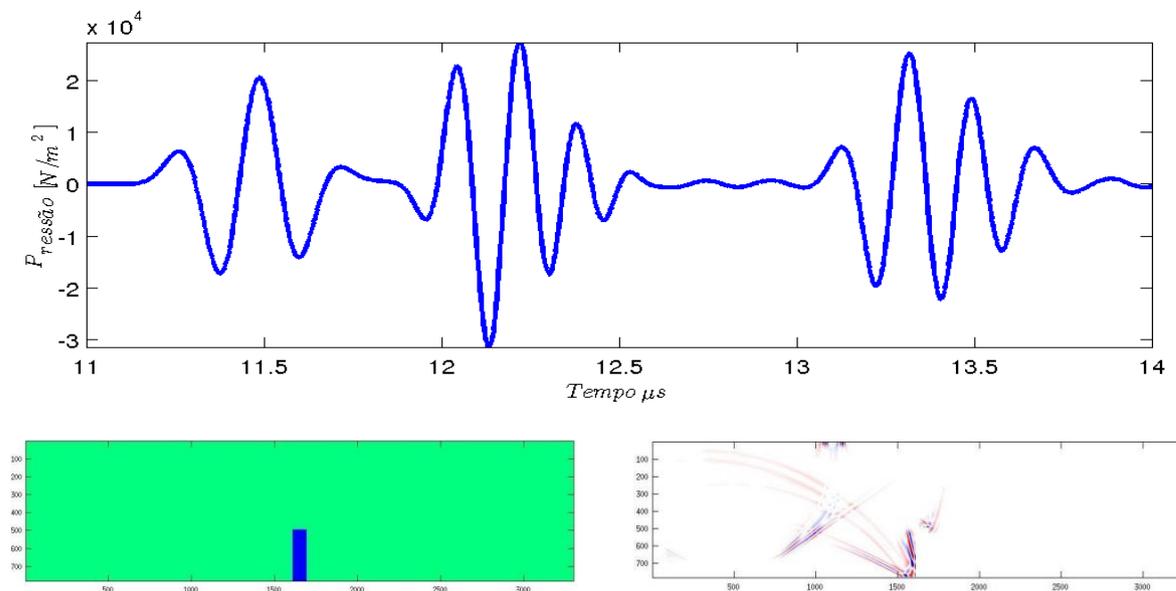
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 35: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2$ mm, $H=6$ mm.



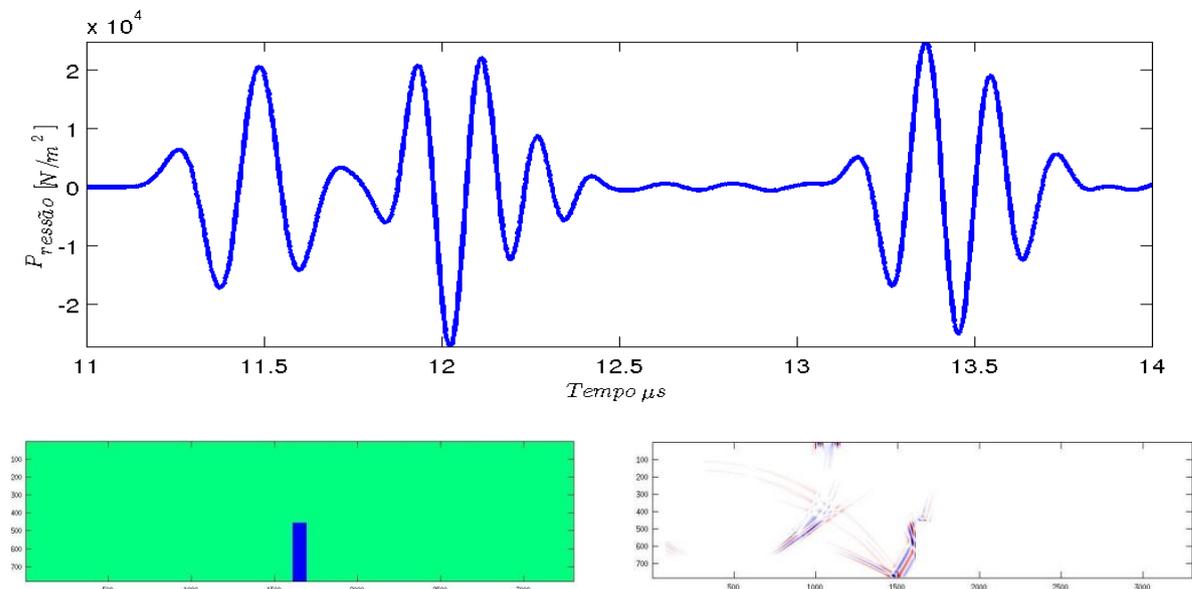
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 36: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2$ mm, $H=7$ mm.



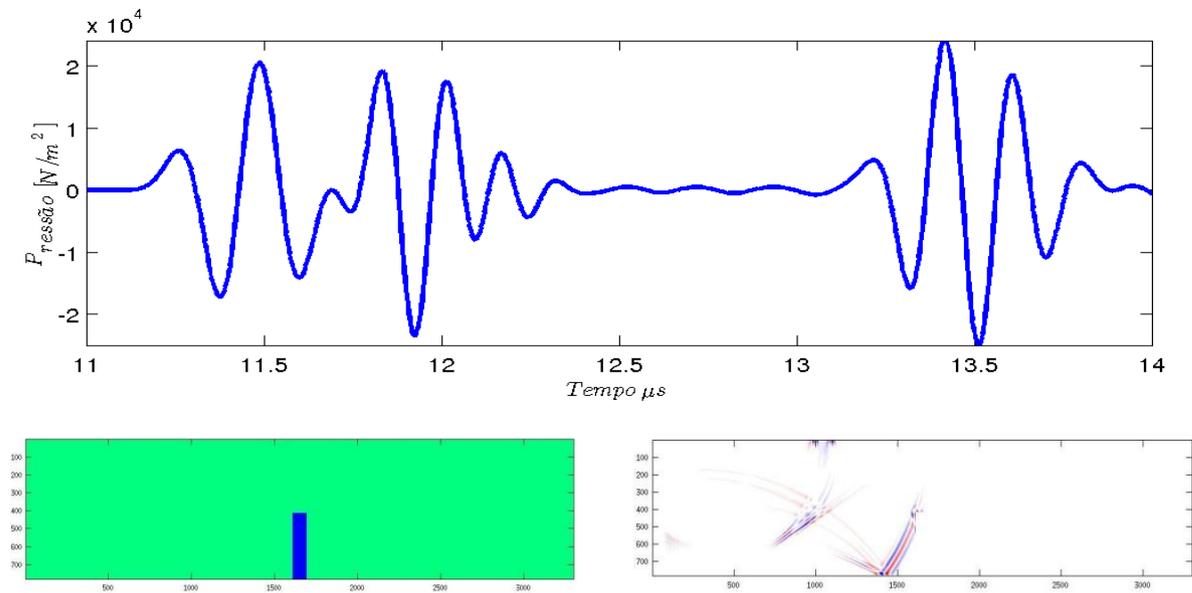
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 37: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2$ mm, $H=8$ mm.



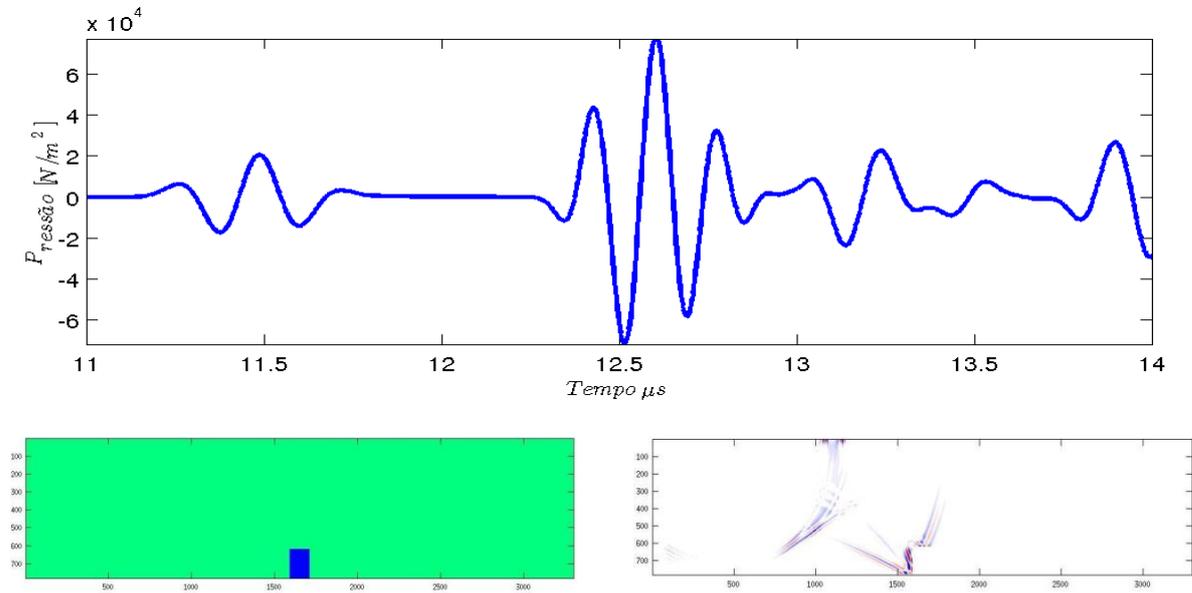
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 38: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=2$ mm, $H=9$ mm.



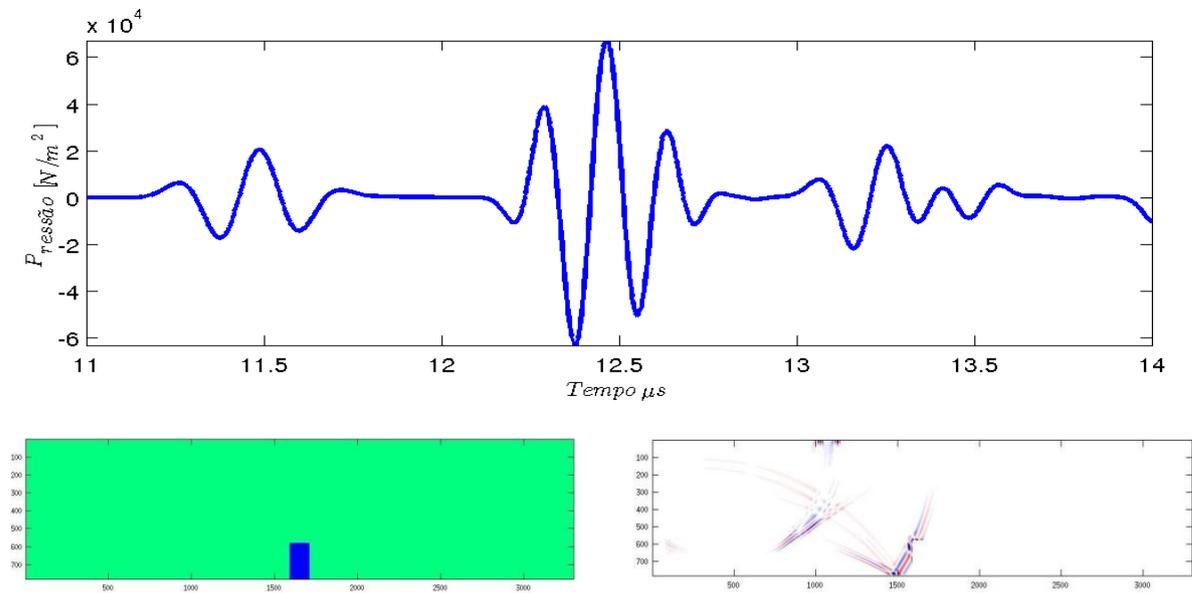
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 39: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 3 mm, H = 4 mm.



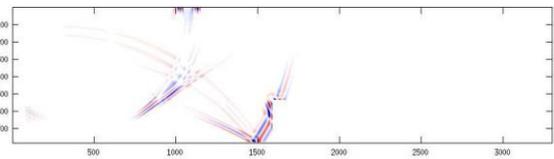
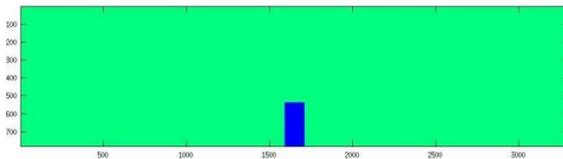
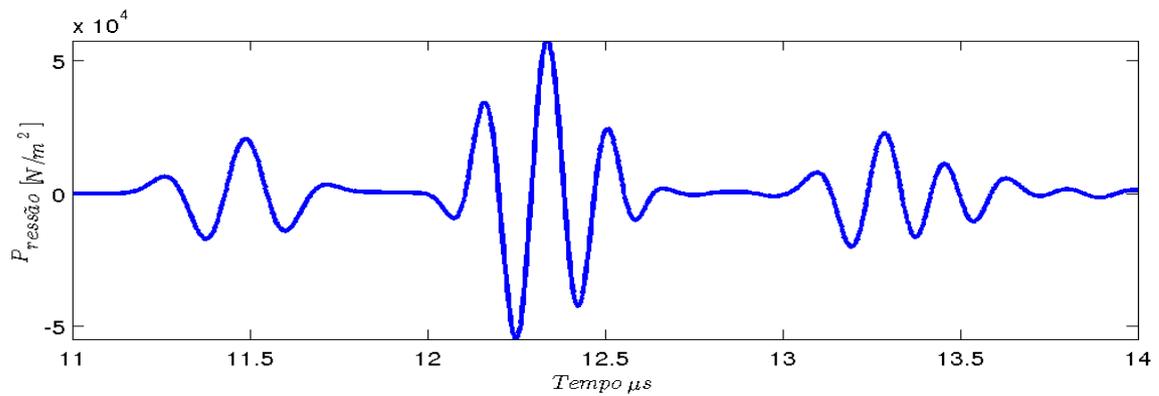
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 40: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 3 mm, H = 5 mm.



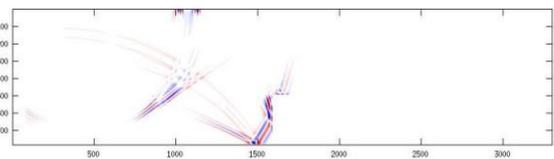
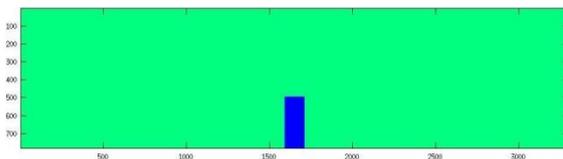
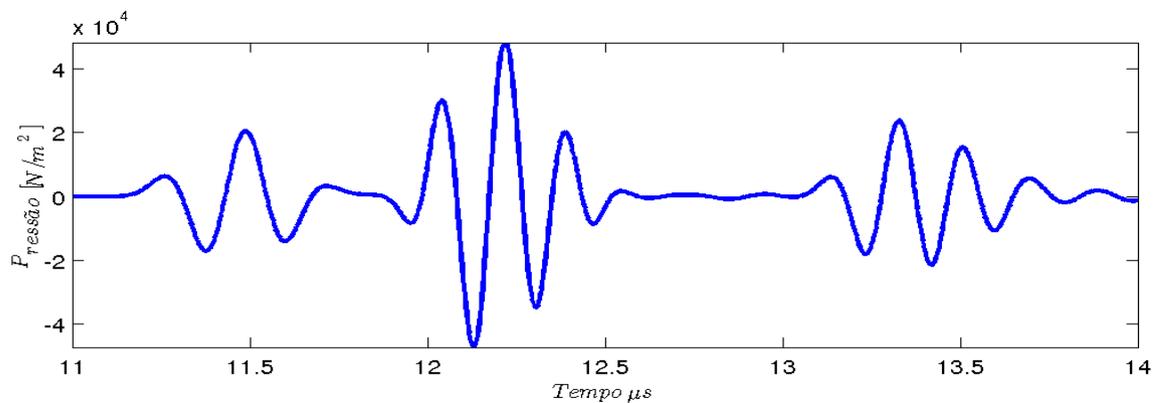
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 41: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 3 mm, H = 6 mm.



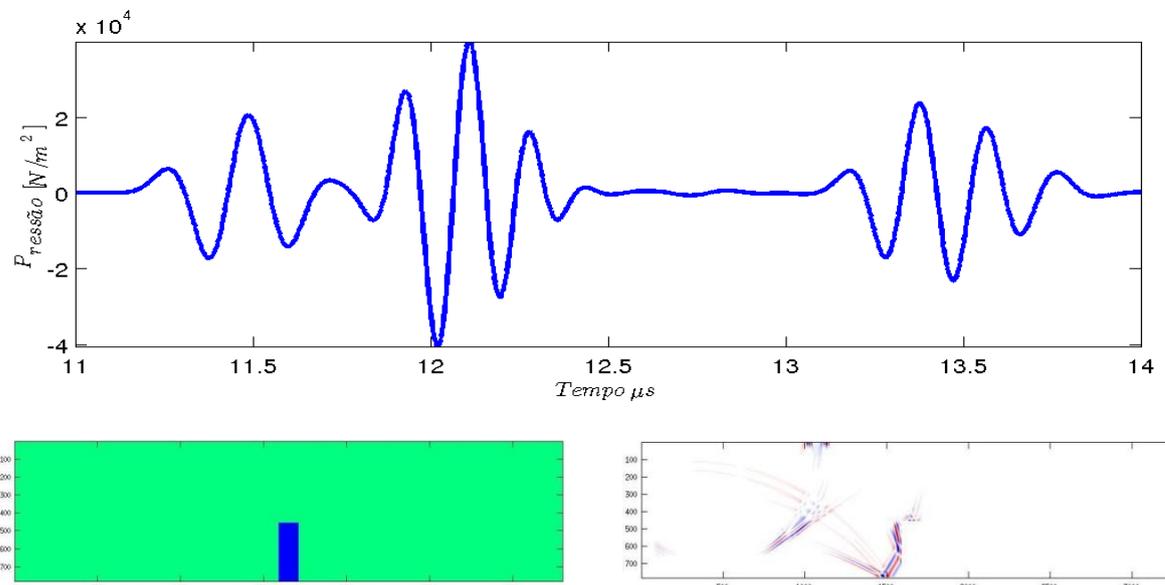
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 42: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 3 mm, H = 7 mm.



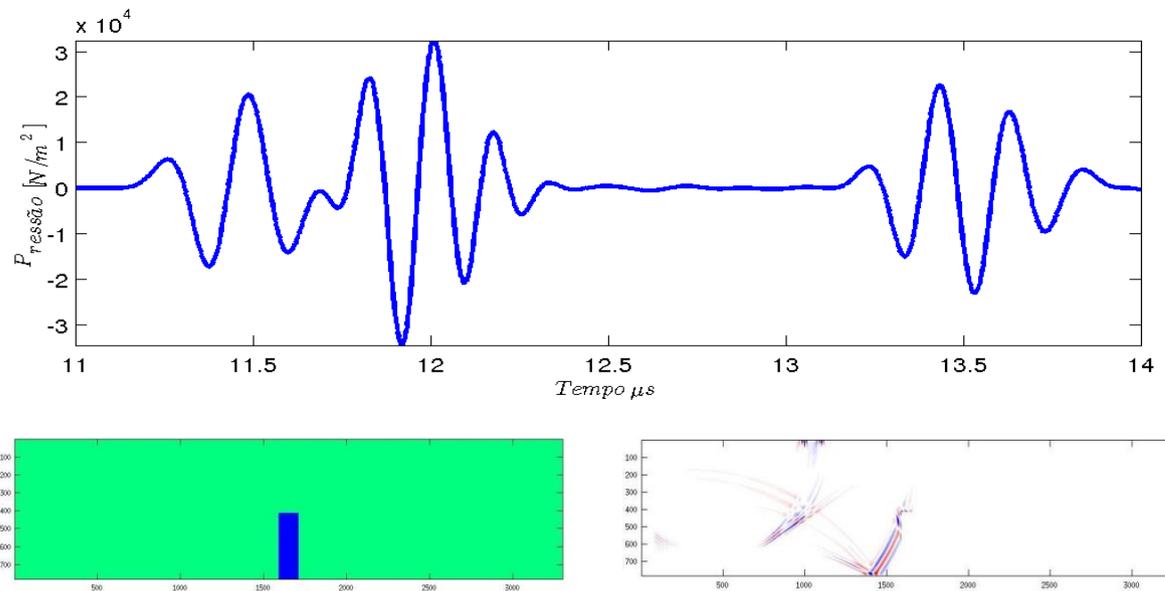
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 43: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=3\text{ mm}$, $H=8\text{ mm}$.



