ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR BILAROO ROT GANTOS
E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM ZG. 1. 02. 1. ZOO7
jen for un-
ORIENTADOR

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

# Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas

Autor: Ricardo dos Santos Fraga Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior

25/08

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

# Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas

Autor: Ricardo dos Santos Fraga Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior

Curso: Engenharia Mecânica Área de Concentração: Mecânica de Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007 S.P. – Brasil

## FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F842a	Fraga, Ricardo dos Santos Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas / Ricardo dos Santos FragaCampinas, SP: [s.n.], 2007.
	Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	1. Ultra-som. 2. Tensões residuais. 3. Elasticidade. I. Santos Júnior, Auteliano Antunes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Avaliation of the penetration depth of critically refracted longitudinal waves.
Palavras-chave em Inglês: Residual stress, Ultrasound, Elasticity.
Área de concentração: Mecânica dos sólidos e projeto mecânico
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button e José Maria Campos

dos Santos. Data da defesa: 26/02/2007 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

# Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas

Autor: Ricardo dos Santos Fraga Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Os min

Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior, Presidente Instituição: FEM/UNICAMP

Profa. Dra. Vera Lúcia da Silveira Nantes Button Instituição: FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. José/Maria/Campos dos Santos Instituição: FEM/UNICAMP

Campinas, 26 de fevereiro de 2007

## Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais Maria Cecília e Paulo de Tarso pelo acolhimento, carinho e dedicação em mostrar que a educação é o bem mais importante adquirido por toda a vida.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

À CAPES pela bolsa de pesquisa.

À minha família pelo apoio e contribuição à minha formação.

À Marcela pela ajuda e compreensão nos momentos em que mais precisei

Aos meus colegas Marcílio Andrino e Sidney Caetano pelos momentos felizes e auxílio incondicional a este trabalho.

Ao meu orientador, por sua presença e direcionamento dado a esta pesquisa.

À Petrobrás pelo apoio financeiro.

Aos professores e colegas da Unicamp que contribuíram de alguma forma para a finalização deste trabalho.

Á Unicamp pela minha formação básica e estrutura disponível.

Ninguém é tão grande que não possa aprender, nem tão pequeno que não possa ensinar

## Resumo

FRAGA, Ricardo dos Santos, Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado)

Na medição de tensões residuais com ultra-som, é necessário conhecer a profundidade de propagação da onda. Sem isso, é impossível definir onde a tensão está sendo medida. Neste trabalho, procurou-se uma relação entre características físicas de transdutores piezoelétricos (freqüência de vibração) e a profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas  $L_{cr}$ ). Primeiramente buscou-se uma base teórica que sinalizasse alguma relação entre a freqüência destas ondas e a profundidade na qual as mesmas se propagam. Depois de definida a teoria, foi estabelecida um procedimento experimental para comprovação prática. Para isto, foi utilizado um tipo de material metálico (aço API 5L X70) no qual ondas longitudinais criticamente refratadas foram excitadas com três diferentes níveis de freqüência (2,25; 3,5 e 5 MHz). Depois das medições realizadas no material, rasgos com diferentes profundidades foram usinados nas amostras metálicas e novamente ondas  $L_{cr}$  foram excitadas nos três níveis de freqüência definidos anteriormente. Os resultados foram comparados e uma relação entre profundidade de penetração e freqüência do transdutor pôde ser obtida. Para qualquer das freqüências, a profundidade de propagação esteve entre 1 e 2 comprimentos de onda.

## Palavras Chave

Ultra-som, Tensões Residuais, Acustoelasticidade

## Abstract

FRAGA, Ricardo dos Santos, Avaliation of the penetration depth of critically refracted longitudinal waves: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 142 p. Dissertação (Mestrado)

This investigation describes a model which permits evaluating the local properties during the process of wax formation. To achieve this objective it was necessary to know the local heat and mass transfer coefficient and hence solve the flow, heat and humidity fields. The solution is based upon converting the fields function in terms of the vorticity and stream function. Once the local heat and mass transfer coefficients are determined a two stage model for the wax formation was used to determine the growth rate of the wax layer. The results were then compared with existing numerical and experimental results and good agreement were found. Additional results were obtained to demonstrate the variation of wax density, temperature field and wax thickness. These results were analyzed and commented. The results obtained from this investigation are important in future studies in wax formation as well as in the energy optimization of the dewaxing process.

## Key Words

Ultrasound, Residual Stress, Acoustoelasticity

# Ìndice

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Nomenclatura	XV
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Formato do trabalho	3
2 Revisão da Literatura	5
2.1 Ultra-som - Teoria	5
2.2 Classificação das ondas ultra-sônicas	6
2.2.1 Ondas longitudinais	6
2.2.2 Ondas transversais	7
2.2.3 Ondas superficiais e sub-superficiais	8
2.2.4 Ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ )	9
2.3 Classificação das ondas superficiais e sub-superficiais	11
2.4 Tensões Residuais	13
2.4.1 Produção de tensão residual	14
2.4.2 Efeitos das tensões residuais	15
2.5 Teoria da Elasticidade	17

2.6 Acustoelasticidade	19
2.7 Sensibilidade das ondas longitudinais superficiais e sub-superficiais	25
2.7.1 Estudo da sensibilidade de ondas $L_{cr}$ considerando material com sua superfície livre de tensões	25
2.7.2 Estudo da sensibilidade de ondas $L_{cr}$ considerando material com sua superfície exposta à ação de tensões	29
2.7.3 Profundidade de penetração de uma onda sub-superficial	35
2.8 Revisão Bibliográfica	35
3 Modelagem Teórica	43
4 Materiais e Métodos	51
4.1 Materiais utilizados	51
4.2 Geometria das amostras	52
4.3 Equipamentos utilizados	52
4.3.1 Transdutores e sapatas	52
4.3.2 Sistema de posicionamento dos transdutores nas amostras	55
4.3.3 Sistema de geração e recepção de pulsos ultra-sônicos	56
4.3.4 Equipamentos e programa de aquisição de dados	57
4.4 Padrão de medição	59
4.4.1 Fatores ambientais	60
4.4.2 Fatores físicos	61
4.4.3 Elaboração do procedimento de medição e mapeamento	64
4.5 Avaliação experimental da profundidade de penetração das ondas $L_{cr}$	68
5 Resultados e Discussões	72
5.1 Verificação do padrão de repetibilidade (mapeamento)	72
5.1.1 Efeito da temperatura	75

5.1.2 Padrão de distribuição dos tempos de percurso	81
5.2 Comparação entre os tempos de percurso antes e após a usinagem dos rasgos	83
5.3 Comparação entre os sinais obtidos (antes e após a usinagem dos rasgos)	87
5.3.1 Comparação entre sinais de baixa amplitude e alta freqüência	87
5.3.2 Comparação das quedas de amplitude (decaimentos)	88
6 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	95
7 Referências Bibliográficas	98
Anexo A	104
A.1 Algoritmo utilizado para a obtenção dos deslocamentos relativos da onda $L_{cr}$	104
A.2 Curvas de Temperatura	106
A.3 Distribuição dos tempos de percurso	123
A.4 Sinais Adiquiridos	130

# Lista de Figuras

1.1: Inspeção ultra-sônica em dutos (Thurler <i>et al</i> , 2003)	2
2.1: Classificação das freqüências sonoras	6
2.2: Representação esquemática das ondas longitudinais	7
2.3: Representação esquemática das ondas transversais	7
2.4: Representação esquemática da onda de Rayleigh	8
2.5: Principais modos de vibração das ondas de Lamb	9
2.6: Representação da refração e da reflexão causados pela incidência oblíqua de um	
feixe de ondas sonoras	10
2.7: Representação esquemática das ondas excitadas na incidência de um feixe sonoro	
oblíquo	11
2.8: Onda longitudinal gerada na superfície inferior do corpo inspecionado.	12
2.9: Representação esquemática das classificações de tensões residuais.	14
2.10 Representação do resultado das tensões residuais agindo juntamente com as	
tensões aplicadas	16
2.11: Tensões atuantes em um corpo cúbico	17
2.12: Partículas contidas em um meio físico	20
2.13: Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados	21
2.14: Variação relativa da velocidade em relação à deformação (Bray, 2000)	24
2.15: Sistema de coordenadas na interface do meio físico	26
2.16: Representação esquemática da excitação das ondas superficiais e sub-	
superficiais	30
2.17 Padrão de radiação de um feixe incidindo com inclinação igual ao primeiro	
ângulo crítico (f = 1,8 MHz, D = 18 mm)	32
2.18: Padrão de radiação de um feixe incidindo com inclinação maior do que o	
primeiro ângulo crítico (f = 1,8 MHz, D = 18 mm)	33
2.19: Relação entre a atenuação da amplitude do lóbulo principal, seu respectivo	
ângulo e a inclinação do feixe acústico.	34
2.20: Dependência do ângulo de máxima amplitude em relação ao produto entre a	
freqüência e o diâmetro do transdutor piezoelétrico.	34
3.1: Sistema de coordenadas utilizado na modelagem	43
3.2: Deslocamentos da onda longitudinal superficial (Aço API 5LX70)	49
4.1: Representação geométrica das barras de Aço API 5L X70	52
4.2: Representação esquemática dos transdutores montados para a emissão e recepção	
de ondas L <sub>cr</sub> – Conjunto de transdução	53
4.3: Dimensões dos transdutores angulares em polegadas (Panametrics, 2004)	54

4.4: Fotos dos transdutores angulares	54
4.5: Pistão pneumático responsável pela força de aplicação das sapatas no material	
inspecionado.	55
4.6: Estrutura de aço utilizada no posicionamento das sapatas dos transdutores no	
material inspecionado.	56
4.7: Representação do sistema de geração e aquisição de dados de ondas Lcr	57
4.8: Tela do programa de aquisição de dados	58
4.9: Trem de ondas	59
4.10: Pirômetro a laser	61
4.11: Fixação da estrutura de posicionamento na bancada de testes	62
4.12: Parafusos de fixação dos transdutores nas sapatas	63
4.13: Padrão de medição para uma freqüência específica	66
4.14: Separação das amostras por freqüência utilizada	67
4.15: Posição do rasgo na amostra	69
4.16: Profundidade considerada	69
4.17: Dimensões do rasgo	70
4.18: Observação experimental da profundidade de penetração da onda L <sub>cr</sub>	70
4.19: Comparação entre os sinais obtidos antes e após o rasgo	71
5.1: Curva geral aproximada da relação entre tempo de percurso e temperatura	76
5.2: Padrão de distribuição de tempos de percurso	82
5.3: Identificação da profundidade de penetração da onda L <sub>cr</sub>	85
5.4: Comparação entre a modelagem teórica e os resultados experimentais	86
5.5: Ruídos obtidos nos mapeamentos	88
5.6: Amostra 1 Lado 1 Posição 1	89
5.7: Amostra 1 Lado 1 Posição 2	89
5.8: Amostra 1 Lado 1 Posição 3	89
5.9: Amostra 1 Lado 1 Posição 4	90
5.10: Amostra 3 Lado 1 Posição 1	90
5.11: Amostra 3 Lado 1 Posição 2	91
5.12: Amostra 3 Lado 1 Posição 3	91
5.13: Amostra 3 Lado 1 Posição 4	91
5.14: Amostra 5 Lado 1 Posição 1	92
5.15: Amostra 5 Lado 1 Posição 2	92
5.16: Amostra 5 Lado 1 Posição 3	93
5.17: Amostra 5 Lado 1 Posição 4	93

## Lista de Tabelas

3.1 Raízes do polinômio característico para os dois materiais utilizados	49
4.1: Propriedades dos materiais (Andrino 2003 e www.matweb.com)	51
4.2: Especificações dos transdutores angulares	54
4.3: Distribuição de rasgos por amostra e suas profundidades	68
5.1: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 1 (2,25 MHz)	73
5.2: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 2 (2,25 MHz)	73
5.3: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 3 (3,5 MHz)	74
5.4: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 4 (3,5 MHz)	74
5.5: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 5 (5,0 MHz)	74
5.6: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 6 (5,0 MHz)	75
5.7: Coeficientes de temperatura obtidos para três diferentes níveis de freqüência	77
5.8: Parâmetros estatísticos - 2,25 MHz	78
5.9: Parâmetros estatísticos – 3,5 MHz	78
5.10: Parâmetros estatísticos – 5,0 MHz	78
5.11: Valores de $F_{\alpha,a-1,N-a}$ obtidos para diferentes valores de $\alpha$	79
5.12: Coeficientes de temperatura e parâmetros estatísticos (2,25; 3,5 e 5,0 MHz)	80
5.13: Valores de $F_{\alpha,a-1,N-a}$ obtidos para diferentes valores de $\alpha$	81
5.14: Possibilidade de obtenção do tempo de percurso (freqüência e profundidade)	83
5.15: Profundidades nas quais o tempo de percurso se torna impossível de ser medido	85

# Nomenclatura

## Letras Latinas

A - área superficial da esfera	[m <sup>2</sup> ]
c - velocidade do som	[m/s]
E – módulo de Young	[MPa]
f – freqüência	[MHz]
G – módulo de cisalhamento	[MPa]
$\mathbf{k}$ – número de onda	$[m^{-1}]$
n, m, l – constantes de Murnagham	
L <sub>11</sub> – constante acustoelástica para ondas longitudinais	
<b>t</b> - tempo de percurso	[s]
$t_0$ – tempo de percurso para o estado livre de tensões	[s]
<b>u,v,w</b> - deslocamentos nas direções x.y e z respectivamente	[m]
$v_{max}$ – ângulo de máxima concentração de energia	
$V_{11}$ – velocidade das partículas na mesma direção de carregamento	[m/s]
$V_{12}$ , $V_{13}$ – velocidade das partículas na direção perpendicular ao carregamento	[m/s]

## Letras Gregas

$\theta_{cr}$ – primeiro ângulo crítico	
$\theta_3$ – terceiro ângulo crítico	
$\sigma$ - tensão normal	[MPa]
$\tau$ - tensão de cisalhamento	[MPa]

- $\boldsymbol{\epsilon}$  deformação
- $\lambda,\mu$  constantes de Lamé
- $\nu$  coeficiente de Poisson
- $\rho$  densidade
- $\boldsymbol{\omega}$  freqüência angular

[kg/m<sup>3</sup>] [rad/s]

## Capítulo 1

## Introdução

Técnicas de ensaios (destrutivos e não-destrutivos) são cada vez mais utilizadas para a manutenção e inspeção dos mais variados componentes mecânicos. A atividade de inspeção assume um papel muito importante, nos mais diversos segmentos industriais, sendo fundamental nos dias de hoje. Diversos problemas relacionados ao desenvolvimento e manutenção de componentes mecânicos são evitados mediante aplicação de técnicas de inspeção e, ao longo dos anos, estas vêm sendo cada vez mais desenvolvidas e aprimoradas. Falhas em componentes mecânicos tem sido o principal motivo de inspeção, nos mais diversos segmentos industriais, desde a área ferroviária até a área petrolífera. No Brasil e no mundo a indústria manufatureira necessita de técnicas de inspeção cada vez mais eficientes, pois a atividade de manutenção precisa ser cada vez mais rápida e eficaz.

A indústria petrolífera é uma das que mais crescem no Brasil e governos das mais diferentes esferas investem, cada vez mais, grande quantidade de capital na produção, exploração e transporte de hidrocarbonetos. O transporte de seus produtos é executado em grande parte por sistemas de dutos de grande extensão.

Muitas técnicas de inspeção são utilizadas para a detecção de falhas em dutos e, por muitos anos, estas vêem sendo utilizadas e aprimoradas. Uma das técnicas mais utilizadas é a inspeção por ondas ultra-sônicas, as quais se propagam ao longo dos dutos, detectando falhas e vazios (Figura 1.1)



Figura 1.1: Inspeção ultra-sônica em dutos (Thurler et al, 2003)

Além das falhas, tensões residuais são importantes fatores causadores de problemas em grandes tubulações. Tensões residuais provenientes de processos de fabricação e tratamentos térmicos podem ser detectadas utilizando técnicas destrutivas, semi-destrutivas e não-destrutivas. Na avaliação de tensões residuais em dutos, as técnicas destrutivas e semi-destrutivas são descartadas, pois danificam a tubulação durante a inspeção. Várias técnicas não-destrutivas, como detecção por Raios-X, apresentam bom desempenho na medição de tensões residuais, porém possuem grandes limitações em relação à complexidade dos equipamentos utilizados e à mobilidade para medições em campo.

A técnica de medição de tensões residuais utilizando ondas ultra-sônicas é relativamente nova, quando se compara com o surgimento do ultra-som como alternativa para detecção de falhas. Medir tensão usando ultra-som proporciona muitas vantagens em relação a outras técnicas de medição, como a facilidade de utilização em campo, utilizando equipamentos mais simples.

Apesar de apresentar várias vantagens na medição de tensões residuais, o ultra-som ainda é uma técnica que precisa ser aprimorada e desenvolvida. Alguns conceitos ainda são desconhecidos em relação à aplicação de ultra-som na medição de tensões residuais. Medir tensões com esta técnica é um processo extremamente sensível, pois vários fatores influenciam os valores de tensão obtidos.

Alguns estudos sobre os aspectos físicos dos transdutores ultra-sônicos vem sendo realizados desde a década de 1970. Ermolov, Basatskaya, e outros cientistas realizaram pesquisas

nas quais as dimensões e freqüências dos transdutores foram testadas em diferentes condições e materiais. Nestes trabalhos, pôde-se observar que a variação das dimensões e das freqüências dos transdutores fez com que os pulsos sonoros se propagassem em profundidades variadas dentro do material inspecionado.

Ondas ultra-sônicas longitudinais criticamente refratadas estão entre as principais ondas utilizadas para a medição de tensões. Elas caminham paralelamente à superfície e são influenciadas pela tensão ao longo do percurso. Como são ondas de corpo, podem ser influenciadas por variações ao longo de qualquer direção.

A identificação do percurso que os pulsos ultra-sônicos seguem dentro do material é de grande importância na medição de tensões residuais. A falta de conhecimento em relação ao caminho seguido pelos pulsos pode trazer um diagnóstico equivocado em relação à distribuição de tensões ao longo do material. Tensões medidas na superfície de um dado corpo podem erroneamente representar tensões em camadas mais profundas. Este tipo de erro leva a avaliações equivocadas, dificultando a obtenção de resultados e prejudicando o trabalho de manutenção de dutos e vasos de pressão.

## 1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é avaliar a profundidade de penetração das ondas longitudinais criticamente refratadas em aço API 5L X70, em função da freqüência dos transdutores ultrasônicos. Os resultados permitirão conhecer em que região as tensões estão sendo medidas e utilizar essa informação para a calibração dos sistemas e reconstrução do estado de tensões em componentes mecânicos

#### 1.2 Formato do trabalho

Depois de introduzidos os principais pontos da pesquisa, o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre alguns conceitos básicos de teoria da elasticidade, acústica e da técnica ultrasônica de detecção de falhas e medição de tensões residuais. A parte final deste capítulo se dedica a expor os estudos já realizados para obter uma relação entre profundidade de penetração das ondas L<sub>cr</sub> e a freqüência de excitação dessas ondas.

3

O capítulo 3 apresenta um desenvolvimento matemático sobre a dependência da profundidade das ondas  $L_{cr}$  em relação a seus deslocamentos transversal e longitudinal, mostrando as relações entre a penetração da onda e sua freqüência.

No capítulo 4 são descritos todos os equipamentos, estruturas e materiais utilizados na comprovação da teoria exposta nos capítulos 2 e 3. A metodologia utilizada para as medições também é exposta neste capítulo. O capítulo 5 tem o principal objetivo de mostrar os resultados obtidos com a pesquisa realizada. O capítulo 6 tem a finalidade de sugerir recomendações para trabalhos futuros e expor as principais conclusões obtidas com a pesquisa.

## Capítulo 2

## Revisão da Literatura

Este capítulo tem como principal objetivo expor as principais teorias que serviram como base para este trabalho. Primeiramente, alguns conceitos sobre ultra-som serão expostos, seguidos de uma descrição da classificação das ondas sonoras. Tensões residuais e suas principais causas também são introduzidas neste capítulo, além das teorias da elasticidade e acustoelasticidade. Por fim, são descritos os principais conceitos referentes às ondas longitudinais criticamente refratadas, suas características e sensibilidade.

#### 2.1 Ultra-som - Teoria

A técnica de medição de tensões residuais em componentes mecânicos, utilizando ultrasom, consiste na emissão de ondas sonoras (dispostas em um feixe) na superfície do material que se deseja avaliar. A introdução de um feixe sônico provoca uma vibração mecânica do material que permite identificar descontinuidades internas. Ondas são pulsos que podem se propagar em um meio físico ou simplesmente no vácuo. As perturbações que requerem em um meio físico podem ser denominadas ondas mecânicas, enquanto que as ondas que não necessariamente se propagam em um meio físico são chamadas de ondas eletromagnéticas.

Perturbações sonoras são ondas mecânicas e podem ser classificadas de acordo com suas freqüências de propagação. Pulsos sonoros que se propagam a uma freqüência abaixo de 20 Hz são classificados como infra-som. Para freqüências de propagação que ficam no intervalo compreendido entre 20 Hz e 20 KHz a onda sonora é classificada como som, para esta faixa de freqüências, as ondas sonoras podem ser captadas pelo ouvido humano (audíveis). Ondas sonoras

com freqüência de propagação acima de 20 KHz são chamadas de ultra-som. Usualmente, ensaios ultra-sônicos em metais são realizados com uma freqüência de propagação compreendida entre 0,5 e 15MHz (Figura 2.1). As ondas ultra-sônicas e infra-sônicas são inaudíveis.



Figura 2.1: Classificação das freqüências sonoras

#### 2.2 Classificação das ondas ultra-sônicas

No meio sólido, as ondas ultra-sônicas podem se propagar de diversas maneiras, que são baseadas nas formas como as partículas do meio físico oscilam. Particularmente para o uso em inspeção, o som pode se propagar em ondas longitudinais, transversais, superficiais e sub-superficiais.

