

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Roselene Aparecida*
dos Santos..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *26/02/2007*


.....
ORIENTADOR

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

Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas L_{CR} em Aços API 5L X70

Autora: Roselene Aparecida dos Santos
Orientador: Auteliano A. dos Santos Júnior

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

Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas L_{CR} em Aços API 5L X70

Autora: Roselene Aparecida dos Santos
Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos 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

Sa59e	<p>Santos, Roselene Aparecida dos Efeito da temperatura sobre a medição de tensão por ondas Lcr em aços API 5L X70 / Roselene Aparecida dos. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.</p> <p>Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Ultra-som. 2. Deformações e tensões. 3. Medidores de tensão. 4. Elasticidade. 5. Tensões residuais – Medição. I. Santos Júnior, Auteliano Antunes. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Temperature effect on stress measurement by Lcr waves in API 5L X70 steel
Palavras-chave em Inglês: Acoustic-elasticity, Stress measurement, Ultrasound
Área de concentração: Mecânica dos sólidos e projeto mecânico
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, Marco Lúcio Bittencourt
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 ACADÊMICO

**Efeito da Temperatura sobre a Medição de
Tensão por Ondas L_{CR} em Aços API 5L X70**

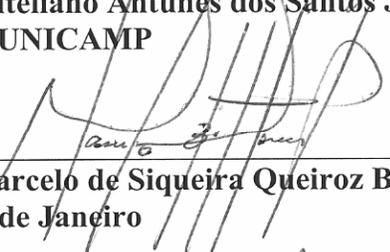
Autora: Roselene Aparecida dos Santos

Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior, Presidente
DPM/FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt
CNEM/Rio de Janeiro**



**Prof. Dr. Marco Lúcio Bittencourt
DPM/FEM/UNICAMP**

Campinas, 26 de Fevereiro de 2007

Dedicatória:

Dedico este trabalho ao meu namorado Rodrigo, aos meus pais Firmo e Jorgina, e aos meus irmãos Rosi e João.

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a ajuda de diversas pessoas a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

À Deus, pois sem Ele nada seria realizado;

Ao meu querido namorado Rodrigo Nunes, pelo imenso amor, carinho, companheirismo, incentivo, paciência e apoio em todos os momentos;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Jr., pelos ensinamentos, pela compreensão e confiança em mim depositada;

Aos meus amigos do laboratório de acustoelástica, Sidney, Ricardo e principalmente ao Marcílio, muito obrigada pela valiosa ajuda e ensinamentos.

Aos meus amigos da LuK do Brasil, por toda ajuda, incentivo e compreensão.

À minha mãe e irmão João, pelo carinho.

À minha irmã Rosi, pelo incentivo, amizade e carinho incondicionais.

E ao meu pai, pelo exemplo de honestidade, trabalho, perseverança e amor, a quem devo muito do que sou.

"A falta de amor é a maior de todas as pobrezaas."
(Madre Tereza de Calcutá)

Resumo

SANTOS, Roselene Aparecida dos, “*Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas Lcr em Aços API 5L X70*”, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 127p. Dissertação (Mestrado).

O processo de medição de tensões mecânicas por ultra-som faz uso da teoria acustoelástica, que relaciona a variação na velocidade de propagação de ondas com as deformações no objeto sob análise. Ondas ultra-sônicas propagando-se em meios elásticos são fortemente influenciadas pelas condições ambientais. Além disso, os sistemas instrumentais ultra-sônicos também podem ser influenciados por características do método e do procedimento de medição. Esta dissertação tem como objetivo estudar o efeito da temperatura sobre o resultado do processo de medição de tensões por ultra-som para aços API 5L X70. Como tópico adicional, é apresentado o estudo dos efeitos da força de contato entre o conjunto de transdutores e a amostra sob análise e também da variação da frequência dos transdutores. Neste trabalho foram utilizadas ondas longitudinais criticamente refratadas, que caminham paralelamente à superfície, logo abaixo desta. Os resultados mostraram que há uma influência significativa da temperatura sobre o resultado da medição e que esta influência pode ser quantificada. Embora a frequência dos transdutores e a pressão de contato também influenciem, estas porém, podem ser controladas durante o processo de medição.

Palavras Chave:

Acustoelasticidade, Medição de tensões, Ultra-som.

Abstract

SANTOS, Roselene Aparecida dos, “*Temperature Effect on Stress Measurement by Lcr Waves in API 5L X70 Steel*”, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 127p. Dissertação (Mestrado)

The measurement process of mechanical stresses by Ultrasonic waves uses the acoustic-elastic theory, which relates the variation of wave speed propagation with the deformations on the object under analysis. Ultrasonic waves propagating itself in elastic medium are widely influenced by environmental conditions. Besides, the ultrasonic instrumentation systems also can be influenced by the method and the measurement procedure. This research has the aim to study the temperature effects on the result of measurement process from stress by ultrasonic waves in API 5L X70. As additional topic, a study of the contact pressure effects is presented between transducer assembly and the sample under analysis and also the transducers frequency variation. Longitudinal critically refracted waves (L_{CR}) were used in this survey, which travel parallel to the surface, just below it. The results showed a significant temperature influence on the measurement results and that influence can be quantified. Although the transducers' frequency and the contact pressure were also influent in a measurement process, but both can be controlled.

Key Words

Acoustic-elasticity, Stress Measurement, Ultrasound

Índice

Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas.....	xv
Nomenclatura	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Descrição dos Capítulos.....	4
Capítulo 2	5
Revisão Bibliográfica sobre Medições de Tensões com Ultrassom.....	5
2.1 Ultra-som e a Medição de Tensões	5
Capítulo 3	21
Conceitos Básicos	21
3.1 Ondas Ultrasônicas	21
3.1.1 Natureza das Ondas e Definições	22
3.1.2 Efeito Piezoelétrico e Efeito Lippmann.....	24
3.1.3 Incidência das Ondas Ultra-Sônicas em diferentes Meios de Propagação	27
3.1.4 Leis da Reflexão	30
3.1.5 Lei de Snell	31
3.1.6 Ângulos Críticos	31
3.1.7 Ondas Ultra-Sônicas	33
3.1.8 Ondas Longitudinais	33
3.1.9 Ondas Transversais ou Cisalhantes.....	34
3.1.10 Ondas Rayleigh.....	35
3.1.11 Ondas de Love	36
3.1.12 Ondas de Lamb	36
3.1.13 Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr})	37

3.2 Tensões Residuais	39
3.3 Métodos de Medição de Tensões	40
3.3.1 Aplicação das Ondas L_{CR} para medição de Tensões	41
3.3.2 Efeitos da Temperatura	47
3.3.3 Influência da Mudança de Microestrutura na Variação da Velocidade das Ondas Ultra-Sônicas e no Efeito Acustoelástico	48
3.3.4 Tensões Elásticas	49
3.3.5 Energia de Deformação.....	51
3.3.6 Determinação das Propriedades Elásticas com Ondas Mecânicas	54
3.4 Princípios básicos de planejamento e análises de experimentos	56
3.4.1 Planejamento fatorial completo	59
3.4.2 Análise de Variância dos efeitos do planejamento fatorial.....	60
Capítulo 4	64
Materiais, Equipamentos e Métodos	64
4.1 Definição do Corpo de Prova.....	65
4.2 Sistema de Medição	67
4.3 Programa de controle e aquisição de dados	69
4.4 Sistemas de controle da força de aplicação da probe e tração	71
4.5 Controle de temperatura.....	72
4.6 Delineamento dos Experimentos	73
4.6.1 Influência sobre o tempo de percurso – estado zero de tensão	73
4.6.2 Influência da temperatura sobre o valor da constante acustoelástica (L_{11}).....	76
4.7 Análise de Variâncias dos Efeitos dos Experimentos.....	83
Capítulo 5	84
Resultados e Discussões.....	84
5.1 Avaliação da importância dos fatores de influência sobre o tempo de percurso	84
5.1.1 Estudo do efeito da força de acoplamento	86
5.1.2 Estudo do efeito da temperatura	89
5.1.3 Análise da significância da temperatura	91
5.2 Influência da temperatura sobre o levantamento da constante acustoelástica (L_{11})	94
5.2.1 Análise da significância da temperatura	96
5.2.2. Avaliação dos coeficiente polinomiais	107
5.3 Resultados para a o efeito da temperatura no estado 0 de tensão	111
5.4 Discussão dos Resultados	115
Capítulo 6	117
Conclusões	117
Capítulo 7	120
Referências Bibliográficas	120

Anexos.....126

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Sistemas automatizados e portáteis de inspeção por ultra-som (site: www.olympusndt.com)	3
Figura 3.1 – Características da Onda Periódica (Matarezi, 2001).	23
Figura 3.2 – Cristais de quartzo com seus eixos de corte (Matarezi, 2001).....	26
Figura 3.3 – Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios (Matarezi, 2001).	27
Figura 3.4 – Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2, (Matarezi, 2001).	30
Figura 3.5 – Esquema que mostra o primeiro ângulo crítico (θ_2) (Matarezi, 2001).	32
Figura 3.6 – Esquema que mostra o segundo ângulo crítico (Matarezi, 2001).....	32
Figura 3.7 – Planos de propagação da onda longitudinal (Rodrigues et al., 2000).....	34
Figura 3.8 – Plano de propagação da onda transversal (Rodrigues et al., 2000).	35
Figura 3.9 – Propagação da onda Rayleigh, (Matarezi, 2001).....	35
Figura 3.10 – Propagação da onda de Love, (Matarezi, 2001)	36
Figura 3.11 – Propagação das ondas Lamb, (Minicucci, 2003).....	37
Figura 3.12 – Distribuição do campo de pressão das ondas L_{CR} (Rose, 1999).....	38
Figura 3.13 – Ângulo crítico com ondas longitudinais (Rose, 1999).	39
Figura 3.14 – Velocidade do plano de ondas e campo de tensão no sistema de coordenadas ortogonal (Bray, 2000)	44
Figura 3.15 – Variação relativa da velocidade em relação à deformação (Bray, 2000)	45
Figura 3.16 – Regiões de rejeição e não rejeição para uma distribuição F. Galdámez (2002).	61
Figura 4.1 – Imagem da barra utilizada nos ensaios	66
Figura 4.2 – Sistema básico para medição de tensões com ultra-som.	67
Figura 4.3 – Figura com arranjo esquemático da Probe (conjunto de transdutores).....	68
Figura 4.4 – Foto de um conjunto de transdutores utilizado no trabalho.....	68

Figura 4.5 – Transdutor montado na sapata de acrílico e transdutores Panametrics desmontados.	68
Figura 4.6 – Tela do Osciloscópio do programa L-Stress.....	69
Figura 4.7 – Tela do programa que aciona os reles de aplicação de força.....	70
Figura 4.8 – Sistema utilizado para medir o tempo de percurso no estado zero de tensão.	71
Figura 4.9 – Sistema para medição de tensões utilizando ondas L_{CR}	72
Figura 4.10 – Foto do multímetro com termopar e do pirômetro digital.	72
Figura 4.11 – Marcas na peça para posicionar a probe.	75
Figura 4.12 – Imagem gerada do Pro-Engineer [®] do tracionador.....	77
Figura 4.13 – Tracionador com cilindros hidráulicos em destaque (amarelo).....	78
Figura 4.14 – Distância percorrida pela onda no material (150mm).	81
Figura 4.15 – Gráfico para a obtenção da constante L_{11}	82
Figura 5.1 – Gráfico dos principais efeitos sobre o tempo de percurso. (software Minitab [®])	85
Figura 5.2 – Gráfico das interações. (software Minitab [®]).....	86
Figura 5.3 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 2,25MHz aplicando-se diferentes forças.	87
Figura 5.4 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 3,5MHz aplicando-se diferentes forças.	88
Figura 5.5 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 5MHz aplicando-se diferentes forças.	88
Figura 5.6 – Gráfico de tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor de 2,25MHz.....	89
Figura 5.7 – Gráfico de tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor 3,5MHz.....	90
Figura 5.8 – Gráfico do tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor de 5MHz.....	90
Figura 5.9 – Gráfico das constantes da barra R1 – 1° dia	98
Figura 5.10 – Gráfico das constantes da barra R1 – 2° dia	98
Figura 5.11 – Gráfico das constantes da barra R1 – 3° dia	99
Figura 5.12 – Gráfico das constantes da barra R2 – 1° dia	99

Figura 5.13 – Gráfico das constantes da barra R2 – 2° dia	100
Figura 5.14 – Gráfico das constantes da barra R2 – 3° dia	100
Figura 5.15 – Gráfico das constantes da barra R3 – 1° dia	101
Figura 5.16 – Gráfico das constantes da barra R3 – 2° dia	101
Figura 5.17 – Gráfico das constantes da barra R3 – 3° dia	102
Figura 5.18 – Tela do Software Minitab com o teste de Tukey para a barra R3	103
Figura 5.19 – Gráfico das constantes da barra R4 – 1° dia	104
Figura 5.20 – Gráfico das constantes da barra R4 – 2° dia	104
Figura 5.21 – Gráfico das constantes da barra R4 – 3° dia	105
Figura 5.22 – Gráfico das constantes da barra R5 – 1° dia	105
Figura 5.23 – Gráfico das constantes da barra R5 – 2° dia	106
Figura 5.24 – Gráfico das constantes da barra R5 – 3° dia	106
Figura 5.25 – Valores médios de L_{11} para as cinco barras nas três temperaturas.	107
Figura 5.26 – Gráfico das constantes da barra R2 – 1° dia (Polinômio).....	108
Figura 5.27 – Gráfico das constantes da barra R2 – 2° dia (Polinômio).....	109
Figura 5.28 – Gráfico das constantes da barra R3 – 2° dia (Polinômio).....	109
Figura 5.29 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R1 – tensão zero	112
Figura 5.30 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R2 – tensão zero	112
Figura 5.31 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R3 – tensão zero	113
Figura 5.32 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R3 – tensão zero – descartando a temperatura 3	113
Figura 5.33 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R4 – tensão zero	114
Figura 5.34 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R5 – tensão zero	114

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Coeficientes de temperatura (Bray, 1998).....	48
Tabela 3.2 – Relação entre as constantes elásticas e a velocidade, direção e propagação das ondas ultra-sônicas para materiais levemente ortotrópicos (Ortega et al., 2003).....	56
Tabela 3.3 – Tabela de análise de variância (ANOVA) – Statcamp (2006)	62
Tabela 4.1: Composição Química e Propriedades Físicas do Aço API 5L x70.....	66
Tabela 4.2 – Fatores de influência na medição do tempo de percurso da onda.	73
Tabela 4.3 – Fatores de influência no levantamento da constante acustoelástica (L_{11}).	76
Tabela 4.4 – Relação entre a pressão (bar) e a tensão teórica (MPa) para cada barra.	79
Tabela 4.5 – Exemplo das planilhas para o levantamento das constantes.	83
Tabela 5.1 – Resultados da variação do tempo de percurso com relação à temperatura.	91
Tabela 5.2 – ANOVA para o Transdutor 2.25 – Força de 150,8N	93
Tabela 5.3 – Resultados de ANOVA para todos os transdutores x força x temperatura	93
Tabela 5.4 – Exemplo do levantamento de Δt	95
Tabela 5.5 – Exemplo das planilhas para o levantamento das constantes.	95
Tabela 5.6 – Tabela com resultados de L_{11} para as retas levantadas.....	96
Tabela 5.7 – Resultados de ANOVA para a barra R1.....	97
Tabela 5.8 – Resultados de ANOVA para cada barra.....	97
Tabela 5.9 – Tabela com resultados de “a” para as curvas levantadas.....	110
Tabela 5.10 – Resultados de ANOVA para os valores de “a” de cada barra.....	110

Tabela 5.11 – Resultados de ANOVA para os valores de “b” de cada barra.....	111
Tabela 5.12 – Resumo dos tempos de percurso / °C para todas as barras, na tensão zero.....	115
Tabela A1 – Barra R1 na temperatura 1.....	126
Tabela A2 – Barra R2 na temperatura 1.....	126
Tabela A3 – Barra R3 na temperatura 1.....	127
Tabela A4 – Barra R4 na temperatura 1.....	127
Tabela A5 – Barra R5 na temperatura 1.....	127

Nomenclatura

Letras latinas

c – velocidade de propagação da onda acústica	[m/s]
C – constantes elásticas	[MPa]
E – módulo de Young	[MPa]
f – frequência	[MHz]
G – módulo de cisalhamento	[MPa]
n, m, l – constantes de Murnagham	
L_{11} – constante acustoelástica para ondas longitudinais	
t – tempo de percurso	[ns]
t_0 – tempo de percurso para o estado livre de tensões	[ns]

Letras Gregas

σ – tensão axial	[MPa]
τ – tensão cisalhante	[MPa]
ε - deformação	
λ, μ – constantes de Lamé	
ρ – densidade	[Kg/m ³]
ν – coeficiente de Poisson	
ω – frequência angular	[rad/s]

Símbolos

Δt_{RS} – é o efeito da tensão residual no tempo de percurso [s]

Δt_T – é o efeito da temperatura no tempo de percurso [s]

Δt_F – é o efeito de uma força aplicada sobre tempo de percurso [s]

$\Delta \sigma$ – é a variação de tensão [MPa]

Abreviações

L_{CR} – onda longitudinal criticamente refratada

Capítulo 1

Introdução

Conhecer as tensões em componentes mecânicos é um dos desafios mais importantes para a segurança de estruturas e peças. Profissionais que se confrontam com a tarefa de determinar a segurança em estruturas metálicas sabem que as técnicas destrutivas não podem ser utilizadas na maioria dos problemas encontrados na vida real. Técnicas destrutivas não são aplicadas, por exemplo, em rodas ferroviárias, bombas, equipamentos nucleares e em dutos de petróleo.

As tensões em dutos de petróleo terrestres acontecem principalmente pela movimentação da terra, e a aplicação de um método destrutivo para sua determinação não é viável, pois não se pode, por exemplo, perfurar um duto para tal avaliação.

Os métodos não destrutivos de medições de tensão são baseados nas relações entre parâmetros físicos e cristalográficos dos materiais, alguns deles são: o método de difração de raios-X, difração de nêutrons, ferromagnetismo, método foto-elástico e o ultra-som. Todos esses métodos permitem a estimativa das tensões em pontos acessíveis ou não de um elemento através da avaliação em regiões acessíveis.

O método de difração por raios-X mede tensões residuais na superfície do material. Embora seja o método não destrutivo mais utilizado, ainda é muito difícil sua aplicação em campo, considerando também que o custo da instrumentação não é tão acessível. O método da difração de nêutrons permite avaliar a tensão ao longo da espessura, mas sua aplicação em campo é inviável, pois necessita utilizar uma fonte de nêutrons, ou seja, um reator nuclear. Pelo método magnético a determinação de tensões está baseada no efeito que a deformação de um material

ferromagnético causa em um campo eletromagnético que o envolve, e vice-versa. Assim, a presença de uma bobina sensível ao campo magnético pode detectar tensões ou sensores de deformação podem detectar variações no campo magnético. A dispersão obtida com esses métodos ainda é um problema a ser resolvido. O método fotoelástico só pode ser usado em materiais que refratem a luz polarizada, o que não é o caso do aço para uso na indústria.

O ensaio por ultra-som é um método no qual um feixe sônico é introduzido no material a ser inspecionado. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e é detectado e analisado para determinar a presença e localização de descontinuidades internas, avaliação e detecção de descontinuidades superficiais, medição de espessuras, avaliação de corrosão, determinação de propriedades físicas e estruturais, além de avaliação das tensões mecânicas. De acordo com Hughes e Kelly (1953) existe uma relação entre a velocidade das ondas ultra-sônicas e a tensão no interior de corpos metálicos homogêneos e isotrópicos. Esta relação depende das constantes elásticas do material até a terceira ordem. Conhecendo essas constantes elásticas é possível determinar as tensões a que o material se encontra sujeito, que multiplicadas pela variação da velocidade da onda em duas situações de tensão diferentes permitem o cálculo da diferença de tensões.

A maior sensibilidade à variação de tensões é obtida com métodos que utilizam ondas cisalhantes e ondas longitudinais. O primeiro método bastante utilizado, baseia-se na variação da diferença de velocidades de duas ondas cisalhantes propagando-se perpendicularmente à tensão, uma delas polarizada na direção da tensão e a outra perpendicular a esta. O método é chamado de Birrefringência. O segundo método baseia-se na variação da velocidade de uma onda longitudinal propagando-se na direção da tensão. Essa onda é gerada pela incidência de uma onda longitudinal no primeiro ângulo crítico de refração. As tensões avaliadas por este método são sempre subsuperficiais. Por percorrer no interior dos materiais analisados trata-se de uma onda volumétrica.

Custo e portabilidade são os principais fatores que limitam o uso extensivo das técnicas não destrutivas. A instrumentação de métodos ultra-sônicos tem uma grande vantagem neste aspecto porque tem o custo mais baixo entre os citados acima e existem vários sistemas portáteis de aquisição de dados, e um fator adicional é a simplicidade do método.



Figura 1.1 – Sistemas automatizados e portáteis de inspeção por ultra-som (site: www.olympusndt.com)

A revisão bibliográfica deste trabalho deixa claro que a medição de tensões por ultra-som é possível, pois sua validação comparativa foi feita por vários autores. Sabendo disso, surge a necessidade de conhecer e quantificar os fatores de influência. Neste trabalho serão realizados experimentos em chapas de aço API 5L X70, utilizando-se a técnica das ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas L_{CR}) para avaliar os efeitos que os fatores de influência exercem sobre o resultado do processo de medição. Os principais fatores de influência são: a textura do material, a temperatura, a força de contato entre o conjunto de transdutores e a peça e a frequência dos transdutores.

Com o objetivo de utilizar o método ultra-sônico em campo, os fatores que influenciam no processo de medição devem ser conhecidos. A textura do material e a temperatura são fatores difíceis de serem controlados em campo. O objetivo deste trabalho é avaliar e quantificar a influência da temperatura, assim como outros fatores possíveis de serem controlados, que são, a força do conjunto de transdutores sobre a peça e a frequência dos transdutores. A textura já é objeto de pesquisa em outros trabalhos do grupo ligado ao Laboratório de Acustoelástica da FEAGRI, onde este trabalho foi realizado.

1.1 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a influência da temperatura sobre o resultado da medição de tensões em chapas de aço API 5L X70, utilizando ondas longitudinais criticamente refratadas. Além disso, será verificada e controlada a influência da frequência dos transdutores e da força de contato entre o sistema ultra-sônico e a amostra.

1.2 Descrição dos Capítulos

O capítulo 1 introduz e localiza o problema de medição de tensões e a necessidade de avaliar o comportamento dos fatores que influenciam no resultado da medição.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre medição de tensões com ultra-som.

O capítulo 3 apresenta os conceitos básicos envolvendo a propagação de ondas, seus tipos, a forma de geração e a geometria do feixe de ondas. Apresenta também conceitos sobre tensões residuais e sobre os principais métodos ultra-sônicos para medir tensões, em especial o de ondas L_{CR} . Uma discussão sobre planejamento experimental e análise de variâncias também é incluída.

O capítulo 4 mostra os procedimentos experimentais adotados para a avaliação dos efeitos dos principais fatores de influência na velocidade das ondas L_{CR} .

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos com os experimentos e a discussão sobre estes. O trabalho é encerrado com o capítulo final de conclusões, onde o cumprimento dos objetivos é avaliado.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica sobre Medições de Tensões com Ultrassom

Este capítulo descreve a revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento de sistemas ultra-sônicos para a medição de tensões, iniciando com a criação dos métodos ultra-sônicos até os mais atuais.

2.1 Ultra-som e a Medição de Tensões

Inicialmente chamado de “teste de tinido”, é considerado o mais antigo ensaio não destrutivo para detectar discontinuidades em peças utilizando ondas sônicas. Este método, usado na avaliação grosseira de peças forjadas e fundidas, era feito através da utilização de um martelo, comparando a intensidade sonora da batida em uma peça livre de discontinuidade (padrão) com peças idênticas produzidas.

Em 1929, Sokolov, na antiga União Soviética e Mulhauser na Alemanha, realizaram as primeiras experiências utilizando a energia ultra-sônica, que possibilitou o seu uso em ensaio de materiais. A energia ultra-sônica era emitida em uma face da peça e recebida na face oposta. Em 1942, Firestone desenvolveu o princípio de “trens de ondas” em pulsos, com a fabricação de aparelhos e cabeçotes de ultra-som utilizados para detectar submarinos. Em 1945, a técnica começou a ser usada em ensaios não destrutivos para detectar defeitos internos em materiais (Matarezi et al., 2001).

Em 1950 começou o desenvolvimento de técnicas de ultra-som para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, medindo a velocidade das ondas para avaliar as constantes

elásticas dos materiais com a variação da temperatura. Hughes e Kelly, em 1953, desenvolveram a teoria da acustoelástica baseada nas constantes elásticas de terceira ordem e na teoria não-linear da elasticidade de Murnaghan. Ao medirem o tempo de transmissão de pulsos elásticos através do sólido isotrópico, as velocidades das ondas longitudinais foram determinadas como uma função da força aplicada.

Em 1958, Bergman, Shahbender, Benson e Raelson descobriram o fenômeno da birrefringência, observando a variação da velocidade da onda transversal quando o sentido da onda coincidia com o da aplicação da tensão, e quando lhe era perpendicular. Crecraft em 1967 mostrou que o ultra-som poderia ser utilizado para análise de tensões em componentes da engenharia.

Egle e Bray, em 1976, a partir de experimentos obtiveram a variação das velocidades das ondas ultra-sônicas devido à mudança de tensão induzida em aços usados em trilhos de ferrovias. Através da determinação das velocidades e dos dados acustoelásticos, Egle e Bray calcularam as constantes elásticas de terceira ordem dos materiais testados.

Em 1979, Egle e Bray projetaram um equipamento capaz de medir tensões em trilhos ferroviários, utilizando o efeito acustoelástico, era composto de dois emissores e quatro receptores. Este equipamento foi testado em laboratório sob condições controladas. Os resultados mostraram que a variação na medição do tempo de propagação da onda foi de no máximo 6 nanosegundos. Baseando-se nos resultados dos testes realizados em campo, concluíram que o equipamento é capaz de medir variações de tensões com acuracidade de aproximadamente 6,9MPa.

Em 1981, os autores supracitados observaram as variações de velocidade das ondas longitudinais de acordo com as variações de várias texturas observadas em aços, essas variações ocorrem principalmente em material de trabalho a frio. Para os autores, existem dois fenômenos primários que poderiam explicar a variação observada na velocidade da onda, uma é a diferença de tensão residual, como um resultado do trabalho a frio, e a outra é o desenvolvimento de uma textura, ou seja, orientação no metal trabalhado.

Bray e Salamanca, em 1984, estudaram uma técnica ultra-sônica chamada *head waves* (ondas de topo) para medições de forças longitudinais em trilhos de ferrovias. Esta técnica serve para determinar as tensões superficiais existentes no material. Usando as faixas do erro padrão foi visto que para os dados obtidos a mediação do tempo de percurso de $36,20\mu\text{s}$ indicaria com 68% de probabilidade que a atual variação de tensão estava na faixa de 19 a 36 MPa. Mesmo que as variações de forças previstas pelas medições por ultra-som fossem de acordo com as mostradas pelos *strain gages*, ficou claro que o tempo existente não foi ainda um dado suficiente para permitir uma avaliação absoluta da força nos trilhos, baseado nos dados obtidos do tempo de percurso ultra-sônico. Fatores, tais como, tensão residual, textura do material e temperatura demonstraram causar variações no tempo de percurso da onda, maiores que as induzidas pelas mudanças de tensão. O sucesso potencial desta aplicação está na característica média inerente da onda acústica e neste caso particular, na habilidade de transmitir o pulso sobre longa distância.

Chatellier e Touratier, em 1988, apresentaram um novo método para a determinação das constantes elásticas e de tensões em placas finas. A atenção maior nesta pesquisa é com relação à textura do material para análise de estruturas cristalinas, por isso os corpos de prova de material SAE 1020 foram escolhidos propositalmente, por serem bastante utilizados, foram recozidos para eliminar as tensões residuais do processo de manufatura. Os testes foram feitos em condições atmosféricas controladas e umidade relativa também. Através dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas de volume polarizadas nas três direções ortogonais, os planos de tensão foram determinados.

Salamanca e Bray, em 1989, utilizaram ondas longitudinais criticamente refratadas para verificar sua eficácia na determinação de tensões. Os valores obtidos nas placas laminadas, a quente e a frio são os mesmos antes de soldar, e após serem soldadas, em ambas as placas, o tempo de percurso aumentou nas regiões distantes da solda. Embora na placa conformada a frio o aumento foi maior. No mesmo ano, Bray fez experimentos com o intuito de obter resultados que pudessem ser úteis na inspeção em indústria petrolífera. O experimento consistia em medir o tempo de percurso de uma onda longitudinal criticamente refratada em placas de aço soldadas, laminadas a quente e a frio, e novamente ambas as placas tiveram o mesmo comportamento, embora as laminadas a frio tivessem apresentado uma redução na amplitude do sinal. A

conclusão do autor neste experimento é que a variação do tempo de percurso da onda longitudinal criticamente refratada foi causada por tensões internas na região da solda e que foram aliviadas pelo tratamento térmico a 593°C.

Junghans e Bray, em 1991, compararam transdutores para ondas tipo L_{CR} (*Longitudinal Critically Refracted Waves*) e transdutores para ondas do tipo *Longitudinal Surface Creeping Wave (LSCW)*, foi observado que as ondas geradas com os transdutores para ondas “creeping” apresentaram um forte amortecimento em comparação às geradas com transdutores do tipo L_{CR} , e também que os lóbulos laterais das ondas L_{CR} são muito mais fortes que os das ondas *creeping*. Portanto, as ondas L_{CR} , por não serem tão amortecidas por serem ondas puramente longitudinais polarizadas são mais indicadas para a medição de tensão utilizando-se da teoria acustoelástica.

Tanala et al, em 1994, utilizaram o método ultra-sônico para a determinação de tensão em juntas soldadas. Foram utilizadas ondas longitudinais subsuperficiais e do tipo Rayleigh. Para a calibração dos efeitos acustoelásticos do referido experimento, um teste de tensão foi utilizado em uma amostra, na qual tem a mesma estrutura da amostra a ser medida. Níveis diferentes de tensão foram aplicados com uma máquina de teste convencional, um extensômetro foi fixado em cada face da amostra, o qual torna possível obter deformação e tensões elásticas. Um transdutor acoplado a uma amostra é excitado por um excitador-receptor. Um osciloscópio digital e um computador foram utilizados para processar os sinais digitais. Utilizaram a técnica em dois tipos de estruturas, em canos de aço inoxidável soldados e em placas de liga de alumínio, 5086. Observou-se que a velocidade das ondas longitudinais propagando-se paralelamente à tensão teve um decréscimo com o aumento das tensões de tração, enquanto que a velocidade das ondas longitudinais propagando-se perpendicularmente a essa direção mostrou-se insensível à elevação da carga. Já no caso das ondas cisalhantes a mudança na velocidade mostrou-se somente sensível em relação à propagação perpendicular a tensão de tração. As ondas Rayleigh, foram sensíveis apenas para um componente de tensão biaxial. Ambas as ondas longitudinais e Rayleigh nas placas de liga de alumínio 5086 soldadas foram sensíveis em relação às tensões paralela e perpendicular à direção de propagação.

Em 1995, Bray & Junghans citaram que o efeito da temperatura sobre a velocidade de propagação da onda pode ser considerado se as condições requerem que isto seja feito. Para o aço

perlítico, o efeito da temperatura é de $0,55\text{m/s}/^\circ\text{C}$, e, para a probe do experimento realizado, o efeito foi calculado em $0,0034\mu\text{s}/^\circ\text{C}$. Mas como o experimento foi realizado entre uma temperatura de $22,6^\circ\text{C}$ e $23,2^\circ\text{C}$, a temperatura não teria um efeito significativo.

A técnica ultra-sônica com o uso de laser foi demonstrada em dois trabalhos em 1997, um por Hammoutene et al que pretendiam detectar defeitos sub-superficiais em materiais compostos, e a técnica foi considerada uma ferramenta poderosa para estas inspeções. A técnica consiste na geração que é executada no regime termoelástico, usando um pulso curto de laser. As fontes termoelásticas combinadas com um feixe de geração de diversos milímetros geram essencialmente ondas longitudinais lançadas na direção normal à superfície da amostra. As ondas são refletidas pelas falhas e produzem um deslocamento transiente da superfície frontal. Já Trenton et. al analisaram materiais contínuos, para isso desenvolveram um modelo 2-D para que as ondas geradas por laser ultra-sônico fossem propagadas, o que descreve a propagação de uma onda em um material de duas camadas unidas ou não por um agente de ligação. Os autores validaram o método através de testes experimentais e obtiveram resultados satisfatórios.

Nikitina e Ostrovsky, em 1998, apresentaram resultados experimentais que demonstraram a possibilidade de estabelecer relações entre as características de frequência da propagação de ultra-som e a anisotropia interna de materiais normalmente utilizados. Utilizaram amostras de ligas de alumínio, que foram produzidos de secções retangulares e circulares, as amostras tinham históricos de produção diferentes, e conseqüentemente, a anisotropia interna também. A preparação para as medições foi bastante cuidadosa, ressonâncias transversais foram eliminadas com um damper especial. Através da velocidade da onda obtiveram para as ligas de alumínio um valor de tensão externa, que geraria a mesma anisotropia de aproximadamente 20MPa. A anisotropia interna é tipicamente devido à textura do material, ou seja, de acordo com a orientação predominante dos grãos.

Medindo a dispersão da velocidade da onda, a fim de julgar a universalidade de tais relações para um dado material, no caso do experimento dos autores, o erro foi de 5 a 10% com relação à dispersão menor dos parâmetros considerados. Apesar disso, estes experimentos confirmam a plausibilidade do método sugerido. Mediram também a correlação entre a anisotropia interna e atenuação de frequência dependente, neste teste mediram chapas de aço de

35mm de espessura. Começaram medindo o tempo da onda, depois mediram a diferença relativa dos valores da velocidade da onda para duas frequências, 2,5 e 5 MHz. O erro de medição de intervalos temporais foi de 5ns, que é em pulsos, maior que três períodos (0,6 μ s), o erro relativo foi menor que 1%. Cada série de medição foi feita com amostras da mesma barra, do mesmo processo de usinagem.

Nesses experimentos os resultados mostraram que em chapas de ligas de alumínio a anisotropia interna não é homogênea, distribuída em um espaço que pode criar erros consideráveis em medições de tensões com métodos ultra-sônicos, mesmo que a média do parâmetro de anisotropia seja conhecido. Para diminuir os erros é sugerido que se façam estudos preliminares do material a fim de encontrar as relações entre a sensibilidade da estrutura, parâmetros acústicos e anisotropia interna do material.