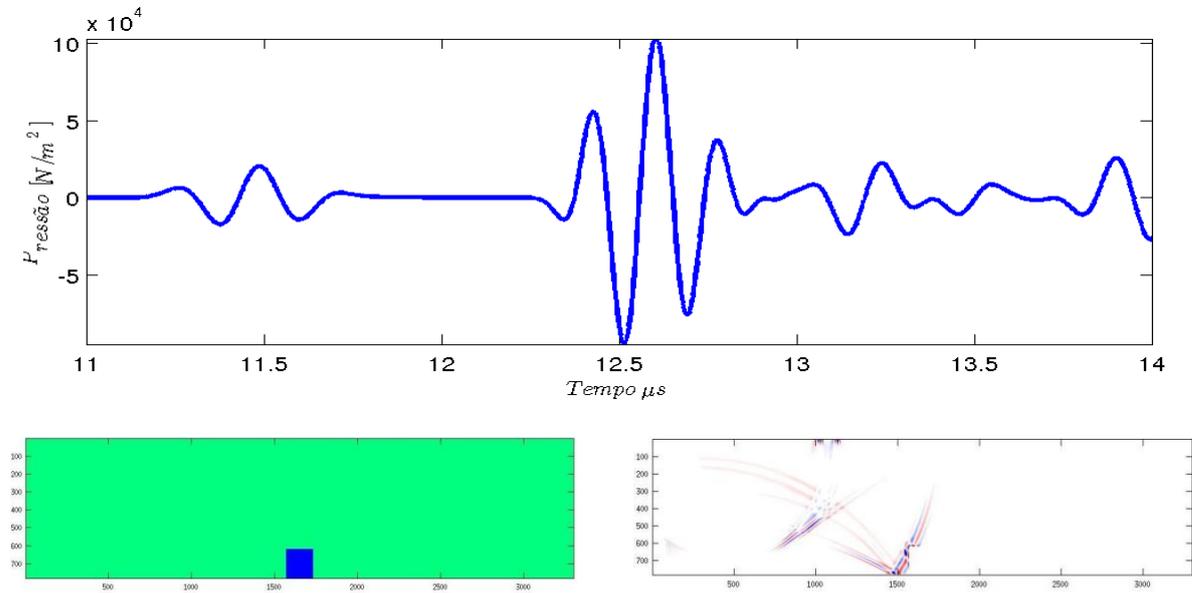
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 44: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=3\text{ mm}$, $H=9\text{ mm}$.



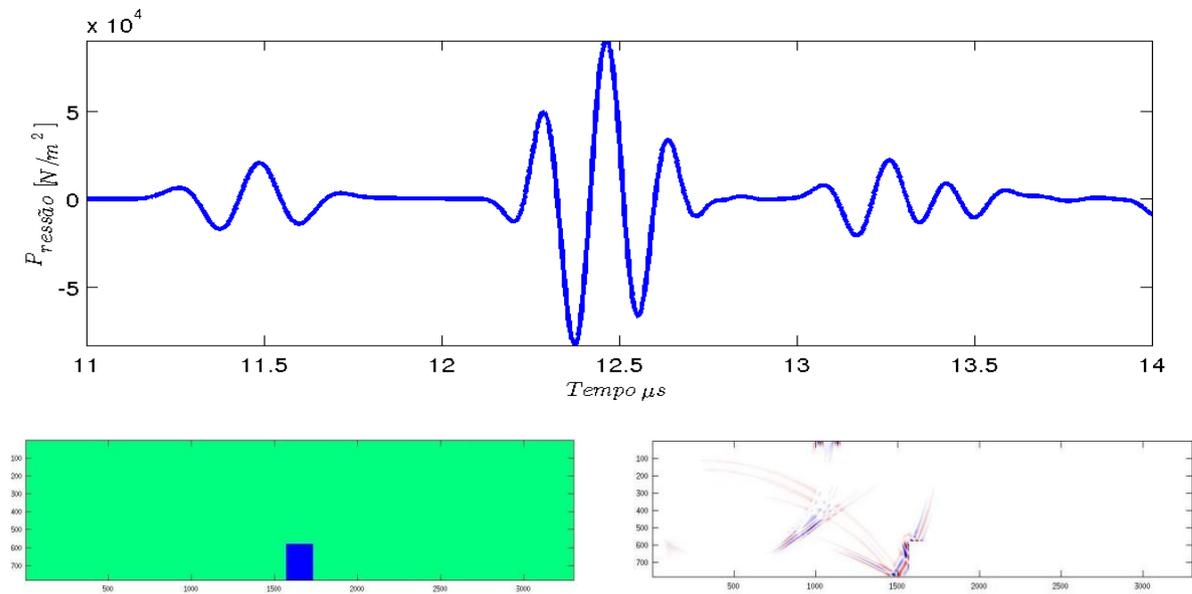
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 45: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 4 mm, H = 4 mm.



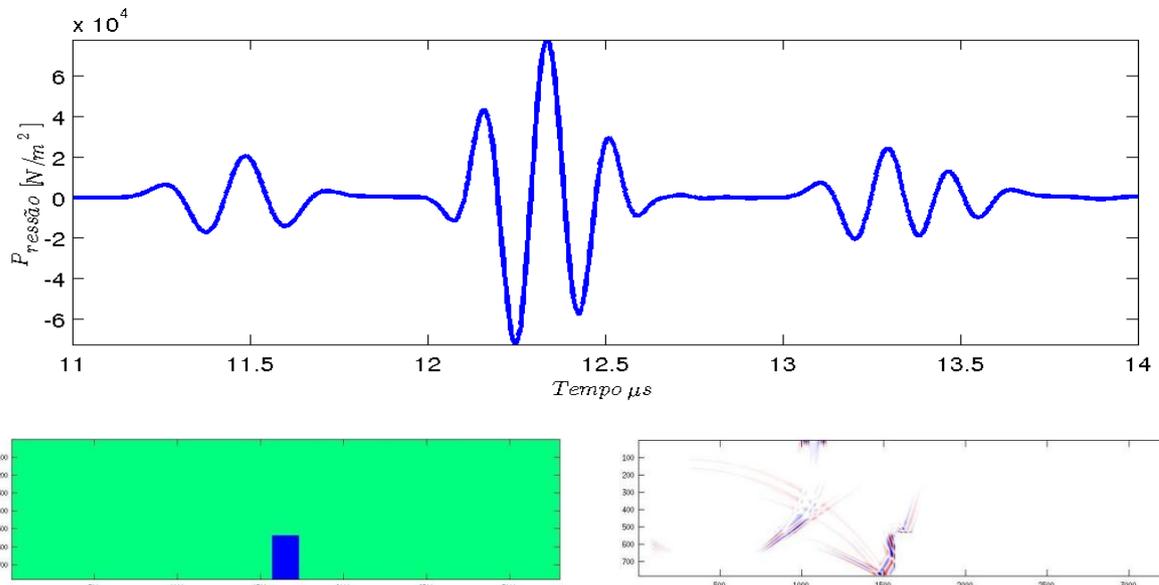
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 46: Sinal simulado em uma falta de penetração, L= 4 mm, H = 5 mm.



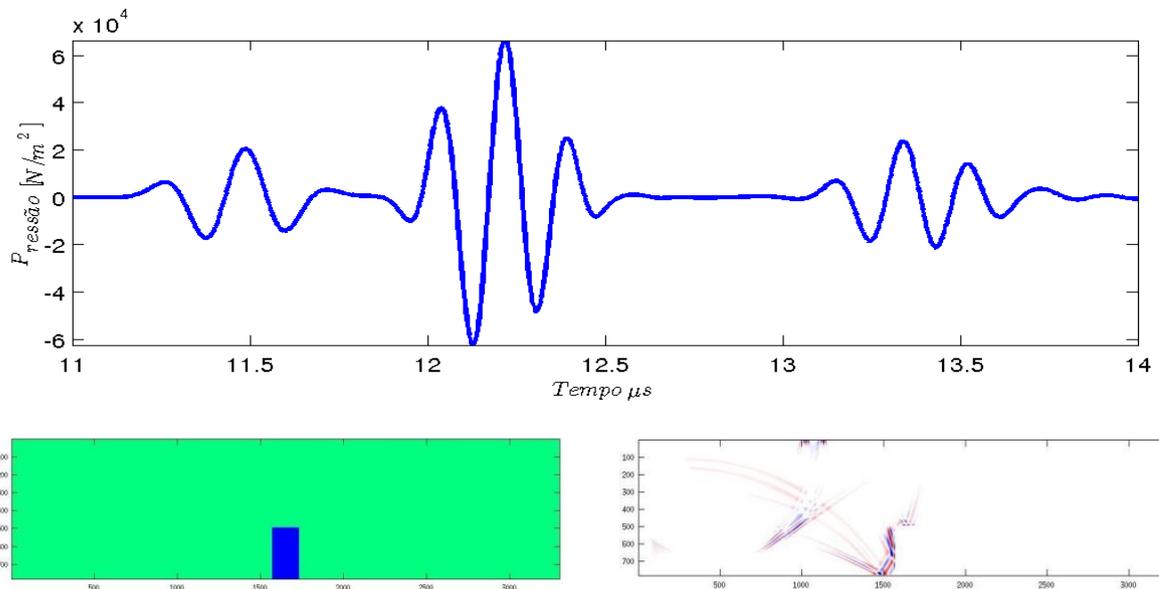
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 47: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=4$ mm, $H=6$ mm.



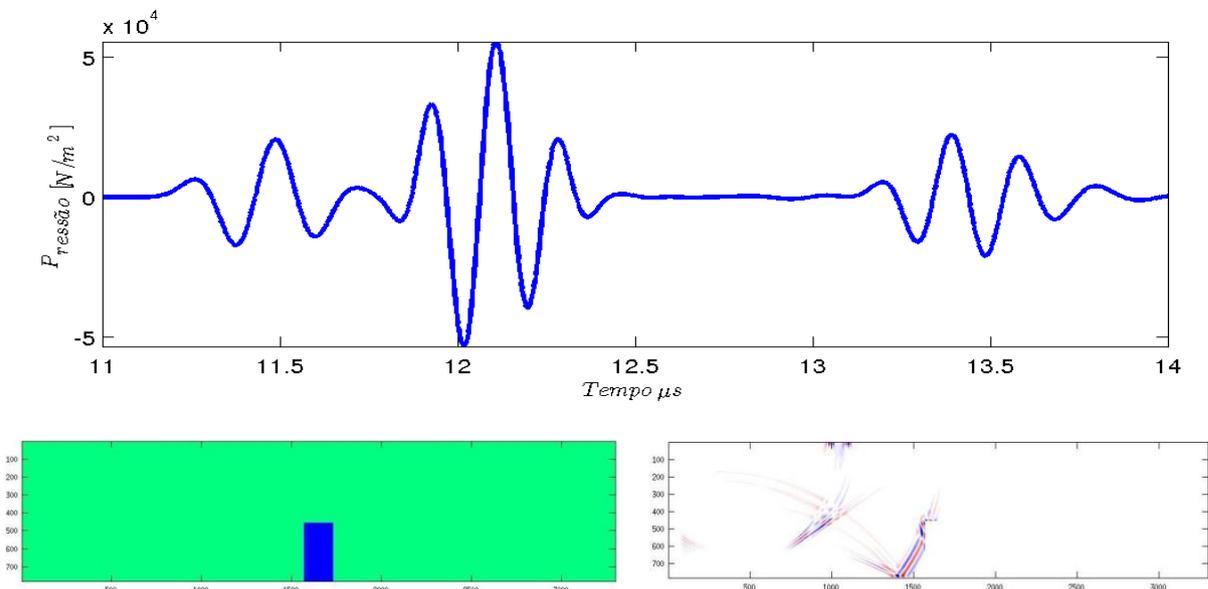
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 48: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=4$ mm, $H=7$ mm.



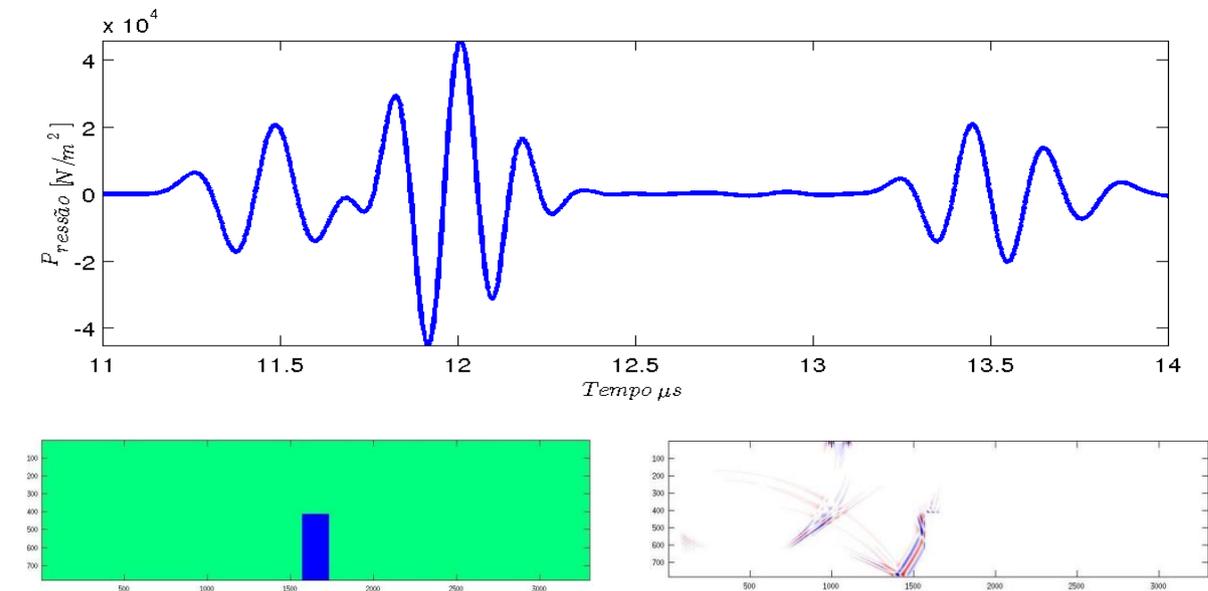
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 49: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=4$ mm, $H=8$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

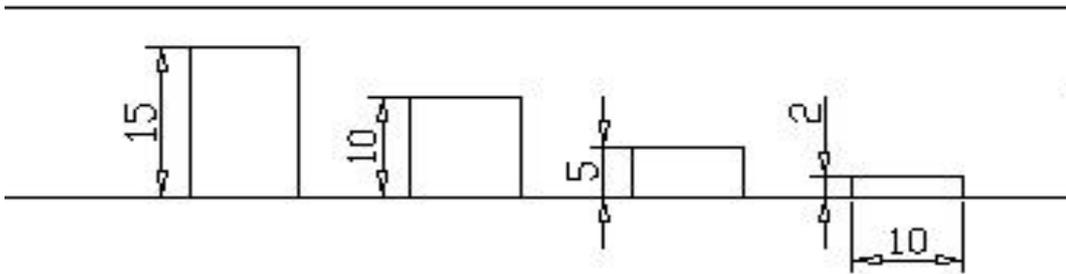
Figura 50: Sinal simulado em uma falta de penetração, $L=4$ mm, $H=9$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

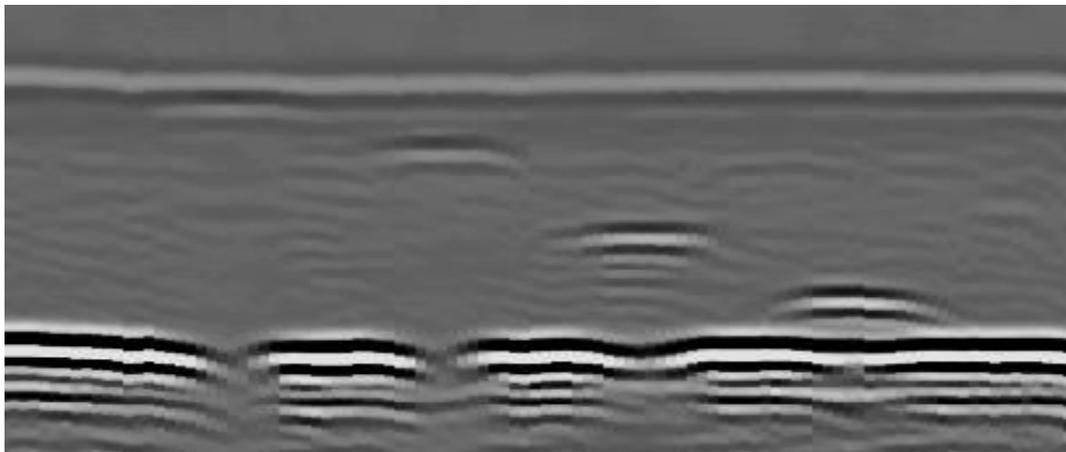
A figura 51 apresenta uma vista lateral do corpo de prova (mencionado na seção 4.3) inspecionado por ensaio ultrassônico. A figura 52 exibe a imagem D-scan construída durante a inspeção. A figura 53 apresenta quatro sinais A-scan obtidos durante a inspeção desse corpo de prova. Cada sinal foi capturado por Moura (2005) sobre um entalhe com profundidade diferente.

Figura 51: Vista lateral do corpo de prova contendo quatro entalhes.