#### 2.2.1 Ondas longitudinais

Nas ondas longitudinais as oscilações ocorrem na mesma direção de propagação dos pulsos (Figura 2.2). Forças de compressão e dilatação são presentes neste tipo de onda e por este fator as ondas longitudinais podem ser chamadas de ondas de pressão ou de compressão. Em algumas situações as ondas longitudinais podem ser chamadas de ondas de densidade, pois a densidade das partículas que as compõem varia durante a propagação dos pulsos. Ondas de compressão podem ser geradas em líquidos ou sólidos, pois sua energia trafega sobre suas estruturas atômicas, em movimentos de compressão e expansão.



Figura 2.2: Representação esquemática das ondas longitudinais

## 2.2.2 Ondas transversais

Diferentemente das ondas longitudinais, as ondas transversais apresentam oscilações das partículas na direção transversal à propagação dos pulsos sonoros (Figura 2.3). Ondas transversais propagam-se apenas no meio sólido e são relativamente fracas (pouco sensíveis a tensão), comparadas com as ondas longitudinais. As ondas transversais podem ser geradas em materiais com energia proveniente de ondas longitudinais, utilizando ângulos adequados de refração.



Figura 2.3: Representação esquemática das ondas transversais

#### 2.2.3 Ondas superficiais e sub-superficiais

As ondas superficiais de Rayleigh propagam-se pela superfície de um material sólido com espessura definida, que deve ser maior que o comprimento da onda sonora. O movimento das partículas de uma onda de Rayleigh segue uma trajetória elíptica, ou seja, tanto transversal quanto longitudinal (Figura 2.4). As ondas superficiais são muito úteis nos ensaios por ultra-som, pois são muito sensíveis a defeitos superficiais e sendo assim, é possível inspecionar áreas que são difíceis de serem analisadas por outros tipos de onda.



Figura 2.4: Representação esquemática da onda de Rayleigh

As ondas de Lamb são perturbações que apresentam vibrações complexas e que se propagam ao longo de um material com espessura definida (comparável ao comprimento de onda). A propagação das ondas de Lamb depende de algumas características do material como densidade e elasticidade. Vários modos de vibração podem ocorrer nas ondas de Lamb, mas os dois mais comuns são o simétrico e o assimétrico (Figura 2.5). O movimento das partículas nas ondas de Lamb é semelhante ao movimento elíptico das ondas de Rayleigh.

As ondas de Love propagam-se na direção paralela à superfície do material analisado, apresentando movimento transversal em relação à direção de propagação do feixe sonoro.

Geralmente, as ondas de Love são utilizadas para se analisar falhas em materiais que foram cobertos por fina camada de outro material.



Figura 2.5: Principais modos de vibração das ondas de Lamb

## 2.2.4 Ondas longitudinais criticamente refratadas (L<sub>cr</sub>)

As ondas longitudinais são as mais sensíveis à presença de tensões. Como as tensões superficiais ou quase-superficiais são as que mais levam a falhas, é adequado utilizar ondas longitudinais que caminhem próximas à superficie. A forma usual de criar tais ondas é a utilização de meios de refratar as ondas paralelamente à superficie, gerando o que convencionou se chamar de ondas longitudinais criticamente refratadas ou ondas L<sub>er</sub>. Estas ondas podem ser geradas colocando-se um transdutor em uma posição oblíqua em relação à superfície do componente mecânico avaliado. A inclinação do transdutor deve se aproximar ao valor do primeiro ângulo crítico. A Figura 2.6 mostra um esquema explicativo. Quando um feixe oblíquo XY de ondas longitudinais incide na interface (região de separação) entre um meio "1" e um meio "2", uma parcela das ondas incidentes é refratada (representada pelos feixes YZ e YZ') no meio "2" e outra é refletida no meio "1" (representada pelos feixes YW e YW'). Ambas as parcelas (refratada e refletida) apresentam ondas longitudinais (YW e YZ) e transversais (YW' e YZ').



Figura 2.6: Representação da refração e da reflexão causados pela incidência oblíqua de um feixe de ondas sonoras

Utilizando a lei de Snell, pode-se calcular o ângulo de incidência do feixe de ondas sonoras  $(\theta_{cr})$ :

$$\theta_{cr} = sen^{-1} \left( \frac{c_1}{c_2} \right) \tag{2.1}$$

Nesta expressão,  $c_1 e c_2$  representam a velocidade da onda no meio "1" e no meio "2", respectivamente. A velocidade da onda depende das propriedades do material no qual a mesma se propaga. Para se calcular o primeiro ângulo crítico utilizando a expressão 2.1 o feixe de ondas refratado deve-se aproximar ao máximo da interface ( $\theta_2 = 90^\circ$ ). A escolha da utilização das ondas  $L_{cr}$  ao invés de outros modos de propagação é justificada pelo fato de que as ondas criticamente refratadas serem muito sensíveis à distribuição de tensões na região sub-superficial de um componente mecânico, conforme já dito, e não apenas na superfície do mesmo. Outro fator importante, é a menor sensibilidade das ondas  $L_{cr}$  em relação à textura e maior sensibilidade à distribuição de tensões sonoras.

#### 2.3 Classificação das ondas superficiais e sub-superficiais

A excitação de ondas longitudinais criticamente refratadas induz a formação de outros tipos de ondas, com diferentes polarizações e trajetórias de propagação. Ermolov (2004), Razygraev (2004) e Baby *et al* (2002) realizaram estudos nos quais foram classificadas as ondas acústicas envolvidas em ensaios ultra-sônicos, realizados com incidência oblíqua em aços. A grande maioria dos cientistas é unânime em relação aos tipos de ondas geradas na incidência oblíqua de ondas ultra-sônicas, porém, a nomenclatura utilizada para classificá-los varia dentro da comunidade científica.

Quando um feixe sônico incide sobre um determinado meio, com inclinação igual ao primeiro ângulo crítico, uma onda longitudinal superficial é formada e se propaga próximo à superfície (Figura 2.7). As ondas longitudinais superficiais apresentam pouca sensibilidade em relação à rugosidade superficial, sendo mais sensíveis às falhas sub-superficiais. Muitas vezes, este tipo de onda é classificado como sub-superficial.



Figura 2.7: Representação esquemática das ondas excitadas na incidência de um feixe sonoro oblíquo

Outros tipos de onda são gerados a partir da onda longitudinal superficial, sendo que estes dependem das condições de contorno às quais a superfície do meio de propagação está submetida. Na superfície livre do material, as tensões normal e cisalhante são nulas, enquanto que no contato entre as sapatas dos transdutores (transmissor e receptor) e o material as tensões são diferentes de zero. Este fator resulta na excitação de ondas laterais (longitudinais e transversais) nas sapatas dos transdutores, durante a realização de um teste de contato. No caso de um teste por imersão, as ondas laterais geradas no líquido são puramente longitudinais. As frentes de onda das ondas transversais laterais apresentam formato de um plano inclinado.

Além das ondas laterais, a excitação de uma onda longitudinal superficial também induz a geração de outros tipos de onda. Uma onda longitudinal, que se propaga pela superfície mas em sentido contrário, também é excitada, recebendo o nome de onda de retorno, a qual pode ser utilizada na avaliação da sensibilidade e da qualidade do contato acústico.

No caso de uma chapa espessa, uma segunda onda longitudinal superficial também pode ser gerada (Figura 2.8), sendo esta, resultado da incidência da onda transversal lateral na superfície inferior, com inclinação igual ao terceiro ângulo crítico (Expressão 2.2):



Figura 2.8: Onda longitudinal gerada na superfície inferior do corpo inspecionado.

#### 2.4 Tensões Residuais

Tensões residuais de tração ou compressão, contidas em um determinado corpo sólido e elástico, são aquelas que existem sem aplicação de carregamento externo (forças externas ou gradientes de temperatura). Normalmente não são necessárias para manter o equilíbrio entre um corpo e seu ambiente e podem ser classificadas de acordo com suas causas, situações de equilíbrio ou métodos pelas quais são medidas. As tensões residuais permanecem em um corpo quando todos os carregamentos atuantes são removidos e podem ser produzidas em processos térmicos ou mecânicos.

Existem três tipos de tensões residuais que são usualmente definidas como tensões de:

- Primeira ordem (σ<sub>I</sub>)
- Segunda ordem ( $\sigma_{II}$ )
- Terceira ordem ( $\sigma_{III}$ )

As tensões de primeira ordem são originárias das interações entre grupos de grãos de um determinado material. Tensões de segunda ordem são oriundas de efeitos relacionadas à apenas um grão. Tensões de terceira ordem atuam no material de formas sub-microscópica e atômica. As tensões de primeira ordem são macro-tensões e as tensões de segunda e terceira são definidas como micro tensões. Tensões residuais contidas em um material são resultados de efeitos macro e microscópicos. Este tipo de classificação de tensões residuais pode ser mostrado pela Figura 2.9.



Figura 2.9: Representação esquemática das classificações de tensões residuais.

Micro-tensões residuais são resultado da presença de diferentes fases em um determinado corpo sólido enquanto que as macro-tensões tem comportamento contínuo quando são consideradas as regiões entre as faces. Um sistema mecânico sujeito somente a tensões residuais está sempre em equilíbrio. Considerando uma dada seção de uma peça, a soma das forças e dos momentos em relação a esta seção será sempre igual a zero.

#### 2.4.1 Produção de tensão residual

As tensões residuais podem ser produzidas por deformações plásticas heterogêneas, contrações térmicas e transformações de fase induzidas por processos de manufatura. Estes mecanismos podem ser classificados da seguinte forma:

- Produção primária: forjamento, extrusão, dobramento, etc.
- Remoção de superfície: usinagem, eletro-erosão, etc.
- Junções: soldagem, brasagem, etc.
- Tratamentos superficiais: jateamento de granalhas, laser, etc.

 Tratamentos térmicos, químicos e termomecânicos: nitrigenação, eletrodeposição, têmpera, etc.

#### 2.4.2 Efeitos das tensões residuais

Tensões residuais, presentes em um meio sólido, podem apresentar elevada magnitude, ocasionando deformações macro e microscópicas. Estes tipos de tensões podem ser tanto benéficas quanto prejudiciais ao funcionamento de um dado componente mecânico. O conhecimento do nível e sinal das tensões residuais é importante, uma vez que problemas relacionados a sistemas mecânicos podem ser evitados tendo-se uma idéia sobre o estado das mesmas. O bom funcionamento de um dado sistema mecânico depende do equilíbrio da segurança de seus componentes e isto pode ser obtido com níveis adequados de tensões residuais em cada um deles.

Geralmente, tensões residuais de compressão na superfície de elementos mecânicos apresentam efeitos benéficos na vida útil e no desgaste corrosivo de elementos mecânicos. Isto devido ao fato de retardarem o início das trincas, além de dificultarem a ocorrência de corrosão. Tensões residuais de tração atuantes na superfície, ao contrário das tensões de compressão, reduzem a performance mecânica dos materiais facilitando a ocorrência de falhas por fadiga e induzindo o aparecimento de trincas superfíciais. No campo elástico, as tensões residuais podem ser adicionadas às tensões aplicadas como carregamentos estáticos.

Os efeitos das tensões residuais em um dado componente mecânico podem ser melhor compreendidos considerando-se uma placa metálica contendo tensões residuais em toda sua extensão. Se uma tensão, com comportamento conhecido, for aplicada no mesmo plano de atuação da tensão residual existente, a tensão total será a soma dos efeitos das tensões residual  $(\sigma_R)$  e aplicada  $(\sigma_{APL})$ :

A superposição das tensões aplicada e residual pode ser melhor compreendida observandose a Figura 2.10. Uma tensão de tração aplicada em um dado material pode ter seu efeito minimizado tendo-se uma tensão residual de compressão atuando na mesma direção, resultando em uma tensão total menor do que a tensão aplicada. Muitos tratamentos térmicos e mecânicos utilizam este conceito buscando introduzir tensões residuais em componentes mecânicos.



Figura 2.10 Representação do resultado das tensões residuais agindo juntamente com as tensões aplicadas

Tensões de compressão podem ajudar a reduzir o nível de tensão total onde a tensão aplicada possui os maiores valores. Isto pode trazer também um aumento da vida em fadiga. No caso de carregamentos cíclicos, trincas podem se iniciar e propagar com um nível de tensão muito menor do que o esperado. Uma acomodação da estrutura em relação ao carregamento aplicado ocorre e isto pode fechar as trincas, postergando sua propagação.

#### 2.5 Teoria da Elasticidade

De acordo com Timoshenko e Goodier (1987) existem duas espécies de forças que podem atuar sobre um determinado corpo. As forças de superfície, distribuídas sobre a superfície do corpo (como a pressão de um corpo sobre outro ou a pressão hidrostática) e as forças de massa ou de volume, distribuídas pelo volume do corpo (forças gravitacionais, magnéticas ou forças de inércia). A força de superfície por unidade de área pode ser decomposta em três componentes paralelas aos eixos coordenados cartesianos x,y e z. As tensões normais ( $\sigma$ ) e de cisalhamento ( $\tau$ ) podem ser representadas no corpo de acordo com a Figura 2.11. O primeiro índice subscrito indica a direção da normal ao plano enquanto que o segundo índice representa a direção de ação da tensão.



Figura 2.11: Tensões atuantes em um corpo cúbico

As tensões atuantes no meio físico são representadas de forma tensorial de acordo com a expressão 2.4:

$$\tau_{ij} = [T] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$
(2.4)

Uma característica importante deste tensor é a sua simetria. O corpo elástico, sujeito às tensões descritas pode sofrer deformações internas. Estas deformações podem ser representadas utilizando uma notação tensorial. De acordo com Krempl (1993), as deformações ( $\epsilon$ ) resultantes em um corpo podem ser representadas de maneira geral pela expressão 2.5:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(2.5)

Para generalizar a representação da deformação,  $u_i$  é o componente do deslocamento de um determinado ponto na direção i e  $x_i$  é a posição deste mesmo ponto na coordenada i. Nesta análise  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$ ,  $x_3 = z$ ,  $u_1 = u$ ,  $u_2 = v$  e  $u_3 = w$ . Utilizando uma representação tensorial para a expressão 2.6, tem-se o seguinte tensor de deformações :

$$\varepsilon_{ij} = [E] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$
(2.6)

O tensor de deformações, assim como o de tensões, é simétrico. Para um sólido elástico linear e isotrópico o tensor de tensões pode ser definido como :

$$T = 2\lambda \varepsilon_{ii} I + 2\mu E \tag{2.7}$$

O tensor I é chamado de tensor identidade e assume os seguintes valores :

$$I_{11} = I_{22} = I_{33} = 1$$
  

$$I_{12} = I_{13} = I_{21} = I_{23} = I_{31} = I_{32} = 0$$
(2.8)

Na expressão 2.7,  $\mu e \lambda$  são chamadas de constantes ou coeficientes de Lamé e a constante E é o módulo de Young. Esta expressão deve ser desenvolvida para se relacionar as tensões normais e de cisalhamento com as deformações ocorridas no corpo. Sendo assim:

$$\sigma_{xx} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu\varepsilon_{xx}$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu\varepsilon_{yy}$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu\varepsilon_{zz}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$
(2.9)

#### 2.6 Acustoelasticidade

Ondas sonoras propagam-se em um dado meio material de acordo com as vibrações e movimentos oscilatórios de suas partículas. Uma onda ultra-sônica pode ser visualizada como um número infinito de partículas oscilando dentro de um material, conectadas por molas elásticas (Figura 2.12). Cada partícula individual é influenciada pelo movimento das partículas vizinhas, sendo que as forças de restauração (inerciais e elásticas) atuam em cada partícula.


Figura 2.12: Partículas contidas em um meio físico

Um conjunto determinado por um corpo de massa definida, conectado a uma mola, tem uma freqüência única de ressonância determinada pela constante da mola e pela massa do corpo. A constante da mola é a razão entre a força de restauração e o deslocamento aplicado na própria mola. Dentro do limite elástico de qualquer material, existe uma relação entre o deslocamento de uma dada partícula e a força induzida na restauração da mesma para sua posição de equilíbrio. Esta dependência linear é descrita pela Lei de Hooke.

Em relação à elasticidade de um material, a Lei de Hooke estabelece que a força de restauração de uma mola é proporcional ao comprimento correspondente à deformação da mesma, atuando em direção oposta ao deslocamento inicial da extremidade da mola. A Lei de Hooke, quando empregada em conjunto com a Segunda Lei de Newton, pode ser utilizada para estudar a velocidade do som. Portanto, é pertinente aplicar a teoria da elasticidade para se avaliar as tensões obtidas por técnicas ultra-sônicas.

De acordo com Bray e Stanley (1997), técnicas ultra-sônicas de medição de tensões em materiais são baseadas no comportamento da velocidade de uma onda sonora, relacionado ao estado de tensões atuantes em um determinado componente mecânico. Considerando-se, por exemplo, um corpo de material determinado, em forma de paralelepípedo e sob ação de tensões de tração na direção longitudinal, pode-se gerar ondas que se propagam nas três dimensões perpendiculares relacionadas ao corpo (Figura 2.13). O primeiro índice relacionado a velocidade representa a direção de propagação da onda, enquanto que o segundo índice está relacionado com

a direção de movimento das partículas. Na Figura 2.13.a, por exemplo, as ondas com  $V_{11}$  se propagam na mesma direção da tensão atuante do corpo.  $V_{11}$  representa a velocidade das partículas na mesma direção de propagação da onda (ondas longitudinais). As velocidades  $V_{12}$  e  $V_{13}$  representam a velocidade da onda em direções perpendiculares ao movimento das partículas (ondas transversais). Nas figuras 2.13.b e 2.13.c as ondas propagam-se em direções ortogonais em relação às tensões atuantes.



Figura 2.13: Representação da propagação de ondas acústicas em materiais tracionados

De acordo com Bray (2000), a variação no tempo de percurso apresenta maior sensibilidade em relação à deformação para ondas longitudinais. A velocidade das ondas planas, trafegando paralelamente ao carregamento, pode ser relacionada à deformação de acordo com as seguintes expressões:

$$\rho_{0}V_{11}^{2} = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_{1}$$

$$\rho_{0}V_{12}^{2} = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_{1} + 2\mu\alpha_{2} - \frac{1}{3}n\alpha_{3}$$

$$\rho_{0}V_{13}^{2} = \mu + (m + \lambda)\theta + 4\mu\alpha_{1} + 2\mu\alpha_{3} - \frac{1}{3}n\alpha_{2}$$
(2.10)

Nas expressões 2.10,  $\alpha$  é a deformação e n, m e l são as constantes de Murnagham. Para o estado de tensão uniaxial,  $\alpha_1 = \varepsilon$ ,  $\alpha_2 = \alpha_3 = -v\varepsilon$  onde  $\varepsilon$  é a deformação na direção 1 e v é o coeficiente de Poisson. Substituindo estes valores nas expressões (2.10) temos:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[ 4(\lambda + 2\mu) + 2(\lambda + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right) \right] \varepsilon$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + \left[ 4\mu + \nu \left(\frac{n}{2}\right) + m(1 - 2\nu) \right] \varepsilon$$
(2.11)

Para ondas planas deslocando-se perpendicularmente ao estado de tensão uniaxial pode-se calcular as componentes da velocidade:

$$\rho_{0} V_{22}^{2} = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon$$

$$\rho_{0} V_{21}^{2} = \rho_{0} V_{31}^{2} = \mu + \left[ (\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \frac{n\nu}{2} \right]\varepsilon$$

$$\rho_{0} V_{22}^{2} = \rho_{0} V_{22}^{2} = \mu + \left[ (\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - \frac{n}{2} \right]\varepsilon$$
(2.12)

Um fator importante na aplicação de técnicas ultra-sônicas para medição de tensões residuais é a avaliação da sensibilidade das ondas sonoras, que pode ser caracterizada como a variação da velocidade em relação à tensão. Derivando-se a expressão 2.12 em relação à deformação e dividindo-se o resultado pela expressão original, tem-se:

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2m} = L_{11}$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{m}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12}$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^{0}}{d\varepsilon} = -2\nu \left[ 1 + \frac{m - \frac{\mu l}{\lambda}}{\lambda + 2\mu} \right] = L_{22}$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{\nu m}{4\mu} = L_{21}$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{m - 2\lambda}{2(\lambda + \mu)} - \frac{n}{4\mu} = L_{23}$$
(2.13)

Os coeficientes  $L_{ij}$  mostrados são chamados de constantes acustoelásticas e representam a variação da velocidade da onda  $V_{ij}$  com a deformação  $\varepsilon$ . Valores experimentais para as constantes acustoelásticas podem ser obtidos na literatura. A variação da velocidade  $V_{11}$  controlada pelo coeficiente  $L_{11}$  é muito maior que as outras variações quando se considera as outras velocidades, o que a torna mais indicada para ser utilizada nos ensaios ultra-sônicos (Figura 2.14).



Figura 2.14: Variação relativa da velocidade em relação à deformação (Bray, 2000)

As tensões podem ser calculadas utilizando-se a Lei de Hooke para o estado uniaxial. Sendo assim:

$$\frac{dV_{11}/V_{11}}{d\varepsilon} = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{d\sigma} = L_{11}$$

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}}$$
(2.14)

A variação na velocidade pode ser expressa pela variação do tempo necessário para a onda sonora se propagar no percurso compreendido entre o emissor e o receptor. Sendo assim, a variação relativa na velocidade pode ser calculada pela variação relativa do tempo de propagação da onda  $(dt/t_0)$ . A expressão utilizada no cálculo torna-se:

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0}dt$$
(2.15)

Onde  $t_0$  é o tempo de percurso que a onda leva para atravessar um trajeto livre de tensões em um dado material investigado.