Em 1998, Duquennoy, Ouafthouh e Ourak analisaram o estado de tensões em chapas grossas utilizando o método da variação da velocidade das ondas Rayleigh, as amostras analisadas foram chapas grossas de liga de alumínio. Os autores desenvolveram equações da propagação das ondas Rayleigh em um material ortotrópico tracionado para o levantamento da relação entre a tensão estática e a velocidade das ondas. E para encontrar os perfis de tensão, fizeram uma análise das velocidades em profundidades diferentes na espessura, propagando as ondas superficiais no sentido de laminação e perpendicular ao mesmo. Comparando-se este método ultra-sônico com outros perfis estabelecidos por um método destrutivo (método da remoção da camada), enfatiza que ambas as técnicas levam a perfis similares. Pois, como mencionam os autores, conhecendo o valor máximo de tensão de aproximadamente, 100MPa o erro máximo calculado é em torno de 0,3MPa, é um valor considerado muito pequeno.

Em 1998, Gori et al. desenvolveram um sistema capaz de medir tensões residuais em aro de rodas ferroviárias, utilizando o fenômeno da birrefringência acústica. O nome dado ao sistema foi ECOMAT, produzida através de um conjunto de transdutores EMAT de duas bobinas, os resultados obtidos foram comparados por extensometria. As tensões deste experimento variaram em mais ou menos 10 Mpa, ou menos de 5% do limite de escoamento, o que significa um bom resultado para medições mecânicas. O método foi validado para utilização em inspeções na indústria e no campo.

O laser ultra-sônico foi apresentado em alguns trabalhos em 1998, os dois citados aqui foram utilizados na indústria aeronáutica, devido à complexidade das peças observou-se a necessidade de desenvolver novas técnicas de inspeção.

Trétout, da empresa de aviação Dassault utilizou o laser para inspecionar peças de diferentes composições. Um protótipo chamado LUIS (“Laser Ultrasonic Inspection System”), que consiste na utilização de um laser de baixa potência sobre a superfície: uma primeira parte de energia incidente é refletida e outra parte é absorvida e convertida em calor. Devido ao calor gerado, um rápido e localizado aumento da temperatura próximo do ponto da superfície onde o feixe é introduzido, produzindo um campo de tensão elástica. Isto ocorre devido à expansão térmica do material, o que dá origem a ondas acústicas longitudinais, transversais e superficiais. A magnitude das ondas depende do material e suas características óticas e termoelásticas, de parâmetros para geração e emissão do laser, do comprimento de onda, da forma e da duração do pulso.

E Monchalin et al. no mesmo ano desenvolveram um método de inspeção com laser ultra-sônico para a caracterização de materiais da indústria aeronáutica também. Na aplicação do laser ultra-sônico, o feixe foi focalizado na superfície do material e a detecção do movimento ultra-sônico foi executado fora da superfície a ser inspecionada. Isto permitiu uma fácil inspeção de formas complexas. Os autores consideraram uma chapa de curvatura simples, onde dois lasers atuaram na detecção e na geração colidindo na mesma localização na superfície de curvatura da chapa em inspeção. A geração produziu uma onda ultra-sônica que se propagou normalmente na superfície da chapa que foi testada. Os autores concluíram que há uma facilidade em caracterizar peças complexas através deste método, com isto o método mostrou-se muito mais eficiente e mais rápido que um sistema mecânico convencional.

A utilização do método de inspeção ultra-sônico pulso-eco é citada em dois trabalhos em 1998. Stepinski e Vagnhammar utilizaram o método para detectar automaticamente a separação de camadas estruturais. Este método já vem sendo utilizado na indústria aeroespacial. A detecção da separação foi possível devido à mudança do coeficiente de variação resultante da variação da amplitude e da fase dos respectivos ecos. Os autores desenvolveram uma técnica de processamento capaz de detectar a separação da interface adesiva entre borracha isolante e o

alumínio. O método foi baseado na representação tempo-frequência de sinais ultra-sônicos adquiridos durante a inspeção das camadas estruturais. Esta representação serviu como um método de pré-processamento capaz de extrair características usadas para a detecção, estas características foram alimentadas por uma rede neural de percepção de múltiplas camadas que executou a detecção. O sistema demonstrou capacidade para detectar pequenas falhas, que poderiam induzir a separação completa nas estruturas que foram testadas.

Neuenschwander, em 1998, utilizou a técnica ultra-sônica pulso-eco por imersão para inspecionar cabos supercondutores de alta corrente, aplicando a emissão do som perpendicular à interface inspecionada. Os resultados encontrados com um conjunto de transdutores simples deram uma clara visão sobre a importância da sua utilização na informação da qualidade das uniões entre diferentes composições.

Em 1999, Bittencourt et al. descreveram sobre a utilização do ultra-som no Brasil. O uso das técnicas de ultra-som no Brasil começou em 1954 no Instituto de Tecnologia Aeronáutica (ITA). No início dos anos 70 as empresas começaram a utilizar o ultra-som em inspeções como parte da linha de produção, ou seja, no controle de qualidade. O objetivo principal era localizar defeitos internos. E muitos outros novos desenvolvimentos foram feitos nas últimas décadas. Como exemplo, medir a vazão da água em reatores nucleares, estudo de porosidade em cerâmica, medição de tensão em barras metálicas e aro de rodas ferroviárias, neste segmento, estão agora interessados no desenvolvimento de procedimentos preditivos para diminuir o número de acidentes e a perda de recursos econômicos, determinação da direção de laminação em chapas metálicas e tamanho de grão de materiais metálicos, esta técnica ainda está em desenvolvimento, mas novas pesquisas demonstram que poderá ser aplicado.

Em 1999, Kypa et al. utilizaram a técnica de medição por ultra-som com ondas L_{CR} (que tem um efeito acustoelástico maior na propagação do que as ondas transversais). Foi montado um sistema de duas placas fixadas por interferência, gerando tensões residuais, para testar a aplicação da técnica da birrefringência. Nas placas, as tensões foram medidas de duas formas: com strain gages (destrutivo) e calculadas por elementos finitos (teórico). Os resultados foram comparados com o sistema de ondas L_{CR} , o qual mostrou uma correlação muito forte com os resultados dos

elementos finitos e com os strain gages. O sistema mostrou as tensões verdadeiras existentes no sistema, sendo uma técnica excelente para solução de vários problemas de engenharia.

Santos e Bray, em 2000, mediram tensões em barras por ultra-som, aplicando ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Os testes foram feitos usando um sistema de aquisição com placa de ultra-som de alta velocidade, instalado em micro computador e em instrumentos comerciais de baixa resolução, usados comercialmente para detectar trincas e espessura de materiais. Os resultados foram comparados aos obtidos com strain-gages. Os ensaios comprovaram que a velocidade de propagação da onda longitudinal na direção do carregamento foi mais sensível a mudanças de tensão. O carregamento das barras foi feito gradualmente por dois cilindros hidráulicos e a pressão foi controlada por manômetro. Os transdutores (emissor e receptor) foram colocados em sapatas de “plexiglass”, com ângulo crítico para gerar ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}), bem como, fixados em uma régua a uma distância fixa. Os resultados mostraram que os dois sistemas (computador pessoal e comercial) se aproximaram da tensão real (medida com strain gages), com erros de 12% ($\pm 2,5\text{MPa}$) para tensões da ordem de 20MPa e 2% ($\pm 2,0\text{MPa}$) para tensões da ordem de 100MPa.

Em 2000, Bouda et al. apresentaram uma técnica experimental desenvolvida para medir velocidades e atenuações de ondas ultra-sônicas através de um aço de dureza variável. A correlação entre medidas ultra-sônicas e a dureza de aços foram investigadas. Para caracterizar a dureza do material, as amostras de aço foram processadas termicamente para gerar o gradiente de dureza longitudinal. Uma técnica de imersão foi usada para as medidas de velocidade e atenuação para ondas internas (transversais e longitudinais). Foram utilizadas quatro amostras, uma segunda análise metalográfica foi feita, de modo que permitisse que fossem identificadas as mudanças estruturais devido ao processamento. A estrutura mudou de martensita para uma estrutura ferrita-perlita, passando através das estruturas bainita e bainita-perlita. As medidas das velocidades das ondas transversais e longitudinais foram analisadas e observou-se que as curvas tinham a mesma aparência. Estas começaram com um valor máximo, decaindo após isso até estabilizar em um valor constante. Os autores também fizeram uma comparação das medidas dos coeficientes de atenuação das ondas longitudinais e transversais. Observou-se também uma semelhança entre as

curvas. Os autores mostraram que na zona mais elevada de dureza, a atenuação é mais importante devido à homogeneidade, onde uma maior difusão da onda é notada.

Halkjaer et al., em 2000, investigaram a propagação de ultra-som através de uma solda austenítica experimentalmente e também por simulações numéricas. Os autores mostraram que a propagação de ultra-sônicas em um meio anisotrópico é fundamentalmente diferente daquele de um meio isotrópico. E também a não homogeneidade da solda resulta em uma dispersão da reflexão e refração das ondas ultra-sônicas. O modelo matemático foi feito através de um algoritmo analítico e também através de uma solução numérica. Estas simulações usaram um modelo de solda capaz de descrever a anisotropia e a não homogeneidade. Diversas simulações foram executadas usando escolha de parâmetros diferentes do modelo de solda. Para cada simulação um tipo de varredura foi utilizado e comparado com o experimental. Baseado nesta comparação um melhor modelo de parâmetros foi escolhido. A estrutura desta solda modelada foi comparada com a micrografia da solda real, com resultados adequados.

Em 2000, Bray descreveu aplicações da técnica ultra-sônica para medição de tensão superficial ao longo de comprimentos finitos. Aplicações específicas foram discutidas: na laminação, em placas de alumínio soldadas, em vasos de pressão, em rotores de turbina, em trilhos e em rodas ferroviárias. A técnica de ultra-som considera a variação do tempo de percurso da onda, que foi relacionado com a tensão residual por meio da constante elástica de terceira ordem do material. A geração das ondas foi feita por transdutores piezoelétricos e a medição do tempo por placas de aquisição acopladas em um computador pessoal, com capacidade de coletar uma amostra a cada 10 nanosegundos. O autor mediu a sensibilidade da variação da velocidade nos corpos de prova, mudando a direção de propagação das ondas. A variação mais significativa ocorreu com as ondas longitudinais propagadas na mesma direção das tensões. O tipo de onda usada foi a longitudinal criticamente refratada (L_{CR}), que mostrou ser mais sensível às variações de tensões do material. A medição experimental das tensões foi feita com dois transdutores (um receptor e outro emissor), colados em uma régua a uma distância fixa e pressionados para evitar a variação da espessura da camada do acoplante, que é uma fonte de erros, causando variações na velocidade da onda.

Chance, em 2000, utilizou ondas longitudinais criticamente refratadas para medir relaxação de tensões residuais em placas de aço soldadas. O autor confirmou que existe uma tensão de relaxação residual definida em chapas soldadas de aproximadamente 45MPa. Utilizando-se de strain-gauges e da técnica de ultra-som L_{CR} , foi demonstrado que o método corresponde bem aos tradicionalmente utilizados. Demonstrou também que tem uma resolução necessária para detectar variações súbitas no estado de tensão. O desvio padrão alcançado pelo sistema de aquisição utilizado foi de aproximadamente 2ns no tempo de percurso da onda, para um corpo de prova de 5,08cm e 6ns para o de 15,24cm. O autor comenta também sobre a facilidade em trabalhar com o método.

Sankar, em 2000, mostrou as vantagens do uso de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}), em comparação com as ondas de volume no método ultra-som, que são apropriadas para caracterizar propriedades volumétricas e as L_{CR} , para superficiais e sub-superficiais. Foram medidas as velocidades das ondas L_{CR} em aço inoxidável AISI 304, com diferentes níveis de trabalho a frio (de 0 a 50%). As ondas L_{CR} foram geradas usando sapatas de acrílico, com inclinação segundo o seu ângulo crítico, para gerar ondas superficiais. Foram utilizadas seis placas de aço AISI 304 em diferentes níveis de trabalho a frio: os resultados foram apresentados em forma de gráficos. A variação de velocidade da onda L_{CR} com o nível de trabalho a frio de cada placa foi comparada com os resultados obtidos com a medição de ondas de volume. As ondas L_{CR} mostraram vantagens práticas em comparação com as de volume. A conclusão do autor foi de que as ondas L_{CR} apresentam propriedades de ondas superficiais e subsuperficiais, por viajarem abaixo da superfície do material.

Landa e Plesek, em 2000, estudaram várias técnicas não destrutivas para a avaliação de tensões residuais. São quatro: a técnica de impulso, técnica de ondas contínuas, técnica de medição das tensões a partir dos cálculos das constantes elásticas de terceira ordem e birrefringência acústica. A técnica de impulso, e de ondas contínuas são criticamente comparadas. A diferença dos resultados é menor que 10%. O método de onda contínua consome mais tempo e tem menor precisão. Birrefringência acústica pode também ser medida diretamente utilizando transdutores sob polarização de ângulo de 45° respeitando as direções principais de

tensão. A diferença da técnica espectral apresentada nas medições de velocidade separadas é menor que 0,6%.

Andrino, em 2002, desenvolveu um sistema automático para medição da constante acustoelástica no laboratório de Acustoelástica da Universidade de Campinas. O equipamento relaciona a variação do tempo de percurso com a tensão. O sistema foi desenvolvido para calcular as tensões através da medição do tempo de percurso de ondas longitudinais superficiais (ondas L_{cr}), utilizando a teoria acustoelástica. Para a geração das tensões foi construído um conjunto mecânico, que consiste numa máquina de tração com dois atuadores hidráulicos, possibilitando o conhecimento da força aplicada por meio de um manômetro digital. O sistema permite determinar a constante acustoelástica, cujo valor possibilita avaliar o estado de tensões em componentes mecânicos.

Duquennoy et. al., em 2002, determinaram teoricamente os coeficientes acustoelásticos das ondas Rayleigh de um material ortotrópico para suas características, isto é, a densidade e as constantes elásticas de segunda e terceira ordem. O conhecimento dos coeficientes acustoelásticos é indispensável para estimar a tensão residual pelo método ultra-sônico. Neste caso, foi escolhida uma liga de alumínio, o qual tem simetria ortotrópica, porque esta simetria é normalmente encontrada em áreas de controle não destrutivas, a liga é 2214, muito utilizada na indústria aeronáutica, seus coeficientes acustoelásticos são calculados teoricamente pelas constantes de segunda e terceira ordem. Então estes coeficientes são medidos diretamente em um estágio experimental a fim de se fazer uma comparação entre os coeficientes acustoelásticos das ondas Rayleigh medidos e os calculados. Esta comparação permitiria validar o equacionamento teórico e também mostraria que é possível calcular os coeficientes acustoelásticos teoricamente, pelas características intrínsecas do material ao invés de medir diretamente durante a fase de calibração. Isto facilitaria calcular coeficientes de peças com diferentes geometrias, pela dificuldade de medir e também de aplicar tensões. As equações de propagação das ondas Rayleigh em materiais ortotrópicos foram desenvolvidas a fim de estabelecer relações entre variações relativas de velocidades e tensões estáticas. Para o equacionamento foi necessário assumir algumas hipóteses: o sólido é hiperelástico, todas as deformações estão na área elástica, a pré-deformação é estática e a pré-deformação e rotações são pequenas. Os corpos de prova são

chapas laminadas finas. A identificação das constantes elásticas foram feitas a partir da determinação das constantes elásticas de segunda ordem e de terceira ordem. Para determinar as constantes acustoelásticas das chapas, diferentes tensões de compressão foram aplicadas à amostra, foi utilizado um pistão de 700kN de capacidade de carga, operado por uma bomba hidráulica, comprimindo a amostra. A célula de carga tem uma precisão relativa de 0,032% e as forças são controladas e medidas por strain-gages. Os transdutores e receptores foram montados no mesmo suporte para não mudar o comprimento da onda, a frequência utilizada foi de 2,25MHz. Os valores obtidos com medições e calculados foram bastante próximos para esta liga de alumínio com ondas Rayleigh. Os erros de medições calculados para os coeficientes de 10.6% e de 2.52%. Os autores concluíram com estas experiências que o método por eles desenvolvido pode ser utilizado para calcular as tensões residuais com métodos ultra-sônicos quando as características do material analisado não permitir uma medição direta dos coeficientes acustoelásticos.

Caetano, em 2003, determinou as constantes acustoelásticas para ondas longitudinais e transversais para o aço API 5L – X70, utilizados em gasodutos e oleodutos, e para a validação do sistema de medição foram avaliados corpos de prova de aço 1020, e também o levantamento das direções de laminação (birrefringência) dos dois aços citados para verificar a influência da textura devido à laminação no tempo de percurso das ondas. Como o aço API 5L-X70 são laminados em chapas de 10,8 mm, que são calandradas e soldadas para formar os tubos, o processo de laminação introduz anisotropia significativa no material, o que pode influenciar nas propriedades elásticas e acustoelásticas da peça final. Para os experimentos, o autor desenvolveu um sistema mecânico para aplicar cargas sobre uma barra, que seria basicamente uma máquina de tração, onde, cilindros hidráulicos permitem que a força aplicada à barra seja conhecida. Foram utilizados dois cabeçotes, montados em um suporte com duas sapatas de acrílico que permitem que as ondas atinjam a superfície do material em um ângulo de cerca de 28°, que é o primeiro ângulo crítico, são utilizados transdutores de 2,25MHz. Para a aquisição dos dados foi utilizado o programa L-Stress desenvolvido por Andrino, 2002, a partir da plataforma gráfica de programação LabVIEW V.6.i. Os resultados das direções de laminação, obtidos pela birrefringência, foram coerentes com as direções de laminação apresentadas pelo fornecedor das barras, o que foi confirmado também, pela observação por metalografia. As constantes

acustoelásticas apresentaram diferença significativa devido à variação da direção de laminação em relação a direção da força aplicada na barra. Com relação à sensibilidade do sistema utilizado, demonstrou ser sensível à variação de tensão, tanto com ondas longitudinais, como com ondas transversais. O método de ondas transversais apresentou dispersão um pouco menor em relação às constantes acustoelásticas longitudinais (L_{11}). A constante acustoelástica L_{11} , obtida para o aço 1020 foi de 2,35, com desvio padrão de aproximadamente 5%, o autor compara com a literatura que apresentam para este aço 2,39 com desvio de 2%, o que demonstra que o método e os instrumentos utilizados são adequados para ser empregado neste trabalho.

Minicucci, em 2003, apresentou um trabalho para avaliação de tensões residuais por ultra-som em aros para rodas ferroviárias novas, utilizando-se de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). O objetivo do trabalho era de fazer a inspeção final na linha de produção de rodas novas, eliminando os ensaios destrutivos e para avaliar as tensões residuais providas dos processos de fabricação. Foram utilizadas neste trabalho 12 rodas ferroviárias forjadas com diâmetro de 38”(965mm). Os tempos de percurso da onda foram medidos pelo programa de aquisição L-Stress (Andrino, 2002). O autor calculou a incerteza de medição de duas formas, a primeira, com relação ao máximo desvio padrão encontrado nos pedaços de roda avaliados (valor de 3,08ns), e o segundo como sendo o desvio padrão geral de todas as medidas (valor de 4,02ns), o valor da incerteza foi de 5,06ns. O valor da variação da repetibilidade em cada ponto encontrado foi de 15,41MPa. A incerteza total de medição do processo em relação à variação da tensão foi de 15,4MPa. O método demonstrou ser adequado para medir o nível de tensões residuais em rodas ferroviárias forjadas novas. E o custo dos equipamentos também são acessíveis, por serem comerciais. O autor sugere também a utilização do método em oficinas de manutenção de rodas para medição de tensões em rodas usadas, o que possibilitaria detectar tensões de tração que podem comprometer a segurança da composição. O autor conclui que o método mostra resultados precisos, o que confirma sua aplicação como alternativa viável para a determinação de tensões em comparação com métodos usuais.

Em 2003, Santos fez a avaliação de tensões residuais causadas por superaquecimento em rodas ferroviárias, utilizando a técnica de ultra-som, empregando ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{CR}). Para simular o aquecimento devido à frenagem, foi utilizada uma

bobina de indução de geometria semelhante a uma sapata de freio, foram medidas dez rodas forjadas novas e após sofrerem alteração devido ao superaquecimento. Os resultados foram satisfatórios comparados com a literatura. O autor avaliou também a sensibilidade do sistema como um todo, que foi de 3,04 MPa/ns. Concluindo portanto que para um desvio padrão de 10ns, a incerteza é de $\pm 30,4$ MPa, para um nível de confiança de 65%. Isto representa uma boa resolução para ensaios não destrutivos. A dispersão dos resultados para cada ponto, foi inferior a ± 10 ns (em tensão, $\pm 30,4$ MPa). Já para o aro todo o maior desvio foi de $\pm 21,93$ MPa. Então para um limite de confiança de 99%, a variação é cerca de ± 44 MPa, pouco mais de 10% do limite de escoamento do aço da roda (cerca de 750 MPa), o que significa um excelente resultado para ensaio não destrutivo.

Em 2003, Andrino em seu trabalho avaliou as tensões residuais em juntas soldadas de placas de aço API 5L X65 e API 5L X70 e para a determinação da relaxação em placas de aço API 5L X70, utilizada em dutos, utilizando o efeito acustoelástico. Foram utilizadas ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) e ondas transversais ou cisalhantes. As tensões longitudinais foram determinadas nas juntas soldadas após a soldagem e após o alívio de tensões. Os perfis de tensão longitudinal, levantados tanto para o aço API 5L X65 como para o API 5L X70, mostraram concordância com o perfil de tensões esperado. Verificou-se uma região de tração no cordão de solda e, em regiões mais afastadas, estas tensões foram diminuindo. Os resultados após o alívio de tensões se mostraram coerentes. O autor afirma que o método ultrassônico foi efetivo para a obtenção dos perfis de tensão residual para materiais usados na confecção de gasodutos e para medir a relaxação de tensão residual em chapas soldadas.

Em 2004, Kawashima desenvolveu uma formulação para calcular as variações de velocidades da onda ao longo da espessura do material. Somente as médias dos valores destas velocidades são obtidas, e como em muitos casos, as características do material variam conforme a espessura devido a tratamentos térmicos e processos de manufatura. Uma tensão residual típica que ocorre ao longo da direção de espessura é como uma curva parabólica. Em princípio, medir as variações de velocidade ao longo da espessura é impossível utilizando uma técnica de pulso-eco. Mas existe uma possibilidade de obter tais variações de velocidade, utilizando-se de procedimentos de espectro inverso, usando a ressonância de espectro da espessura medida, neste

trabalho a ressonância espectro da espessura do material foi numericamente calculada para uma chapa que consistia de muitas camadas (layers), (101 camadas (layers)). O autor utilizou o EMAT (Transdutor acústico eletromagnético) para fazer as medições, o que demonstrou uma boa compatibilidade entre os valores calculados e os medidos, e o corpo de prova tinha três camadas, alumínio: 1,01mm, mercúrio: 1.182mm e alumínio 1.01mm, foram escolhidos estes dois materiais por possuírem uma impedância acústica muito parecida. O autor concluiu que com os experimentos e formulações é possível obter frequências de ressonância para chapas com muitas camadas.

Capítulo 3

Conceitos Básicos

Este capítulo descreve conceitos sobre ondas ultrasônicas, tensões residuais e uma abordagem básica sobre planejamento de experimentos e análise de variâncias.

3.1 Ondas Ultrasônicas

Num sentido bastante amplo, uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio com velocidade definida. Em geral, fala-se de uma onda quando a transmissão do sinal entre dois pontos distantes ocorre sem que haja transporte direto de matéria de um desses pontos ao outro (Nussenzveig, 1983).

Um pequeno objeto flutuante mostra como se move a superfície da água na passagem da onda: para cima e para baixo, para frente e para trás, mas permanecendo em média na mesma posição. É a forma da onda, no caso a crista, que se propaga de um ponto a outro sobre a superfície. O objeto não se move em relação ao ponto de impacto, mas apenas sobe e desce, as ondas movem-se para fora, no sentido do movimento das cristas e vales.

Considere-se uma corda esticada em que se aplica um impulso em uma das extremidades, sacudindo-a para cima e para baixo. O pulso se propaga como uma onda ao longo da corda. Cada ponto da corda atingido oscila para cima e para baixo, ou seja, a perturbação é um deslocamento na direção perpendicular à direção de propagação da onda. Uma onda como esta se chama onda transversal.

Um exemplo extremamente importante de ondas transversais são as ondas eletromagnéticas, em que os campos elétrico e magnético em cada ponto oscilam mantendo-se sempre perpendiculares à direção de propagação.

3.1.1 Natureza das Ondas e Definições

As ondas são classificadas em mecânicas e eletromagnéticas. Ondas mecânicas são originadas pela deformação de uma região de um meio elástico. Para se propagarem, necessitam de um meio material, portanto não se propagam no vácuo (Minicucci, 2003).

O som é um fenômeno acústico que consiste na propagação de ondas sonoras produzidas por um corpo, que vibra em um meio material elástico. As ondas sonoras propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Seu entendimento é fundamental para o estudo de ultra-som.

As ondas de luz, da mesma forma que as de rádio, são ondas eletromagnéticas, originadas por cargas elétricas oscilantes. O meio onde se propagam não necessita ser material, pode ser no vácuo.

As ondas são periódicas quando seguem uma à outra em sucessão regular e se repetem identicamente em intervalos de tempos iguais.

Na acústica são descritos os fenômenos relacionados com as oscilações mecânicas (vibrações), que originam as ondas sonoras, bem como, a propagação dessas ondas nos sólidos, líquidos e gases. As ondas sonoras são periódicas, sendo classificadas em audíveis e inaudíveis, dependendo do número de períodos que ocorram na unidade de tempo (frequência).

O som pode ser classificado em: infra-som, ondas com frequências inferiores a 20 Hz e que são inaudíveis; sons que têm frequência compreendidas entre 20 Hz e 20 MHz, que são percebidos pelo ouvido humano, e ultra-som, que são ondas com frequências superiores a 20 MHz, e também são inaudíveis (Caetano, 2003).

As ondas ultra-sônicas comportam-se da mesma forma que as ondas sônicas audíveis. Elas propagam-se em meios elásticos, que podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, mas nunca no vácuo.

O feixe sônico e o feixe de luz são semelhantes em muitos aspectos, ambos são ondas e obedecem aos mesmos princípios, cada um viaja em uma velocidade característica. Em um meio homogêneo, a velocidade depende das propriedades do meio e não das propriedades da onda.

As oscilações mecânicas produzem ondas periódicas que geram uma curva harmônica. Neste tipo de oscilação mecânica senoidal, a partícula do meio executa um movimento harmônico em torno da posição original de repouso. A figura 3.1 mostra uma forma de onda senoidal ou periódica com suas características.

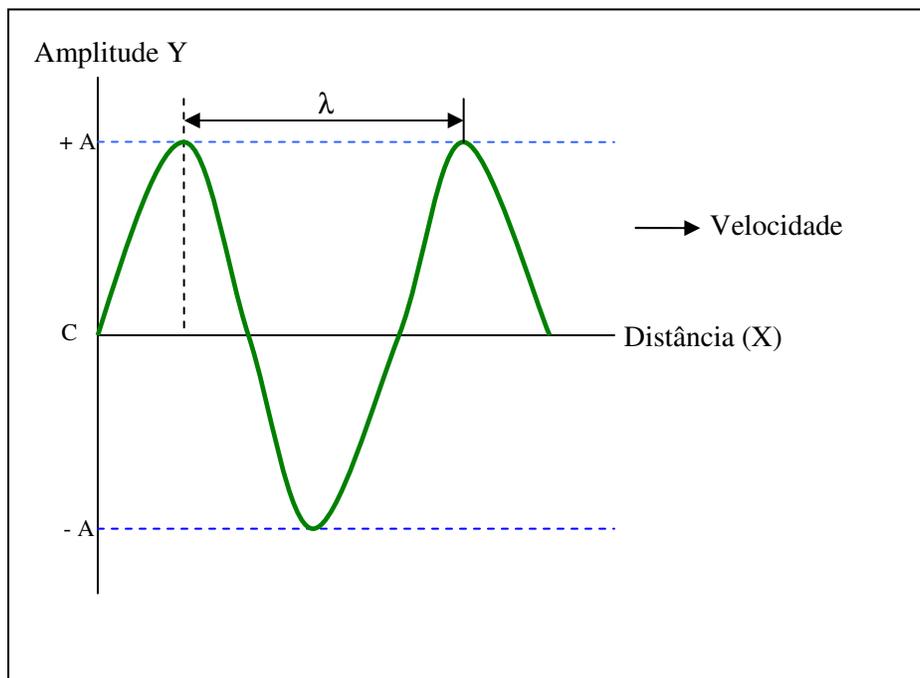


Figura 3.1 – Características da Onda Periódica (Matarezi, 2001).

As equações a seguir que são aplicadas às ondas ultra-sônicas:

$$Y = A \text{ sen } (x) \quad (3.1)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

$$V = \lambda f \quad (3.3)$$

Onde:

A – Amplitude da onda (valor máximo da crista da onda no eixo Y);	[m]
Y – Valor da amplitude da onda no eixo Y;	[m]
x – Valor da distância percorrida no eixo X em graus;	[°]
λ – Comprimento de onda (distância entre duas cristas ou vales consecutivos)	[m]
T – Período (menor intervalo de tempo de repetição do fenômeno periódico), pode ser definido como tempo em que a onda gasta para completar a distância “ λ ”;	[s]
f – Frequência (número de ciclos em uma unidade de tempo);	[Hz]
V – Velocidade de propagação da onda no meio.	[m/s]

A velocidade das ondas e a taxa com que a amplitude e a energia da onda decrescem durante a propagação são constantes e características do meio em que a onda está se movendo.

3.1.2 Efeito Piezoelétrico e Efeito Lippmann

O efeito Piezoelétrico é um fenômeno que ocorre com os cristais anisotrópicos, nos quais se desenvolvem cargas elétricas quando os cristais são submetidos a deformações mecânicas. Este fenômeno foi descoberto por Pierre e Jacques Currie em 1880 e manifesta-se da seguinte forma: aplicando-se cargas mecânicas nas duas faces opostas de uma lâmina de cristal de quartzo, ocorre a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias nessas faces, isto é, em uma das faces formam-se cargas positivas e, na outra, cargas negativas. Experiências mostraram que as cargas elétricas desenvolvidas na lâmina de cristal são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas (Matarezi, 2001).

No ano seguinte (1881), Lippmann apresentou sua teoria de que o fenômeno Piezoelétrico também deveria possuir um fenômeno inverso ou recíproco, portanto, o efeito Lippmann é o efeito recíproco do efeito Piezoelétrico. Neste caso, observam-se deformações mecânicas nos cristais quando são submetidos a tensões elétricas. O fenômeno se manifesta aplicando-se nas faces opostas de uma lâmina cristalina (às quais se aplicam eletrodos) cargas elétricas positivas (de um lado) e negativas (outro lado). Estas cargas provocam uma deformação no cristal, análoga à deformação sofrida pela lâmina no efeito Piezoelétrico. Aplicando-se uma tensão V a uma lâmina de cristal piezoelétrico, ocorre uma deformação “d” (expansão) positiva na espessura da

lâmina. Invertendo-se a polaridade da tensão, ocorre também uma inversão na deformação, isto é, uma contração (deformação negativa).

Se for aplicada uma tensão alternada na lâmina do cristal, ela sofrerá deformações sucessivas, passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada. Se a lâmina for cortada do bloco de cristal, de tal forma que sua frequência de vibração natural coincida com a frequência de vibração ou tensão que lhe foi aplicada, ocorrerá o fenômeno da ressonância na lâmina e a amplitude da vibração será máxima.

Neste caso existe a transformação de energia elétrica em mecânica. Todos os dispositivos que transformam uma espécie de energia em outra são chamados de transdutores. No equipamento de ultra-som o efeito Lippmann é usado para gerar ultra-sons. Os transdutores ou cabeçotes podem gerar vibrações mecânicas de alguns ciclos por segundo (Hertz), até cerca de 25.000.000 de ciclos por segundo (25 MHz).

Os ultra-sons são usados principalmente em ensaios para detecção de discontinuidades no interior de peças metálicas. Para isto, coloca-se o cabeçote com uma das faces sobre a peça metálica, alimentando-o com uma corrente elétrica alternada com a frequência desejada. A lâmina de cristal entrará em vibração e o dispositivo funcionará como um transmissor ou emissor de ultra-som, que penetrará na peça transmitindo-lhe uma vibração mecânica de alta frequência.

Reciprocamente se ao mesmo dispositivo (sem corrente elétrica) for colocado sobre a superfície do metal e esta estiver vibrando, a vibração se transmitirá pelo contato com a lâmina cristalina, a qual sofrerá deformações sucessivas, que darão origem a cargas elétricas de polaridades contrárias em suas faces. Quando o dispositivo funciona desta forma é chamado de receptor. O dispositivo, além de transformar energia elétrica em mecânica, transforma também energia mecânica em elétrica. Quando o transdutor é usado com esta dupla função recebe o nome de emissor-receptor.

O quartzo cristalino é um prisma de seis faces, com uma pirâmide em cada base. Todo cristal exhibe o fenômeno da birrefringência (dupla refração), porém há uma direção privilegiada

em que não exhibe; a do eixo óptico do cristal. As lâminas dos cristais de quartzo são cortadas na direção do seu eixo óptico. O quartzo cristalino tem seu eixo óptico coincidindo com uma reta que une os vértices das pirâmides opostas. A figura 3.2 representa um cristal de quartzo com o eixo óptico marcado pela direção Z. Além deste eixo, existem os eixos ou direções X que passam através de arestas opostas, e eixos ou direções Y que passam pelo centro de faces opostas. Existem três eixos X e três eixos Y em um cristal de quartzo.

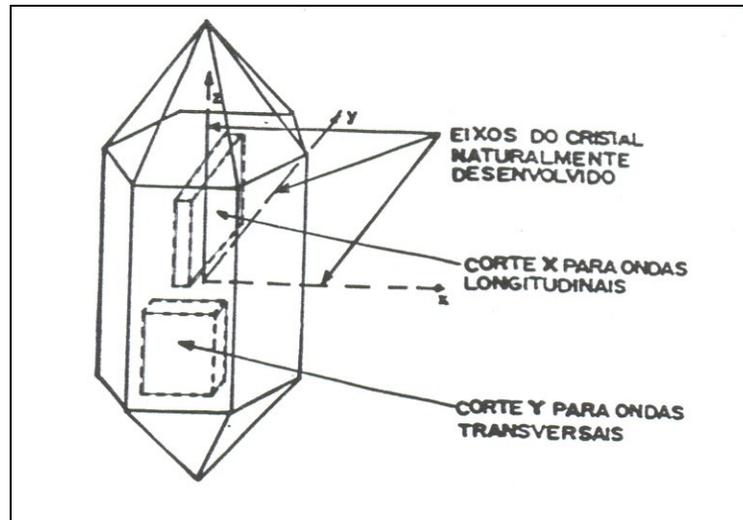


Figura 3.2 – Cristais de quartzo com seus eixos de corte (Matarezi, 2001).

Tanto os eixos X como os eixos Y são perpendiculares ao eixo Z do cristal de quartzo. As lâminas de cristais de quartzo são cortadas segundo os eixos X e Y. Outros cristais, além do cristal de quartzo, possuem também características piezoelétricas e são usadas em transdutores de ultra-som, tais como:

- Titanato de Bário – um dos mais eficientes na emissão acústica, porém fica limitado à utilização em frequências abaixo de 15MHz. São os mais empregados na inspeção de soldas e materiais forjados.
- Metaniobato de Chumbo – este cristal possui estabilidade em altas temperaturas e módulo piezoelétrico elevado, porém possui baixa velocidade sônica e baixa resistência mecânica sendo empregado em casos de frequência elevada.