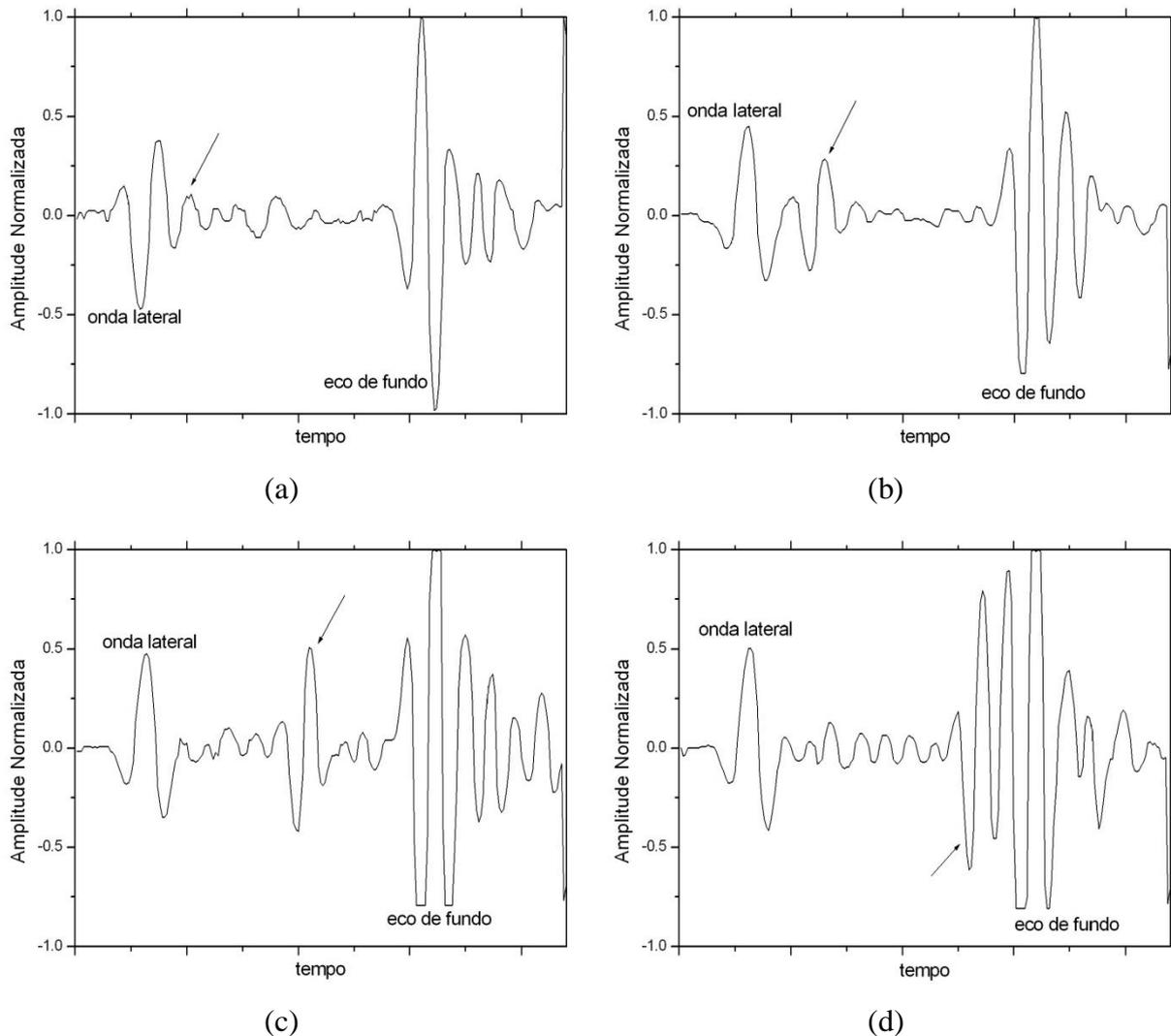
Fonte: Adaptado de Moura (2005)

Figura 52: Imagem D-scan produzida pela inspeção ultrassônica baseada na técnica TOFD.



Fonte: Adaptado de Moura (2005)

Figura 53: Sinais capturados experimentalmente por Moura (2005) durante inspeção ultrassônica automatizada do corpo de prova apresentado na figura 51: (a) sinal capturado sobre o entalhe de 15 mm; (b) sinal capturado sobre o entalhe de 10 mm; (c) sinal capturado sobre o entalhe de 5 mm; (d) sinal capturado sobre o entalhe de 2 mm.



Fonte: Adaptado de Moura (2005)

A análise dos sinais capturados sobre entalhes com diferentes tamanhos mostra a mesma variação da posição do eco refletido pela descontinuidade observada para os sinais simulados e discutida anteriormente. Obviamente, esse comportamento ocorre para todos os ângulos de transdutor. A comparação entre esses e os sinais simulados indica que a simulação produz resultados coerentes com o observado experimentalmente.

4.4 Sinais de descontinuidades do tipo 2 (Poro)

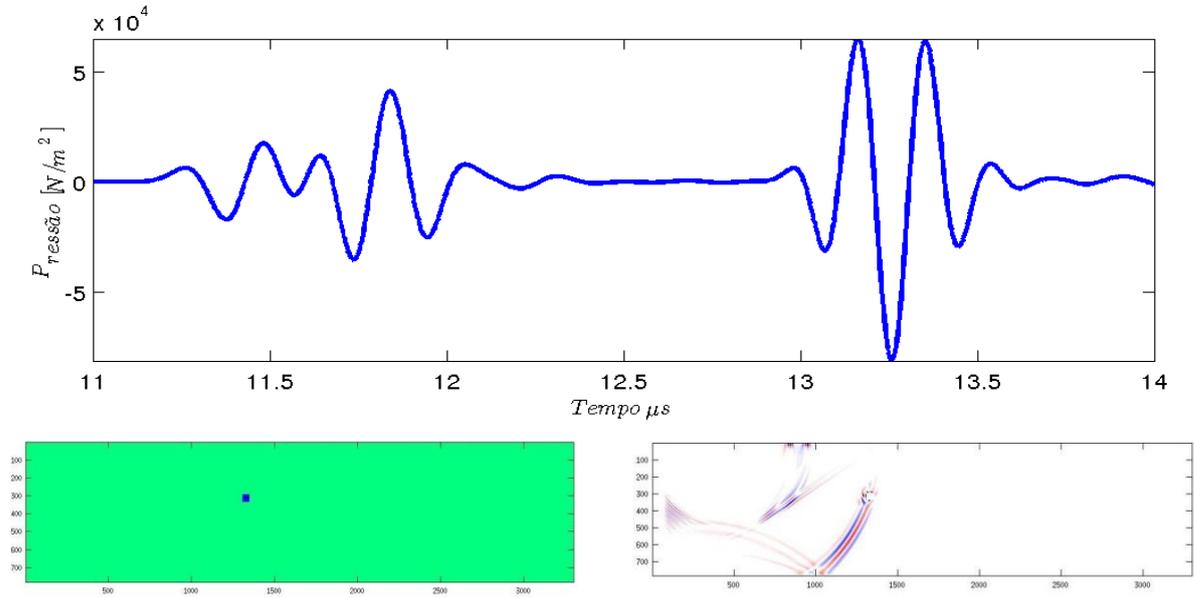
Nas figuras 54 a 71 vê-se a presença do eco difratado no poro. As figuras deixam evidente que o tamanho do poro resulta no aumento da amplitude do eco registrado pelo receptor em virtude de uma maior quantidade de energia ser refletida pelo obstáculo. Consequentemente, há uma queda de amplitude do eco de fundo.

As figuras 54 a 71 apresentam os resultados das dezoito simulações de propagação de onda em meios bidimensionais modelados contendo descontinuidades do tipo poro. Os A-scans produzidos durante as simulações permitem a visualização mais (e.g., Fig. 56, 61 e 68) e menos (e.g., Fig. 57, 59, 62) evidente das ondas difratadas nos poros, a depender posição da descontinuidade em relação à proximidade com a superfície de inspeção e superfície oposta. Ondas difratadas em descontinuidades muito próximas a essas superfícies alcançam o receptor sobrepostas à onda lateral ou à onda refletida na parede oposta, dificultando e, por vezes impossibilitando, sua identificação. A onda refletida em poros localizados próximos à superfície superior ou próximos à superfície inferior pode se sobrepor, respectivamente, à onda lateral (ver figura 57), e ao eco de fundo (ver figura 55), dificultando a sua visualização no sinal. Na literatura encontram-se disponíveis diversos relatos sobre a dificuldade de empregar a técnica TOFD para reproduzir corretamente perfis de defeitos localizados próximos à superfície de inspeção (SILVA, 1999) e (SILK, 1978).

É possível ainda verificar o efeito do tamanho do poro na quantidade de energia refratada, e/ou refletida, pelo obstáculo e seu efeito na amplitude das ondas registradas pelo receptor. Tais variações nas amplitudes das ondas difratadas provocam variações nas amplitudes dos ecos de fundo.

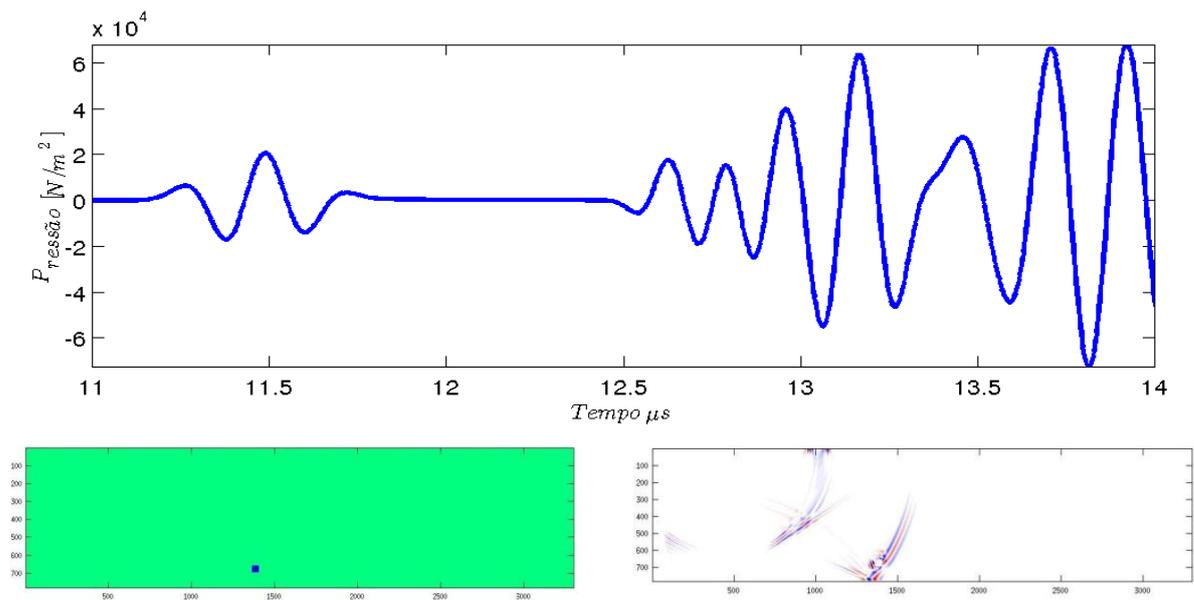
Uma análise qualitativa da simulação de sinais de descontinuidade do tipo 2 (poro) foi executada a partir da comparação com sinais reais capturados por Moura (2003, 2004, 2005b) durante a inspeção de soldas presentes em chapas de aço AISI 1020 com 20 mm de espessura. Durante o processo de soldagem foram intencionalmente inseridas descontinuidades do tipo: falta de fusão, falta de penetração e porosidades, gerando padrões de defeitos. Os defeitos inseridos foram mapeados através de ensaio ultrassônico convencional e radiográfico, revelando a posição, o tipo e a dimensão de cada um. Toda a configuração do ensaio está descrita em Moura (2003, 2004, 2005b) e é similar a empregada na inspeção do corpo de prova exibido pela figura 51.

Figura 54: Sinal simulado em um poro $L = 1 \text{ mm}$, $H = 1 \text{ mm}$.



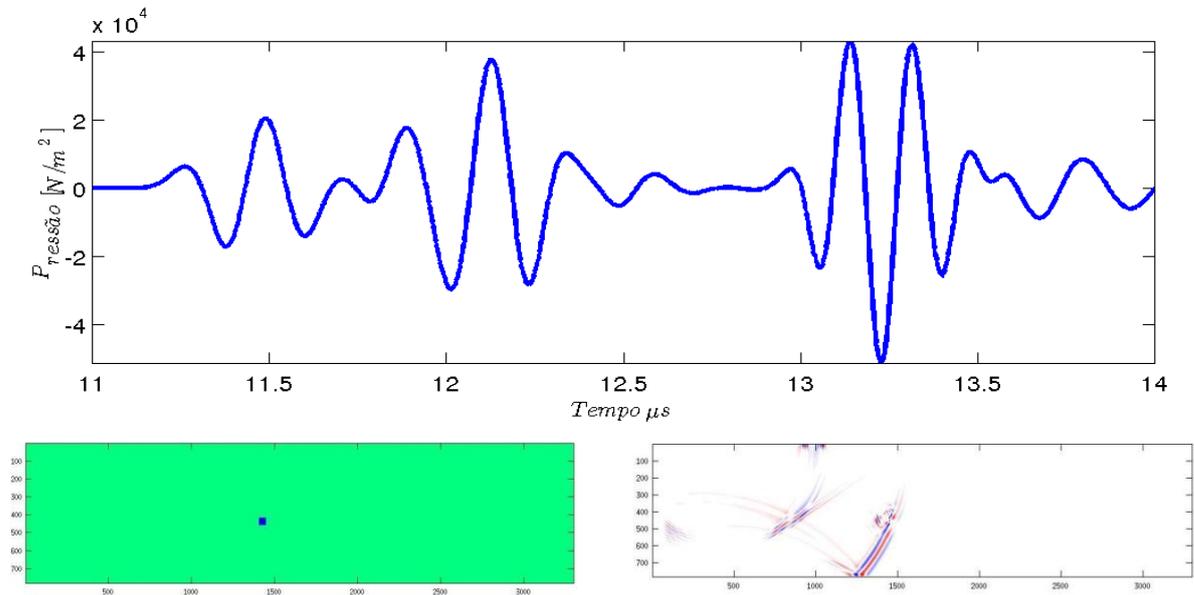
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 55: Sinal simulado em um poro $L = 1 \text{ mm}$, $H = 1 \text{ mm}$.



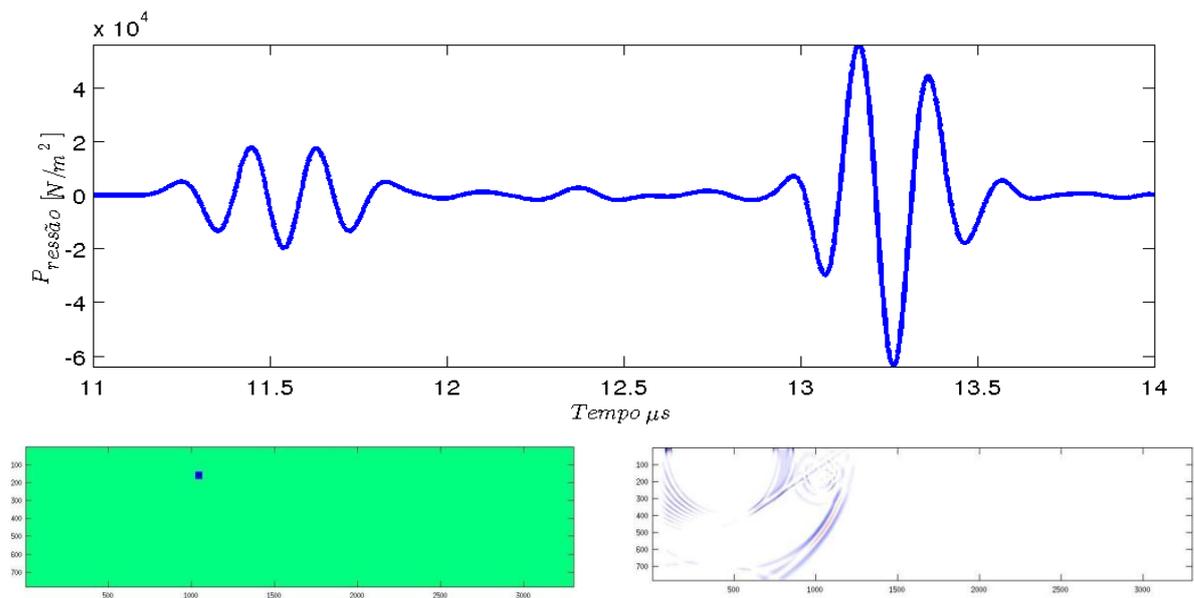
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 56: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



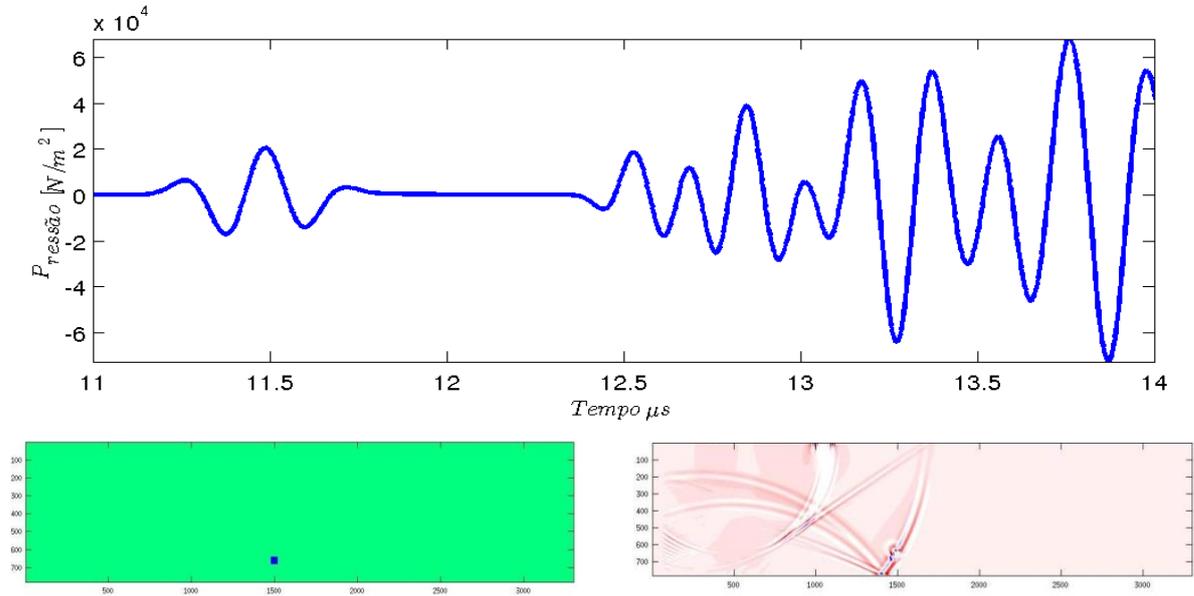
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 57: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



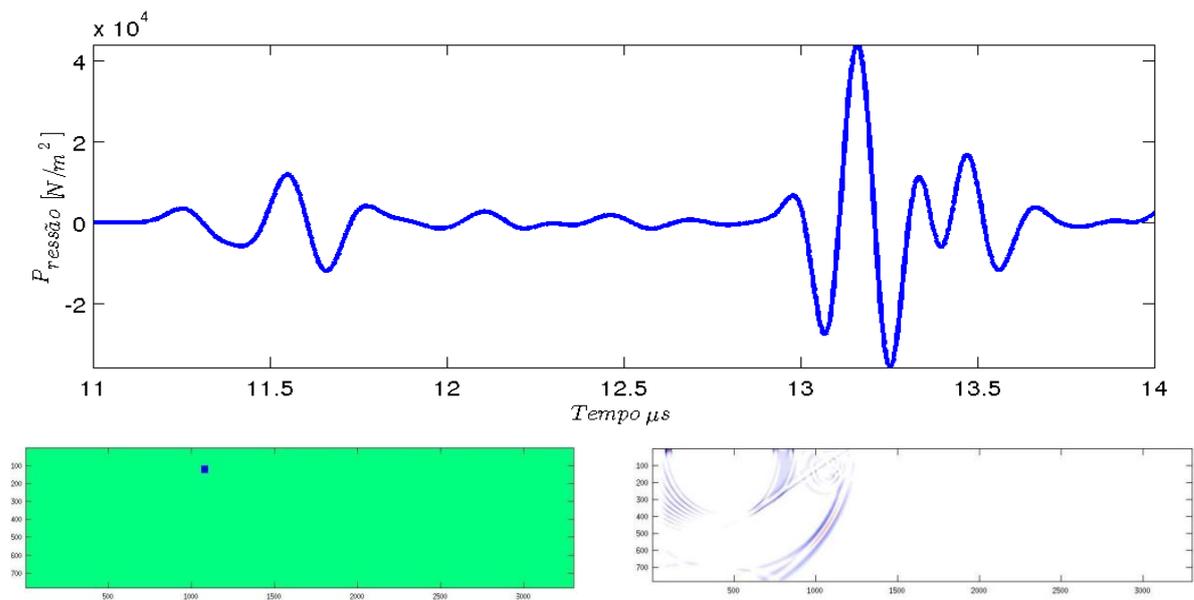
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 58: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