#### 2.7 Sensibilidade das ondas longitudinais superficiais e sub-superficiais

A sensibilidade das ondas longitudinais superficiais e sub-superficiais começou a ser estudada no final da década de 1970 e início da década de 1980 por pesquisadores soviéticos. Os estudos relacionados à sensibilidade foram realizados de duas formas diferentes, as quais consistem em:

- Interface entre o material inspecionado e as sapatas dos transdutores livre da ação de tensões (Yuzonene, 1981)
- Consideração das tensões provenientes do contato das sapatas dos transdutores com o material inspecionado (Basatskaya e Ermolov, 1980).

Ambos os estudos levam a diferentes considerações relacionadas às condições de contorno do problema de propagação de ondas sonoras, e consequentemente, diferentes resultados relacionados à profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$ . Quando se considera a superfície do material livre da ação de tensões referentes ao contato sapata-material, a profundidade de penetração das ondas sub-superfíciais depende apenas da freqüência dos transdutores piezoeletricos. Por outro lado, a consideração de tensões provenientes do contato sapata-transdutor leva a resultados nos quais a profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  depende não apenas da freqüência dos transdutores, mas também das dimensões de seus cristais piezoeletricos.

#### 

A obtenção dos comportamentos dos deslocamentos e das tensões das ondas superficiais e sub-superficiais envolve sua caracterização matemática, que depende de uma série de considerações e simplificações. Com o objetivo de obter um comportamento das ondas superficiais e sub-superficiais, foi realizado um estudo (Yuzonene,1981; Sajauskas,2004), no qual a principal simplificação resume-se a representar o problema das ondas superficiais e sub-

superficiais de forma bidimensional (Figura 2.15). A interface do sistema consiste no limite entre o meio físico sujeito à ação de pulsos sonoros e o ar.



Figura 2.15: Sistema de coordenadas na interface do meio físico

O movimento dos pulsos sonoros excitados na superfície e no interior do meio é descrito pela seguinte expressão:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} = G(\Delta \vec{U}) + (\lambda + G)grad(div(\vec{U}))$$
(2.16)

Onde  $\vec{U}$  é o vetor deslocamento da partícula, t é o tempo,  $\rho$  é a densidade,  $\lambda$  é a constante de Lamé e G é o módulo de cisalhamento. O vetor  $\vec{U}$  pode ser decomposto em duas componentes: uma referente ao movimento laminar (longitudinal) e outra representando o movimento solenoidal (transversal). A parcela laminar depende do potencial escalar  $\varphi$ , enquanto que a parcela solenoidal depende do potencial vetorial  $\psi$ .

$$\vec{U}_L = grad(\varphi) \tag{2.17}$$

$$\vec{U}_T = grad(\psi) \tag{2.18}$$

Os potenciais  $\varphi \in \psi$  são soluções das equações de onda, sendo estas:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$
(2.19)

Onde  $c_L$  e  $c_T$  são as velocidades das ondas longitudinal e transversal, respectivamente. Como soluções das expressões 2.19, os potenciais  $\varphi \in \psi$  podem ser definidos por (Sajauskas, 2004):

$$\varphi = A \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$
  

$$\psi = B \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(2.20)

Nas expressões 2.20 A e B são constantes que representam as amplitudes dos potenciais  $\varphi$  e  $\psi$ . As constantes  $k_L$  e  $k_T$  são os números das ondas longitudinal e transversal respectivamente, sendo estes definidos por:

$$k_{L} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)}} = \frac{\omega}{c_{L}}$$

$$k_{T} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \frac{\omega}{c_{T}}$$
(2.21)

Nas expressões 2.21,  $\omega$  é a freqüência angular, que se encontra no intervalo definido por  $k_L < k < k_T$ .

De acordo com Rose (1999), o vetor deslocamento pode ser representado pela equação de Helmholtz (expressão 2.22):

$$\vec{U} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{\psi} \tag{2.22}$$

No caso de uma onda polarizada verticalmente, o potencial vetorial apresenta  $\psi = \psi_y$ , pois as outras duas componentes do potencial são nulas. Desenvolvendo-se a expressão 2.22 tem-se:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}$$
  

$$v = 0$$
  

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$
  
(2.23)

As ondas superficiais excitadas na superficie de um meio físico estão sujeitas a duas condições de contorno referentes às tensões na interface do meio com o ar, representadas da seguinte forma:

$$\sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{zz} = 0 \end{cases} (z = 0)$$

$$(2.24)$$

Substituindo-se as expressões 2.9 e 2.20 em 2.24 tem-se um sistema de equações que levam à uma expressão polinomial denominada Equação de Rayleigh. Esta equação traz importantes conclusões referentes aos tipos de ondas superficiais e sub-superficiais envolvidos. A equação de Rayleigh pode ser expressa por:

$$16(1-r^{2})\overline{m}^{6} + 8(2r^{2}-3)\overline{m}^{4} + 8\overline{m}^{2} - 1 = 0$$
(2.25)

Onde:

$$\overline{m} = \frac{\overline{k}}{k_T} \qquad r = \frac{k_L}{k_T}$$
(2.26)

Definidos os potenciais  $\varphi \in \psi$  torna-se possível a obtenção de expressões para os deslocamentos u e w. Substituindo-se 2.20 em 2.23 tem-se:

$$u = Aki \exp\left[-\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}z + i(kx - \omega t)\right] + \frac{2Ak\sqrt{k_{T}^{2} - k}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{\left(k_{T}^{2} - 2k^{2}\right)} \exp\left[i\sqrt{k_{T}^{2} - k}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(2.27)

$$w = -A\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}} \exp\left[-\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}z + i(kx - \omega t)\right] - \frac{2Ak^{2}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{(k_{T}^{2} - 2k^{2})} \exp\left[i\sqrt{k_{T}^{2} - k}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(2.28)

As expressões 2.27 e 2.28 são de grande importância para o estudo da profundidade de penetração das ondas longitudinais criticamente refratadas. Para se avaliar a profundidade de penetração de uma onda longitudinal criticamente refratada é necessário conhecer seu comportamento no meio inspecionado. A maneira como uma onda acústica se propaga ao longo de um determinado material é fundamental para se avaliar a sua sensibilidade às tensões, sendo assim, o conhecimento do campo de deslocamentos torna-se essencial.

# 2.7.2 Estudo da sensibilidade de ondas $L_{cr}$ considerando material com sua superfície exposta à ação de tensões

Basatskaya e Ermolov (1980) realizaram estudo de sensibilidade das ondas  $L_{cr}$  no qual as considerações e simplificações utilizadas são diferentes das estabelecidas por Sajauskas (2004) e Yuozonene (1981). A princípio considera-se o meio submetido à excitação das ondas sonoras sob a ação de um transdutor montado sobre uma sapata de acrílico (Figura 2.16)



Figura 2.16: Representação esquemática da excitação das ondas superficiais e sub-superficiais

As condições de contorno atuantes no meio físico podem ser descritas de acordo com as expressões 2.29:

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} \sigma_z \exp[i(k(sen(\theta)) - \omega t)] & |x| \le l \\ 0 & |x| > l \end{cases}$$

$$\sigma_{xz} = 0 & |x| < \infty$$
(2.29)

A resolução das equações de Helmholtz utilizando-se as condições de contorno 2.29 permite obter expressões dos deslocamentos u e v. Entretanto estas expressões são obtidas em forma de integrais, complicadas para serem resolvidas. Um artifício importante para a integração destas expressões é a utilização do método da descida mais íngreme (*steepest descent*). Esta técnica consiste na resolução de integrais que apresentam a forma da expressão 2.30, justamente a mesma contida nas integrais dos deslocamentos u e v.

$$I(\rho) = \int_{C} F(\zeta) \exp(\rho q(\zeta)) d\zeta$$
(2.30)

Nesta expressão, I, F e q são funções hipotéticas e  $\rho$  e  $\zeta$  são variáveis também hipotéticas.

A principal vantagem de se utilizar a técnica da descida mais íngreme é a representação das componentes  $u_x$  e  $u_z$  em forma de uma série de potências inversas. Sendo assim, a integral da expressão 2.30 pode ser expressa por:

$$I = \exp\left[i\left(kr - \frac{\pi}{4}\right)\right] \sqrt{\frac{2\pi}{|q''(v_0)|kr}} \times \left\{F(v_0) + \frac{1}{2kr}\left[\frac{q'''}{(q'')^2}F' + \frac{1}{4}\frac{q''}{(q'')^2}F - \frac{5}{12}\frac{(q''')^2}{(q'')}F - \frac{F''}{q''}\right]_{v=v_0} + \ldots\right\}$$
(2.31)

A expressão 2.31 foi representada com apenas dois termos que podem trazer conclusões importantes sobre a sensibilidade das ondas longitudinais refratadas.

De acordo com Ermolov (2004), as ondas transversais laterais geradas carregam com elas grande quantidade de energia, fazendo com que a onda longitudinal superficial decaia rapidamente. De acordo com Basatskaya e Ermolov (1980), a relação entre a amplitude e a distância r entre os transdutores transmissor e receptor seguem a relação  $A \sim r^{-3/2}$ . Esta relação pode ser justificada analisando-se o comportamento da expressão 2.31. Perto da superfície livre do meio o primeiro termo da série se torna nulo, enquanto que o deslocamento de uma onda longitudinal superficial é determinado pelo segundo termo, o qual decresce com o aumento da distancia de acordo com a relação mencionada. Quando se considera a divergência dos raios acústicos em um plano perpendicular ao plano da superfície do meio inspecionado, o segundo termo da expressão 2.31 decai seguindo a relação  $A \sim r^{-2}$ .

Em regiões abaixo da superfície livre do meio, o primeiro termo da série se torna predominante, fazendo com que a atenuação siga a relação  $A \sim r^{-1/2}$ . Assim como na região próxima à superfície, esta relação varia quando se considera a divergência dos raios acústicos no plano perpendicular, seguindo a forma  $A \sim r^{-1}$ .

Pode-se concluir com estas relações que a onda acústica apresenta maior atenuação em regiões próximas à superfície do meio, confirmando o fato de que a onda acústica é pouco sensível à rugosidade e outros defeitos superficiais.

De acordo com Basatskaya e Ermolov (1980, 1985), a sensibilidade de um feixe de ondas longitudinais refratadas pode ser caracterizada pelo campo acústico por elas gerado. A máxima sensibilidade de um feixe de ondas longitudinais está localizada no ângulo onde a amplitude de deslocamento é máxima. Quando o feixe acústico incide sobre a interface de um corpo de aço,

com freqüência de 1,8 MHz e inclinação igual ao primeiro ângulo crítico, o ângulo de amplitude máxima é de  $72^{\circ}$  (Figura 2.17). Grande parte da energia de radiação da onda acústica se concentra no lóbulo principal do padrão do campo acústico.



Figura 2.17 Padrão de radiação de um feixe incidindo com inclinação igual ao primeiro ângulo crítico (f = 1,8 MHz, D = 18 mm)

De acordo com a Figura 2.17, a amplitude na superfície é 20 dB menor do que a amplitude máxima, confirmando a baixa sensibilidade da onda longitudinal na superfície do material inspecionado.

Quando se diminui o ângulo de inclinação do feixe sônico em relação ao primeiro ângulo crítico, o lóbulo principal apresenta um aumento em sua largura angular e o ângulo de máxima amplitude aumenta em relação à interface. No aumento do ângulo de incidência, o número de lóbulos laterais do campo acústico aumenta, diminuindo a largura do lóbulo principal. Neste caso, a amplitude máxima já não se localiza no lóbulo principal, e sim em um dos lóbulos laterais (Figura 2.18). O ângulo onde a amplitude de deslocamento é máxima se aproxima da interface, ocorrendo em conjunto com um aumento nas amplitudes dos lóbulos laterais.



Figura 2.18: Padrão de radiação de um feixe incidindo com inclinação maior do que o primeiro ângulo crítico (f = 1,8 MHz, D = 18 mm)

Uma relação entre o ângulo de inclinação do feixe acústico, o ângulo de máxima amplitude e a atenuação da amplitude do deslocamento pode ser observada na Figura 2.19. Quando se aumenta o ângulo de inclinação do feixe sônico até aproximadamente  $33^{\circ}$ , o ângulo de amplitude máxima também aumenta, porém, para inclinações maiores que  $33^{\circ}$  o aumento de v<sub>max</sub> ocorre de forma mais lenta. Por outro lado, com o aumento no ângulo de inclinação  $\theta$ , a amplitude contida no lóbulo principal decresce rapidamente. No gráfico da Figura 2.19 A é a amplitude, v<sub>max</sub> é o ângulo em relação à superfície onde o lóbulo apresenta máxima amplitude e  $\theta$  é o ângulo entre a normal do transdutor e a superfície do meio inspecionado.



Figura 2.19: Relação entre a atenuação da amplitude do lóbulo principal, seu respectivo ângulo e a inclinação do feixe acústico.

A forma mais prática de se variar a direção de máxima sensibilidade a defeitos subsuperficiais é variar a freqüência ou o diâmetro do transdutor piezoelétrico (para transdutores cilíndricos). Com o aumento destes dois parâmetros, o ângulo de máxima amplitude se aproxima a  $90^{\circ}$  com uma variação da amplitude máxima não mais do que 10 dB (Figura 0.20).



Figura 0.20: Dependência do ângulo de máxima amplitude em relação ao produto entre a freqüência e o diâmetro do transdutor piezoelétrico.

Este estudo traz importantes conclusões referentes aos parâmetros que influenciam na sensibilidade das ondas longitudinais superficiais e sub-superficiais. Tanto o aumento da freqüência quanto o aumento das dimensões do cristal piezoelétrico do transdutor fazem com que as ondas logitudinais apresentem maior sensibilidade em regiões mais próximas a superfície.

### 2.7.3 Profundidade de penetração de uma onda sub-superficial

A profundidade de penetração de uma onda longitudinal sub-superficial está diretamente ligada à sua sensibilidade em relação às falhas próximas a superficie do material. Recentemente Ya *et al* (2004) e Belahcene e Lu (2002) realizaram estudos sobre a profundidade de penetração, nos quais foi constatado que a onda sub-superficial apresenta uma penetração igual a um comprimento de onda. Os estudos confirmam que o aumento da freqüência natural do transdutor (diminuição do comprimento de onda) faz com que a profundidade de máxima sensibilidade decresça (penetração). Com seus estudos, outros autores como Sajauskas (2004) e Yuzonene (1981) acreditam que a profundidade de penetração de uma onda sub-superficial se encontra entre um e dois comprimentos de onda.

### 2.8 Revisão Bibliográfica

Formulações matemáticas e trabalhos experimentais sobre as ondas  $L_{cr}$  foram desenvolvidos em grande quantidade entre a segunda metade da década de 1970 e a primeira metade da década de 1980. Basatskaya *et tal* (1978) realizaram estudos nos quais foram caracterizados os sinais originários dos diversos tipos de onda gerados na excitação de ondas  $L_{cr}$ . Transdutores ultra-sônicos foram dispostos em amostra de material com dimensões especificadas e a partir deles foram medidas as amplitudes dos sinais dos diversos tipos de ondas gerados. Conclusões importantes sobre a variação do sinal em relação à distância da superfície do material e a forma como os diversos tipos de onda se propagam dentro do material foram obtidas. Até hoje estes estudos servem de base para as pesquisas que avaliam o comportamento das ondas  $L_{cr}$  em diferentes pontos na região sub-superficial do material.

Couchman e Bell (1978) realizaram trabalho experimental com o objetivo de detectar e caracterizar as ondas superficiais geradas por transdutores inclinados próximos ao primeiro ângulo crítico de refração, em peças de alumínio, com a técnica de imersão. O ângulo de incidência dos feixes de ondas ultra-sônicas foi variado com valores próximos ao primeiro ângulo crítico. Para cada valor de inclinação foram medidos os tempos de percurso, juntamente com as suas respectivas amplitudes de chegada. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que com o aumento da distância entre os transdutores, a amplitude do sinal decai. Outro fator que contribui com a diminuição da amplitude é um aumento no ângulo de inclinação do transdutor em relação ao primeiro ângulo crítico. As amplitudes obtidas com as ondas superficiais são duas vezes menores do que as obtidas na excitação de pseudo-ondas de Rayleigh. As ondas superficiais também apresentam menor atenuação em relação às estas últimas.

Ermolov e Razygraev (1979) realizaram experimentos nos quais foram medidas as atenuações das ondas longitudinais criticamente refratadas para diversas distâncias entre os transdutores emissor e receptor. Os resultados obtidos neste estudo indicam que quando a onda  $L_{cr}$  se propaga na interface de um sistema formado pelo material inspecionado e água em contato, a amplitude do sinal recebido decresce mais rapidamente quando se comparado com um sistema composto pelo material em contato direto com o ar. Isto pode ser explicado pela capacidade da água de formar ondas laterais em seu interior, as quais carregam em si grande quantidade de energia. No caso do ar em contato com o material, a energia contida na onda lateral excitada no ar carrega uma quantidade de energia desprezível, fazendo com que a atenuação seja menor. Outra conclusão importante é relação direta entre a formação de ondas laterais (no material inspecionado e no meio em contato) e a rápida atenuação da onda  $L_{cr}$ .

Continuando os estudos sobre a sensibilidade de uma onda longitudinal criticamente refratada, Basatskaya e Ermolov (1985) tiraram importantes conclusões sobre o campo acústico de transdutores angulares com inclinação próxima aos ângulos críticos de refração. Vários métodos (teóricos e experimentais) utilizados na caracterização de padrões acústicos de ondas transversais foram comparados e apresentaram resultados semelhantes. Nestes estudos pôde-se constatar que, para ângulos de inclinação maiores que o primeiro ângulo critico, ondas longitudinais podem ser geradas, apesar de a amplitude máxima de deslocamento decair mais

rapidamente para valores de inclinação sub-criticos. Este comportamento, observado nas ondas longitudinais sub-superficiais, é semelhante ao comportamento reconhecido nas ondas transversais que se propagam na região próxima a superfície. Outra conclusão importante tirada neste trabalho foi a relação entre a inclinação do eixo acústico em relação à superfície e as amplitudes de deslocamento das ondas longitudinais e transversais próximas a superfície. No caso das ondas transversais, a amplitude de deslocamento é máxima para inclinação igual ao segundo ângulo critico. Isto não se repete para as ondas longitudinais, onde a máxima amplitude ocorre para uma inclinação maior do que o primeiro ângulo critico.

Bray *et al* (1996) realizaram estudo no qual foram mapeados os níveis de tensões residuais contidos em um disco de turbina a vapor utilizando a excitação de ondas  $L_{cr}$ . Neste trabalho foi mencionado que a profundidade de penetração de uma onda longitudinal criticamente refratada é igual ao seu comprimento de onda.

Ortega em sua tese de doutorado, no ano de 2001, desenvolveu um método de medição de tensões residuais por ultra-som baseado no ângulo de refração. Através da utilização de ondas de incidência obliqua, o autor mostrou a mudança de velocidade em relação a vários ângulos de refração. Ortega destaca duas grandes vantagens desse método. Primeiro, para a determinação da tensão residual não existe a necessidade do conhecimento prévio da espessura do material. E segundo, não é necessário a determinação das velocidades de propagação das ondas.

Caetano, Andrino e Santos, em 2002, determinaram a direção de laminação em aços API 5LX70 utilizando ondas ultra-sônicas cisalhantes. Para a análise experimental os autores utilizaram 8 barras com medidas de 760 x 70 x 10,8 mm. Para a medida dos tempos de percurso foi utilizado um arranjo construído pela empresa americana QMI. Este arranjo possui no mesmo suporte 4 sensores dispostos a  $90^{\circ}$ .

Dois tipos de experimentos foram realizados pelos autores para a determinação do sentido de laminação. Primeiro, o transdutor de ondas cisalhantes foi colocado no corpo de prova de modo que os sensores ficassem alinhados em relação às direções principais de tensão, ou seja, um sensor estaria perpendicular em relação ao maior comprimento da barra, e o outro sensor

perpendicular a este formando um ângulo de 90°. Como resultados, Caetano, Andrino e Santos obtiveram que 3 barras extraídas de uma chapa apresentaram sentido de laminação longitudinal, e as outras duas barras apresentaram sentido de laminação transversal. Os resultados foram coerentes com a informação dada pelo fabricante das peças. Para as barras restantes da outra chapa, os resultados foram similares, mostrando que duas barras estavam no sentido de laminação longitudinal e a outra no sentido transversal.

O segundo experimento foi realizado para a avaliação da uniformidade da variação do tempo de percurso. O mesmo arranjo utilizado para a verificação do sentido de laminação foi utilizado. Diferentemente do ensaio anterior, não foram medidos apenas os tempos de percurso nas direções das tensões principais, para 0° e 90°. Para os ângulos de 30° e 150°, e 60° e 120°, os tempos de percurso foram praticamente os mesmos.

Andrino, Caetano e Santos, em 2002, utilizaram a técnica ultra-sônica para a determinação de tensões mecânicas em uma liga de alumínio estrutural 7050. Os corpos de prova utilizados neste experimento tinham dimensões de 760 x 70 x 12,7 mm. Dois experimentos foram realizados. No primeiro foram investigadas a variação do tempo de percurso da onda com a direção de laminação. Para o segundo experimento foi determinada a constante acustoelástica para uma posterior determinação das tensões residuais em chapas de alumínio.

No primeiro caso foi utilizada a técnica da birefringência acústica, baseada em ondas cisalhantes. Para a determinação dos tempos de percurso foi utilizado um sensor Panametrics V-154, ligado através de cabos coaxiais a um excitador-receptor de pulsos da marca Panametrics, modelo 5072 PR. Para a leitura dos tempos de percurso esta aparelhagem estava ligada a um computador IBM PC com uma placa National Instruments, modelo 5911. Os autores puderam observar, através dos resultados, que o tempo de percurso foi menor na direção longitudinal. Assim, a velocidade é maior nessa direção e é menor na direção transversal, confirmando a literatura disponível.

