

Universidade Federal Fluminense

RODRIGO GUERRA DE SOUZA

Processamento de Sinais de Ultrassom para
Determinação da Direção de Laminação em Materiais
Metálicos

VOLTA REDONDA

2014

RODRIGO GUERRA DE SOUZA

**Processamento de Sinais de Ultrassom para
Determinação da Direção de Laminação em Materiais
Metálicos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional

Orientador:

José Flávio Silveira Feiteira

Coorientador:

Diomar Cesar Lobão

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

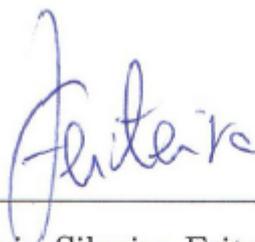
2014

Processamento de Sinais de Ultrassom para Determinação da Direção de
Laminação em Materiais Metálicos

Rodrigo Guerra de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada por:



Prof. José Flávio Silveira Feiteira, D.Sc. / MCCT-UFF



Prof. Ladário da Silva, D.Sc. / ICEX-UFF



Prof. Max Suell Dutra, Dr.-Ing. / COPPE-UFRJ

Volta Redonda, 30 de Julho de 2014.

à Sebastião Ferreira de Souza

Agradecimentos

Ao Senhor, que és o céu, a terra, a vida e a morte.

Aos meus familiares, em especial meus pais Altamir e Rosângela, pela minha existência.

Ao meu irmão Rafael que tanto entendeu a ausência durante o período do curso.

À minha amiga e esposa Julia, e seus pais Giovani e Mara, que sempre estiveram firme e confiante ao meu lado.

Aos meus orientadores Feiteira, Lobão, e Sandro que souberam, tão brilhantemente, conduzir-me nesta etapa da vida.

A todos os professores da EEIMVR-UFF pelos ensinamentos, mesmo aqueles que encontrei nos corredores, apenas.

A todos os amigos da sala D-01 pela força nos momentos mais difíceis, principalmente, meu irmão astral José Luiz Guarino por ter me guardado tanta confiança.

Aos amigos Gláucio, Célio, Hernanes, Everson, e Dionísio pela presença contínua no Laboratório.

À professora Vanessa pela motivação constante e o professor Rodrigo pelas considerações finais.

Aos amigos Antônio Wilson e Matheus que tanto me ajudaram fora dos muros da academia.

A todos da secretaria, biblioteca, cantina, portaria, e serviços gerais pela contribuição e zelo do patrimônio público.

Enfim, a todos que direta, ou indiretamente, me ajudaram a vencer mais essa batalha.

Resumo

Neste trabalho é desenvolvida e aplicada uma metodologia experimental para se determinar a direção de laminação em materiais metálicos através do emprego do equipamento de ultrassom utilizando-se a técnica da birrefringência acústica. Os ensaios não destrutivos envolvendo o uso do ultrassom são empregados, no Brasil, quase que exclusivamente, na detecção, na localização, e no dimensionamento de descontinuidades. No trabalho são apresentados os resultados da técnica não convencional desenvolvida, onde são utilizados os fenômenos da variação da velocidade da onda ultrassônica, na identificação da direção de laminação em ligas metálicas. Este método consiste em determinar a variação da velocidade da onda ultrassônica decorrente do processo de laminação da chapa, a partir da medida do intervalo de tempo decorrido entre seus ecos. A bancada experimental é composta de um aparelho de ultrassom, transdutor piezoelétrico, osciloscópio digital com software de aquisição de sinais, e microcomputador. Inicialmente, fez-se um estudo para a determinação da direção de laminação via ultrassom de algumas chapas de aço, e por fim, a comparação com a análise metalográfica. O trabalho mostra que as técnicas da birrefringência acústica, e da correlação cruzada podem ser utilizadas para avaliação da direção de laminação em chapas de aço.

Abstract

This work was developed and applied an experimental methodology to analyze the rolling direction of metallic materials through the use of ultrasonic equipment using the technique of acoustic birefringence. Non-destructive tests involving the use of ultrasonic equipment are employed in Brazil, almost exclusively in the detection, location and sizing of discontinuities. this paper presents results unconventional technique developed, which are used phenomena varying the speed of the ultrasonic wave, the identification of the rolling direction in alloys. This method consists in determining of laminated plate, from the measurement of the time interval between its echoes. The experimental set up consisted of an ultrasound device, piezoelectric transducer, digital oscilloscope with software of the signal conception, and microcomputer. The study showed that the technique of birefringence can be use for evaluations of the rolling direction of steel plates.

Palavras-chave

1. Birrefringência Acústica
2. Correlação Cruzada
3. Direção de Laminação
4. Ultrassom

Glossário

\vec{a}	: Aceleração (m/s^2)
A	: Área
B	: Módulo de Elasticidade Volumétrico
B_0	: Birrefringência acústica
E	: Módulo de Elasticidade (GPa)
F	: Força (N)
G	: Módulo de Rigidez (GPa)
P	: Pressão (N/m)
t	: Tempo
T	: Temperatura
V	: Volume (m^3)
\vec{v}	: Velocidade Linear da Onda Unidimensional
V_L	: Velocidade da Onda Ultrassônica Longitudinal (m/s)
V_C	: Velocidade da Onda Ultrassônica Cisalhante (m/s)
V_S	: Velocidade da Onda Ultrassônica Superficial (m/s)
Δ	: Variação
ε	: Deformação
ν	: Velocidade do Som
μ	: Coeficiente de Poisson
ρ	: Densidade do meio (kg/m^3)
σ	: Tensão

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Objetivo	13
1.2	Apresentação	13
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Do Ensaio por Ultrassom	15
2.2	Dos Princípios Físicos	16
2.2.1	Características Gerais das Ondas Ultrassônicas	16
2.2.2	Propagação e Tipos de Ondas Ultrassônicas	17
2.2.3	Velocidade da Onda Ultrassônica	21
2.2.3.1	Considerações sobre a Velocidade do Som	32
2.2.3.2	Análise em Meios Sólidos	35
2.2.3.3	Da Relação Tensão-Deformação	37
2.2.4	Tensor de Rigidez	38
2.2.5	Comportamento das Ondas Ultrassônicas	41
2.2.6	Da anisotropia dos Metais	42
2.2.7	Birrefringência Acústica	44
3	Materiais e Métodos	46
3.1	Componentes do Sistema de Medição por Ultrassom	46
3.2	Determinação da Direção de Polarização da Onda no Transdutor	49
3.2.1	Transdutor de Onda Cisalhante de Incidência Normal	50

3.2.2	Transdutor de Incidência Oblíqua	51
3.3	Determinação da Direção de Laminação de Chapas de Aço	53
3.3.1	Determinação da Direção de Laminação via Análise Metalográfica	53
3.3.2	Determinação da Direção de Laminação por Ultrassom Utilizando o Transdutor de Incidência Oblíqua	56
3.3.3	Determinação da Direção de Laminação por Ultrassom Utilizando o Transdutor de Incidência Normal	58
3.4	Processamento de Sinais	61
3.4.1	Método Direto	61
3.4.2	Correlação Cruzada	64
4	Resultados e Discussão	67
4.1	Chapa de Aço API X80	67
4.1.1	Ultrassom	67
4.1.2	Análise Metalográfica	69
4.1.3	Birrefringência	70
4.1.4	Decaimento de Energia no Pulso Ultrassônico	70
4.2	Chapa de Aço API X80 com Tratamento Térmico	71
4.2.1	Ultrassom	71
4.2.2	Birrefringência	73
4.3	Propagação da Onda Superficial no Aço	74
4.4	Chapa de Aço Inox AID-2205	75
4.4.1	Ultrassom	75
4.4.2	Análise Metalográfica	75
4.4.3	Birrefringência	76
4.4.4	Módulo de Rigidez	77
4.5	Chapa de Aço ASTM A36	77

4.5.1	Ultrassom	77
4.5.2	Análise Metalográfica	78
4.5.3	Birrefringência	79
4.5.4	Módulo de Rigidez	80
4.6	Repetibilidade	81
4.6.1	Chapa de Aço Inox AID-2205	81
4.6.2	Chapa de Aço ASTM A36	81
4.7	Chapa de Aço ABNT 1045	82
4.7.1	Ultrassom	82
4.7.2	Análise Metalográfica	84
4.7.3	Birrefringência	85
4.7.4	Decaimento de Energia no Pulso Ultrassônico	85
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	87
5.1	Conclusões	87
5.2	Trabalhos Futuros	89
	Referências	90

Capítulo 1

Introdução

A Laminação é um processo de conformação mecânica que confere aos materiais metálicos melhores propriedades: encruamento, dureza, resistência, por exemplo. No processo físico, a chapa é forçada a passar entre dois rolos laminadores regulados numa tensão determinada, cujo objetivo final é reduzir a espessura da chapa, ver figura (1.1).

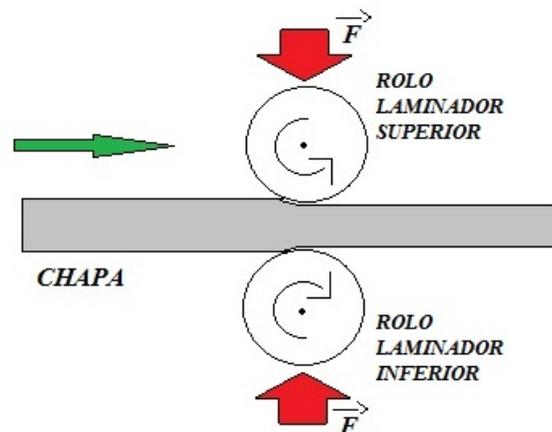


Figura 1.1: Representação esquemática de um laminador

Como resultado da deformação plástica ocorrida na laminação, os grãos do metal adquirem uma orientação preferencial paralela à direção de laminação. Metais laminados apresentam propriedades mecânicas que variam em função da direção de laminação [8], desta forma, é necessário conhecer a direção de laminação do material que se deseja analisar. A maneira mais tradicional de se determinar a direção de laminação do metal é via ensaio metalográfico, no qual cortam-se duas amostras nas direções longitudinal e transversal para verificação. Nesta técnica, emprega-se uma metodologia própria com o

uso de equipamentos específicos para se chegar aos resultados. Nesse contexto, a técnica ultrassônica apresenta grande destaque por ser não destrutiva, e ter como principal potencial a possibilidade de caracterização da anisotropia em todo volume do material.

A técnica ultrassônica se baseia no fato de que o efeito da anisotropia do material conforme a direção de laminação causa variações no tempo de percurso da onda ultrassônica, ou seja, as velocidades de propagação da onda conforme a direção de laminação são diferentes [4]. A velocidade de propagação da onda ultrassônica, no aço, aumenta se a direção de polarização da onda for paralela à direção de laminação do material, e a velocidade de propagação da onda ultrassônica diminui se a direção de polarização da onda for perpendicular à direção de laminação do material [3].

Com base na teoria da elasticidade aplicada à vibrações mecânicas demonstra-se que a velocidade da onda ultrassônica propagando-se através de um sólido homogêneo e isotrópico é função das constantes elásticas do material e da densidade do meio na qual a onda se propaga. Essa demonstração é realizada no desenvolvimento deste trabalho.

O material metálico policristalino é considerado isotrópico se possui uma distribuição aleatória dos grãos, e também, quando suas propriedades físicas se mantêm, em média constantes, consideradas diferentes orientações. Submetido ao processo de laminação, os grãos tomam uma orientação preferencial conforme a direção de laminação. Este fato resulta que o material metálico laminado torna-se acusticamente anisotrópico. Sendo assim, quando a onda ultrassônica percorre um meio acusticamente anisotrópico sua velocidade deixa de ser constante, pois é função do módulo de elasticidade do material, da densidade do meio, e de outro fator, a direção de laminação. A onda ultrassônica cisalhante incidente se divide em duas componentes com polarizações perpendiculares, e com velocidades diferentes entre si, que resulta o fenômeno da birrefringência acústica. Esse fenômeno da birrefringência acústica da onda ultrassônica é similar ao fenômeno da birrefringência da luz polarizada na fotoeletricidade. Uma comparação geral entre a propagação de ondas de luz e ondas ultrassônicas, em meios anisotrópicos, tem sido proposta por muitos pesquisadores [13].

Estudos também mostram que as tensões residuais são tensões internas que existem no material metálico mesmo na ausência de carregamento externo, ou seja, o fenômeno origina-se tanto de processos de fabricação e montagem, como em processos de conformação e serviços, e que é necessário separá-lo dos efeitos da textura cristalográfica do material em análise.

Neste trabalho não se pretende esgotar este vasto tema, pelo contrário, apesar de

trazer uma metodologia e contribuir para a aquisição de novos conhecimentos acerca da determinação da direção de laminação utilizando o ensaio não destrutivo por ultrassom, o trabalho é mais uma base na qual futuras pesquisas poderão ser desenvolvidas.

Dentre as contribuições deste trabalho, destacam-se:

1. A formação de uma equipe de trabalho na manipulação do sistema ultrassônico para obter resultados acerca da anisotropia acústica em metais.
2. A realização de um trabalho interdisciplinar envolvendo as grandes áreas da Engenharia, na aplicação de técnicas de processamento de sinais ultrassônicos.
3. A iniciação dos estudos envolvendo o fenômeno da variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica em metais laminados.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é o processamento de sinais de ultrassom para determinação da direção de laminação em materiais metálicos. Portanto, é necessária a montagem da bancada experimental composta de um sistema ultrassônico de ensaio não destrutivo para desenvolver a metodologia proposta.

1.2 Apresentação

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica e os conceitos acerca da teoria sobre o tema, mais especificamente com explicações sobre o ensaio por ultrassom e os componentes que integram o sistema ultrassônico; os princípios físicos e a natureza da onda ultrassônica, bem como os modos de propagação, classificação, características, e tipos de ondas; explora a velocidade da onda ultrassônica, a dedução das equações que modelam o fenômeno da propagação deste tipo de onda, e a conseqüente relação entre a tensão e a deformação de um sólido elástico; e por fim, revê os conceitos sobre os efeitos da anisotropia gerada pela orientação dos grãos nos materiais metálicos laminados.

No Capítulo 3 são mostrados os materiais e métodos empregados neste trabalho, ou seja, traz os detalhes da metodologia aplicada e as técnicas de medição da velocidade de propagação da onda ultrassônica; a especificação dos equipamentos que integram o sistema ultrassônico na bancada experimental, bem como a calibração inicial e a composição

química dos materiais metálicos utilizados nos ensaios; as maneiras de se determinar a direção de polarização da onda no transdutor de incidência oblíqua e de incidência normal e, por fim, a metodologia para se determinar a direção de laminação nas amostras por dois tipos: Ultrassom e Metalografia .

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados e as discussões, mostrando a análise da anisotropia nas amostras de aço pela utilização do sistema ultrassônico com ondas transversais. Como resultado adicional, para fins de comparação, é feito o levantamento das micrografias, nas mesmas amostras, utilizando-se a metodologia metalográfica. Para a validação do método, foi necessária a verificação da repetibilidade dos ensaios em cada ponto da malha de referência dos materiais sob análise, cujos resultados também são apresentados.

No Capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas e listadas as observações adicionais que podem nortear a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Do Ensaio por Ultrassom

O ensaio por ultrassom é não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado. O feixe ultrassônico que percorre o material é refletido pelas interfaces, e logo depois detectado e analisado para determinar a presença e localização de possíveis descontinuidades. O ensaio por ultrassom é um dos ensaios não destrutivos mais importantes, e sua aplicação principal inclui procedimentos práticos, na inspeção de materiais e na detecção e avaliação de descontinuidades internas e superficiais, medição de espessura, avaliação de corrosão, determinação de propriedades físicas do material, estrutura, tamanho de grão e constantes elásticas [8].

Neste trabalho é utilizada a técnica do ultrassom para a determinação da direção de laminação em amostras de aço de diferentes especificações. Nesta aplicação, deve-se levar em consideração fenômenos que ocorrem quando a onda ultrassônica atravessa o material metálico, como o retroespalhamento da onda, a birrefringência acústica, e a anisotropia gerada pela orientação preferencial dos grãos [5, 6].

No ensaio por ultrassom, a energia sônica refletida pela interface depende essencialmente do estado físico da matéria, e em menor grau, das propriedades específicas da matéria, como as reflexões parciais, na interface do meio material[17]. Segundo a ABENDE (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos) o ensaio por ultrassom apresenta algumas vantagens quando comparado a outros ensaios não destrutivos, tais como: grande poder de penetração da onda ultrassônica; alta sensibilidade e precisão; portabilidade e varredura volumétrica.

No Brasil o ensaio por ultrassom teve em 1979 o seu grande impulso em termos de

utilização e credibilidade, devido a construção das primeiras plataformas de produção de petróleo na Bacia de Campos e o início da qualificação de inspetores de ultrassom pela Petrobrás. Atualmente este ensaio atingiu uma grande aceitação, principalmente, como alternativa ao ensaio radiográfico, para as situações onde existem dificuldades quanto à proteção radiológica ou quanto ao cumprimento dos prazos contratuais.

2.2 Dos Princípios Físicos

2.2.1 Características Gerais das Ondas Ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que consistem na oscilação de partículas atômicas ou moleculares de uma substância, em torno de uma posição de equilíbrio. Se estas vibrações repetem-se periodicamente, e com uma determinada frequência, o som pode ser classificado em infrassom, som audível, e ultrassom conforme a figura (2.1).

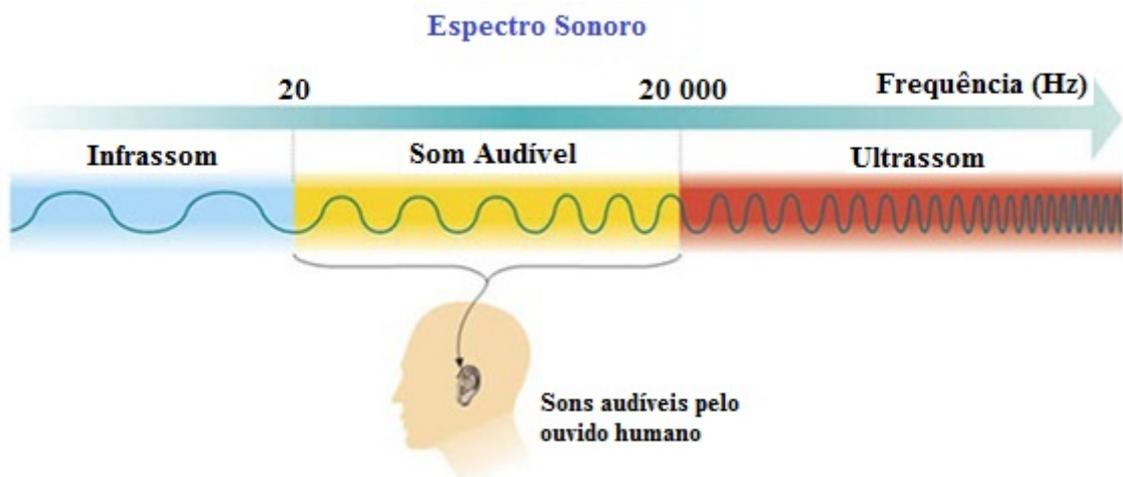


Figura 2.1: Espectro sonoro [1]

As ondas ultrassônicas possuem o mesmo comportamento das ondas sônicas audíveis pelo ser humano. Em muitos aspectos, o feixe ultrassônico é semelhante ao feixe de luz, na qual ambos obedecem aos mesmos princípios. Da mesma forma de um feixe de luz, o feixe ultrassônico é refletido nas superfícies, refratado quando atravessa a interface entre dois meios não homogêneos que possuem diferentes velocidades de propagação, e é difratado em bordas ou ao redor de obstáculos. O espalhamento em superfícies rugosas reduz a energia do feixe ultrassônico, da mesma maneira que reduz a intensidade de um feixe luminoso [20].

Pode ser realizada uma comparação geral entre a propagação de ondas luminosas e ondas ultrassônicas em meios anisotrópicos, ou seja, a onda ultrassônica é usada da mesma maneira que a luz polarizada na fotoelasticidade como foi relatado por Henneck e Green, em 1968 [10].

A velocidade das ondas ultrassônicas e a taxa com que a amplitude e a energia decrescem durante a propagação são constantes. Quando uma onda ultrassônica se propaga através de um sólido elástico, as partículas do meio movem-se, porém oscilam em suas órbitas espaciais. Somente a energia viaja através do meio. A amplitude e a energia das ondas ultrassônicas que se propagam em meios elásticos dependem da energia fornecida inicialmente. A velocidade e a perda gradual de amplitude e energia dependem das propriedades específicas do meio na qual a onda se propaga [9].

2.2.2 Propagação e Tipos de Ondas Ultrassônicas

Como esse trabalho baseia-se na variação das propriedades da onda ultrassônica, é necessária a apresentação de um breve resumo sobre este tipo de onda.

As ondas sônicas propagam-se em meios materiais que podem ser de natureza gasosa, líquida ou sólida. Neste trabalho, as ondas ultrassônicas utilizadas, propagam-se em meios sólidos, como o aço. Quando as partículas atômicas ou moleculares do metal são removidas de suas posições de equilíbrio por qualquer força externa (pulso de ultrassom), tensões internas agem para realocar essas partículas em suas posições originais. Em razão das forças interatômicas existentes entre as partículas adjacentes, o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas, e assim por diante, propagando desta maneira uma onda elástica. O deslocamento real de matéria que ocorre na passagem da onda ultrassônica é extremamente pequeno, mas influencia a força de atração entre as partículas e o comportamento elástico dos materiais [17]. Desta maneira, a energia se propaga de partícula em partícula da substância, posto que a velocidade finita de propagação da onda depende das características do meio onde se propaga, devendo-se considerar a densidade e as constantes elásticas do material [5, 6].

Vários tipos de ondas ultrassônicas são utilizados para a análise dos materiais metálicos, sendo classificadas como ondas longitudinais, ondas transversais ou cisalhantes, e ondas superficiais, que podem ser do tipo Rayleigh, do tipo creeping, e ondas superficiais de Lamb.