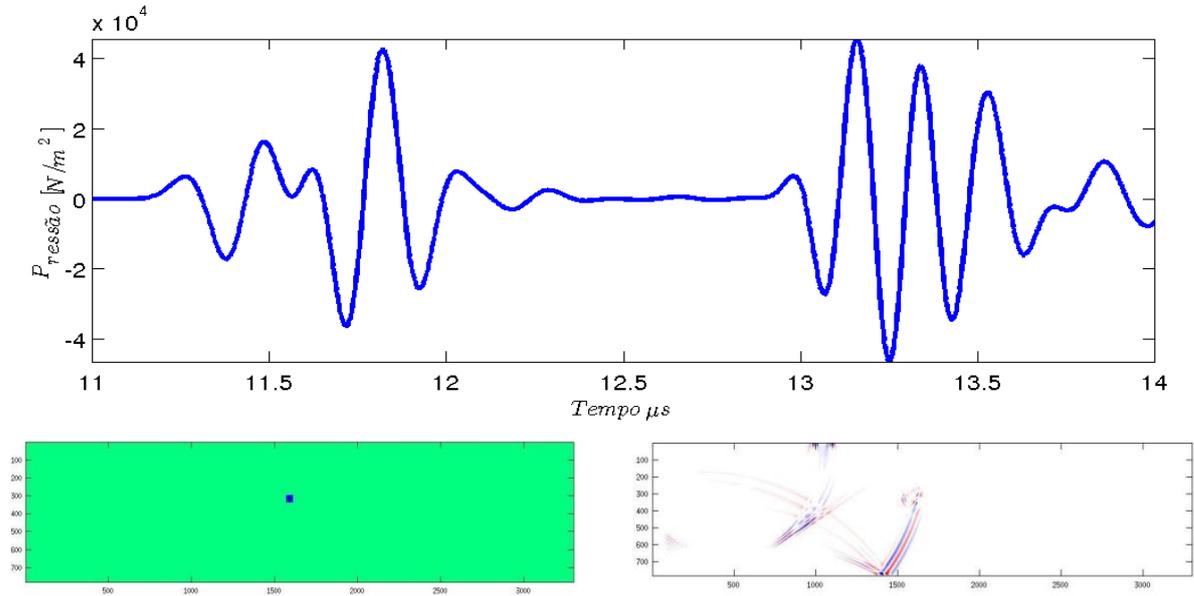
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 59: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



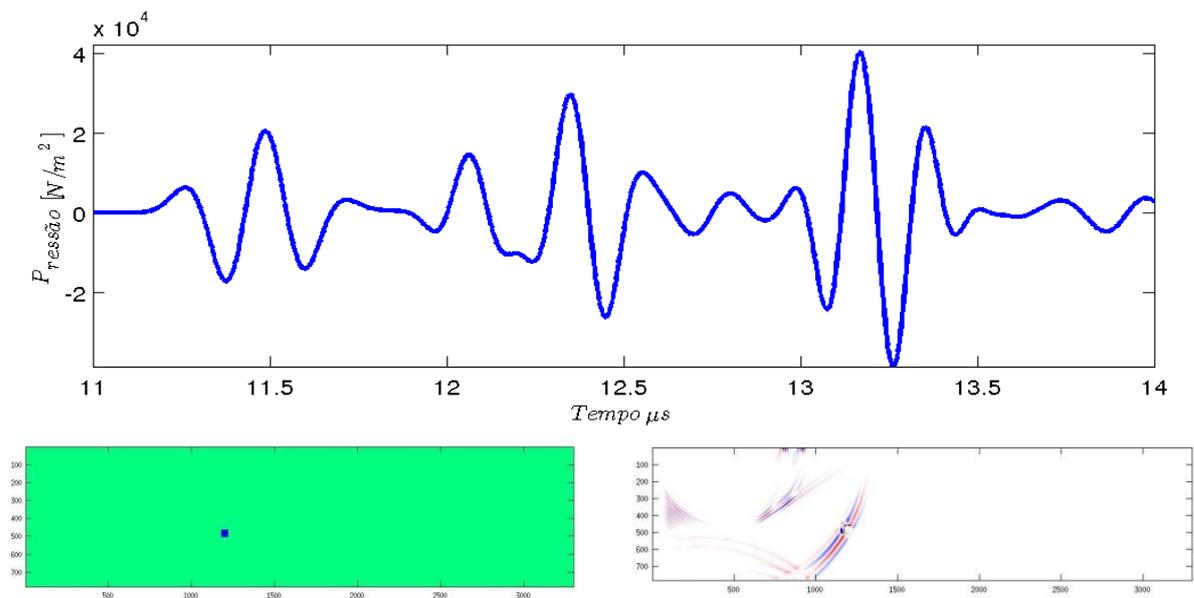
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 60: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



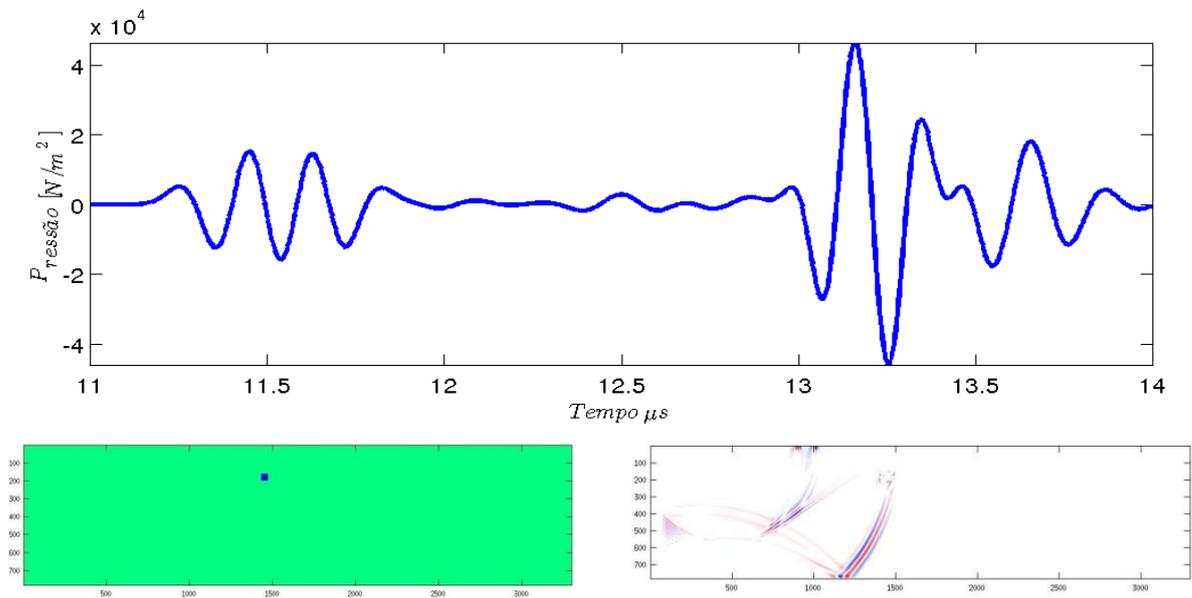
Fonte: figura do próprio autor.

Figura 61: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



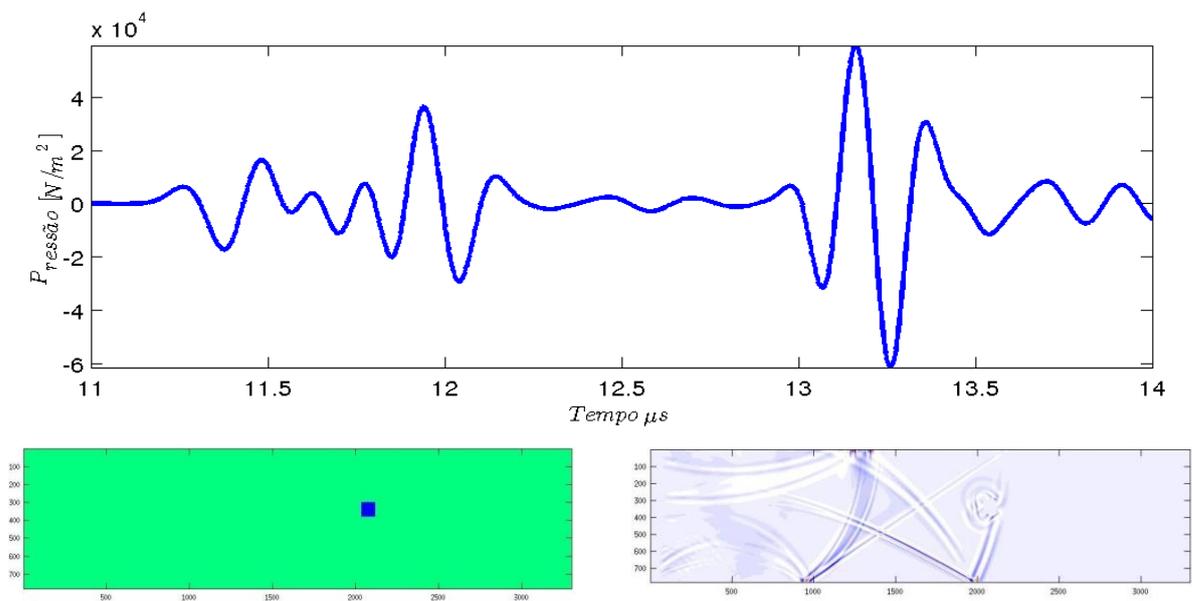
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 62: Sinal simulado em um poro $L = 1$ mm, $H = 1$ mm.



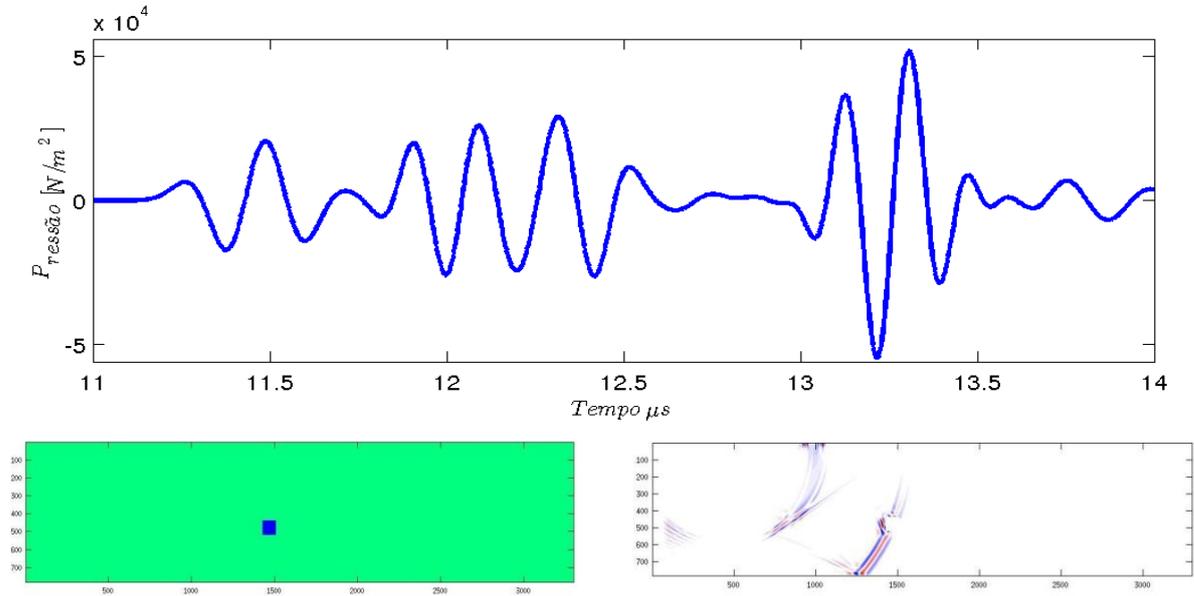
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 63: Sinal simulado em um poro $L = 2$ mm, $H = 2$ mm.



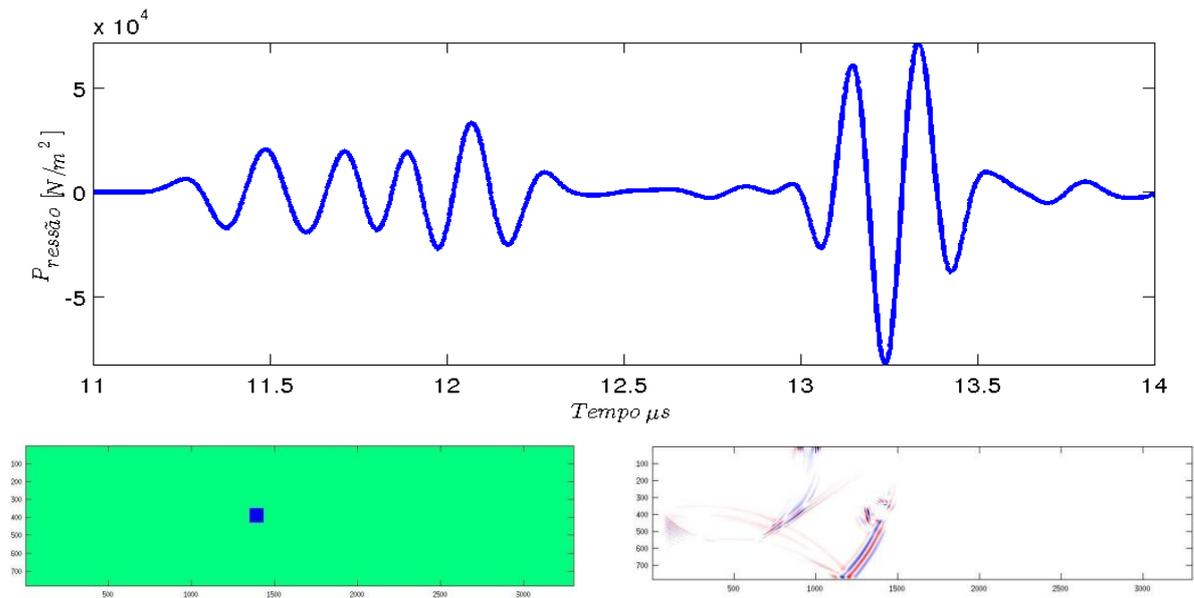
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 64: Sinal simulado em um poro $L = 2 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$.



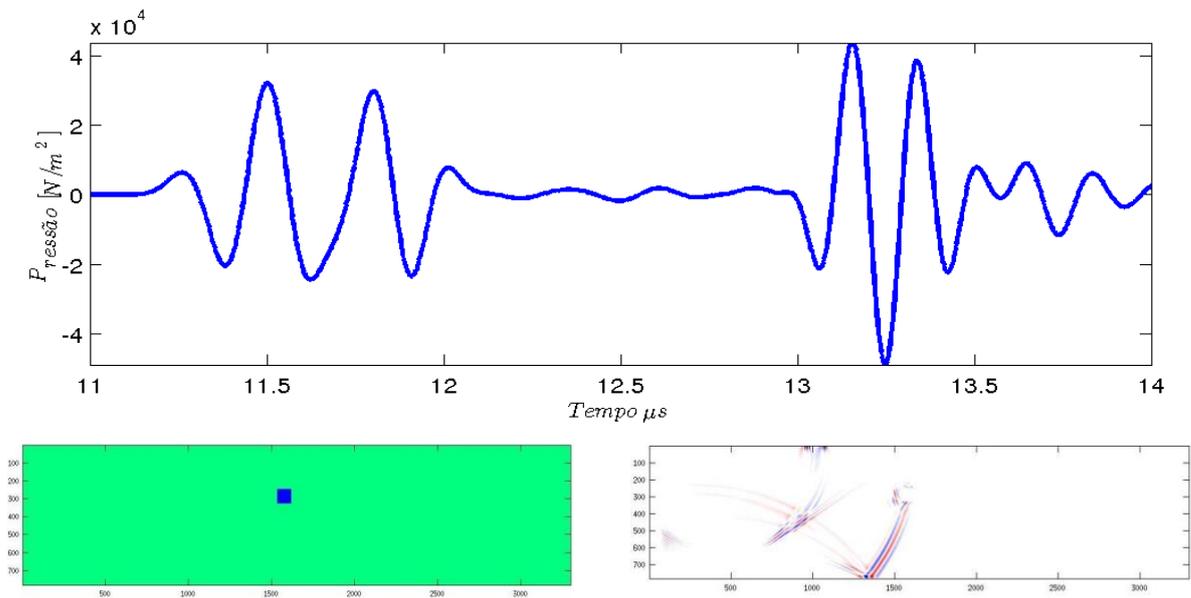
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 65: Sinal simulado em um poro $L = 2 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$.



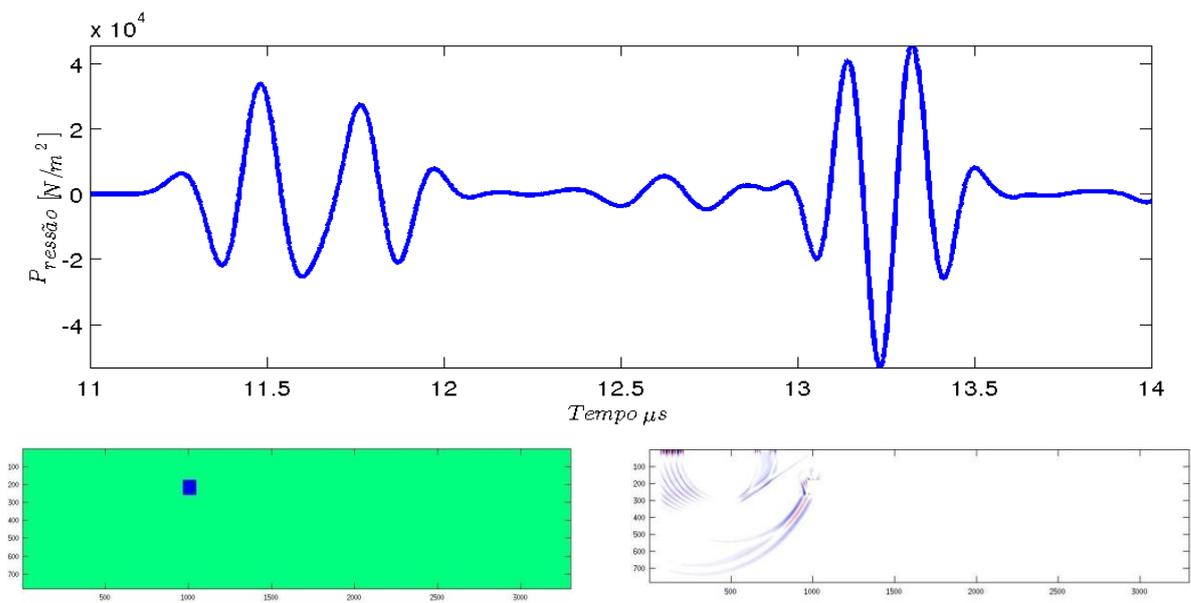
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 66: Sinal simulado em um poro $L = 2 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$.



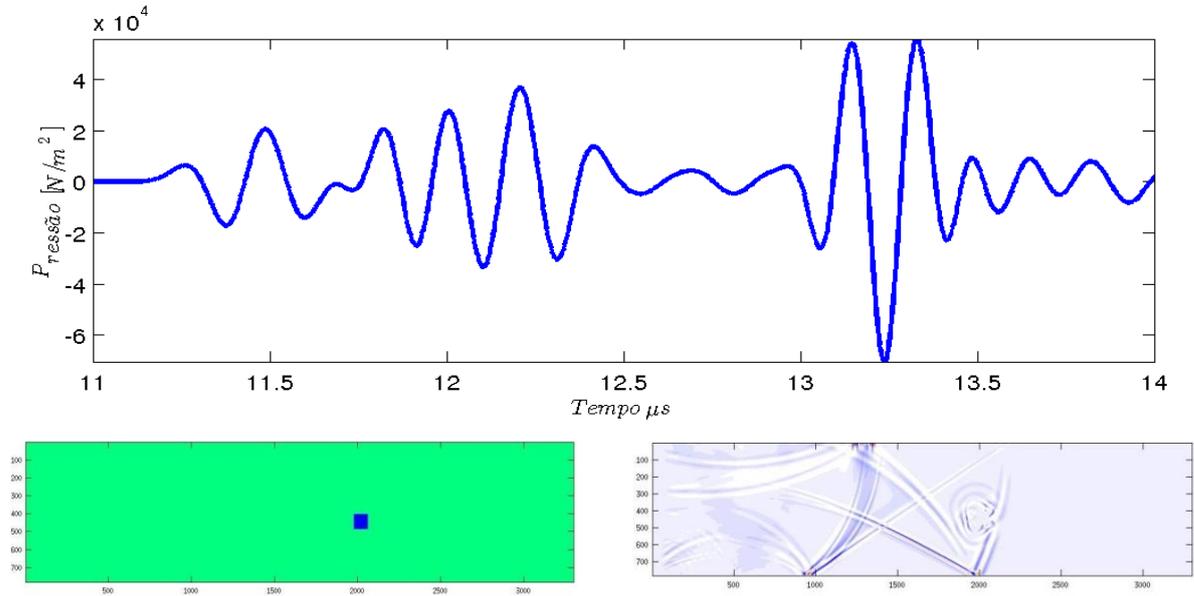
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 67: Sinal simulado em um poro $L = 2 \text{ mm}$, $H = 2 \text{ mm}$.