No segundo caso foram determinadas as constantes acustoelásticas (C<sub>a</sub>) através de ondas transversais. Para esta determinação foi construído um sistema para aplicação de cargas em

barras e foi levantada a correlação entre as tensões aplicadas e a variação do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas.

Santos, Bray, Andrino e Caetano, em 2003, mostraram resultados dos perfis de tensão residual longitudinal para aços API 5L X70 usados em oleodutos e gasodutos. Os autores utilizaram para este levantamento ondas longitudinais criticamente refratadas (L<sub>cr</sub>). Dez conjuntos soldados foram analisados, sendo cinco na direção longitudinal e outros cinco na direção transversal. Os resultados mostraram-se satisfatórios, apresentando na região da solda tensões de tração e em regiões vizinhas e distantes do cordão de tensões de menor magnitude. Os resultados mostraram excelente concordância com o perfil de tensões esperado.

Belahcene e Lu (2002) desenvolveram estudo no qual a profundidade de penetração de uma onda longitudinal criticamente refratada correspondeu a aproximadamente um comprimento de onda. Para isto foram utilizados transdutores piezoelétricos com freqüências de 2,25; 3,2; 5; 6,6 e 10 MHz. Para cada medição foram utilizados três transdutores do mesmo modelo (um transmissor e dois receptores), responsáveis pela medição do tempo de percurso da onda longitudinal criticamente refratada. O corpo de prova utilizado apresentou onze rasgos em seu interior, com profundidade de 0,5 a 9,5 mm. Os rasgos têm a função de delimitar o quanto a onda Lcr penetra no material ensaiado.

Em mais um trabalho, Santos, Bray e Caetano, em 2003, mostraram os resultados das constantes acustoelásticas para o alumínio 7050. Utilizaram-se ondas longitudinais criticamente refratadas para este levantamento. Os resultados mostraram total concordância com a literatura disponível.

Baby *et al* (2003) realizou estudo no qual o foco principal foi a detecção de falhas em tubulações soldadas utilizando ondas Lcr. Uma das principais causas de falhas em tubulações é a corrosão causada pela presença de hidrogênio. As falhas desta natureza se situam em uma região que se limita a  $\pm 5$  mm do eixo de solda do duto. A utilização de ondas cisalhantes convencionais muitas vezes não possibilita a detecção deste tipo de falha. Assim, foi proposta uma técnica de inspeção utilizando ondas Lcr. Diferentemente de outras técnicas nas quais a idéia

principal é a utilização de ondas Lcr que se propagam em regiões próximas as superfícies, a técnica proposta neste trabalho utiliza ondas longitudinais secundárias (criadas na superfície inferior do material) para a detecção de falhas que se localizam próximas ao diâmetro da superfície interior dos dutos. Os resultados apresentados por este estudo demonstraram que a utilização da onda longitudinal secundária foi eficaz na detecção de falhas próximas à superfície inferior dos tubos, evitando ecos de interferência de defeitos geométricos contidos na tubulação.

A determinação da freqüência de operação de transdutores pulso-eco é de grande importância em ensaios não destrutivos, uma vez que esta freqüência é utilizada na construção de diagramas ADD (amplitude/distância/diâmetro) de transdutores. Danilov *et al* (2002) realizaram estudo no qual discutem as possibilidades de se utilizar o modelo para determinar a freqüência de transdutores inclinados com base em investigações experimentais e simulações computacionais.

Ya *et al* (2004) realizaram um estudo no qual as tensões residuais em placas de alumínio soldadas à laser foram avaliadas utilizando técnica ultra-sônica juntamente com métodos convencionais. A distribuição não-uniforme de tensões residuais na direção transversal ao material soldado foi obtida utilizando-se a propagação de ondas Lcr ao longo do corpo de prova. A distribuição não-uniforme de tensões perpendicular à linha de solda e em relação à profundidade do material foi obtida utilizando-se a técnica de perfuração. Neste trabalho pôde-se constatar que tanto a técnica ultra-sônica quanto o método óptico são bons instrumentos de avaliação de tensões residuais, sendo o método ultra-sônico mais indicado, pois não demanda a destruição parcial do material analisado.

Razygraev (2004) realizou um importante trabalho sobre a física das ondas geradas a partir da onda longitudinal criticamente refratada. Primeiramente foram reconhecidas as diferentes ondas que se propagam no interior do material inspecionado: onda de retorno, ondas laterais transversais, ondas laterais longitudinais, onda longitudinal superficial, onda longitudinal superficial inferior. Após esta etapa, alguns problemas relacionados à inspeção ultra-sônica foram levantados, juntamente com a importância da física das ondas excitadas na resolução dos mesmos. Problemas relacionados a amplitude do sinal de retorno em relação à altura e largura de segmentos e incisões, além do decaimento do sinal de retorno de uma onda longitudinal incidente sobre falhas ou fraturas planas e orientadas ao longo da direção de propagação do ultra-som, foram os principais fatores descritos e resolvidos com o conhecimento da física das ondas excitadas a partir da onda Lcr.

Algumas questões importantes e paradoxais sobre a fisica de técnicas ultra-sônicas foram levantadas por Ermolov (2005). Questões relacionadas à queda e aumento de sinal em situações peculiares, transmissão de ondas ultra-sônicas em camadas de ar, comportamento de pulsos sonoros em camadas de óleo, atenuação de ondas longitudinais criticamente refratadas, entre outras, foram tratadas neste trabalho. Quanto à atenuação de ondas Lcr, quando se aumenta a distância entre os transdutores angulares (transmissor e receptor), o sinal recebido apresenta uma leve queda de amplitude. Esta situação de geração e transmissão de ondas Lcr foi repetida em um material no qual foi depositada uma camada espessa de aço austenítico, responsável por um decaimento mais rápido do sinal com o aumento da distancia entre os transdutores. Quando uma onda Lcr é excitada na superfície superior do sólido, as ondas laterais transversais geradas em cada ponto da superfície incidem sobre a superfície inferior do sólido com um valor igual ao terceiro ângulo critico, excitando uma onda longitudinal que se propaga próxima à superfície inferior do sólido. Esta onda secundária gera outras ondas laterais transversais que partem da superfície inferior, fazendo com que a amplitude do sinal recebido pelo receptor não seja tão pequena. Quando se coloca uma camada de material postada na superfície inferior, parte das ondas laterais é refratada no interior do deste material, evitando a formação de uma onda longitudinal secundária e consequentemente impossibilitando a formação de ondas laterais que partem da superfície inferior. Sem estas ondas laterais, o sinal chega ao receptor com menos amplitude, fazendo com que a atenuação seja maior com o aumento da distância entre os transdutores.

Hayashi *et al* (2005) propôs uma maneira de analisar ondas acústicas excitadas em barras com secções arbitrárias. Neste estudo foram utilizadas ondas guiadas (guided waves), excitadas em barras com secção quadrada e do tipo "I" (as mesmas utilizadas nos trilhos das estradas de ferro). Para a caracterização de falhas e defeitos nestes tipos de barras foi utilizado o método dos elementos finitos semi-analítico (SAFEM). Os resultados obtidos neste estudo mostram que a

utilização de análise estrutural na avaliação de ondas guiadas é possível para materiais com diferentes geometrias.

Ermolov *et al* (2005) propôs uma técnica alternativa para se testar a capacidade de inspeção de soldas austeníticas, além de segregar a sensibilidade em objetos testados, responsável pelos ruídos que deterioram a inspeção de materiais. A técnica proposta consiste na excitação de ondas ultra-sônicas no material dos corpos unidos pela solda (fora da região de solda) e posteriormente excitar pulsos sonoros na região do corpo que contém a união soldada. Subtraindo-se as amplitudes dos sinais obtidos no segundo e primeiro casos respectivamente, obtém-se a atenuação que caracteriza a inspeção. A atenuação obtida neste processo permite calcular a constante de atenuação  $\delta_w$ , que pode ser utilizada como uma correção do processo de inspeção nas demais regiões inspecionadas no material soldado. As condições de teste precisam ser bem controladas para que não ocorram erros na correção. A principal vantagem desta metodologia é a ausência de necessidade de confecção de falhas artificiais, necessárias em outros tipos de teste.

Técnicas ultra-sônicas voltadas para a avaliação de tensões residuais têm sido largamente empregadas nos últimos vinte anos. Santos *et al* (2005) realizaram estudos no qual foram utilizados pulsos ultra-sônicos na avaliação da relaxação de tensões residuais em tubulações de aço API 5LX70. Neste trabalho foram utilizadas placas com direções de laminação orientadas no sentido longitudinal e transversal, além de apresentarem cortes verticais e horizontais realizados para receberem a solda. Primeiramente as placas foram usinadas e posteriormente as tensões foram aliviadas mediante aquecimento e resfriamento. Em seguida as placas foram soldadas e tiveram seus parâmetros de soldagem controlados. Medições de tensão utilizando ondas ultra-sônicas criticamente refratadas foram realizadas logo após a soldagem e em seguida outros cortes foram feitos no local onde as placas foram soldadas. Os tempos de corte e de solda foram rigorosamente medidos para se controlar os parâmetros que influenciam no processo. Os resultados obtidos indicam que a técnica de medição de tensões residuais utilizando-se ondas L<sub>cr</sub> é eficiente na identificação de variações de tensão neste aço, além de poder ser utilizada em outros tipos de materiais semelhantes.

# Capítulo 3

## Modelagem Teórica

A teoria desenvolvida por Yuzonene (1981) e relembrada por Sajauskas (2004) indica que a profundidade de penetração de uma onda longitudinal criticamente refratada está diretamente ligada à profundidade na qual os deslocamentos longitudinal e transversal da onda  $L_{cr}$  se tornam muito pequenos em relação aos seus valores próximos à superfície livre do material inspecionado. Grande parte da teoria não é exposta de forma integral nos trabalhos destes autores e tiveram que ser novamente deduzidas neste trabalho, de forma mais detalhada. Este capítulo tem por objetivo resgatar a teoria de ambos os autores, em detalhes, além de aplicá-la, de forma inédita, ao Aço API 5L X70.

## Estudo da profundidade de penetração das ondas L<sub>cr</sub> baseado no deslocamento

A Figura 3.1 apresenta o sistema de coordenadas utilizado na modelagem matemática:



Figura 3.1: Sistema de coordenadas utilizado na modelagem

Para uma onda superficial que se propaga ao longo da interface entre o corpo sólido e o ar, as condições de contorno a serem satisfeitas são :

$$\sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{zz} = 0$$
 (3.1)

As tensões atuantes no sólido podem ser definidas por:

$$\sigma_{xx} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right)$$
  

$$\sigma_{zz} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial^2 z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right)$$
  

$$\sigma_{xz} = \mu \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 z} \right)$$
(3.2)

Nas expressões 3.1 e 3.2,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xz}$  e  $\sigma_{zz}$  são as tensões atuantes no meio,  $\psi \in \varphi$  são os potenciais transversal e longitudinal e  $\lambda \in \mu$  são as constantes de Lamé. De acordo com Sajauskas (2004) os potenciais referentes às parcelas longitudinal e transversal podem ser definidor por:

$$\varphi = A \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$
  

$$\psi = B \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(3.3)

Na expressão 3.3, as constantes  $k_L e k_T$  são os números das ondas longitudinal e transversal respectivamente, sendo estes definidos por:

$$k_{L} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)}} = \frac{\omega}{c_{L}}$$

$$k_{T} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \frac{\omega}{c_{T}}$$
(3.4)

Onde  $c_L$  e  $c_T$  são as velocidades das ondas longitudinal e transversal respectivamente e  $\omega$  é a freqüência angular, a qual se encontra no intervalo definido por  $k_L < k < k_T$ .

Substituindo os potenciais (3.3) na expressão  $\sigma_{xz} = 0$ , pode-se obter uma relação entre as amplitudes *A* e *B*:

$$\mu \left( 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 z} \right) = 0$$
(3.5)

$$-2Aik\sqrt{k^2 - k_L^2} - Bk^2 + B(k_T^2 - k^2) = 0$$
(3.6)

$$\frac{A}{B} = \frac{\left(k_T^2 - 2k^2\right)}{2ki\sqrt{k^2 - k_L^2}}$$
(3.7)

Depois de encontrada a relação entre as constantes  $A \in B$ , deve-se desenvolver as expressões (3.8) utilizando-se as expressões (3.3):

$$U = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

$$W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x}$$
(3.8)

Substituindo (3.3) e (3.7) em (3.8), tem-se para  $U \in W$ :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = Aik \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -A\sqrt{k^2 - k_L^2} \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = Bik \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = Bi\sqrt{k_T^2 - k^2} \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$U = Aik \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right] - Bi\sqrt{k_T^2 - k^2} \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$W = -A\sqrt{k^2 - k_L^2} \exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z + i(kx - \omega t)\right] + Bik \exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(3.10)

$$U = Aki \exp\left[-\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}z + i(kx - \omega t)\right] + \frac{2Ak\sqrt{k_{T}^{2} - k^{2}}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{(k_{T}^{2} - 2k^{2})} \exp\left[i\sqrt{k_{T}^{2} - k}z + i(kx - \omega t)\right]$$

$$W = -A\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}} \exp\left[-\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}z + i(kx - \omega t)\right] - \frac{2Ak^{2}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{(k_{T}^{2} - 2k^{2})} \exp\left[i\sqrt{k_{T}^{2} - k^{2}}z + i(kx - \omega t)\right]$$
(3.11)

A análise do comportamento de W em relação à profundidade z, é facilitada com a divisão de W por  $W_0$ , onde  $W_0 = W(z = 0)$ . Sendo assim:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\exp\left[-\sqrt{k^2 - k_L^2}z\right] + \frac{2k^2}{\left(k_T^2 - 2k^2\right)}\exp\left[i\sqrt{k_T^2 - k^2}z\right]}{\left\{1 + \frac{2k^2}{\left(k_T^2 - 2k^2\right)}\right\}}$$
(3.12)

A avaliação do comportamento de U em relação à profundidade z, de forma semelhante à feita na equação 3.12, é:

$$\frac{U}{U_{0}} = \frac{i \exp\left[-\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}z\right] + \frac{2\sqrt{k_{T}^{2} - k^{2}}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{\left(k_{T}^{2} - 2k^{2}\right)} \exp\left[i\sqrt{k_{T}^{2} - k^{2}}z\right]}{\left\{i + \frac{2\sqrt{k_{T}^{2} - k^{2}}\sqrt{k^{2} - k_{L}^{2}}}{\left(k_{T}^{2} - 2k^{2}\right)}\right\}}$$
(3.13)

Um dos passos para o estudo do comportamento dos deslocamentos U e W em relação à profundidade z envolve a definição da equação de Rayleigh para as ondas longitudinais superficiais (os passos realizados até a equação de Rayleigh estão descritos no Capítulo 2). Para isto, deve-se substituir (3.3) em (3.2) obtendo-se um sistema de equações no qual a única solução diferente de zero é encontrada para um determinante igual a zero:

$$\begin{vmatrix} (2\bar{k}^2 - k_T^2) & (-2\bar{k}\sqrt{k_T^2 - \bar{k}^2}) \\ 2i\bar{k}\sqrt{\bar{k}^2 - k_L^2} & (2\bar{k}^2 - k_T^2) \end{vmatrix} = 0$$
(3.14)

O cálculo do determinante leva o sistema ao seguinte equacionamento:

$$(2\bar{k}^{2} - k_{T}^{2})(2\bar{k}^{2} - k_{T}^{2}) = (-2\bar{k}\sqrt{k_{T}^{2} - \bar{k}^{2}})(2\bar{k}i\sqrt{\bar{k}^{2} - k_{L}^{2}}) (4\bar{k}^{4} - 4k_{T}^{2}\bar{k}^{2} + k_{T}^{4}) = (-4\bar{k}^{2}i\sqrt{(k_{T}^{2} - \bar{k}^{2})(\bar{k}^{2} - k_{L}^{2})}) (4\bar{k}^{4} - 4k_{T}^{2}\bar{k}^{2} + k_{T}^{4})(4\bar{k}^{4} - 4k_{T}^{2}\bar{k}^{2} + k_{T}^{4}) = (-16\bar{k}^{4}((k_{T}^{2} - \bar{k}^{2})(\bar{k}^{2} - k_{L}^{2})))$$

$$16\bar{k}^{8} - 16\bar{k}^{6}k_{T}^{2} + 4\bar{k}^{4}k_{T}^{4} - 16\bar{k}^{6}k_{T}^{2} + 16\bar{k}^{4}k_{T}^{4} - 4\bar{k}^{2}k_{T}^{6} + 4\bar{k}^{4}k_{T}^{4} - 4\bar{k}^{2}k_{T}^{6} + k_{T}^{8} = (3.15)$$
$$-16\bar{k}^{6}k_{T}^{2} + 16\bar{k}^{4}k_{T}^{2}k_{L}^{2} + 16\bar{k}^{8} - 16\bar{k}^{6}k_{L}^{2}$$

Dividindo a expressão 3.15 por  $k_T^8$ :

$$16\frac{\bar{k}^{8}}{k_{T}^{8}} - 16\frac{\bar{k}^{6}}{k_{T}^{6}} + 4\frac{\bar{k}^{4}}{k_{T}^{4}} - 16\frac{\bar{k}^{6}}{k_{T}^{6}} + 16\frac{\bar{k}^{4}}{k_{T}^{4}} - 4\frac{\bar{k}^{2}}{k_{T}^{2}} + 4\frac{\bar{k}^{4}}{k_{T}^{4}} - 4\frac{\bar{k}^{2}}{k_{T}^{2}} + 1 = -16\frac{\bar{k}^{6}}{k_{T}^{6}} + 16\frac{\bar{k}^{4}k_{L}^{2}}{k_{T}^{6}} + 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} - 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}}{k_{T}^{6}} + 24\frac{\bar{k}^{4}}{k_{T}^{4}} - 8\frac{\bar{k}^{2}}{k_{T}^{2}} + 1 = 16\frac{\bar{k}^{4}k_{L}^{2}}{k_{T}^{6}} - 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{6}} - 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{6}} - 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{6}} - 16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{2}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{8}}{k_{T}^{8}} = -16\frac{\bar{k}^{6}k_{L}^{8$$

$$16\frac{\kappa}{k_T^6} \left(1 - \frac{\kappa_L}{k_T^2}\right) + 8\frac{\kappa}{k_T^4} \left(2\frac{\kappa_L}{k_T^2} - 3\right) + 8\frac{\kappa}{k_T^2} - 1 = 0$$
(3.16)

Sendo:

$$\overline{m} = \frac{\overline{k}}{k_T}$$

$$r = \frac{k_L}{k_T}$$
(3.17)

E substituindo-se (3.17) em (3.16), tem-se a seguinte equação de Rayleigh:

$$16(1-r^{2})\overline{m}^{6} + 8(2r^{2}-3)\overline{m}^{4} + 8\overline{m}^{2} - 1 = 0$$
(3.18)

Substituindo  $k_T$  e  $k_L$  por  $\overline{m}$  e r em 3.12 e 3.13:

$$\frac{\exp\left[-2\pi\sqrt{1-\left(\frac{r}{m}\right)^{2}}\frac{z}{\lambda_{l}}\right]+\frac{2}{\left(\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-2\right)}\exp\left[i2\pi\sqrt{\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-1}\frac{z}{\lambda_{l}}\right]}{\left\{1+\frac{2}{\left(\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-2\right)}\right\}}$$

$$(3.19)$$

$$\frac{U}{U_{0}}=\frac{i\exp\left[-2\pi\sqrt{1-\left(\frac{r}{m}\right)^{2}}\frac{z}{\lambda_{l}}\right]+\frac{2\sqrt{\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-1}\sqrt{1-\left(\frac{r}{m}\right)^{2}}}{\left(\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-2\right)}\exp\left[i2\pi\sqrt{\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-1}\frac{z}{\lambda_{l}}\right]}{\left(\left(\frac{1}{m}\right)^{2}-2\right)}$$

$$(3.20)$$

Em ambos os casos  $\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda_l}$ . Sendo  $\bar{k}$  o número de onda e,  $\lambda_l$  o comprimento da onda.

Os comportamentos de U/U<sub>0</sub> e W/W<sub>0</sub> dependem das raízes do polinômio (3.18). Por outro lado, as raízes da equação de Rayleigh dependem das propriedades do material a ser inspecionado (principalmente do coeficiente de Poisson). O material utilizado neste trabalho é o aço API 5LX70 ( $v_{aço} = 0,3$ ). Para materiais que apresentam o coeficiente de Poisson dentro do intervalo 0,26 <  $v \le 0,45$ , quatro das seis raízes obtidas pela equação de Rayleigh são números complexos conjugados e as outras duas raízes obtidas são números reais com sinais opostos. Para materiais com coeficiente de Poisson 0,045 ≤ v < 0,26 todas as seis raízes obtidas são números reais (três pares com valores inversos). De acordo com Yuzonene (1981), as raízes reais obtidas para os materiais com 0,26 <  $v \le 0,45$  representam as ondas superficiais de Rayleigh, enquanto que as

raízes complexas representam as ondas longitudinais superficiais. As raízes complexas  $\underline{m}$ , obtidas pela equação de Rayleigh, devem ser escolhidas de tal forma que quando substituídas nas expressões 3.19 e 3.20 façam com que as amplitudes dos deslocamentos caiam em relação à profundidade  $\underline{z}$ . O aço API 5L X70 apresentou as raízes expostas na Tabela 3.1 :

Material	Poisson (v)	r	raizes
Aço API 5LX70	0,29	0,403473292	-0,4966+0,1041*i
			-0,4966-0,1041*i
			0,4966+0,1041*i
			0,4966-0,1041*i
			-1,0609
			1,0609

Tabela 3.1 Raízes do polinômio característico para os dois materiais utilizados

As raízes escolhidas para representarem as ondas longitudinais apresentam parte real positiva e parte imaginária negativa (ou vice versa). Os deslocamentos apresentados pela onda longitudinal superficial foram simulados utilizando-se o programa MATLAB R12 (os códigos estão no Anexo A.1). Os resultados obtidos para o Aço API 5L X70 podem ser observados na Figura 3.2:



Figura 3.2: Deslocamentos da onda longitudinal superficial (Aço API 5LX70)

Observando-se a Figura 3.2 pode-se perceber que para o Aço API 5LX70 as magnitudes dos deslocamentos tendem a serem muito pequenas para  $z/\lambda_l \ge 1$ , onde  $\lambda_l$  é o comprimento de onda. Isto significa que para profundidades próximas a  $\lambda_l$  os deslocamentos são consideráveis, sendo este o limite de penetração de ondas longitudinais sub-superficiais. Pode-se observar também que o valor máximo da função W/W<sub>0</sub> se encontra na superfície. No caso da função U/U<sub>0</sub>, para o aço API 5L X70, o máximo se encontra em  $z/\lambda_l \cong 0,022$ .