A onda ultrassônica longitudinal, também chamada de onda de compressão, é aquela

onde a movimentação das partículas do meio material é paralela à direção de propagação da onda ultrassônica. Elas percorrem os metais como uma série alternada de zonas de compressão e rarefação, nas quais as partículas transmitem a vibração, movendo-se conforme o sentido de propagação da onda. A velocidade das ondas longitudinais no aço é de, aproximadamente, 5900 m/s. Para melhor exemplificar este tipo de onda, pode-se propor o esquema das figuras (2.2) e (2.3):

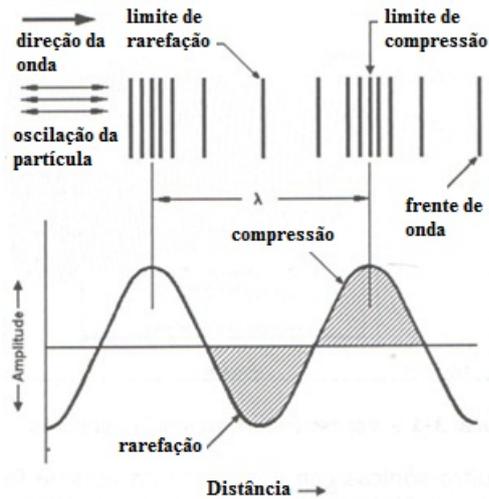


Figura 2.2: Característica da onda sônica longitudinal [17]

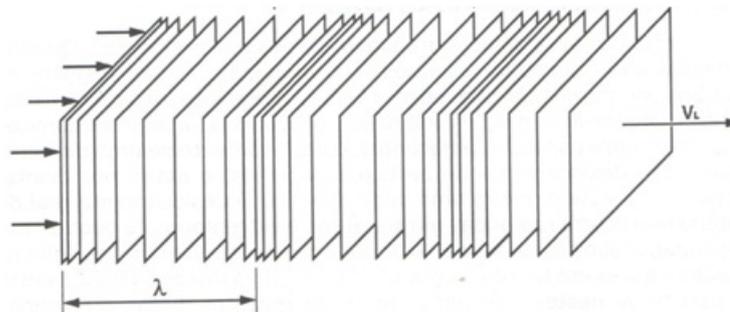


Figura 2.3: Propagação da onda longitudinal [17]

Conhecida como onda cisalhante, ou de corte, a onda ultrassônica transversal é também muito utilizada na inspeção de materiais metálicos. Na onda transversal, ao contrário da onda longitudinal, as partículas do meio, na qual a onda se propaga, movem-se perpendicularmente à direção de propagação da onda ultrassônica. A velocidade de propagação da onda transversal é, aproximadamente, metade daquela da onda longitudinal, o que pode facilitar medir o tempo de percurso entre dois ecos consecutivos. As ondas transversais são geradas quando as partículas próximas à superfície são acionadas na direção

paralela a esta superfície, ou seja, quando o primeiro plano se desloca, ele arrasta por interação elástica o plano adjacente, e assim por diante, criando vales e cristas nos pontos laterais. Neste caso, os planos das partículas mantem-se equidistantes, movimentando-se lateralmente com ação cisalhante entre eles, como ilustrado na figura (2.4):

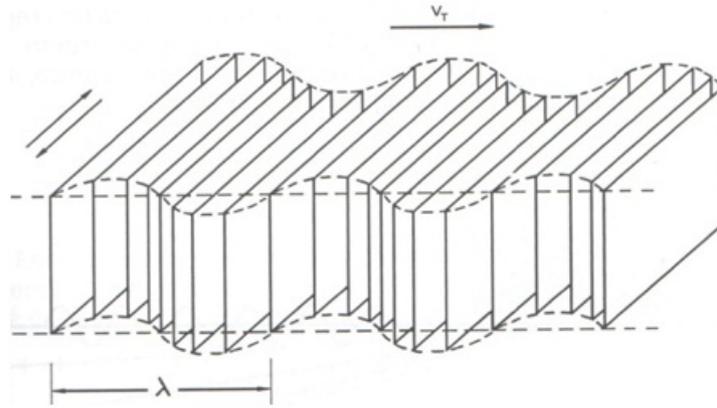


Figura 2.4: Propagação da onda transversal [17]

Outro tipo de onda ultrassônica é a onda superficial. Geradas por transdutores especiais, as ondas ultrassônicas superficiais são caracterizadas pelo movimento das partículas ao longo da interface entre um corpo sólido e o ar. Descontinuidades microestruturais localizadas nas proximidades da superfície podem ser detectadas por estas ondas. Geralmente, as ondas superficiais tem um pequeno alcance por serem fortemente atenuadas, ou seja, grande perda gradual de amplitude e energia. O alcance depende da qualidade da superfície da peça, e o uso de acoplantes (fluido de alta viscosidade e baixa rugosidade que se coloca entre a peça e o transdutor para se transmitir a onda ultrassônica) de diferentes tipos pode também influenciar no surgimento de ecos na tela do equipamento. Os principais tipos de ondas superficiais são: ondas de Rayleigh e ondas do tipo Creeping.

A onda superficial do tipo Rayleigh é gerada quando uma onda transversal percorre a superfície de um material sólido [15]. A condição para ser gerada pode ser calculada pela lei de Snell, através do cálculo do segundo ângulo crítico, que é aquele em que a onda transversal tangencia a superfície do material. Uma onda do tipo Rayleigh provoca uma fina região de oscilação, ou seja, no caso de transdutores de alta frequência, a penetração da onda pode ser menor do que 1 mm. Devido à divergência do feixe sônico, a onda transversal também percorre a região subsuperficial [17, 15]. As ondas de Rayleigh são 90% ondas cisalhantes, e são assim chamadas porque requerem um contorno para existirem, ou seja, são ondas que requerem uma superfície muito delgada, ou de pequena espessura, para se propagarem, com a oscilação das partículas ocorrendo numa profundidade equivalente

a um comprimento de onda [15], como pode ser observado na figura (2.5):

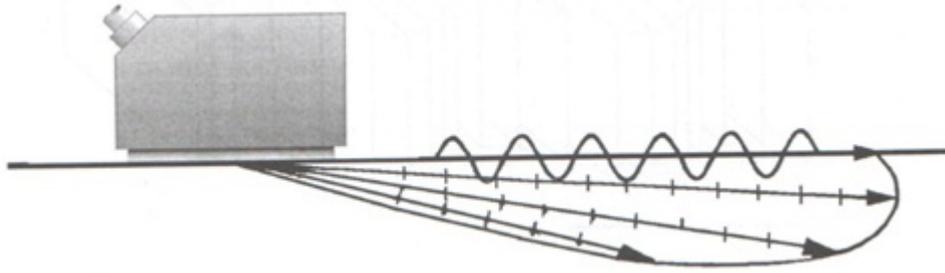


Figura 2.5: Propagação da onda superficial de Rayleigh [17]

A onda ultrassônica superficial do tipo Creeping é gerada no primeiro ângulo crítico em que a onda longitudinal tangencia a superfície do material, ou seja, as ondas ultrassônicas superficiais do tipo creeping são ondas longitudinais numa fina camada da superfície do material. Esse tipo de onda, bem como a onda do tipo Rayleigh, é fortemente atenuada pelo fato de que a cada ponto em seu deslocamento uma onda transversal é gerada e transmitida para o interior do material com um certo ângulo [14].

As ondas ultrassônicas de Lamb, também conhecidas como ondas de chapa por serem utilizadas em placas de espessura da ordem de um comprimento de onda, são transmitidas em pulsos curtos com uma faixa de frequência relativamente ampla, com isso, implica numa alta porcentagem de dispersão da onda. As ondas de Lamb consistem numa vibração complexa das partículas ao longo da espessura da chapa na qual a onda se propaga [17].

Na avaliação não destrutiva, a utilização das ondas de Lamb tem como principal vantagem a propagação em longas distâncias através de toda a espessura de estruturas em formas de placas. Em contrapartida, a interceptação dos sinais não é tarefa trivial devido ao caráter multimodo e características dispersivas destas ondas [14].

As ondas de Lamb possuem, no aço, velocidade entre 2000 e 4000 m/s, mas pode-se encontrar valores até um pouco mais acima de 5000 m/s. As ondas de Lamb podem se apresentar de duas formas básicas: simétricas, ou dilatacional, e assimétrica, ou compressional. Os dois tipos de onda são mostrados na figura (2.6):

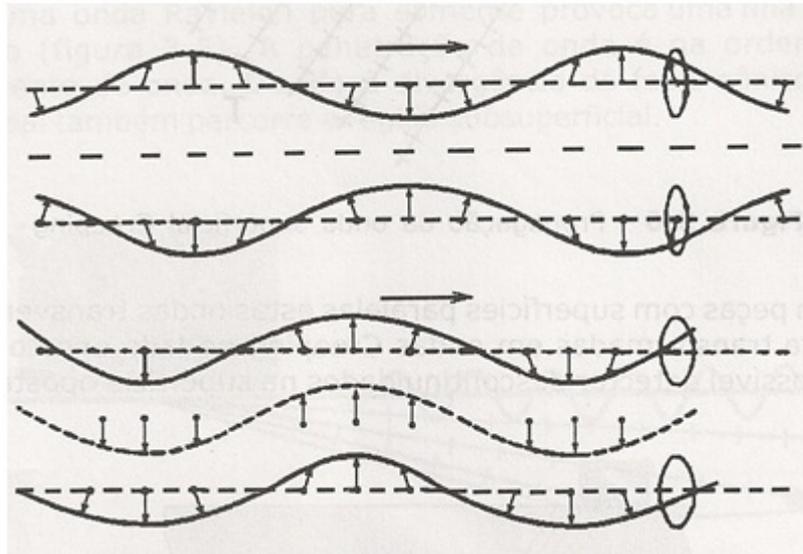


Figura 2.6: Modos de propagação das ondas de Lamb [17]

2.2.3 Velocidade da Onda Ultrassônica

A teoria da elasticidade aplicada rigorosamente às vibrações mecânicas permite obter expressões matemáticas para a velocidade da onda ultrassônica, quando se tem os tipos de onda citados, se propagando através de um meio material sólido, teoricamente, homogêneo e isotrópico.

Neste trabalho, o desenvolvimento da equação geral que descreve o comportamento das ondas ultrassônicas se propagando num meio sólido, requer o entendimento prévio de como se propaga uma onda acústica unidirecional num fluido, supostamente ideal, tomando-se como exemplo o modelo do pistão proposto por Newton.

Ondas planas podem ser produzidas num fluido confinado no interior de uma tubulação pela movimentação de baixa frequência de um pistão localizado em uma das extremidades do êmbolo. Supondo distâncias relativamente grandes dessa fonte de geração de ondas, e também uma relação prévia entre o comprimento de onda e o diâmetro da tubulação, as perturbações geradas no fluido, ou seja, as frentes de onda, detêm o mesmo comportamento, as mesmas características, e similaridades das ondas planas que se propagam em uma única direção. Considera-se também, que a amplitude da onda gerada, devida à baixa frequência, seja muito pequena para demonstração das equações [19]. Uma onda plana é caracterizada conforme suas variáveis acústicas: deslocamento da partícula, densidade, pressão, por exemplo, e possui amplitude constante num plano perpendicular à direção de propagação [18].

O desenvolvimento da equação de Newton que descreve a velocidade da onda ultrassônica longitudinal pode ser compreendido conforme o modelo do pistão mostrado na figura (2.7). Na figura (a) o fluido confinado está em repouso à pressão P_0 no interior da tubulação. Considera-se, ainda, que este gás se comporte como um gás ideal devido à baixa pressão em que se está confinado. Depois, é aplicado um acréscimo de pressão δP pela movimentação do pistão, durante um intervalo de tempo t conforme as figuras (b) e (c). Todas as partículas do fluido à esquerda da superfície de controle S se deslocam com velocidade δu (velocidade da partícula), e as partículas à direita desta interface permanecem em repouso. A frente de onda, situada entre as partículas que se deslocam e as partículas em repouso, se desloca para a direita com velocidade v (velocidade da onda).

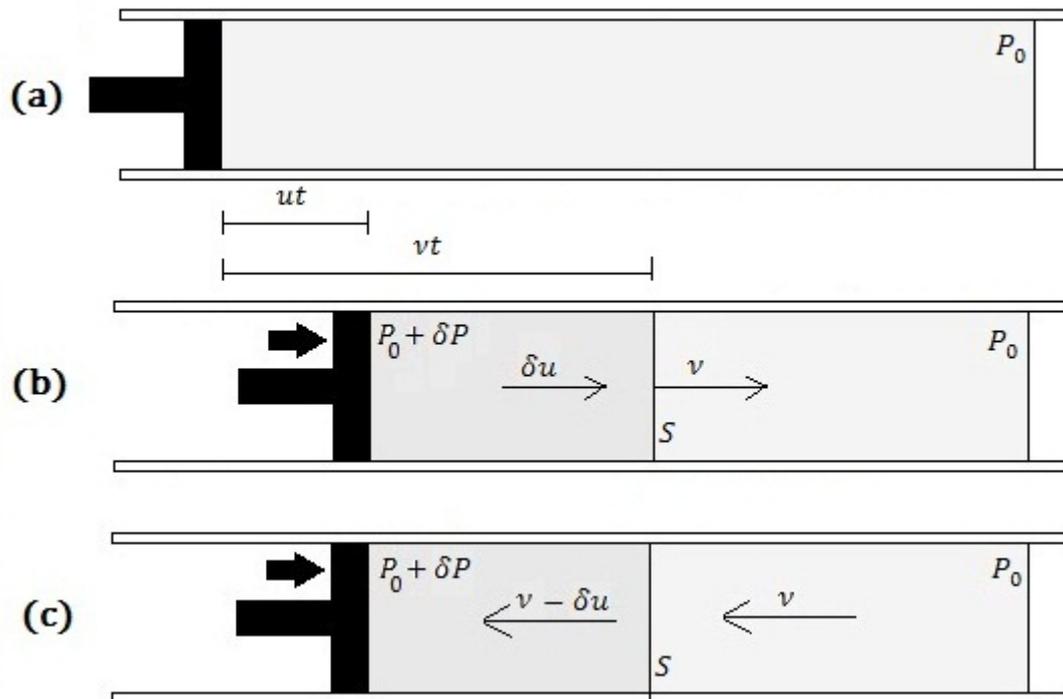


Figura 2.7: Modelo do pistão usado para explicar a equação da velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal. (a) Fluido confinado (b) Observador imóvel; (c) Observador caminhando com a frente de onda [19] - modificado

Analisando-se o experimento do pistão mostrado na figura (2.7), quando o pistão se move para direita, ele desloca as moléculas do gás em contato para a direita. Essas moléculas deslocadas se aproximam das moléculas que estão mais à frente, causando aumento na densidade do gás, e conseqüentemente, aumento na pressão naquela região. Este aumento na pressão local faz com que as moléculas do gás dessa região se desloquem mais para a direita. Esse deslocamento provoca aumento na densidade do gás ainda mais à frente, o que provoca aumento na pressão, e todo este processo vai se repetindo, gerando

um pulso longitudinal que se propaga para a direita [16].

Por outro lado, quando o pistão se move para trás, após ter empurrado as moléculas do gás para frente, a densidade do gás na região em contato diminui, e conseqüentemente, a pressão também diminui. A densidade e a pressão nessa região voltarão a aumentar novamente quando o pistão tornar a se movimentar para frente, provocando o deslocamento da zona de baixa densidade e pressão para a direita. A repetição do movimento do pistão para frente e para trás provoca uma sucessão de regiões do gás com densidades e pressões altas e baixas intercaladas que se propagarão para a direita, de modo que caracteriza a propagação da onda longitudinal pelo interior da tubulação [16].

Os processos físicos envolvidos quando uma onda acústica se propaga são os seguintes:

- A variação de densidade causa variação de pressão;
- O movimento do fluido provoca variação de densidade;
- As diferenças de pressão produzem o deslocamento do fluido.

Neste trabalho, considera-se a determinação dos processos físicos citados para construir uma teoria quantitativa para a velocidade da onda acústica. Os processos serão estudados separadamente, e depois faz-se a combinação das equações obtidas em uma, apenas.

O primeiro processo, que relaciona a variação de densidade como causa da variação de pressão, ou seja, dado um meio material, a pressão depende da densidade, pode ser descrito conforme determinada função,

$$P = f(\rho) \tag{2.1}$$

A figura (2.7) mostra que antes da passagem da onda acústica em certa região do meio, esta região está em equilíbrio e os valores de pressão e densidade de equilíbrio serão denotados por P_0 e ρ_0 . Tomando-se a função na região em equilíbrio, tem-se que,

$$P_0 = f(\rho_0) \tag{2.2}$$

Dados experimentais analisados, revelam que as variações de pressão (δP) que ocorrem quando uma onda acústica se propaga em um meio material são extremamente pequenas. Sendo assim, as variações na densidade ($\delta\rho$) e os deslocamentos das partículas em relação à região de equilíbrio são, também, muito pequenos [16]. Desta forma, pode-se escrever,

$$P = P_0 + \delta P \quad (2.3)$$

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho \quad (2.4)$$

Substituindo-se as equações (2.3) e (2.4) em (2.1), tem-se que,

$$P_0 + \delta P = f(\rho_0 + \delta\rho) \quad (2.5)$$

Supondo $\delta\rho$ infinitesimal, pode-se expandir o lado direito da equação (2.5) por uma expansão em série de Taylor no entorno de ρ_0 até primeira ordem, pois se as flutuações são muito pequenas em relação à região de equilíbrio, os termos de segunda ordem e ordens superiores das derivadas parciais podem ser desprezados [16]. Então,

$$P_0 + \delta P = f(\rho_0) + \delta\rho \left. \frac{df}{d\rho} \right|_{\rho=\rho_0}$$

$$P_0 + \delta P = f(\rho_0) + \delta\rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \quad (2.6)$$

Cabe ressaltar que o índice zero da equação (2.6) indica que a derivada $\frac{dP}{d\rho}$ é calculada na região de equilíbrio.

Comparando-se as equações (2.6) e (2.2), verifica-se a equação (2.7), onde a variação da pressão é proporcional à variação da densidade e a constante de proporcionalidade, que é a derivada $\frac{dP}{d\rho}$ calculada na região de equilíbrio.

$$\delta P = \delta\rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_0 \quad (2.7)$$

faz-se, a partir de agora, uma análise do segundo processo físico, onde o movimento do fluido provoca variação de densidade. Considerando-se que a posição da camada de fluido na superfície de controle não perturbada pela onda seja x e que o seu deslocamento, ou seja, o desvio entre a posição instantânea da camada de fluido e a sua posição de equilíbrio, no instante t devido à onda seja $u(x, t)$, a nova posição dessa camada de fluido no instante t é $x + u(x, t)$, como mostra a figura (2.8).

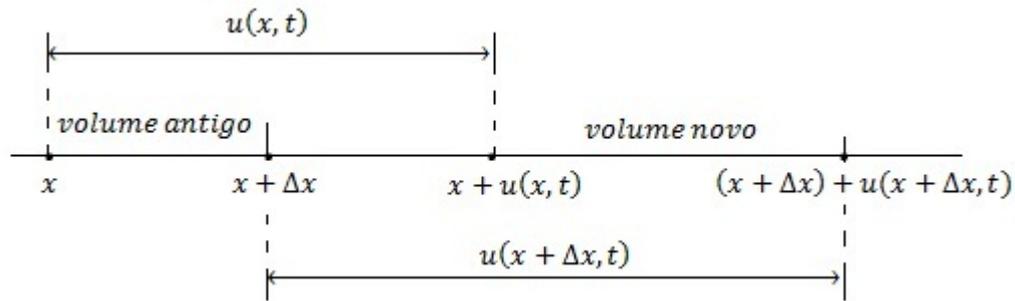


Figura 2.8: Deslocamento da posição instantânea da camada de fluido e a sua posição de equilíbrio

Considera-se, também, que a posição não perturbada de uma camada vizinha de fluido seja dada por $x + \Delta x$ e que sua nova posição no instante t seja $(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)$.

Para os cálculos dos volumes deslocados, o fluido ideal, considerado inicialmente na figura (2.7), está confinado na tubulação cuja área de uma secção transversal é A perpendicular ao eixo imaginário x que passa pelo centro, conforme mostra a figura (2.9).

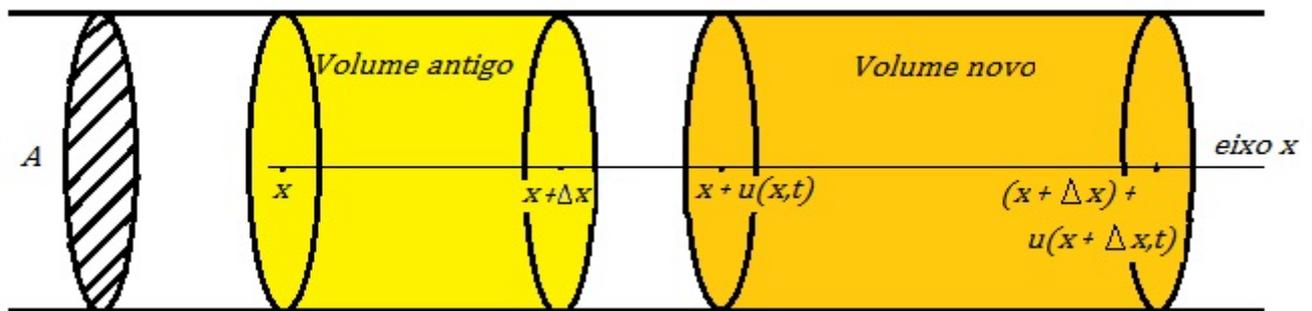


Figura 2.9: Representação dos volumes deslocados pelo eixo imaginário central x da tubulação

O volume inicial do fluido, antes de ser perturbado, é o volume antigo, mostrado na figura (2.9), dado por,

$$V_0 = A[(x + \Delta x) - x]$$

$$V_0 = A\Delta x \quad (2.8)$$

Sendo a densidade do fluido em equilíbrio ρ_0 , a massa de fluido dentro do volume V_0 é dada por,

$$M = \rho_0 V_0$$

$$M = \rho_0 A \Delta x \quad (2.9)$$

A massa de fluido, após ser deslocada pela passagem da onda longitudinal, passa a ocupar o novo volume V , dado por,

$$V = A \{[(x + \Delta x) + u(x + \Delta x, t)] - [x + u(x, t)]\}$$

$$V = A \{ \Delta x + [u(x + \Delta x, t) - u(x, t)] \}$$

$$V = A \Delta x \left\{ 1 + \left[\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \right] \right\}$$

De modo que Δx é infinitesimal, então faz-se a seguinte afirmação,

$$\frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x} \approx \frac{\partial u}{\partial x}(x, t)$$

Logo, reescreve a equação do novo volume,

$$V = A \Delta x \left[1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \right] \quad (2.10)$$

Pelo princípio da conservação, a massa de fluido dentro do novo volume é a mesma que estava contida no volume inicial, pois a matéria não foi perdida ou adicionada durante o deslocamento [16]. Denominando de ρ a densidade do volume deslocado, tem-se que,

$$M = \rho V$$

$$M = \rho A \Delta x \left[1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \right] \quad (2.11)$$

Comparando-se as equações (2.9) e (2.11), tem-se que,

$$\rho_0 A \Delta x = \rho A \Delta x \left[1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \right]$$

$$\rho_0 = \rho \left[1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \right] \quad (2.12)$$

Substituindo ρ por $\rho_0 + \delta\rho$, obtem-se,

$$\rho_0 = (\rho + \delta\rho) \left[1 + \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \right]$$

Desenvolvendo a equação acima, tem-se que,

$$\delta\rho = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) - \delta\rho \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \quad (2.13)$$

Note que a equação (2.13) possui o termo $\delta\rho(\partial u/\partial x)$ de segunda ordem da derivada parcial que será desprezado segundo o critério adotado na dedução. Logo, reescrevendo a equação (2.13), obtem-se,

$$\delta\rho = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) \quad (2.14)$$

A equação (2.14) descreve o segundo princípio físico, ou seja, uma relação entre o deslocamento da partícula e a variação na densidade. Observa-se, também, que a equação (2.14) satisfaz uma compreensão intuitiva de como a densidade varia conforme o deslocamento, de modo que, se o deslocamento for positivo, $\partial u/\partial x > 0$, isso significa que as partículas do fluido estão saindo da região onde se mede a densidade ρ . Portanto, a densidade nessa região deve diminuir quando o deslocamento da partícula aumentar [16].

Por fim, estuda-se o terceiro processo físico, onde as diferenças de pressão produzem o deslocamento do fluido. As partículas do fluido se movem porque forças atuam sobre elas. As forças atuantes são devidas à variação de pressão entre diferentes pontos do fluido. Neste caso, aplica-se a segunda lei de Newton à quantidade de fluido que se desloca, ou seja, determina-se a equação de movimento para essa massa de fluido [16].

Considerando-se a figura (2.9), viu-se que a massa de fluido que se desloca é calculada pela equação (2.9). Como essa massa desloca-se em um tempo t , cujo deslocamento é u , então a aceleração a da partícula é descrita por,

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Passa-se esta análise, ao encontro da força que atua sobre a massa de fluido considerada e que produz a aceleração descrita. No instante t , o volume cilíndrico de massa M do fluido está submetido a uma pressão $P(x, t)$ atuando sobre sua face esquerda *posicao*(x) e a uma pressão $P(x + \Delta x, t)$ atuando sobre sua face direita *posicao*($x + \Delta x$). A figura (2.10) mostra as forças atuando sobre as duas faces em sentidos opostos.