- Titanato Zirconato de Chumbo – possui alto módulo piezoelétrico com grande capacidade de emissão e de amortecimento. É recomendado para ensaios de penetrabilidade.
- Sulfato de Lítio – É um cristal produzido artificialmente, com grande capacidade de amortecimento, porém é solúvel em água e sua aplicação se limita a temperaturas inferiores a 75°C. Este tipo de cristal é o mais empregado em aplicações médicas.

3.1.3 Incidência das Ondas Ultra-Sônicas em diferentes Meios de Propagação

Quando ondas ultra-sônicas longitudinais propagando-se em um meio “1”, incidem perpendicularmente em uma interface de mudança para o meio “2”, algumas relações matemáticas são válidas. Cada anteparo ou mudança do meio de propagação recebe o nome de interface. Um mesmo meio pode ter várias interfaces, sendo desta forma chamado de meio descontínuo.

Quando a onda-sônica passa de um meio 1 para um meio 2, apenas uma característica fica constante: a frequência. A figura 3.3 mostra o conceito de onda incidente e refletida em diferentes meios.

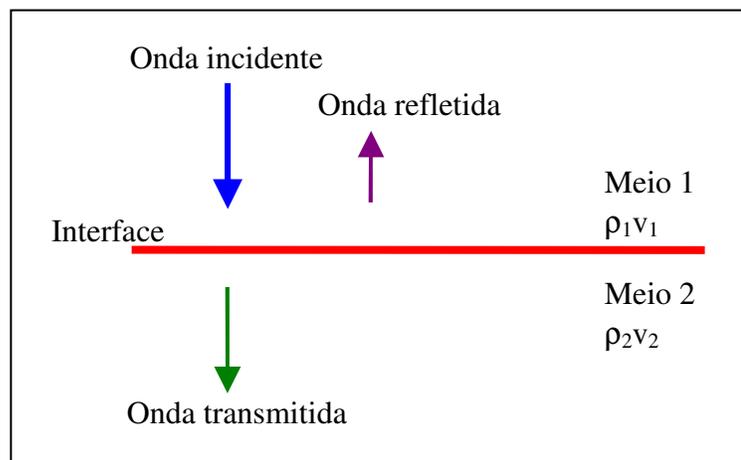


Figura 3.3 – Ondas incidentes e refletidas em diferentes meios (Matarezi, 2001).

As características acústicas do meio 1 são ρ_1 e v_1 , onde ρ_1 é a densidade do meio 1 e v_1 a velocidade da onda neste meio, de modo análogo, as características do meio 2 são ρ_2 e v_2 . Considerando as características acústicas dos dois meios, algumas relações matemáticas podem

ser obtidas entre as amplitudes das ondas refletidas e transmitidas, e a amplitude da onda incidente.

Considerando “A” como amplitude da onda incidente, “B” como amplitude da onda refletida e “C” como amplitude da onda transmitida, as amplitudes “B” e “C” podem ser escritas em função de “A” (Matarezi, 2001):

$$B = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} . A \quad (3.4)$$

$$C = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} . A \quad (3.5)$$

As equações 3.4 e 3.5 foram estabelecidas em função das amplitudes das ondas ultra-sônicas no meio. A condição de maior interesse no emprego do ultra-som é aquela em que a amplitude da onda transmitida de um meio 1 para um meio 2 é máxima, condição em que a amplitude da onda refletida é mínima. Nesta condição a potência transmitida é máxima e, numa situação ideal, a amplitude da onda refletida deve ser igual a zero (B=0). Logo, pode-se obter a equação 3.6.

$$0 = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} . A \Rightarrow \rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (3.6)$$

A quantidade de energia refletida ou transmitida por uma onda é definida como impedância acústica (Z), que é igual ao produto das duas características acústicas: a densidade do meio e a velocidade de propagação da onda, conforme a equação 3.7.

$$Z = \rho V \quad (3.7)$$

Para uma transmissão máxima de energia (ou intensidade sonora) de um meio para outro, considerando um caso ideal, é necessário que as impedâncias acústicas dos dois meios sejam

iguais, condição necessária para que a reflexão da onda seja nula, conforme a equação 3.6. A equação 3.8 mostra esta relação:

$$Z_1 = Z_2 \quad (3.8)$$

No caso prático, sempre existe diferença de impedância entre os meios, porém, para uma transmissão máxima de energia, é necessário que as impedâncias entre os meios sejam mais próximas possíveis. Para que isto aconteça, normalmente é usado um acoplante entre o transdutor e a peça. A escolha do acoplante correto é muito importante para o desempenho do ensaio de ultra-som, estando diretamente relacionado com a sua precisão. A seguir, estão listadas as impedâncias acústicas de alguns materiais mais usados no ensaio de ultra-som, bem como de acoplantes. Nesta relação pode-se observar que a transmissão máxima ocorrerá para os meios, glicerina / aço, pois a glicerina é o acoplante que tem a impedância acústica mais próxima do aço.

$$Z_{\text{água}} = 1,5 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{ar}} = 430 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{aço}} = 4,7 \times 10^7 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{óleo}} = 1,1 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$$

$$Z_{\text{glicerina}} = 2,4 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2.\text{s}$$

As impedâncias acústicas permitem calcular as taxas de reflexão (R) e de transmissão (T) de uma onda, conforme as equações 3.9 e 3.10 (Rodrigues et al. 2000).

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.9)$$

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (3.10)$$

3.1.4 Leis da Reflexão

Um dos mais importantes tópicos associados à medição de tensões por ultra-som é o estudo dos fenômenos associados às leis de reflexão. A velocidade de uma onda refratada depende da velocidade no meio e do ângulo de incidência da onda no meio.

Quando uma onda incide em uma interface de separação entre um meio 1 e 2, com uma determinada inclinação, parte desta onda é refratada para o meio 2, com componentes longitudinais e transversais, e parte é refletida para o meio 1, também com componentes longitudinais e transversais.

A figura 3.4 mostra uma onda longitudinal (XY) incidindo obliquamente na interface entre o meio 1 e o meio 2, segundo a direção XY. A onda longitudinal é refletida e refratada segundo as direções YW e YZ, respectivamente, para os meios 1 e 2. A incidência oblíqua da onda XY origina duas outras ondas transversais, que se propagam segundo as direções YW' e YZ', em 1 e 2. Este fenômeno ocorre nas bordas ou interfaces dos dois meios.

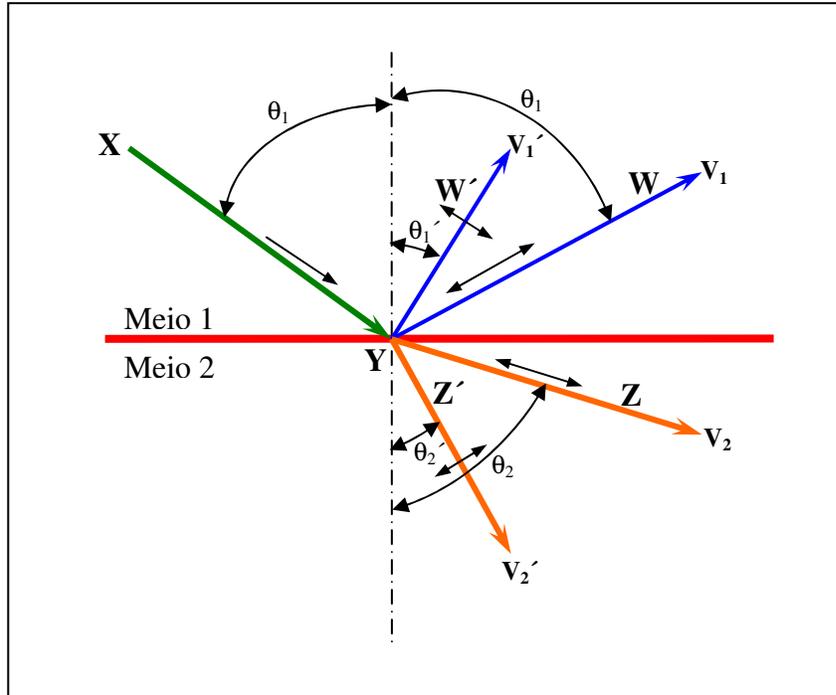


Figura 3.4 – Ondas refratadas e refletidas nos meios 1 e 2, (Matarezi, 2001).

A figura 3.4 mostra ainda as seguintes grandezas:

V_1 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refletida no meio 1 (YW);

V_2 – Velocidade de propagação da onda longitudinal refratada no meio 2 (YZ);

V_1' – Velocidade de propagação da onda transversal refletida no meio 1 (YW');

V_2' – Velocidade de propagação da onda transversal refratada no meio 2 (YZ').

Na incidência oblíqua das ondas ultra-sônicas, dois importantes fatos acontecem a partir da conversão dos modos de vibração, que são muito importantes no projeto de cabeçotes de ondas longitudinais. Na interface de separação dos dois meios no qual incide obliquamente uma onda, sendo o meio 1 líquido e o meio 2 sólido, ocorre que V_2 é maior que V_1 . Este fato acontece porque a velocidade V_2 da onda longitudinal refratada é maior do que V_1 da onda longitudinal refletida. Este fato faz com que haja um desvio da onda refratada YZ, que se afasta da normal fazendo com que θ_2 (refração) seja maior que θ_1 (reflexão).

3.1.5 Lei de Snell

Na acústica, a lei de Snell é muito usada, pois relaciona as velocidades com os ângulos de incidência, refração e reflexão das ondas. Esta relação é fundamental no estudo das ondas superficiais, que requerem um cálculo preciso do ângulo de incidência para serem geradas na superfície da peça.

A lei de Snell é dada pela equação 3.11:

$$\frac{V_1}{\text{sen } \theta_1} = \frac{V_2}{\text{sen } \theta_2} = \frac{V_2'}{\text{sen } \theta_2'} = \frac{V_1'}{\text{sen } \theta_1'} \quad (3.11)$$

3.1.6 Ângulos Críticos

Quando o ângulo θ_1 da onda incidente XY aumenta, a onda refratada YZ fica mais perto da superfície, até que, em determinado momento, θ_2 fica igual a 90° , gerando uma onda longitudinal superficial. Este ângulo de incidência θ_1 , necessário para tornar θ_2 igual a 90° , é chamado de primeiro ângulo crítico. A figura 3.5 mostra a formação do primeiro ângulo crítico.

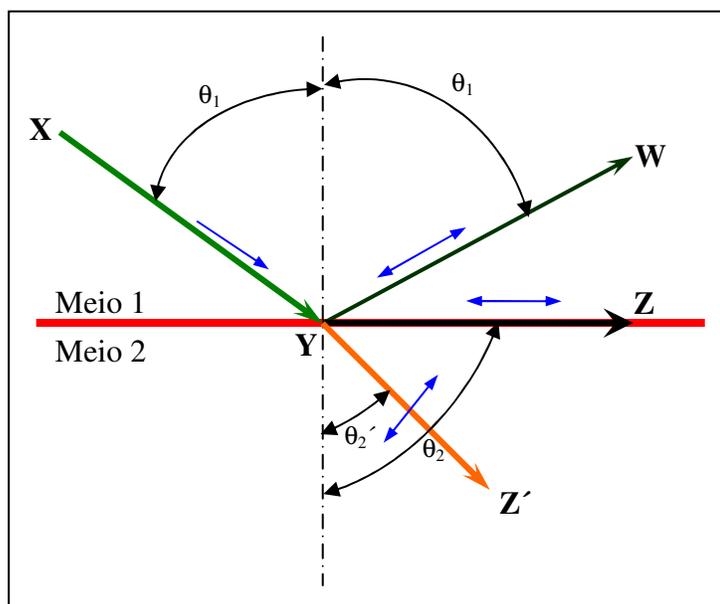


Figura 3.5 – Esquema que mostra o primeiro ângulo crítico (θ_2) (Matarezi, 2001).

Se continuar aumentando o ângulo de inclinação da onda incidente θ_1 , a onda refratada transversal YZ' , ficará mais perto da superfície da peça. Quando o ângulo de incidência θ_1 for suficiente para que θ_2' seja igual a 90° , ter-se-á a formação do segundo ângulo crítico. A figura 3.6 mostra a formação do segundo ângulo crítico.

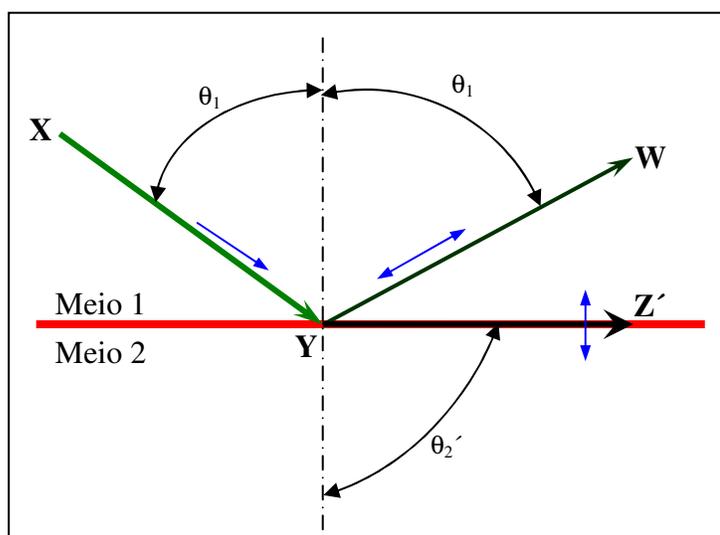


Figura 3.6 – Esquema que mostra o segundo ângulo crítico (Matarezi, 2001).

Nos transdutores de ondas transversais (cisalhantes), o cristal deve ser posicionado de tal modo que o ângulo de incidência da onda fique entre o primeiro e o segundo ângulo crítico, pois desta forma a onda refratada no material será apenas do tipo transversal, evitando erros de interpretação, visto que tais ondas possuem velocidades diferentes.

3.1.7 Ondas Ultra-Sônicas

Quando partículas atômicas ou moleculares são removidas de suas posições de equilíbrio por qualquer força externa, tensões internas agem para recolocar as partículas em suas posições originais. Em razão das forças interatômicas existentes entre partículas adjacentes, o deslocamento de uma partícula induz a um deslocamento de partículas vizinhas e assim por diante, propagando desta maneira, uma onda elástica. O deslocamento real da matéria que ocorre nas ondas ultra-sônicas é extremamente pequeno. A amplitude, o modo de vibração e a velocidade das ondas difere nos sólidos, líquidos e gases em função da grande diferença na distância média entre as partículas nestes diferentes estados de matéria.

Considerando que o meio de propagação é elástico, ou seja, que as partículas que o compõem não estão rigidamente ligadas entre si e podem oscilar em qualquer direção, classificam-se as ondas ultra-sônicas em três tipos: longitudinais, transversais e superficiais.

3.1.8 Ondas Longitudinais

Uma onda é longitudinal, quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram na mesma direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso os planos de partículas do meio de propagação não mantêm as mesmas distâncias uns dos outros, conforme mostra a figura 3.7.

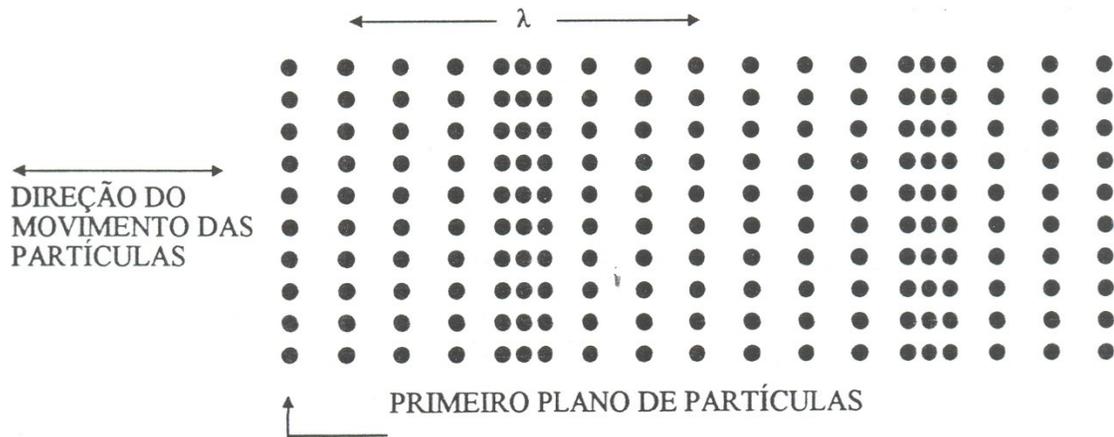


Figura 3.7 – Planos de propagação da onda longitudinal (Rodrigues et al., 2000).

Ao ser aplicada uma onda ultra-sônica longitudinal num meio elástico, o primeiro plano de partículas desse meio é comprimido por ação do impacto da onda, que transmite a energia cinética recebida sucessivamente para os próximos planos de partículas, os quais entram em vibração. Deste modo, todo o meio elástico vibra e, no caso da onda longitudinal, esta vibração ocorre na mesma direção de propagação da onda. Aparecem em sucessão, zonas de compressão e rarefação. As distâncias entre cada duas compressões ou entre duas diluições determinam o comprimento da onda.

As ondas longitudinais propagam-se nos sólidos, líquidos e gases. Estas ondas possuem altas velocidades de propagação, variando conforme o meio:

Aço – $V_1 = 5900 \text{ m/s}$

Água - $V_1 = 1480 \text{ m/s}$

Ar - $V_1 = 330 \text{ m/s}$

Plexiglass - $V_1 = 2670 \text{ m/s}$

3.1.9 Ondas Transversais ou Cisalhantes

Uma onda é transversal quando as partículas do meio em que ela se propaga vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda nesse meio. Neste caso, os planos de

partículas no meio de propagação mantém a mesma distância uns dos outros, conforme a figura 3.8:

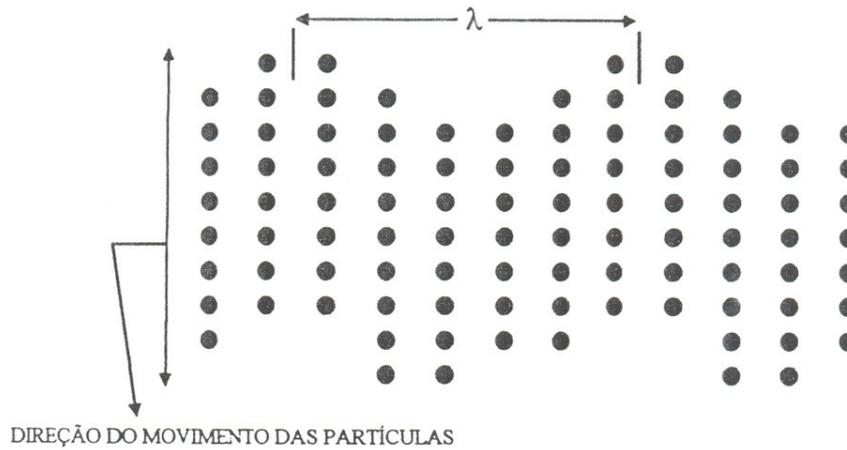


Figura 3.8 – Plano de propagação da onda transversal (Rodrigues et al., 2000).

As velocidades para as ondas transversais no aço e alumínio são:

Aço – $V_t = 3230\text{m/s}$

Alumínio – $V_t = 3130\text{m/s}$

3.1.10 Ondas Rayleigh

São ondas que se propagam à semelhança das ondas na superfície das águas. Apresentam um movimento elíptico e se propagam exclusivamente na superfície de um sólido cuja espessura seja maior que o comprimento de onda, conforme a figura 3.9:

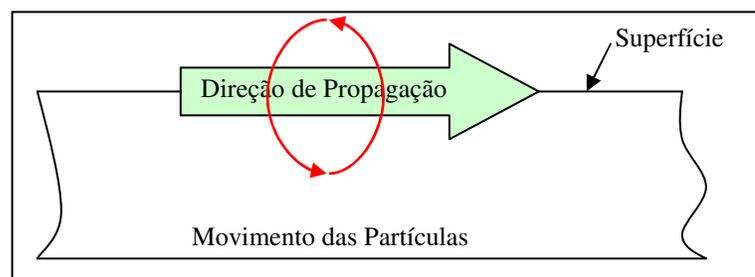


Figura 3.9 – Propagação da onda Rayleigh, (Matarezi, 2001).

Neste tipo de onda, o movimento das partículas é tanto longitudinal como transversal em relação à direção do feixe. A velocidade de propagação das ondas Rayleigh é aproximadamente 10% inferior à de uma onda transversal no mesmo material.

3.1.11 Ondas de Love

Propagam-se na superfície do material sem componente normal. Apresentam um movimento paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação do feixe. Sua aplicação restringe-se à inspeção de camadas finas de materiais que foram recobertos por outro de maior impedância acústica, como, por exemplo, chapas galvanizadas com eletrodeposição. A figura 3.10 mostra a propagação da onda de Love.

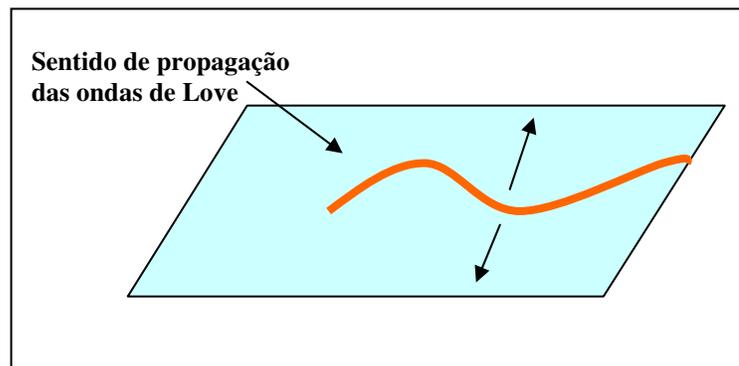


Figura 3.10 – Propagação da onda de Love, (Matarezi, 2001)

3.1.12 Ondas de Lamb

As ondas de Lamb, mostradas na figura. 3.11, ocorrem quando a espessura do material é comparável ao comprimento de onda. A aplicação destas ondas ocorre na detecção de discontinuidades internas e superficiais. As ondas de Lamb são geradas em chapas finas, por meio de ondas longitudinais de velocidade e frequência pré-determinada.

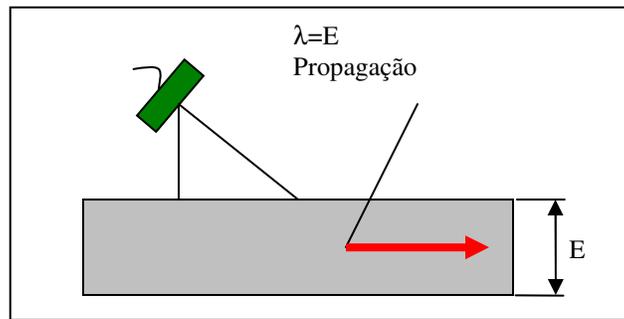


Figura 3.11 – Propagação das ondas Lamb, (Minicucci, 2003).

As ondas de Lamb são classificadas em simétricas e assimétricas, sendo que cada modo se propaga com uma velocidade de fase, que depende da espessura da chapa e da frequência.

3.1.13 Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr})

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 superfície. A forma usual de criar tais ondas é a utilização de meios de refratar as ondas paralelamente à superfície, refratando as ondas paralelamente à superfície, gerando as chamadas ondas longitudinais criticamente refratadas ou ondas L_{CR} .

São ondas geradas no primeiro ângulo crítico, que é aquele em que a onda longitudinal tangencia a superfície do material. Assim elas são definidas como ondas longitudinais na superfície do material. Para isso são utilizados transdutores angulares com inclinação próxima ao primeiro ângulo crítico.

As ondas longitudinais criticamente refratadas recebem vários nomes na literatura inglesa, dentre os quais se pode citar: “subsurface elastic waves”, “head waves”, “creeping waves” e “lateral waves”.

Este tipo de onda tem sido largamente empregado na detecção de defeitos sub-superficiais em materiais isotrópicos.

A teoria estabelece que no primeiro ângulo crítico, ou perto dele, para ondas longitudinais incidindo numa interface (líquido-sólido), vindo de um meio de menor velocidade da onda longitudinal, coexistem dois tipos de ondas, as sub-superficiais e as ondas longitudinais. As duas ondas satisfazem as condições de contorno na face livre do sólido, onde todas as tensões são supostamente iguais a zero. Qualquer distúrbio na face livre se move com velocidade igual à da onda longitudinal no sólido. A amplitude deste deslocamento diminui com o aumento da distância, conforme a relação $(1/r^n)$, onde “ r ” é a distância e “ n ” varia de 1,5 a 2,0. Este fato indica que estas ondas são fortemente atenuadas comparadas com as ondas de volume, nas quais o índice “ n ” varia de 0,5 a 1,0. As ondas sub-superficiais podem ser detectadas em qualquer ponto da superfície, porém, o cabeçote receptor precisa estar com uma inclinação igual à do primeiro ângulo crítico.

Uma característica das ondas superficiais é a distribuição de amplitude da pressão acústica no plano de incidência. Esta forma de distribuição do campo de pressão revela que a máxima sensibilidade acontece quando as ondas estão em um ângulo de 10° a 20° da superfície livre, conforme a figura 3.12. Esta propriedade faz com que as ondas L_{CR} sejam pouco sensíveis a defeitos superficiais e à rugosidade do material.

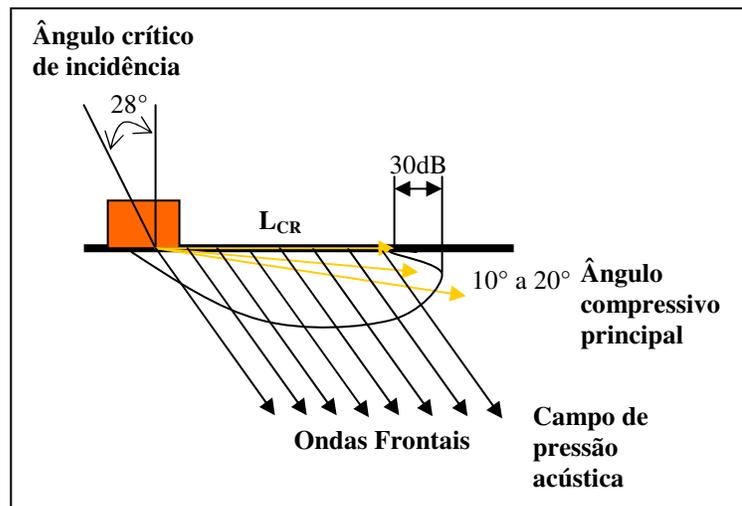


Figura 3.12 – Distribuição do campo de pressão das ondas L_{CR} (Rose, 1999).

A definição das ondas L_{CR} está relacionada com o primeiro ângulo crítico, o qual, para meios isotrópicos, é calculado pela lei de Snell (3.11). Assim, o ângulo crítico (θ_{cr}) é dado pela expressão (3.14), na qual V_1 é a velocidade da onda no meio 1 e V_2 no meio 2. A figura 3.13 mostra as ondas longitudinais incidindo no ângulo crítico (Rose, 1999).

$$\theta_{cr} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (3.14)$$

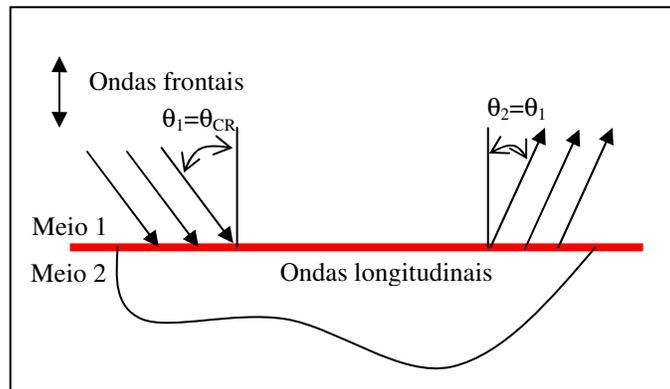


Figura 3.13 – Ângulo crítico com ondas longitudinais (Rose, 1999).

3.2 Tensões Residuais

Tensões residuais ou internas consistem em um sistema de tensões que existem em um corpo quando este está livre de esforços externos. Estas tensões são oriundas de uma deformação plástica não uniforme no corpo, principalmente devido a mudanças não uniformes de forma e volume.

As tensões residuais são consideradas apenas como tensões elásticas, o valor máximo não pode ultrapassar o limite elástico do material. A tensão que excede este valor, sem a ação de forças externas, será relaxada por uma deformação plástica até atingir o valor da tensão de escoamento, condição necessária para estabelecer o equilíbrio interno. As tensões residuais aparecem nos processos mecânicos, térmicos e químicos, que produzem deformações permanentes e não uniformes na forma ou no volume das peças.

Existem três tipos de tensões residuais, que são: de primeira, segunda e terceira ordem. As tensões de primeira ordem ou macro-tensões são originárias das interações entre grupos de grãos de um determinado material, as de segunda ordem ou micro-tensões, são oriundas de efeitos relacionados à apenas um grão. E as de terceira ordem, também designadas como micro-tensões atuam no material de forma sub-microscópica e atômica.

Tensões residuais de tração ou compressão, contidas em um determinado corpo sólido e elástico, são aquelas que existem sem a aplicação de carregamento externo (forças externas ou gradientes de temperatura).

As tensões residuais podem ser produzidas por deformações heterogêneas, contrações térmicas e transformações de fase induzidas por processos de manufatura. Os processos que introduzem tensões residuais são: forjamento, extrusão, dobramento, usinagem, eletro-erosão, solda, brasagem e tratamentos térmicos e superficiais como, têmpera, eletrodeposição, jateamento de granalhas etc.

3.3 Métodos de Medição de Tensões

O problema de medir tensões residuais tem sido abordado e resolvido com um certo grau de sucesso. Tensões residuais nunca são medidas diretamente e sim, medindo-se a deformação que existe em um corpo sob tensão. Diferentes técnicas têm sido utilizadas para medir estas tensões residuais que podem ser classificadas como: técnicas tensão-relaxação, técnicas de difração, técnicas que usam propriedades sensíveis à tensão e técnicas de fratura. Comumente, são utilizados os seguintes métodos: mecânicos, difração de raios X, difração de Nêutrons, magnéticos, de fraturas e o método que utiliza a propagação das ondas ultra-sônicas.

Este último método, que não é destrutivo, é baseado na variação da velocidade das ondas ultra-sônicas propagando-se através de um material em um estado de deformação elástica, ou seja, tensionado. Este efeito foi denominado de efeito acustoelástico.

3.3.1 Aplicação das Ondas L_{CR} para medição de Tensões

A técnica ultra-sônica baseia-se na variação da velocidade das ondas ultra-sônicas com a tensão (aplicada ou residual). Este efeito é chamado de efeito acustoelástico, que é baseado na anisotropia induzida pelas tensões. A teoria acustoelástica foi desenvolvida por Hughes e Kelly (1953), que foram os precursores, cujas fórmulas foram concebidas para velocidade de ondas em meio isotrópico, para um estado de tensões uniaxial ou hidrostático.

As ondas elásticas se propagam em sólidos isotrópicos com uma velocidade característica do material em teste. As velocidades das ondas longitudinais (V_l) e transversais (V_t) são dadas pelas expressões 3.15 e 3.16:

$$\rho V_l^2 = \lambda + 2\mu = K + \frac{3}{4}\mu \quad (3.15)$$

$$\rho V_t^2 = \mu \quad (3.16)$$

Onde:

ρ - densidade do material;

λ e μ - constante de Lamé;

K - módulo de volume.

O comportamento elástico do material é descrito por λ e μ , numa primeira aproximação (Lei de Hooke). Em engenharia, as propriedades elásticas são mais frequentemente caracterizadas pelo módulo de Young (E) e o módulo de cisalhamento (G). As relações entre essas propriedades e as constantes de Lamé são:

$$G = \mu \quad (3.17)$$

$$E = \mu \left(\frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \right) \quad (3.18)$$

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} \quad (3.19)$$

Ondas longitudinais e transversais se propagam no volume dos materiais. Mudando o ângulo de incidência, o feixe sônico pode retornar à face da peça como uma onda sub-superficial perto da superfície. A onda superficial (V_R) é uma onda guiada, e segue a forma da superfície da peça, dada pela expressão 3.20:

$$V_R = V_t \frac{(0,87 + 1,12\nu)}{(1 + \nu)} \quad (3.20)$$

Onde:

ν - coeficiente de Poisson do material.

O modelo mais usado para descrição do efeito acustoelástico mostra a influência do estado de tensões na velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas dadas por Hughes e Kelly, usando a teoria das deformações finitas de Murnaghan's, e os termos de terceira ordem da energia elástica de um sólido. A energia de deformação por unidade de volume $\phi(\epsilon)$, pode ser escrita como uma série de potências em função da deformação elástica ϵ , conforme a expressão 3.21.

$$\phi(\epsilon) = \phi_0 + gC_{ij}\epsilon_{ij} + \frac{1}{2}C_{ijkl}\epsilon_{ij}\epsilon_{kl} + \frac{1}{6}C_{ijklmn}\epsilon_{ij}\epsilon_{kl}\epsilon_{mn} + \dots \quad (3.21)$$

Se a tensão é zero antes da deformação, ϕ_0 é zero. O segundo termo é a energia potencial, que pode ser igual a zero desde que o nível de referência não seja importante. C_{ijkl} e C_{ijklmn} são os tensores de segunda e terceira ordens das constantes elásticas do sólido. O número de constantes elásticas é reduzido no caso de sólidos isotrópicos para duas constantes de segunda ordem (λ e μ) e três constantes de terceira ordem (l, m e n). As constantes elásticas são conhecidas pelas suas posições em termos de deformação na expressão 3.21. Os coeficientes dos termos com deformação elevada ao quadrado são constantes de segunda ordem, e as deformações elevadas ao cubo são constantes de terceira ordem. No sólido isotrópico, a densidade da energia de deformação depende apenas dos invariantes I_1 , I_2 e I_3 , do tensor de deformação (Lagrangian),

desde que as constantes elásticas sejam invariantes (material isotrópico) sob rotações arbitrárias. Assim, a nova expressão da energia de deformação é dada pela equação 3.22.

$$\phi(\varepsilon) = \frac{(\lambda + \mu)I_1^2}{2 - 2\mu I_2} + \frac{(l + 2m)I_1^3}{3 - 2mI_1 I_2} + nI_3 \quad (3.22)$$

A densidade de um corpo em tensão de deformação, também pode ser expressa em função dos invariantes, como mostra a expressão 3.23:

$$\rho(\varepsilon) = \frac{\rho}{(1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3)} \quad (3.23)$$

Onde:

ρ = densidade do sólido com tensão zero.