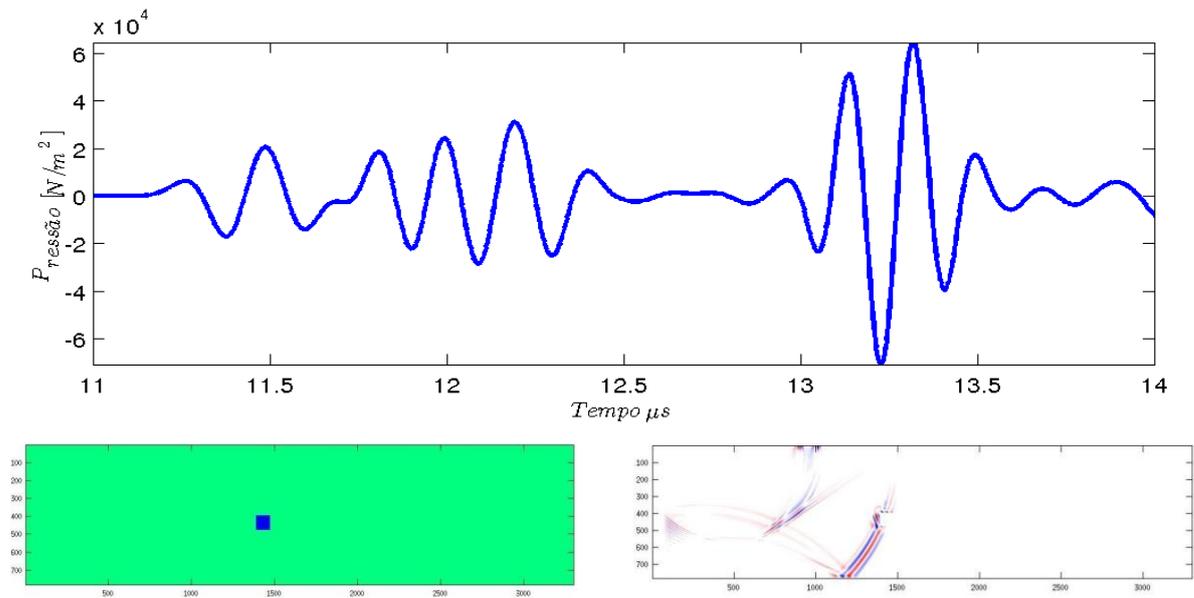
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 68: Sinal simulado em um poro $L = 2$ mm, $H = 2$ mm.



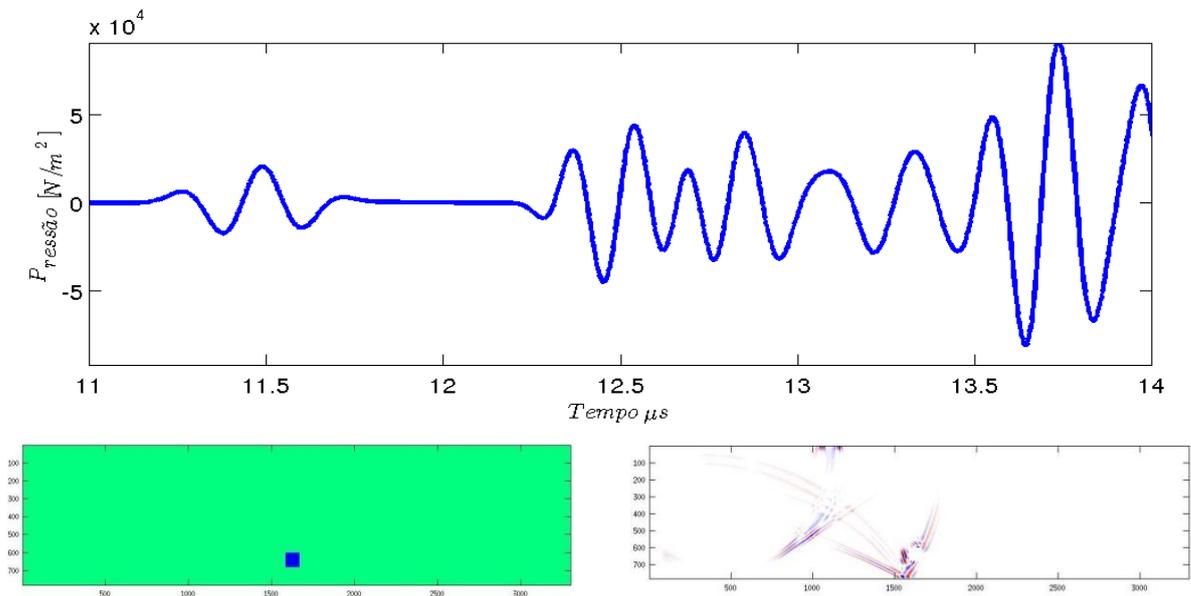
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 69: Sinal simulado em um poro $L = 2$ mm, $H = 2$ mm.



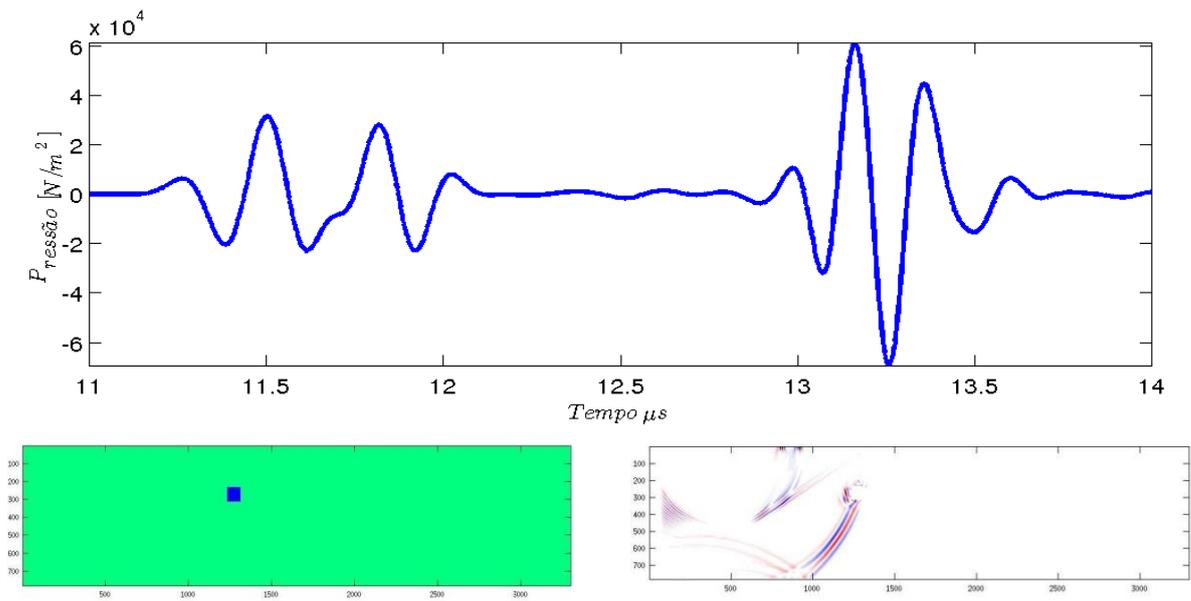
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 70: Sinal simulado em um poro $L = 2$ mm, $H = 2$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

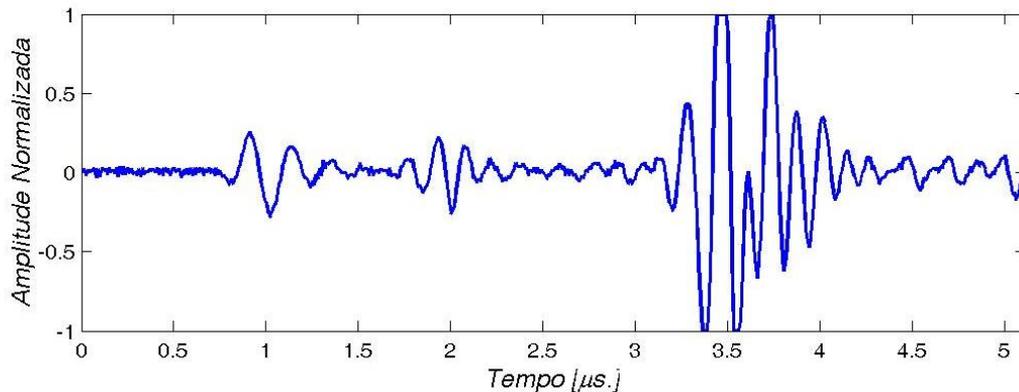
Figura 71: Sinal simulado em um poro $L = 2$ mm, $H = 2$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

A figura 72 apresenta um A-scan capturado experimentalmente por Moura (2003, 2004, 2005b) sobre uma região de um corpo de prova contendo um poro. Pode-se observar a semelhança entre o sinal real e os simulados.

Figura 72: Sinal real capturado em um poro.

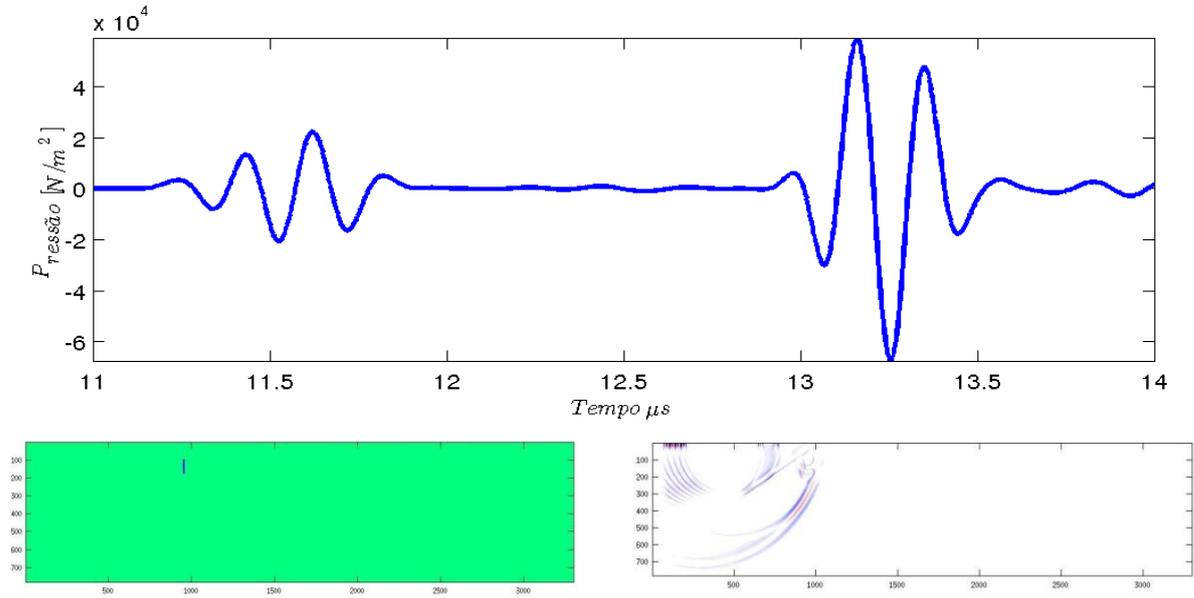


Fonte: Moura (2003)

4.5 Sinais de descontinuidades do tipo 3 (Trinca)

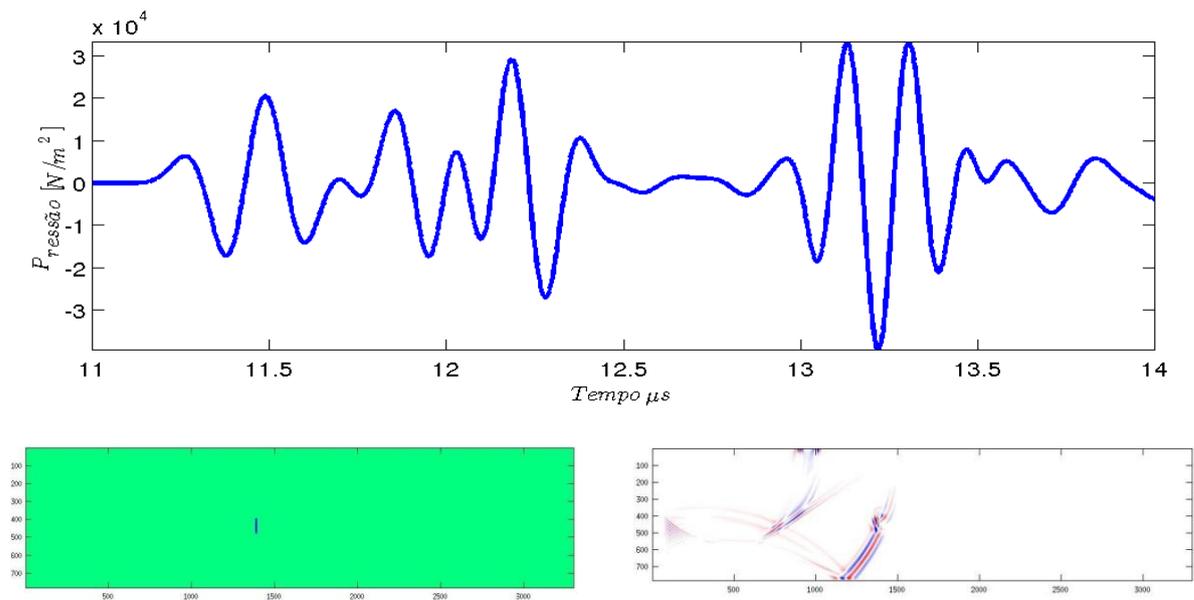
Nas figuras 73 a 90 (referentes às descontinuidades tipo 3 que procura retratar uma trinca longitudinal ou um caso particular de falta de fusão) pode-se perceber a presença das ondas difratadas pelas pontas superior e inferior do defeito entre a onda lateral e o eco de fundo. Como visto na seção 2.3 da revisão, quando se utiliza a técnica TOFD, a primeira onda a alcançar o receptor corresponde à onda lateral, e caso não exista descontinuidade a segunda onda corresponde ao eco de fundo. Caso uma trinca esteja presente no interior do material, o sinal difratado na extremidade superior de uma descontinuidade percorre um menor caminho e chega ao receptor antes do sinal gerado na extremidade inferior. Para defeitos próximos à superfície superior (superfície de varredura) a onda difratada na ponta superior da descontinuidade se sobrepõe a onda lateral (e.g., Fig. 73, 77, 80). Por outro lado, a onda difratada na ponta inferior da descontinuidade se sobrepõe ao eco de fundo quando o defeito encontra-se próximo à superfície oposta. Por esta razão, os picos referentes às pontas superior e inferior podem não aparecerem muito evidentes no sinal A-scan.

Figura 73: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



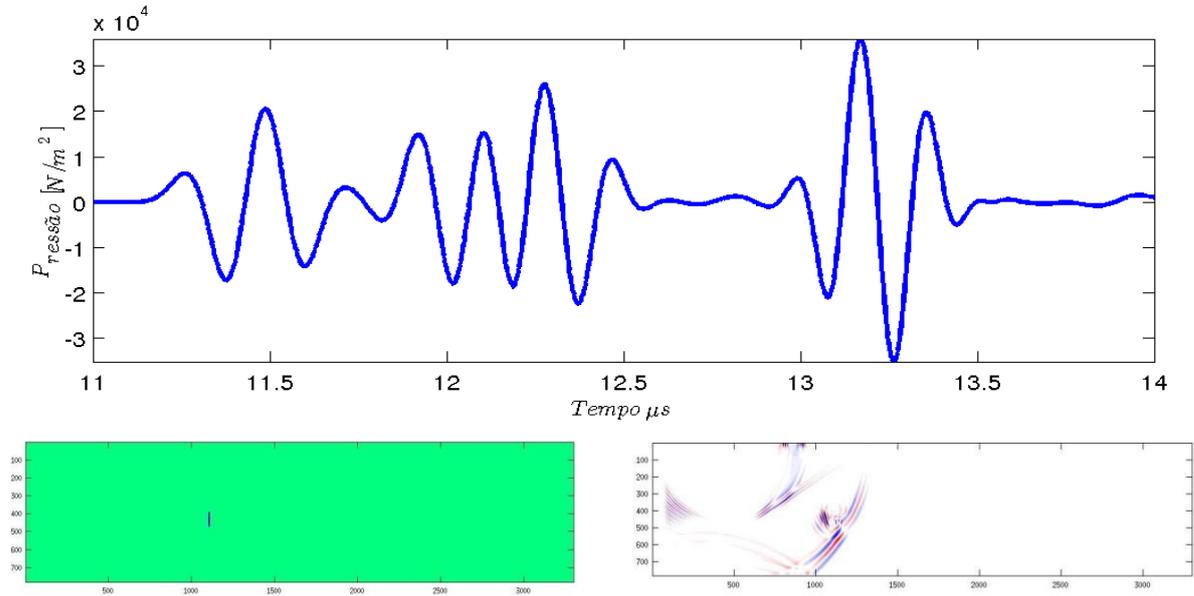
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 74: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



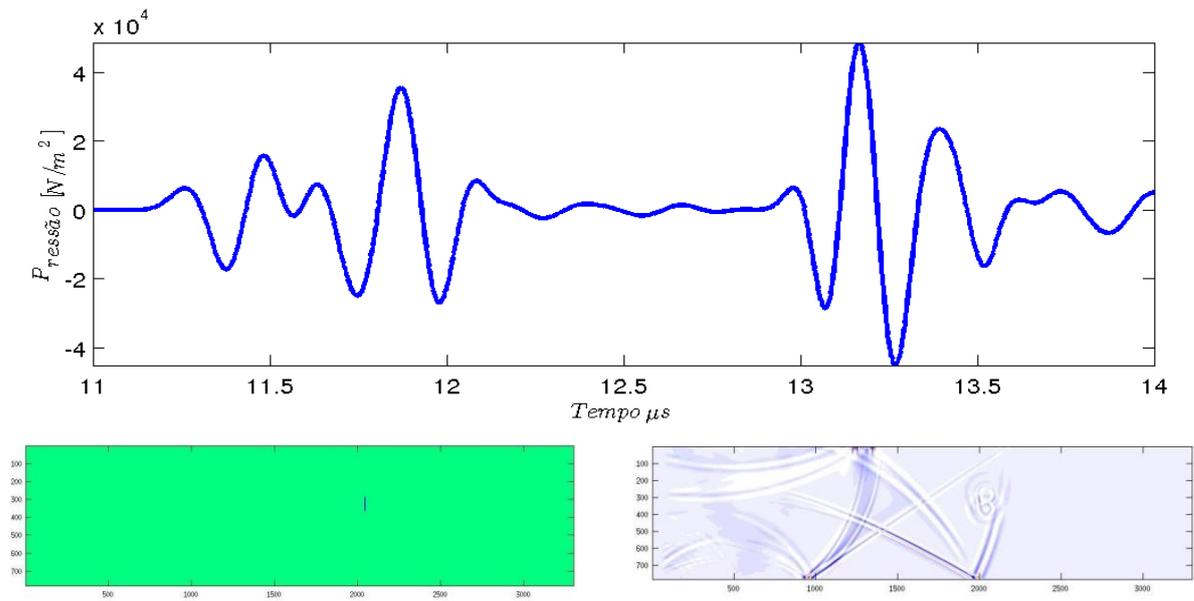
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 75: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