## Capítulo 4

# Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta os materiais das amostras metálicas utilizadas na parte experimental, bem como suas dimensões e propriedades. Em seguida, são descritos todos os equipamentos utilizados nos ensaios de medição por ultra-som (sistemas de aquisição, posicionamento, emissão e recepção de pulsos sonoros). Finalmente, as estratégias utilizadas na obtenção do padrão de repetibilidade e na avaliação da profundidade de penetração das ondas L<sub>cr</sub> são expostas de forma detalhada. Toda a atividade experimental foi realizada no laboratório de estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI).

## 4.1 Materiais utilizados

Para os ensaios ultra-sônicos foi utilizado o Aço API 5LX70, utilizado na construção de dutos. Para o estudo de constatação da profundidade de penetração das ondas Lcr foram confeccionadas cinco amostras teste de material. A composição química e algumas das principais propriedades do aço estão descritas na Tabela 4.1:

Aço API 5L X70						
Componente	Massa (%)	Componente	Massa (%)	Componente	Massa (%)	
Si	0,339	Ti	0,001	Mn	1,529	
Р	0,01	Ni	0,02	S	0,0004	
AI	0,031	Са	0,0013	Cu	0,017	
Nb	0,043	В	0,0001	V	0,059	
Cr	0,02	Мо	0,001	С	0,069	
Densidade	7,85 g/cc					
Dureza Brinell	174 - 223					
Módulo de Elasticidade	205 Gpa					
Coef de Poisson	0,29					
Módulo de Cisalhamento	80 Gpa					

Tabela 4.1: Propriedades dos materiais (Andrino 2003 e www.matweb.com)

## 4.2 Geometria das amostras

As amostras de aço utilizadas no experimento apresentam uma geometria retangular. Ao todo foram utilizadas seis amostras de aço, sendo cinco pertencentes ao mesmo lote. As cinco amostras apresentam a mesma geometria mostrada na Figura 4.1 e a amostra restante difere das outras apenas na espessura (8 mm ao invés de 10mm).



Figura 4.1: Representação geométrica das barras de Aço API 5L X70

## 4.3 Equipamentos utilizados

O conjunto utilizado na avaliação da sensiblidade das ondas  $L_{cr}$  é composto por equipamentos responsáveis pelo posicionamento dos transdutores no material, além do sistema de aquisição de dados, de geração de ondas acústicas e de fixação do material em uma posição fixa e apropriada. Serão descritos de forma detalhada todos os sistemas utilizados nos ensaios de sensibilidade.

#### 4.3.1 Transdutores e sapatas

A emissão e recepção dos pulsos ultra-sônicos demandam a utilização de transdutores piezoelétricos (de freqüências conhecidas) organizados de acordo com o esquema representado pela Figura 4.2:



Figura 4.2: Representação esquemática dos transdutores montados para a emissão e recepção de ondas L<sub>cr</sub> – Conjunto de transdução

Para a geração e recepção de ondas  $L_{cr}$  os transdutores devem estar inclinados em relação à superfície do material inspecionado, obedecendo a Lei de Snell. Para isto, são utilizadas sapatas de acrílico, responsáveis pela inclinação e contato do transdutor com o metal. Para o aço, o ângulo de inclinação deve ser de 28° aproximadamente, pois este valor é definido de acordo com o primeiro ângulo crítico. Os transdutores que serão utilizados são da marca PANAMETRICS, com freqüências de 2,25; 3,5 e 5,0 MHz.

As leituras de tensão obtidas a partir de técnica ultra-sônica apresentam grande sensibilidade quando se considera a relação entre a tensão aplicada no material e o tempo de percurso da onda Lcr. Qualquer variação nas tensões atuantes sobre o material inspecionado pode trazer grandes variações mensuráveis nos tempos obtidos, portanto, torna-se necessário o controle das tensões às quais as amostras de materiais estão submetidas. Uma das principais fontes de variação é a força aplicada sobre as sapatas, quando estas são posicionadas nas amostras. Esta força deve apresentar a mínima variação possível, pois se uma carga maior do que o usual for aplicada nas sapatas, a amostra de material tende a flexionar e causar variações nos tempos de percurso obtidos. Além disso, o próprio conjunto de transdução pode fletir, causando variação na distância entre os transdutores e, conseqüentemente, no tempo de percurso.

Os transdutores utilizados para a avaliação da sensibilidade das ondas  $L_{cr}$  são do tipo angular padrão "*Standard Angle Beam Transducer*" (Figura 4.3). Estes transdutores apresentam elemento piezoelétrico de dimensões elevadas, comparado com elementos de outras classes de transdutores (13 x 25mm). A Figura 4.4 representa os transdutores piezoelétricos em diferentes perspectivas. Segue-se uma tabela (Tabela 4.2) dos modelos de transdutores usados juntamente com as dimensões dos mesmos:

Frequência	Série	Dimensões do cristal
2.25	A403S-SB	
3.5	A412S-SB	13 x 25 mm
5.0	A405S-SB	

Tabela 4.2: Especificações dos transdutores angulares



Figura 4.3: Dimensões dos transdutores angulares em polegadas (Panametrics , 2004)



Figura 4.4: Fotos dos transdutores angulares

## 4.3.2 Sistema de posicionamento dos transdutores nas amostras

A técnica de medição de tensões residuais utilizando ondas Lcr apresenta extrema sensibilidade em relação a temperatura, posição de medição, pressão de contato entre sapata e material e esforços externos atuantes na própria barra. Todas estas fontes de sensibilidade devem ser controladas, para que não surjam respostas não esperadas no material inspecionado em termo dos tempos de percurso medidos. Para se iniciar o processo de avaliação da profundidade de penetração de uma onda Lcr em um dado material, deve-se inspecionar todas as regiões do material estudado para que se identifique qualquer variação de distribuição de tensões nas regiões inspecionadas. Para eliminar grande parte das incertezas, as medições dos tempos de percurso das ondas Lcr devem ser executadas sob temperaturas bem controladas, com tensões externas comportadas e conhecidas, além de um rigoroso controle sobre a posição de colocação das sapatas no material inspecionado. No caso deste estudo, a ausência de tensão de tração aplicada nas extremidades dos corpos de prova diminuem as incertezas relacionadas às forças externas. A posição das sapatas deve ser controlada. Para isto foi utilizado um sistema de posicionamento das sapatas acionado por um pistão pneumático FESTO com pressão máxima de 10 bar/145psi (Figura 4.5).



Figura 4.5: Pistão pneumático responsável pela força de aplicação das sapatas no material inspecionado.
O pistão pneumático é colocado em uma estrutura de aço (Figura 4.6), que serve como estrutura de apoio.



Figura 4.6: Estrutura de aço utilizada no posicionamento das sapatas dos transdutores no material inspecionado.

A estrutura de sustentação dos transdutores é fixada em uma bancada de testes para que a vibração ocasionada pelo posicionador seja amortecida, mantendo a posição da sapata o mais próximo da posição anterior.

## 4.3.3 Sistema de geração e recepção de pulsos ultra-sônicos

A geração e recepção dos pulsos ultra-sônicos podem ser realizadas utilizando-se um excitador-receptor de pulsos, modelo 5072 PR da Panametrics. O transdutor receptor recebe os pulsos oriundos do equipamento mediante um cabo coaxial do tipo BCN. O emissor normalmente é acoplado ao conector T/R, situado na parte frontal do aparelho. O receptor, por sua vez, é conectado à saída R, também localizada no painel frontal. Na parte traseira do aparelho situam-se três saídas (RF OUT, EXT TRIG IN e SYNC OUT), responsáveis pela transferência dos sinais do equipamento para o sistema de aquisição de dados. Normalmente, conecta-se a saída RF OUT ao canal 1 da placa de aquisição de dados para que estes sejam digitalizados. Assim como na

situação anterior, também são utilizados cabos do tipo BCN para a conexão com a placa de aquisição. A aquisição de dados também depende da sincronização do sinal, que é obtida ligandose a saída SYNC OUT com a entrada PRF1 da placa de aquisição, mediante um plug SMB (Figura 4.7)



Figura 4.7: Representação do sistema de geração e aquisição de dados de ondas Lcr

## 4.3.4 Equipamentos e programa de aquisição de dados

Andrino (2003) desenvolveu um programa de aquisição de dados utilizado para calcular tensões em componentes mecânicos através da medição do tempo de percurso de ondas  $L_{cr}$ , utilizado acustoelasticidade. O programa foi desenvolvido a partir da plataforma gráfica de programação Labview V.6.i da National Instruments. Apesar de ter sido desenvolvido para calcular tensões, este programa será utilizado apenas para a medição do tempo de percurso no mapeamento das amostras metálicas e na obtenção do formato das ondas sonoras. Para a aquisição dos dados no micro-computador, foi utilizada uma placa de aquisição de dados NI 5911, que possui trigger interno e externo e taxa de aquisição de 100 MHz, com um canal.

O programa desenvolvido em Lab-View, L-Stress V1.0, é composto por cinco ambientes. O primeiro deles é responsável pelos dados iniciais que serão inseridos. Por exemplo, as propriedades do material e suas dimensões. A tela principal do programa (que é semelhante a um osciloscópio) está representada na Figura 4.8.



Figura 4.8: Tela do programa de aquisição de dados

A técnica utilizada para a medição do tempo de percurso consiste na medição do tempo decorrido entre disparo inicial de pulsos ultra-sônicos (executado pelo transdutor emissor) e o recebimento destes pulsos (transdutor receptor) . O trem de pulsos recebido pelo receptor apresenta vários "picos" e "vales" (valores máximos e mínimos) e o tempo de percurso é considerado como o tempo decorrido entre o momento da emissão e o segundo cruzamento do trem de pulsos com a linha zero (Figura 4.9).



Figura 4.9: Trem de ondas

O programa desenvolvido realiza a leitura instantânea dos trens de ondas. O programa é capaz de captar várias ondas em cada medição. Ao todo são computadas dez ondas a partir das quais é calculada uma média simples. Uma interpolação de dados é executada para cada onda, para que se obtenha de forma exata o tempo de percurso da onda  $L_{cr}$ . Esta interpolação se torna necessária pois a freqüência de amostragem da placa é de 100 MHz, fato este que leva a uma distância entre pontos da ordem de dez nanosegundos. Para melhorar a precisão do processo de medição, foi realizada uma média das médias dos dados das ondas originais, para que se anule qualquer efeito negativo das fontes de imprecisão aleatórias.

#### 4.4 Padrão de medição

A obtenção e a análise dos resultados depende diretamente da utilização de um método de medição adequado e eficiente. O mapeameto dos tempos de percurso de barras metálicas é um procedimento extremamente sensível em relação a fatores físicos e ambientais. Realizar as medições dos tempos de percurso envolve um controle cuidadoso destes fatores e qualquer incerteza imprevista pode levar a conclusões equivocadas. O primeiro passo a ser executado nesta atividade experimental consiste na obtenção de um padrão de medição (garantia de que os

resultados seguem um padrão em condições físicas e ambientais controladas). A obtenção deste padrão pode ser dividida em três sub-etapas, sendo elas:

- Identificação dos fatores físicos e ambientais que podem influenciar nos resultados.
- Elaboração de um procedimento adequado para minimizar a influencia destes fatores previamente identificados.
- Mapeamento das amostras de materiais com as condições físicas e ambientais controladas rigorosamente, utilizando o procedimento de medição estabelecido.

#### 4.4.1 Fatores ambientais

O principal fator ambiental identificado é a variação de temperatura a qual o ambiente (laboratório) está sujeito. Este fator é o mais crítico, pois qualquer mudança na temperatura pode trazer grande variação nos tempos de percurso obtidos. Avaliar a influência da temperatura significa encontrar qual a relação entre o tempo de percurso medido e os níveis de temperatura. A técnica utilizada para o reconhecimento deste efeito consiste observar os resultados obtidos ao longo das medições, em níveis de temperatura diferentes e estabelecer uma relação entre a temperatura e os tempos de percurso. Isto pode ser obtido mediante a utilização de aparelhos de ar condicionado operando a um certo tempo (algumas horas), para que a temperatura fique estável dentro da sala.

O conjunto de medições do tempo de percurso realizado juntamente com as temperaturas medidas, trazem uma relação entre a temperatura e o tempo de percurso. Nesta relação, o aumento no tempo de percurso é, provavelmente, proporcional ao aumento na temperatura. Os instrumentos utilizados na medição da temperatura são: termômetro de mercúrio e pirômetro Raytek – Raynger ST a laser (Figura 4.10). A precisão obtida com o termômetro de mercúrio é de 0,5 °C, enquanto que a precisão obtida pelo pirômetro é de 0,1 °C.



Figura 4.10: Pirômetro a laser

## 4.4.2 Fatores físicos

Alguns fatores identificados podem ter seus efeitos quantificados, enquanto que a quantificação do efeito de outros continua como tema de pesquisa futuro. Os principais fatores identificados são:

- Não uniformidade do material (posicionamento)
- Pressão de contato
- Distribuição do agente acoplante

## 4.4.2.1 Não uniformidade do material

A não uniformidade do material (textura) pode afetar significativamente os resultados. Durante este estudo, como o objetivo foi avaliar a profundidade da onda, esse efeito deveria ser minimizado. A questão era garantir que as sapatas de acrílico estivessem colocadas onde a textura fosse muito semelhante. Como a textura não estava sendo medida, a posição de medida deveria ser a mesma. Assim, o controle rigoroso do posicionamento poderia minimizar em muito os erros obtidos durante o processo de obtenção do padrão de repetibilidade. O controle do posicionamento da sapata de acrílico na amostra metálica foi executado por uma estrutura rígida, a qual fixou o sistema de posicionamento na bancada de testes. Para isto, a estrutura foi fixada na bancada com parafusos (Figura 4.11).



Figura 4.11: Fixação da estrutura de posicionamento na bancada de testes

Além da fixação da estrutura rígida na bancada, deve-se ter um controle do posicionamento da amostra metálica na mesma bancada. Com a utilização de contra-pesos sobre a amostra e com uma operação de subida e descida controlada (para evitar o deslocamento das amostras) o posicionamento apresentará pouquíssima variação.

A utilização de três pares de transdutores de diferentes freqüências exige montagem e desmontagem constante dos mesmos nas sapatas de acrílico. Isso traz fontes de erros não previstas, uma vez que por mais que se tenha cuidado, a posição do transdutor na sapata nunca será a mesma de antes de sua troca. Para evitar este problema, foram confeccionados seis pares de sapatas de acrílico (três para o aço e três para o alumínio). Isto faz com que não se torne necessária a retirada do transdutor da sapata e, conseqüentemente, seu posicionamento continuará sempre o mesmo.

#### 4.4.2.2 Pressão de contato

Os contatos entre o transdutor e a sapata e entre a sapata e a amostra metálica são fatores críticos na obtenção do padrão de repetibilidade nos resultados. A pressão de contato entre a sapata e o transdutor varia toda a vez que este for trocado, pois os transdutores são montados na sapata mediante a utilização de dois parafusos de fixação (Figura 4.12).



Figura 4.12: Parafusos de fixação dos transdutores nas sapatas

Apesar de serem, teoricamente, elementos rígidos, tanto o acrílico quanto o transdutor e os parafusos apresentam uma pequena elasticidade, que apesar de mínima, pode influenciar na pressão de contato. Caso haja dispersão, essa será uma das fontes que serão avaliadas.

No caso do contato entre a sapata e a amostra metálica, a pressão de contato depende diretamente da pressão na linha de ar, utilizada no avanço do pistão pneumático do posicionador. Quanto maior a pressão de contato, menor o tempo de percurso medido. Há no entanto, um limite identificado em pesquisas anteriores (Santos *et al*, 2006). A força aplicada estará sempre acima do valor limite, permitindo a eliminação da influência.

#### 4.4.2.3 Distribuição do Agente Acoplante

Agente acoplante é uma substância lubrificante utilizada para que a diferença entre as impedâncias acústicas, das superfícies dos meios em contato, seja minimizada, aumentando a capacidade de transmissão de ondas acústicas. Existem vários acoplantes que podem ser utilizados, como água e géis especiais, porém, neste trabalho foi utilizado óleo lubrificante da marca Singer, o qual apresenta viscosidade de 9,6 Cst (a 40°C), utilizado na lubrificação de máquinas de costura. Textos anteriores mostram a conveniência do uso de tal fluído (Santos *et al*, 2006).

Os contatos entre o transdutor e a sapata de acrílico, e também entre a sapata e a amostra metálica, se fazem mediante a utilização do acoplante. Quando este se distribui de maneira irregular nas interfaces destes meios, pode ocorrer um alto índice de reflexão das ondas sonoras incidentes em algumas regiões, prejudicando os sinais emitidos e recebidos pelos transdutores. Este comprometimento do sinal traz variação aos tempos de percurso calculados e, conseqüentemente, prejudica a análise dos resultados obtidos. Apesar de representar um obstáculo na obtenção de resultados esperados, a má distribuição de acoplante pode ser facilmente corrigida, uma vez que o acrílico é um material transparente, o que proporciona a observação de "vazios" na interface, facilitando a correção e permitindo uma redistribuição uniforme do agente acoplante.

#### 4.4.3 Elaboração do procedimento de medição e mapeamento

Depois da identificação dos fatores físicos e ambientais que influenciam no padrão de medição, é necessário o estabelecimento de uma estratégia para realizar as medições dos tempos de percurso de forma padronizada. Obter um padrão de medição significa obter resultados similares, sob a ação de uma série de fatores internos e externos adequadamente controlados. A idealização de uma estratégia de medição de tempos de percurso de ondas L<sub>cr</sub> é algo complicada, uma vez que, como mencionado anteriormente, o tempo de percurso é extremamente sensível a vários fatores.

A estratégia de medição deve ser definida considerando inicialmente a utilização de três níveis de freqüências ultra-sônicas (2,25; 3,5 e 5 MHz) além do material avaliado (Aço 5L X70).

Uma estratégia possível para a obtenção do padrão de medição é o mapeamento de vários pontos das amostras metálicas. A principal idéia envolvida na obtenção do padrão de medição é a obtenção de resultados, dentro de um certo padrão, em diferentes regiões das amostras metálicas sob condições controladas de temperatura, pressão de contato e posição.

O controle da pressão de contato depende apenas da pressão executada para o avanço do pistão pneumático. Esta pressão é constante e será controlada pelo manômetro da linha de ar e pelo transdutor de pressão instalado no sistema. O controle da posição de colocação da sapata na amostra metálica será feito com a ajuda de marcas nas amostras, feitas com caneta para retro-projetor. Apesar de apresentar uma pequena variação de posição, as incertezas originárias desta variação são possivelmente pequenas. A temperatura é o fator mais difícil de ser controlado, uma vez que existe uma variação de temperatura natural no ambiente. Porém, esta variação pode ser corrigida sabendo-se o comportamento do tempo de percurso em relação à temperatura.

A estratégia de obtenção do padrão consiste no mapeamento de tensões nas seis amostras de aço. Cada amostra será mapeada em oito pontos (quatro na face superior e quatro na face inferior). Ao todo serão quarenta e oito pontos mapeados, sendo que as amostras serão divididas em três pares (cada par de amostras será destinado a uma freqüência específica). A estratégia de obtenção do padrão de medição para um determinado par de amostras com freqüência específica pode ser representada pelo fluxograma da Figura 4.13:



Figura 4.13: Padrão de medição para uma freqüência específica

Primeiramente, separa-se o primeiro par de amostras a ser mapeado (com transdutores de freqüência definida). A primeira amostra do par é posicionada na bancada com a face superior exposta para cima. A temperatura da amostra na primeira posição de mapeamento é medida com o auxílio do pirômetro e em seguida é medido o tempo de percurso, sendo que a medição em uma determinada posição é repetida por 4 vezes. Depois de realizadas as 4 medidas na primeira posição, a amostra é deslocada de forma que a segunda posição fique postada no local de medição. O tempo de percurso é novamente medido por quatro vezes, até o momento que a próxima posição da amostra é colocada para ser medida. No momento em que todas as 4 posições da face superior da amostra estão mapeadas, vira-se a amostra para que a face inferior se localize ante a montagem. O procedimento de mapeamento é então repetido para a face inferior e no momento que esta estiver mapeada, retira-se a primeira amostra e coloca-se a segunda (do par). O mapeamento de cada par de amostras é repetido por seis vezes, para que se tenha a leitura dos

tempos de percurso para diferentes níveis de temperatura. Se for constatado um padrão de medição (relação direta entre tempo de percurso e o nível de temperatura), as amostras se encontram prontas para serem analisadas quando ao mapeamento.