No caso de propagação de onda plana no eixo das deformações principais, existem apenas três componentes da deformação a serem consideradas, ε_{ii} , $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_{ki}$. Logo, os invariantes da deformação serão:

$$I_1 = \varepsilon_{ii} \quad (3.24)$$

$$I_2 = -(\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ji} + \varepsilon_{ik}\varepsilon_{ki}) \quad (3.25)$$

$$I_3 = 0 \quad (3.26)$$

Derivando a equação 3.22 em relação às deformações dos componentes da tensão, a solução das equações de onda resulta em três expressões para propagação de uma onda longitudinal pura e duas ondas transversais puras, polarizadas na direção principal da deformação de cada uma delas, conforme as equações:

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (4m + 4\lambda + 10\mu)\varepsilon_1 \quad (3.27)$$

$$\rho V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_2 - \frac{1}{2}n\varepsilon_3 \quad (3.28)$$

$$\rho V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) + 4\mu\varepsilon_1 + 2\mu\varepsilon_2 - \frac{1}{2}n\varepsilon_2 \quad (3.29)$$

A figura 3.14 mostra elementos de uma barra sob tensão, onde a onda se propaga em três direções. O primeiro índice da velocidade representa a direção de propagação da onda e o segundo representa a direção de movimento das partículas. Na figura (a) a onda propaga-se paralela à carga e V_{11} representa a velocidade das partículas na mesma direção de propagação da onda (onda longitudinal). Entretanto V_{12} e V_{13} representam a velocidade da onda nos planos perpendiculares. Nas figuras (b) e (c), as ondas propagam-se em outras direções.

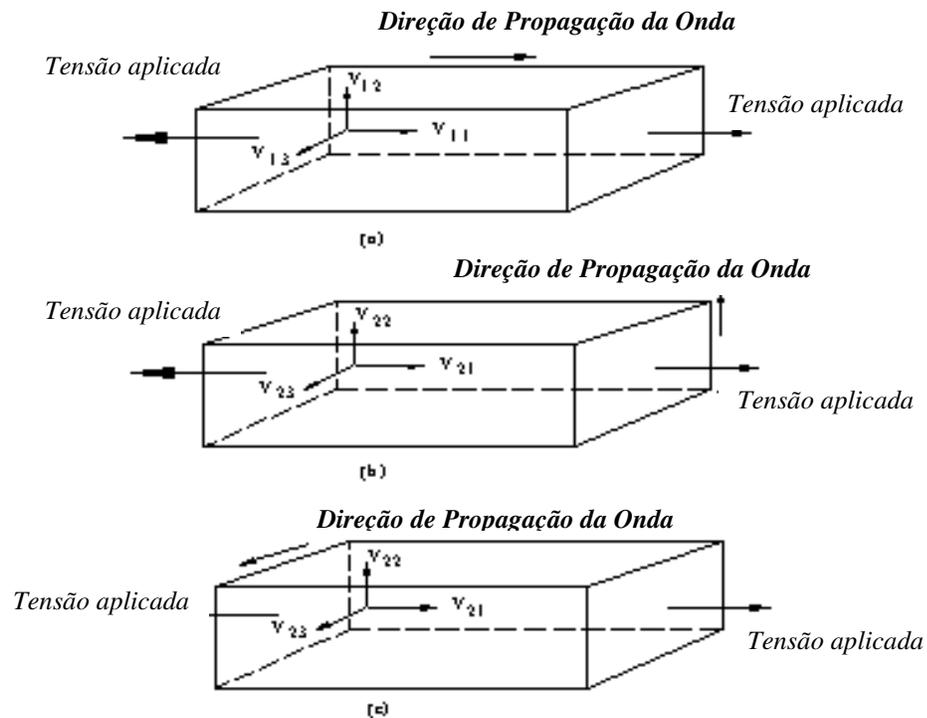


Figura 3.14 – Velocidade do plano de ondas e campo de tensão no sistema de coordenadas ortogonal (Bray, 2000)

A sensibilidade destas ondas com relação à tensão é mostrada na figura 3.15. De acordo com Bray (2000), a variação mais significativa no tempo de percurso com relação à tensão foi encontrada para ondas longitudinais.

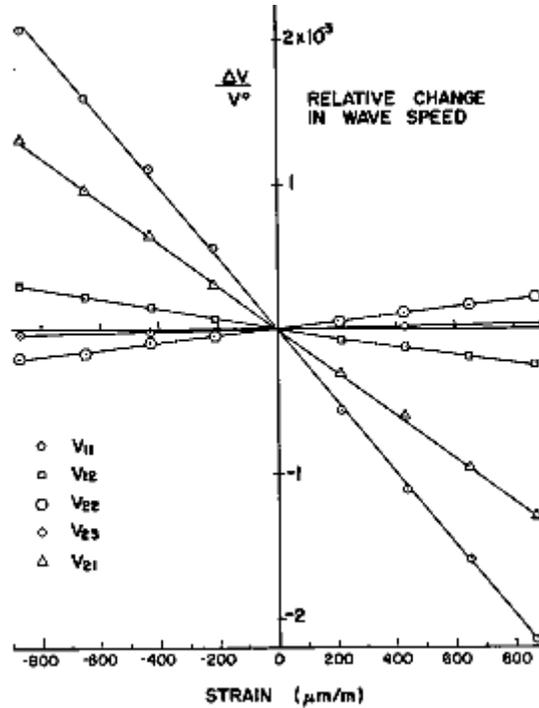


Figura 3.15 – Variação relativa da velocidade em relação à deformação (Bray, 2000)

As equações 3.27, 3.28 e 3.29 podem ser simplificadas, considerando que a deformação está agindo apenas na direção 1 (estado uniaxial). Portanto, as seguintes considerações podem ser feitas com relação às deformações:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon \quad (3.31)$$

As novas equações ficam:

$$\rho V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (3.32)$$

$$\rho V_{12}^2 = \rho V_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + \nu \left(\frac{n}{2} \right) + m(1 - 2\nu) \right] \varepsilon \quad (3.33)$$

A sensibilidade da equação 3.32 em relação à deformação pode ser obtida derivando-a em relação à deformação ε , conforme a equação 3.34, e reagrupando os termos. Nesta equação o termo L_{11} é definido como constante acustoelástica para as ondas longitudinais, e se aplica às ondas L_{cr} .

$$\frac{dV_{11}/V_{11}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + \nu\mu \left(1 + \frac{2l}{\lambda} \right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad (3.34)$$

Os valores das constantes acustoelásticas em outras direções são obtidas da mesma forma. A variação da velocidade V_{11} , controlada pela constante L_{11} , é muito maior do que as outras nas demais direções, indicando que as ondas que se propagam na mesma direção da aplicação das tensões são as mais indicadas para avaliação das tensões (mais sensíveis às tensões).

A tensão pode ser calculada por uma aplicação unidimensional de tensão-deformação em sólidos elásticos. A equação 3.34 pode ser rearranjada de modo a fornecer a variação da tensão em função do tempo relativo de percurso da onda (d_l/t_0), como mostrado na equação 3.36, onde t_0 é o tempo de percurso da onda para um material livre de tensões (tensão zero), com as mesmas características do material a ser investigado. A equação 3.35 da resistência dos materiais, é utilizada para transformar a deformação em tensão, que é incluída na equação 3.36:

$$d\sigma = E d\varepsilon \quad (3.35)$$

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (3.36)$$

Onde:

$d\sigma$ - variação da tensão (MPa);

E – módulo de elasticidade (MPa)

A equação (3.36) pode ser aplicada em outras direções, desde que a constante acustoelástica “L” seja mudada para um valor referente à nova direção.

Para medição de tensão, os cabeçotes das ondas L_{cr} devem ser montados, com distância fixa e conhecida, com um cabeçote agindo como emissor e outro como receptor. Em alguns casos são usados dois cabeçotes para recepção, particularmente para avaliar o efeito da temperatura. Os efeitos da tensão, da textura e da temperatura na velocidade da onda influenciam os dados coletados. A forma de influência destes parâmetros é dada pela equação 3.37:

$$t = t_0 + \Delta t_{RS} + \Delta t_T + \Delta t_F + \Delta t_{TX} \quad (3.37)$$

Onde:

t – tempo de percurso da onda;

t_0 – tempo de percurso da onda na temperatura padrão no material homogêneo, isotrópico e livre de tensões;

Δt_{RS} – efeito da tensão residual no tempo de percurso da onda;

Δt_T – efeito da diferença de temperatura em relação à temperatura padrão medida;

Δt_F – efeito da força aplicada no tempo de percurso da onda;

Δt_{TX} – efeito da textura do material no tempo de percurso da onda.

3.3.2 Efeitos da Temperatura

De acordo com Bray (1998) a temperatura induz a diferenças de velocidade e ocorre em ambos os materiais, o material a ser investigado e no material da probe. A relação da velocidade da onda e temperatura (dc/dT) é dada por:

$$\frac{dc}{dT} = k_T \frac{m}{s^\circ C} \quad (3.38)$$

Onde k_T é uma constante para um material particular, conforme mostra a tabela 3.1:

<i>Efeitos da Temperatura sobre a Velocidade da Onda</i>	
Material	k_T
Acrílico	-2,3
Aço Perlítico	-0,55

Tabela 3.1 – Coeficientes de temperatura (Bray, 1998)

O efeito da temperatura no tempo de percurso será:

$$\Delta t_T = \frac{d}{k_T \Delta T} \quad (3.39)$$

Onde:

d = é a distância percorrida pela onda no material

ΔT = é a diferença de temperatura medida.

3.3.3 Influência da Mudança de Microestrutura na Variação da Velocidade das Ondas Ultra-Sônicas e no Efeito Acustoelástico

Materiais cristalinos são, em geral, anisotrópicos. O ferro alfa, por exemplo, tem o módulo de elasticidade variando com a direção cristalográfica, o que influencia na velocidade da onda em diferentes direções. Nas direções <100>, <110> e <111> do cristal cúbico de ferro, as velocidades das ondas ultra-sônicas longitudinais são 5440, 6190 e 6420 m/s, respectivamente, mostrando uma variação superior a 15%. Os materiais policristalinos são, de modo geral, heterogêneos, devido às diferentes orientações dos cristais; logo, as constantes elásticas variam em relação ao sistema de referência.

A microestrutura determina o comportamento elástico do material e também a velocidade da onda ultra-sônica. Técnicas de ultra-som para avaliação de tamanho de grão, porosidades e danos por fadiga são desenvolvidas para casos de aplicação específica. Devido à complexidade da interação entre elementos microestruturais, como grãos, contorno de grãos, precipitações, poros, discordâncias, vazios com a propagação de ondas ultra-sônicas, e pelo fato destas influências na velocidade do som serem da mesma ordem de grandeza da influência da deformação ou da tensão, não existe uma aproximação generalizada que possa ser usada para avaliação do estado de tensão em materiais nos quais a microestrutura varia na área ensaiada. O

único procedimento existente é a investigação experimental da dependência entre as velocidades do ultra-som e de suas respectivas tensões, usando amostras representativas com diferentes estados de microestrutura (Schneider, 1998).

3.3.4 Tensões Elásticas

O comportamento das tensões em componentes mecânicos segue a teoria básica de elasticidade. Segundo esta, as tensões são proporcionais à deformação a que o corpo está sujeito, a menos que a magnitude das primeiras ultrapasse o limite elástico (região plástica). Nesse caso, as tensões deixam de ter essa proporcionalidade, mas ainda possuem características que permitem relacioná-las à velocidade de propagação de ondas. Em muitos dos casos envolvendo plasticidade, o que se deseja é determinar as tensões pré-existentes no material, as quais se dá o nome de tensões residuais.

A base da acustoelasticidade foi desenvolvida por Hughes & Kelly (1953) e ainda serve para a maioria das aplicações conhecidas. Segundo estes, a variação da velocidade das ondas ultra-sônicas está relacionada à deformação do material. A forma como a deformação está relacionada à tensão é matéria da elasticidade.

A relação entre a tensão e a deformação é chamada de equação constitutiva e descrita como:

$$T = T(E) \Leftrightarrow T_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \quad (3.40)$$

Onde:

T = tensão

E = deformação e o termo

C_{ijkl} = tensor elástico, que define a resposta do sistema em função das características do material.

As constantes C_{ijkl} são chamadas de constantes elásticas ou de rigidez.

Essa nova relação reduz o número de constantes em 18, fazendo com que o número total de constantes para um sólido linear elástico se reduza a 36.

3.3.5 Energia de Deformação

O termo *Elasticidade* está diretamente relacionado com o fato de que o corpo possui energia armazenada quando submetido a tensões menores do que o limite de escoamento. Essa energia é chamada de Energia de Deformação U e é função das forças aplicadas e dos deslocamentos (trabalho), ou das tensões e deformações. Da definição de energia, pode-se escrever:

$$T_{ij} = \frac{\partial U}{\partial E_{ij}} \quad (3.44)$$

Com base na equação (3.40) pode-se calcular a variação da tensão com a deformação em relação a um plano s , numa direção r qualquer:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial E_{rs}} = C_{ijrs} \quad (3.45)$$

Combinando com a equação (3.44), tem-se:

$$C_{ijrs} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial E_{rs}} = \frac{\partial^2 U}{\partial E_{rs} \cdot \partial E_{ij}} \quad (3.46)$$

No entanto, como a variação da energia não depende da ordem da derivação:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial E_{rs} \cdot \partial E_{ij}} = \frac{\partial^2 U}{\partial E_{ij} \cdot \partial E_{rs}} \quad (3.47)$$

A segunda parte da equação 3.47, de acordo com a equação 3.46 é o coeficiente C_{rsij} . Como a primeira é o coeficiente C_{ijrs} , tem-se:

$$C_{ijrs} = C_{rsij} \quad (3.48)$$

Isso implica que um coeficiente qualquer C_{ijkl} é igual a C_{klij} . Essa afirmação reduz o número de constantes desconhecidas de 36 para 21, na matriz dos coeficientes elásticos.

A redução no número de coeficientes permite também uma modificação nos índices utilizados. A equação 3.41 com a igualdade da equação 3.54 torna-se:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{1222} \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & C_{2333} & C_{1333} & C_{1233} \\ C_{1123} & C_{2223} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{1213} \\ C_{1113} & C_{2213} & C_{1333} & C_{2313} & C_{1313} & C_{1213} \\ C_{1112} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ 2.E_{23} \\ 2.E_{31} \\ 2.E_{12} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Simplificando os índices, a relação (3.49) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ 2.E_{23} \\ 2.E_{31} \\ 2.E_{12} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

3.3.6 Característica Estrutural do Material

Completar a equação (3.50) com valores que possam ser obtidos em ensaios de engenharia requer a definição da estrutura do material analisado. Duas abordagens são normalmente utilizadas para aço laminado, que é o caso do material para a fabricação de dutos: isotrópica e ortotrópica. Material isotrópico é aquele que tem as mesmas propriedades elásticas em qualquer

direção, ou seja, em relação a qualquer sistema de coordenadas adotado. Material ortotrópico é aquele que tem três eixos de simetria para as propriedades mecânicas; elas variam de forma similar quando o sistema é rotacionado na direção positiva ou negativa em relação a qualquer um dos eixos. A definição de qual abordagem é adequada não está necessariamente baseada em fatores mensuráveis: se o material é laminado com intensidade elevada ele é considerado ortotrópico; se não, isotrópico. Quão grande é o efeito de cada modelo sobre o resultado de propagação de ondas ultra-sônicas é o que definirá o modelo a ser adotado.

Para materiais *isotrópicos*, que se deformam linearmente quando da aplicação da tensão, as constantes elásticas se reduzem a apenas 3. Como os materiais são isotrópicos, não há necessidade de incluir a direção na propriedade mecânica que substitui cada coeficiente. A relação constitutiva para materiais isotrópicos é dada por:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ 2.E_{23} \\ 2.E_{31} \\ 2.E_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

O valor E , sem índice, representa o módulo de elasticidade do material; o valor G representa o módulo de elasticidade transversal e ν representa o Coeficiente de Poisson.

Para materiais *ortotrópicos*, as constantes se reduzem a nove, que dependem da direção. É importante ressaltar que os coeficientes se referem às direções analisadas. A equação constitutiva para esse caso fica:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ 2.E_{23} \\ 2.E_{31} \\ 2.E_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -v_{21}/E_2 & -v_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -v_{12}/E_1 & 1/E_2 & -v_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -v_{13}/E_1 & -v_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Com base na relação expressa em (3.52), é possível avaliar o efeito da anisotropia do material sobre a resposta de tensões.

3.3.6 Determinação das Propriedades Elásticas com Ondas Mecânicas

A descrição da relação acustoelástica requer o conhecimento das propriedades elásticas do material sob investigação. A medição dessas por ensaios convencionais pode não ser adequada devido às dimensões dos componentes envolvidos. Uma alternativa é utilizar ultra-som para essa determinação. Para as nove constantes elásticas envolvidas serão necessárias nove equações.

A equação do movimento para ondas se propagando em um meio sólido pode ser escrita como:

$$\rho \cdot \ddot{u}_i = T_{ij,j} + \rho \cdot g_i \quad (3.53)$$

Onde:

j na tensão significa a derivada em relação a coordenada cartesiana x_j ; o último termo significa as forças de corpo;

ρ é a densidade;

u_i são os deslocamentos e sua segunda derivada é a aceleração. Desprezando as forças de corpo, inserindo a equação (3.40) em (3.53) e rearranjando, tem-se:

$$\rho \cdot \ddot{u}_i - C_{ijkl} \cdot u_{k,lj} = 0 \quad (3.54)$$

onde $E_{kl} = 0,5 \cdot (u_{l,k} + u_{k,l})$ foi usado para introduzir a variação do deslocamento na equação.

O deslocamento de uma onda plana harmônica pode ser dado por Musgrave (1970):

$$u_k = A \cdot p_k \cdot \exp[i \cdot \omega \cdot (s_r \cdot x_r - t)] \quad (3.55)$$

Onde,

p_k é o vetor que define a direção de polarização;

ω é a frequência angular;

s_r é um vetor de relacionado à velocidade e direção de propagação,

A é um fator para a amplitude.

Inserindo a equação (3.54) em (3.55) e substituindo o vetor s_r pela sua relação com a velocidade, é possível obter as soluções a partir da solução do determinante (equação de Christoffel):

$$\left| C_{ijrs} \cdot n_j \cdot n_l - \rho \cdot v^2 \cdot \delta_{ik} \right| = 0 \quad (3.56)$$

Onde:

δ_{ik} é o delta de Kroenecker

O resultado do determinante apresenta a relação entre as constantes elásticas e a velocidade da onda ultra-sônica, para cada direção de propagação e polarização. Ondas polarizadas na

mesma direção de propagação são chamadas de longitudinais, enquanto que ondas polarizadas em direções perpendiculares a de propagação são chamadas transversais. Ortega e colaboradores (2003) apresentam uma tabela simplificada que permite a determinação dos valores das constantes elásticas a partir da velocidade de propagação das ondas mecânicas (tabela 3.2). No mesmo trabalho, determinaram as constantes utilizando ondas ultra-sônicas. Brown (1989) também determinou as relações entre as diversas ondas e as velocidades.

Tabela 3.2 – Relação entre as constantes elásticas e a velocidade, direção e propagação das ondas ultra-sônicas para materiais levemente ortotrópicos (Ortega et al., 2003)

C	v	Prop.	Pol.	C	v	Prop.	Pol.
C_{11}	v_{11}	x_1	x_1	C_{66}	v_{12} (ou v_{21})	x_1 (ou x_2)	x_2 (ou x_1)
C_{22}	v_{22}	x_2	x_2	C_{12}	v_{QL} ou v_{QT}	45° de x_1 e x_2	plano (x_1 - x_2)
C_{33}	v_{33}	x_3	x_3	C_{13}	v_{QL} ou v_{QT}	45° de x_1 e x_3	plano (x_1 - x_3)
C_{44}	v_{23} (ou v_{32})	x_2 (ou x_3)	x_3 (ou x_2)	C_{23}	v_{QL} ou v_{QT}	45° de x_2 e x_3	plano (x_2 - x_3)
C_{55}	v_{13} (ou v_{31})	x_1 (ou x_3)	x_3 (ou x_1)				

3.4 Princípios básicos de planejamento e análises de experimentos

O planejamento experimental, também denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo, (Button, 2002).

Esse objetivo maior pode ser dividido em outros objetivos de acordo com o propósito dos ensaios:

- a) determinar quais variáveis são mais influentes nos resultados;
- b) atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar os resultados;
- c) atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a variabilidade dos resultados e,

d) atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a influência de variáveis incontroláveis;

Button (2002) destaca alguns benefícios da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental:

- redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- determinação da confiabilidade dos resultados;
- realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- seleção das variáveis que influem num processo com número reduzido de ensaios;
- representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Montgomery (1991) estabelece um procedimento para o planejamento e para a análise dos resultados:

Reconhecimento e definição do problema: depende em grande parte da experiência já adquirida no estudo de processos semelhantes;

Escolha das variáveis (fatores de influência) e das faixas de valores em que estas variáveis serão avaliadas: devem-se verificar como essas variáveis serão controladas nos níveis escolhidos e como eles serão medidos.

Escolha adequada da variável de resposta: de modo que se garanta a objetividade na análise dos resultados obtidos

Delineamento dos experimentos: deve ser o mais simples possível, tamanho da amostra (número de réplicas), seqüência de execução dos ensaios, necessidade de aleatorização ou do uso de blocos. A experimentação é um processo iterativo. Principalmente em processos complexos, com diversas variáveis influentes, não se deve partir de um conjunto extenso de experimentos, que envolva um grande número de variáveis, estudadas em diversos níveis. É mais produtivo

estabelecer-se um conjunto inicial com número reduzido de ensaios (poucas variáveis, poucos níveis de avaliação), ir aprendendo sobre o processo e aos poucos, acrescentar novas variáveis e níveis e eliminar variáveis que não se apresentem influentes. Com essa iniciativa, reduz-se o número total de ensaios e o que é mais importante reservam-se os recursos para aqueles ensaios realmente importantes, que normalmente não fornecem resultados objetivos nas tentativas iniciais;

Execução dos experimentos: esta etapa é extremamente importante pois garante a validade experimental e exige do pesquisador um conhecimento profundo dos instrumentos, equipamentos e métodos de controle e monitoramento;

Análise dos resultados: com o uso de métodos estatísticos, a fim de que as conclusões estabelecidas sejam objetivas. Destaca-se que esses métodos não permitem afirmar se uma dada variável apresenta ou não um determinado efeito: eles apenas garantem a confiabilidade e a validade dos resultados, de modo que se possa determinar o erro associado nas conclusões, de acordo com um dado grau de confiança previamente estabelecido. Deve-se reconhecer o que é significativo estatisticamente e o que é significativo na prática, seja industrial ou de pesquisa. Nesta fase podem ser utilizados softwares estatísticos (Minitab, Excel, Statistica etc.).

Dentre os planejamentos existentes destacam-se os seguintes:

- ✓ Planejamento totalmente aleatorizado;
- ✓ Planejamento aleatorizado por blocos;
- ✓ Planejamento aleatorizado por níveis;
- ✓ Planejamento por níveis completo aleatorizado por blocos;
- ✓ Planejamento por níveis incompleto aleatorizado por blocos;
- ✓ Planejamento quadrado latino;
- ✓ Planejamento quadrado greco-latino;

- ✓ Planejamento fatorial fracionado;
- ✓ Planejamento Ortogonal;
- ✓ Planejamento fatorial completo.

3.4.1 Planejamento fatorial completo

Este planejamento foi o utilizado neste trabalho. Segundo Button (2001), o planejamento fatorial é indicado para a fase inicial do procedimento experimental quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável de resposta escolhida. Ainda, “é um modelo de efeitos fixos, isto é, a análise dos efeitos provocados pelos fatores não pode ser transferida para outros níveis que não os analisados no planejamento.”

As técnicas de planejamento e análise de experimentos fatoriais são utilizadas com o objetivo de se adquirir informações para a avaliação dos efeitos de todas as variáveis envolvidas no experimento em estudo, realizando-se o mínimo número de ensaios possíveis. (Santana-Greco, 2004).

Em pesquisas básicas e tecnológicas, técnicas de planejamento de experimentos conduzidos no esquema fatorial têm sido cada vez mais aplicadas. A grande vantagem da sua utilização é o teste de várias hipóteses em um mesmo experimento, incluindo a possibilidade de obtenção de conclusões mais amplas diante do estudo simultâneo de vários fatores.

Para se realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis independentes a serem estudadas e os valores em que essas variáveis serão testadas, denominados, níveis. Em seguida, efetuam-se experimentos para todas as combinações possíveis dos níveis selecionados para as variáveis ou fatores em estudo.

Como cada fator pode possuir vários níveis de variação e como o número de condições experimentais a serem testadas em um experimento fatorial é dado por todas as combinações possíveis dos diversos níveis dos fatores ou variáveis que o constituem, a realização do experimento completo pode tornar-se inviável.

Para estes casos, é necessário fazer o fracionamento do experimento, que permite que as informações desejadas sejam obtidas realizando-se apenas uma fração do experimento total, com base na redundância existente quando muitos fatores são introduzidos. Através da aplicação da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários, o número de condições experimentais necessárias à obtenção da resposta desejada pode ser reduzido, fazendo-se uso do sistema de acoplamento de efeitos, que se baseia na consideração de que interações de alta ordem podem ser desconsideradas. Dessa forma o experimentador pode reduzir o tempo de pesquisa, sem ser obrigado a limitar o número de fatores a serem testados ou o número de níveis por fator, como ocorre no método clássico de experimentação (Galdámez, 2002).

3.4.2 Análise de Variância dos efeitos do planejamento fatorial

O princípio básico das técnicas estatísticas de experimentos é usar conceitos matemáticos de estatística e as informações obtidas nos experimentos realizados. Com os dados analisados matematicamente e com os testes planejados corretamente é possível rejeitar ou aceitar as hipóteses formuladas (Galdámez, 2002).

Alguns autores, como Montgomery (1991) e Levine (1998), propõem uma série de passos que podem ser utilizadas para conduzir o teste de hipóteses dos experimentos. Aqui estão alguns deles:

- Deve-se partir de duas hipóteses sobre determinado parâmetro. A primeira, é a hipótese nula (H_0). Esta hipótese parte do princípio de que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados de uma população e será sempre a hipótese testada no experimento. A segunda hipótese, (H_1), será considerada verdadeira se a hipótese nula for falsa.

- Ao desenvolver as hipóteses do experimento é necessário que seja usada uma estatística específica, com base em um determinado resultado da amostra. Tais valores podem ser determinados com o auxílio de softwares estatísticos, que apresentam várias distribuições estatísticas (*t*-student, F-Fisher, Z-standard, entre outras), que podem ser usadas para se determinar a probabilidade de uma hipótese nula ser verdadeira ou não.

- Os riscos nas tomadas de decisões podem ser minimizados através da observação do nível de significância, que é a probabilidade de se cometer o erro do tipo I (quando a hipótese nula é rejeitada, mesmo sendo verdadeira). É identificada como o nível (α) do teste estatístico. Recomendam-se utilizar os níveis de α em 0,1 ou menos. Selecionado o valor de α , é possível determinar o tamanho da região de rejeição da hipótese nula do experimento. Com isso, os valores críticos que dividem as regiões de rejeição e não-rejeição podem ser determinados, conforme apresentado pela figura 3.16, para a estatística F.

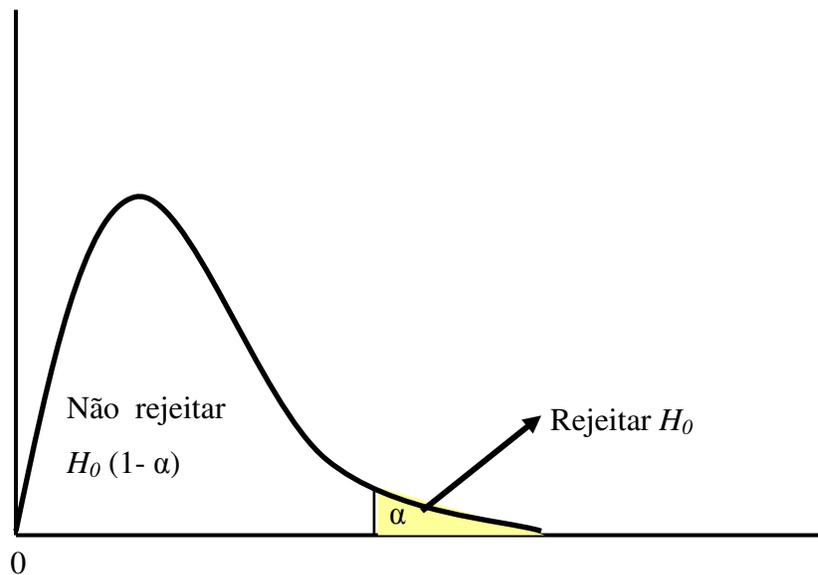


Figura 3.16 – Regiões de rejeição e não rejeição para uma distribuição F. Galdámez (2002).

O coeficiente de confiança, é o complemento da probabilidade de um erro do tipo I, e é identificado como $(1 - \alpha)$. Esse termo multiplicado por 100, passa a simbolizar o nível de confiança percentual para o experimento. Com essa estimativa é possível afirmar se a média aritmética da população está contida dentro de um intervalo. Segundo Montgomery (1991), com esse procedimento se garante um valor pequeno para a probabilidade do erro do tipo II (quando a hipótese nula é rejeitada, sendo falsa).

Considerando os fatores apresentados, a técnica estatística de Análise de Variância, também conhecida como ANOVA (*Analysis of Variance*), é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos. O objetivo desta técnica é

analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos (principais e de interação) significativos nas respostas de um sistema.

O modelo matemático que define a variação da resposta é dado pela equação 3.57. Com a análise da variância, procura-se identificar se alguns dos coeficientes desse modelo são reflexos do erro experimental ou se realmente são efeitos significativos.

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.57)$$

Onde:

μ – média geral dos dados (parâmetro comum a todos os tratamentos);

α_i – efeito do nível i do fator (fator que provoca na variável de resposta);

ε_{ij} - componente aleatório do erro experimental.

Os resultados da ANOVA são geralmente apresentados em um quadro ou tabela, conforme a tabela 3.3. Tais resultados representam a análise do experimento. As colunas desse quadro apresentam as fontes de variação, os graus de liberdade, a soma dos quadrados, os quadrados médios, e a estatística do teste F_0 , e p que será abordado a seguir.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Estatística F	P
Fator A	a - 1	SQ_A	QM_A	$F_A = QM_A / QM_E$	P ($F > F_A$)
Fator B	b - 1	SQ_B	QM_B	$F_B = QM_B / QM_E$	P ($F > F_B$)
Interação (AxB)	(a - 1) (b - 1)	SQ_{AB}	QM_{AB}	$F_{AB} = QM_{AB} / QM_E$	P ($F > F_{AB}$)
Erro	a b (r-1)	SQ_E	QM_E		
Total	a b r-1	SQ_T			

Tabela 3.3 – Tabela de análise de variância (ANOVA) – Statcamp (2006)

Os parâmetros que possuam razão F_0 maior que a estatística F crítica, são os fatores que exercem influência sobre o valor da média de resultados. A estatística F , que segue uma distribuição com ν_1 (numerador) e ν_2 (denominador) graus de liberdade, para um dado nível de significância α , são retiradas das tabelas apresentadas por alguns autores, como exemplo Montgomery (1991).

Os fatores que possuam F_0 menor que a F crítica não causam efeitos significativos sobre a média, portanto, a hipótese nula é verdadeira.

Vale ressaltar que o quadro ANOVA é facilmente construído com softwares estatísticos, como MINITAB, STATISTICA e EXCEL. Além dessa vantagem, na maioria dos programas está incluído o valor “p”, como mostrado na tabela 3.3. Esse valor corresponde à área sob a qual a estatística F é calculada. Com esse parâmetro estatístico é possível concluir sobre as hipóteses nulas sem precisar recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição F . Ou seja, se o valor p for menor que o nível de significância escolhido α , a hipótese nula é rejeitada.

Capítulo 4

Materiais, Equipamentos e Métodos

Este capítulo descreve o material estudado, os equipamentos e sistemas utilizados no estudo e os métodos empregados. Parte do detalhamento do método foi incluída no capítulo 5, de resultados, para facilitar a compreensão do trabalho.

Como já citado anteriormente, Bray & Junghans (1995) mediram o efeito da temperatura sobre a velocidade de propagação das ondas L_{CR} na alma de trilhos ferroviários. O valor encontrado foi de $3,4\eta s/^{\circ}C$. Experimentos anteriores realizados em materiais para a confecção de duto como parte de um relatório para a empresa Petrobrás S.A. indicavam uma influência significativamente maior (Santos, 2006). Ao longo deste capítulo serão descritas as ferramentas para uma análise criteriosa do efeito, bem como as formas de eliminação de qualquer outra possível causa de variação nos resultados da medição.

Os capítulos anteriores mostraram que a tensão varia linearmente com o tempo de percurso das ondas longitudinais para materiais isotrópicos. Experimentos realizados em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa (Andrino, 2003, Caetano, 2003) mostraram que a resposta linear é esperada também em aços laminados, embora exista um efeito significativo da textura, tanto nos valores de tempo de percurso para o estado livre de tensões como nos valores do coeficiente angular da relação (L_{11}). Com base nessas informações, dois tipos de experimentos foram desenvolvidos para a verificação da influência da temperatura:

- O primeiro visa avaliar a influência da temperatura sobre a velocidade de propagação da onda, utilizando conjuntos de transdutores com frequências

diferentes e aplicando forças de contato diferentes entre o corpo de prova a ser testado e o transdutor. A razão é avaliar se mesmo com transdutores diferentes e forças diferentes a influência da temperatura tem o mesmo comportamento. Para evitar a influência da textura, apenas uma amostra será medida, em apenas uma posição. Nesse experimento, não será aplicada tensão à amostra, já que o estudo se limitará em observar a influência da temperatura. Será realizado no estado zero de tensão.

- O segundo experimento permitirá avaliar a influência da temperatura sobre a constante acustoelástica (L_{11}) do material. Neste experimento serão aplicadas tensões e serão utilizados apenas transdutores de uma frequência específica e um único valor para a força de contato do conjunto de transdutores sobre a peça.

4.1 Definição do Corpo de Prova

O material a ser analisado neste trabalho é o aço API 5L X70. Esse aço é utilizado na construção de gasodutos e é um dos materiais utilizados no gasoduto Brasil-Bolívia. Como a classificação dos aços API permite diversas composições químicas, a tabela 4.1 mostra a composição química e propriedades mecânicas do material de uma amostra retirada da mesma chapa original dos corpos de prova. Todos os corpos de prova utilizados neste trabalho foram retirados com a maior dimensão ao longo da direção de laminação, segundo informações do CENPES-Petrobrás, que forneceu as barras.

API 5L X70					
Composição Química	C (%)	0,069	Mn (%)	1,529	
	Si (%)	0,339	S (%)	0,0004	
	P (%)	0,01	Cu (%)	0,017	
	Al (%)	0,031	V (%)	0,059	
	Nb (%)	0,043	Cr (%)	0,02	
	Ti (%)	0,001	Mo (%)	0,001	
	Ni (%)	0,02	N (%)	0,0054	
	B (%)	0,0001	Ca (%)	0,0013	
	Sn (%)				
	Limite de Resistência (MPa)				
	650				
	Limite de Escoamento (MPa)				
	600				
	Dureza Vickers				
204					

Tabela 4.1: Composição Química e Propriedades Físicas do Aço API 5L x70

Para o primeiro experimento foi utilizada uma única barra, denominada R1, para que o efeito da textura do material fosse eliminado, já que o objetivo do teste era observar a influência da temperatura. E para o segundo experimento foram utilizadas cinco barras, denominadas R1, R2, R3, R4 e R5. A forma das barras é mostrada na figura 4.1.