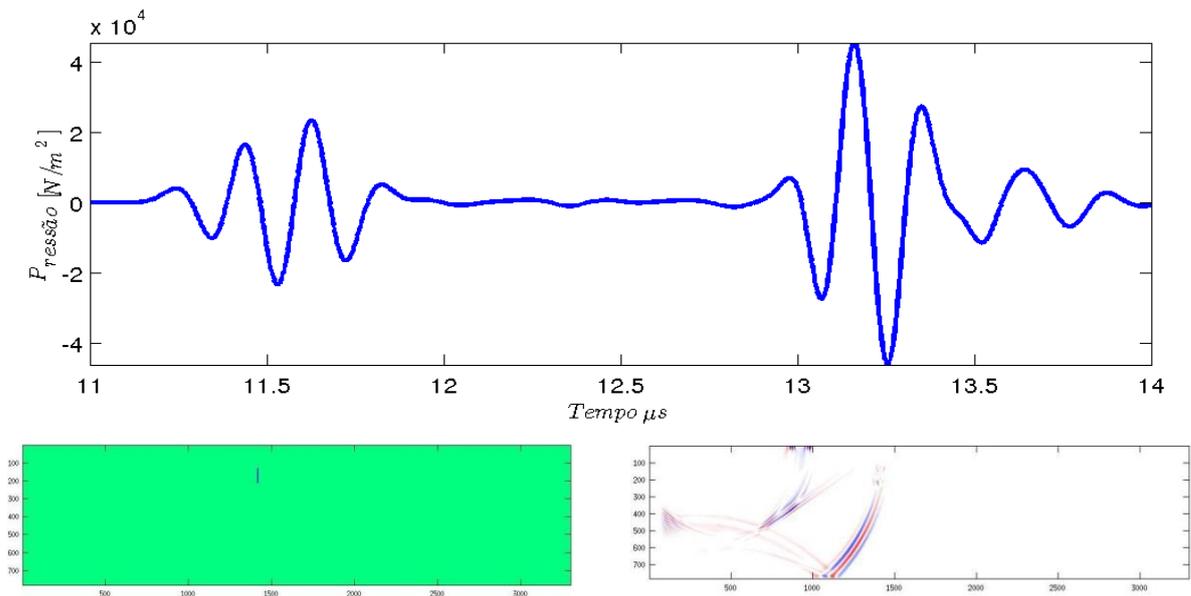
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 76: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



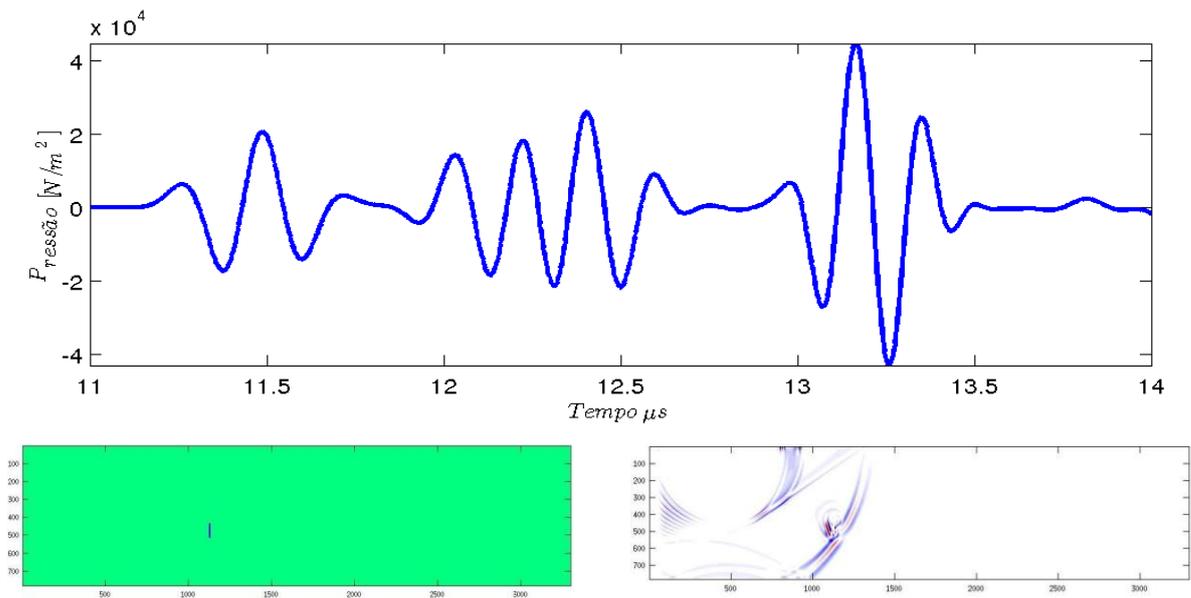
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 77: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



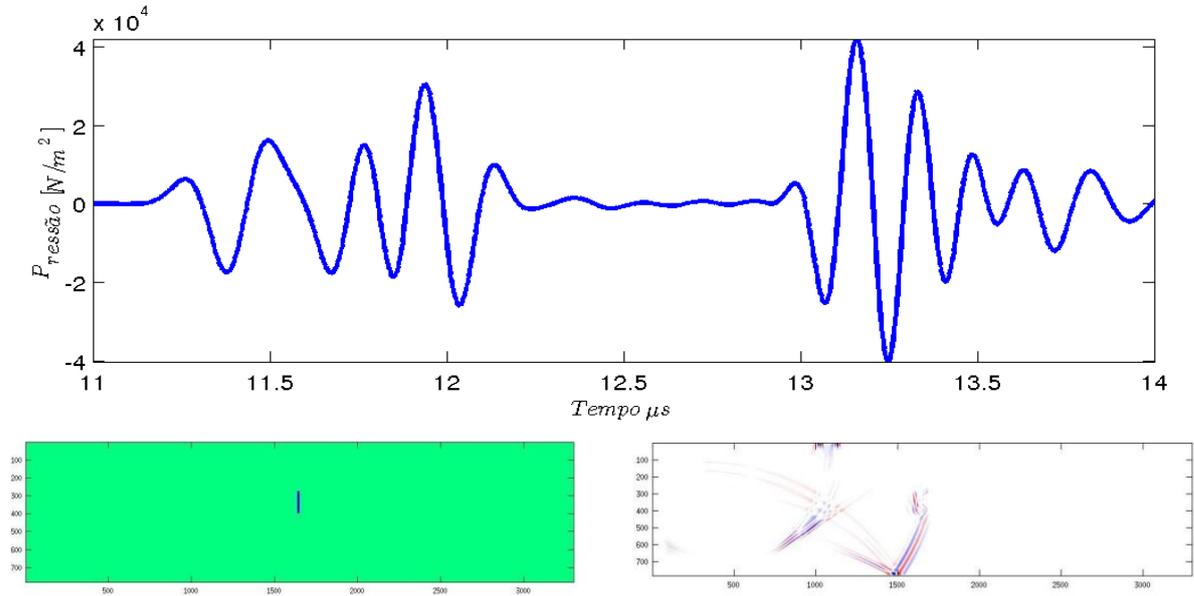
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 78: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.2$ mm, $H = 2$ mm.



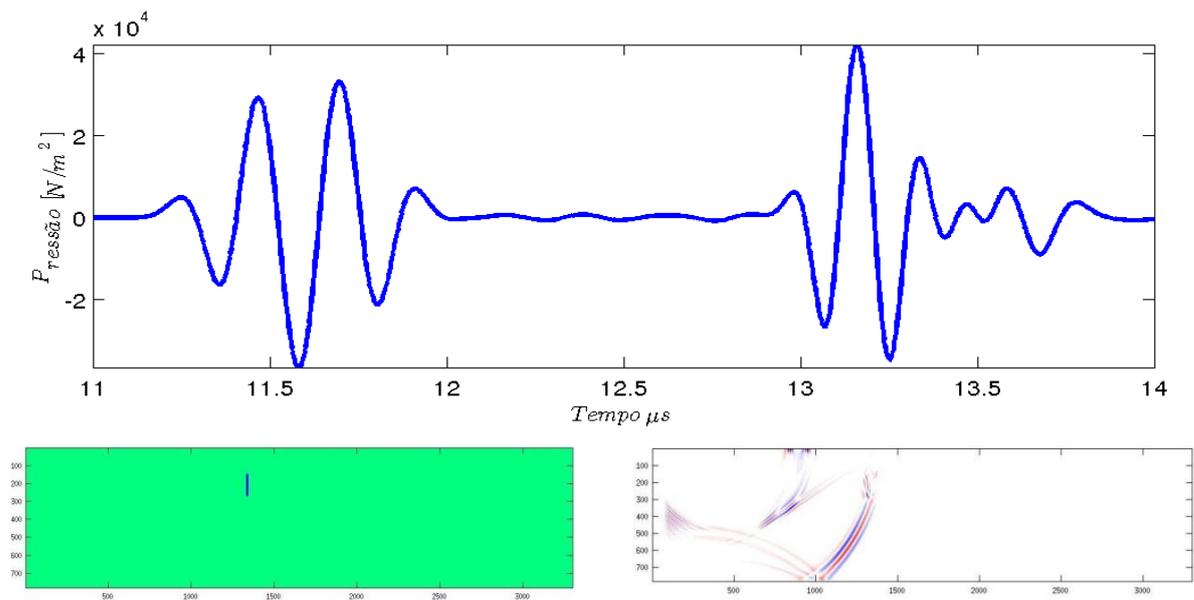
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 79: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



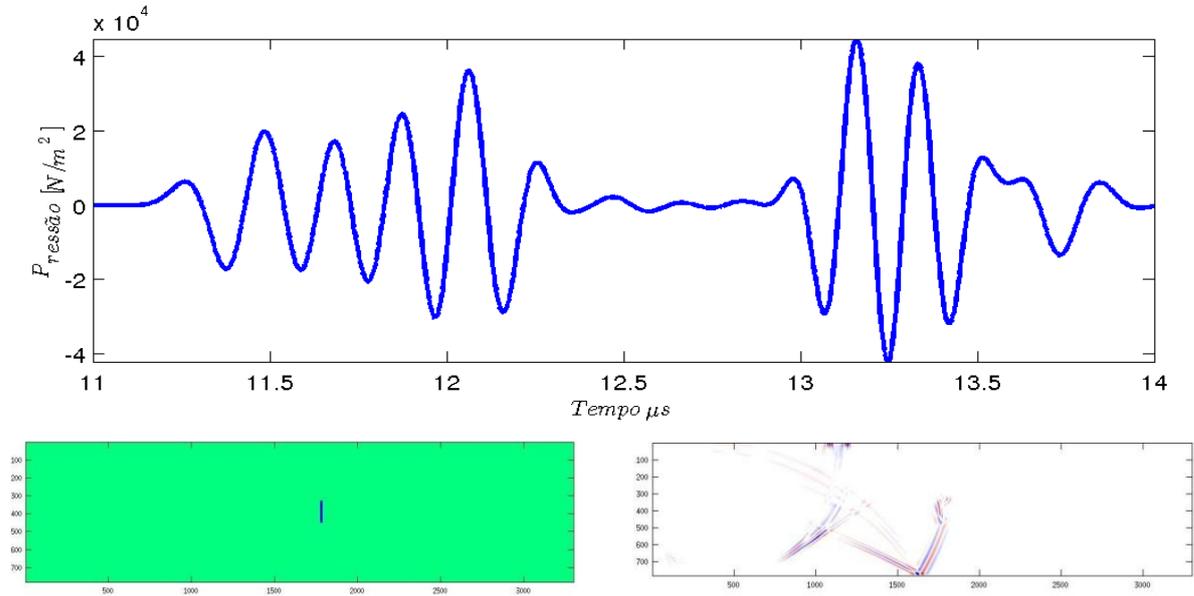
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 80: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



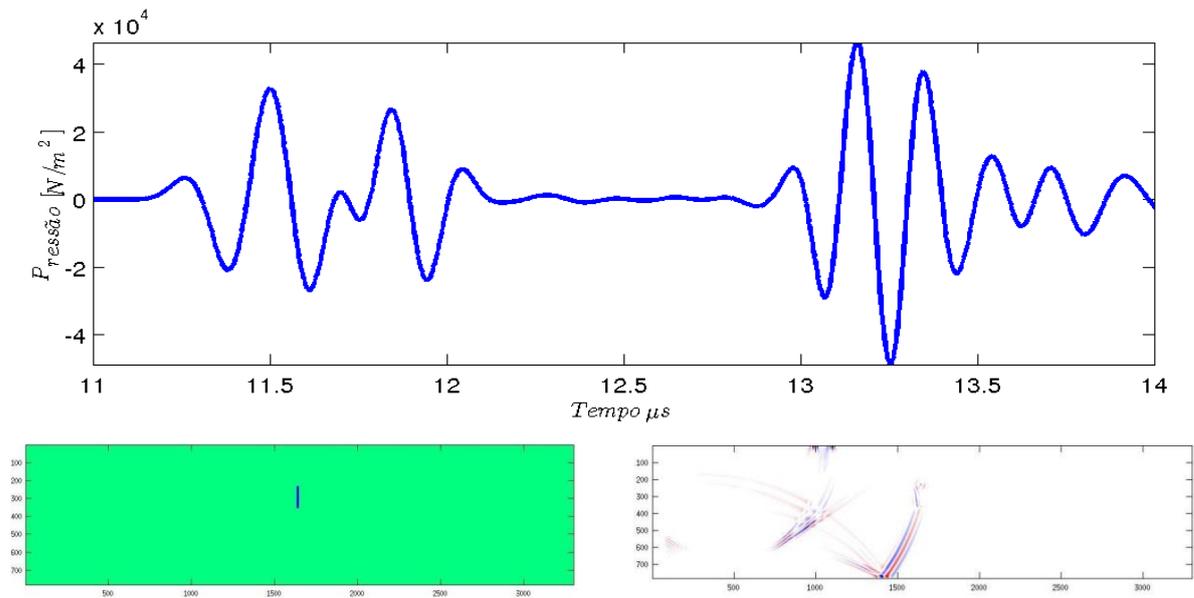
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 81: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



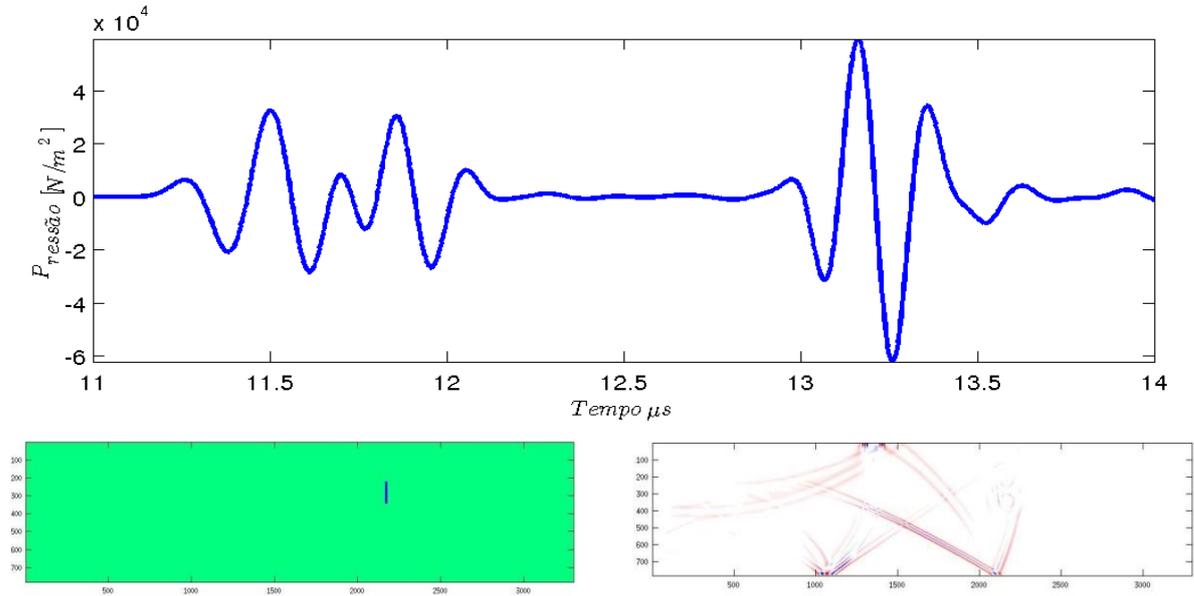
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 82: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



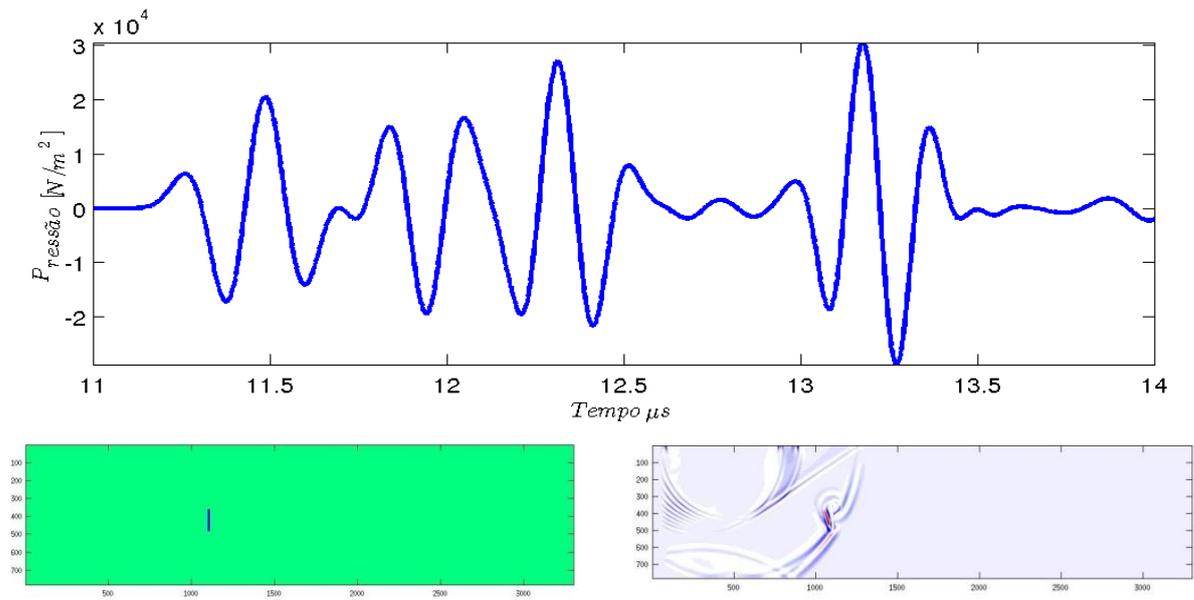
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 83: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



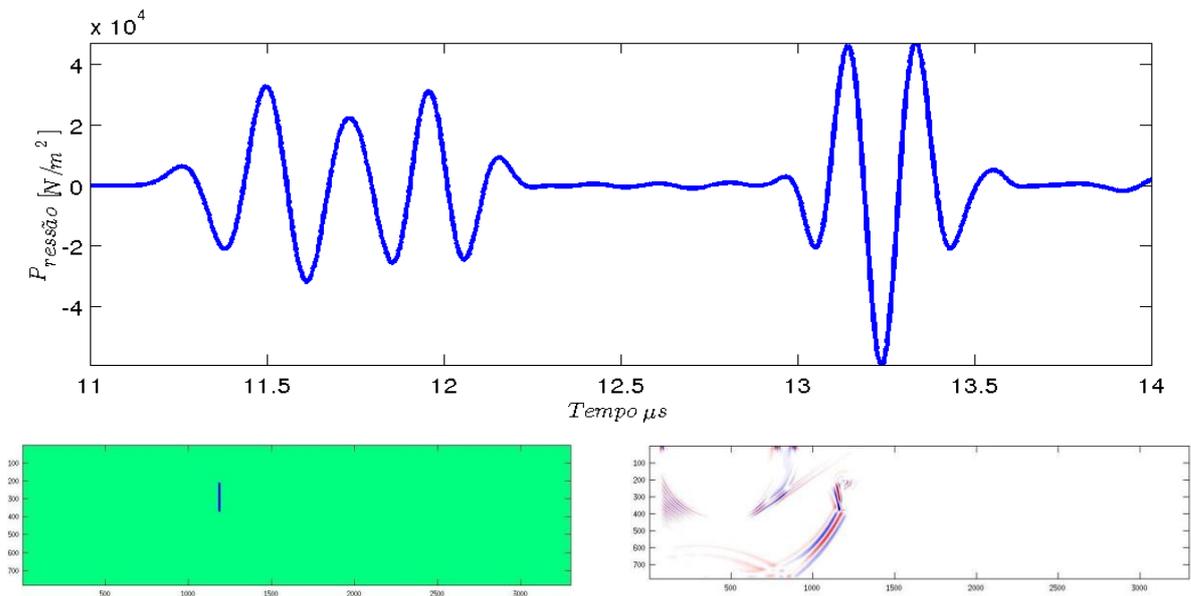
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 84: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.3$ mm, $H = 3$ mm.