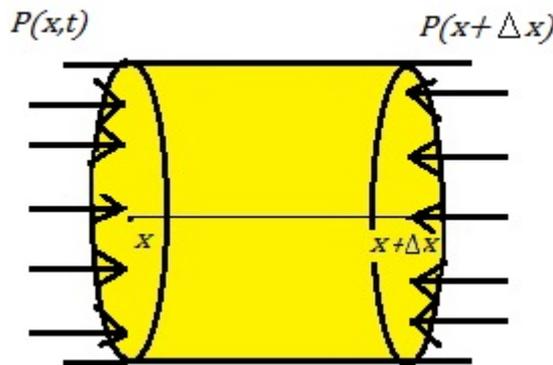


Figura 2.10: Representação das forças atuantes no elemento de massa considerado

As forças atuando sobre as faces da esquerda F_e e da direita F_d do cilindro representado na figura (2.10) são descritas por,

$$F_e = P(x, t)A$$

$$F_d = -P(x + \Delta x, t)A$$

De maneira que a força resultante atuando no elemento de massa considerado pode ser escrita como,

$$F = F_e + F_d$$

$$F = A[P(x, t) - P(x + \Delta x, t)] \quad (2.15)$$

Tomando-se a derivada da pressão P em relação à posição x , tem-se que,

$$\frac{\partial P}{\partial x} \approx \frac{P(x + \Delta x, t) - P(x, t)}{\Delta x}$$

De maneira que a equação (2.15) pode ser reescrita como,

$$F = -A\Delta x \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.16)$$

Cabe ressaltar que, nesta análise, a variação de pressão ocorre pela passagem da onda acústica. Logo, se $P = P_0 + \delta P$ com P_0 constante, então,

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\partial(\delta P)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \quad (2.17)$$

Reescrevendo-se a equação (2.16), obtém-se,

$$F = -A\Delta x \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \quad (2.18)$$

Combinando-se as equações (2.9)e(2.18), e aplicando-se a segunda lei de Newton, tem-se que,

$$-A\Delta x \frac{\partial(\delta P)}{\partial x} = \rho_0 A \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial(\delta P)}{\partial x} \quad (2.19)$$

A equação (2.19) modela o terceiro princípio físico, ou seja, uma relação entre a variação de pressão e o deslocamento da partícula.

Uma vez modelados os três processos físicos citados, pode-se combinar as equações (2.7),(2.14), e (2.19) para obter uma única equação resultante seja para a variação de pressão δP , ou para a variação da densidade $\delta\rho$, ou para o deslocamento u da partícula [16].

Substituindo-se a equação (2.7) na equação (2.19), obtem-se o deslocamento u da partícula descrito por,

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\delta\rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \right]$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial(\delta\rho)}{\partial x}$$

De modo que, substituindo-se a equação (2.14) na expressão acima, tem-se que,

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

A equação (2.20) modela a propagação unidimensional de ondas sonoras em um meio material. Portanto, pode-se reescrevê-la da seguinte maneira,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

$$\nu = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0} \quad (2.22)$$

A equação (2.22) modela a velocidade de propagação do som no fluido. Pode-se ainda obter equações da onda similares para as variações de densidade e de pressão do fluido. Tomando-se a derivada em relação a x em ambos os lados da equação (2.19) tem-se que,

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = - \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2}$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2}$$

Substituindo-se a equação (2.14), obtem-se,

$$\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(- \frac{\delta \rho}{\rho_0} \right) = - \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

Combinando-se as equações (2.23) e (2.7) obtem-se equações escritas somente em termos de $\delta \rho$ ou δP . Logo,

$$\frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} = \frac{1}{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0} \frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2(\delta P)}{\partial x^2} = \frac{1}{\nu^2} \frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial t^2} = \nu^2 \frac{\partial^2(\delta \rho)}{\partial x^2} \quad (2.25)$$

As equações (2.21), (2.24), e (2.25) revelam que as propagações das perturbações de pressão δP , de densidade $\delta \rho$, e do deslocamento u das partículas de fluido, propagam-se ao longo do meio material com a mesma velocidade ν . Portanto, obtem-se três maneiras distintas de visualizar uma onda sonora: em termos da propagação da perturbação da pressão; em termos da propagação da perturbação da densidade; e por fim, em termos da propagação do deslocamento das partículas do meio material em relação à posição de equilíbrio [16].

2.2.3.1 Considerações sobre a Velocidade do Som

Diz-se da equação (2.22) que a velocidade de propagação do som em um meio material depende da taxa de variação da pressão com a densidade no equilíbrio. Em geral, essa taxa de variação depende de como a temperatura do meio varia com as compressões e rarefações provocadas pela perturbação. Por exemplo, intuitivamente pode-se concluir que numa região de compressão do meio, sua temperatura aumenta, e conseqüentemente, numa região de rarefação do meio, sua temperatura diminui. Usando a equação (2.22), Newton foi o primeiro pesquisador a calcular a velocidade do som propagando-se num fluido. Em seu cálculo, ele supôs que a temperatura do meio, na qual a onda sonora se propaga, não varia, ou seja, mantém-se constante. O argumento de Newton era que as transferências de calor entre os vários pontos do fluido são tão rápidas que não chegam a produzir variações na temperatura. Newton ainda não conhecia a equação da onda, pois esta equação só foi obtida por d'Alembert, em 1747, após sua morte. O que Newton fez nos *Principia* foi construir um modelo para as ondas sonoras em um fluido baseado em uma analogia com um sistema de molas acopladas oscilantes. Com esse modelo ele chegou à equação (2.22) para a velocidade da onda no fluido [16].

Usando-se uma terminologia moderna, pode-se dizer que Newton calculou a velocidade do som considerando que a propagação do som é um processo isotérmico (temperatura constante). Então, supondo que o fluido comporte-se como um gás ideal, tem-se que,

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = k\rho$$

Onde k é uma constante e ρ a densidade. Portanto, em um processo isotérmico,

$$k = \frac{\partial P}{\partial \rho} \tag{2.26}$$

$$\nu^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0$$

$$\nu^2 = k_0 = \frac{P_0}{\rho_0} \quad (2.27)$$

Aplicando-se a equação acima para uma onda sonora que se propaga no ar, considerando-se as condições normais de temperatura e pressão ($P_0 = 1.013Pa$, $T = 273K$, e $\rho_0 = 1.293kg/m^3$), obtem-se, o valor de 280 m/s.

Sabe-se que o valor da velocidade de propagação do som no ar é de 332 m/s. Portanto, o cálculo de Newton estava errado, mesmo na época, as medidas experimentais já eram suficientemente acuradas para que ele soubesse do erro. O motivo do erro de Newton se deve à sua suposição de que a temperatura do fluido permanece constante quando o som se propaga por ele. O cálculo correto foi feito pelo matemático e físico francês Pierre Simon Laplace (1749 - 1827), em 1816, quase um século após a morte de Newton. A hipótese de Laplace era exatamente a oposta à de Newton, ou seja, a de que não há trocas de calor entre os diversos pontos do fluido quando uma onda sonora se propaga por ele. A idéia é a de que as compressões e rarefações do meio são rápidas que não dão tempo para que o calor flua de uma região de compressão para outra de rarefação e equalize a temperatura do fluido. Na terminologia moderna, pode-se dizer que Laplace supôs que quando uma onda se propaga por um fluido o processo é *adiabático* [16].

Para um processo adiabático no gás ideal, a relação entre pressão e densidade é dada por,

$$P = c^{te} \rho^\gamma$$

Onde γ representa o coeficiente isoentrópico, ou seja, razão entre o calor específico à pressão constante e o calor específico à volume constante.

Tomando-se a derivada de P em relação a ρ , tem-se que,

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = c^{te} \gamma \rho^{\gamma-1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\gamma P}{\rho}$$

No equilíbrio,

$$\nu^2 = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} \quad (2.28)$$

Substituindo-se, na equação (2.28), os mesmos valores para o ar em condições normais de temperatura e pressão, obtém-se $\nu = 332$ m/s, que está em concordância com o valor experimental [16]. Sendo assim, pode-se reescrever a equação (2.28) de uma maneira mais conveniente, ou seja, considerando-se que o gás ideal tem massa M e é composto por moléculas cuja massa molar é m , onde a variável n representa o número de mols, tem-se que,

$$M = nm \longleftrightarrow m = \frac{M}{n}$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador do lado direito da equação (2.28) por V e usando-se a expressão da massa molar, obtém-se,

$$\nu^2 = \gamma \frac{PV}{\rho V} \longleftrightarrow \nu^2 = \gamma \frac{nRT}{M} \longleftrightarrow \nu^2 = \gamma \frac{RT}{m}$$

Logo,

$$\nu = \sqrt{\gamma \frac{RT}{m}} \quad (2.29)$$

Conforme a equação (2.29) conclui-se que a velocidade de propagação do som em um gás ideal não depende da sua pressão ou da sua densidade, mas apenas da sua temperatura absoluta e da sua massa molar. Porém, sabe-se que um fluido, em geral, não comporta-se como um gás ideal, no entanto, para usar a equação (2.29) e calcular a velocidade de propagação do som no fluido considerado, deve-se encontrar outra maneira de expressar a pressão em termos da densidade [16]. Assim, para um fluido qualquer cujo volume V sofre uma alteração ΔV sob ação de uma alteração na pressão ΔP , define-se o módulo de elasticidade volumétrico B ,

$$B \equiv - \frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (2.30)$$

Sabe-se que a densidade do fluido é expressa pela relação,

$$\rho = \frac{M}{V} \longleftrightarrow \rho = MV^{-1}$$

Logo, pode-se escrever,

$$\Delta\rho = -MV^{-2}\Delta V \longleftrightarrow \Delta\rho = -\rho V^{-1}\Delta V \longleftrightarrow \frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

Substituindo-se esta expressão na equação (2.30), obtem-se,

$$B = \rho \frac{\Delta P}{\Delta\rho} \quad (2.31)$$

Agora, pode-se escrever a derivada de P em relação à ρ da seguinte forma,

$$\frac{\partial P}{\partial\rho} = \frac{B}{\rho} \quad (2.32)$$

Reescrevendo-se a equação da velocidade de propagação do som em um fluido, obtem-se,

$$\nu = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial\rho}\right)_0}$$

$$\nu = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (2.33)$$

2.2.3.2 Análise em Meios Sólidos

Quando uma onda ultrassônica se propaga através de um sólido elástico, faz-se uma correspondência das variáveis acústicas [2]. Com todas as hipóteses consideradas na dedução das equações, a velocidade da onda longitudinal V_L num sólido pode ser escrita como,

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.34)$$

Assim, pode ser notado que a velocidade de propagação de um pulso longitudinal, na qual as partículas vibram na direção de propagação da onda, num sólido elástico, depende apenas do módulo de elasticidade e da densidade do meio. Pode-se, ainda, generalizar a

equação da onda longitudinal, reescrevendo a equação (2.34) em função do coeficiente de Poisson [3]. Essa passagem é apresentada no subitem 2.2.4, a partir do estudo da lei de Hooke escrita na forma tensorial. Sendo assim, a equação (2.34) é definida por,

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (2.35)$$

As velocidades para as ondas cisalhantes V_C , na qual as partículas vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda, e para as ondas superficiais V_S , também podem ser demonstradas utilizando-se modelos semelhantes [3]. E suas respectivas equações são,

$$V_C = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$V_C = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} \quad (2.36)$$

$$V_S = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} \quad (2.37)$$

Ainda, em função dos valores dos coeficientes de Poisson dos materiais, pode-se admitir que a relação entre as velocidades da onda cisalhante e longitudinal, e a relação entre as velocidades da onda superficial e cisalhante é aproximadamente,

$$V_C = 0.5V_L \quad (2.38)$$

$$V_S = 0.92V_C \quad (2.39)$$

Então, a velocidade da onda cisalhante é aproximadamente 50% da velocidade da onda longitudinal e a velocidade da onda superficial cerca de 90% da onda cisalhante [11].

É interessante observar que a velocidade da onda ultrassônica discutida anteriormente é conhecida como velocidade de fase, uma vez que é obtida a partir da comparação da

fase de oscilação relativa de átomos vizinhos, na qual considera-se o meio contínuo e não dispersivo. Um meio dispersivo é aquele em que a velocidade de fase depende da frequência de oscilação. Muitas das situações em determinados fenômenos físicos não exibem qualquer variação nesse sentido, e podem ser representados pelas equações convencionais de propagação das ondas sonoras, que resultam em simplificações práticas, e que ignoram qualquer dependência entre a frequência e a velocidade. Quando, entretanto, o meio de propagação é dispersivo, a definição de velocidade, a partir da energia, requer uma atenção especial e será diferente da velocidade de fase. Isso porque, quando as velocidades de fase são distorcidas através do meio, essa distorção dificulta definir sua velocidade média. Introduce-se então o conceito de velocidade de grupo, que é a velocidade média de um grupo, ou pacote, de ondas, que é um sinal de comprimento finito compreendendo um número limitado de comprimentos de onda [3].

2.2.3.3 Da Relação Tensão-Deformação

Para entender a relação entre a tensão e o módulo de elasticidade do material na qual a onda se propaga, deve-se fazer o estudo do módulo de elasticidade volumétrico de um fluido ideal.

Sabe-se que o módulo de elasticidade volumétrico é dado pela razão entre a variação de pressão e a variação fracional de volume deslocado [3]. Então,

$$B = \frac{\Delta P}{\frac{A \vec{v} t}{Act}} \quad (2.40)$$

Onde,

B é o módulo de elasticidade volumétrico.

$A \vec{v} t$ é o volume deslocado com velocidade \vec{v} do êmbolo.

Act é o volume deslocado com velocidade c da frente de onda.

Então,

$$\Delta P = B \frac{\vec{v}}{c} \quad (2.41)$$

A equação (2.41) pode ser usada nos ensaios mecânicos de metalurgia, onde o módulo de elasticidade volumétrico B é interpretado como o módulo de elasticidade do material sólido (módulo de Young), e ainda faz-se as seguintes relações,

$$\Delta P \rightarrow \vec{\sigma}$$

$$\frac{\vec{v}}{c} \rightarrow \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \vec{\epsilon}$$

Daí, reescrevendo a equação (2.41), apresenta-se a lei de Hooke,

$$\vec{\sigma} = E \vec{\epsilon} \quad (2.42)$$

2.2.4 Tensor de Rigidez

Reescrevendo a lei de Hooke em sua forma tensorial, tem-se que [12],

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1 + \mu)} \left[\epsilon_{ij} + \frac{\mu}{(1 - 2\mu)} \delta_{ij} \epsilon_{mn} \right] \quad (2.43)$$

Para tornar o tensor da tensão simétrico é necessário fazer,

$$\epsilon_{ij} \longrightarrow \frac{\epsilon_{ij} + \epsilon_{ji}}{2}$$

Daí, segue que,

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1 + \mu)} \left[\frac{1}{2}(\epsilon_{ij} + \epsilon_{ji}) + \frac{\mu}{(1 - 2\mu)} \delta_{ij} \epsilon_{mn} \right] \quad (2.44)$$

Onde,

$$C_{ijkl} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \varepsilon_{kl}} \quad (2.45)$$

Então, substituindo-se a equação (2.57) na equação (2.58), tem-se que,

$$\begin{aligned} C_{ijkl} &= \frac{\partial}{\partial \varepsilon_{kl}} \left\{ \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1}{2}(\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}) + \frac{\mu}{(1-2\mu)} \delta_{ij} \varepsilon_{mn} \right] \right\} \\ C_{ijkl} &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1}{2}(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il}) + \frac{\mu}{(1-2\mu)} \delta_{ij} \delta_{mk} \delta_{ml} \right] \\ C_{ijkl} &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1}{2}(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{jk} \delta_{il}) + \frac{\mu}{(1-2\mu)} \delta_{ij} \delta_{kl} \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

Observa-se que na equação(2.59) há simetria no tensor de rigidez em relação as componentes i, j e k, l [12]. Então, a componente longitudinal é calculada quando $i = j = k = l = 1$. Daí, segue que,

$$\begin{aligned} C_{1111} &= \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1}{2}(\delta_{11} \delta_{11} + \delta_{11} \delta_{11}) + \frac{\mu}{(1-2\mu)} \delta_{11} \delta_{11} \right] \\ C_{1111} &= \frac{E}{1+\mu} \left[1 - \frac{\mu}{(1-2\mu)} \right] \\ C_{1111} &= \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \end{aligned} \quad (2.47)$$

Nota-se que C_{1111} é $\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \varepsilon_{11}}$, o que implica afirmar que ε_{22} e ε_{33} são mantidos constantes enquanto ε_{11} varia [12].

A componente transversal é calculada quando $i = k = 1$ e $j = l = 2$ [12]. Daí, segue que,

$$C_{1212} = \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{1}{2}(\delta_{11} \delta_{22} + \delta_{21} \delta_{12}) + \frac{\mu}{(1-2\mu)} \delta_{12} \delta_{12} \right]$$

$$C_{1212} = \frac{E}{1 + \mu} \left[\frac{1}{2} \right]$$

$$C_{1212} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.48)$$

Logo, substituindo-se a equação (2.47) na equação (2.34), reescreve-se a equação da velocidade de propagação da onda ultrassônica em função da componente longitudinal reescrita em sua forma tensorial, ou seja, em função do módulo de elasticidade (E), da massa específica (ρ), e do coeficiente de Poisson (μ). Da mesma forma, substituindo-se a equação (2.48) na equação (2.36), reescreve-se a equação da velocidade de propagação da onda ultrassônica em função da componente transversal, também reescrita em sua forma tensorial, ou seja, em função do módulo transversal (G), da massa específica (ρ), e do coeficiente de Poisson (μ).

2.2.5 Comportamento das Ondas Ultrassônicas

Na utilização de ondas ultrassônicas para os ensaios não destrutivos em materiais metálicos é necessário o uso de acoplante, ou seja, fluido de alta viscosidade e baixa rugosidade que se coloca entre o transdutor e a amostra do metal para se transmitir a onda, eliminando-se o problema da diferença de impedâncias acústicas dos meios, neste caso, entre o ar e o metal. A impedância acústica do metal é da ordem de 10^5 vezes maior que do ar. Define-se impedância acústica como a característica que determina a quantidade de energia refletida ou transmitida entre os meios que compõem a interface. Se as impedâncias acústicas dos meios forem iguais, não haverá reflexão, e toda a energia será transmitida, entretanto, se as impedâncias forem muito diferentes, como a interface metal-ar, por exemplo, haverá apenas reflexão, portanto a onda não será transmitida ao metal em análise [17].

A figura (2.11), representa a transmissão e a reflexão da onda ultrassônica propagando-se em dois meios com diferentes características acústicas.

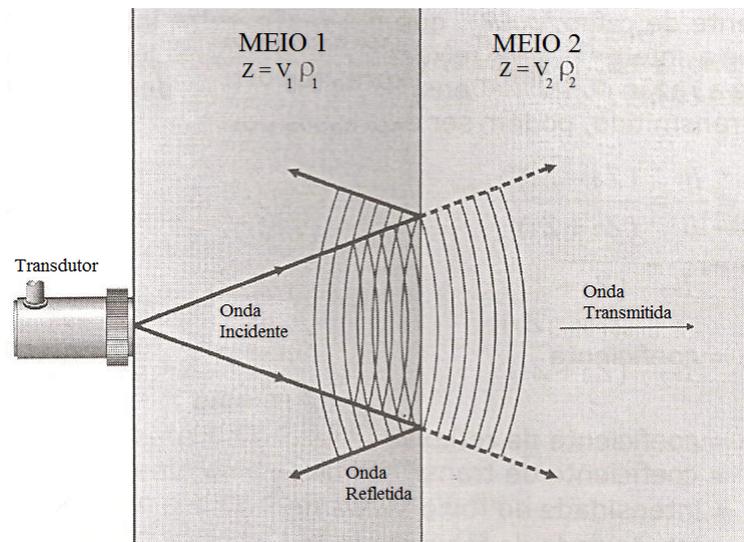


Figura 2.11: Reflexão e transmissão da onda ultrassônica[17]

Esta característica é usada no ensaio de ultrassom para calcular as quantidades de energia refletida e transmitida por discontinuidades, e principalmente, para selecionar materiais adequados para uma efetiva transmissão da energia acústica entre as interfaces do sistema de inspeção [17], isto é, para a produção de acoplantes eficientes.

2.2.6 Da anisotropia dos Metais

Os materiais metálicos usados nos ensaios deste trabalho são materiais que foram submetidos ao processo de laminação. Como resultado da deformação plástica ocorrida na laminação, os grãos do metal adquirem uma orientação preferencial paralela à direção de laminação. Metais laminados, ou seja, materiais que possuem anisotropia microestrutural, apresentam propriedades mecânicas que variam em função da direção de laminação, desta forma, torna-se importante a análise nestes materiais.

A figura (2.12) mostra uma micrografia feita a partir do corte longitudinal, ou seja, paralelo à direção de laminação de uma amostra do aço inox AID-2205 usada neste trabalho. Observa-se, que os grãos do material possuem um alinhamento preferencial conforme a direção de laminação, caracterizando-se assim, uma anisotropia microestrutural em relação aos eixos ortogonais considerados.

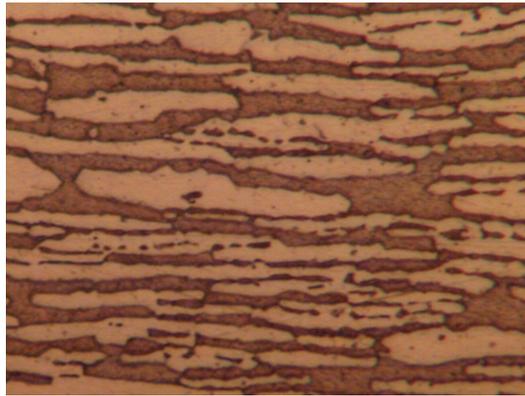


Figura 2.12: Micrografia do Aço Inox AID-2205 - 500x

Na teoria, os materiais metálicos que possuem os grãos com orientações cristalográficas distribuídas de forma aleatória, e que possuem suas propriedades físicas, em média constantes, conforme a direção adotada, são denominados materiais isotrópicos e homogêneos. Entretanto, se esses grãos assumem uma orientação preferencial, durante o processo de laminação, esse fato já é o suficiente para tornar o material anisotrópico do ponto de vista metalúrgico, pois suas propriedades físicas são alteradas conforme as direções consideradas. Do ponto de vista mecânico ocorre o mesmo fenômeno, ou seja, o material que, teoricamente, era isotrópico e homogêneo, após o processo de laminação, se torna acusticamente anisotrópico, pois neste caso, a velocidade da onda ultrassônica, ao se propagar numa chapa de aço, varia conforme a direção de laminação do material em análise. O interesse na análise da anisotropia microestrutural de um material é grande, porque além

de se prever as propriedades físicas citadas acima, deve-se separar os efeitos causados pela orientação dos cristais dos daqueles causados pela tensão, por exemplo, de um material carregado de tensões residuais.

A teoria desenvolvida para a medida de tensão residual por ultrassom, é adequada na medida que se conhece a influência da anisotropia gerada pela orientação preferencial dos grãos. Isto quer dizer que a orientação cristalográfica dos materiais aparece como um problema para a medida de tensão por ultrassom, uma vez que influenciam na velocidade da onda na mesma ordem de grandeza que as tensões, perturbando os resultados da medida de tensão [3]. A influência dessa anisotropia citada é estimada por uma birrefringência máxima de 10%, e este efeito pode ser subtraído das medidas de tensão adquiridas quando se conhece a direção de laminação da amostra [21].

Muitos métodos foram desenvolvidos como maneiras de separar os efeitos da orientação cristalográfica dos daqueles da tensão. Um desses métodos foi proposto por Allen e Sayers, em 1984, combinando a medida do tempo de trânsito de uma onda longitudinal com a medida do tempo de duas ondas cisalhantes ortogonalmente polarizadas. Basearam-se no argumento demonstrado de que a soma dos quadrados das velocidades dos três modos de onda, incidindo perpendicularmente e tomados em qualquer superfície, num material de estrutura cúbica, é uma constante independente da orientação dos grãos [13].