As amostras são separadas em pares, pois não é possível mapear todas as amostras com todas as freqüências. A simples troca de transdutor, ou até mesmo da montagem, traz grande incerteza na medição do tempo de percurso como já dito. A Figura 4.14 representa de maneira mais clara a divisão de amostras por freqüência utilizada:



Figura 4.14: Separação das amostras por freqüência utilizada

As amostras 1 e 2 são mapeadas com o transdutor de 2,25 MHz, as amostras 3 e 4 são mapeadas com os transdutores de 3,5 MHz e por fim, as amostras 5 e 6 são mapeadas com a freqüência de 5,0 MHz. Com este procedimento espera-se que a obtenção do padrão de medição seja atingida no momento em que os tempos de percurso, medidos em um nível de temperatura, sejam iguais.

#### 4.5 Avaliação experimental da profundidade de penetração das ondas L<sub>cr</sub>

Após obtido um padrão de repetibilidade dos resultados sob condições ambientais controladas, deve-se aplicar uma estratégia experimental para verificar se a profundidade de penetração de uma onda  $L_{cr}$  realmente segue a teoria desenvolvida anteriormente. O mapeamento realizado na obtenção do padrão de repetibilidade será importante na avaliação da penetração das ondas ultra-sônicas, pois servirá como um padrão de comparação.

A técnica experimental de avaliação da profundidade de penetração consiste na usinagem de um conjunto de rasgos, com profundidades definidas, nas amostras metálicas. Estas profundidades serão realizadas de forma gradativa, sendo que serão usinados vinte e quatro rasgos nas seis amostras de cada material (quatro rasgos por barra). A Tabela 4.3 apresenta a distribuição das profundidades dos rasgos para cada par de amostras:

	Barra	Posicao	Profundidades (mm)
	B1	1	4
		2	3,5
		3	3
		4	2,5
먹	B2	1	2
Μ		2	2,5
25		3	1
2,		4	0,5
	B3	1	4
		2	3,5
		3	3
		4	2,5
N	B4	1	2
ΗИ		2	2,5
5		3	1
ŝ		4	0,5
	B5	1	4
		2	3,5
		3	3
	5.0	4	2,5
N	B6	1	2
Ы		2	2,5
0		3	1
5		4	0,5

Tabela 4.3: Distribuição de rasgos por amostra e suas profundidades

Pode-se observar na Tabela 4.3 que os rasgos apresentam profundidades que variam entre 4 e 0,5 mm. Pensou-se em usinar mais rasgos, com mais níveis de profundidade, porém as dimensões das amostras e das montagens transdutor/sapata não permitiram um maior leque de níveis. As quatro posições da primeira amostra do par foram usinadas com profundidades de 4,0; 3,5; 3,0 e 2,5 mm enquanto que as quatro posições da segunda amostra foram usinadas com profundidades de 2,0; 1,5; 1,0 e 0,5 mm. Todos os rasgos foram usinados nas posições da superfície inferior das amostras, sendo que as medidas dos tempos de percurso foram realizadas nas posições opostas, ou seja, na face superior (Figura 4.15).



Figura 4.15: Posição do rasgo na amostra

Outro fator importante a ser observado, é que a profundidade considerada (P) não é a profundidade absoluta do rasgo, mas sim a distância entre a superfície superior e o fundo do rasgo (Figura 4.16)



Figura 4.16: Profundidade considerada

As dimensões do rasgo devem ser definidas de forma que não se prejudiquem a estrutura da amostra, evitando rompimento da mesma quando for manuseada. As dimensões do rasgo podem ser observadas na Figura 4.17.



Figura 4.17: Dimensões do rasgo

A observação experimental da profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  consiste na comparação entre os tempos de percurso obtidos previamente no padrão de medição (mapeamento inicial) e os tempos de percurso obtidos após a usinagem dos rasgos (mapeamento final). Diferentemente do mapeamento inicial, o mapeamento final consiste na obtenção dos tempos de percurso nas posições da superfície superior apenas, pois não há sentido comparar os tempos de percurso medidos na superfície superior, pois os rasgos foram usinados nesta. O procedimento de comparação pode ser observado na Figura 4.18. Deve-se esclarecer que o mapeamento final será realizado em diferentes níveis de temperatura (obtidos com seis repetições do mapeamento).



Figura 4.18: Observação experimental da profundidade de penetração da onda L<sub>cr</sub>

De acordo com a Figura 4.18, acredita-se que no momento em que a onda  $L_{cr}$  passa pelo obstáculo (rasgo), seu tempo de percurso muda radicalmente, em comparação com o tempo de percurso medido na superfície, antes da usinagem do rasgo (caso 1). No caso de a onda  $L_{cr}$  não passar pelo obstáculo (caso 2), acredita-se que o tempo de percurso será pouco influenciado, tendo apenas variações decorrentes da própria usinagem (adição de tensão residual proveniente da operação de usinagem) ou até mesmo um encruamento do material na região usinada.

Outra forma de verificar experimentalmente a profundidade de penetração da onda  $L_{cr}$  é observar os sinais das medições obtidas no mapeamento inicial e final (Figura 4.19). Acredita-se que os sinais obtidos nos mapeamentos finais e iniciais (antes e depois da usinagem dos rasgos) serão diferentes. Com a presença de um obstáculo físico, refrações e reflexões das ondas geradas no interior do material e provenientes da presença do rasgo podem trazer atenuações (queda de amplitude do sinal obtido no mapeamento final, em comparação com o inicial), trazendo também algumas informações importantes sobre a profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$ 



Figura 4.19: Comparação entre os sinais obtidos antes e após o rasgo

## Capítulo 5

# **Resultados e Discussões**

A profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  pode ser identificada analisando-se a diferença entre os valores de tempo de percurso obtidos durante o mapeamento das amostras metálicas e após a usinagem dos rasgos nas profundidades pré-determinadas. Outra forma de se avaliar a profundidade de penetração é a comparação entre as amplitudes dos sinais obtidos nas medições dos tempos de percurso antes e depois da usinagem dos rasgos. De acordo com a metodologia adotada, a análise dos resultados obtidos será realizada em três etapas:

- Verificação de um padrão de repetibilidade nos tempos de percurso medidos em cada região das amostras, considerando-se o efeito da temperatura.
- Comparação entre os tempos de percurso obtidos durante o mapeamento e após a usinagem dos rasgos de profundidades definidas.
- Comparação entre os sinais obtidos na medição dos tempos de percurso (antes e após a usinagem dos rasgos).

#### 5.1 Verificação do padrão de repetibilidade (mapeamento)

Como mencionado anteriormente, o mapeamento das amostras metálicas consiste na medição dos tempos de percurso, em diferentes pontos das amostras, em diferentes momentos e sob diferentes condições de temperatura. Para os resultados de tempo de percurso obtidos sob as mesmas temperaturas, os valores dos tempos de percurso não devem exceder uma diferença de 3 nanosegundos, pois foi constatado que a relação entre o tempo de percurso e a tensão residual não permite uma variação maior do que esta diferença de 3 nanosegundos, já que isto significaria

cerca de 15 MPa, e seria importante frente a tensão limite de escoamento do material. A obtenção de um padrão de repetibilidade é extremamente complicada, uma vez que o tempo de percurso das ondas  $L_{cr}$  é extremamente sensível à variação de temperatura. Entretanto, um padrão de repetibilidade aceitável foi obtido durante o mapeamento das amostras metálicas. Os resultados obtidos no mapeamento, utilizando-se o transdutor de 2,25 MHz, podem ser observados pelas Tabelas 5.1 e 5.2. As Tabelas 5.3 e 5.4 representam os resultados do mapeamento realizado com transdutores de 3,5 MHz e por fim, o mapeamento realizado com os transdutores de 5 MHz pode ser observado nas Tabelas 5.5 e 5.6. Os valores de temperatura medidos pelo pirômetro estão em graus Celsius (°C) enquanto que os tempos de percurso estão em microsegundos (10<sup>-6</sup> s).

			Bar	ra 1					
	Lado 1								
Pos	sicao 1	Pos	icao 2	Pos	icao 3	Pos	sicao 4		
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura		
38,290	19,8	38,273	19,8	38,276	19,8	38,256	19,8		
38,310	20,9	38,283	21	38,286	21,1	38,271	21,2		
38,296	20,4	38,272	20,4	38,273	20,5	38,261	20,5		
38,336	22,3	38,309	22,5	38,313	22,8	38,306	22,9		
38,352	23,7	38,328	23,7	38,323	23,7	38,315	23,7		
38,294	20,4	38,273	20,5	38,273	20,6	38,259	20,7		
			Lac	lo 2					
Pos	sicao 1	Pos	icao 2	Pos	icao 3	Pos	sicao 4		
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura		
38,304	19,9	38,265	19,9	38,269	19,9	38,272	19,9		
38,327	22,2	38,310	22,3	38,301	22,4	38,308	22,4		
38,306	20,8	38,278	20,7	38,278	20,8	38,277	20,8		
38,356	23,7	38,326	23,7	38,330	23,8	38,332	23,9		
38,308	21,6	38,293	21,6	38,284	21,5	38,285	21,7		
38,305	21,1	38,284	21,2	38,285	21,2	38,281	21,2		

Tabela 5.1: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 1 (2,25 MHz)

1 40014 0.2, 1110414 400 VIIIDOD 40 DUTUMIO 0001400 110 114004110 44 1 1110544 $= 12,20$ 11110	Γabela 5.2: Média dos tem	pos de percurso	obtidos no ma	peamento da	Amostra 2 (2	2.25 M	(Hz)
--	---------------------------	-----------------	---------------	-------------	--------------	--------	------

Barra 2								
			Lac	lo 1				
Pos	icao 1	Posi	icao 2	Pos	icao 3	Pos	Posicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,262	19,8	38,243	19,8	38,247	19,8	38,245	19,8	
38,291	22,3	38,277	22,3	38,278	22,3	38,272	22,3	
38,283	21,4	38,267	21,4	38,264	21,5	38,258	21,6	
38,322	23,4	38,307	23,6	38,304	23,6	38,297	23,6	
38,291	22,3	38,276	22,4	38,275	22,4	38,271	22,4	
38,279	21,5	38,263	21,6	38,263	21,6	38,256	21,6	
			Lac	lo 2				
Pos	icao 1	Posi	icao 2	Pos	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,307	20,8	38,263	20,8	38,267	20,8	38,279	20,9	
38,303	20,6	38,266	20,8	38,261	20,8	38,277	20,7	
38,322	22	38,284	22,2	38,295	22,2	38,301	22,3	
38,354	23,8	38,320	23,8	38,320	23,9	38,337	23,9	
38,330	22,7	38,290	22,7	38,299	22,8	38,316	22,9	
38,316	21,7	38,275	21,9	38,286	21,9	38,299	21,9	

Barra 3								
			Lac	lo 1				
Pos	icao 1	Posi	icao 2	Posi	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,320	21,1	38,320	21,1	38,321	21,2	38,328	21,1	
38,304	20,5	38,302	20,6	38,304	20,6	38,309	20,4	
38,364	24,4	38,366	24,1	38,363	24,1	38,362	24,1	
38,303	20,2	38,302	20,2	38,304	20,2	38,305	20,2	
38,307	20,5	38,306	20,5	38,309	20,6	38,311	20,6	
38,291	19,3	38,291	19,4	38,292	19,4	38,294	19,5	
			Lac	lo 2				
Pos	icao 1	Pos	icao 2	Posi	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,335	21,3	38,307	21,4	38,316	21,4	38,326	21,6	
38,316	20,6	38,294	20,6	38,300	20,7	38,304	20,6	
38,375	24,4	38,350	24,2	38,354	24,4	38,361	24,3	
38,318	20,3	38,293	20,4	38,298	20,3	38,303	20,4	
38,328	20,9	38,301	20,9	38,306	20,9	38,314	21	
38,313	19,6	38,283	19,6	38,318	19,7	38,297	19,6	

Tabela 5.3: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 3 (3,5 MHz)

Tabela 5.4: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 4 (3,5 MHz)

Barra 4									
	Lado 1								
Pos	icao 1	Posi	icao 2	Posicao 3		Pos	Posicao 4		
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura		
38,318	20,4	38,315	20,4	38,322	20,5	38,334	20,6		
38,371	23,8	38,362	23,8	38,372	23,7	38,378	23,8		
38,363	23,5	38,351	23,4	38,359	23,4	38,368	23,4		
38,311	20,1	38,306	20,1	38,318	20,2	38,328	20,2		
38,328	20,7	38,318	20,8	38,328	20,8	38,336	20,9		
38,306	19,4	38,298	19,6	38,307	19,6	38,318	19,6		
			Lac	lo 2					
Pos	icao 1	Posi	icao 2	Posi	icao 3	Pos	sicao 4		
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura		
38,327	20,6	38,310	20,6	38,309	20,6	38,302	20,6		
38,378	24,2	38,364	24	38,364	24	38,356	24,1		
38,358	23,2	38,346	23,1	38,345	23,1	38,336	23,1		
38,324	20,4	38,312	20,4	38,310	20,5	38,299	20,5		
38,326	20,7	38,312	20,7	38,310	20,7	38,300	20,7		
38,323	20,1	38,311	20,2	38,313	20,4	38,306	20,6		

Tabela 5.5: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 5 (5,0 MHz)

	Barra 5							
			Lac	lo 1				
Pos	icao 1	Pos	icao 2	Posi	icao 3	ao 3 Posicao 4		
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,285	20,6	38,268	20,6	38,256	20,6	38,233	20,6	
38,294	21	38,276	20,9	38,263	20,9	38,242	20,9	
38,324	22,4	38,308	22,7	38,296	22,8	38,274	22,8	
38,328	22,7	38,309	22,8	38,297	23	38,274	22,9	
38,361	24,8	38,342	24,9	38,330	25,1	38,307	25	
38,311	21,9	38,290	22,2	38,276	22,1	38,257	22,1	
			Lac	lo 2				
Pos	sicao 1	Pos	icao 2	Posi	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,290	20,9	38,276	20,8	38,276	20,8	38,274	20,8	
38,300	21,3	38,285	21,3	38,287	21,3	38,285	21,3	
38,337	23,2	38,323	23,5	38,323	23,4	38,323	23,4	
38,340	23,4	38,324	23,4	38,324	23,4	38,324	23,6	
38,365	25,2	38,349	25,2	38,349	25,2	38,347	25,2	
38,315	22,4	38,301	22,4	38,301	22,4	38,299	22,3	

Barra 6								
			Lac	lo 1				
Pos	icao 1	Pos	icao 2	Pos	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,627	20,6	38,643	20,6	38,639	20,6	38,628	20,6	
38,646	21,7	38,661	21,7	38,661	21,7	38,650	21,8	
38,687	23,8	38,703	23,9	38,700	24,1	38,687	24,1	
38,686	23,8	38,699	23,9	38,702	24,2	38,688	24,2	
38,700	24,8	38,712	25	38,713	25	38,698	24,9	
38,653	22	38,666	22,2	38,666	22,2	38,651	22,2	
			Lac	lo 2				
Pos	icao 1	Pos	icao 2	Pos	icao 3	Pos	sicao 4	
Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	Temperatura	
38,653	20,8	38,645	20,8	38,655	20,8	38,645	20,8	
38,679	22,1	38,670	22,1	38,681	22,1	38,673	22,2	
38,682	22,5	38,676	22,5	38,687	22,6	38,678	22,7	
38,721	24,6	38,713	24,7	38,724	24,7	38,714	24,8	
38,677	22,3	38,668	22,3	38,678	22,3	38,669	22,3	
38,680	22,4	38,671	22,3	38,681	22,4	38,672	22,4	

Tabela 5.6: Média dos tempos de percurso obtidos no mapeamento da Amostra 6 (5,0 MHz)

Apenas analisando os dados contidos nas tabelas não é possível observar um padrão de medição nos mapeamentos realizados antes da usinagem dos rasgos. Para uma análise mais criterioza dos resultados obtidos, é necessário observar como as médias dos tempos de percurso se distribuem ao longo das posições nas amostras. Para isto, foram elaborados gráficos que relacionam os tempos de percurso obtidos, em cada posição das amostras, com suas respectivas temperaturas aferidas. Um dos passos da verificação da obtenção de um padrão de medição passa pelo estudo da influência da temperatura nos tempos de percurso medidos. Pode-se observar nos gráficos, que existe uma relação direta entre o tempo de percurso e a temperatura da amostra (em uma determinada posição). Quando se aumenta a temperatura, aumenta-se o tempo de percurso e este fator foi observado durante a análise da influencia da temperatura.

#### 5.1.1 Efeito da temperatura

De acordo com os resultados obtidos nas medições utilizando-se as três freqüências (2,25; 3,5 e 5 MHz), o tempo de percurso é diretamente proporcional à temperatura da amostra metálica. Em cada ponto de mapeamento pode-se obter uma relação linear entre o tempo de percurso da onda  $L_{cr}$  e a temperatura da amostra.

Para cada posição analisada na amostra metálica, foram obtidos seis tempos de percurso em seis diferentes níveis de temperatura. Com seis níveis de temperatura para cada ponto é possível obter uma relação direta entre temperatura e tempo de percurso. Para a posição 2, na face 2 da

amostra 1, com uma freqüência de 2,25 MHz, a curva de temperatura em função do tempo de percurso pode ser representada pelo gráfico da Figura 5.1. A curva foi obtida por aproximação, utilizando-se o método dos mínimos quadrados pelo programa Microsoft Excel. A equação da curva obtida pode ser observada ao lado da curva aproximada.



Figura 5.1: Curva geral aproximada da relação entre tempo de percurso e temperatura

As curvas obtidas para cada posição, em todas as amostras metálicas, podem ser observadas no Anexo A.2. Analisando-se todas as curvas, de todas as posições de todas as amotras, pode-se perceber em todas as posições, o mesmo comportamento apresentado pela posição 2, do lado 2 e da amostra 1 é observado. Isto significa que em todas as posições das amostras o tempo de percurso e diretamente proporcional à temperatura da amostra. Este já é o primeiro indício de que um padrão de medição foi obtido. O segundo indício, o qual conclui de fato que foi obtido um padrão de medição nos mapeamentos será apresentado na comparação dos mapeamentos antes e após a usinagem dos rasgos. Observando-se o comportamento do tempo de percurso em relação à temperatura pode-se perceber que a curva obtida pode ser descrita algebricamente pela expressão 5.1:

$$t_p = C_t(T_a) + C_c \tag{5.1}$$

Nesta expressão,  $t_p$  é o tempo de percurso (nanosegundos),  $C_t$  é a constante de temperatura (ns/°C),  $C_c$  é o tempo de percurso para uma temperatura igual a zero (escala Celsius),  $T_a$  é a

temperatura da amostra. No estudo do comportamento do tempo de percurso em relação à temperatura da amostra, a constante de temperatura é a informação mais importante, pois permite corrigir um valor de tempo de percurso obtido em um determinado nível de temperatura para um outro nível de temperatura diferente do nível onde o tempo de percurso foi medido. A Tabela 5.7 representa os valores de coeficiente de temperatura obtidos com as três freqüências utilizadas.

	2,25 MHz		3,5	MHz	5 MHz	
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
	0,0172	0,0155	0,0146	0,0148	0,0182	0,0178
	0,0146	0,0153	0,0136	0,0133	0,0173	0,0168
	0,0155	0,0161	0,0162	0,0143	0,0164	0,0168
	0,0167	0,0175	0,0149	0,0143	0,0166	0,0165
	0,0142	0,0146	0,0154	0,0146	0,0177	0,0178
	0,0158	0,018	0,0139	0,0148	0,0169	0,0175
	0,0167	0,0135	0,0147	0,0137	0,0167	0,0176
	0,0161	0,0186	0,0142	0,0151	0,0167	0,0171
Desvio Padrão	0,0011	0,0018	0,0008	0,0006	0,0006	0,0005
Média	0,0159	0,0161	0,0147	0,0144	0,0171	0,0172

Tabela 5.7: Coeficientes de temperatura obtidos para três diferentes níveis de freqüência

Para se analisar as influências das amostras (barras) e das freqüências sobre o coeficiente de temperatura é necessário aplicar um método de análise estatística, o qual se assemelha ao método de planejamento estatístico aleatorizado por níveis. Os resultados obtidos, relacionados às fontes de influência nos coeficientes de temperatura não estão dentro do principal objetivo, sendo considerados como resultados adicionais. Entretanto, este comportamento do coeficiente de temperatura em relação às fontes de influência deve ser mostrado, pois é importante na análise de obtenção de um padrão de medição. Após analisados os efeitos das amostras medidas com cada freqüência, será analisado apenas os efeitos das freqüências sobre os coeficientes de temperatura.