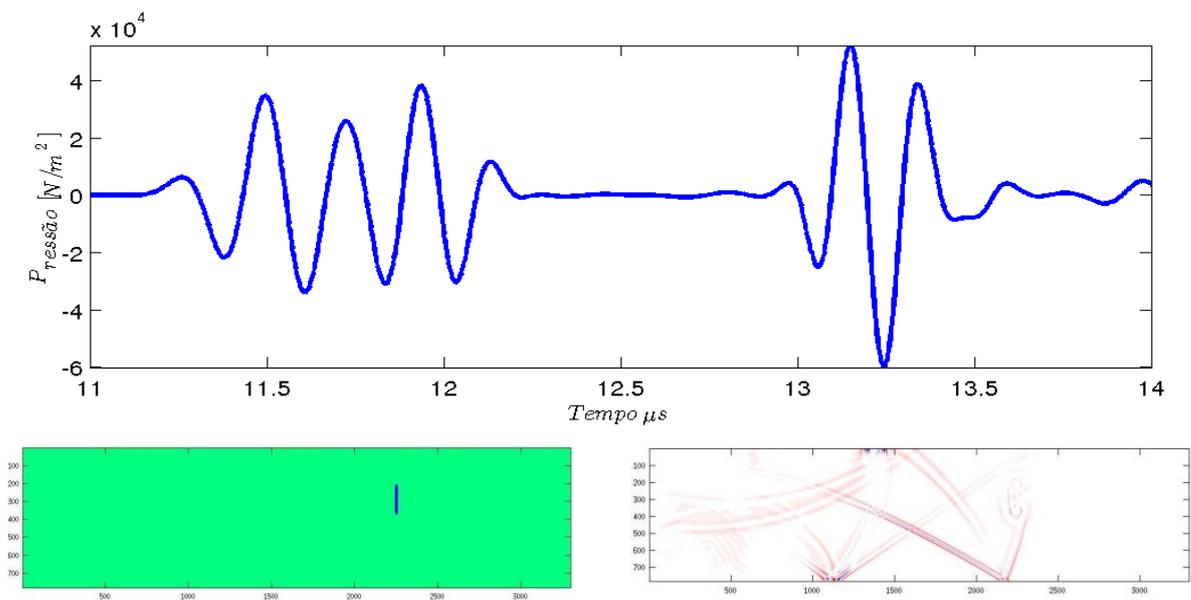
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 85: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



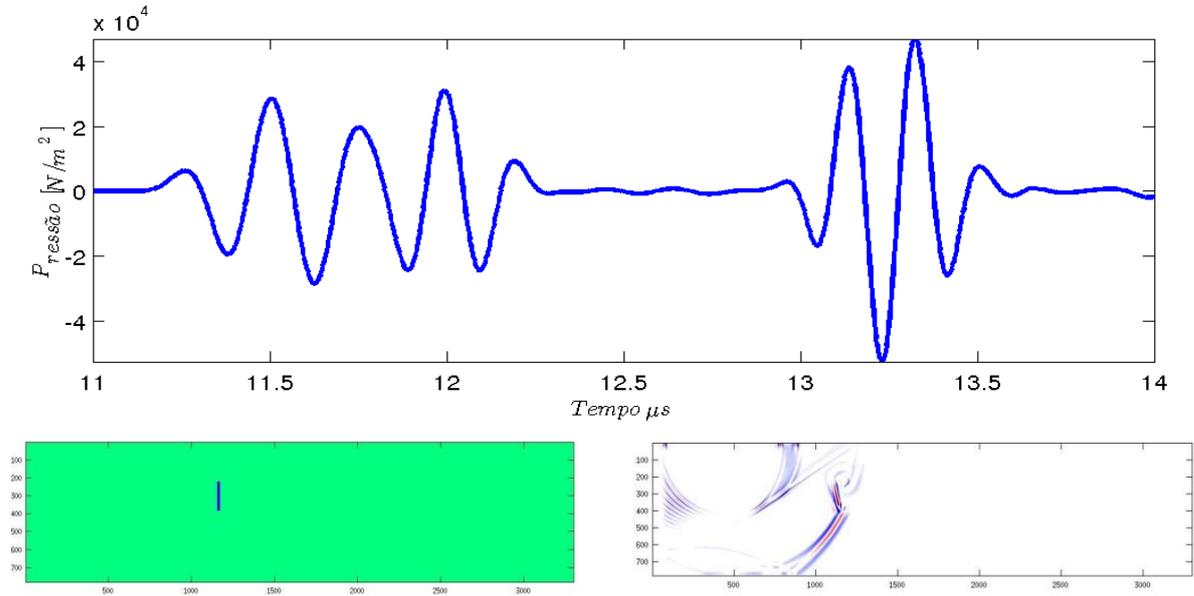
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 86: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



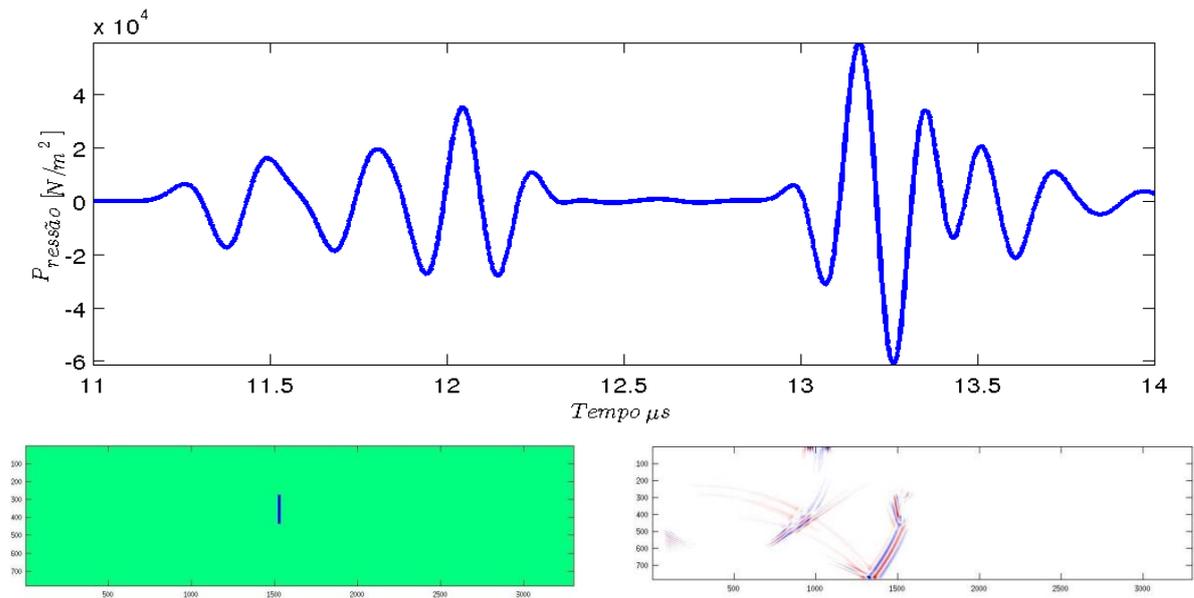
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 87: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



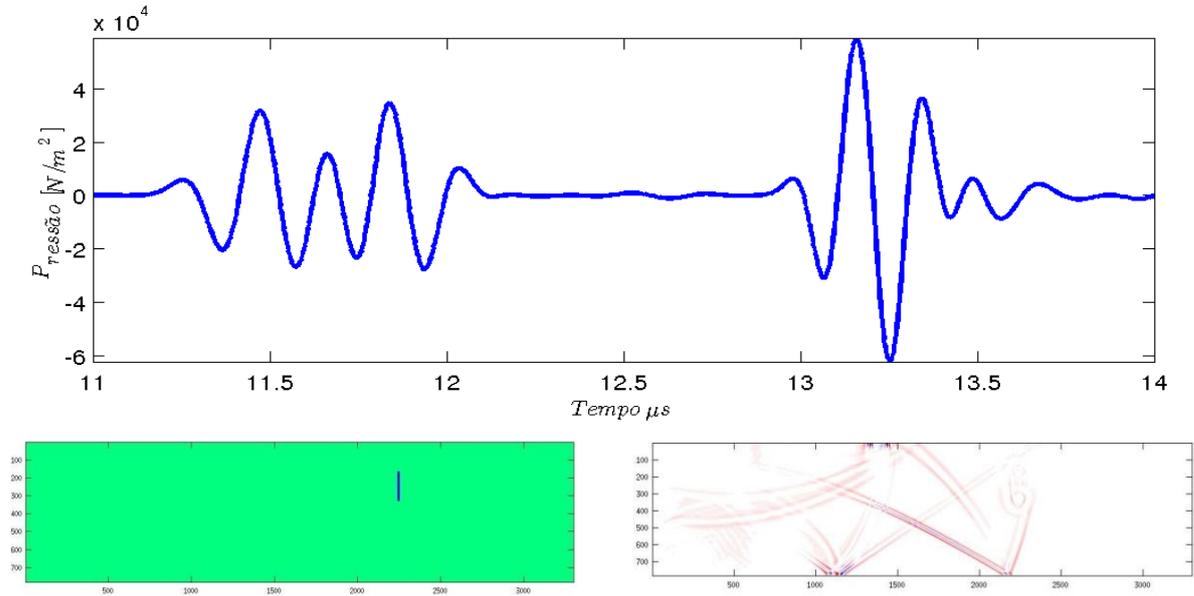
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 88: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



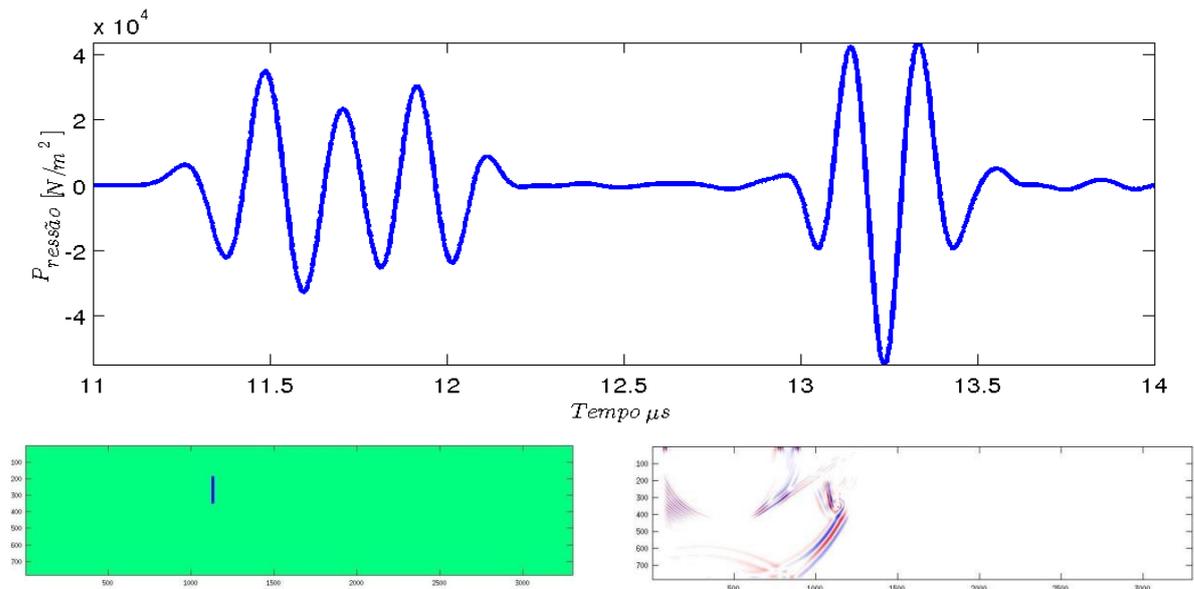
Fonte: figura do próprio autor.

Figura 89: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

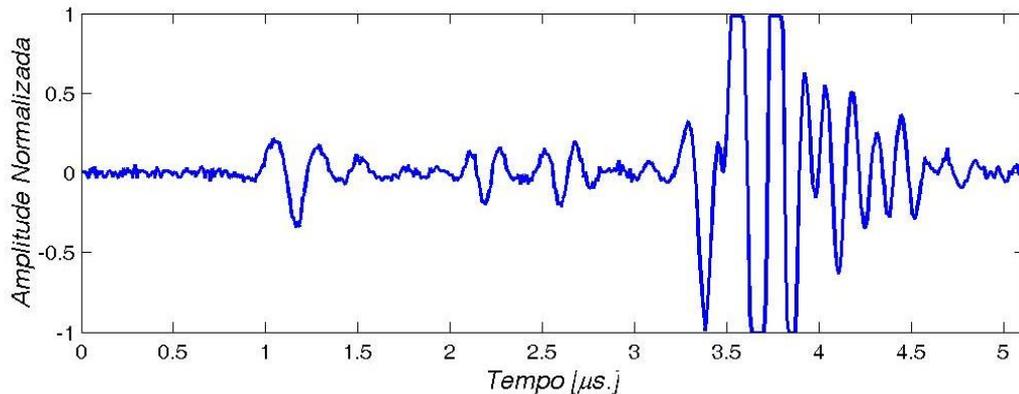
Figura 90: Sinal simulado em uma trinca longitudinal $L = 0.4$ mm, $H = 4$ mm.



Fonte: Figura do próprio autor.

A figura 91 apresenta um A-scan capturado experimentalmente por Moura (2003, 2004, 2005b) sobre uma região de um corpo de prova contendo uma falta de fusão. Pode-se observar a semelhança entre o sinal real e os simulados.

Figura 91: Sinal real capturado sobre uma falta de fusão.



Fonte: Moura (2003).

4.6 Cálculo do desempenho da paralelização da simulação

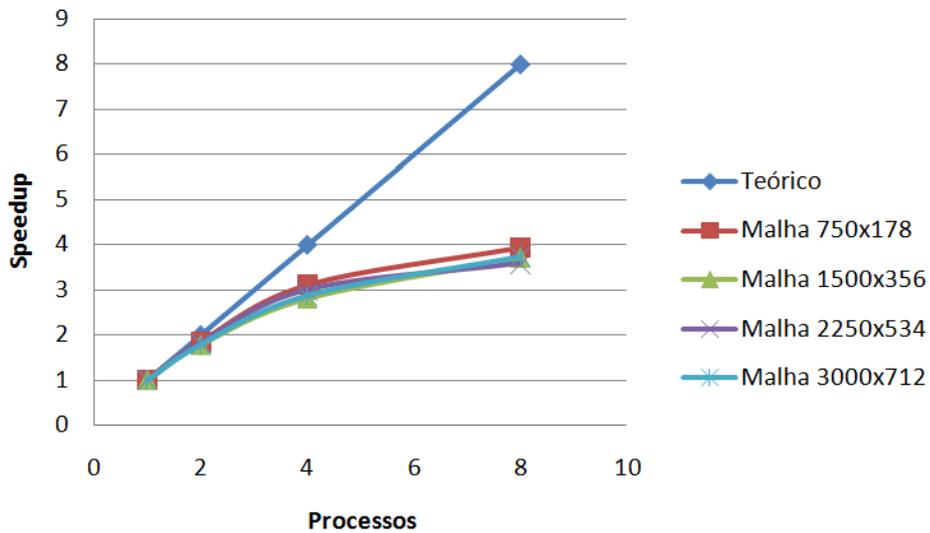
O cálculo do *speedup* da versão paralela do programa foi realizado com o uso da equação 64, durante a simulação da propagação de onda em um meio modelado sem defeito, para diferentes números de processos e tamanhos de malha. Os tamanhos de malha considerados (número de volumes na direção x versus número de volumes na direção z) foram = $\{(750 \times 178), (1500 \times 356), (2250 \times 234)$ e $(3000 \times 712)\}$. A figura 92 mostra os resultados obtidos em comparação com o valor teórico ideal.

Constata-se que para o problema proposto a utilização de 8 processos representa um ganho significativo do *speedup* em 4 vezes em relação a execução com apenas um processo que pode ser equivalente a versão sequencial do programa. No entanto, para quantidades maiores de processos observa-se uma queda expressiva do *speedup*, provavelmente devido a grande troca de informações realizada entre os processos. A figura 93 revela que o *speedup* pode ser inferior à execução com apenas um processo.

Também foram calculados os tempos de execução para os quatro tamanhos de malhas citadas anteriormente e variando o número de processos entre 1 e 32. Os resultados desses cálculos podem ser visualizados nas figuras 92, 93, 94, e 95, e mostram que aumento do número de processos para valores superiores a 8 ocasiona aumento substancial do tempo de

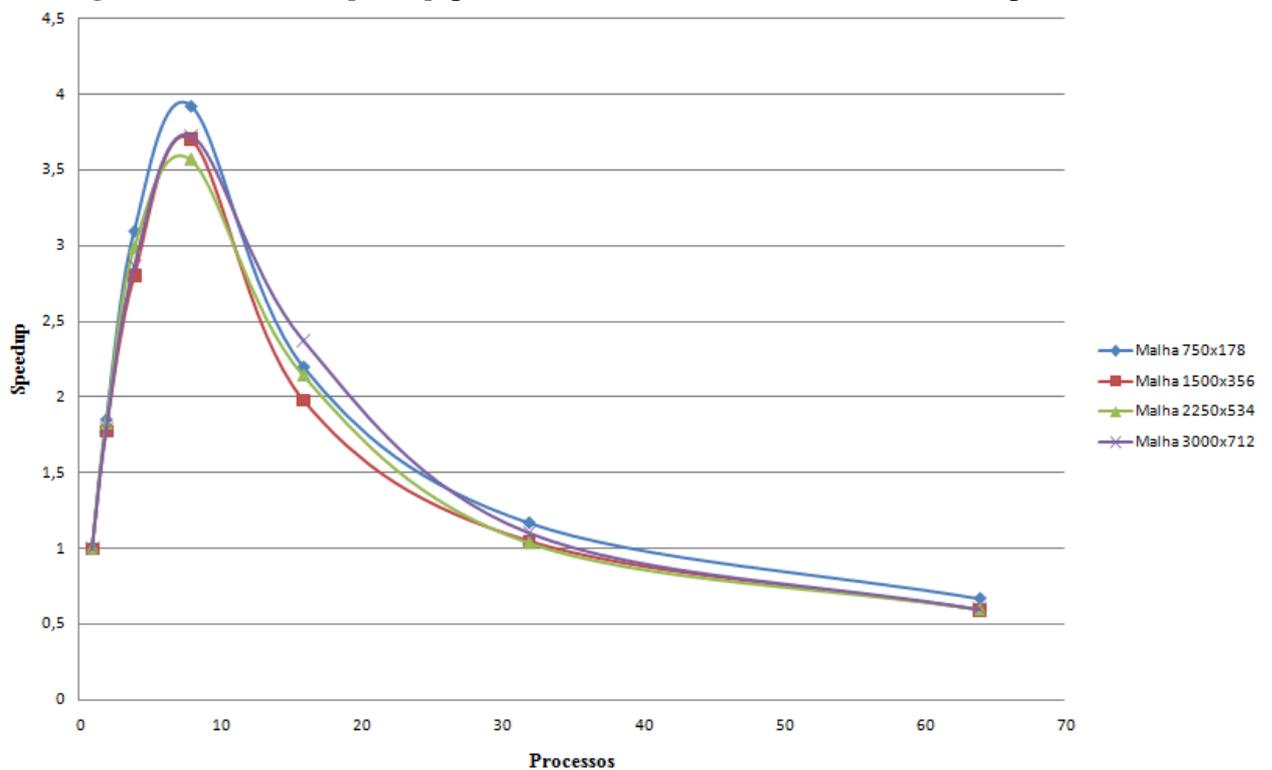
execução, confirmando as medidas de *speedup* realizadas, e levando concluir que, para o problema proposto, melhores tempos são obtidos com até 8 processos.