Fisher, em 1987, desenvolveu um método que consistia em medir a velocidade da onda na extremidade da chapa laminada, pois nestes locais não existe tensão residual, sendo assim a velocidade da onda superficial estaria sendo afetada apenas pela orientação cristalográfica. Esta medida seria usada como referência ao se medir a parte da chapa laminada com tensão. Este método foi empregado também por outros pesquisadores, por apresentar a particularidade de que, o material ensaiado inicialmente estaria representando exatamente a mesma microestrutura do material ao qual se desejava medir as tensões [13].

Através do uso de ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente, Pritchard, em 1987, mostrou também, que é possível separar os efeitos da orientação cristalográfica dos daqueles causados pela tensão. Para isso, mediu a velocidade da onda superficial horizontalmente polarizada em função do ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção de laminação de uma chapa de alumínio. Ele constatou que para ângulos intermediários entre as direções de laminação e a ortogonal a esta, a velocidade é afetada pelo alinhamento dos grãos, na qual o grau de variação depende da quantidade e do tipo de textura

do material, porém para o material livre de tensões a velocidade quando as direções estão alinhadas voltará ao seu valor original [13].

Bittencourt, em 1997, aplicou a técnica da birrefringência para determinar a direção de laminação de chapas de aço e alumínio com um transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal, perpendicular à face da chapa. Para o teste o transdutor foi posicionado em vários pontos da superfície da chapa de maneira que o ângulo formado entre a direção de polarização da onda e a direção de laminação do material, ficasse em 0° , 60° e 90° . Para cada posição mediu-se a velocidade da onda, ou seja, o tempo que a onda levou para percorrer a espessura da chapa. Concluiu-se que dependendo do tipo de material que está sendo analisado, o tempo de percurso da onda é maior ou menor, quando a direção de polarização está alinhada com a direção de laminação, ocorrendo o oposto quanto esta perpendicular à esta. Para o aço, a menor velocidade ocorre quando a direção de polarização está perpendicular à direção de laminação, e para o alumínio, o comportamento é oposto. Sendo assim, a direção de laminação é aquela em que o sinal ultrassônico chega atrasado ou adiantado em relação às outras posições [13].

2.2.7 Birrefringência Acústica

A velocidade das ondas ultrassônicas, tanto com a direção de polarização paralela como perpendicular à direção de laminação, ao se propagar através de um sólido elástico laminado não é constante quando comparado à situação hipotética e teórica de um sólido homogêneo e isotrópico, ou seja, ocorre uma variação que depende do estado de tensão residual do material processado, da direção de propagação da onda ultrassônica em relação aos planos cristalinos, e da direção da movimentação das partículas do meio elástico pela passagem da onda [3]. O estado de tensão do material pode estar relacionado a vários fatores, tais como, a submissão a processos de conformação mecânica, por exemplo, ou a esforços externos. Por sua vez, tanto a direção de propagação da onda, quanto a direção de movimentação das partículas do meio, podem estar alinhada ou não à direção de laminação, ou à direção da carga externa. Como já foi citado, o material na qual foram extraídas as amostras é anisotrópico do ponto de vista metalúrgico e mecânico. Desta forma, denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional entre as velocidades ou entre os tempos de trânsito da onda ultrassônica tomada a partir das diferentes direções ortogonais polarizadas entre si [3]. Nesta técnica, a onda é propagada perpendicularmente à superfície através da espessura do material podendo a polarização da onda ser alinhada ou não com a direção de laminação do material. Em um material isotrópico, isto é, sem

efeito da orientação dos grãos, o tempo que a onda leva para percorrer a espessura é o mesmo para as duas direções de polarização. Porém, se este material é anisotrópico, pode-se calcular a birrefringência inicial B_0 [13]:

$$B_0 = \frac{t_1 - t_2}{\frac{t_1 + t_2}{2}} \quad (2.49)$$

Onde t_1 é o tempo de percurso da onda ultrassônica polarizada ao longo do eixo acústico rápido, ou seja, com a direção de polarização da onda paralela à direção de laminação do material e t_2 é o tempo de percurso da onda polarizada ao longo do eixo acústico lento, isto é, com a direção de polarização da onda perpendicular à direção de laminação do material.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Componentes do Sistema de Medição por Ultrassom

No desenvolvimento deste trabalho é montada uma bancada experimental para se analisar a anisotropia acústica em materiais metálicos através do emprego do sistema ultrassônico para a medida do tempo decorrido de propagação da onda. O diagrama de blocos e a fotografia que são mostrados, respectivamente, nas figuras (3.1) e (3.2), permitem um melhor entendimento do princípio de funcionamento e dos componentes que integram o sistema ultrassônico.

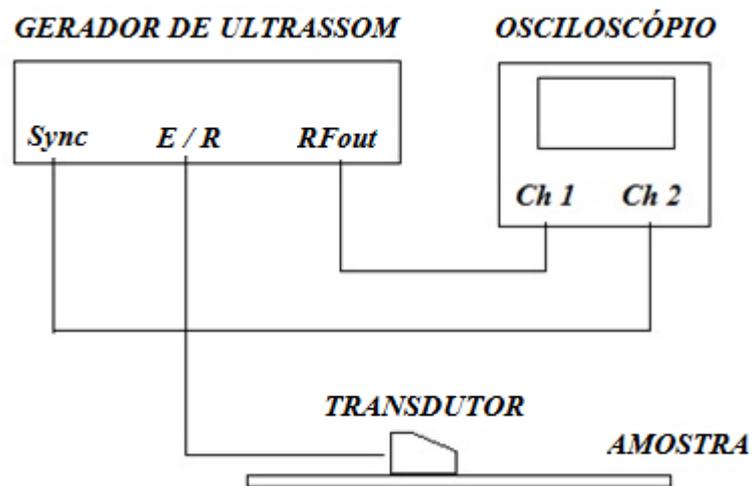


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema ultrassônico

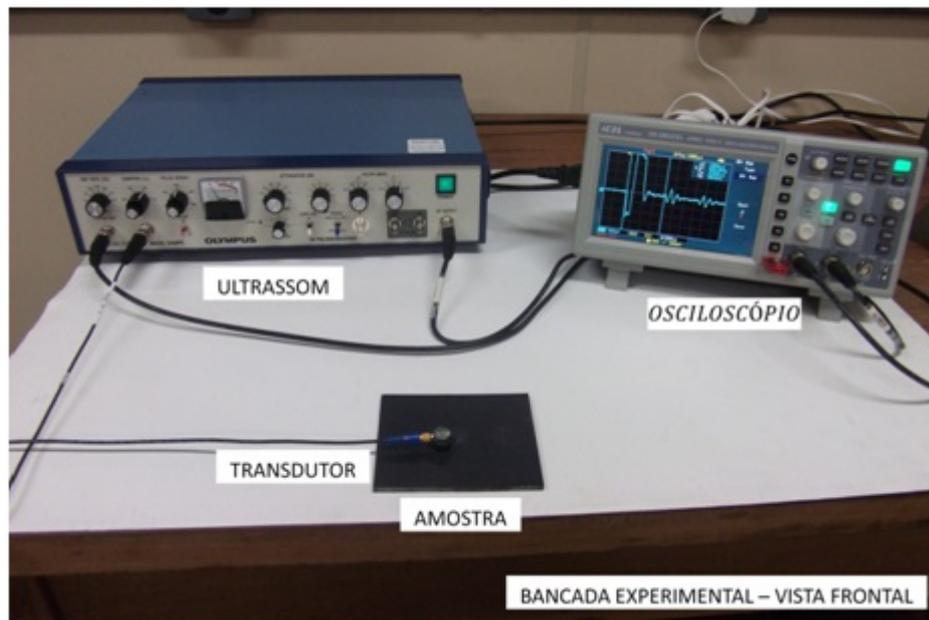


Figura 3.2: Componentes do sistema ultrassônico

Onde,

$Ch1$ e $Ch2$ são os dois canais analógicos com a ligação do fio terra no próprio chassi do osciloscópio. Conforme o modo de operação utilizado, o canal 1 é a entrada principal do sinal analógico, enquanto o canal 2 realiza o sincronismo do osciloscópio e o aparelho de ultrassom.

E/R é a transmissão (emissor/receptor) do sinal para o transdutor no equipamento de ultrassom, que neste trabalho, foi operada no modo pulso-eco.

$Sync$ é a entrada do sincronismo do sinal trigado, que neste trabalho optou-se pelo canal 2.

$RF - out$ é a saída analógica (rádio frequência) do equipamento de ultrassom.

O sistema de medição é composto de um aparelho de ultrassom não convencional que funciona como um gerador de pulsos, e simultaneamente, como receptor de ecos a partir de um transdutor piezoelétrico. O gerador de pulsos ultrassônicos é conectado diretamente a um osciloscópio digital, e este conectado diretamente a um microcomputador. Os pulsos gerados excitam o transdutor piezoelétrico que transmite ao material em análise as ondas ultrassônicas. Estas ondas penetram no material e retornam, mostrando na tela do osciloscópio os ecos relativos ao tempo decorrido para a onda se propagar ao longo da espessura da chapa laminada. Os sinais são adquiridos por um *software* instalado no microcomputador, e a taxa de aquisição é manipulada pelo usuário, conforme o tipo de

fenômeno que se deseja analisar.

Utilizou-se um transdutor piezoelétrico de ondas cisalhantes com incidência normal de 5 MHz. Neste tipo de transdutor, a onda cisalhante emitida incide perpendicularmente no material, percorrendo a região ao longo da espessura no ponto em análise. Optou-se por este tipo de transdutor pelo fato de garantir a varredura em todo o volume do material a ser inspecionado, bem como, por saber que a velocidade da onda cisalhante é, aproximadamente, metade da velocidade da onda longitudinal [3, 11, 17], e também, para garantir que, em todos os pontos da malha de referência inscrita na amostra, a onda percorra a mesma distância.

Na configuração pulso-eco utiliza-se apenas um transdutor com essa característica. A medida do tempo decorrido de propagação da onda é feita vinculada diretamente à base de tempo selecionada no osciloscópio. Neste caso, é tomada uma referência comum a dois ecos consecutivos, que pode ser o ponto de máximo dos ecos ou o ponto de inflexão. A figura (3.3) mostra um exemplo de medição de espessura, na qual o tempo é medido diretamente pelo intervalo entre esses dois pontos, marcados nos dois ecos consecutivos, que corresponde ao tempo que a onda ultrassônica levou para percorrer duas vezes a espessura do material [3]. Essa técnica pode ser aprimorada com a utilização de processamento de sinal adequado como será estudado adiante.

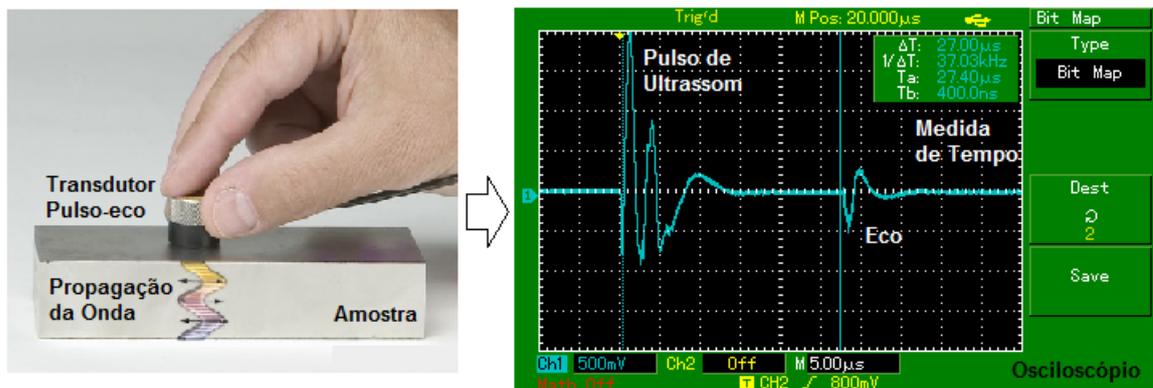


Figura 3.3: Representação da medição de espessura na configuração pulso-eco

Para os experimentos realizados com o transdutor de incidência oblíqua foi utilizado o método direto para medida do tempo de trânsito da onda ultrassônica superficial, uma vez que o osciloscópio digital oferece recursos para a gravação tanto do sinal adquirido, quanto da imagem contendo o valor do intervalo de tempo medido conforme a calibração da escala previamente estabelecida.

O acoplante (fluido de alta viscosidade e baixa rugosidade que se coloca entre a peça e o transdutor para se transmitir a onda ultrassônica) utilizado para eliminar a camada de ar entre o transdutor e a chapa, e assim facilitar a transmissão das ondas ultrassônicas foi a glicerina. A escolha deve-se ao fato de que a glicerina possui baixa rugosidade superficial, em torno de $2 \mu m$, e impedância acústica equivalente à do aço[17].

Abaixo, segue a especificação dos componentes do sistema ultrassônico:

- Osciloscópio Digital 25GS/s:
Minipa - Modelo MO-2062 com *software* de aquisição do sinal.
- Gerador de Pulso [Emissor / Receptor]:
Modelo 5058PR alta voltagem – Olympus NDT [*Nondestructive testing Products*].
100 - 900V com configurações de tensão contínua e gradual. Atenuador de 0 - 80 dB em passos de 1 dB e escala de 1dB - 60 dB.
- Transdutores Piezoelétricos:
Transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal, frequência de 5 MHz, e 10 mm de diâmetro.
Transdutor de incidência oblíqua de 60° , frequência de 4 MHz.
- Microcomputador, 2GB de memória, processador dual core 2.2GHz, HD 160GB, SO windows 7, com Matlab e Excel 2010.

3.2 Determinação da Direção de Polarização da Onda no Transdutor

O uso da técnica da birrefringência, empregando transdutores de ondas cisalhantes, necessita que seja conhecida a direção de polarização da onda ultrassônica nos transdutores em uso, isto é, a direção na qual a onda é gerada. As ondas cisalhantes são geradas quando as partículas próximas à superfície da chapa são acionadas na direção paralela a esta superfície, ou seja, quando o primeiro plano se desloca, na direção conhecida, ele arrasta por interação elástica o plano adjacente, e assim por diante [17].

Na aquisição dos transdutores o comprador pode solicitar esta informação, ou mesmo sem essa solicitação formal, muitas vezes o próprio fornecedor já indica a direção de polarização da onda no transdutor. Entretanto, na situação em que a direção de polarização seja desconhecida, essa informação pode ser obtida de modo bastante simples. Neste tra-

balho apresentam-se duas maneiras distintas, uma para o transdutor de onda cisalhante de incidência normal, e outra, para o transdutor de incidência oblíqua.

3.2.1 Transdutor de Onda Cisalhante de Incidência Normal

Pode-se determinar a direção de polarização da onda no transdutor emitindo-se uma onda longitudinal em uma peça de aço com um lado inclinado em 61° conforme mostrado na figura (3.4).

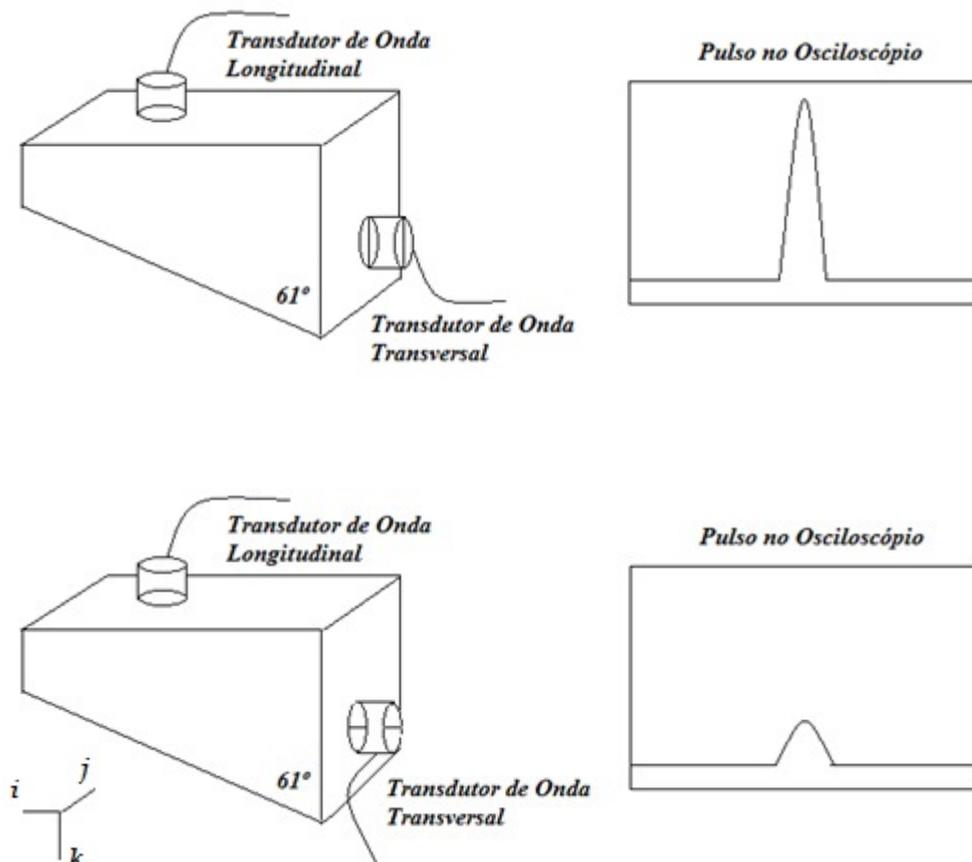


Figura 3.4: Esquema para determinação da direção de polarização da onda no transdutor de incidência normal via bloco com iclinação de 61° [3] - adaptado

Assim, ocorre uma conversão de modo muito forte para onda transversal. Com um transdutor longitudinal emissor e um transversal receptor, faz-se o transdutor transversal girar. Quando o eco alcançar a amplitude mínima (menor energia do pulso), a direção de polarização da onda no transdutor será perpendicular à direção de propagação da onda longitudinal, normal ao plano jk . Quando encontrar a amplitude máxima, será paralela à direção de propagação da onda longitudinal, paralela ao plano jk [3].

A explicação da utilização do bloco de 61° é que os fenômenos de conversão de modo que ocorrem obedecem aos princípios físicos da lei de Snell, ou seja, é importante observar que uma onda longitudinal incidente com ângulo entre 60° e 70° na interface do metal, será refletida na forma de uma onda transversal com alta pressão sônica, pois o segundo ângulo crítico é 60° [17].

3.2.2 Transdutor de Incidência Oblíqua

O modo de se determinar a direção de polarização da onda ultrassônica no transdutor de incidência oblíqua é, também, via experimento, na qual utiliza-se o bloco padrão de calibração *V1*. Neste caso, move-se, horizontalmente ao plano da interface do metal, o transdutor de incidência oblíqua até atingir o eco de amplitude máxima na resposta, ou seja, o pulso ultrassônico remanescente de maior energia. Se encontrar o eco de amplitude máxima, conforme o índice de marcação do bloco de calibração, encontra-se a direção de polarização da onda no transdutor, pois nessa posição o cristal piezoelétrico do transdutor capta completamente o eco refletido.

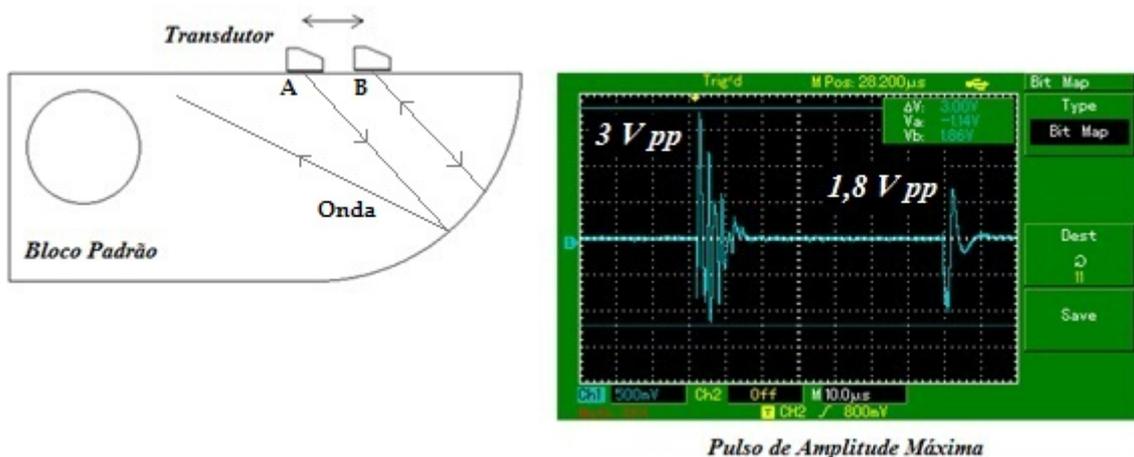


Figura 3.5: Esquema para determinação da direção de polarização da onda no transdutor de incidência oblíqua via bloco padrão *V1*

Conforme a figura (3.5), numa experiência realizada neste trabalho, o pulso ultrassônico emitido possui amplitude de 3V pico a pico, enquanto o eco de resposta na posição *B* possui amplitude máxima de $1,8\text{V}$ pico a pico, decorridos $70\mu\text{s}$ da emissão. Neste caso, o decaimento mínimo de energia foi de 40% durante a propagação da onda transmitida. Nesta experiência calibrou-se o osciloscópio nos seguintes valores: 500 mV por divisão no canal 1, e $10\mu\text{s}$ por divisão na escala de tempo. O equipamento de ultrassom foi

ajustado para os seguintes valores: 2 KHz, 200 ohms, filtragem *HighPass* = 0.1db e *LowPass* = 0.5db.

Executaram-se, experimentalmente, as duas maneiras de se determinar a direção de polarização nos transdutores: incidência normal e incidência oblíqua. Os resultados foram satisfatórios nos dois casos, porém a experiência realizada neste subitem é mais vantajosa. Nota-se, a princípio, que a experiência realizada no subitem 3.2.1 exige muita habilidade manual do operador, pois deve-se manusear dois transdutores, o emissor e o receptor, tornando-se a prática complexa e passível de erros devido a alta sensibilidade do equipamento. Já a experiência realizada neste subitem, pelo modo de operação pulso-eco, o operador manipula facilmente o transdutor de incidência oblíqua enquanto monitora o eco na tela do osciloscópio. Outra questão importante é o fato de que o bloco metálico com inclinação de 61° da experiência realizada no subitem 3.2.1 não se encontra à venda, ou seja, deve-se confeccionar conforme as medidas, enquanto o bloco padrão da experiência realizada neste subitem, já é próprio para calibração de transdutores e pode ser adquirido no mercado especializado em vendas de produtos de ensaios não destrutivos conforme catálogos técnicos.

3.3 Determinação da Direção de Laminação de Chapas de Aço

Com o intuito de avaliar a eficiência do método ultrassônico para se determinar a direção de laminação das chapas, foram escolhidas amostras de aços de diferentes especificações, com diferentes espessuras, condições de laminação, e tratamento térmico. A tabela (3.1) traz a análise química, classificação e espessura das chapas de aço analisadas, todas classificadas como aço baixa liga.

Aço	Classificação	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Ni(%)	Cr(%)	Mb(%)	Esp.(mm)
Inox	AID 2205	0.015	0.3238	1.835	0	0	5.468	22.753	3.0147	4
ASTM A36	Estrutural	0.25	0.4	0.8	0.04	0.05	0	0	0	5
ABNT	1045	0.47	0.22	0.71	0.018	0.011	0	0	0	12.5
B.Q.	API 5LX80	0.076	0	1.512	0.016	0.002	0	0	0	19

Tabela 3.1: Especificação e composição química das amostras analisadas

3.3.1 Determinação da Direção de Laminação via Análise Metalográfica

Para determinação da direção de laminação de uma chapa de aço carbono baixa liga, via análise metalográfica, duas pequenas amostras são cortadas em relação à espessura da chapa, nos sentidos transversal e longitudinal à direção de referência inicial, tomada com base na aparência visual da região em análise. Escolhe-se, arbitrariamente, uma direção longitudinal, e conseqüentemente, uma direção transversal, e faz-se a marcação na chapa antes do corte. A figura (3.6) representa um exemplo de extração e visualização dos corpos de prova, a partir do recorte da chapa laminada, para a determinação da direção de laminação via análise metalográfica.