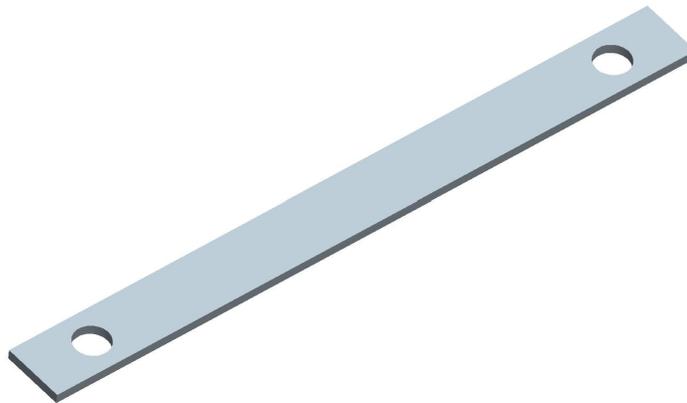


Figura 4.1 – Imagem da barra utilizada nos ensaios

As barras possuem as seguintes dimensões: 760 x 70 x espessura, que varia de barra para barra, R1 = 9 mm, R2 = 9,9 mm, R3 e R5 = 10 mm, R4 = 8,5 mm.

4.2 Sistema de Medição

O sistema ultra-sônico utilizado é mostrado na figura 4.2. É composto de um computador PC (1), com uma placa de aquisição de dados NI 5911 (100 MHz), um pulsador-receptor Panametrics 5072 PR (2) e um conjunto de transdutores montados num arranjo que denominamos “probe” (3), de forma a permitir a geração de ondas L_{CR}.

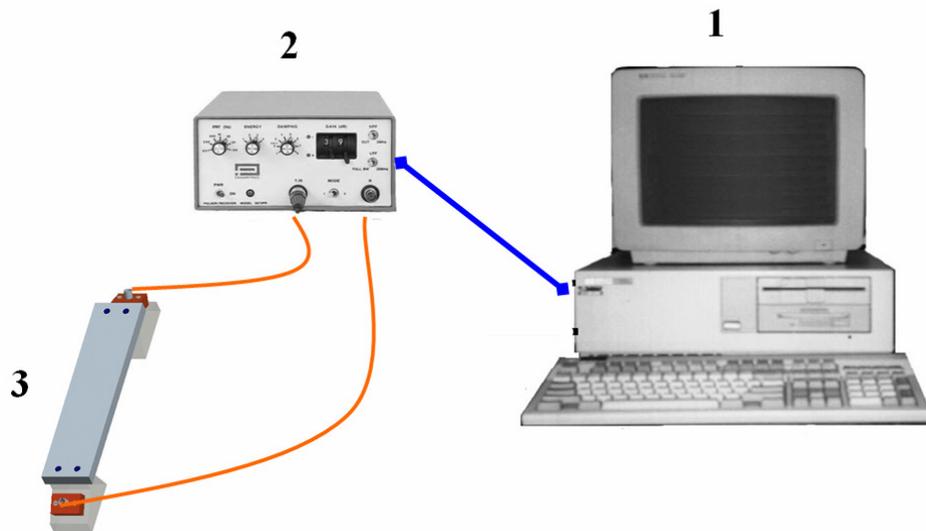


Figura 4.2 – Sistema básico para medição de tensões com ultra-som.

A probe é mostrada nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5. É construída com os transdutores Panametrics A404S, de 2,25; 3,5 e 5 MHz, montados em cunhas angulares de acrílico com 28°, que permitem a geração de ondas paralelas à superfície.

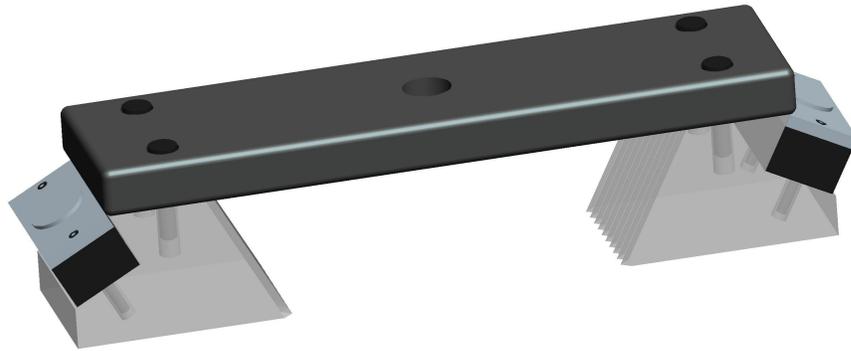


Figura 4.3 – Figura com arranjo esquemático da Probe (conjunto de transdutores)



Figura 4.4 – Foto de um conjunto de transdutores utilizado no trabalho

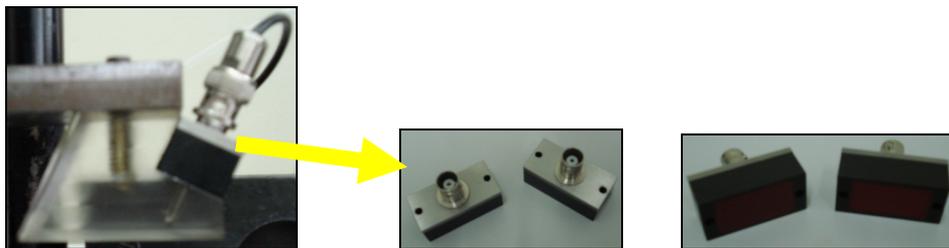


Figura 4.5 – Transdutor montado na sapata de acrílico e transdutores Panametrics desmontados.

O fluido de acoplamento acústico entre os transdutores e as cunhas é o óleo mineral de uso geral, de marca Singer. O mesmo fluido é utilizado como fluido de acoplamento entre a barra em teste e a cunha de acrílico.

4.3 Programa de controle e aquisição de dados

O programa de aquisição de dados utilizado no trabalho é o L-Stress v.1.0, o mesmo utilizado por outros autores citados anteriormente, como Caetano (2003) e Santos (2003). É o programa disponível no Laboratório de Acustoelástica da FEAGRI-Unicamp. Todo o sistema é controlado pelo programa L-stress v 1.0, escrito na linguagem LabView, que foi originalmente escrito para levantamento de constantes acustoelásticas de materiais isotrópicos por Andrino em seu trabalho de mestrado (2003). A figura 4.6 mostra a tela do osciloscópio do programa.

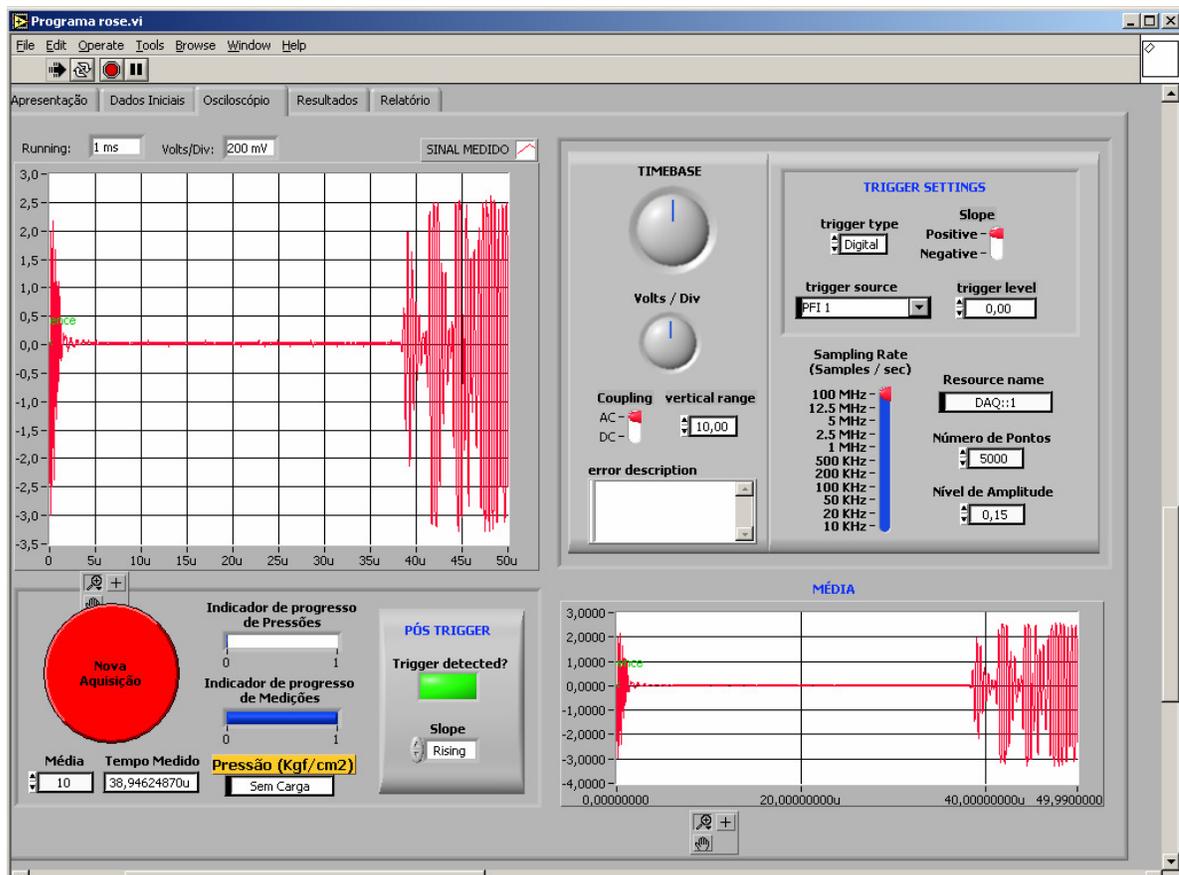


Figura 4.6 – Tela do Osciloscópio do programa L-Stress.

O programa lê os sinais de onda gerados (trem de onda) até um número máximo de pontos. Este número corresponde a um tempo, que pode ser calculado utilizando a taxa de aquisição da placa NI 5911. Como esta é de 100 MHz, ou 100 milhões de pontos por segundos, o espaço de tempo entre duas aquisições é de cerca de 10 ns.

O trem de onda adquirido representa uma matriz de amplitude da onda em função do tempo. O pulsador-receptor excita o pulso no emissor do conjunto de transdutores, que gera a onda e é recebido pelo receptor. O sinal é amplificado no pulsador-receptor e é enviado à placa de aquisição. O programa fica constantemente lendo o que está sendo adquirido pela placa e identifica o instante do pulso inicial. A partir desse instante passa a procurar ao longo da matriz o instante em que a onda longitudinal criticamente refratada (a primeira a chegar) atinge o receptor. Identificada a onda, o programa procura o instante em que essa cruza o valor nulo de amplitude pela segunda vez. Essa é uma convenção mantida para o cálculo do tempo e sua alteração para qualquer outro ponto da onda não deverá influenciar o resultado final. A dificuldade é que outros pontos, como a crista da onda, podem ser mais difíceis de medir.

Além do L-stress v.1.0, foi utilizado um programa existente, para atuação de relés, que controla um cilindro pneumático que aplica a força da probe sobre a peça. Este programa é parte da biblioteca LabView de instrumentos virtuais (VI's). O programa também envia o sinal que controla a aplicação da pressão hidráulica, que aplica tensão às barras durante os ensaios, quando necessário. Embora já exista essa funcionalidade no programa L-stress v.10, foi decidido utilizar o procedimento de acionamento manual da aplicação de força por representar maior segurança ao operador do sistema. A figura 4.7 mostra uma das telas do programa.

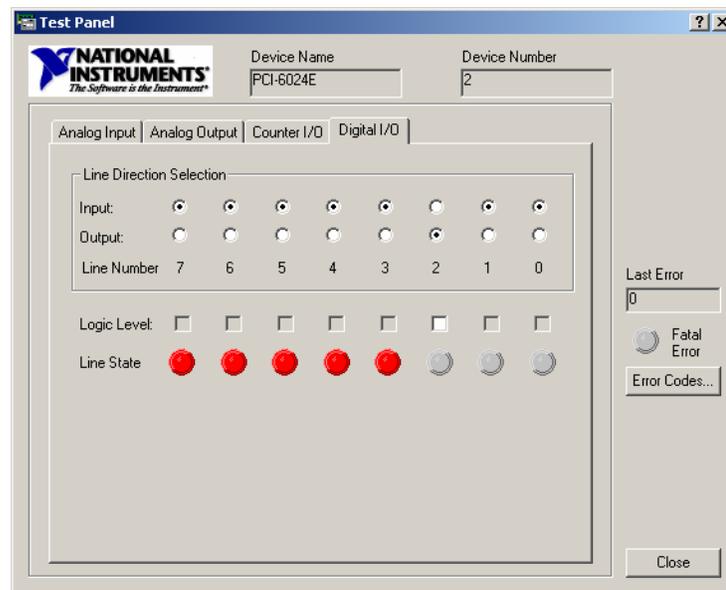


Figura 4.7 – Tela do programa que aciona os relés de aplicação de força

4.4 Sistemas de controle da força de aplicação da probe e tração

A figura 4.8 mostra o sistema utilizado no primeiro experimento para medição do tempo de percurso no estado zero de tensão. O conjunto apresentado na figura 4.8 consiste em um conjunto mecânico de apoio (1) que suporta um cilindro pneumático (2). Este, por sua vez, aplica força ao conjunto de transdutores (3) e o pressiona contra a barra (4). A aplicação da força é controlada por um regulador manual instalado na linha de pressão (não mostrado) e pela VI do sistema automático da National Instruments, citado acima. No caso desse experimento, a barra R1 foi apoiada em suas laterais e no conjunto mecânico de apoio, não sendo aplicada qualquer tensão na direção de percurso da onda.

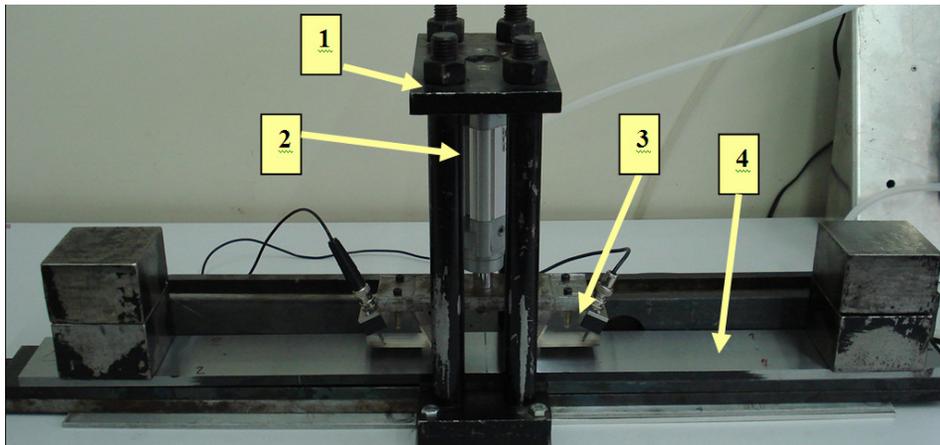


Figura 4.8 – Sistema utilizado para medir o tempo de percurso no estado zero de tensão.

A figura 4.9 mostra o sistema completo para aplicação de tensão nas barras e medição da tensão. Está incluído nele, o aparato que controla a força aplicada sobre o conjunto de transdutores, já apresentado. Como citado anteriormente, testes demonstraram que este pode ser um fator importante e está sendo considerado neste trabalho. Também está mostrado o sistema de controle pneumático (1). Esse sistema serve tanto para aplicar pressão ao aparato que controla a força (2) na interface entre a probe e a peça, nos dois experimentos, como aciona um sistema hidro-pneumático (3) de aplicação de força nas amostras, para a segunda parte dos experimentos - levantamento das constantes acustoelásticas. O sistema mostrado em (2) não é exatamente o sistema utilizado na segunda parte dos experimentos; o conjunto para aplicação de força será mostrado ao longo do restante do trabalho.

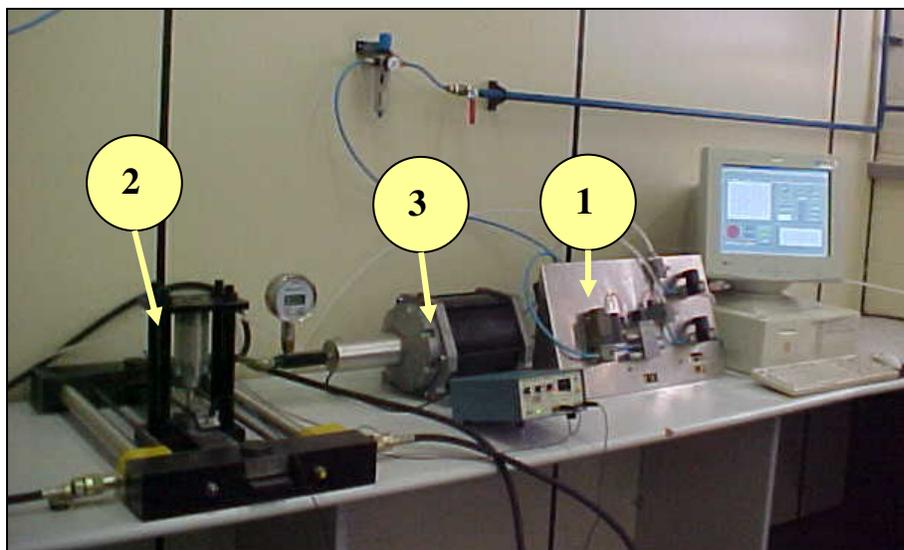


Figura 4.9 – Sistema para medição de tensões utilizando ondas L_{CR}

4.5 Controle de temperatura

A temperatura na peça foi medida por um pirômetro digital e por um termopar conectado a um multímetro. A temperatura ambiente foi medida por um termômetro de mercúrio.



Figura 4.10 – Foto do multímetro com termopar e do pirômetro digital.

4.6 Delineamento dos Experimentos

Conforme exposto, foi avaliada a influência da temperatura no estado “0” de tensão e com o material sob tensão uniaxial. Pela equação 3.36, esses são os fatores que influenciariam no resultado da medição, a menos que haja uma eventual variação no módulo de elasticidade, não esperada.

Em ambos os experimentos foi utilizado o planejamento fatorial completo, que inclui todas as possíveis combinações dos fatores do experimento. Em um experimento aleatório completo todas as combinações de experimentos possíveis devem ser analisadas, mas a ordem das corridas é aleatória. A aleatorização oferece alguma proteção contra o vício do experimento.

O planejamento fatorial completo envolve a exploração sistemática de todas as combinações de níveis de cada fator. Isto permite identificar todas as interações de efeitos dos fatores diversos.

4.6.1 Influência sobre o tempo de percurso – estado zero de tensão

Neste experimento, foram analisados três fatores, que estão mostrados na tabela 4.2.

Fatores	Níveis						
Temperatura	1	2	3	4	5	6	7
Força dos Transdutores	150,8 N		301,6 N		603,2 N		
Freqüência dos transdutores	2,25 MHz		3,5 MHz		5 MHz		
Barra	R1						
$7 \times 3 \times 3 = 63 \times 5$ (repetições) = 315 medições							

Tabela 4.2 – Fatores de influência na medição do tempo de percurso da onda.

Todos os níveis de todos os fatores serão testados simultaneamente. Para eliminar o efeito de textura do material, foi utilizada uma única barra, a R1, e foram feitas marcas na peça, para manter a probe sempre na mesma posição.

Três formas de observação da temperatura foram utilizadas. Um termômetro foi empregado para a medição da temperatura ambiente; um pirômetro digital ótico foi utilizado para a medição da temperatura na peça e, para a mesma finalidade, um conjunto termopar-multímetro foi empregado. Todas as temperaturas foram registradas numa tabela, para cada tempo de percurso medido.

Para obter variações na temperatura que pudessem influenciar nos resultados, foi adotado um procedimento de controle utilizando o sistema de ar condicionado do laboratório. Os dois aparelhos de ar condicionado do laboratório permaneciam funcionando durante toda a noite. De manhã a temperatura da peça estava entre 21,5 e 22° C. As primeiras medições eram feitas com os dois aparelhos ligados. Enquanto o tempo ia passando, a temperatura ia subindo, e perto de 12h00 já chegava a aproximadamente 23° C. Um dos aparelhos de ar condicionado era desligado e outras medições eram feitas. Por fim, o segundo aparelho era desligado, e a peça dentro do laboratório atingia entre 27 e 29° C. Ao longo de cada dia de experimentação, com um mesmo par de transdutores, eram realizadas sete medições para cada força, ou seja, 105 medições por dia.

Algumas características do procedimento experimental são:

- Um conjunto de transdutores, com a determinada frequência, 2,25; 3,5 ou 5 MHz, foram selecionados para cada medição. Normalmente, a medição era feita ao longo de todo o dia, conforme descrito, com o mesmo conjunto de transdutores. Ao iniciar as medições do próximo dia, os novos transdutores eram instalados no conjunto de transdutores e o trabalho se iniciava.
- A intensidade das forças entre os conjuntos de transdutores e a peça, foi controlada utilizando o programa automático da National Instruments, que permitia selecionar um nível de tensão proporcional à pressão de atuação. Essa tensão acionava uma válvula proporcional.

- Todas as 105 medições diárias tiveram as temperaturas do termômetro de mercúrio, do termopar e do pirômetro digital registradas em planilhas.
- Entre cada medição, a pressão no cilindro pneumático, que aplicou a força entre o conjunto de transdutores e a amostra, era retirada pela aplicação de pressão a outra face do pistão do cilindro. Com isso, o conjunto de transdutores se afastava da peça e permitia a inserção de fluido de acoplamento. .
- A cada medição era acrescentado o fluido de acoplamento acústico à interface entre o acrílico e a peça, com o auxílio de um pincel.
- Quando havia aumento da força (pressão pneumática) gerada pelo cilindro entre os três níveis selecionados, a interface de contato era limpa com papel toalha e o fluido de acoplamento era aplicado.
- Em cada medição, a posição dos transdutores era checada. As marcas feitas para alinhar o conjunto de transdutores são mostradas na figura 4.11. Isso permitia que a medição fosse feita sempre na mesma posição da barra R1.



Figura 4.11 – Marcas na peça para posicionar a probe.

- Entre o instante que o cilindro era atuado para pressionar o conjunto de transdutores sobre a peça e o instante da medição, aguardavam-se aproximadamente vinte

segundos para que o conjunto se assentasse e as medidas estabilizassem. A escolha do tempo foi feita com base nas informações obtidas com os demais membros do grupo de pesquisa, segundo os quais era necessário aguardar no mínimo 10 segundos para assentamento.

- Através do programa L-Stress, a aquisição do tempo de percurso foi feita cinco vezes, para cada pressão nos sete níveis de temperatura. Como dito, entre cada uma das cinco medições o conjunto foi retirado. Cada resultado de medição representava a média nos tempos de percurso de 5 conjuntos de ondas; cada conjunto com 20 ondas, geradas pelo programa. Assim, 100 ondas foram utilizadas para cada resultado da medição. Entretanto, dada a velocidade do processo, o trabalho era executado quase instantaneamente.

4.6.2 Influência da temperatura sobre o valor da constante acustoelástica (L_{11})

Na análise da influência da temperatura sobre a inclinação da curva tensão-tempo (Eq. 3.36), também foi utilizado o planejamento fatorial completo. As possíveis interações são descritas pela tabela 4.3.

<i>Fatores</i>	<i>Níveis</i>				
Temperatura	1	2	3		
Força dos Transdutores	603,2 N				
Frequência dos transdutores	2,25 MHz				
Pressão nas barras	0 bar	50 bar	100 bar	150 bar	190 bar
Barras	R1	R2	R3	R4	R5
3 x 5 x 5 = 75 x 5 (repetições) = 375 medições / dia x 3 dias = 1125 medições					

Tabela 4.3 – Fatores de influência no levantamento da constante acustoelástica (L_{11}).

A forma de medição da temperatura foi a mesma adotada no primeiro experimento, controlando os aparelhos de ar condicionado. No entanto, para fins de maior produtividade, foram medidas três barras pela manhã, com os dois aparelhos ligados, três após desligar um dos aparelhos e outras três após os dois aparelhos serem desligados.

O procedimento utilizado foi o seguinte:

- A barra (1) (figura 4.12) foi posicionada no conjunto tracionador por dois pinos (2), um em cada furo dos suportes laterais. Pressão é aplicada aos cilindros hidráulicos (pistões) que aplicam tração à barra (figura 4.13 – 1 e 2), a partir de 0 até atingir 190 bar, para estabilizar o sistema e evitar eventual deformação plástica durante os testes.

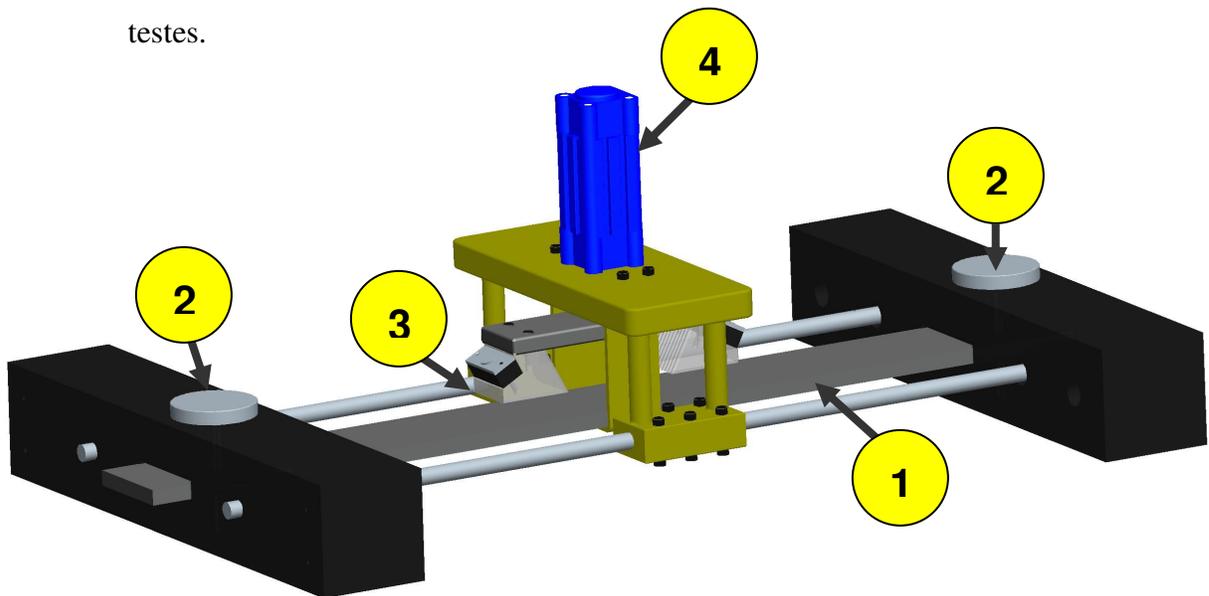


Figura 4.12 – Imagem gerada do Pro-Engineer[®] do tracionador.

- O conjunto de transdutores (figura 4.12 – 3) é posicionado nas regiões marcadas nas barras (figura 4.11) para descerem sempre nas mesmas posições.
- O fluido acoplante é aplicado entre cada uma das medições, com o auxílio de um pincel.

- A temperatura é observada em três pontos: temperatura ambiente, e na barra por termopar e por pirômetro digital, para cada medição.
- O conjunto de transdutores (3 da figura 4.12) desce com o auxílio do cilindro pneumático (4 da figura 4.12), controlado pelo programa automático da *National Instruments* (figura 4.7).
- A cada ensaio, com o valor da pressão aplicada nos dois pistões (1 e 2 da figura 4.13) e suas respectivas áreas, calcula-se a força aplicada na barra, para cada uma das pressões: 0, 50, 100, 150 e 190 bar, conforme segue equação 4.1:

$$F = P(2A_p) \quad (4.1)$$

Onde:

F = Força aplicada na barra (N)

P = Pressão medida no manômetro (Pa)

A_p = Área dos pistões (mm^2)

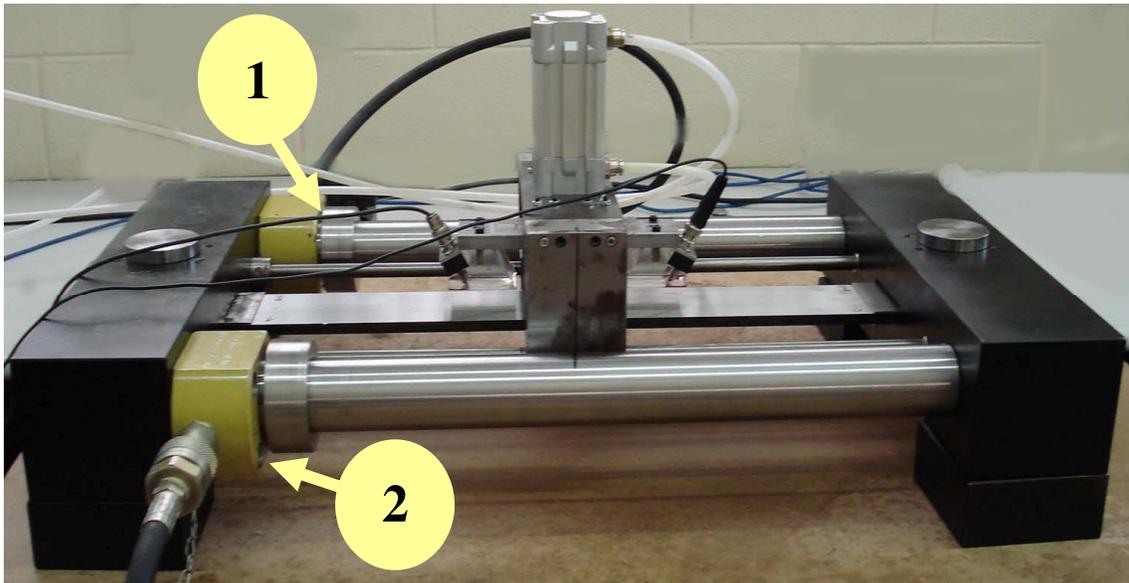


Figura 4.13 – Tracionador com cilindros hidráulicos em destaque (amarelo)

- Com a força aplicada nas barras, calcula-se a tensão teórica em cada barra, conforme a equação 4.2, e é mostrada para cada barra na tabela 4.4.

$$\sigma = \frac{F}{A_{barra}} \quad (4.2)$$

Onde:

σ - tensão teórica na barra (MPa),

F – força aplicada nas barras, obtida na equação 4.1 (N);

A_{barra} – área da secção transversal na barra (mm²), que deve ser calculada para cada barra, pois possuem espessuras diferentes.

Barra R1		Barra R2		Barra R3	
<i>Pressão (bar)</i>	<i>Tensão teórica (MPa)</i>	<i>Pressão (bar)</i>	<i>Tensão teórica (MPa)</i>	<i>Pressão (bar)</i>	<i>Tensão teórica (MPa)</i>
0	0	0	0	0	0
50	45,72989239	50	41,57262944	50	41,15690315
100	91,45978478	100	83,14525889	100	82,3138063
150	137,1896772	150	124,7178883	150	123,4707094
190	173,7735911	190	157,9759919	190	156,396232

Barra R4		Barra R5	
<i>Pressão (bar)</i>	<i>Tensão teórica (MPa)</i>	<i>Pressão (bar)</i>	<i>Tensão teórica (MPa)</i>
0	0	0	0
50	48,41988606	50	41,15690315
100	96,83977212	100	82,3138063
150	145,2596582	150	123,4707094
190	183,995567	190	156,396232

Tabela 4.4 – Relação entre a pressão (bar) e a tensão teórica (MPa) para cada barra.

- Para obter a constante acustoelástica é utilizada a equação 4.3, já deduzida no capítulo 3:

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0} dt \quad (4.3)$$

Integrando a equação, tem-se:

$$\sigma = \frac{E}{L_{11}t_0^*} \Delta t \quad (4.4)$$

Onde:

$$\Delta t = t - t_0 \text{ (}\eta\text{s)} \quad (4.5)$$

E:

σ - tensão teórica na barra tracionada (MPa);

E = módulo de elasticidade no aço API 5L X70 = 2,05 E +05 MPa, valor obtido experimentalmente no Laboratório de Acustoelástica da Unicamp;

L_{11} - constante acustoelástica;

t_0^* - tempo de referência;

t – tempo de percurso da onda na barra tracionada (η s);

t_0 – tempo de percurso da onda na barra livre de tensão, ou seja, com pressão nula nos cilindros (η s).

O tempo t_0^* , tempo de referência, é obtido pela equação:

$$t_0^* = \frac{D_c}{V_A} \quad (4.6)$$

D_c = distância entre os cabeçotes (150mm) – figura 4.14;

V_A = velocidade da onda longitudinal no aço (5900 m/s)

t_0^* - tempo de referência calculado = 25423,7 nanosegundos.

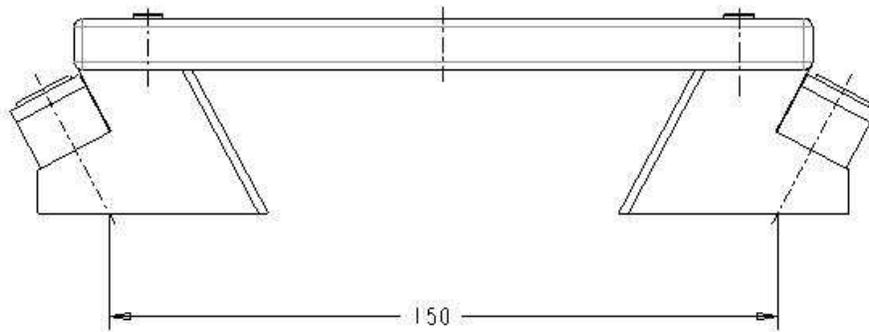


Figura 4.14 – Distância percorrida pela onda no material (150mm).

- O valor t_0 é obtido com o resultado do tempo de percurso da onda na barra livre de tensão e o tempo t , tempo de percurso na barra tensionada. O objetivo é gerar um par de dados com os valores medidos para cada nível de tensão (50, 100, 150 e 190 bar) em função da variação do tempo. Com isto é possível obter um valor numérico para o produto (tensão x constante acustoelástica), para cada nível de tensão aplicada, conforme equação 4.7.