Figura 92: Curva de *speedup* para diferentes tamanhos de malha.



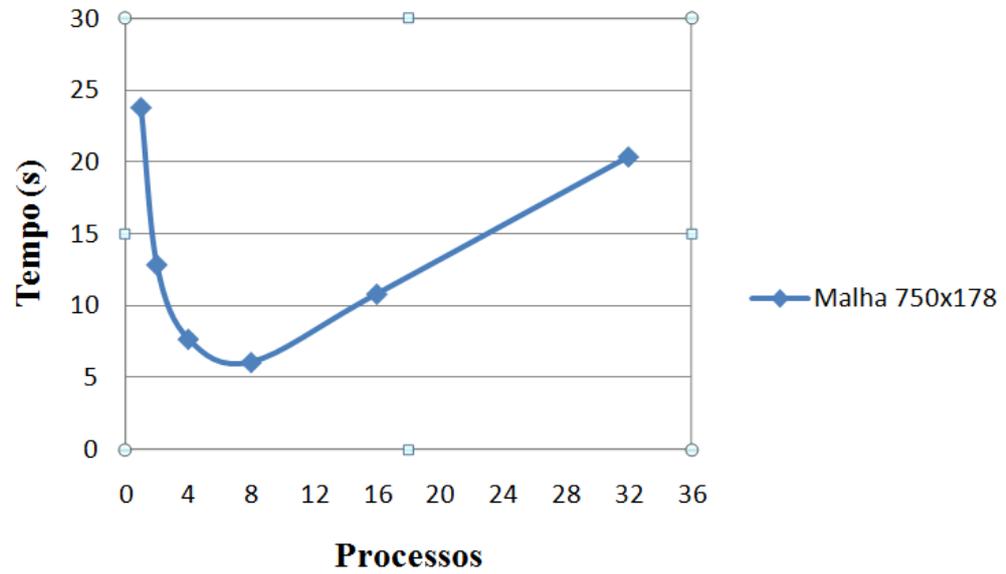
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 93: Curva de *speedup* para diferentes tamanhos de malha com 64 processos.



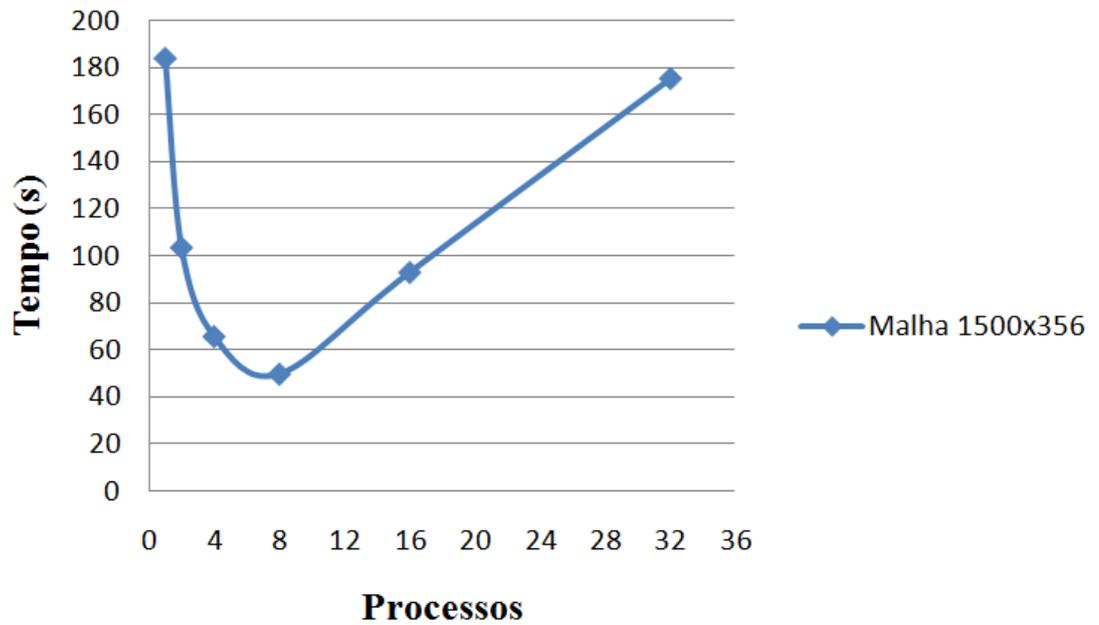
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 94: Tempo de execução para uma malha de 750x178 volumes.



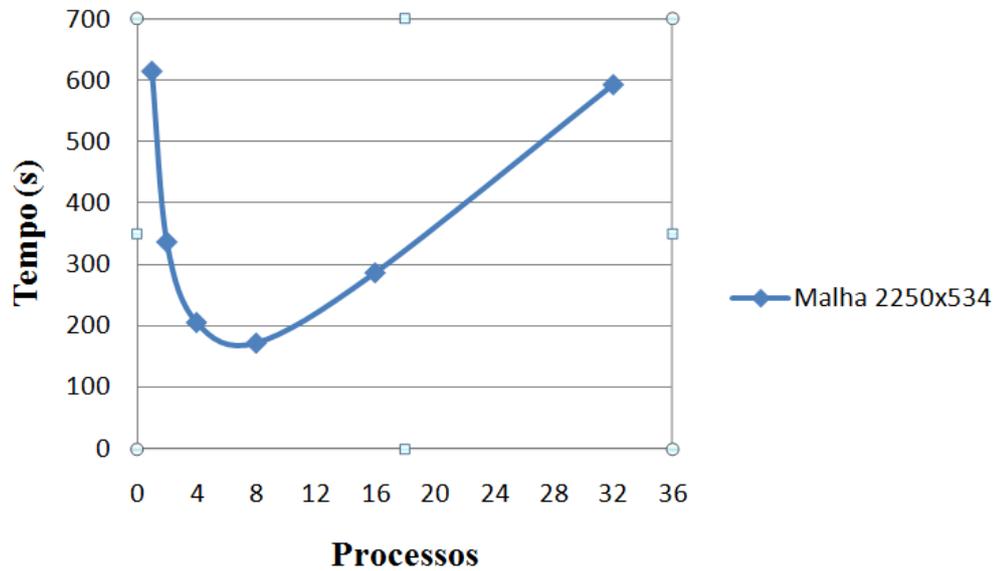
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 95: Tempo de execução para uma malha de 1500x356 volumes.



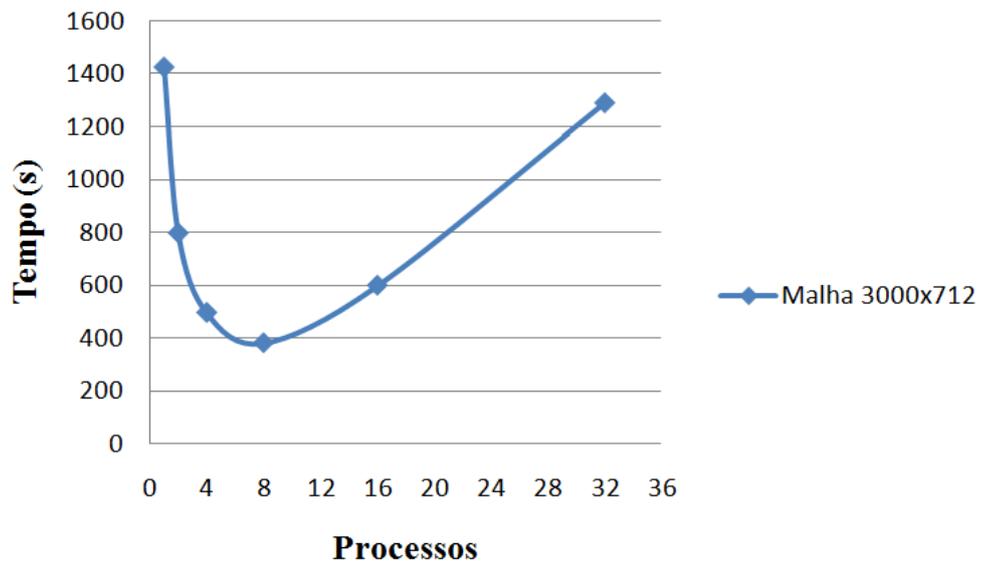
Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 96: Tempo de execução para uma malha de 2250x534 volumes.



Fonte: Figura do próprio autor.

Figura 97: Tempo de execução para uma malha de 3000x712 volumes.



Fonte: Figura do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Foi realizada com sucesso a modelagem de um meio isotrópico bidimensional, considerando as características inerentes ao ensaio por ultrassom, como a densidade do material e a velocidade de propagação da onda. Adicionalmente, descontinuidades foram introduzidas ao meio de modo a reproduzir defeitos de soldagem como: falta de penetração, poros e trincas.

Para diversas combinações de tipo, tamanho e posição da descontinuidade inserida ao meio modelado, foram executadas simulações computacionais da propagação da onda utilizando o método dos volumes finitos para a solução das equações. As simulações produziram um conjunto de sinais A-scan semelhantes aos capturados durante a inspeção ultrassônica de juntas soldadas.

A análise dos sinais ultrassônicos produzidos por simulação revela que variações no tamanho das descontinuidades provocam alterações também na amplitude da onda refletida na parede oposta em virtude de diferenças na quantidade de energia refletida pelo obstáculo. Tais observações foram confirmadas com ajuda de sinais capturados experimentalmente.

Além da versão serial, ou sequencial, do programa, foi desenvolvida uma versão paralela do mesmo. O emprego da computação de alto desempenho e a utilização da técnica de decomposição de domínio bidimensional para as simulações realizadas, através da biblioteca de troca de mensagens MPI, mostrou-se eficiente uma vez que a utilização de vários processadores executando simultaneamente a mesma tarefa é possível refinar a malha e com isso aumentar a precisão dos resultados.

A análise das curvas de tempo de processamento e *speedup* mostrou que, para o problema abordado, houve uma significativa redução do tempo de processamento para o uso simultâneo de até oito processadores. No entanto, a partir de oito processadores o aumento no tempo de troca de informações passa a ser desvantajoso.

A simulação do ensaio ultrassônico utilizando a técnica TOFD em meios bidimensionais possibilitou uma melhor compreensão e interpretação dos fenômenos de interação da onda com o meio e com as descontinuidades inseridas e a previsão de resultados.

Por fim, pode-se concluir que o método empregado neste trabalho possibilitará a obtenção, a um menor custo e menor tempo, de um banco de dados útil no treinamento de ferramentas de reconhecimento de padrões de defeitos de soldagem.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicar técnicas de processamento de sinais e técnicas de reconhecimento de padrões aos sinais simulados e capturados experimentalmente para identificar as diferentes classes de descontinuidades.

Validar o modelo e a simulação testando o aprendizado dos classificadores.

Aperfeiçoar o algoritmo considerando meios heterogêneos anisotrópicos.

Utilizar malhas não estruturadas para melhor representação das descontinuidades e da geometria do material.

REFERÊNCIAS

- ABOUDI, J. Numerical simulation of seismic sources. **Geophysics**, v. 36, n. 5, p. 810-821, 1971.
- ACHENBACH, J. **Wave propagation in elastic solids**. Elsevier, 1973.
- ANCELME, R. L. **Aplicação da migração reversa no tempo para análise de AVA em meios complexos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011.
- ALFORD, R. M. KELLY, K. R., BOORE, D. M. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. **Geophysics**, v. 39, p. 834-842. 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Handbook - **Welding, brazing and soldering**, v. 6, ASM, p. 2608. 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Handbook - **Nondestructive evaluation and quality control**, 9th ed., v. 17, ASM, New York, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. Handbook - **Ultrasonic testing**, editor P. McIntire, v. 7, ASNT, New York, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. Handbook- **Nondestructive testing overview**, editors P. O. Moore and P. McIntire, v. 10, ASNT, New York, 1996.
- BASKARAN, G.; RAO, C. L.; BALASUBRAMANIAM, K. Simulation of the TOFD technique using the finite element method. **Insight-non-destructive testing and condition monitoring**, v. 49, n. 11, p. 641-646, 2007.
- BRENNY, F. **O método dos volumes finitos aplicado a propagação de ondas elásticas**. 85 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2007.
- BRITISH STANDARD. **BS 7706**, Guide to calibration and setting-up of the ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) technique for the detection, location and sizing of flaws, 1993.
- BULCÃO, A. **Modelagem e migração reversa no tempo empregando operadores elásticos e acústicos**, Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.
- CERJAN, C. *et al.* A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations. **Geophysics**, v. 50, p. 705-708. 1985.
- CHARLES, J. H. et al., Radiographic Interpretation. In: Moore, P.O. (editor) **Nondestructive testing handbook, radiographic testing**, 3a edição, v. 4, p. 207–218. ASTM, Columbus 2002.

DAVIS, J.L., **Mathematics of wave propagation**. Princeton. N.J: Princeton University Press, 2000. 416p.

DORMY, E.; TARANTOLA, A. Numerical simulation of elastic wave propagation using a finite volume method. **Journal of Geophysical Research**. v. 100, 1995.

EUROPEAN PRESTANDARD. **ENV 583-6**, Non-destructive testing - Ultrasonic examination Part 6: Time-of flight diffraction technique as a method for detection and sizing of discontinuities, 2000.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M., **Computational methods for fluid dynamics**. Berlin: Springer, 1996

GRAFF, K. F. **Wave motion in elastic solids**. New York, Dover Publication, 1991. 688p.

KELLY, K. *et al.* Synthetic seismograms: a finite-difference approach. **Geophysics**, v. 41, p. 2-27. 1976.

KIRK, D. B.; HWU, W. W. **Programando para processadores paralelos. Uma abordagem prática à programação de GPU**. Tradução de Daniel Vieira. Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2011.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. **Course of theoretical physics v 7: Theory and elasticity**. Pergamon Press, 1959.

LARA, M. A. de M. **Paralelização de um algoritmo de propagação da onda acústica 2d usando MPI**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012.

LEVEQUE, R. J. Finite volume methods for nonlinear elasticity in heterogeneous media. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**. v. 40, Issue 1-2, p 93-104, September 2002.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Ed. LTC. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 452p.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, Ed. LTC. Rio de Janeiro, 2004. 472p.

MOURA, E. P. de. **Reconhecimento de padrões de defeito de soldagem em sinais ultrassônicos obtidos pela técnica TOFD utilizando redes neurais artificiais**, Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais, PEMM/COPPE/UFRJ (2003).

MOURA, E.P. et al., Pattern recognition of welding defects in preprocessed TOFD signal using linear classifiers., **Journal of Nondestructive Evaluation**. v. 23, p. 163 - 172, 2004.

MOURA, E.P de.; SIQUEIRA, M.H.S.; da Silva, R. R.; REBELLO, J.M.A.; CALÔBA, L.P., Welding defect pattern recognition in TOFD signals – Part 1. Linear classifiers, **Insight** (Northampton), United Kingdom, v. 47, n. 12, p. 777-782, 2005.

MOURA, E.P., VASCONCELOS, A. A. Development of an automatic inspection equipment bases on the TOFD technique, In: 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, 2005b.

MUFTI, I. R. Large-scale three-dimensional seismic models and their interpretive significance. **Geophysics**, v. 55, n. 9, p. 1166-1182, 1990.

PATANKAR, S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow**. CRC Press, 1980.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. **N-1738**, Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados, Julho de 1997.

RAAD, J. A.; DIJKSTRA, F. H. Mechanized Ultrasonic testing on girth welds during pipeline constructions, **Materials Evaluation, Insight 55**, p 890-895, August 1997.

RAAD, J. A.; DIJKSTRA, F. H. Mechanised UT on girth welds during pipeline construction - a mature alternative to radiography, **Insight 40**, p. 435-438, 1998.

REYNOLDS, A. C. Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems. **Geophysics**, v. 43, n. 6, p. 1099-1110, 1978.

RIBEIRO, I. *et al.* Processamento digital de sinais e inteligência computacional aplicados aos ensaios ultrassônicos, In: **Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. Alagoas. 2010.

ROSA FILHO, J. C. **Modelagem sísmica de ondas elásticas e migração reversa no tempo em meios transversalmente isotrópicos**. 162 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2002.

ROSE, J. L. **Ultrasonic waves in solid media**. Cambridge university press, 2004, 476p.

SHULL, P. J. TITTMANN, B. R. **ultrasound in nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications**. Edited by Peter J. Shull, p. 63-193. New York, NY: Marcel Dekker, Inc. 2002.

SILK, M.G., LIDINGTON, B.H. An Investigation of the potential of the use of scattered ultrasound in the determination of crack depth. Artigo da **Non-Destructive Testing Center, Materials Physics Division**, U.K.A.E.A. Research Group, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, AERE-R 7649, 1974 HL. 74/202 (C14).

SILK, M.G. New approaches to crack sizing by ultrasonics - **Recent developments in non destructive testing**, Seminar Papers, Abington, Cambridge, 4-6, Oct. 1976, Published by the Welding Institute, Paper 5, p. 40-45, 1978.

SILVA, I. C., **Avaliação da técnica do tempo de percurso da onda difratada no dimensionamento de descontinuidades**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, março 1999.

TADI, M. Finite Volume Method for 2D Elastic Wave Propagation. **Bulletin of the Seismological Society of America**. n. 4, v. 94, p. 1500-1509, August 2004.

TEMPLE, J. A. G. Time of flight inspection: theory, nuclear energy, v. 22, n. 5, p. 335-348, Oct, 1983.

TEMPLE, J. A. G. Predicted ultrasonic responder for pulse-echo inspections, **British Journal of NDT**, p. 145 - 154, May, 1986.

THOMSEN, L. Weak elastic anisotropy., **Geophysics**, v. 51, n. 10, p. 1954-1966, 1986.

VERKOOIJEN, J. TOFD used to replace radiography, **Insight 37**, p. 433-435, Jun 1995.

VIEIRA, A. P., MOURA, E.P. et. al, Characterization of welding defects by fractal analysis of ultrasonic signals. **Chaos, Solitons and Fractals**. v. 38, p. 748 - 754, 2008.

WOOH, S. C.; SHI, Y. A simulation study of beam steerein characteristics for linear phased arrays. **Journal of Nondestructive Testing Evaluation**, v. 18, n. 2, 1999.

YAO, Z.; MARGRAVE, G. F. Fourth-order finite-difference scheme for P and SV wave propagation in 2D transversely isotropic media. **CREWES Research Report**, v. 11, 1999.