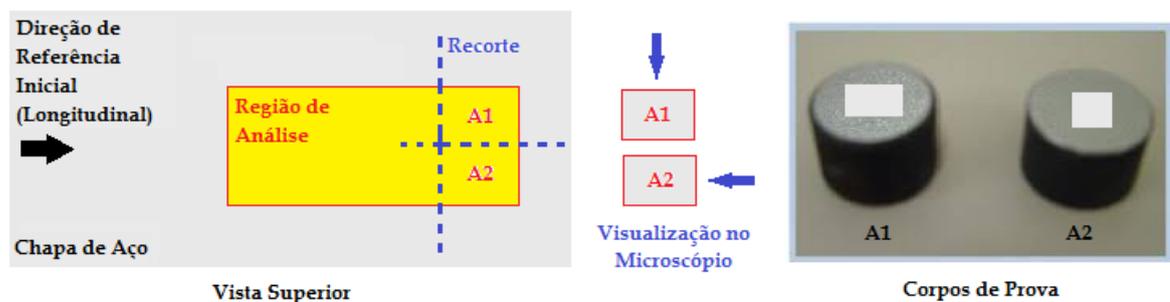


Figura 3.6: Representação do recorte da chapa laminada e visualização do corpo de prova no microscópio

Na realização dos ensaios, são feitos lixamento de desbaste para retirada de rebarbas e lixamento superficial para regularização da superfície do material, ambos feitos de forma manual. É realizado, também, o polimento das amostras com panos e abrasivos específicos para materiais ferrosos com os equipamentos do laboratório de Metalurgia da EEIMVR-UFF, e atacadas com Nital 3% (solução composta de 97 ml de água destilada e 3 ml de ácido nítrico) para melhor visualização. No processo é usado um microscópio óptico modelo *MetallvertLeitz* com analisador de imagens e software *Image – proPlus* para a aquisição das micrografias.

Seguem os passos realizados:

1º passo: Corte da amostra laminada. Ver figura (3.7) (a).

2º passo: Recorte de duas pequenas amostras (longitudinal e transversal) e realização do embutimento com polímero. Ver figura(3.7) (b).

3º passo: Etapas de lixamento: 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 mesh. Ver figura (3.8) (a).

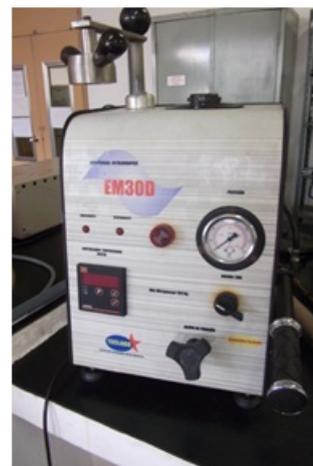
4º passo: Etapas de polimento com alumina de 1%, 0.5% e 0.03%. Ver figura (3.8) (b).

5º passo: Ataque com Nital durante 10 s de exposição.

6º passo: Coletar as micrografias da estrutura cristalina do material com o microscópio óptico com analisador de imagens. Ver figura (3.9).



(a) Policorte



(b) Máquina de Embutimento

Figura 3.7: 1º e 2º passos



(a) Lixadeira

(b) Politriz

Figura 3.8: 3º e 4º passos

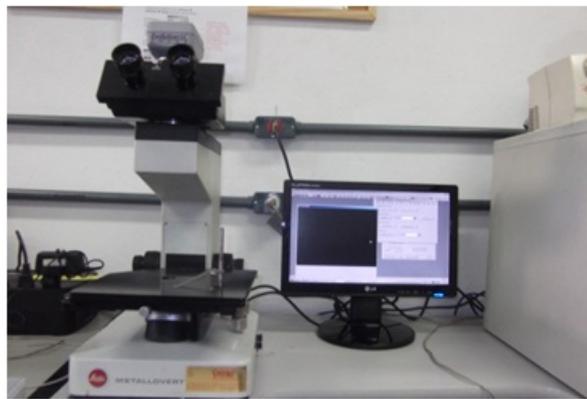


Figura 3.9: Microscópio óptico com digitalização de imagens

Para a amostra de aço inox AID 2205, as lixas de carbeto de silício são fixadas nos discos rotativos da lixadeira e politriz metalográfica dupla PL02EB modelo Teclago, conforme as figuras (3.8). São utilizadas lixas de variadas granulometrias, também seguindo uma ordem crescente: 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh.

Para o polimento é utilizado como abrasivo pasta de diamante de 6 e 3 μm . Posteriormente, são realizados ataques químicos nas amostras para revelar a microestrutura do material, e assim identificar, visualmente, a orientação dos grãos conforme a direção de laminação. O ataque é realizado utilizando-se reagente específico para aços inoxidáveis duplex denominado Behara II no qual é utilizada a seguinte proporção para produzir a solução: 1000 ml de água destilada, 200 ml de ácido clorídrico e 0,3 g de metabissulfito de potássio. Após o preparo da solução, submete-se a amostra em contato com o reagente durante, aproximadamente, 12 segundos. Em seguida, a amostra é retirada da solução e limpa com álcool etílico absoluto e posta para secar com jato de ar quente. Para a análise

da microestrutura da amostra é usado o microscópio óptico Leica DMILM com câmera acoplada Leica DFC295 e software para obtenção de imagens LeicaQWin Lite V 3.5.1. LEICA localizado no laboratório de caracterização microestrutural da EEIMVR-UFF.

3.3.2 Determinação da Direção de Laminação por Ultrassom Utilizando o Transdutor de Incidência Oblíqua

Para determinação da direção de laminação via ultrassom com a utilização do transdutor de incidência oblíqua, colocou-se o transdutor em pontos distintos na superfície da chapa e mediu-se o tempo de percurso da onda em cada ponto em duas direções ortogonais entre si. Para esta análise é muito importante que se conheça previamente o comportamento da velocidade da onda ultrassônica se propagando em duas direções de polarização ortogonais entre si em relação à direção de laminação da chapa. Os dados foram processados através de um código computacional elaborado em Matlab, onde foram calculadas as velocidades da onda ultrassônica superficial em cada região sem a influencia da borda, como indicado na figura (3.10).

O método é realizado em três etapas. A primeira etapa refere-se a marcação dos referenciais nas amostras do aço inox AID 2205 e do aço ASTM A36 . Foram traçadas retas perpendiculares em pontos previamente selecionados da chapa obtendo-se assim quadrantes com as medidas das distâncias conhecidas. Nestes quadrantes foram marcados os pontos distintos, conforme o exemplo da figura (3.10),

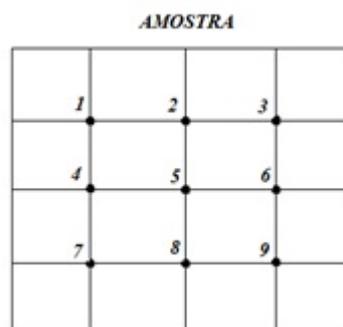


Figura 3.10: Exemplo de uma malha de referência. O número de pontos foi distribuído conforme o tamanho da amostra.

Na segunda etapa, submete-se as amostras ao ensaio de ultrassom. Tomou-se uma direção de referência inicial (*D.R.I.*), e alinhou-se a direção de polarização do transdutor com esta direção. A seguir deu-se um giro de 90° no transdutor alinhando-o para a outra posição, conforme o esquema mostrado na figura (3.11).

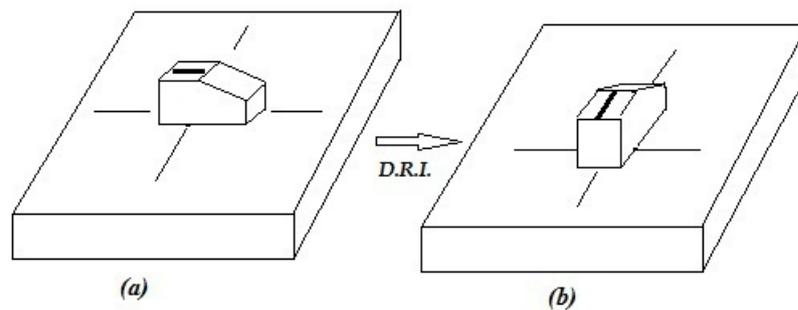


Figura 3.11: Desenho esquemático mostrando um exemplo das diferentes posições do transdutor. (a) DP // DRI (ponto 4 \rightarrow 5) e (b) DP + DRI (ponto 4 \rightarrow 1)

O sinal ultrassônico foi adquirido com o transdutor nessas duas posições. Este procedimento repetiu-se para todos os nodos selecionados com o intuito de se determinar os tempos de percurso da onda ao longo da superfície da chapa. Em função da anisotropia do material, e principalmente, pelos efeitos de borda, cada sinal obtido para uma determinada direção, chegará adiantado ou atrasado em relação a outro, como mostra o exemplo da figura (3.12).

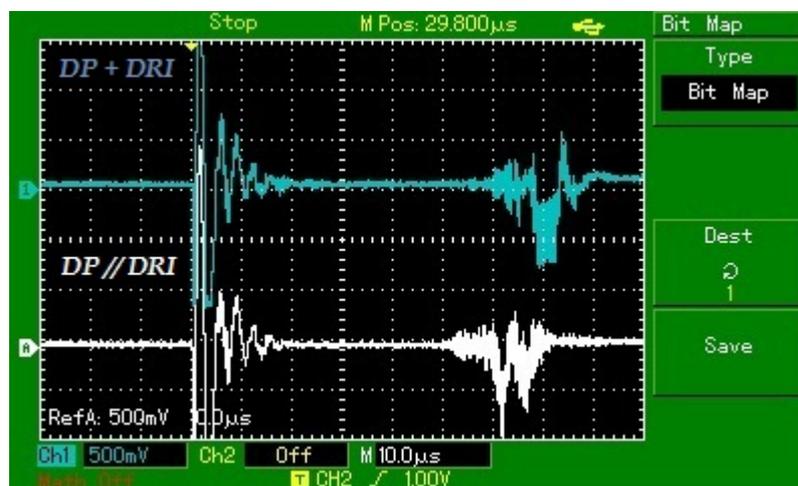


Figura 3.12: Exemplo de sinais obtidos conforme a orientação do transdutor - sinal azul: ponto 4 \rightarrow 1 ; sinal branco: ponto 4 \rightarrow 5

Procedimentos práticos já mostraram que, no caso do aço, a maior velocidade da onda ocorre quando a direção de polarização coincide com a direção de laminação, e a menor velocidade ocorre quando a direção de polarização está perpendicular à direção de laminação [3]. Sabendo-se que o experimento prático não é automatizado, dependendo portanto da intervenção manual do operador, é possível a ocorrência de erros de precisão causados por diferentes forças aplicadas sobre o transdutor em cada ponto da malha de

referência. Neste caso, para eliminar ou reduzir este erro, adotou-se, aproximadamente, o valor de 50 N, ou seja, colocou-se um bloco de apoio de massa igual a 5 Kg sobre o transdutor de incidência oblíqua na medição do tempo de percurso da onda em cada ponto da malha de referência.

Esta análise tem a finalidade de avaliar o material na condição como recebido, com relação ao efeito da anisotropia oriunda de processos de fabricação anteriores, tais como corte, laminação, e usinagem [13]. A birrefringência, que pode ser entendida como a diferença fracional das velocidades ou dos tempos decorridos, tomados nas direções paralela e perpendicular, mostra a anisotropia do material com relação à passagem da onda ultrassônica nas diferentes direções, e mais acentuadamente, nas bordas (não consideradas no experimento). Na amostra os tempos foram medidos nas regiões estabelecidas com a direção de polarização do transdutor ora alinhada ora perpendicular à direção de referência inicial. A birrefringência em relação ao tempo foi calculada subtraindo-se o tempo de percurso da onda nas direções polarizadas, e dividindo este valor pela média aritmética dos tempos aquisitados, enquanto a taxa percentual de variação da velocidade em cada ponto foi calculada levando-se em consideração apenas a diferença fracional das velocidades tanto alinhada quanto perpendicular à direção de referência inicial, conforme a equação (2.49) [3].

A terceira, e última etapa, foi o processamento dos sinais aquisitados e a geração dos gráficos comparativos que serão apresentados posteriormente. O método usado neste ensaio, para calcular as medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica nas duas amostras: inox AID 2205 e ASTM A36, foi o método direto, que será mostrado mais adiante. No experimento, foram realizadas 10 medições em cada ponto da malha de referência nas duas direções, onde foram retiradas as medidas de maior e menor valor, e das restantes, calculada a média e o desvio padrão. Com as matrizes dos valores das médias e dos desvios padrão gerados nas duas direções ortogonais entre si, em relação à direção de laminação, foi executado um código computacional em Matlab que encontra-se na seção Apêndice deste trabalho.

3.3.3 Determinação da Direção de Laminação por Ultrassom Utilizando o Transdutor de Incidência Normal

Para a determinação da direção de laminação via ultrassom com a utilização do transdutor de incidência normal, colocou-se o transdutor em pontos distintos na superfície da amostra e mediu-se o tempo de percurso da onda em cada ponto, de duas maneiras: ora

com a direção de polarização do transdutor alinhada, ora perpendicular com a direção de referência inicial.

O método consistiu em três etapas. A primeira etapa foi constituída da marcação dos referenciais nas amostras do aço ABNT 1045 e do aço API 5L X80. Foram traçadas retas perpendiculares em pontos previamente selecionados da chapa, conforme o exemplo da figura (3.13),



Figura 3.13: Exemplo de uma malha de referência. Nas amostras maiores, o número de pontos de medição chegou a 60

A segunda etapa foi caracterizada pelo ensaio de ultrassom propriamente dito. Tomou-se uma direção de referência inicial, alinhou-se a direção de polarização do transdutor com esta direção, e aquisitou-se o sinal propagado. A seguir deu-se um giro de 90° no transdutor alinhando-o para a outra posição, conforme o esquema mostrado na figura (3.14), aquisitando-se novamente o sinal em questão.

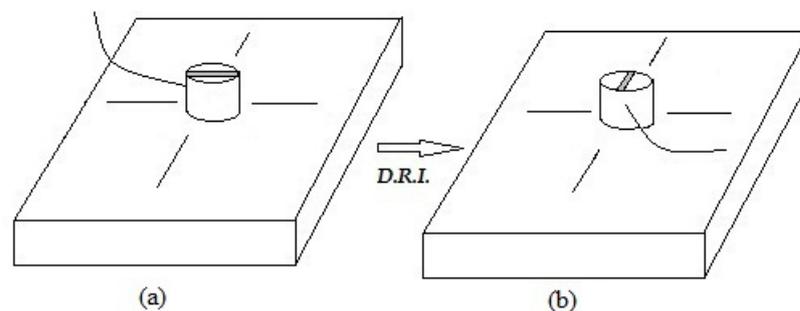


Figura 3.14: Desenho esquemático mostrando duas diferentes posições do transdutor. (a) DP // DRI e (b) DP \perp DRI

O sinal ultrassônico foi aquisitado com o transdutor nessas duas posições. Este procedimento repetiu-se para todos os pontos selecionados com o intuito de se determinar os

tempos de percurso da onda através da espessura da chapa. Em função da anisotropia do material, cada sinal obtido para uma determinada direção, chegará adiantado ou atrasado em relação ao outro.

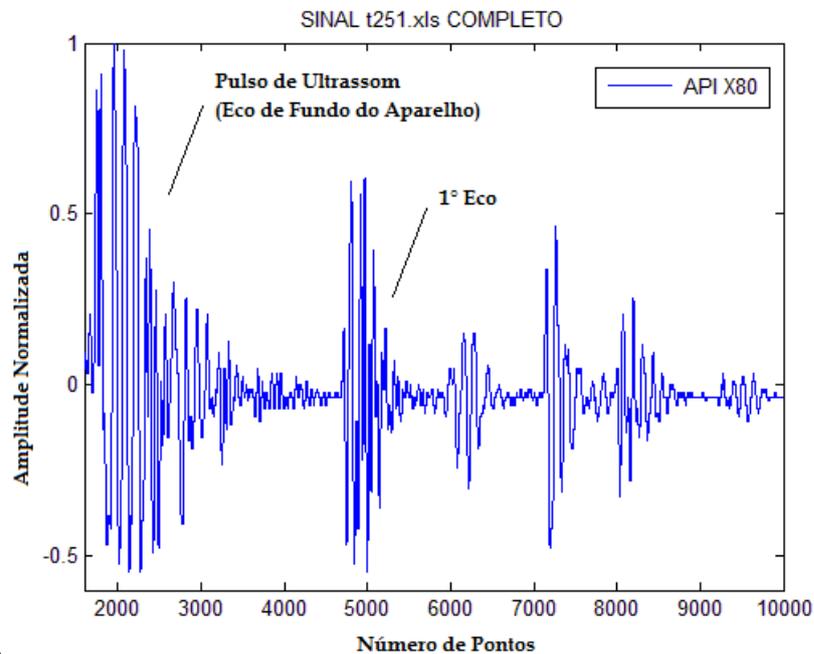


Figura 3.15: Sinal obtido no ponto 25 com a DP // DRI

No modo de operação Pulso-eco, selecionado no gerador de ultrassom, o primeiro pulso (pulso de ultrassom conforme a figura (3.15)) é mostrado, constantemente, na tela do osciloscópio, ou seja, mesmo que o operador não coloque o transdutor em contato com a amostra, o sinal fica registrado conforme a base de tempo selecionada no equipamento em questão. Na prática, os técnicos denominam esse pulso como eco de fundo do equipamento.

O sinal da figura(3.15) representa a propagação da onda cisalhante através da espessura do aço API 5L X80 no ponto 25 com a direção de polarização do transdutor paralela à direção de referência inicial. Sabendo-se que o experimento prático não é automatizado, dependendo portanto da intervenção manual do operador, é possível a ocorrência de erros de precisão causados por diferentes forças aplicadas sobre o transdutor em cada ponto da malha de referência. Neste caso, para eliminar ou reduzir este erro, adotou-se, aproximadamente, o valor de 50 N, ou seja, colocou-se um bloco de apoio de massa igual a 5 Kg sobre o transdutor de incidência normal na medição do tempo de percurso da onda em cada ponto da malha de referência.

A terceira, e última etapa, tratou do processamento dos sinais aquisitados e da geração

dos gráficos comparativos que serão apresentados posteriormente. O método usado neste ensaio, para calcular as medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica através da espessura em cada ponto da malha de referência nas duas amostras, foi o método da correlação cruzada, que será mostrado mais adiante. No experimento foram realizadas, em cada ponto determinado na malha, 10 medições de tempo de percurso da onda ultrassônica ao longo da espessura do material. Cabe ressaltar que o intervalo entre uma e outra medição, no mesmo ponto, e nas duas direções ortogonais entre si, chegou a ser maior que 24 horas, objetivando repetibilidade ótima dos componentes do sistema ultrassônico montado. Os sinais foram coletados com taxa de aquisição de 10000 pontos num intervalo de 20 us, o que resulta uma taxa de aquisição de 2 ns por ponto no sinal. A taxa de aquisição do equipamento é ajustada automaticamente, e varia conforme a espessura do material, ou seja, neste caso considerado, a espessura da amostra era de 19 mm. Uma vez aquisitados os sinais, foi executado um código computacional, que será apresentado na seção Anexos, capaz de realizar a leitura dos sinais aquisitados e o cálculo do intervalo de tempo da onda ultrassônica através da espessura, em cada ponto, e em cada direção respectiva. Por fim, foram eliminados o maior e o menor valor de tempo em cada ponto, em cada direção, e calculada a média e o desvio padrão para análise gráfica.

3.4 Processamento de Sinais

Na obtenção das variações de tempo da onda ultrassônica cisalhante ao longo da superfície ou da espessura do material foi utilizada a configuração pulso-eco, onde um único transdutor é usado como emissor e receptor, e o sinal aquisitado corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face oposta a que o transdutor está acoplado. O tempo de percurso da onda é o tempo medido entre dois ecos consecutivos, que neste trabalho pode ser calculado de duas maneiras distintas: o método direto e a correlação cruzada.

3.4.1 Método Direto

Este método consiste em medir o tempo de percurso da onda ultrassônica através do intervalo entre os máximos de dois ecos consecutivos, ou seja, o pulso de ultrassom (eco de fundo) e o primeiro eco. Na execução do código computacional, buscam-se dois pontos de referência no sinal, e calcula-se o intervalo de tempo entre eles. O método é passível de erros, seja por dificuldades de localização da referência, seja pela falta de precisão na sua localização devido a existência de ruídos no sinal aquisitado. O que normalmente ocorre,

por exemplo, é a existência de dois ou mais pontos contendo o valor máximo do sinal, o que gera essa falta de precisão. Neste trabalho, a rotina escrita em Matlab, retorna o ultimo valor máximo encontrado nas regiões de busca.

O código computacional, a princípio, realiza a leitura dos sinais adquiridos, carregando e normalizando os sinais em cada ponto conforme a orientação do transdutor. Depois, cria uma matriz, na qual cada linha representa o sinal adquirido em cada ponto, e em sua respectiva direção. A partir dessa matriz, aplicam-se janelas sobre o sinal completo, representado em cada linha, separando-se as regiões de interesse: o pulso de ultrassom inicial e o primeiro eco.

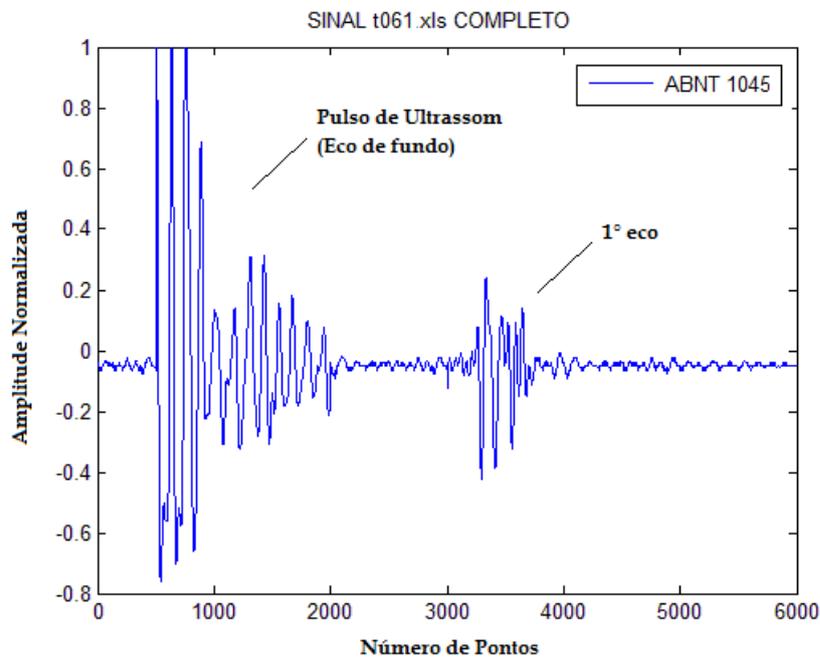


Figura 3.16: Sinal completo no ponto 6 da amostra do aço ABNT 1045

Como exemplo, a figura (3.16) representa o sinal de propagação da onda ultrassônica completo no ponto 6 com a direção de polarização da onda no transdutor paralela à direção de referência inicial na amostra do aço ABNT 1045.

A segunda etapa no código computacional trata do cálculo da defasagem de propagação da onda pela diferença entre os pontos de máximos das respectivas regiões consideradas.