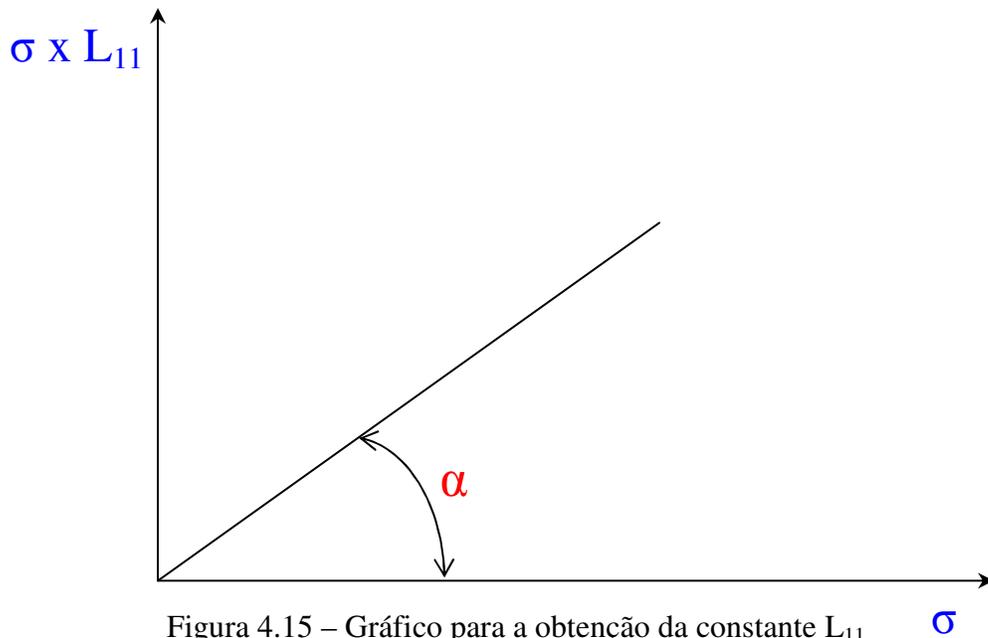
$$\sigma L_{11} = \frac{E}{t_0^*} \Delta t \quad (4.7)$$

Onde:

σ - tensão aplicada na barra tracionada (MPa);

L_{11} - constante acustoelástica.

O lado direito da equação 4.7 pode ser calculado com os tempos medidos (sem tensão e com tensão) e os dados já mostrados. Ao traçar um gráfico deste valor em função da tensão aplicada, a inclinação será a constante acustoelástica, conforme mostra a figura 4.15.



Pelo gráfico é possível determinar a constante acustoelástica, conforme a equação 4.8:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\sigma L_{11}}{\sigma} \Rightarrow \operatorname{tg}(\alpha) = L_{11} \quad (4.8)$$

- Cada valor de variação de tempo corresponde a 5 medidas de tempos de percurso para cada tensão aplicada à barra, a cada temperatura. Isso permite obter um valor médio representativo, que é o que será registrado no gráfico para obtenção de L_{11} .

A tabela 4.5 mostra um exemplo das tabelas para o levantamento das constantes acustoelásticas.

Barra R1 15/12/2006			Barra R1 15/12/2006		
Temperatura 1 (21,4 - 22,3°C)			Temperatura 2 (23,3 - 24,8°C)		
<i>Tensão</i>			<i>Tensão</i>		
<i>Pressão</i>	<i>teórica (σ)</i>	<i>Tensão x L₁₁</i>	<i>Pressão</i>	<i>teórica (σ)</i>	<i>Tensão x L₁₁</i>
0	0	0	0	0	0
50	45,72989239	167,459066	50	45,72989239	169,475633
100	91,45978478	292,996812	100	91,45978478	314,9964563
150	137,1896772	361,776604	150	137,1896772	391,5516653
190	173,7735911	405,795284	190	173,7735911	465,3809543

Barra R1 15/12/2006		
Temperatura 3 (26,8 - 28,4°C)		
<i>Tensão</i>		
<i>Pressão</i>	<i>teórica (σ)</i>	<i>Tensão x L₁₁</i>
0	0	0
50	45,72989239	179,1819764
100	91,45978478	317,3911293
150	137,1896772	410,6993546
190	173,7735911	480,9430974

Tabela 4.5 – Exemplo das planilhas para o levantamento das constantes.

4.7 Análise de Variâncias dos Efeitos dos Experimentos

As técnicas estatísticas de experimentos são utilizadas, principalmente, para analisar, interpretar e apresentar as informações de experimentos planejados. Com os dados analisados matematicamente e com os testes desempenhados corretamente, é possível rejeitar ou aceitar hipóteses formuladas. As hipóteses básicas, conforme visto no capítulo 3, são:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k \\ H_1: \mu_i = \mu_j \neq \mu_j \ (i \neq j) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \mu_1 = \dots = \mu_k \\ H_1: \text{pelo menos um é diferente} \end{array} \right.$$

Se $p < 0,05$, rejeitamos a hipótese nula. Aceitamos a hipótese nula, se $p > 0,05$, ou seja, todas as médias estão contidas no intervalo de confiança e podem ser consideradas iguais.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos dois experimentos realizados para este trabalho: o primeiro, avaliar a influência da temperatura sobre o tempo de percurso da onda e o segundo, avaliar a influência da temperatura sobre o levantamento das constantes acustoelásticas (L_{11}) para o aço API 5L X70.

5.1 Avaliação da importância dos fatores de influência sobre o tempo de percurso

Para analisar a influência dos principais fatores sobre o tempo de percurso da onda, foi utilizada uma única barra, para que o efeito da textura fosse eliminado. Isso se dá porque é sabido que a textura influencia de forma decisiva e porque o tema é objeto de pesquisas em outros trabalhos do grupo ligado ao Laboratório de Acustoelástica da FEAGRI, onde este trabalho foi realizado. Foram utilizados três conjuntos de transdutores, com transdutores de 2,25; 3,5 e 5 MHz, para analisar se o efeito da temperatura seria igual. Para cada transdutor a força de acoplamento (pressão) do conjunto de transdutores (“probe”) sobre a peça variou em três níveis (150,8; 301,6 e 603,2N). A avaliação foi feita em sete níveis diferentes de temperatura e para cada combinação de condições de ensaio foram feitas cinco medições.

A representação gráfica da influência foi obtida através de gráficos de análise de variância (ANOVA). Estes gráficos estão mostrados na figura 5.1, feito com o auxílio do programa MiniTab[®]. Observa-se que todos os fatores testados têm influência sobre o tempo de percurso, sendo a frequência dos transdutores, a que tem maior influência, e em seguida vem a pressão dos transdutores e a temperatura, que têm efeitos muito similares. Nas faixas de fatores estudadas, a

temperatura causou uma variação de cerca de 13,5 ns, o mesmo acontecendo para a força de contato 12,5 ns. A variação causada pela mudança dos transdutores foi de 168,5 ns. No entanto, a tendência correta é um bom indicativo de que as frequências têm uma influência maior.

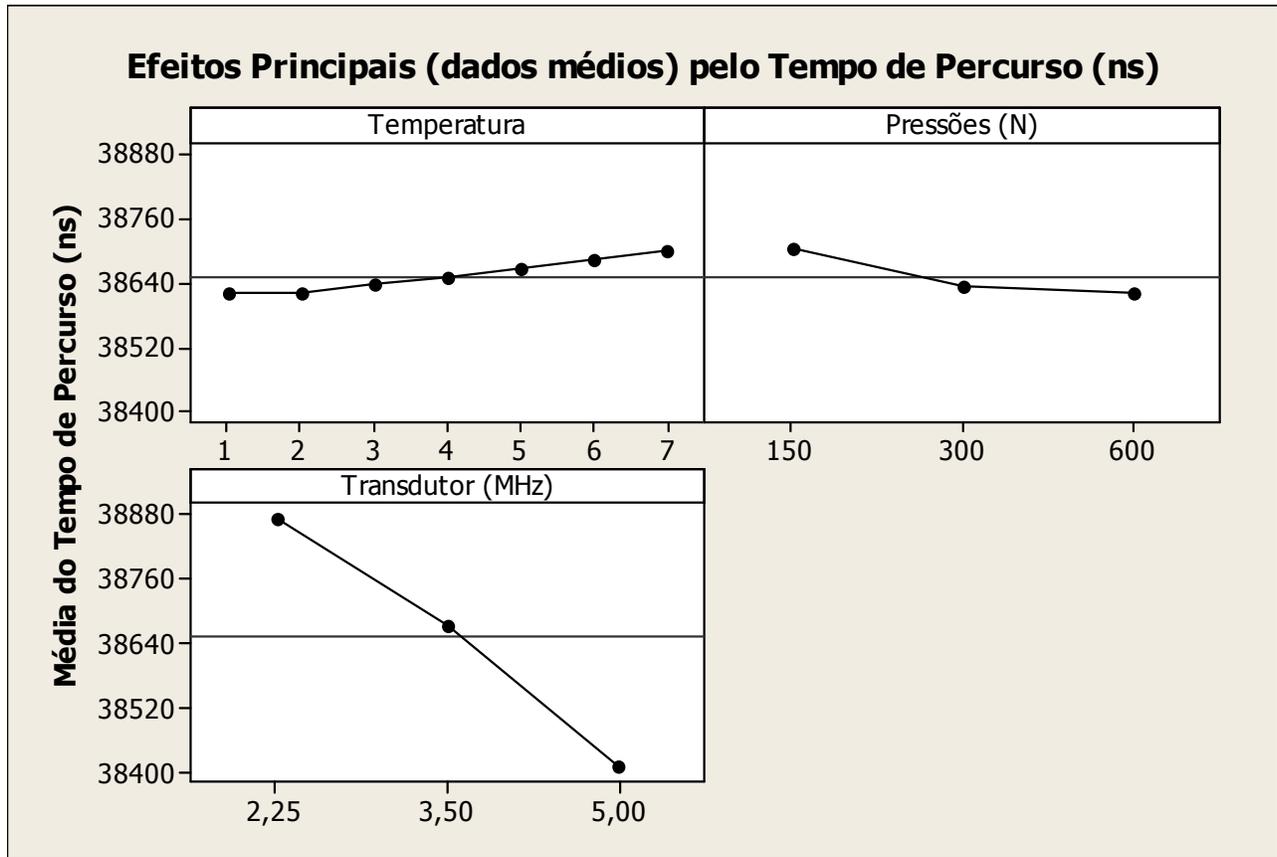


Figura 5.1 – Gráfico dos principais efeitos sobre o tempo de percurso. (software Minitab®)

No gráfico da figura 5.2, observa-se o efeito cruzado dos fatores. Nota-se, como já dito, que a temperatura varia tanto para as diferentes pressões, quanto para as diferentes frequências. Se o objetivo é conhecer o efeito somente da temperatura, seria importante controlar os demais fatores que também influenciam. No tocante às frequências, a análise pode ser feita para cada conjunto de transdutores. Para a força de acoplamento (pressão), pode-se realizar os experimentos para uma pressão definida ou estudar o comportamento do tempo de percurso de modo mais profundo. Como pode ser visto na figura 5.1, parece haver uma tendência a estabilização para força de contato maiores que 600 N. Essa alternativa será checada.

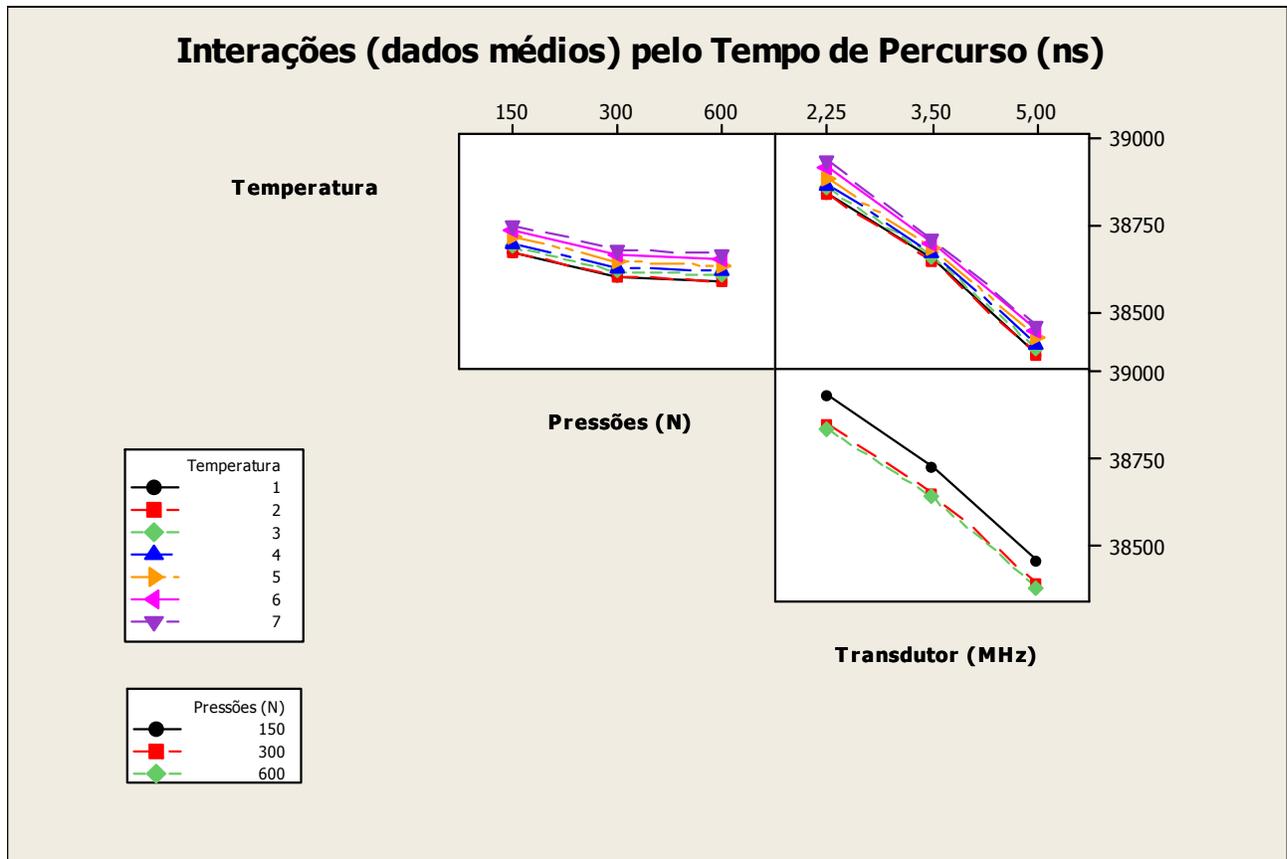


Figura 5.2 – Gráfico das interações. (software Minitab®)

5.1.1 Estudo do efeito da força de acoplamento

Conforme os testes eram realizados, observou-se que havia uma tendência a estabilização conforme o nível de força aplicada da probe contra a amostra em teste, e para estudar este efeito, foi realizado um terceiro experimento.

Foi medido o tempo de percurso para cada conjunto de transdutores testado, o de 2,25 MHz; o de 3,5 MHz e o de 5 MHz, com forças sobre a peça partindo de 150N e variando de 38 em 38N até atingir 720N. As medições foram feitas com a temperatura controlada com variação de aproximadamente 0,5°C, da primeira para a última força. Foram levantados três tempos de percurso para cada força, como foram dezesseis diferentes, totalizaram 48 medições para cada conjunto de transdutores.

As figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostram os resultados obtidos neste experimento. Nos três gráficos apresentados, observa-se um comportamento semelhante, ou seja, à medida que se aumenta a pressão, o tempo de percurso é menor. Outro fator importante observado é que a partir de 600N a variação do tempo de percurso é praticamente nula em todos os casos. Isso pode ser usado para ajustar uma força adequada na interface, sem que alguma eventual variação cause alteração significativa nos resultados. Forças maiores que 600 N serviriam a este propósito.

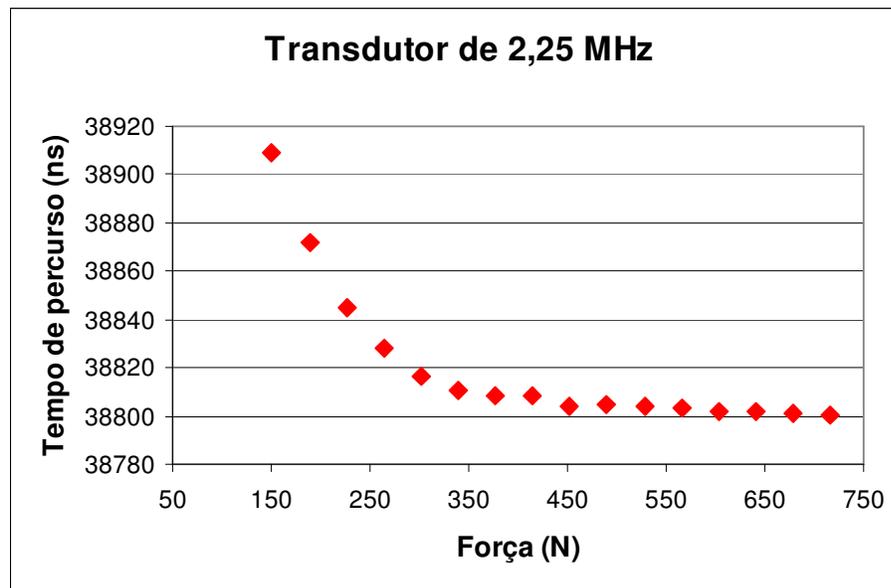


Figura 5.3 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 2,25MHz aplicando-se diferentes forças.

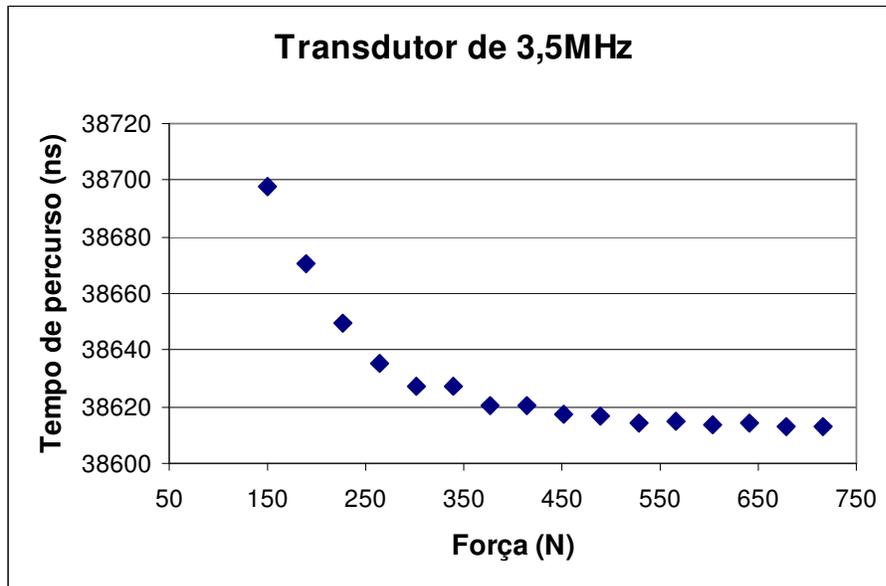


Figura 5.4 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 3,5MHz aplicando-se diferentes forças.

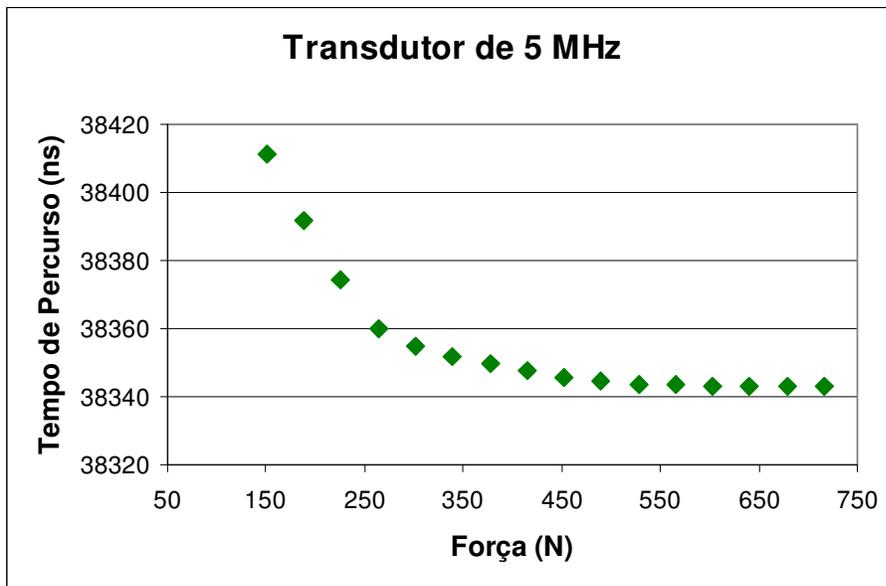


Figura 5.5 – Gráfico do tempo de percurso com o transdutor 5MHz aplicando-se diferentes forças.

5.1.2 Estudo do efeito da temperatura

Das três avaliações feitas no primeiro experimento, a temperatura é um dos principais fatores a ser estudado, pois a força dos transdutores e a frequência dos mesmos são parâmetros que podem ser controlados. Porém para uma aplicação em campo, a influência da temperatura sobre o tempo de percurso pode ser relevante.

Os três gráficos mostrados nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam a variação do tempo de percurso com a temperatura para cada conjunto de transdutores. Também é mostrado o efeito para os três níveis de força (pressões). Os gráficos mostram as medições feitas em sete níveis diferentes de temperatura. Em todas as medições, um comportamento muito semelhante pode ser visto.

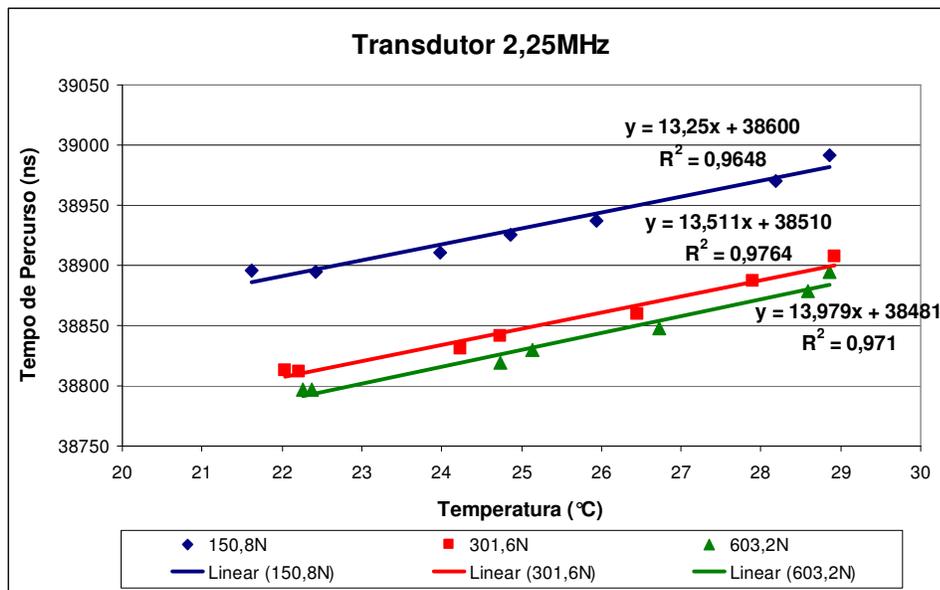


Figura 5.6 – Gráfico de tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor de 2,25MHz

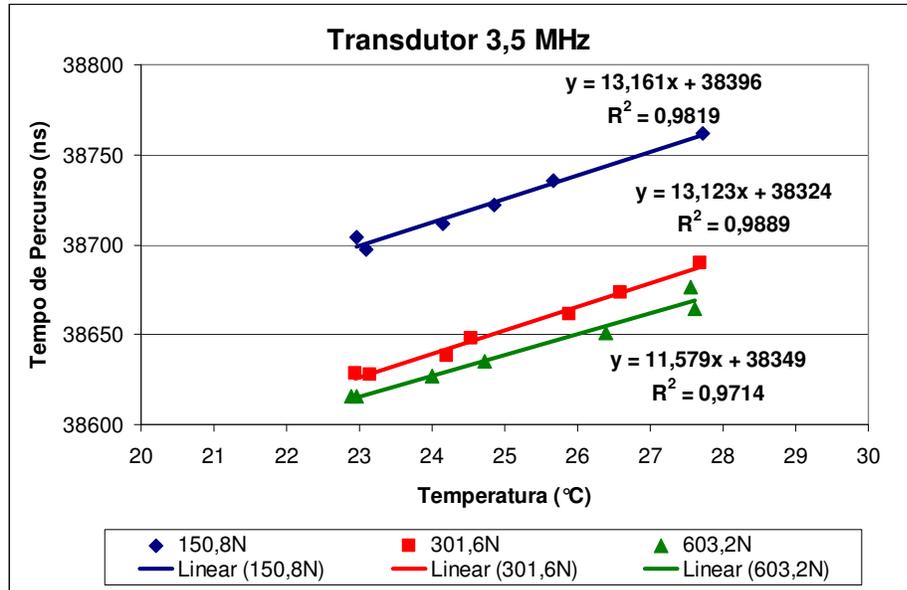


Figura 5.7 – Gráfico de tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor 3,5MHz

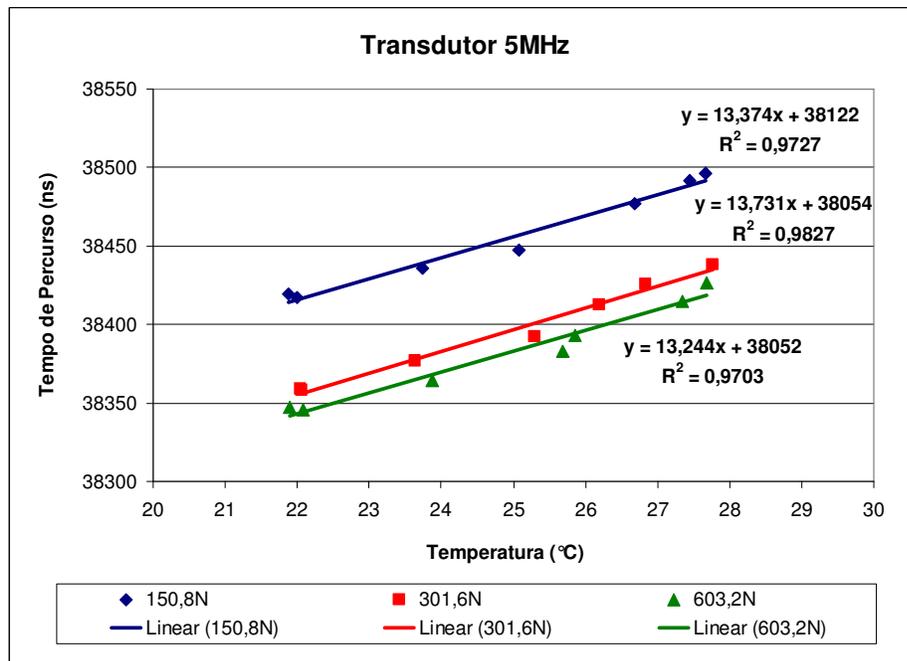


Figura 5.8 – Gráfico do tempo de percurso x temperatura e força de contato para o transdutor de 5MHz.

A tabela 5.1 mostra de forma resumida, os resultados para a variação do tempo de percurso com a temperatura, já mostrados nos gráficos.

Transdutor (MHz)	Força (N)	Resultado ($\eta s / ^\circ C$)
2,25	150,8	13,250
	301,6	13,511
	603,2	13,979
3,5	150,8	13,161
	301,6	13,123
	603,2	11,579
5	150,8	13,374
	301,6	13,731
	603,2	13,244

Tabela 5.1 – Resultados da variação do tempo de percurso com relação à temperatura.

5.1.3 Análise da significância da temperatura

Observando no gráfico o R^2 das medições realizadas, os valores todos ficaram acima de 0,96. Como esse fator mede o quanto a variável de resposta é explicada pelo modelo, quanto mais próximo a “1”, melhor. Considera-se que acima de 0,7 o modelo está explicando bem a variação na variável de resposta. Portanto, a curva (reta) explica adequadamente o fenômeno.

Embora os valores de R^2 sejam elevados, muito próximos a “1”, foi realizada a ANOVA (análise de variâncias), com o objetivo de certificar se existe realmente diferença no tempo de percurso, com relação à temperatura. Para isso, foram fixados os outros fatores, força e frequência dos transdutores. A análise mostra que o fator “temperatura” provoca alterações significativas no “tempo de percurso”.

O modelo apropriado pela análise pode ser descrito pela equação 5.1 (STATCAMP):

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij} \quad (5.1)$$

Onde:

μ – média geral dos dados (parâmetro comum a todos os tratamentos);

α_i – efeito do nível i do fator (fator que provoca a variável de resposta);

ε_{ij} - componente aleatório do erro experimental.

Desta forma testou-se as hipóteses:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k \\ H_1: \mu_i = \mu_j \neq \mu_j \ (i \neq j) \end{array} \right.$$
$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \mu_1 = \dots = \mu_k \\ H_1: \text{pelo menos um é diferente} \end{array} \right.$$

Para o intervalo de confiança de 95%, rejeita-se a hipótese nula se a probabilidade de ocorrência for menor que 5% - $p < 0,05$, ou seja, são diferentes entre si. E se aceita a hipótese nula, se $p > 0,05$, ou seja, todas as médias estão contidas no intervalo de confiança e podem ser consideradas iguais. A estatística F é outra forma de se testar a igualdade entre as médias dos níveis. Quando o valor de F for grande, rejeita-se a hipótese nula, e conclui-se que existe diferença entre as médias. Os resultados das análises foram os seguintes para o intervalo de confiança de 95%:

a. ANOVA Transdutor de 2,25MHz

A tabela 5.2 mostra um exemplo da ANOVA realizada no software Minitab® para o transdutor de 2.25 MHz e força de 150,8N. O mesmo foi feito para cada transdutor com as diferentes forças de contato, e os valores estão mostrados na tabela 5.3.

Pressão = 150,8 N:

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Estatística F	P
Temperatura	6	40877,52	6812,92	1430,22	0,000
Erro	28	133,38	4,76		
Total	34	41010,89			

S = 2,183 R² = 99,67% R² (adj) = 99,61%

Tabela 5.2 – ANOVA para o Transdutor 2.25 – Força de 150,8N

Conclusão: $p < 0,05$: Rejeita-se H_0 , e conclui-se que a temperatura influencia no tempo de percurso.

b. ANOVA para todos os transdutores e forças de contato

Transdutor (MHz)	Força (N)	Estatística F	P	Temperatura
2,25	150,8	1430,22	0,000	Influencia
	301.6	3774,04	0,000	Influencia
	603.2	4598,36	0,000	Influencia
3,5	150,8	1816,48	0,000	Influencia
	301.6	5491,18	0,000	Influencia
	603.2	3588,31	0,000	Influencia
5	150,8	3179,34	0,000	Influencia
	301.6	2406,88	0,000	Influencia
	603.2	5227,54	0,000	Influencia

Tabela 5.3 – Resultados de ANOVA para todos os transdutores x força x temperatura

Portanto, em todos os casos, para os três transdutores e para as três forças para cada um, a temperatura influencia no tempo de percurso. A semelhança nos resultados para o coeficiente de inclinação das melhores retas ajustadas indica que a influência é a mesma ou muito próxima. Apenas em um caso a inclinação ficou fora da faixa de 13 e 14 $\eta/s^{\circ}C$. A média de todos os fatores, incluindo este valor fora da faixa é de 13,25 $\eta/s^{\circ}C$ e o desvio padrão é 0,675718 η/s . Com a retirada desse valor, a média fica 13,43 $\eta/s^{\circ}C$, e o desvio padrão é 0.301127 η/s .

5.2 Influência da temperatura sobre o levantamento da constante acustoelástica (L_{11})

Para o levantamento das constantes acustoelásticas foram utilizadas cinco barras, somente com um conjunto de transdutores, o de 2,25 MHz, e a mesma força da probe sobre todas as barras, 603,2N. Para cada barra, foram levantadas nove constantes acustoelásticas, três para cada temperatura, medidas em três dias diferentes.

A escolha do conjunto de transdutores de 2,25 MHz deve-se ao fato de que este nível de frequência é o mais utilizado para aplicações em aço. Como se sabia que a resposta dos tempos de percurso com a temperatura era aproximadamente a mesma para cada transdutor, a avaliação de só um conjunto permitiria conhecer o comportamento dos demais.

A forma escolhida para obter a constante foi traçar o valor da variação do tempo de percurso multiplicando este valor por (E/t_0^*) , é obtido o valor do lado esquerdo da equação 5.2, em função da tensão aplicada. Como essa variação (lado direito da equação 5.2) é igual ao produto da tensão pela constante acustoelástica (lado esquerdo), a inclinação da reta que se ajusta aos dados, obtém a constante, diretamente. As barras foram tracionadas com cinco tensões diferentes.

$$\sigma L_{11} = \frac{E}{t_0^*} \Delta t \quad (5.2)$$

Em cada uma das cinco tensões, o tempo de percurso foi medido cinco vezes, para as cinco barras, três faixas de temperatura distintas e em três dias diferentes, totalizando 1125 medições. Das cinco medições para cada tensão, foi calculada a média, que foi considerada para o cálculo de Δt ($= t - t_0$), multiplicado por (E/t_0^*) , resultando em Tensão (σ) x Constante acustoelástica (L_{11}).

Segue um exemplo da planilha para o levantamento de Δt . A segunda coluna mostra os tempos obtidos quando a barra não está sob tensão. A terceira, quando é aplicado 50 bar ao sistema de tracionamento hidráulico, e assim por diante. A tabela mostra os desvios obtidos, da ordem de um nanosegundo. A última linha mostra os valores da diferença entre os tempos médios

de percurso para cada valor de tensão aplicada. Multiplicando esse valor por (E/t_0^*) permite calcular o valor do lado esquerdo da equação 5.2.

Pressão (bar)	0	50	100	150	190
Tensão Teórica (MPa)	0	41,1569	82,3138	123,4707	156,3962
1	38,987078	39,015413	39,030405	39,044345	39,054081
2	38,989593	39,013915	39,02973	39,043839	39,054547
3	38,988316	39,014709	39,02973	39,04452	39,053706
4	38,988614	39,015034	39,03034	39,043853	39,054878
5	38,989009	39,014339	39,030618	39,044509	39,05611
Média (η_s)	38988,522	39014,682	39030,165	39044,2132	39054,6644
desvio (η_s)	0,938115	0,584151	0,409842	0,342332	0,923045
$t-t_0$	26,16	41,6426	55,6912	66,1424	

Tabela 5.4 – Exemplo do levantamento de Δt .

Os resultados de Tensão (σ) x Constante acustoelástica (L_{11}) são colocados em planilhas, como as mostradas na tabela 5.5, que resultarão nos gráficos para o levantamento das constantes:

Barra R1 15/12/2006 Temperatura 1 (21,4 - 22,3 °C)			Barra R1 15/12/2006 Temperatura 2 (23,3 - 24,8 °C)		
Tensão teórica			Tensão teórica		
Pressão (MPa)	Tensão x L_{11}		Pressão (MPa)	Tensão x L_{11}	
0	0	0	0	0	0
50	45,72989239	167,459066	50	45,72989239	169,475633
100	91,45978478	292,996812	100	91,45978478	314,9964563
150	137,1896772	361,776604	150	137,1896772	391,5516653
190	173,7735911	405,795284	190	173,7735911	465,3809543

Barra R1 15/12/2006 Temperatura 3 (26,8 - 28,4 °C)		
Tensão Teórica		
Pressão (MPa)	Tensão x L_{11}	
0	0	0
50	45,72989239	179,1819764
100	91,45978478	317,3911293
150	137,1896772	410,6993546
190	173,7735911	480,9430974

Tabela 5.5 – Exemplo das planilhas para o levantamento das constantes.