#### 5.1.1.1 Influencia das amostras nos coeficientes de temperatura

Utilizando-se a análise estatística proposta, pode-se observar que as amostras pouco influenciam nos coeficientes de temperatura. Para isto, foram calculados todos os parâmetros estatísticos (Tabela 5.8, 5.9, 5.10):

a:	2	
n:	8	
	2,25	MHz
	Barra 1	Barra 2
	1,72E-02	1,55E-02
	1,46E-02	1,53E-02
	1,55E-02	1,61E-02
	1,67E-02	1,75E-02
	1,42E-02	1,46E-02
	1,58E-02	1,80E-02
	1,67E-02	1,35E-02
	1,61E-02	1,86E-02
Média	1,59E-02	1,61E-02
Desvio Padrão	1,05E-03	1,77E-03
F0	7,67E-01	

Tabela 5.8: Parâmetros estatísticos - 2,25 MHz

Tabela 5.9: Parâmetros estatísticos – 3,5 MHz

a:	2	
n:	8	
	3,5	MHz
	Barra 3	Barra 4
	1,46E-02	1,48E-02
	1,36E-02	1,33E-02
	1,62E-02	1,43E-02
	1,49E-02	1,43E-02
	1,54E-02	1,46E-02
	1,39E-02	1,48E-02
	1,47E-02	1,37E-02
	1,42E-02	1,51E-02
Média	1,47E-02	1,44E-02
Desvio Padrão	8,36E-04	6,05E-04
F0	8,51E-01	

Tabela 5.10: Parâmetros estatísticos - 5,0 MHz

a:	2	
n:	8	
	5 N	ЛНz
	Barra 5	Barra 6
	1,82E-02	1,78E-02
	1,73E-02	1,68E-02
	1,64E-02	1,68E-02
	1,66E-02	1,65E-02
	1,77E-02	1,78E-02
	1,69E-02	1,75E-02
	1,67E-02	1,76E-02
	1,67E-02	1,71E-02
Média	1,71E-02	1,72E-02
Desvio Padrão	6,21E-04	5,04E-04
F0	4,10E-01	

A avaliação do efeito das amostras no coeficiente de temperatura depende de uma comparação dos parâmetros estatísticos com os valores de  $F_{\alpha,a-1,N-a}$ , que são valores que dependem do número de níveis e de medições, os quais podem ser obtidos na literatura. Para que a análise estatística seja mais criteriosa, é necessário realizar a comparação dos parâmetros para diferentes valores de  $\alpha$ . De acordo com Montgomery (2005) os valores obtidos para  $F_{\alpha,a-1,N-a}$  para  $\alpha = \{0,25;0,1;0,05;0,025;0,01\}$  estão dispostos na Tabela 5.11:

Tabela 5.11: Valores de  $F_{\alpha,a-1,N-a}$  obtidos para diferentes valores de  $\alpha$ 

<b>F0</b> (α)			
F0.0,25,1,14:	1,44		
F0.0,1,1,14:	3,1		
F0.0,05,1,14:	4,6		
F0.0,025,1,14:	6,3		
F0.0,01,1,14:	8,86		

Para as amostras mapeadas com freqüência de 2,25 MHz pode-se concluir que as amostras pouco influenciam no coeficiente de temperatura. De acordo com a análise estatística proposta, os resultados obtidos para os coeficientes de temperatura independem das amostras se  $F_0 < F_{\alpha,a-1,N-a}$ . No caso do mapeamento realizado com transdutores de 2,25 MHz, 7,67.10<sup>-1</sup>  $< F_{\alpha,1,14}$  para qualquer valor de  $\alpha$ . Isto significa que para qualquer intervalo de confiança exposto na Tabela 5.11 os valores do coeficiente de temperatura pouco variam, indicando que as amostras neste caso não exercem influência.

Ao se analisar o efeito das amostras mapeadas com freqüência de 3,5 MHz pode-se concluir que as amostras não influenciam nos valores do coeficiente de temperatura. Comparando-se os parâmetros estatísticos calculados na Tabela 5.9 (referente à freqüência de 3,5 MHz) com os valores expostos na Tabela 5.11 pode-se observar que para qualquer intervalo de confiança  $F_0 < F_{\alpha,a-1,N-a}$ , ou seja: Para qualquer intervalo de confiança: 8,51.10<sup>-1</sup> <  $F_{\alpha,1,14}$ . Este fato simplesmente confirma que estatisticamente as amostras não apresentam influência sobre os coeficientes de temperatura. Para as amostras mapeadas com transdutores de 5,0 MHz,  $4,10.10^{-1} < F_{\alpha,1,14}$  (para qualquer intervalo de confiança). Sendo assim, para este nível de freqüência as amostras não apresentam influência sobre os coeficientes de temperatura.

Com os resultados obtidos nos mapeamentos das amostras com os três níveis de freqüência utilizados conclui-se que amostras diferentes de um mesmo material apresentam o mesmo coeficiente de temperatura.

#### 5.1.1.2 Influencia das freqüências nos coeficientes de temperatura

A próxima fase do estudo da relação entre a temperatura e os tempos de percurso obtidos nas medições de tensões consiste na avaliação da influencia das freqüências nos coeficientes de temperatura. Os valores obtidos para cada freqüência, independentemente das amostras, estão dispostos na Tabela 5.12, juntamente com os parâmetros estatísticos calculados:

a:	3		
n:	16		
	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz
	1,72E-02	1,46E-02	1,82E-02
	1,46E-02	1,36E-02	1,73E-02
	1,55E-02	1,62E-02	1,64E-02
	1,67E-02	1,49E-02	1,66E-02
	1,42E-02	1,54E-02	1,77E-02
	1,58E-02	1,39E-02	1,69E-02
	1,67E-02	1,47E-02	1,67E-02
	1,61E-02	1,42E-02	1,67E-02
	1,55E-02	1,48E-02	1,78E-02
	1,53E-02	1,33E-02	1,68E-02
	1,61E-02	1,43E-02	1,68E-02
	1,75E-02	1,43E-02	1,65E-02
	1,46E-02	1,46E-02	1,78E-02
	1,80E-02	1,48E-02	1,75E-02
	1,35E-02	1,37E-02	1,76E-02
	1,86E-02	1,51E-02	1,71E-02
Soma - yi.	2,56E-01	2,32E-01	2,74E-01
Media - ÿi.	1,60E-02	1,45E-02	1,72E-02
Soma - y	7,63E-01		
Medida - ÿ	1,59E-02		
SSt	9,77E-05		
SStrat	5,54E-05		
Sse	4,24E-05		
Sstrat/(a-1)	2,77E-05		
Sse/(N-a)	9,41E-07		
F0	2,94E+01		

Tabela 5.12: Coeficientes de temperatura e parâmetros estatísticos (2,25; 3,5 e 5,0 MHz)

O procedimento estatístico utilizado neste caso é o mesmo utilizado nos casos anteriores. Pode-se observar que desta vez, o número de níveis e o número de resultados é diferente dos casos anteriores (a = 3 e N = 48). Sendo assim, de acordo com Montgomery (2005), os valores de  $F_{\alpha,2,45}$  estão descritos na Tabela 5.13 (por interpolação):

Tabela 5.13: Valores de  $F_{\alpha,a-1,N-a}$  obtidos para diferentes valores de  $\alpha$ 

F0 (α)		
F0.0,25,3,45:	1,42	
F0.0,1,3,45:	2,22	
F0.0,05,3,45:	2,82	
F0.0,025,3,45:	3,43	
F0.0,01,3,45:	3,86	

Comparando-se os valores obtidos na Tabela 5.1 com os parâmetros estatísticos calculados na Tabela 5.13, pode-se concluir que, para qualquer intervalo de confiança correspondido por  $\alpha$ , o coeficiente de temperatura é fortemente influenciado pela freqüência dos transdutores ultrasônicos, pois para qualquer  $\alpha$ : 29,4 >  $F_{\alpha,1.14}$ .

A ausência de uma relação direta entre a freqüência do transdutor e o coeficiente de temperatura é algo que deve ser destacado neste trabalho. De acordo com os resultados expostos na Tabela 5.12 pode-se concluir que não existe uma relação direta entre a freqüência do transdutor e o coeficiente de temperatura. Isto demonstra que estes coeficientes são influenciados apenas pelas características de um dado par de transdutores utilizados em um mapeamento.

#### 5.1.2 Padrão de distribuição dos tempos de percurso

O segundo indício (definitivo) que finalmente indica a obtenção de um padrão de medição é o padrão de distribuição dos tempos de percurso. Como comprovado anteriormente, o tempo de percurso da onda  $L_{cr}$  é diretamente proporcional à temperatura da amostra. Sendo assim, para diferentes níveis de temperatura foi observado o mesmo padrão de distribuição dos tempos de percurso. O gráfico da Figura 5.2 expõe de forma mais explícita a obtenção de um padrão de distribuição. Este gráfico representa o mapeamento realizado na superfície superior (lado 1) da

amostra 4, a 3,5 MHz. Os outros mapeamentos realizados nas amostras restantes estão expostos no Anexo A.3.



Figura 5.2: Padrão de distribuição de tempos de percurso

De acordo com a Figura 5.2, os tempos de percurso foram distribuídos de acordo com a posição do mapeamento na amostra, representadas no gráfico em sua barra abaixo. Pode-se perceber que para níveis de temperatura mais altos, as linhas de mapeamento se localizam em posições mais elevadas no gráfico, comprovando novamente o efeito da temperatura nas medições do tempo de percurso, os quais são apresentados no gráfico no eixo vertical. O terceiro eixo representa o nível de temperatura medido em graus Celsius. As linhas grossas e tracejadas na cor vermelha indicam que o padrão de distribuição dos tempos de percurso é o mesmo para qualquer temperatura, comprovando o padrão de medição que foi obtido na atividade experimental. Para as outras amostras, as distribuições (formato das linhas de tempo de percurso) também obedeceram o mesmo padrão para qualquer nível de temperatura. Se forem traçadas retas

entre tempos de percurso medidos em diferentes níveis de temperatura, e em uma posição definida da amostra, curvas do comportamento do tempo de percurso em relação a temperatura podem ser obtidas, com o mesmo comportamento da curva exposta no estudo do efeito da temperatura.

#### 5.2 Comparação entre os tempos de percurso antes e após a usinagem dos rasgos

Para a comprovação da profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  serão apresentados os resultados obtidos para o comportamento do tempo de percurso. Estas leituras serão apresentadas separadamente de acordo com a freqüência do transdutor utilizado no mapeamento das amostras.

A medição dos tempos de percurso das ondas  $L_{cr}$  nem sempre é possível. Existem algumas situações nas quais a amplitude do sinal é tão pequena, que se confunde com o ruído. Nestes casos, a medição do tempo de percurso das ondas  $L_{cr}$  se torna impossível, uma vez que outros sinais, com altos níveis freqüências e oriundos de inúmeras reflexões e refrações no interior do material, se confundem com a amplitude do sinal, trazendo muita variação nos tempos de percurso lidos. A Tabela 5.14 representa em quais profundidades avaliadas foi possível medir o tempo de percurso:

		Frequência (MHz)		
		2,25	3,5	5
)	0,5	X	X	X
m	1	X	X	X
u)	1,5	X	X	X
ade	2	X	X	X
lidá	2,5	X	X	0
pui	3	X	0	0
oft	3,5	X	0	0
Pr	4	X	0	0

Tabela 5.14: Possibilidade de obtenção do tempo de percurso (freqüência e profundidade)

As posições nas amostras, com suas respectivas profundidades de rasgo, que não possibilitaram a medição do tempo de percurso, são marcadas na tabela com a letra "X" em vermelho. As posições que tornaram possíveis as medições dos tempos de percurso estão marcadas com a letra "O" em verde. Pode-se observar na Tabela 5.14 que para qualquer

profundidade de rasgo não é possível a medição do tempo de percurso utilizando transdutores de 2,25 MHz. Isto significa que para qualquer profundidade, a amplitude do sinal se confunde com o as outras amplitudes de sinais de alta freqüência (ruídos). Além disso, até para profundidades de 4,0 mm a onda acústica sofre grande influência do vazio ocasionado pelo rasgo, significando que a onda de 2,25 MHz se propaga mais longe da superfície, a uma profundidade maior do que 4,0 mm. Deve-se lembrar que estas profundidades não são dos rasgos e sim a distância entre o fundo do rasgo e a face oposta à face onde o rasgo foi usinado (camada de material sem obstáculos físicos).

No mapeamento das amostras utilizando-se transdutores de 3,5 MHz de freqüência pôde-se verificar que o tempo de percurso da onda ultra-sônica se tornou possível de ser medido para as profundidades de 4,0; 3,5 e 3,0 mm. Para profundidades de 2,5 a 0,5 mm a amplitude do sinal ficou muito pequena, se confundindo com as outras amplitudes menores e de alta freqüência. Isto significa que para uma profundidade (distância entre o fundo do rasgo e a face livre da amostra) maior do que 3,0 mm, o tempo de percurso se torna muito difícil de ser calculado, ou seja, a amplitude do sinal sofre grande influencia de seu ruído. Este pode ser um indício de que a onda ultra-sônica consegue avaliar o material a uma profundidade de 3,0 a 2,5 mm.

De acordo com os resultados obtidos com o mapeamento realizado a 5,0 MHz, o tempo de percurso pôde ser medido nas profundidades de rasgo de 4,0; 3,5; 3,0 e 2,5 mm. Para as posições usinadas com rasgos de 2,0; 1,5; 1,0 e 0,5 mm não foi possível a medição dos tempos de percurso, uma vez que a amplitude do sinal se confundiu com os sinais de baixas amplitudes e altas freqüências. Isto indica que para profundidades entre 2,5 e 2,0 mm a amplitude sofre enorme influencia dos outros sinais, se tornando impossível a medição do tempo de percurso.

Para se ter uma idéia de como foi observada a faixa de profundidades onde possivelmente a onda L<sub>cr</sub> penetrou no material, tem-se o gráfico da Figura 5.3. Este gráfico representa os mapeamentos realizados antes e após a usinagem dos rasgos e indicam que no momento em que foi impossível medir o tempo de percurso, existe uma interrupção das linhas que representam as distribuições dos tempos de percurso, em uma dada posição (profundidade) e em diferentes níveis de temperatura. Na Figura 5.3, as marcas vermelhas em "O" representam as últimas posições nas quais foi possível medir os tempos de percurso dos mapeamentos realizados após a usinagem dos

rasgos (linhas coloridas tracejadas). As marcas vermelhas em "X" representam os pontos nos quais existe uma diferença entre os padrões dos mapeamentos realizados antes e após a usinagem. Esta diferença de padrão pode ser justificada, possivelmente, por um encruamento do material resultante da usinagem local e também por uma adição de tensão residual realizada pelo fresamento do rasgo.



Figura 5.3: Identificação da profundidade de penetração da onda L<sub>cr</sub>

Considerando a profundidade de penetração da onda  $L_{cr}$  como a profundidade na qual o tempo de percurso se torna impossível de ser medido, tem-se (Tabela 5.15) :

Tabela 5.15: Profundidades nas quais o tempo de percurso se torna impossível de ser medido

	Profundidade		
Frequência (MHz)	Comprimento (mm)	Comprimentos de onda ( $\lambda$ )	
2,25	P > 4	Ρ > 1,55λ	
3,5	2,5 < P < 3,0	1,50 λ < P < 1,80 λ	
5	2,0 < P < 2,5	1,72 λ < P < 2,15 λ	

Comparando-se os resultados experimentais com os teóricos, pode-se concluir que as profundidades de penetração se encontram dentro do intervalo compreendido como faixa de profundidades nas quais a onda se torna pouco sensível (entre 1 e 2 comprimentos de onda). A Figura 5.4 representa melhor a comparação entre a modelagem teórica e os resultados experimentais:



Figura 5.4: Comparação entre a modelagem teórica e os resultados experimentais

De acordo com a Figura 5.4, a intersecção entre os três intervalos de profundidade de penetração indica que a onda tem grande possibilidade de penetrar no material em um intervalo entre 1,72 e 1,8 comprimentos de onda. Isto indica que os resultados obtidos comprovam os conceitos propostos na modelagem teórica.

#### 5.3 Comparação entre os sinais obtidos (antes e após a usinagem dos rasgos)

Além de se avaliar a profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  mediante a análise do comportamento dos tempos de percurso, os sinais obtidos durante as medições também podem compor um importante diagnóstico em relação ao comportamento destas ondas. Os sinais obtidos nos mapeamentos das amostras, realizados nas três freqüências, estão disponíveis no Anexo A.4.

Na literatura estudada não existem referências que estudam a profundidade de propagação de ondas L<sub>cr</sub> por análise de sinais, portanto algumas variáveis de comparação serão adotadas para se realizar esta comparação. As variáveis de comparação sugeridos neste trabalho são:

- Sinais de alta freqüência e baixa amplitude (ruídos)
- Queda de amplitude (decaimento)

Os sinais obtidos nas posições de uma mesma amostra não puderam ser comparados entre si, uma vez as amplitudes destes sinais variam até mesmo entre posições da mesma amostra.

#### 5.3.1 Comparação entre sinais de baixa amplitude e alta freqüência

Aspectos importantes em relação aos sinais dos sinais podem ser observados nos resultados obtidos durante o mapeamento das amostras. Quando se aumenta a freqüência dos transdutores utilizados no mapeamento, os sinais de baixa amplitude tendem a ter amplitudes mais baixas. Analisando-se os gráficos do Anexo A.4 pode-se notar que as maiores amplitudes de alta freqüência se encontram nos sinais obtidos com os transdutores de 2,25 MHz enquanto que as menores amplitudes pertencem aos sinais obtidos com os transdutores de 5,0 MHz. A Figura 5.5 apresenta alguns sinais obtidos com as três freqüências e comprovam a observação feita:



Figura 5.5: Ruídos obtidos nos mapeamentos

A análise dos sinais traz importantes conclusões em relação à profundidade de penetração, uma vez que os tempos de percurso se tornam difíceis de serem medidos quando as amplitudes da onda principal se confundem com as amplitudes das ondas de alta freqüência. Para freqüências mais baixas, as amplitudes secundárias (ruídos) são maiores e mais dificultada se torna a medição dos tempos de percurso, indicando que a onda penetra em camadas mais profundas do material, conforme as observações realizadas na análise da distribuição dos tempos de percurso.

#### 5.3.2 Comparação das quedas de amplitude (decaimentos)

Analisando-se os gráficos dos sinais obtidos em cada posição das amostras metálicas podese observar que com a diminuição da distância entre o fundo do rasgo e a superfície em contato com a sapata de acrílico, a amplitude do sinal cai em relação ao sinal medido antes da usinagem do rasgo. Isto significa que quanto mais próximo da superfície, maior é a queda de amplitude do sinal. Este fator foi observado analisando-se os mapeamentos realizados com as três freqüências. As linhas mais claras (em tons de azul) representam os sinais obtidos após a usinagem enquanto que as linhas mais escuras (em tons de marrom) representam os sinais no mapeamento anterior a usinagem. Alguns dos sinais contidos no Anexo A.4 podem ser observados com menos detalhes nas figuras que se seguem. • Mapeamento realizado a 2,25 MHz



Figura 5.6: Amostra 1 Lado 1 Posição 1



Figura 5.7: Amostra 1 Lado 1 Posição 2



Figura 5.8: Amostra 1 Lado 1 Posição 3



Figura 5.9: Amostra 1 Lado 1 Posição 4

Pode-se perceber, nas figuras de 5.6 a 5.9, que a diferença entre as amplitudes dos primeiros picos é maior na medida em que o fundo do rasgo fica mais próximo da superfície. Desde camadas mais distantes da superfície, as amplitudes do sinal principal se confundem com as amplitudes secundárias. Em camadas mais próximas da superfície as amplitudes do sinal obtido após a usinagem ficam muito próximas de zero.

## • Mapeamento realizado a 3,5 MHz



Figura 5.10: Amostra 3 Lado 1 Posição 1



Figura 5.11: Amostra 3 Lado 1 Posição 2



Figura 5.12: Amostra 3 Lado 1 Posição 3



Figura 5.13: Amostra 3 Lado 1 Posição 4
Assim como os sinais adquiridos a 2,25 MHz, os sinais obtidos com os mapeamentos realizados a 3,5 MHz indicam que diferença entre as amplitudes dos sinais obtidos antes e após a usinagem é diretamente proporcional à distância entre o fundo do rasgo e sua superfície oposta. Entretanto, a diferença entre amplitudes dos sinais de 3,5 MHz é menor comparada às diferenças dos sinais obtidos com 2,25 MHz. Em alguns momentos até, as amplitudes principais dos sinais obtidos, após a usinagem, são maiores do que os sinais obtidos no mapeamento prévio.



## • Mapeamento realizado a 5,0 MHz

Figura 5.14: Amostra 5 Lado 1 Posição 1



Figura 5.15: Amostra 5 Lado 1 Posição 2



Figura 5.16: Amostra 5 Lado 1 Posição 3



Figura 5.17: Amostra 5 Lado 1 Posição 4

Os sinais obtidos a 5,0 MHz apresentam a mesma tendência observada nos demais sinais: o aumento da diferença entre as amplitudes principais dos sinais obtidos antes e depois da usinagem quando se aumenta a distância entre o fundo do rasgo e a superfície oposta. Este mapeamento apresentou amplitudes secundárias (de ondas com alta freqüência) muito baixas, fazendo com que os tempos de percurso possam ser medidos nas camadas mais baixas de material.

Com os sinais obtidos durante as medições não se pode fazer uma conclusão direta sobre a profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$ . Entretanto, pode-se concluir que para menores freqüências, as amplitudes dos sinais obtidos após a usinagem apresentam maior decaimento em

relação ao sinal original, dando a entender que as ondas de maior freqüência trafegam em camadas do material que se situam mais próximas da superfície.

# Capítulo 6

# Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

Este trabalho comprovou que a penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas, de caráter acústico, ocorre em um intervalo entre um e dois comprimentos de onda (mais precisamente, entre 1,72 e 1,80 comprimentos de onda). Esta comprovação foi aplicada a um tipo de material definido (Aço API 5L X70). A verificação desta observação, para outros tipos de materiais de interesse, pode ser realizada em pesquisas futuras.

A avaliação da profundidade de penetração utilizando-se a medição do tempo de percurso das ondas  $L_{cr}$  foi a principal estratégia utilizada neste trabalho, a qual pôde ser aplicada com sucesso. A técnica de análise dos sinais obtidos na medição dos tempos de percurso trouxe importantes indícios sobre a penetração das ondas  $L_{cr}$ , permitindo a definição clara de uma faixa para a profundidade de penetração, que poderá ser utilizada na medição de tensões sobre o intervalo exato de profundidades no qual a penetração pode ocorrer.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada, pôde-se observar que existem outros fatores que influenciam na penetração das ondas  $L_{cr}$ , além da freqüência dos transdutores piezoelétricos. As dimensões dos cristais dos transdutores também podem influenciar na penetração, sendo que este fator pode ser encarado como um novo desafio, além de tema para um trabalho futuro.

A comprovação experimental da profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$  também trouxe algumas conclusões importantes sobre a metodologia de medição de tensões residuais utilizandose ultra-som. A influência da temperatura no tempo de percurso das ondas  $L_{cr}$  foi uma confirmação importante, pois a partir do controle da temperatura é possível medir as tensões residuais de forma mais precisa e com menores incertezas. A influência de algumas características dos transdutores piezoelétricos (não identificadas) no comportamento da relação entre o tempo de percurso e a temperatura do meio inspecionado é algo que também pode ser estudado de forma mais abrangente em trabalhos futuros.