Nesta rotina, separa-se a primeira região de busca do valor máximo, encontra-se o ponto de máximo do pulso de ultrassom (eco de fundo no aparelho), e cria-se um vetor contendo todos os valores de máximo desta região, em cada linha da matriz principal

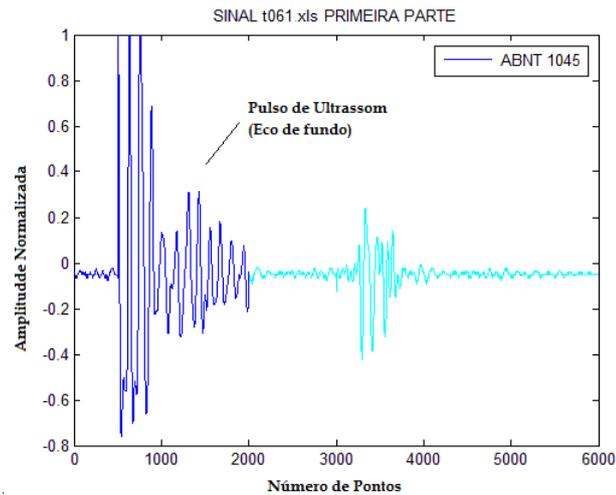


Figura 3.17: Separação da primeira região - pulso de ultrassom

que contém todos os sinais adquiridos em todos os pontos da malha de referência na amostra. Conforme a figura (3.17), observa-se a separação da primeira região de busca contendo o valor máximo do pulso de ultrassom inicial. Observa-se, também, que ocorre uma diminuição do número de pontos do sinal coletado nos mesmos 20 us, ou seja, por conta da espessura da amostra do aço ABNT 1045 ser igual a 12 mm, a taxa de aquisição de pontos, que é ajustada automaticamente no equipamento, também diminui.

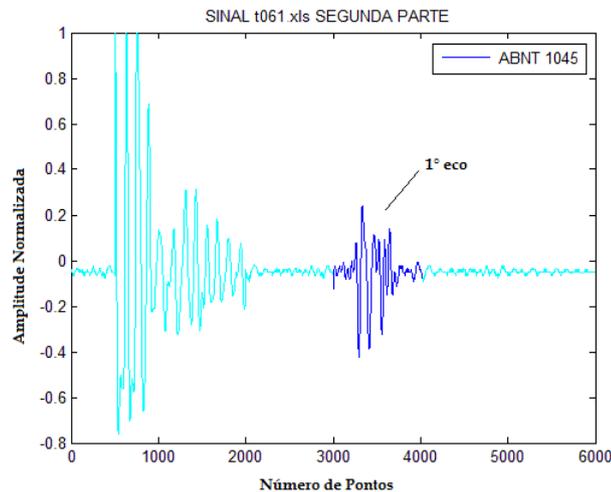


Figura 3.18: Separação da segunda região - Primeiro eco

Posteriormente, repetem-se os passos na segunda região de busca do valor máximo, e assim, cria-se um vetor contendo todos os valores de máximo desta região. A figura (3.18) mostra, em destaque, a separação da segunda região de busca contendo o valor máximo na região do primeiro eco.

Por fim, calculam-se as defasagens do tempo decorrido de propagação da onda em cada ponto da malha de referência, e uma vez conhecida a espessura da amostra, calculam-se também as respectivas velocidades, e os valores birrefringência. Na geração dos gráficos para este método, optou-se por interpolar os pontos com a função *spline* do Matlab.

3.4.2 Correlação Cruzada

Por definição, a correlação cruzada é uma técnica de processamento de sinais que verifica a similaridade entre dois sinais em função de um atraso entre deles. Esta técnica é frequentemente utilizada quando deseja-se estudar o comportamento de um sinal de curta duração que esteja inserido num sinal mais longo.

A correlação cruzada $r(\cdot)$ entre duas sequências $x(\cdot)$ e $y(\cdot)$ defasadas de τ , e ambas de comprimento L é calculada pela equação (3.1). Demonstra-se que o instante de ocorrência do máximo da sequência $r(\cdot)$ iguala-se ao atraso entre as duas sequências [7].

$$r(n) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x(k)y(k + \tau + n) \quad (3.1)$$

Neste trabalho, a técnica da correlação cruzada foi implementada para garantir a precisão e a resolução necessárias para as medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica na determinação da direção de laminação em materiais metálicos. Desta forma, reduz-se a imprecisão citada anteriormente no método direto.

Foi desenvolvido um código computacional cujo princípio baseia-se nas seguintes etapas: primeiramente, realiza-se a leitura dos sinais aquisitados, carregando e normalizando os sinais em cada ponto conforme a orientação do transdutor. Em seguida, cria-se uma matriz que abrigará a coleção de todos os sinais de todos os pontos da amostra em análise. Em tal matriz, cada linha representa um sinal aquisitado em cada ponto, e em sua respectiva direção, como exemplo, o sinal representado na figura (3.15). A partir dessa matriz, para cada linha, aplica-se uma janela sobre o sinal completo, separando-se a região que contém o pulso de ultrassom e o primeiro eco. Como exemplo, a figura (3.19) mostra o pulso do gerador de ultrassom e o primeiro eco aquisitado no ponto 25 com a direção de polarização do transdutor paralela à direção de referência inicial na amostra do aço API 5L X80. Ambas regiões, pulso de ultrassom e primeiro eco, compõem o sinal y da correlação cruzada.

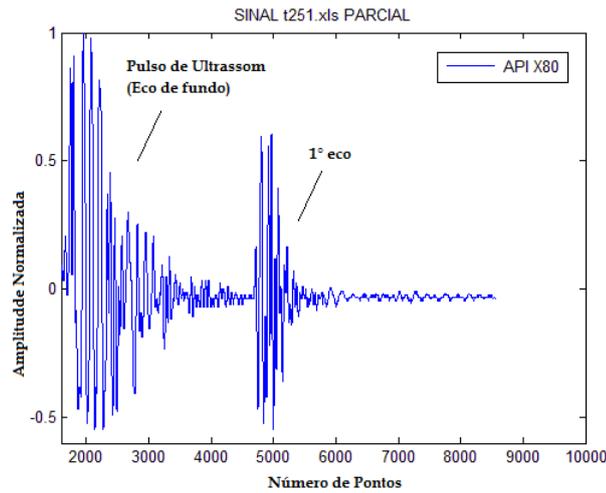


Figura 3.19: Separação da região contendo o pulso de ultrassom inicial e o primeiro eco - Sinal y da correlação cruzada

Em seguida, aplica-se outra janela sobre o sinal parcial citado anteriormente, separando-se a região contendo, apenas, o pulso de ultrassom inicial como mostra a figura (3.20), correspondendo ao sinal x da correlação cruzada.

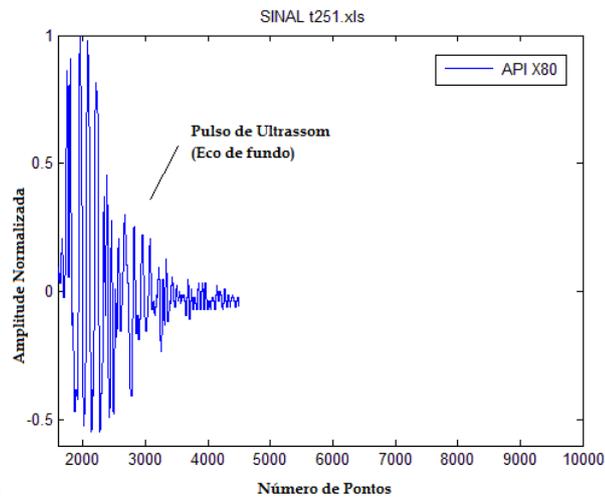


Figura 3.20: Separação da região contendo o pulso de ultrassom inicial - Sinal x da correlação cruzada

Por fim, aplica-se a correlação cruzada entre os sinais que foram editados, obtendo-se, por exemplo, o sinal da figura (3.21). Logo depois, no sinal resultante r da correlação cruzada da figura (3.21), busca-se no trecho final o ponto de máximo, pois este valor corresponde ao atraso entre os dois sinais analisados. Este procedimento é realizado em cada linha da matriz principal, calculando-se o intervalo de tempo em cada nodo da malha

de referência, conforme as duas direções.

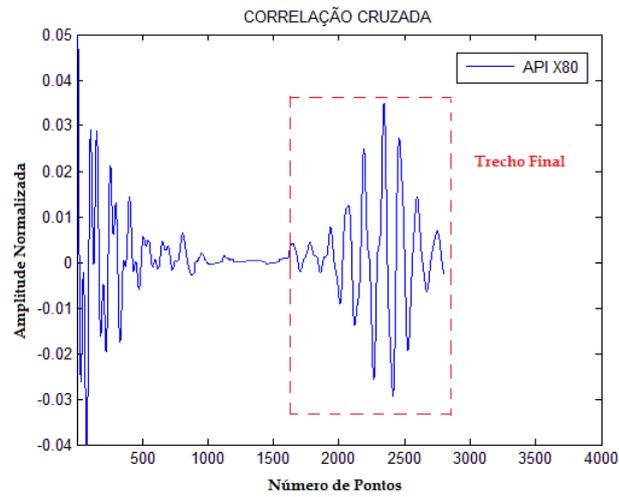


Figura 3.21: Resultado da correlação cruzada no ponto 25 da amostra

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Chapa de Aço API X80

4.1.1 Ultrassom

Conforme o levantamento dos dados com a equipe de Metalurgia da EEIMVR-UFF, a chapa de aço API X80 (200 x 100 x 19 mm) foi submetida ao processo de laminação à quente, sem que houvesse bobinamento ao término do processo. A chapa foi analisada como recebida, e não sofreu tratamento térmico após o processo de laminação.

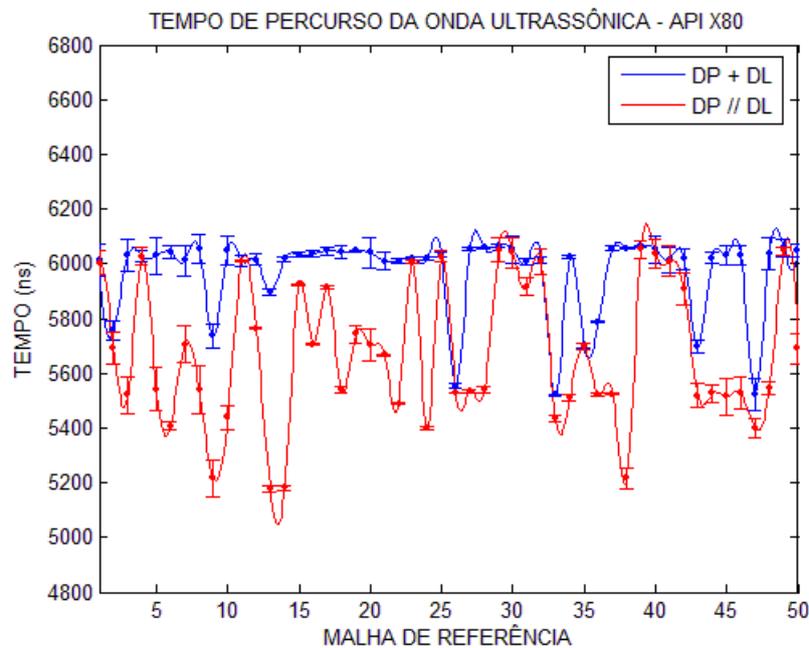


Figura 4.1: Tempo de percurso da onda cisalhante no aço API 5L X80

A figura (4.1) mostra o resultado das medidas do tempo de percurso da onda cisalhante através da espessura da amostra, obtidas no ensaio. As medidas por ultrassom foram feitas em 50 pontos distintos, e em duas direções em cada ponto conforme a metodologia desenvolvida. Através dos resultados, constata-se que esta chapa apresenta anisotropia acústica, ou seja, os grãos do material assumem uma orientação preferencial conforme a direção de laminação.

A figura (4.2) mostra a análise de tendência dos pontos em relação ao tempo de percurso da onda nas duas direções ortogonais entre si. O resultado mostra que o tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante através da espessura do material é menor quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa.

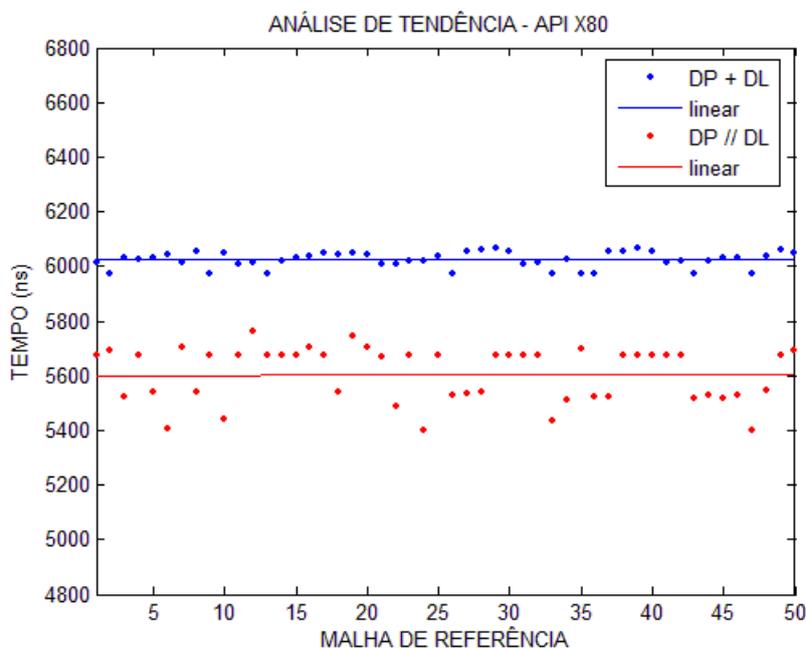


Figura 4.2: Análise de tendência do tempo de percurso da onda no aço API X80

Conforme o gráfico de tendência, faz-se ainda, a análise da velocidade da onda ultrassônica cisalhante. Conforme os resultados mostrados na figura (4.3), observa-se o valor da velocidade em cada ponto da malha de referência na chapa. Conforme o resultado, constata-se que a velocidade da onda ultrassônica cisalhante através da espessura do material é maior quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa.

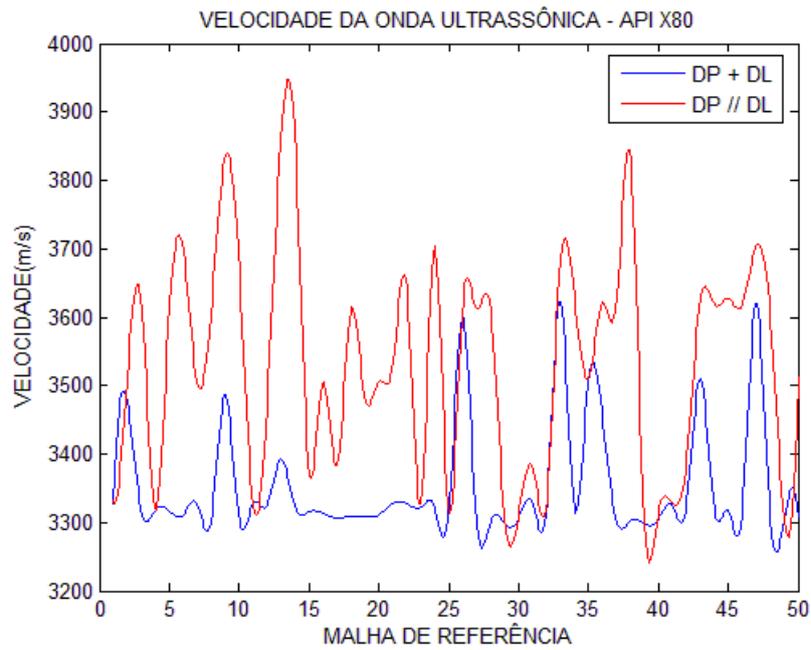
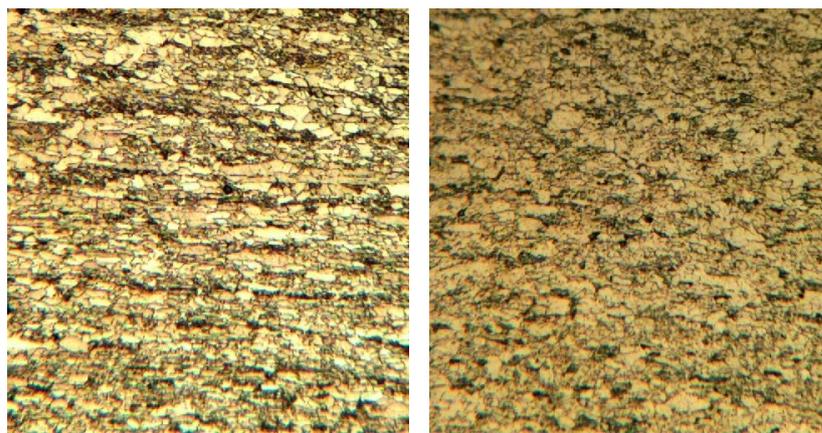


Figura 4.3: Velocidade da onda cisalhante no aço API 5L X80

4.1.2 Análise Metalográfica

Conforme a figura (4.4), nota-se que os grãos do metal estão alinhados conforme a direção de laminação. Este resultado confirma o resultado obtido pelo ensaio de ultrassom.



(a) Longitudinal

(b) Transversal

Figura 4.4: Micrografia do Aço API X80 (200x)

4.1.3 Birrefringência

A análise da birrefringência é mostrada de acordo com o gráfico da figura (4.5). O resultado mostra que o material possui birrefringência acústica acentuada em cada nodo, o que implica na orientação bem definida dos grãos em toda a região analisada.

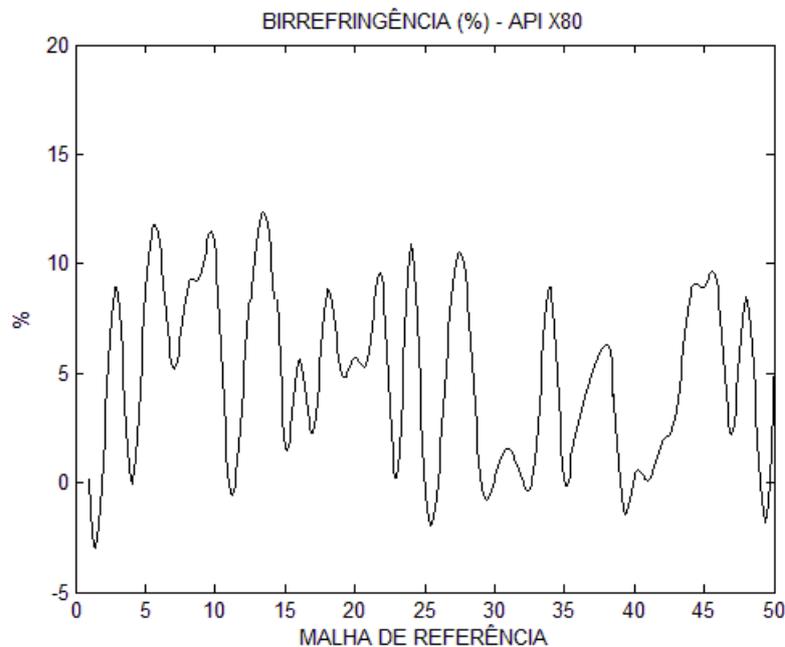


Figura 4.5: Análise da birrefringência no aço API X80

4.1.4 Decaimento de Energia no Pulso Ultrassônico

A figura (4.6) mostra a taxa com que a energia e a amplitude decrescem durante a propagação da onda cisalhante através da espessura da amostra. No caso em que a direção de polarização da onda no transdutor está paralela à direção de laminação da chapa, o decaimento de energia do sinal emitido é de 32%. Entretanto, no caso em que a direção de polarização é perpendicular à direção de laminação, o decaimento é de 49.6%. Este fenômeno ocorre devido ao fato da onda cisalhante ter mais dificuldade de se propagar quando a direção de polarização da onda está perpendicular à direção de laminação, conforme a análise já feita anteriormente. Cabe também ressaltar que, em todos os pontos da malha de referência, a força exercida sobre o transdutor foi 50N.

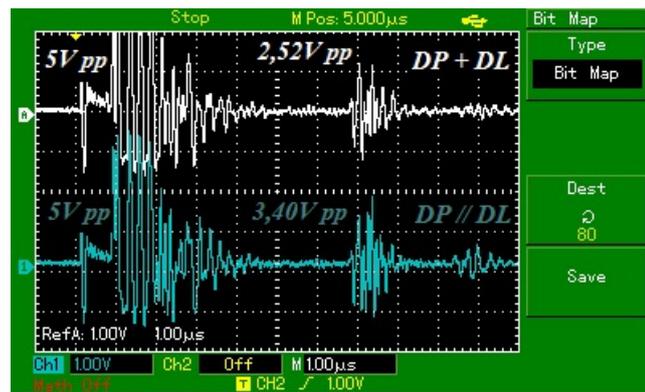


Figura 4.6: Decaimento de energia do sinal na chapa de aço API X80

4.2 Chapa de Aço API X80 com Tratamento Térmico

4.2.1 Ultrassom

Depois da análise da amostra do aço API X80 (200 x 100 x 19 mm) como recebida após a laminação, foi feita uma análise da mesma amostra submetida ao tratamento térmico de alívio de tensão. A amostra foi colocada no forno já aquecido à 600°C, durante cinco horas, e resfriada dentro do forno desligado.

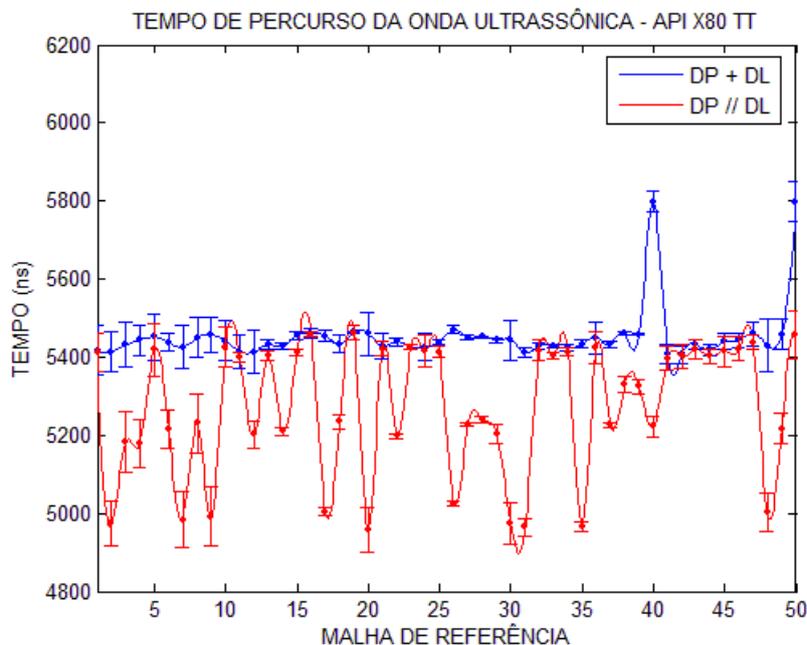


Figura 4.7: Tempo de percurso da onda cisalhante no aço API 5L X80 com tratamento térmico

A figura (4.7) mostra o resultado das medidas do tempo de percurso da onda cisalhante através da espessura da amostra tratada termicamente, obtidas no ensaio. As medidas por ultrassom foram feitas em 50 pontos distintos, e em duas direções em cada ponto conforme a metodologia desenvolvida. Através dos resultados, constata-se que a chapa, após receber o tratamento térmico, ainda apresenta anisotropia acústica.

A figura (4.8) mostra a análise de tendência dos pontos em relação ao tempo de percurso da onda nas duas direções ortogonais entre si. O resultado mostra que o tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante através da espessura do material é menor quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa. O gráfico ainda mostra que ocorreu uma diminuição do tempo de percurso da onda cisalhante na amostra tratada termicamente quando comparada com a amostra recebida após a laminação.