5.2.1 Análise da significância da temperatura

Como o objetivo deste experimento é saber se a variação da temperatura influencia no valor das constantes, foi aplicado a ANOVA para cada barra. Os resultados de L_{11} estão na tabela 5.6 para cada barra de R1 a R5. Os valores da tabela foram tirados dos gráficos para o levantamento da constante acustoelástica L_{11} . Foram traçados dois tipos de gráficos, um com uma reta, para se obter o valor da constante e outro com o polinômio. A razão para o segundo tipo de curva é analisar o fato de que polinômio se ajusta melhor aos pontos obtidos.

	Barra R1	Barra R2	Barra R3	Barra R4	Barra R5
Temperatura	L_{11}	L_{11}	L_{11}	L_{11}	L_{11}
1	2,30680	2,78980	3,47950	3,98560	3,24550
1	2,47610	2,63730	3,83390	3,88030	3,33880
1	2,34340	2,83640	3,40900	4,01730	3,20430
Média 1	2,37543	2,75450	3,57413	3,96107	3,26287
2	2,63730	3,43250	3,84910	3,93500	3,38850
2	2,32280	3,22530	4,04160	4,03240	3,41620
2	1,92110	3,07880	3,84420	4,00000	3,54230
Média 2	2,29373	3,24553	3,91163	3,98913	3,44900
3	2,73050	3,08850	3,38710	3,95570	3,88800
3	3,07600	2,76830	3,63950	4,15530	3,25590
3	2,28310	3,86450	3,38210	4,14310	3,42580
Média 3	2,69653	3,24043	3,46957	4,08470	3,52323

Tabela 5.6 – Tabela com resultados de L_{11} para as retas levantadas.

No teste estatístico ANOVA feito para cada barra, foi utilizado o mesmo intervalo de confiança utilizado no experimento anterior, de 95%, ou seja, há igualdade entre as médias se $p > 0,05$ e não há igualdade entre as médias se $p < 0,05$.

Para todos os gráficos apresentados agora, as equações:

y_1 = equiva à equação para a temperatura 1;

y_2 = equiva à equação para a temperatura 2;

y_3 = equiva à equação para a temperatura 3.

a. ANOVA para Barra R1:

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrados Médios	Estatística F	P
Temperatura	2	0,2720	0,1360	1,38	0,320
Erro	6	0,5897	0,0983		
Total	8	0,8617			

S = 0,3135 $R^2 = 31,57\%$ R^2 (adj) = 8,76%

Tabela 5.7 – Resultados de ANOVA para a barra R1

Conclusão: $p > 0,05$: Aceita-se H_0 , e conclui-se que a temperatura não influencia no levantamento da constante acustoelástica.

b. ANOVA para todas as barras

A tabela 5.8 mostra um resumo da ANOVA de todos os resultados para todas as barras

Barra	Estatística F	P	Temperatura
R1	1,38	0,320	Não influencia
R2	1,99	0,218	Não influencia
R3	5,57	0,043	Influencia
R4	1,88	0,232	Não influencia
R5	1,37	0,324	Não influencia

Tabela 5.8 – Resultados de ANOVA para cada barra

A seguir os gráficos para o levantamento das constantes acustoelásticas (L_{11}) para a barra R1.

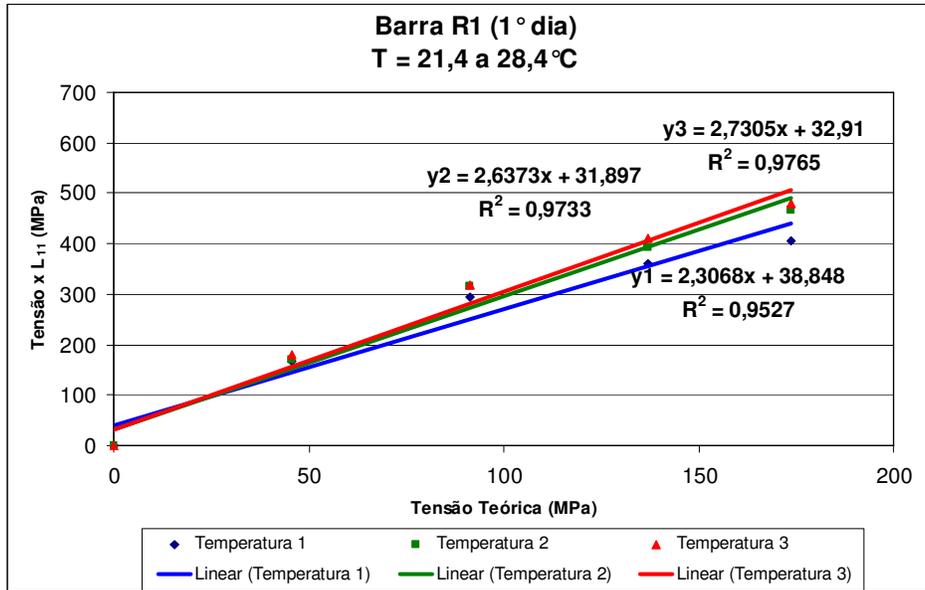


Figura 5.9 – Gráfico das constantes da barra R1 – 1° dia

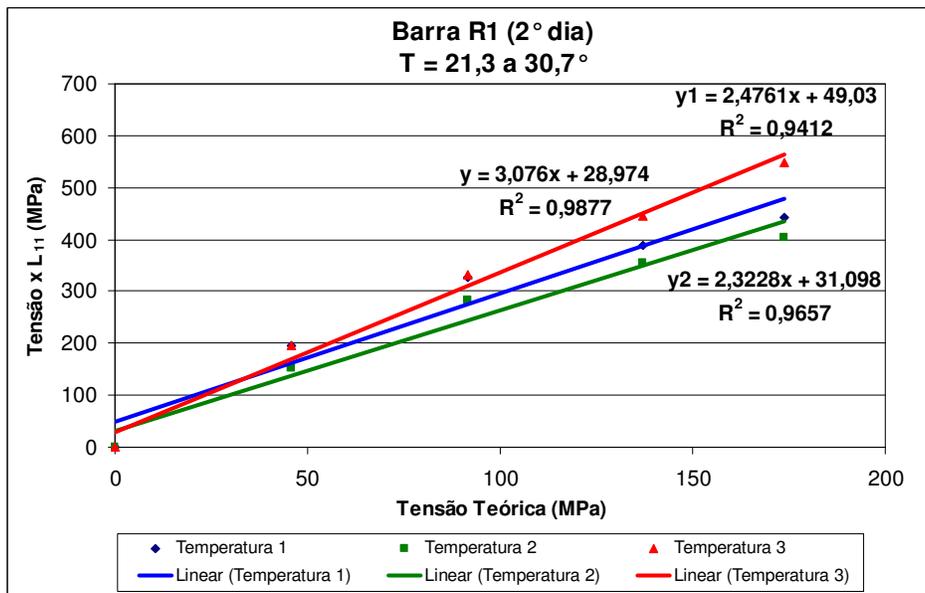


Figura 5.10 – Gráfico das constantes da barra R1 – 2° dia

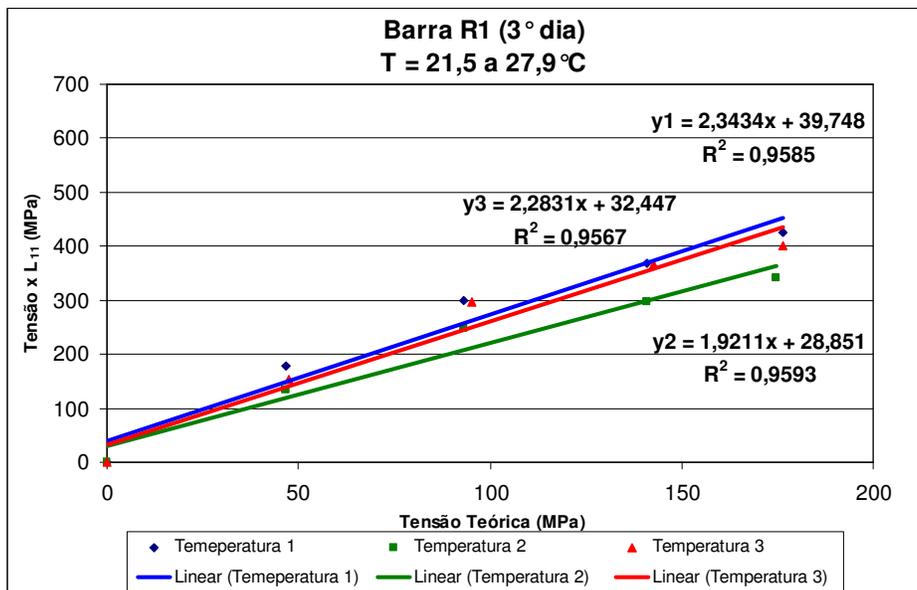


Figura 5.11 – Gráfico das constantes da barra R1 – 3º dia

Abaixo os gráficos para o levantamento das constantes acustoelásticas (L_{11}) para a barra R2.

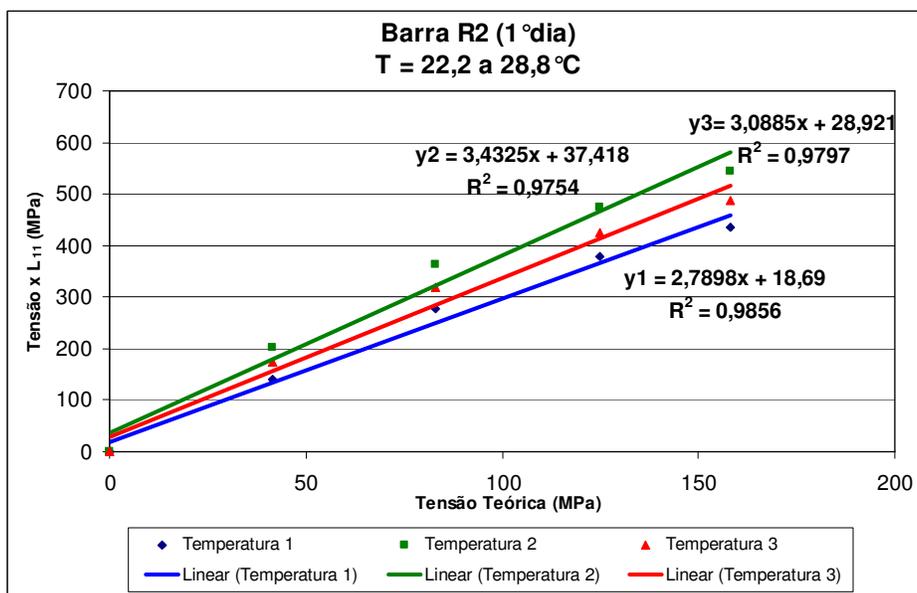


Figura 5.12 – Gráfico das constantes da barra R2 – 1º dia

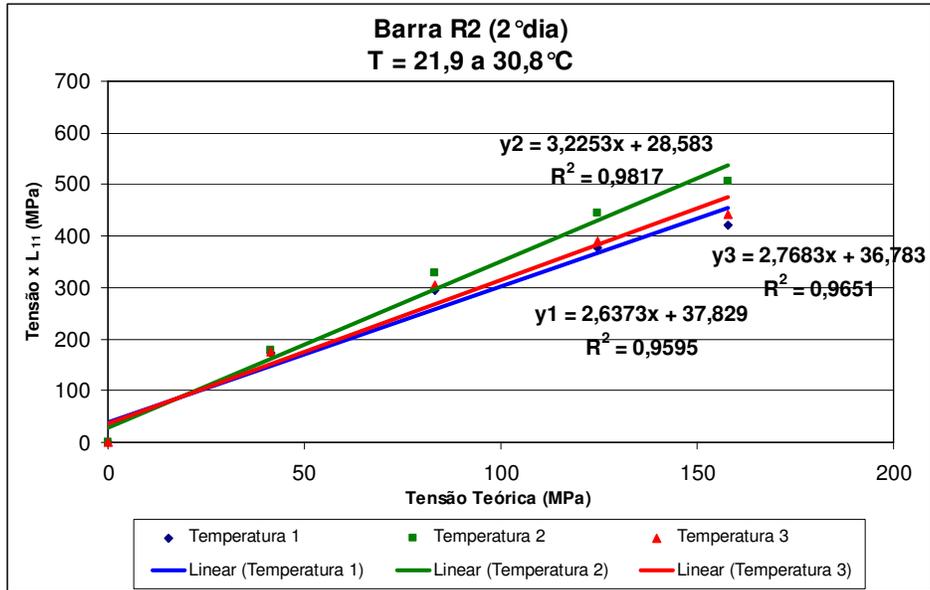


Figura 5.13 – Gráfico das constantes da barra R2 – 2º dia

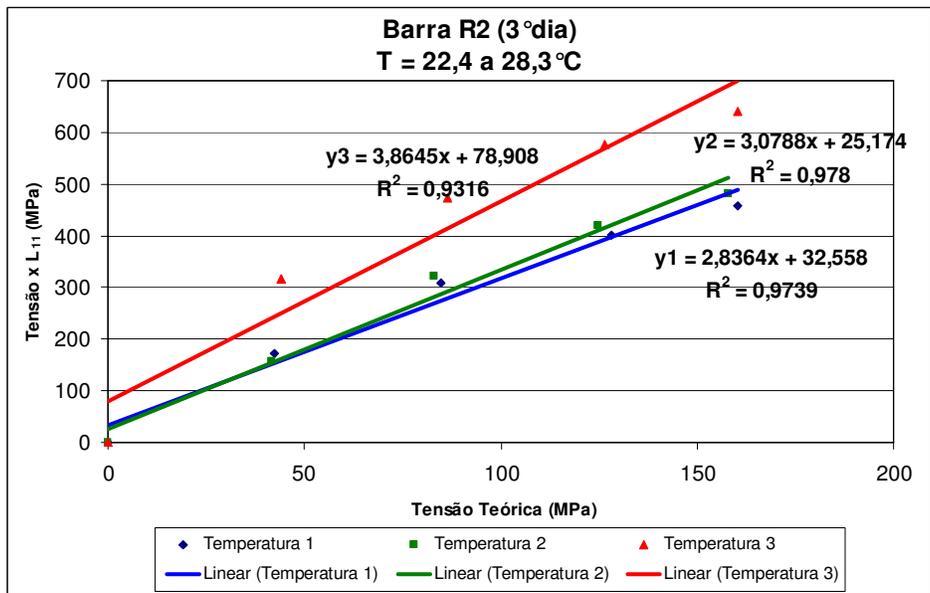


Figura 5.14 – Gráfico das constantes da barra R2 – 3º dia

Abaixo os gráficos para o levantamento das constantes acustoelásticas para a barra R3.

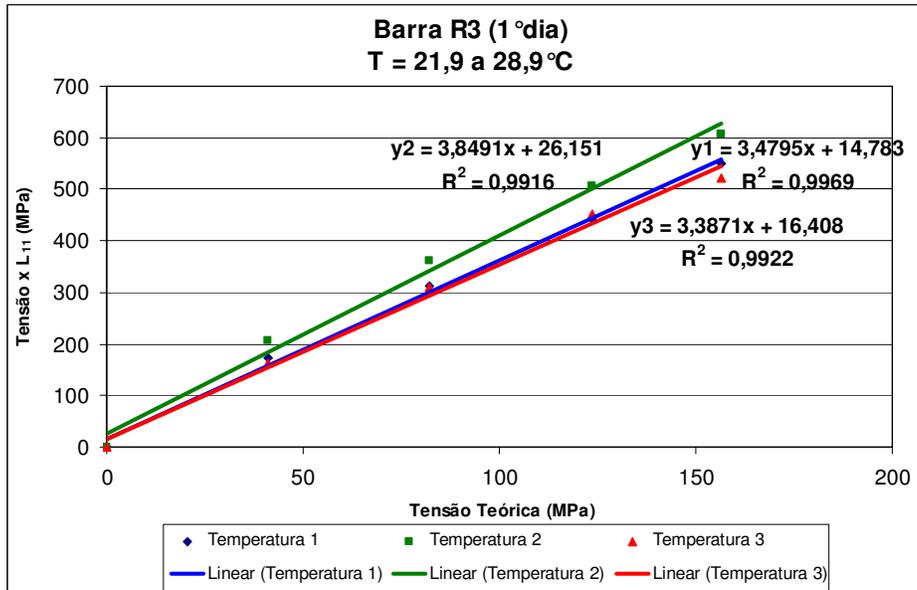


Figura 5.15 – Gráfico das constantes da barra R3 – 1° dia

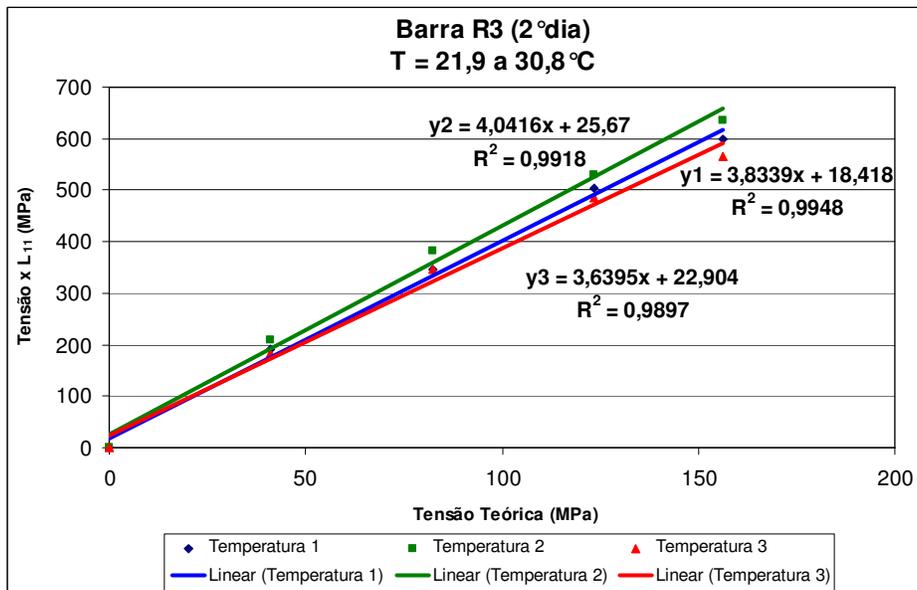


Figura 5.16 – Gráfico das constantes da barra R3 – 2° dia

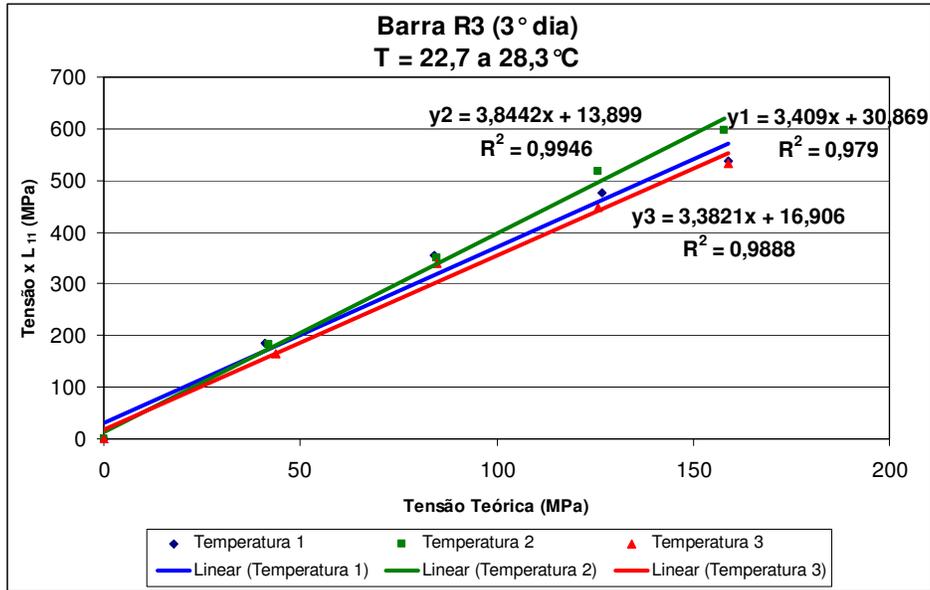


Figura 5.17 – Gráfico das constantes da barra R3 – 3° dia

Como no teste ANOVA as constantes da barra R3 apresentaram diferença, foi realizado o teste de Tukey, para identificar onde está a diferença. Este teste proposto por Tukey (1953), TSD – Tukey Significant Difference, permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias dos níveis, ou seja, não permite comparar grupos entre si. A fórmula é definida como:

$$TSD = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{QME}{n}} \quad (\text{dados balanceados}) \quad (5.3)$$

$$TSD = \frac{q_{\alpha}(k, N - k)}{\sqrt{2}} \sqrt{QME \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (\text{dados não balanceados}) \quad (5.4)$$

Onde:

q – amplitude total de “student” (que depende de k)

k – número de níveis

(N – k) – número de graus de liberdade dos erros

Este teste preserva o nível de significância para todos os contrastes. Rejeita-se a igualdade entre dois níveis se:

Abaixo os gráficos para o levantamento das constantes acustoelásticas (L_{11}) para a barra R4.

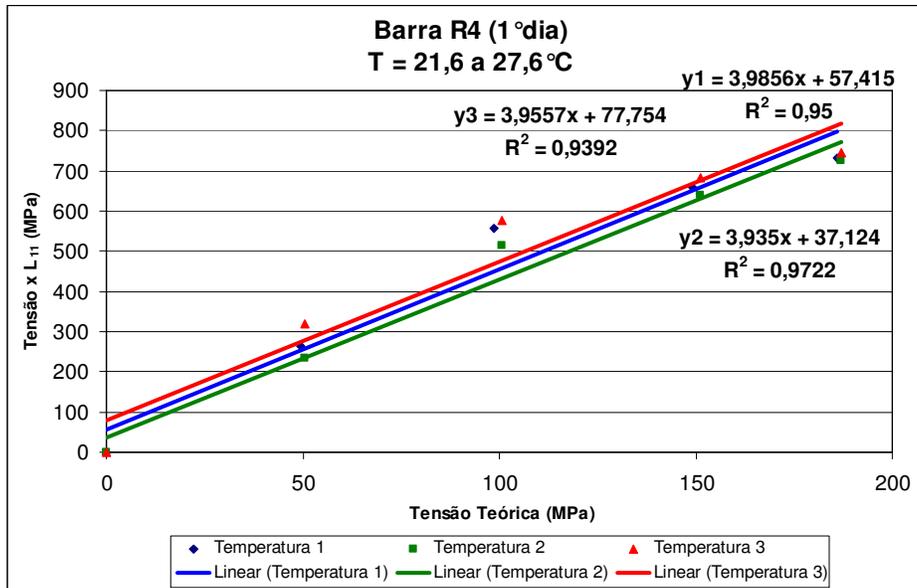


Figura 5.19 – Gráfico das constantes da barra R4 – 1º dia

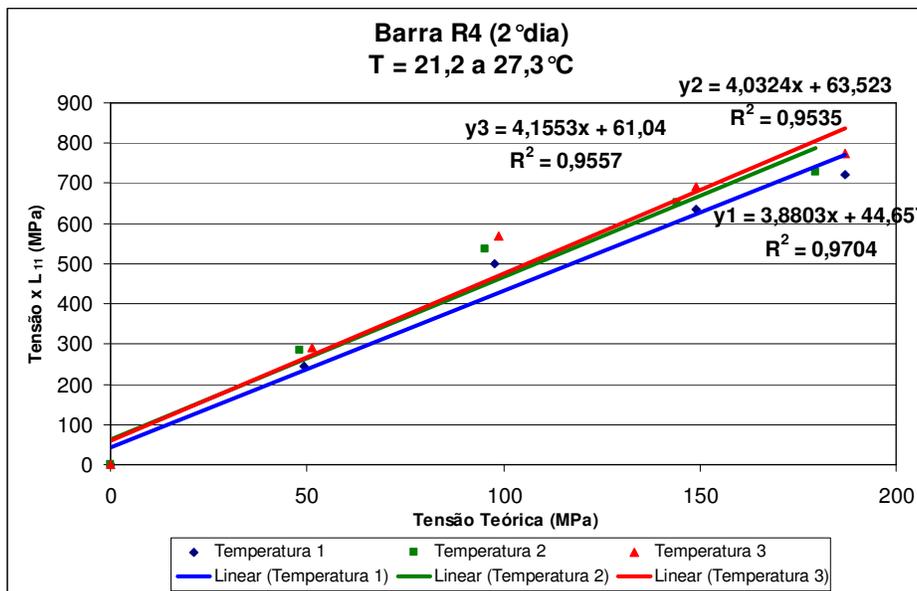


Figura 5.20 – Gráfico das constantes da barra R4 – 2º dia

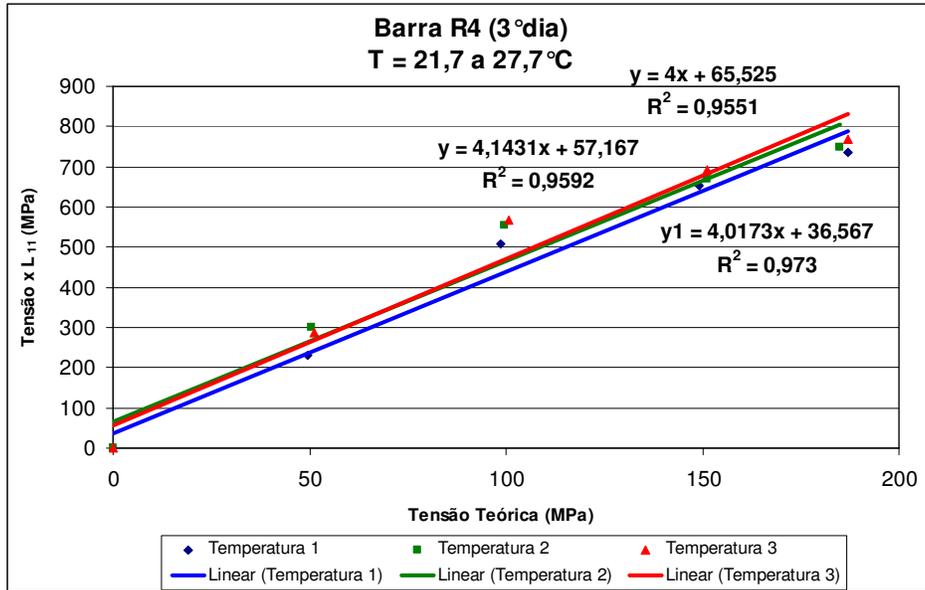


Figura 5.21 – Gráfico das constantes da barra R4 – 3º dia

Abaixo os gráficos para o levantamento das constantes acustoelásticas (L_{11}) para a barra R5.

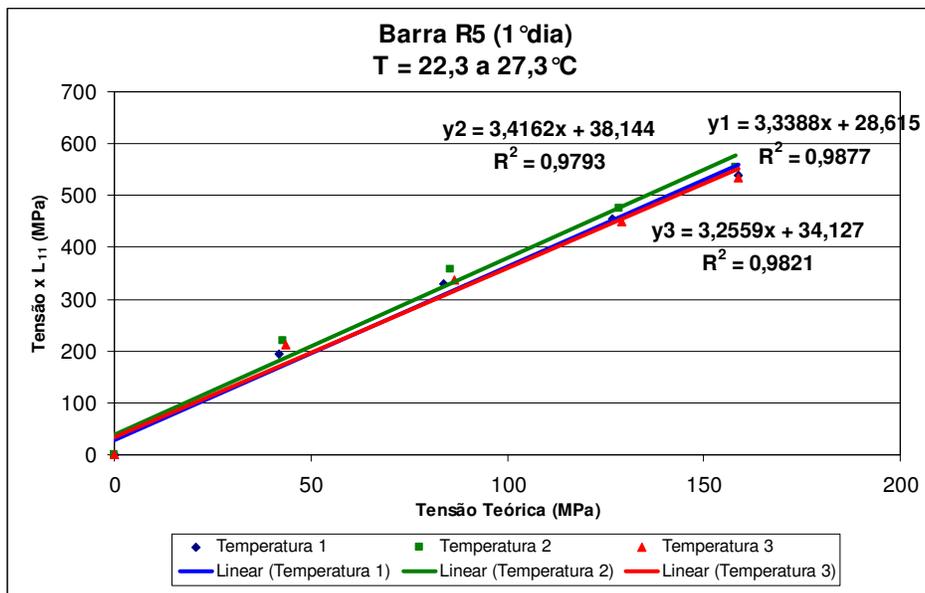


Figura 5.22 – Gráfico das constantes da barra R5 – 1º dia

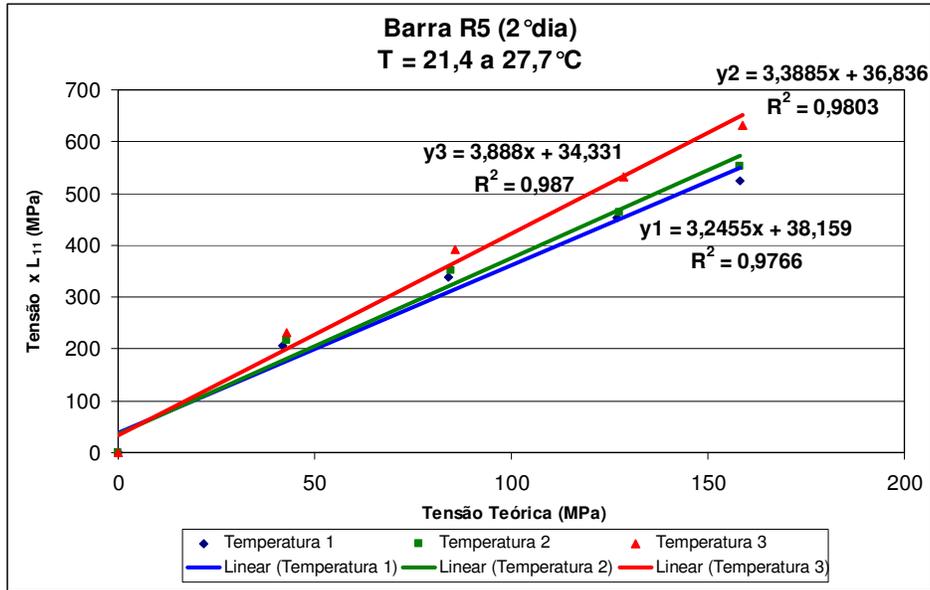


Figura 5.23 – Gráfico das constantes da barra R5 – 2º dia

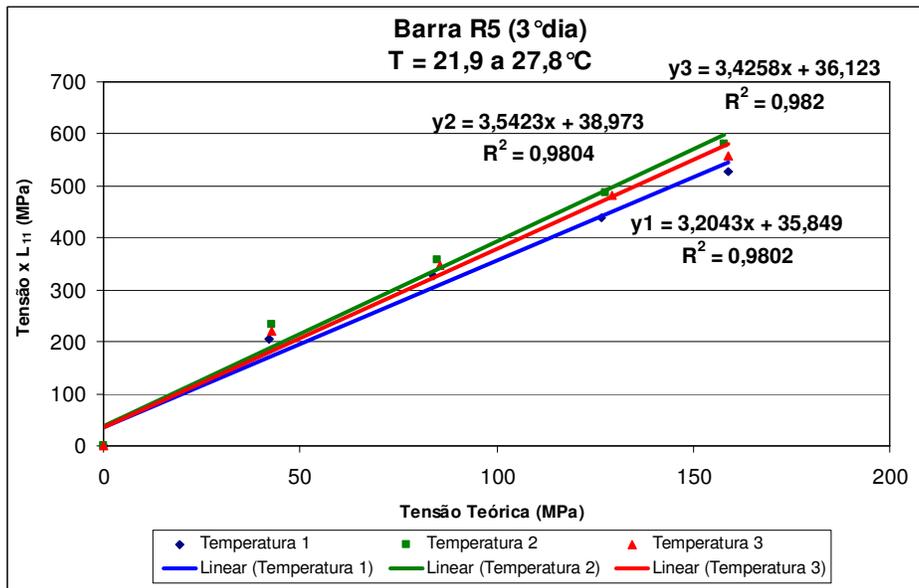


Figura 5.24 – Gráfico das constantes da barra R5 – 3º dia

Para quatro das cinco barras, a temperatura não influencia no levantamento da constante acustoelástica (L_{11}). O mesmo não ocorreu para a barra R3. Com estes dados parece claro que a

temperatura realmente não influencia nos resultados da constante acustoelástica, embora influencie no tempo de percurso, como demonstrado no experimento anterior.

Foi observado que os valores de L_{11} foram muito diferentes para cada barra o que pode estar ligado a não uniformidade da textura do material. A figura 5.25 mostra esta variação.

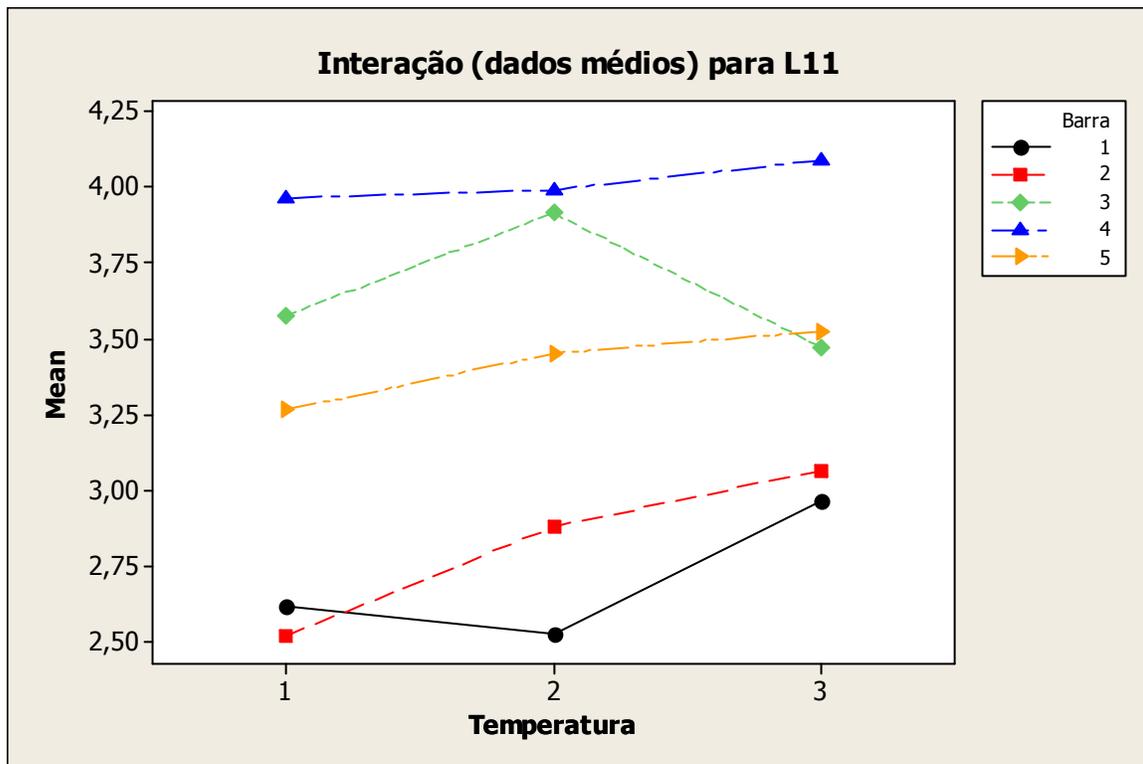


Figura 5.25 – Valores médios de L_{11} para as cinco barras nas três temperaturas.