A identificação de outros tipos de ondas gerados no interior de um meio físico definido (ondas laterais, refrações na superfície inferior das amostras, ondas de retorno e ondas refletidas da interface para as sapatas de acrílicos) é algo que pode explicar o surgimento de ondas secundárias, com altas freqüências nos sinais obtidos. A onda longitudinal criticamente refratada na superfície inferior do material (oposta à interface de contato) pode ser utilizada na avaliação de tensões residuais na superfície inferior, facilitando a inspeção, diminuindo o tempo de medição, possibilitando a avaliação das duas superfícies do material ao mesmo tempo. Esta possibilidade poderá ser confirmada em estudos futuros de modo a contribuir com as pesquisas já existentes sobre a avaliação de tensões residuais.

A utilização de três diferentes níveis de freqüência (2,25; 3,5 e 5,0 MHz) tornou possível a identificação da profundidade de penetração, apesar de se tornar difícil a medição dos tempos de percurso com a freqüência de nível mais baixo (2,25 MHz). Para se ter uma idéia melhor do efeito das freqüências dos transdutores na relação entre temperatura e tempo de percurso e na profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$ , outros transdutores com níveis de freqüência diferentes dos utilizados neste trabalho poderiam ser utilizados em trabalhos futuros.

A identificação e o controle do efeito da pressão de contato também possibilitou a diminuição das incertezas nas medições dos tempos de percurso e, por consequência, uma identificação mais precisa da profundidade de penetração das ondas  $L_{cr}$ . A utilização de uma estrutura de fixação entre a montagem de transdutores e o material inspecionado possibilitou a medição dos tempos de percurso de forma mais precisa. Com estas observações, foi possível controlar o efeito do posicionamento e da pressão de contato, diminuindo as incertezas das medições.

A modelagem teórica deste trabalho está em concordância com os resultados experimentais obtidos. Apesar das simplificações do problema acústico (condições de contorno na interface), a

teoria apresentou consistência matemática, com pequena diferença em relação aos resultados obtidos na prática.

# **Referências Bibliográficas**

ANDRINO, M. H. Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico. 2003. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas

BABY, S.; BALASUBRAMANIAN, T.; PARDIKAR, R. J. Ultrasonic Study for Detection of Inner Diameter Cracking in Pipeline Girth Welds Using Creeping Waves, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 80, 2003, p. 139 – 146.

BASATSKAYA, L. V.; VOPILKIN, A. K.; ERMOLOV, I. N.; IVANOV, V. I.; SHISHOV, A.P. Propagation of Longitudinal Ultrasonic Waves Near the Surface of a Solid, Sov. Phys.Accoust., v. 24, n. 1, 1978, pp. 15-20.

BASATSKAYA, L. V.; ERMOLOV I. N. Field of Angle-Beam Transducers With Near-Critical Wedge Angles, Defektoskopiya, n. 4, 1985, pp 3 - 11

BASATSKAYA, L. V.; ERMOLOV I. N. Theoretical Study of Ultrasonic Longitudinal Subsurface Waves in Solid Media, Defektoskopiya, n. 7, 1980, pp. 58–65.

BELAHCENE, F; LU, J. Determination of Residual Stress Using Critically Refracted Longitudinal Waves and Immersion mode, Journal of Strain Analysis, v. 37, n. 1, 2002, p. 13 – 20.

BENECH, N.; NEGREIRA, C. N. Longitudinal And Lateral Low Frequency Head Wave Analysis in Soft Media, Journal of Acoustical Society of America, v. 117, n. 6, June 2005, pp. 3424 – 3431.

BRAY, D. E. Current Directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques. 15<sup>th</sup> WCNDT, Roma, 2000, Disponível em: <a href="http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647">http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647</a> /idn647.htm>. Acesso em 15 de Abril de 2005.

BRAY, D. E.; STANLEY, R. K. Nondestrucitve Evaluation. A tool in Design. Manufacturing, and Service. Boca Raton: CRC Press, 1997, 586 p.

BRAY, D. E.; PATHAK, N.; SRINIVASAN, M. N. Residual Stress Mapping in a Steam Turbine Disk Using the L<sub>cr</sub> Ultrasonic Technique, Materials Evaluation, v. 54, n. 7, 1996, pp 832 – 839.

BREKHOVSKIKH, L. M. Waves in Layered Media. Academic Press Inc, 1980, 503 p.

CAETANO, S. F. Determinação das Constantes Acustoelásticas para Aço API 5L X70 para Gasodutos. 2003. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas

COUCHMAN, J.C.; BELL, J. R. Prediction, Detection and Characterization of a Fast Surface Wave Produced Near the First Critical Angle, Ultrasonics, November 1978.

ERMOLOV, I. N. Achievements in Ultrasonic Inspection (from Materials of the 16<sup>th</sup> International Conference), Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 41, n. 8, 2005, pp. 483–489.

99

ERMOLOV, I. N. Progress in The Theory of Ultrasonic Flaw Detection: Problems and Prospects, Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 40, n. 10, 2004, pp. 655 – 678.

ERMOLOV, I. N. The Wonders of Ultrasound, Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 41, n. 3, 2005, pp. 193 – 202

ERMOLOV, I. N.; VOPILKIN, A. K.; GREBENNIKOV, V. V.; SAMARIN, P. F. Sensitivity Trimming in Testing Austenitic Welds, Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 41, n. 1, 2005, pp. 1-6.

ERMOLOV, I. N.; RAZYGRAEV, N. P. Attenuation of Ultrasonic Main Waves With Distance, Defektoskopiya, n. 1, January 1979, pp 37 – 40.

GNÄUPEL-HEROLD, T. PRASK, H. J.; CLARK, A. V.; HEHMAN, C. S., NGUYEN, T. N.
A Comparison of Neutron and Ultrasonic Determinations of Residual Stress, Meas. Sci. Technol.
v. 11, 2000, pp. 436 – 444.

GSELL, D.; DUAL, J. Non-destructive Evaluation of Elastic Material Properties in Anisotropic Circular Cylindrical Structures, Ultrasonics, v. 43, 2004, pp. 123 – 132.

HAYASHI, T.; TAMAYAMA, C.; MURASE, MORIMASA. Wave Structure Analysis of Guided Waves in a Bar With an Arbitrary Cross-Section, Ultrasonics, v. 44, 2006, pp 17 – 24.

KAMATH, H.; WILLATZEN, M.; RODERICK, V. N. Vibration of Piezoeletric Elements Surrounded by Fluid Media, Ultrasonics, v. 44, 2006, pp. 64 – 72.

KIM, D. S.; SEO, W. S.; LEE, K. M. IE-SASW Method for Nondestructive Evaluation of Concrete Structure, NDT&E International, v. 39, 2006, pp 143 – 154.

KINSLER, L. E; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, 1982, 480 p.

LI, JIAN.; ROSE, J. L. Natural Beam Focusing of Non-Axisymmetric Guided Waves in Large-Diameter Pipes, Ultrasonics, v. 44, 2006, pp 35 – 45.

MATSUMOTO, E. Y. MATLAB 6.0: Fundamentos de Programação, Editora Érica, 2001, 310 p.

MINICUCCI, D. J. Avaliação de Tensões por Ultra-Som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C, 2003. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 2005, 643 p.

MURAYAM, R.; MISUMI, K. Development of a Non-Contact Stress Measurement System During Tensile Testing Using The Eletromagnetic Acoustic Transducer For a Lamb Wave, NDT&E International, v. 39, 2006, pp. 299 – 303.

NIKIFOROV, L. A.; KHARITONOV, A. V. Parameters of Longitudinal Subsurface Waves Excited by Angle-Beam Transducers, Defektoskopiya, n. 6, June 1981, pp. 80 – 85.

ORTEGA, L. P. C. Análise de Tensões por Ultra-Som Através da Refração de Ondas com Incidência Obliqua. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001, 178 p. Tese (Doutorado).

PEROV, D. V.; RINKEVICH, A. B.; SOMORODINSKII, Y. G. Wavelet Filtering of Signals from Ultrasonic Flaw Detector, Russinan Journal of Nondestructive Testing, v. 38, n. 12, 2002, pp. 869–882.

RAVENSCROFT, F.; HILL, R.; DUFFIL, C.; BUTTLE, D. CHIME – A New Ultrasonic Method for Rapid Screening of Pipe, Plate and Inaccessible Geometries, Proceedings 7<sup>th</sup> European Conference on NDT (ECNDT), ECNDT Paper 433, Compenhagen, Denmark, April, 1998.

RAZYGRAEV, N. P. Ultrasonic Nondestructive Testing by Head Waves: Physical Prerequisites and Practical Use, Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 40, n. 9, 2004, pp 593 – 601.

ROSE, J. L. Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge University Press, 1999, 454 p.

SANTOS, A. A. Avaliação da Referência de Tensões Para Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas, Relatório de Projeto em Parceria: Universidade Estadual de Campinas e Petróleo Brasileiro S/A. Janeiro 2006. 45 p.

SANTOS, A. A.; BRAY, D. E. Ultrasonic Stress Measurement Using PC Based and Comercial Flaw Detectors. Review of Scientific Instruments, v. 71, n. 9, p. 3464 – 3469, Sep. 2000.

SANTOS, A. A.; BRAY, D. E.; ANDRINO, M. H.; TREVISAN, R. E. Application of Acoustoelasticity to Evaluate Stress Relaxation in API 5L X 70 Steel for Pipelines, Materials Evaluation, v. 63, n. 5, May 2005, pp 511 – 515.

SANTOS, G. F. M. Avaliação de Tensões Residuais Causadas por Superaquecimento em Rodas
Ferroviárias Utilizando Acustoelasticidade. 2003. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)
– Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas

SAJAUSKAS, S. Longitudinal Surface Acoustic Waves (Creeping Waves). Monograph. Kaunas: Technology, 2004, 176 p.

SATHISH, S.; MARTIN, R. W.; MORAN, T. J. Local Surface Skimming Longitudinal Wave Velocity And Residual Stress Mapping, Journal of Acoustical Society of America, v. 115, n. 1, January 2004, pp. 165 – 171.

SOLODOV, I.; PFLEIDERER, H.; GERHARD, H.; PREDAK, S.; BUSSE, G. New Opportunities for NDE With Air-Coupled Ultrasound, NDT&E International, v. 39, 2006, pp. 176–183.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Theory of Elasticity, New York: McGraw-Hill, 1987

THURLER, L. M.; NEVES, D. L. C.; MOREIRA, A. B.; CARNEVAL, R. O. Avaliação da Técnica de Ultra-Som à Distância Aplicada a Uma Tubulação de Petróleo da REDUC, In: III CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (III PANNDT), 2003, Rio de Janeiro. 2003.

UVAROV, V. I.; SEDYKHOV, A. S.; TAROYANTS, S. S. Determination of The Optimum Directional Angles of Ultrasonic Oscillation in Testing Seamless Thick-Wall Pipes, Russian Journal of Nondestructive Testing, v. 37, n. 7, 2001, pp. 496–498.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Overview – Residual Stress: Part 1 – Measurement Techniques, Materials Science And Technology, v. 17, April 2001, pp. 355 – 365.

YA, M.; MARQUETTE, P.; BELAHCENE, F.; LU, J. Residual Stresses in Laser Welded Aluminium Plate by Use of Ultrasonic and Optical Methods, Materials Science and Engineering, A 382, 2004, p. 557-264.

YUZONENE, L. V. Elastic Longitudinal Surface Waves And Their Use For Nondestructive Inspection, Defektoskopyia, n. 8, 1981, pp 29 – 38.

ZAITSEV, V.; NAZAROV, V.; GUSEV, V.; CASTAGNEDE, B. Novel Nonlinear-Modulation Acoustic Technique for Crack Detection, NDT&E International, v. 39, 2006, pp. 184 – 194.

# Anexo A

### A.1 Algoritmo utilizado para a obtenção dos deslocamentos relativos da onda L<sub>cr</sub>

Para a modelagem teórica foram realizados programas utilizando-se a linguagem MATLAB para o estudo dos deslocamentos relativos das partículas das ondas longitudinais criticamente refratadas. A coeficiente 'r' pode ser calculado de acordo com o primeiro programa. O segundo programa executa a resolução do polinômio da equação de Rayleigh, utilizando-se o coeficiente 'r'. No terceiro programa, as raízes obtidas pela resolução do polinômio são utilizadas na obtenção do comportamento dos deslocamentos relativos.

#### • Cálculo de 'r'

```
%Calculo do coeficiente 'r'
clear;
poisson=0.29;
r=((1-(2*poisson))/(2*(poisson+1)))^0.5;
```

#### Resolução da equação de Rayleigh

%Equaçao de Rayleigh
[m,y]=solve('0 = (16\*(1-(r^2))\*(m^6)) + (8\*((2\*(r^2))-3)\*(m^4)) + (8\*(m^2)) 1','r=4.0347e-001');

#### Obtenção do gráfico dos deslocamentos relativos

```
%Programa utilizado para simular os deslocamentos
format short e
clear;
```

```
%Dados da onda
r = 4.0347e - 001;
m =-.49667788407603081731722134588253+.10415981094252929969455467791455*i;
%Dados da equação
k1=(-2*pi)*((1-((r/m)^2))^{(0.5)});
k^{2=2}/(((1/m)^{2})-2);
k3 = (2*pi*i)*((((1/m)^2)-1)^(0.5));
k4 = 1 + k2;
k5=i;
k6=(-2*pi)*((1-((r/m)^2))^{(0.5)});
k7 = (2*((((1/m)^2)-1)^(0.5))*((1-((r/m)^2))^(0.5)))/(((((1/m)^2)-2)^(0.5));
k8=(2*i*pi)*((((1/m)^2)-1)^(0.5));
k9=k5+k7;
%Grafico
L=0.001;
zf=2;
N=zf/L;
z=0:L:zf;
u=abs(real(((k5*exp(k6*z))+(k7*exp(k8*z)))/k9));
w=abs(real((exp(k1*z)+(k2*exp(k3*z)))/k4));
figure(1);
plot(z,u,z,w);
title('Deslocamentos em funçao da profundidade');
xlabel('z/lambda');
ylabel('Deslocamento');
legend('U/U0','W/W0');
grid on
```

## A.2 Curvas de Temperatura

As curvas de temperatura obtidas na análise da relação entre o tempo de percurso e a temperatura da amostra estão dispostas nas figuras a seguir. As expressões das retas aproximadas e os fatores  $R^2$  também podem ser observados.



Figura A.1: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 1 e Posição 1 (2,25 MHz)



Figura A.2: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 1 e Posição 2 (2,25 MHz)



Figura A.3: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 1 e Posição 3 (2,25 MHz)



Figura A.4: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 1 e Posição 4 (2,25 MHz)



Figura A.5: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 2 e Posição 1 (2,25 MHz)



Figura A.6: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 2 e Posição 2 (2,25 MHz)



Figura A.7: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 2 e Posição 3 (2,25 MHz)



Figura A.8: Curva obtida para a Amostra 1, Lado 2 e Posição 3 (2,25 MHz)



Figura A.9: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 1 e Posição 1 (2,25 MHz)



Figura A.10: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 1 e Posição 2 (2,25 MHz)



Figura A.11: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 1 e Posição 3 (2,25 MHz)



Figura A.12: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 1 e Posição 4 (2,25 MHz)



Figura A.13: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 2 e Posição 1 (2,25 MHz)



Figura A.14: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 2 e Posição 2 (2,25 MHz)



Figura A.15: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 2 e Posição 3 (2,25 MHz)



Figura A.16: Curva obtida para a Amostra 2, Lado 2 e Posição 4 (2,25 MHz)



Figura A.17: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 1 e Posição 1 (3,5MHz)



Figura A.18: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 1 e Posição 2 (3,5MHz)



Figura A.19: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 1 e Posição 3 (3,5MHz)



Figura A.20: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 1 e Posição 4 (3,5MHz)



Figura A.21: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 2 e Posição 1 (3,5MHz)



Figura A.22: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 2 e Posição 2 (3,5MHz)



Figura A.23: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 2 e Posição 3 (3,5MHz)



Figura A.24: Curva obtida para a Amostra 3, Lado 2 e Posição 4 (3,5MHz)



Figura A.25: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 1 e Posição 1 (3,5MHz)



Figura A.26: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 1 e Posição 2 (3,5MHz)



Figura A.27: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 1 e Posição 3 (3,5MHz)



Figura A.28: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 1 e Posição 4 (3,5MHz)



Figura A.29: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 2 e Posição 1 (3,5MHz)



Figura A.30: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 2 e Posição 2 (3,5MHz)



Figura A.31: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 2 e Posição 3 (3,5MHz)



Figura A.32: Curva obtida para a Amostra 4, Lado 2 e Posição 4 (3,5MHz)



Figura A.33: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 1 e Posição 1 (5,0MHz)



Figura A.34: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 1 e Posição 2 (5,0MHz)



Figura A.35: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 1 e Posição 3 (5,0MHz)



Figura A.36: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 1 e Posição 4 (5,0MHz)



Figura A.37: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 2 e Posição 1 (5,0MHz)



Figura A.38: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 2 e Posição 2 (5,0MHz)



Figura A.39: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 2 e Posição 3 (5,0MHz)



Figura A.40: Curva obtida para a Amostra 5, Lado 2 e Posição 4 (5,0MHz)



Figura A.41: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 1 e Posição 1 (5,0MHz)



Figura A.42: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 1 e Posição 2 (5,0MHz)



Figura A.43: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 1 e Posição 3 (5,0MHz)



Figura A.44: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 1 e Posição 4 (5,0MHz)



Figura A.45: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 2 e Posição 1 (5,0MHz)



Figura A.46: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 2 e Posição 2 (5,0MHz)



Figura A.47: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 2 e Posição 3 (5,0MHz)



Figura A.48: Curva obtida para a Amostra 6, Lado 2 e Posição 4 (5,0MHz)

#### A.3 Distribuição dos tempos de percurso

Os gráficos a seguir representam a distribuição dos tempos de percurso em relação as posições mapeadas, em diferentes níveis de temperatura. O eixo vertical representa os tempos de percurso enquanto que os outros dois eixos representam o nível de temperatura e a posição na amostra onde foi realizada a medida. As linhas coloridas contínuas representam os mapeamentos realizados antes da usinagem dos rasgos, enquanto que as linhas colorida tracejadas representam os mapeamentos realizados após a usinagem dos rasgos. Os tempos são medidos em microsegundos, enquanto que a temperatura foi medida em graus Celsius. As posições que apresentam interrupção das linhas tracejadas (mapeamentos realizados após a usinagem) representam os limites nos quais foi possível medir os tempos de percurso. Este limite é representado pela profundidade na qual foi possível fazer a ultima medição do tempo de percurso.



Figura A.49: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 1 (2,25 MHz)



Figura A.50: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 2 (2,25 MHz)



Figura A.51: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 3 (3,5 MHz)



Figura A.52: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 4 (3,5 MHz)


Figura A.53: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 5 (5,0 MHz)



Figura A.54: Distribuição dos tempos de percurso na superfície superior amostra 6 (5,0 MHz)

## A.4 Sinais Adiquiridos

As figuras que se seguem representam os sinais obtidos antes e após a usinagem dos rasgos. As cores azuladas representam os mapeamentos finais enquanto que as cores mais escuras representam os sinais dos mapeamentos iniciais.

## • Mapeamentos realizados a 2,25 MHz



Figura A.55: Sinais do mapeamento – profundidade de 4,0 mm (2,25 MHz)

Barra 1 - Lado 2 - Posicao 2



Figura A.56: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,5 mm (2,25 MHz)

Barra 1 - Lado 2 - Posicao 3



Figura A.57: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,0 mm (2,25 MHz)





Figura A.58: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,5 mm (2,25 MHz)



Figura A.59: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,0 mm (2,25 MHz)





Figura A.60: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,5 mm (2,25 MHz)

Barra 4 - Lado 2 - Posicao 3



Figura A.61: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,0 mm (2,25 MHz)





Figura A.62: Sinais do mapeamento – profundidade de 0,5 mm (2,25 MHz)

## • Mapeamentos realizados a 3,5 MHz



Figura A.63: Sinais do mapeamento – profundidade de 4,0 mm (3,5 MHz)



Figura A.64: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,5 mm (3,5 MHz)

Barra 3 - Lado 1 - Posicao 3



Figura A.65: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,0 mm (3,5 MHz)



Figura A.66: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,5 mm (3,5 MHz)

Barra 4 - Lado 1 - Posicao 1



Figura A.67: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,0 mm (3,5 MHz)



Figura A.68: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,5 mm (3,5 MHz)

Barra 4 - Lado 1 - Posicao 3



Figura A.69: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,0 mm (3,5 MHz)



Figura A.70: Sinais do mapeamento – profundidade de 0,5 mm (3,5 MHz)



## • Mapeamentos realizados a 5,0 MHz

Figura A.71: Sinais do mapeamento – profundidade de 4,0 mm (5,0 MHz)



Barra 5 - Lado 1 - Posicao 2

Figura A.72: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,5 mm (5,0 MHz)

Barra 5 - Lado 1 - Posicao 3



Figura A.73: Sinais do mapeamento – profundidade de 3,0 mm (5,0 MHz)



Figura A.74: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,5 mm (5,0 MHz)

Barra 6 - Lado 1 - Posicao 1



Figura A.75: Sinais do mapeamento – profundidade de 2,0 mm (5,0 MHz)



Figura A.76: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,5 mm (5,0 MHz)

Barra 6 - Lado 1 - Posicao 3



Figura A.77: Sinais do mapeamento – profundidade de 1,0 mm (5,0 MHz)



Barra 6 - Lado 1 - Posicao 4

Figura A.78: Sinais do mapeamento – profundidade de 0,5 mm (5,0 MHz)