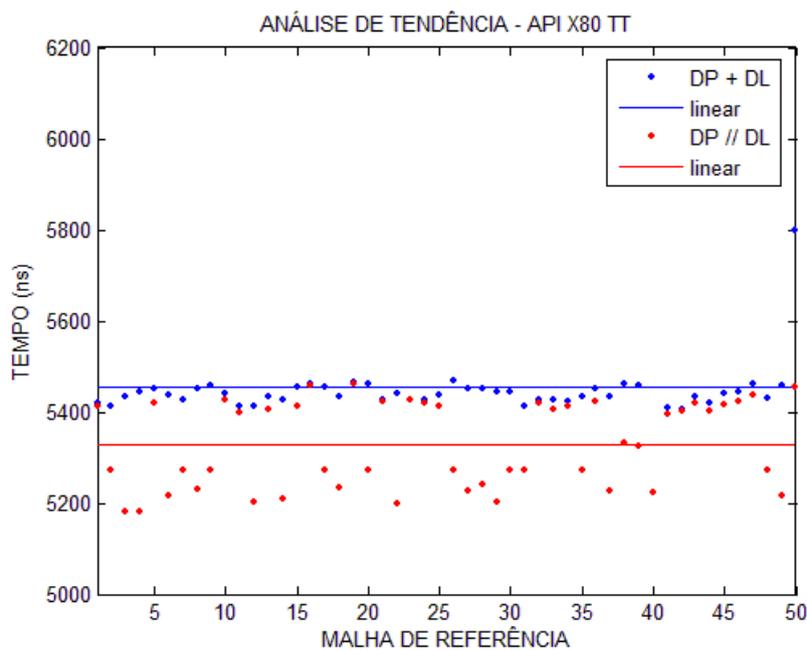


Figura 4.8: Análise de tendência do tempo de percurso da onda no aço API X80 com tratamento térmico

Conforme o resultado mostrado na figura (4.9), observa-se o valor da velocidade em cada ponto da malha de referência na chapa. O resultado mostra que a velocidade da onda ultrassônica cisalhante através da espessura do material é maior quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa. O resultado mostra, ainda, que a velocidade de propagação da onda cisalhante na amostra tratada termicamente é maior quando comparada com a amostra recebida após a laminação.

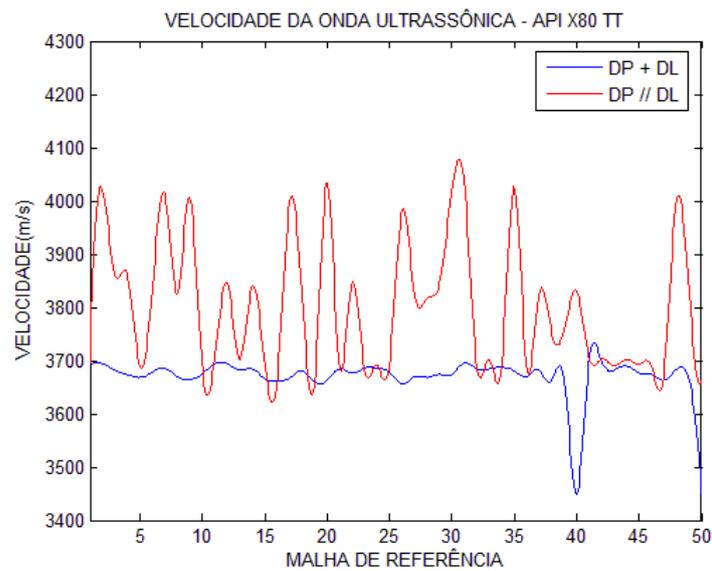


Figura 4.9: Velocidade da onda cisalhante no aço API 5L X80 com tratamento térmico

4.2.2 Birrefringência

A análise da birrefringência é mostrada de acordo com o gráfico da figura (4.10). O resultado mostra a birrefringência acústica acentuada em cada nodo, e sua anisotropia em toda a região analisada, mesmo após o tratamento térmico escolhido.

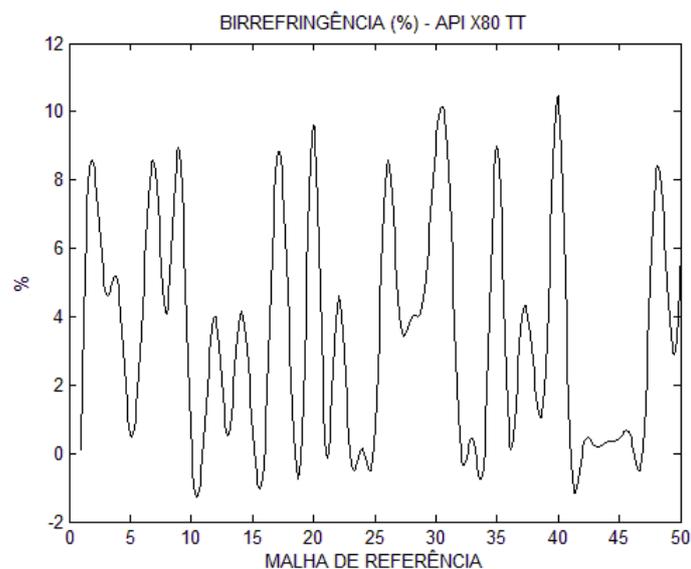


Figura 4.10: Análise da birrefringência do aço API X80 com tratamento térmico

4.3 Propagação da Onda Superficial no Aço

Como ensaio inicial, fez-se um teste sobre a natureza da velocidade ultrassônica superficial se propagando no aço em diferentes posições relativas à borda da amostra. Tomou-se dois tipos diferentes de aços, de acordo com suas respectivas especificações. Conforme a figura (4.11) observa-se uma relação linear entre o tempo de percurso e a distância percorrida pela onda, antes já prevista.

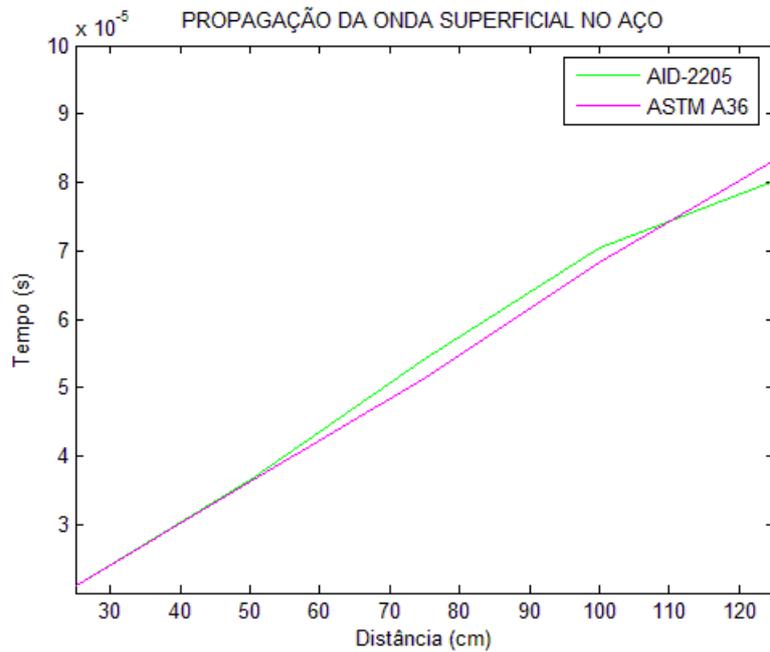


Figura 4.11: Análise da onda superficial se propagando no aço

4.4 Chapa de Aço Inox AID-2205

4.4.1 Ultrassom

A chapa de aço inox AID-2205 (dimensão 150 x 100 x 4 mm) foi obtida pelo processo de laminação e não sofreu tratamento térmico após o processo. A figura (4.12) mostra o resultado das medidas do tempo de percurso da onda superficial obtidas no ensaio. As medidas por ultrassom foram feitas em 25 pontos distintos, e em duas direções em cada ponto conforme a metodologia desenvolvida. Através dos resultados, constata-se que esta chapa apresenta anisotropia acústica bem definida, ou seja, os grãos do material assumem uma orientação preferencial conforme a direção de laminação.

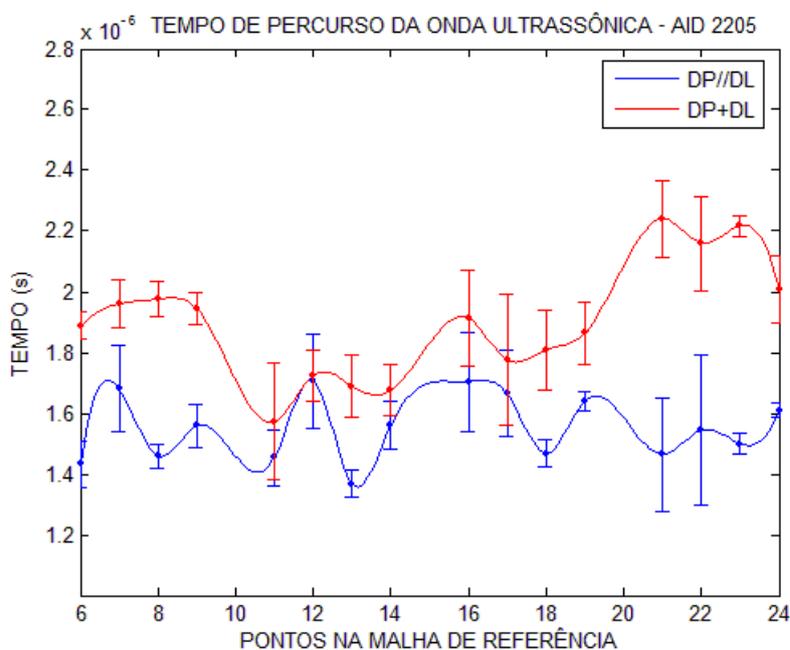
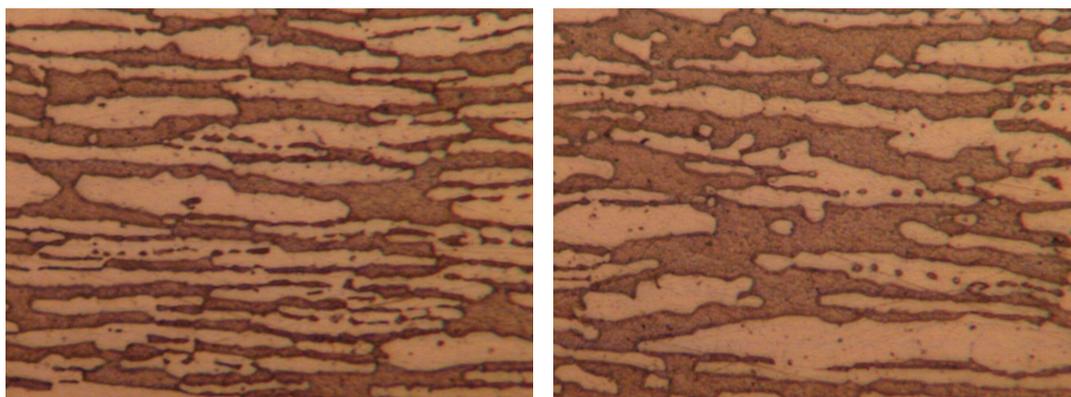


Figura 4.12: Tempo de percurso da onda superficial no aço inox AID-2205

Observa-se, ainda, que o tempo de percurso da onda ultrassônica superficial é menor em todos os pontos, quando a direção de polarização da onda no transdutor está paralela à direção de laminação da amostra.

4.4.2 Análise Metalográfica

O resultado discutido via ensaio por ultrassom é confirmado quando se faz a análise da direção de laminação via metalografia, conforme a figura (4.13).



(a) 500x

(b) 1000x

Figura 4.13: Micrografia do Aço Inox AID-2205

Nota-se que os grãos do metal estão nitidamente alinhados numa direção preferencial, de acordo com a direção de laminação, longitudinal àquela do corte.

4.4.3 Birrefringência

Faz-se, ainda, a análise da birrefringência de acordo com o gráfico da figura (4.14). Conclui-se que o material possui birrefringência acústica acentuada em cada nodo, e anisotropia acústica em toda a região analisada.

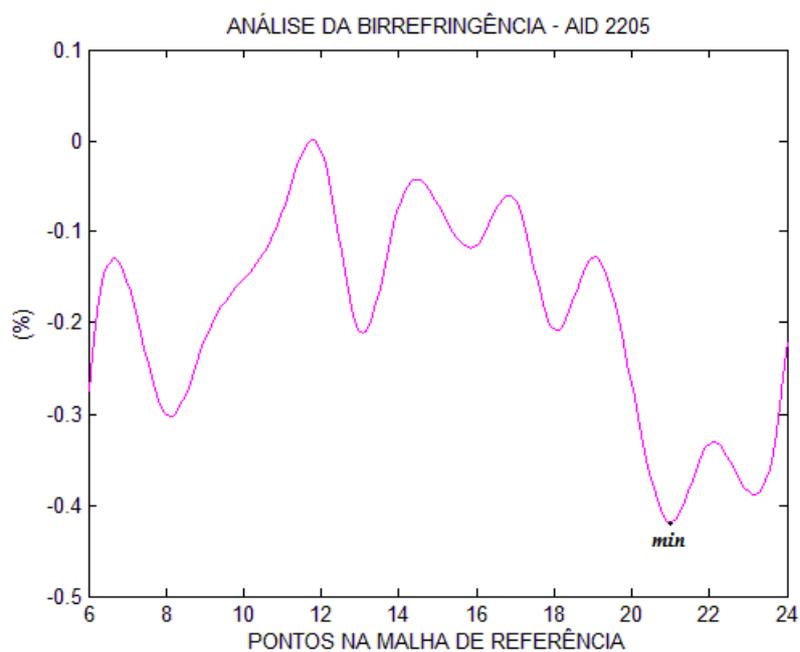


Figura 4.14: Birrefringência no aço inox AID-2205

4.4.4 Módulo de Rigidez

De posse dos valores da velocidade da onda ultrassônica cisalhante em cada nodo na amostra, calcula-se também o módulo de rigidez do material em análise.

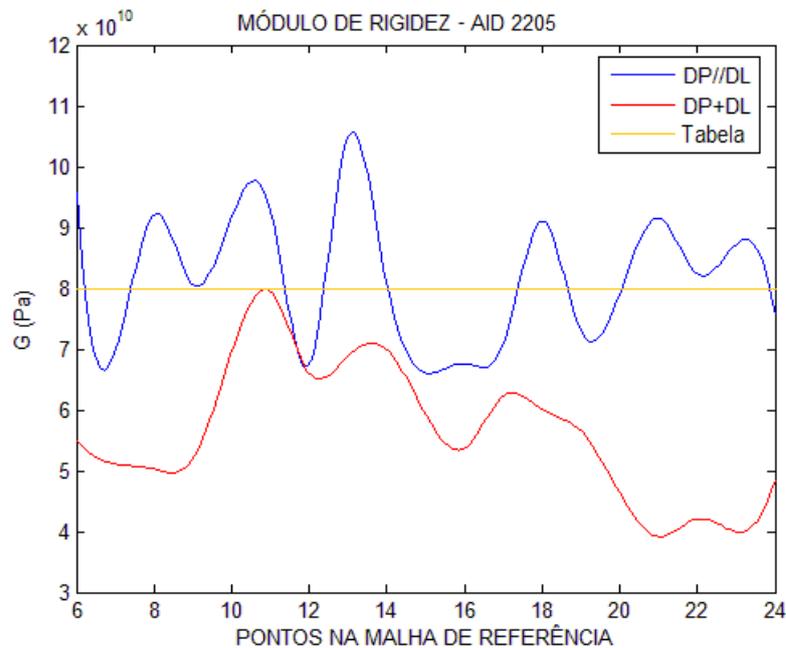


Figura 4.15: Módulo de Rigidez no aço inox AID-2205

Conforme a figura (4.15), conclui-se que para o valor teórico do módulo de rigidez no aço inox AID-2205, geralmente encontrado em tabelas de propriedades mecânicas dos materiais, é tomado o valor da velocidade quando a onda se propaga na direção de laminação, ou seja, o valor teórico para a velocidade da onda na equação (2.32) neste material é o valor médio das velocidades quando a direção da onda no transdutor está paralela à direção de laminação.

4.5 Chapa de Aço ASTM A36

4.5.1 Ultrassom

Conforme informação da equipe do laboratório de ensaio microestrutural da EEIMVR-UFF, a chapa de aço ASTM A36 (dimensão 100 x 100 x 5 mm) foi obtida pelo processo de laminação a quente e não sofreu tratamento térmico após o processo. As medidas por ultrassom foram feitas em 16 pontos distintos na malha de referência escrita na chapa. A

seguir faz-se uma avaliação comparativa da direção de laminação da chapa de aço ASTM A36 por ultrassom e metalografia.

Inicialmente, o gráfico da figura (4.16) resume os resultados dos ensaios realizados por ultrassom com as medidas de tempo obtidas nos pontos distribuídos ao longo da superfície da chapa.

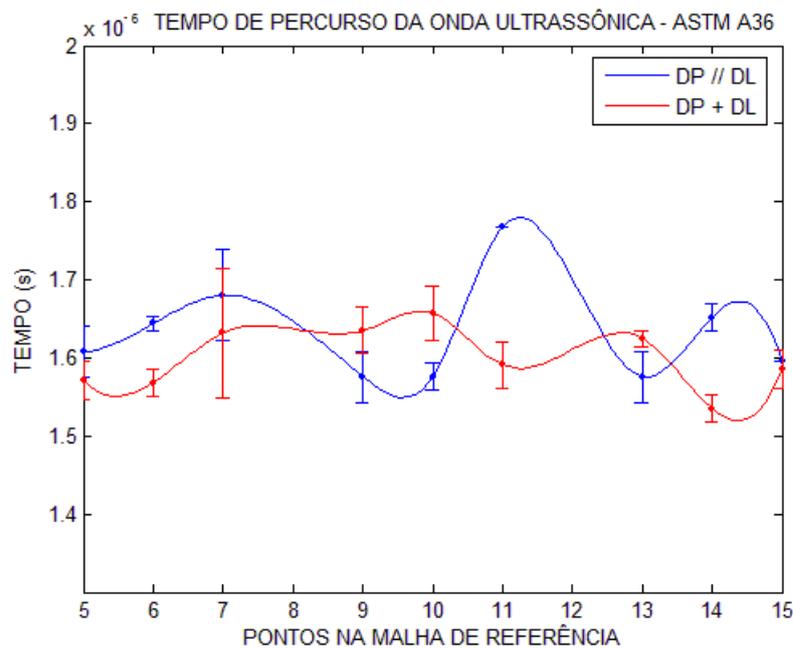


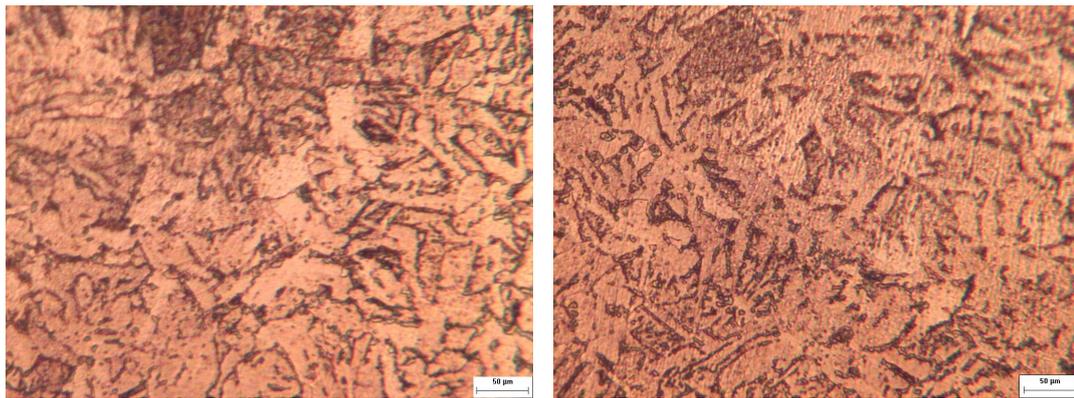
Figura 4.16: Tempo de percurso da onda superficial no aço ASTM A36

Conclui-se que os grãos, neste material, não possuem uma orientação preferencial conforme a direção de laminação, de modo que possui fraca anisotropia acústica. Esta análise é feita mediante ao do fato de que os tempos de percurso da onda superficial medidos em cada ponto, ora com a direção de polarização do transdutor paralela, ora perpendicular à direção de laminação possuem valores muito próximos.

4.5.2 Análise Metalográfica

Comparativamente, faz-se a análise da direção de laminação pelo ensaio metalográfico conforme a figura (4.17).

Observa-se que os grãos da chapa laminada não possuem uma orientação preferencial conforme a direção de laminação. Admite-se que a recristalização dinâmica ocorrida após o processo, praticamente elimina a anisotropia acústica do metal laminado.



(a) Longitudinal

(b) Transversal

Figura 4.17: Micrografia do Aço ASTM A36 (500x)

4.5.3 Birrefringência

Constata-se, ainda, pelo gráfico da figura (4.19) da análise feita por ultrassom, que para alguns pontos analisados o tempo de percurso da onda com a direção de polarização do transdutor ora paralela, ora perpendicular à direção de laminação quase não sofre variação.

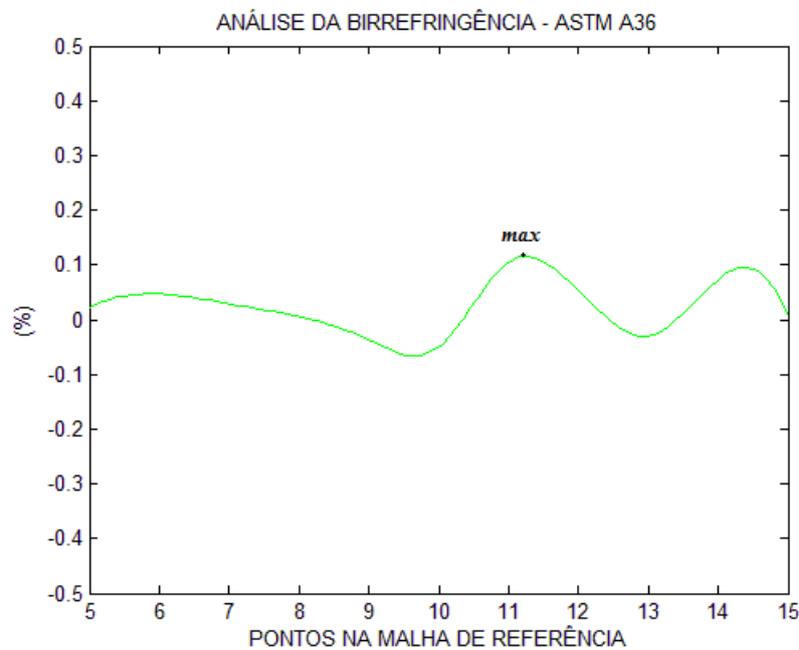


Figura 4.18: Birrefringência no aço ASTM A36

Este comportamento mostra não haver uma definição dos grãos do material com

relação ao alinhamento em relação à direção de laminação, o que foi comprovado pela análise metalográfica. A maior diferença entre os pontos ocorre no ponto 11 da malha de referência, na qual a birrefringência foi de 0.1054%, onde esse valor gera uma diferença de ordem nanométrica entre os tempos medidos.

4.5.4 Módulo de Rigidez

Novamente, de posse dos valores da velocidade da onda ultrassônica cisalhante em cada nodo na amostra, calcula-se também o módulo de rigidez do material em análise.

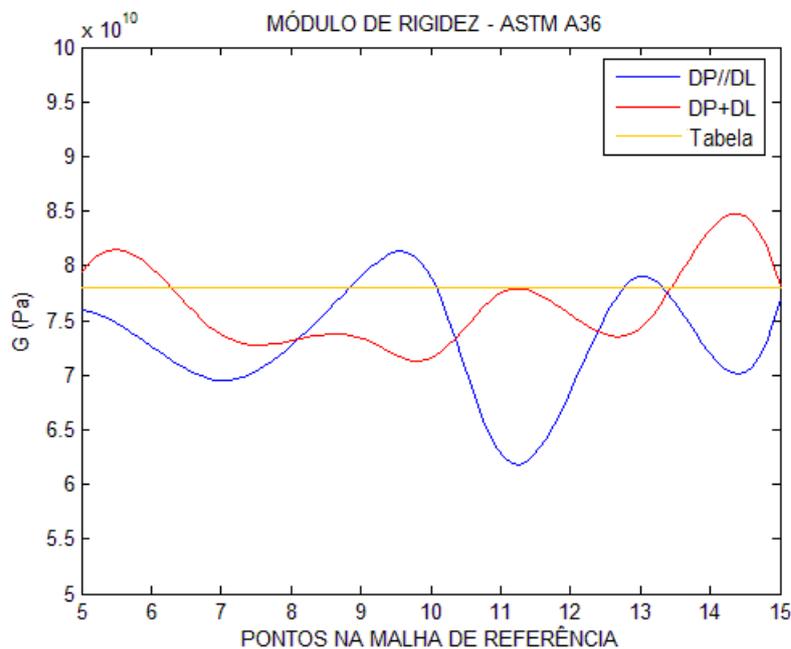


Figura 4.19: Módulo de Rigidez no aço ASTM A36

Conforme a figura (4.19), conclui-se que o valor teórico para o módulo de rigidez neste material está bem próximo da média das velocidades da onda ultrassônica tomadas nas direções de propagação ortogonais entre si. Em outras palavras, em cada nó, o valor teórico da velocidade equivale, aproximadamente, à media aritmética das velocidades de propagação da onda ultrassônica tomadas quando a direção de polarização no transdutor está perpendicular e paralela à direção de laminação.

Este comportamento era esperado, uma vez que neste material os grãos não assumem uma orientação preferencial conforme a direção de laminação da amostra, como já explicado anteriormente.

4.6 Repetibilidade

Nos ensaios envolvendo a chapa de aço inox AID-2205 e a chapa de aço ASTM A36 foi desenvolvida a seguinte metodologia: em cada ponto da malha de referência foram feitas 10 medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica, nas quais foram retirados o maior e o menor valor. Dos valores restantes foi calculado a média aritmética e o desvio padrão para serem levados ao código computacional em ambiente Matlab. Cabe ressaltar, também, que para a discussão realizada não tomou-se os pontos das bordas das amostras referentes aos eixos referenciados.

4.6.1 Chapa de Aço Inox AID-2205

Nesta amostra, a malha de referência possui 25 pontos distintos.

nó	média	desvio									
6	81.92	0.7694	7	67.60	1.4142	8	50.80	0.4000	9	36.20	0.7071
11	81.76	0.9209	12	67.22	1.5697	13	50.16	0.4510	14	36.48	0.8075
16	84.72	1.6346	17	67.68	1.4255	18	51.04	0.4561	19	36.36	0.2966
21	82.00	1.8547	22	67.36	2.4755	23	51.92	0.3347	24	36.92	0.2191

Tabela 4.1: DP // DL - Média dos valores de tempo e desvio padrão em cada ponto em microssegundos

nó	média	desvio									
6	40.60	0.4472	7	40.60	0.8000	8	41.20	0.5657	9	41.00	0.5292
11	56.32	1.9267	12	57.84	0.8295	13	58.08	1.0354	14	57.76	0.8295
16	75.44	1.5646	17	75.60	2.1354	18	76.16	1.3145	19	76.40	1.0198
21	97.84	1.2522	22	97.20	1.5492	23	98.32	0.3347	24	96.48	1.1100

Tabela 4.2: DP + DL - Média dos valores de tempo e desvio padrão em cada ponto em microssegundos

4.6.2 Chapa de Aço ASTM A36

Nesta amostra, a malha de referência possui 16 pontos distintos.

nó	média	desvio	nó	média	desvio	nó	média	desvio
5	70.72	0.3347	6	54.64	0.0894	7	38.20	0.5831
9	70.32	0.3247	10	54.56	0.1673	11	38.80	0.0000
13	69.92	0.3247	14	54.16	0.1673	15	37.64	0.0000

Tabela 4.3: DP // DL - Média dos valores de tempo e desvio padrão em cada ponto em microssegundos

nó	média	desvio	nó	média	desvio	nó	média	desvio
5	37.80	0.2449	6	37.68	0.1789	7	38.24	0.8295
9	54.15	0.3000	10	54.25	0.3416	11	54.15	0.3000
13	70.40	0.1047	14	69.60	0.1790	15	70.00	0.2480

Tabela 4.4: DP + DL - Média dos valores de tempo e desvio padrão em cada ponto em microssegundos

Conclui-se que o erro de maior valor na chapa de aço inox AID-2205 ocorre no nodo 22, e na chapa de aço ASTM A36 ocorre no nodo 11 da malha de referência, na qual estão localizados na região de maior birrefringência acústica. Supõe-se que esse fenômeno é consequência do posicionamento dos pontos na malha de referência, de modo que, em cada chapa, é o nodo mais distante da borda nas duas direções perpendiculares tomadas entre si, na qual sofre maior influência do decaimento de energia do sinal emitido devido a maior distância percorrida pelo sinal remanescente.

4.7 Chapa de Aço ABNT 1045

4.7.1 Ultrassom

A chapa de aço ABNT 1045 (150 x 100 x 12.5 mm) foi submetida ao processo de laminação à quente, e não sofreu tratamento térmico após o processo.

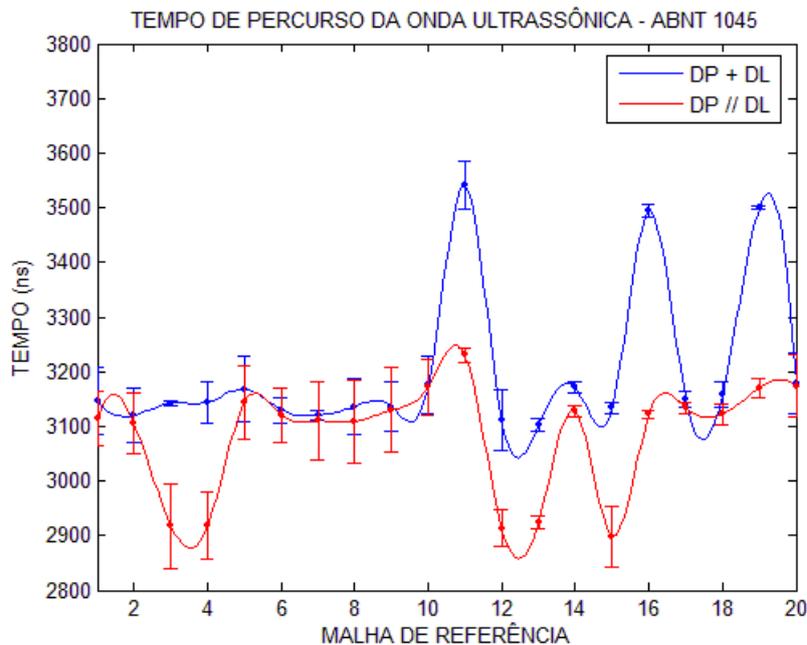


Figura 4.20: Tempo de percurso da onda cisalhante no aço ABNT 1045

A amostra foi analisada como recebida em 20 pontos distintos, e em duas direções ortogonais entre si em cada ponto. A figura (4.20) mostra o resultado das medidas do tempo de percurso da onda ultrassônica ao se propagar ao longo da espessura do material. Através dos resultados, constata-se que o material apresenta uma suave anisotropia acústica, ou seja, os grãos do material assumem, levemente, uma orientação preferencial conforme a direção de laminação.

A figura (4.21) mostra a análise de tendência dos pontos em relação ao tempo de percurso da onda nas duas direções ortogonais entre si. Conclui-se que o tempo de percurso da onda ultrassônica cisalhante através da esperssura do material é menor quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa.

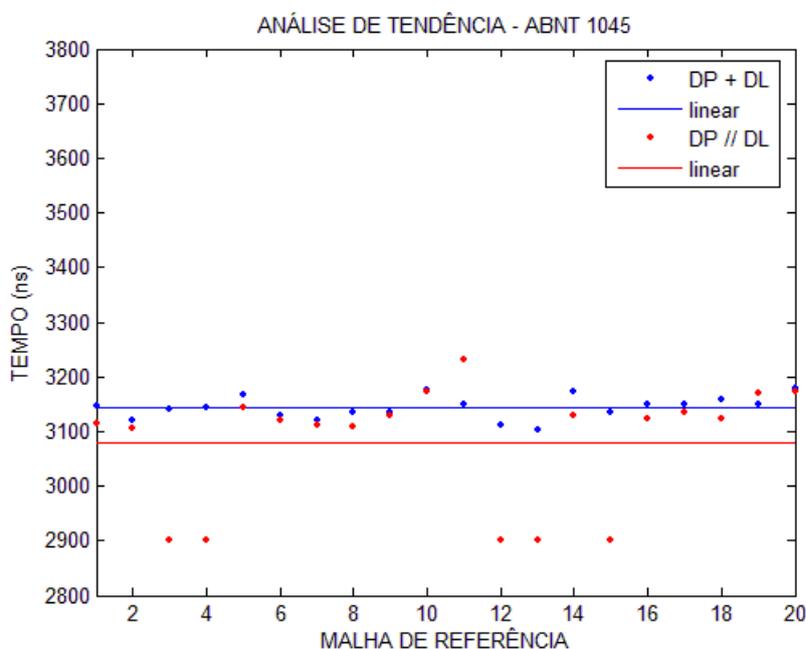


Figura 4.21: Análise de tendência do tempo de percurso da onda

Conforme o gráfico de tendência, faz-se ainda, a análise da velocidade da onda ultrassônica cisalhante. Conforme os resultados mostrados na figura (4.22), observa-se o valor da velocidade em cada um dos 20 pontos da malha de referência na chapa. Conclui-se que a velocidade da onda ultrassônica cisalhante através da esperssura do material é maior quando a direção de polarização do transdutor está paralela à direção de laminação da chapa.

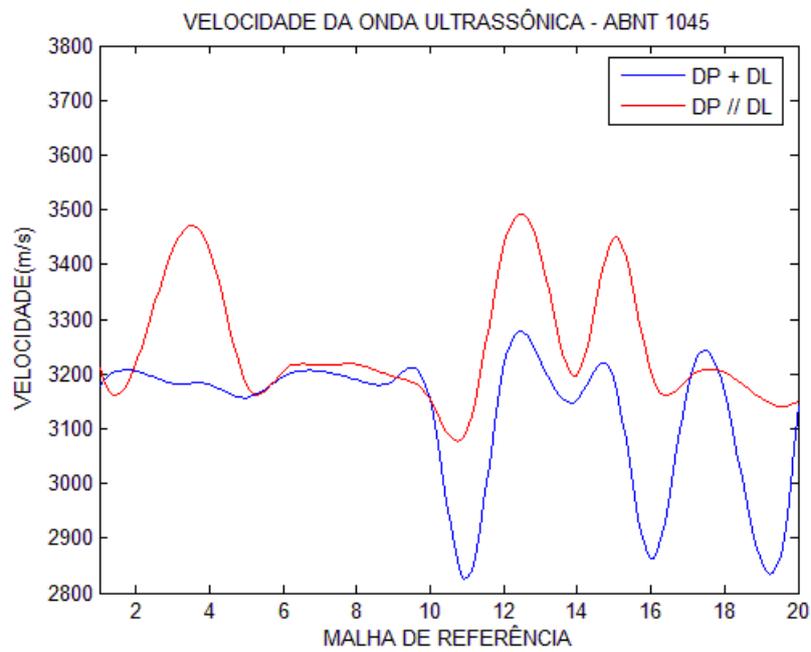
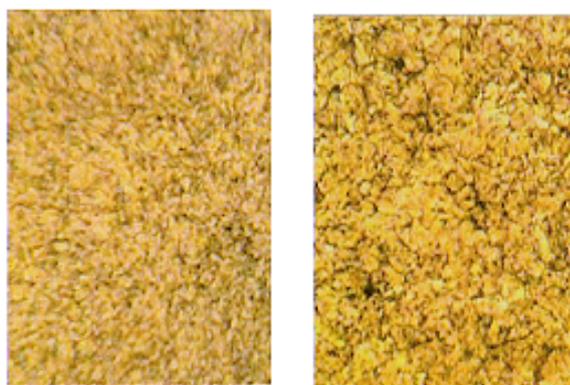


Figura 4.22: Velocidade da onda cisalhante no aço ABNT 1045

4.7.2 Análise Metalográfica

Conforme a figura (4.23), nota-se que os grãos do metal estão levemente alinhados conforme a direção de laminação. Este resultado confirma o resultado obtido pelo ensaio de ultrassom.



(a) Longitudinal

(b) Transversal

Figura 4.23: Micrografia do Aço ABNT 1045 (200x)

4.7.3 Birrefringência

A análise da birrefringência é mostrada de acordo com o gráfico da figura (4.24). Conclui-se que o material possui birrefringência acústica acentuada em cada nodo, o que implica numa anisotropia acústica bem definida em toda a região analisada.

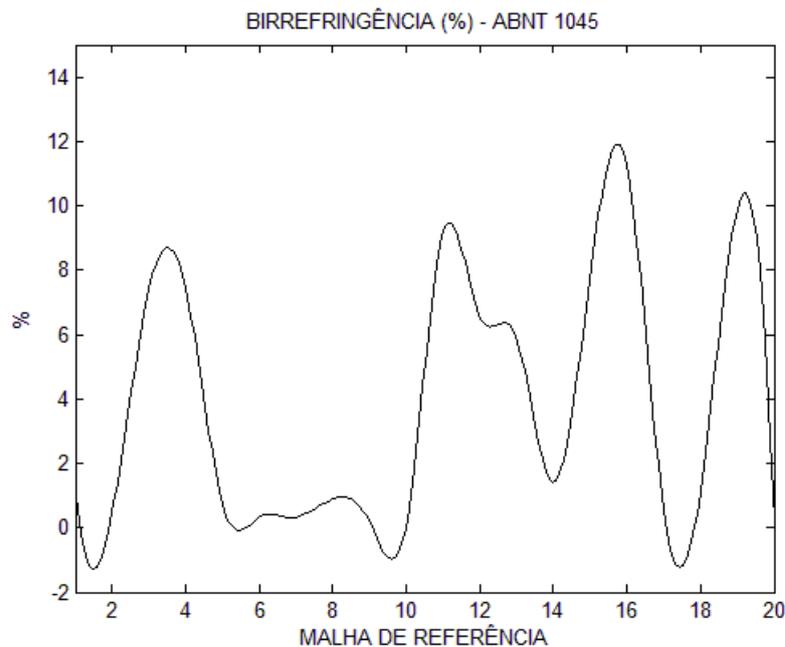


Figura 4.24: Análise da birrefringência

4.7.4 Decaimento de Energia no Pulso Ultrassônico

A figura (4.25) mostra a taxa com que a energia e a amplitude decrescem durante a propagação da onda cisalhante difratada. No caso em que a direção de polarização da onda no transdutor está paralela à direção de laminação da chapa, o decaimento de energia do sinal emitido é de 37.5%. Entretanto, no caso em a direção de polarização é perpendicular à direção de laminação, o decaimento é de 44%. Este fenômeno ocorre devido ao fato da onda cisalhante ter mais dificuldade de se propagar quando a direção de polarização da onda está perpendicular à direção de laminação da chapa. Cabe ainda ressaltar que neste ensaio, em ambos os casos, e em todos os pontos, a força exercida sobre o transdutor foi de 50N.

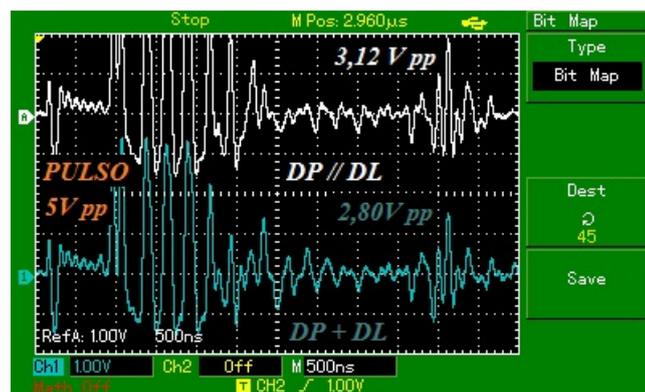


Figura 4.25: Decaimento de energia do sinal na chapa de aço ABNT 1045

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Conforme o desenvolvimento do trabalho, apresentam-se as seguintes conclusões acerca da metodologia aplicada para a determinação da direção de laminação em materiais metálicos utilizando-se uma bancada experimental composta de um sistema ultrassônico.

5.1 Conclusões

1. O estudo teórico sobre técnicas de aquisição e processamento de sinais revelou possíveis aplicações para o cálculo do tempo decorrido de propagação de uma onda ultrassônica transversal através da espessura de amostras de materiais metálicos laminados;
2. O sistema ultrassônico montado na bancada experimental permitiu que os ensaios fossem realizados de forma padrão e eficiente, com rapidez e precisão adequadas no desenvolvimento do trabalho;
3. A correlação cruzada, técnica de processamento de sinais, aplicada aos sinais ultrassônicos aqusitados mostrou-se eficaz e de precisão adequada, no cálculo do tempo de percurso da onda ultrassônica ao se propagar pela espessura da amostra. Já o método direto, segunda técnica de processamento de sinais aplicada neste trabalho, mostrou-se eficaz na determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica, porém menos preciso quando comparado com a técnica da correlação cruzada, conforme os resultados apresentados;
4. A aplicação da equação da birrefringência acústica, empregada juntamente com as técnicas de processamento de sinais utilizadas neste trabalho, permitiu analisar o

comportamento anisotrópico dos metais laminados, e conforme os resultados apresentados, concluiu-se que a influência da microestrutura, em média, é de 10% do valor do tempo de propagação da onda ultrassônica nas duas direções ortogonais entre si consideradas;

5. Nas amostras do aço API5L X80 com e sem tratamento, e na amostra do aço ABNT 1045, analisadas com o transdutor de incidência normal de 5 MHz, o tempo de percurso da onda ultrassônica transversal foi menor quando a direção de polarização da onda no transdutor esta paralela à direção de laminação do metal, ou seja, a velocidade da onda ultrassônica transversal foi maior nesta situação;
6. A amostra do aço INOX AID 2205, analisada com o transdutor de incidência oblíqua de 60° de 4MHz, apresentou anisotropia acústica dentro da faixa média de 10% do valor do tempo de propagação da onda ultrassônica nas duas direções ortogonais entre si consideradas;
7. A amostra do aço ASTM A36, também analisada com o transdutor de incidência oblíqua de 60° de 4MHz, apresentou baixa anisotropia acustica, ou seja, os tempos de propagação da onda ultrassônica transversal calculados nas direções ortogonais entre si, ou seja, no eixo rápido e no eixo lento considerados, tiveram valores muito próximos uns dos outros. Admite-se que a recristalização dinâmica ocorrida ao término do processo da laminação à quente, praticamente elimina a influência da direção de laminação nos valores de tempo decorrido calculados;
8. A metodologia empregada com o sistema ultrassônico montado permitiu, ainda, a análise do módulo de elasticidade transversal dos materiais metálicos usados no presente trabalho, uma vez conhecidos os valores das velocidades calculadas em cada ponto da malha de referência inscrita nas amostras, verificou-se que o módulo transversal não é constante devido à anisotropia acústica do metal laminado;
9. Os resultados obtidos com a metodologia do sistema ultrassônico empregado, foram comparados com a metodologia metalográfica, ou seja, utilizando-se os equipamentos do laboratório de metalurgia da EEIMVR-UFF, foram determinadas as respectivas direções de laminação das amostras, através das micrografias apresentadas;
10. O desenvolvimnto do presente trabalho mostrou uma aplicação não convencional de utilização do equipamento de ultrassom, na qual informações da microestrutura dos metais analisados foram reveladas.

5.2 Trabalhos Futuros

Sugestões de trabalhos futuros:

1. Processamento de sinais de ultrassom para determinação da textura cristalográfica em ligas metálicas;
2. Processamento de sinais de ultrassom para determinação da constante acustoelástica em materiais metálicos;
3. Processamento de sinais de ultrassom para análise de tensões residuais em juntas soldadas;

Referências

- [1] Imagem do Espectro Sonoro, figura2.1. World Wide Web, <http://www.aulas-fisica-quimica.com/imagens>. Acessado em 01/2013.
- [2] ANDRINO, M. Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas para medição de tensão em dutos, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil, 2007.
- [3] BITTENCOURT, M. Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultrassônica e análise do estado de tensão em materiais metálicos pela técnica da birrefringência acústica, Tese de Doutorado, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- [4] BITTENCOURT, M., LAMY, C., PAYÃO, J. Determinação da direção de laminação de aços e ligas de alumínio por ultrassom. *Soldagem e Inspeção 3* (1998), 12–16.
- [5] BITTENCOURT, M., LAMY, C., PAYÃO, J. Potencialidades da técnica ultrassônica. *Soldagem e Inspeção 3* (1998), 1–11.
- [6] BITTENCOURT, M., LAMY, C., PAYÃO, J. Um estudo preliminar do comportamento de ondas ultrassônicas em um material sob tensão. *COPPE/UFRJ/IEN* (1998), 1–11.
- [7] BITTENCOURT, M., LAMY, C., PAYÃO, J., PINHEIRO, M. Medida do tempo de percurso da onda ultrassônica para avaliação de tensões. *COPPE/UFRJ/IEN 1* (2003), 2–3.
- [8] CAMINHA, H. M., ALADIR, P. Princípios de ultrassom, Companhia Siderúrgica Nacional, 1978.
- [9] CUETO, A. R. Ensayos no destructivos por la técnica de ultrasonido industrial, México, 1989.
- [10] HSU, N. M. Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis. *Experimental Mechanics 14* (1974), 169–176.
- [11] LAMY, C. A. Um estudo sobre o dimensionamento de descontinuidades superficiais pela técnica ultrassônica do tempo decorrido, Tese de Doutorado, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1990.
- [12] LAWRENCE, E. M. Introduction to the mechanics of a continuous medium, Michigan State University, New Jersey, 1969.
- [13] MARQUEZE, C. M. Análise por ultra-som da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas, Tese de Mestrado, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2002.

-
- [14] MENEZES, I. J., PARANHOS, R. S. Estudo da propagação das ondas de lamb em chapas de alumínio com furos de diferentes profundidades, 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico, 2011.
- [15] RAYLEIGH, L. On waves propagated along the plane surfaces of an elastic solid. *Proceedings of London Math 17* (1985), 4–11.
- [16] ROQUE, A. Física 2: Ondas, fluidos, e termodinâmica. aula 20 - usp, 2010.
- [17] SANTIN, J. L. Ultrassom: Técnica e aplicação, Artes gráficas e Editora Unificado, Curitiba, PR, 2003.
- [18] SANTOS, A. A. Avaliação da referência de tensões para ondas longitudinais criticamente refratadas, Relatório de Projeto em Parceria Unicamp e Petrobrás, Janeiro, 2006.
- [19] SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W. Física: Calor, ondas e Ótica, vol 2, 6^a Ed, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1981.
- [20] SOUZA, L. A. M. Curso de ultrassom, Petroquímica União, 1983.
- [21] WALASZEK, H., ABADALLAHOUI, Y., LIEURADE, H. P. Potentialities of ultrasonics for evaluating residual stresses: influence of microstructure. *Roma WCNDT 1* (2000), 1–4.