5.2.2. Avaliação dos coeficiente polinomiais

Um fato chamou a atenção ao longo desta pesquisa: a curva que melhor se ajusta aos pontos obtidos experimentalmente não é uma reta, mas um polinômio de segundo grau. Esse fato havia sido observado em alguns experimentos já realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Acustoelástica, mas quando a carga aplicada era aumentada, a reta voltava a ser a melhor opção. Para a capacidade do sistema de aplicação de cargas disponível para os ensaios, isso não aconteceu.

As figuras a seguir são algumas das apresentadas anteriormente, mas com polinômios ao invés de retas. Nota-se que em todos os gráficos os polinômios atingem um R^2 maior do que os das retas. Ainda está por ser explicada a razão de tal resposta, além dos objetivos deste trabalho, mas pode estar relacionado ao alinhamento dos sistemas de aplicação de carga e à forma de fixar o sistema de medição.

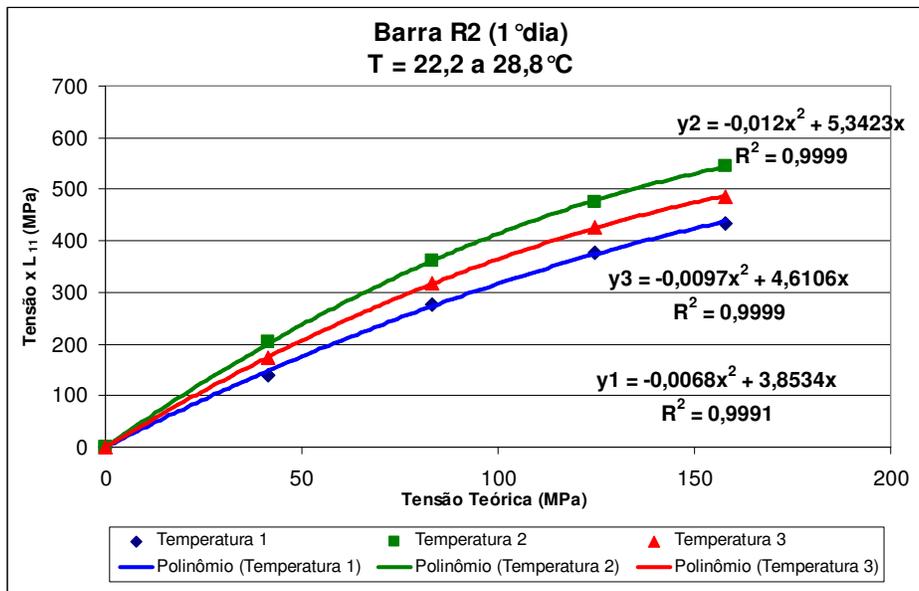


Figura 5.26 – Gráfico das constantes da barra R2 – 1º dia (Polinômio)

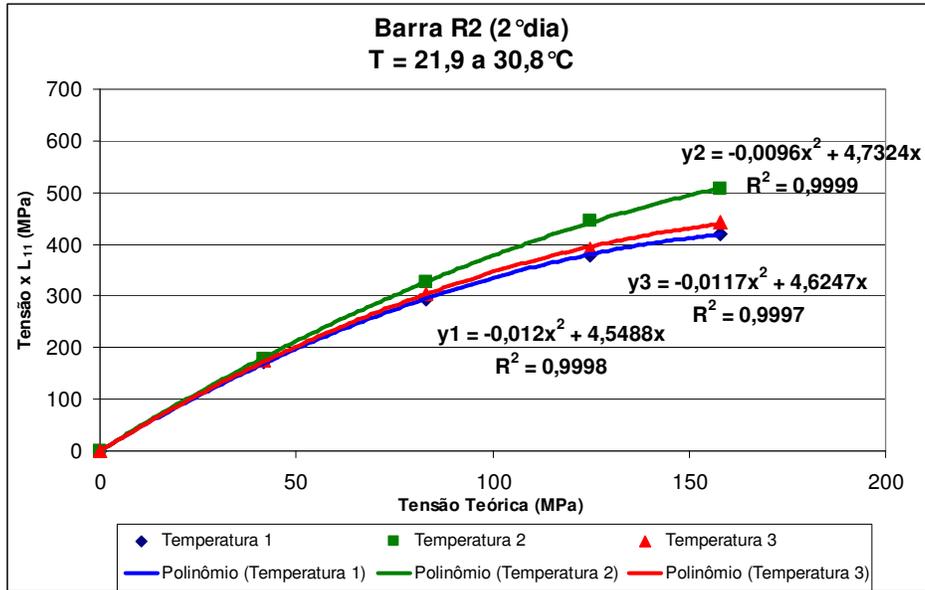


Figura 5.27 – Gráfico das constantes da barra R2 – 2º dia (Polinômio)

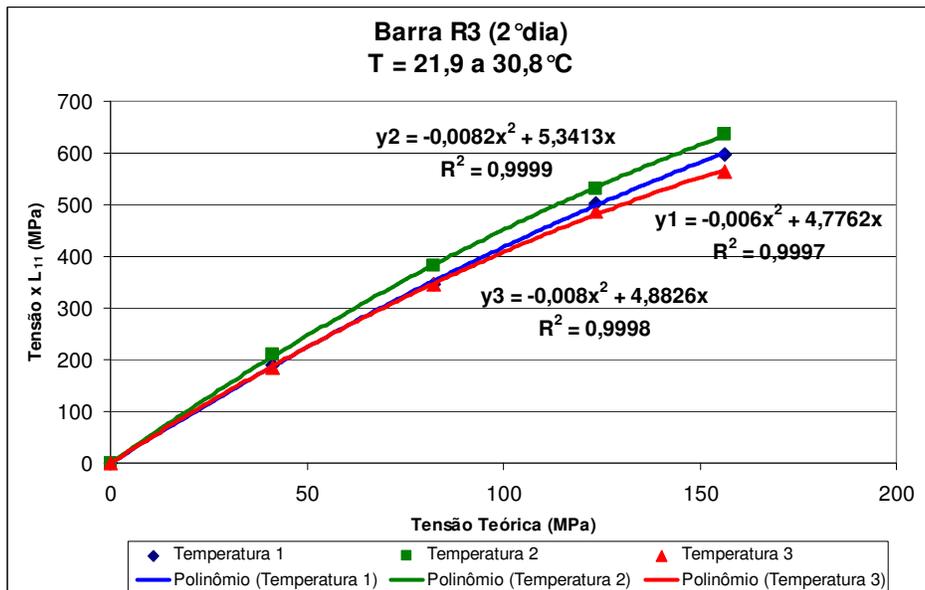


Figura 5.28 – Gráfico das constantes da barra R3 – 2º dia (Polinômio)

Se a análise anterior mostrou que a temperatura não influencia no coeficiente linear da reta de ajuste, a pergunta a ser respondida é se influencia no coeficiente de segunda ordem do polinômio. Assim novas análises foram feitas considerando agora os polinômios levantados. O

valor de “a”, no polinômio $y = ax^2 + bx$ está sendo analisado. A tabela 5.9 mostra os valores de “a” dos polinômios:

	Barra R1	Barra R2	Barra R3	Barra R4	Barra R5
Temperatura	a	a	a	a	a
1	-0,01240	-0,00680	-0,00420	-0,01530	-0,00830
1	-0,01500	-0,01200	-0,00600	-0,01150	-0,01130
1	-0,01170	-0,01010	-0,01070	-0,01050	-0,00970
Média 1	-0,01303	-0,00963	-0,00697	-0,01243	-0,00977
2	-0,01020	-0,01200	-0,00800	-0,01040	-0,01110
2	-0,01040	-0,00960	-0,00820	-0,01670	-0,01050
2	-0,00940	-0,00930	-0,00510	-0,01600	-0,01060
Média 2	-0,01000	-0,01030	-0,00710	-0,01437	-0,01073
3	-0,01030	-0,00970	-0,00600	-0,01860	-0,00940
3	-0,00800	-0,01170	-0,00800	-0,01530	-0,00990
3	-0,01110	-0,02260	-0,00650	-0,01470	-0,01010
Média 3	-0,00980	-0,01467	-0,00683	-0,01620	-0,00980

Tabela 5.9 – Tabela com resultados de “a” para as curvas levantadas.

A tabela 5.10 mostra um resumo da ANOVA de todos os resultados para todas as barras

Barra	Estatística F	P	Temperatura
R1	5,01	0,052	Não influencia
R2	1,17	0,218	Não influencia
R3	0,01	0,990	Não influencia
R4	1,40	0,316	Não influencia
R5	1,09	0,395	Não influencia

Tabela 5.10 – Resultados de ANOVA para os valores de “a” de cada barra

Com este novo teste, conclui-se que a temperatura não influencia no tempo de percurso, porém o valor de “p” para a barra R3 foi muito alto, indicando que realmente não há influência. Apenas para verificação foi feito o teste de ANOVA para os valores do coeficiente linear “b” do polinômio e os valores estão mostrados na tabela 5.11. O resultado demonstrou que a temperatura não influencia o valor de “b”.

Barra	Estatística F	P	Temperatura
R1	2,59	0,154	Não influencia
R2	1,20	0,364	Não influencia
R3	1,36	0,325	Não influencia
R4	2,15	0,197	Não influencia
R5	1,76	0,250	Não influencia

Tabela 5.11 – Resultados de ANOVA para os valores de “b” de cada barra

5.3 Resultados para a o efeito da temperatura no estado 0 de tensão

Os ensaios realizados na segunda etapa, para a verificação do efeito da temperatura sobre o valor de L_{11} , permitem comparar também o seu efeito sobre o tempo de percurso, quando considerados os resultados sem a aplicação de tensão sobre a barra. O mesmo poderia ser feito para qualquer dos níveis de tensão, mas para o nível nulo a incerteza sobre a quantidade de tensão aplicada é nula, enquanto para outros níveis pode haver variação vinda do sistema de aplicação de cargas. E com esta avaliação observa-se o efeito da temperatura sobre diferentes regiões do material. Assim, apenas a variação devido ao fato de que a medição é feita em diferentes regiões do material é levada em conta.

Para essa avaliação, foram levantadas retas que mostram o quanto a temperatura influenciou no tempo de percurso de cada uma das cinco barras, no estado zero de tensão. Essas curvas são apresentadas nas figuras 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34:

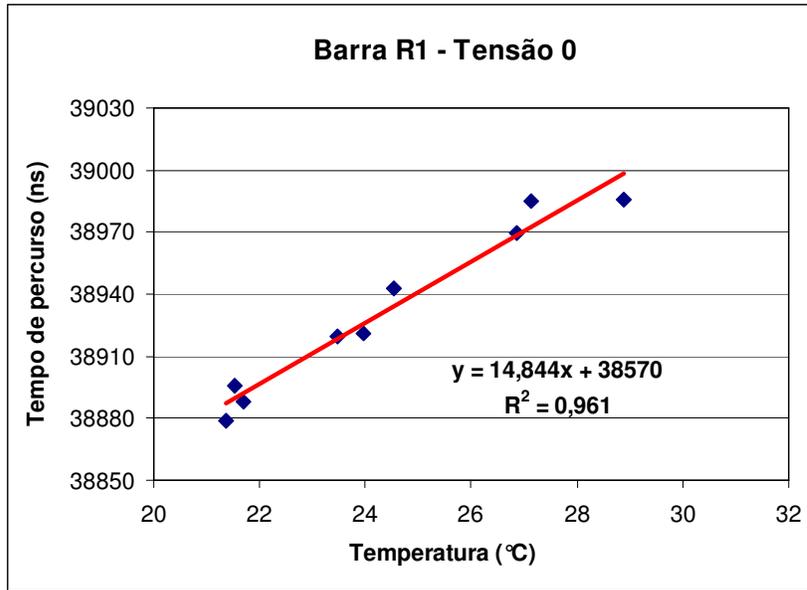


Figura 5.29 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R1 – tensão zero

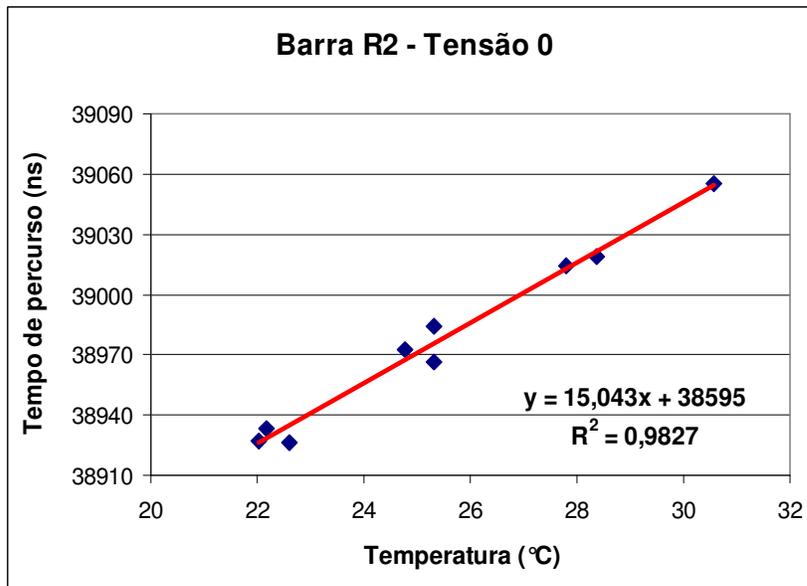


Figura 5.30 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R2 – tensão zero

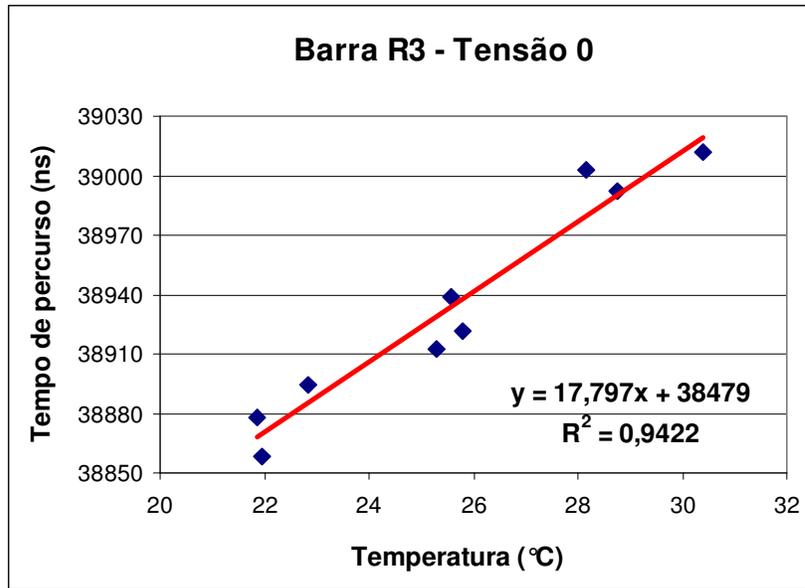


Figura 5.31 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R3 – tensão zero

Como a barra 3, pelo teste de Tukey apresentou discrepância na temperatura 3, foi refeito o gráfico da inclinação, eliminando a temperatura 3, e o resultado está mostrado no gráfico 5.32.

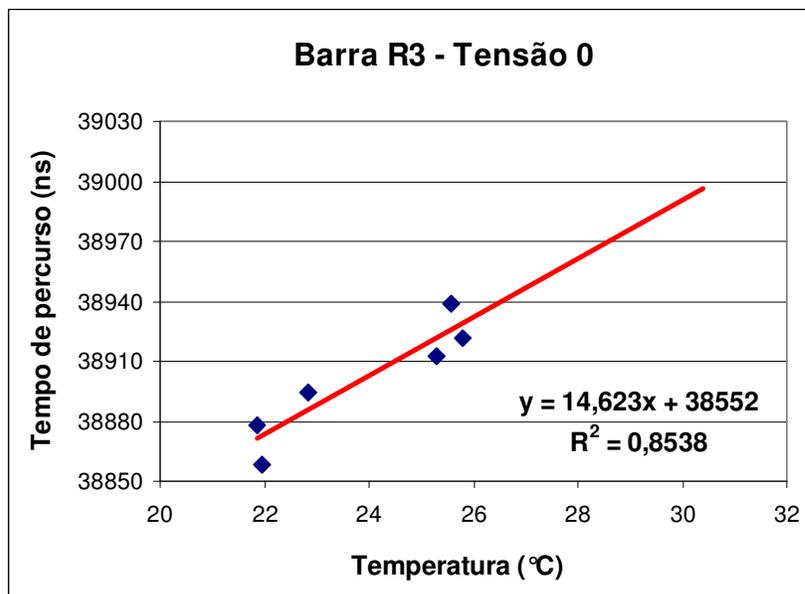


Figura 5.32 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R3 – tensão zero – descartando a temperatura 3

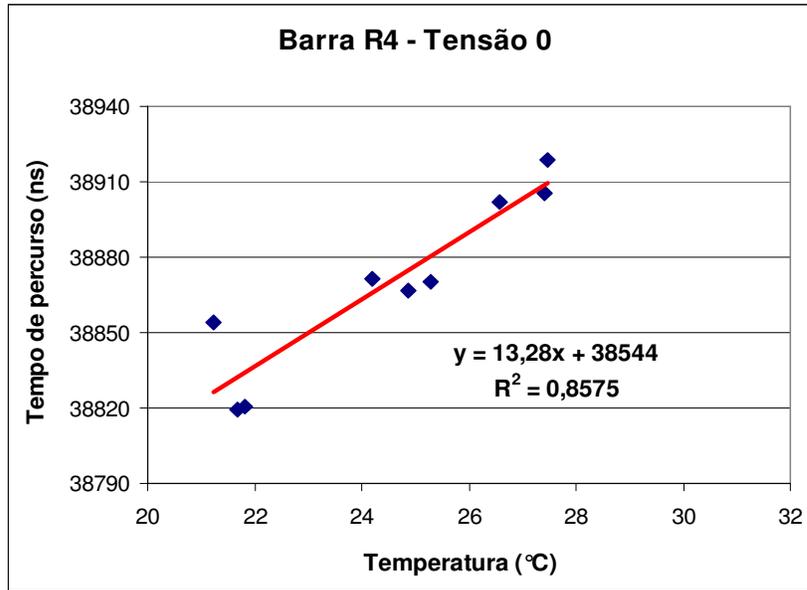


Figura 5.33 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R4 – tensão zero.

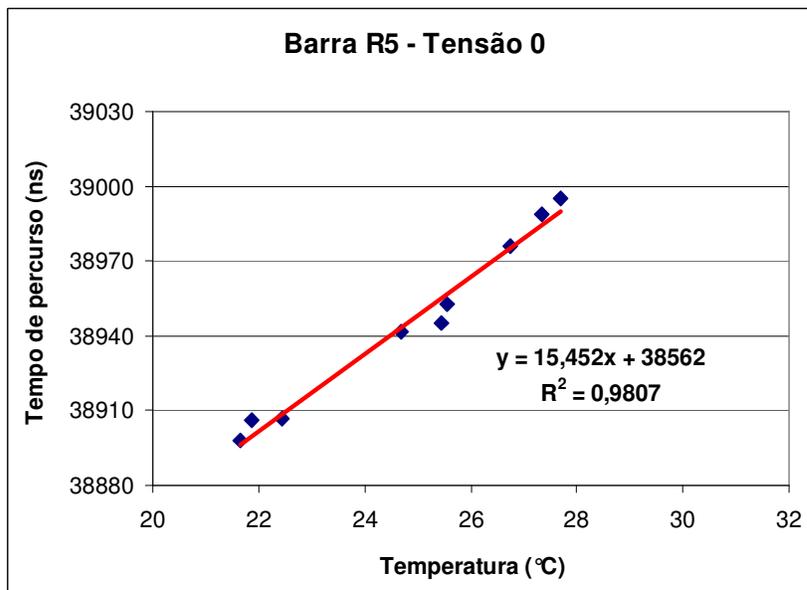


Figura 5.34 – Gráfico da temperatura em função do tempo de percurso para a barra R5 – tensão zero.

A tabela 5.12 mostra o resumo dos resultados da influência da temperatura sobre o tempo de percurso no estado nulo de tensão para as cinco barras testadas, todas com o transdutor de 2,25 MHz e força igual a 603,2N:

<i>Barra</i>	<i>Tempo de Percurso (ηs) / °C</i>
R1	14,844
R2	15,043
R3	17,797
R4	13,28
R5	15,452
<i>Média</i>	15,3

Tabela 5.12 – Resumo dos tempos de percurso / °C para todas as barras, na tensão zero

Comparando a barra R1, que foi testada no primeiro experimento, o valor foi próximo ao encontrado para o transdutor de 2,25 MHz, com força de 603,2N, que foi de 13,979 $\eta s/^\circ C$. As demais barras, exceto a R3, tiveram um valor muito próximo um dos outros. Já a barra R3, teve um valor muito acima, talvez isto explique porque esta barra apresentou resultados muito diferentes no teste ANOVA, demonstrando que a temperatura influenciaria no levantamento da constante nas restas e nos polinômios não.

Embora o valor em cada uma das barras seja diferente, fica confirmado o que já havia sido observado no item 5.1 sobre a influência significativa da temperatura.

5.4 Discussão dos Resultados

Para o primeiro experimento, conclui-se que a temperatura influencia no tempo de percurso da onda, em média, 13,58 $\eta s/^\circ C$ para o transdutor de 2,25MHz, em média 12,621 $\eta s/^\circ C$ para o

transdutor de 3,5MHz e $13,45\eta\text{s}/^\circ\text{C}$ para o transdutor de 5MHz. Esses valores são muito superiores ao mencionado por Bray & Junghans, em 1995, de $3,4\eta\text{s}/^\circ\text{C}$, para o aço de trilhos ferroviários. Os valores são ainda maiores quando são utilizados dados do segundo experimento com a mesma finalidade. Neste caso, um valor médio de $15,3\eta\text{s}/^\circ\text{C}$ foi encontrado, levando em conta os dados obtidos com a barra R3, sem descartar a temperatura 3 que apresentou discrepância no teste de Tukey, desconsiderando a temperatura 3 da barra R3 que não se comporta exatamente da mesma forma que as demais, o valor médio encontrado foi de $14,6\eta\text{s}/^\circ\text{C}$.

No segundo experimento ficou claramente demonstrado que a temperatura não influencia no valor da constante acustoelástica (L_{11}). Problemas provavelmente relacionados ao sistema de medição fizeram que a resposta da barra à aplicação de tensões não fosse linear, como esperado para materiais isotrópicos. O aço utilizado foi laminado e pode ser classificado como ortotrópico, embora essa característica não deva apresentar influência significativa nas ondas longitudinais. Outro fator a ser considerado é o nível de tensão aplicado, entre 26 e 30% da tensão de escoamento do material. Ainda está para ser encontrada a razão pela qual o polinômio de segundo grau foi a curva que melhor se ajustou aos resultados, embora a reta também mostre um bom ajuste.

Os resultados dos experimentos mostraram que estes atingiram plenamente os objetivos para os quais foram planejados e permitiram concluir sobre os efeitos da temperatura sobre a resposta do sistema. A obtenção dos resultados e das conclusões obtidas são fundamentais para a utilização da acustoelasticidade para a medição de tensões em ambientes não controlados, como as dutovias terrestres.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho avaliou a influência da temperatura sobre o resultado da medição de tensões em aço API 5L x70 para gasodutos utilizando ondas longitudinais criticamente refratadas. Assim sendo atingiu todos os objetivos propostos.

Dois experimentos foram conduzidos, já que são dois os parâmetros que podem ser influenciados pela temperatura: o valor do tempo de percurso sem a aplicação de tensões e o valor do coeficiente angular da reta que relaciona a tensão aplicada ao tempo de percurso, representado pela constante acustoelástica L_{11} .

As seguintes conclusões foram obtidas com o desenvolvimento desse trabalho:

- a) A temperatura influencia significativamente o valor do tempo de percurso quando não há tensão aplicada ao material. A variação do tempo de percurso da onda para o sistema utilizado foi de cerca de $13,5 \text{ ns}/^\circ\text{C}$, muito superior ao obtido em literatura (Bray e Stanley, 1996), de $3,4 \text{ ns}/^\circ\text{C}$. Ressalta-se que foram analisadas cinco barras, o que permitiu chegar a esta conclusão.
- b) A influência da temperatura no tempo de percurso determinada com dois métodos e sistemas diferentes foi muito próxima, ou seja, em um dos experimentos, a barra estava totalmente solta e no outro estava presa no conjunto tracionador, embora sem tensão nenhuma aplicada. Quando os dados utilizados são os obtidos a partir de cinco barras, o resultado médio é um valor de cerca de $14,6 \text{ ns}/^\circ\text{C}$.

- c) A temperatura não influencia significativamente a constante acustoelástica nas faixas de temperaturas analisadas. Como não são esperadas variações significativas do módulo de elasticidade nessa faixa, a variação de temperaturas não influencia a resposta da medição de tensões, dado que se conheça o valor do tempo de percurso para tensão nula na temperatura desejada.

Como conclusões adicionais, têm-se:

- I Há uma variação significativa da resposta a aplicação de tensões entre as diversas amostras. Isso mostra que haverá sempre uma incerteza importante no resultado da medição com o método. Seu cálculo está além dos objetivos deste trabalho.
- II Há uma variação significativa do tempo de percurso em amostras diferentes, com a mesma temperatura. Esse efeito provavelmente está ligado a não uniformidade da textura do material. Embora cada uma das barras tenha sido medida sempre na mesma posição, não há garantias de que a textura seja a mesma para as diversas barras e posições. (Anexos)
- III A frequência dos transdutores mostrou ser uma importante fonte de variação da resposta do sistema em termos de tensão. O processo de troca dos transdutores também poderia ter influenciado no resultado. Mas como o transdutor não foi trocado enquanto eram realizadas todas as medições com as diferentes forças e temperaturas, esse argumento é descartado.
- IV A força de aplicação do conjunto de transdutores sobre a amostra tem influência significativa no resultado, mas há um valor limite de 600 N, acima do qual essa influência cessa. A solução para o problema é utilizar sempre um valor de força acima de 600 N.

As recomendações para trabalhos futuros estão ligadas às descobertas obtidas neste trabalho. As principais são:

- Avaliar a influência da temperatura em frequências diferentes com um número superior de amostras.
- Avaliar o efeito da textura sobre o tempo de percurso e a constante acustoelástica e desenvolver formas de minimizá-la.
- Estudar a razão da dispersão dos valores de L_{11} obtidos para esse material, pois neste trabalho os valores obtidos foram entre 2,37 e 4, e segundo Caetano (2003), os valores encontrados foram em média 1,70.
- Desenvolver um sistema que meça os fatores de influência (temperatura, textura etc) e controle os fatores de aplicação (frequência, forma do conjunto de transdutores etc) a fim de permitir a aplicação em campo para a inspeção em gasodutos.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

- Andrino, M. H. Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico: Tese de Mestrado: Universidade Estadual de Campinas, Abril, 2003.
- Andrino, M. H., Caetano, S. F., Santos Júnior, A.A., Trevisan, R.E., Sistema automático para determinação de tensões mecânicas em chapas metálicas baseado na teoria acustoelástica. *Laboratório de Acustoelástica da Universidade de Campinas*, 2002, Campinas.
- Benson, R.W.; Raelson, V.J., Acustoelasticity, *Product Engineering*, n.30, pp. 56-59, 1959.
- Bittencourt, M. S. Q.; Lamy, C. A.; Santos Júnior, A. A.; Payão Filho, J.C.; Bray, D.E. H., Ultrasonic technic and their application in Brazil: reality and perspectives. In: 6° NDE Topical Conference, ASME, v.19, 1999.
- Bouda, B. A., Benchaala, A., Alem,K., Ultrasonic characterization of materials hardness. *Ultrasonics*, v.38, pp. 224-227, 2000.
- Bray, D. E., Junghans, P. G., Application of the Lcr ultrasonic technique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates, *NDT&E International*, v. 28, No. 4, pp. 235-242, 1995.
- Bray, D. E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.

- Bray, D. E.; Salamanca, L.T., Zero – force travel – time parameters for ultrasonic head – waves in railroad rail. *Materials Evaluation*, v. 43, No. 7, pp. 854-858, June 1984.
- Bray, D. E. Ultrasonic stress measurement with Lcr technique. *NDTnet*, July 24, 1998.
- Button, S. T., Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas. Apostila, 2001.
- Caetano, S. F., Determinação das constantes acustoelásticas para aço API 5L X70 para gasodutos. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 197p., 2003, Dissertação (Mestrado).
- Chance, B. H., Ultrasonic measurement of residual stress relaxation in welded steel plates using critically refracted longitudinal waves. Texas. Texas A&M University. Dissertação (Mestrado), 90p. 2000.
- Chartellier, J., Touratier, M. A., A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.83, n.1, pp. 109-117, 1988.
- Crecraft, D.I., The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves, *Journal Sound Vibration*, v. 5, n. 1, pp. 173-192, 1967.
- Dieter, G. E. Engineering design materials and processing approach, *Mcgraw Hill*, chapter 7, pp. 252-260, 1983.
- Duquenoy, M., Ouaftouh, M., Ourak, M., Ultrasonic evaluation of stress in orthotropic materials using Rayleigh waves. *Elsevier NDT&E International*, v.32, pp. 189-199, 1999.
- Duquenoy, M.; Ouaftouh, M., Ourak, M.; Jenot F., Theoretical determination of Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values. *Elsevier Ultrasonics*, v. 39, pp. 575–583, 2002.
- Egle, D. M., Bray, D. E., Application of the acoustoelasticity effect to rail stress measurement, *Material Evaluation*, v.37. n.4, pp. 41-46, 1979.

- Galdámez, E. V. C., Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Dissertação (Mestrado), 2002.
- Gori, M., Certo, M., Patelli, G., Aruta, L., Ultrasonic assessment of residual stresses in the rim of railway solid wheels, *7th ECNDT –European Conference on Non-destructive Testing*. NDTnet, v.3, n.7, session railway, Copenhagen 1998.
- Halkjaer, S., Sorensen, M. P., Kristensen, W. D., The propagation of ultrasound in an autenitic weld. *Ultrasonics*, v.38, pp. 256-261, 2000.
- Hughes, D. S., Kelly, J. L., Second - Order elastic deformation of solids, *Physical Review*, v.92, n.5, pp. 1145-1149, 1953.
- Junghans, P. G. and Bray, D. E., Beam characteristics of high angle longitudinal wave probes, *NDE Applications, Advanced Methods and Codes and Standards*, ed. R. N. Pangborn *et al.*, PVP v.216, NDE v.9, *Proceedings of the 1991 Pressure Vessels and Piping Conference*, San Diego, CA, June, pp. 23-27, 1991.
- Kawashima, K., Measurement of velocity variations along a wave path in the through-thickness direction in a plate. *Ultrasonics – Elsevier*, 2004.
- Kypa, J.M.R.; Santos Júnior, A. A., Bray, D. E. Surface stress measurement using longitudinal critically refracted (Lcr) waves. *Proceedings of XV COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, 1999, Águas de Lindóia, Brasil.
- Landa, M., Plesek, J. Ultrasonic techniques for non-destructive evaluation of internal stress. *Proceedings of 15° WCNDT*, 2000, Rome.
- Levine, D. M., Berenson, M. L., Stephan, D., Estatística: teoria e aplicações. Rio de Janeiro, *ed. Livros Técnicos e Científicos (LTC)*. Cap. 7-12, pp. 329-620.

- Matarezi, J. C., Rodrigues, A. M., Qualificação no ensaio por ultra-som – Nível I, *Centro Técnico Aeroespacial – IFI – São José dos Campos*, 43p., 2001.
- Minicucci, D. J. Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro de Rodas Ferroviárias Forjadas Novas – Classe C. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Outubro, 2003 119p., Dissertação (Mestrado).
- Monchalin, J. P., Néron, C., Choquet, M., Drolet, D., Viens, M., Laser-ultrasonics inspection and characterization of aeronautic materials, *7th ECNDT-European Conference on Non-destructive Testing*, Copenhagen, v.3, n.11, 1998.
- Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments, 3^a Ed., John Wiley and Sons, 1991.
- Neuenschwander, J., Ultrasonic testing of aluminium stabilized high-current superconducting cables, *7th ECNDT-European Conference on Non-destructive Testing*, Copenhagen, v.3, n.11, 1998.
- Nussenzveig, H.M. Curso de Física Básica – v.2 – Fluídos, Oscilações e Ondas; Calor. Editora: Edgard Blücher Ltda., 1983.
- Nikitina, N. Y., Ostrovsky, L. A., An ultrasonic method for measuring stresses in engineering materials, *Ultrasonics*, v.35, pp. 605-610, 1998.
- Ortega, L. P. C. Análise de Tensões por Ultra-Som Através da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua: Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro 2001.
- Ortega, L.P.C., Bittencourt, M.S., Lamy, C.A. & Payão Filho, J.C. Obtenção das Constantes Elásticas por Ultra-som em meios isotrópicos e levemente ortotrópicos. *3rd Pan American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT*, Rio de Janeiro, junho de 2003.
- Rodrigues, A. M., Silva, M. E. S., Qualificação no Ensaio por Ultra-som Nível I. *IFI / CTA / Subdivisão de Treinamento*, 2000, 23p.
- Rose, J. L., Ultrasonic Waves in solid media. *Cambridge University Press*, 1999, Cap. 7, 18 e 19, pp. 288-306.

- Salamanca, T. L., Reinhart, E., Bray, D. E., Golis, M. J., Field applications of an ultrasonic method for stress measurement in structures, *Non-destructive Testing (Proceedings 12th World Conference)*, ed. J Boogaard and G.M. Van Dijk, Elsevier Sci. Pub., Amsterdam, 1989.
- Sankar, B. N., Study of cold worked austenitic stainless steel – using Lcr waves, *15th WCNDT*, Roma, 2000.
- Santana-Greco, J. A., Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 340p. Tese (Doutorado), 2004.
- Santos, A. A., Bray, D. E. Ultrasonic stress measurement using PC based and commercial flaw detectors, *Review of Scientific Instruments*, v. 71,n. 9, September 2000.
- Santos, A. A., Bray, D. E., Application of longitudinal critically refracted waves to evaluate stresses in railroad wheels, *2000 ASNT Spring Conference on 9th annual Research Symposium. American Society for Nondestructive Testing*. Birmingham, Alabama, EUA, março, 2000.
- Santos, G. F. M. Avaliação de Tensões Residuais Causadas por Superaquecimento em Rodas Ferroviárias Utilizando Acustoelasticidade: Tese de Mestrado: Universidade Estadual de Campinas, Setembro, 2003.
- Schneider, E., Nondestructive analysis of stress states in components using micromagnetic and ultrasonic techniques an overview. *Proceedings of 7th ECNDT*, 1998, Copenhagen.
- Stepinski, T., Vagnhammar, B., Automatic detecting disbonbs in Layered Structures using ultrasonic pulso-echo inspection. *7th ECDNT-European Conference on Non-destructive Testing*, Copenhagen, v.3, n.9, 1998.
- Tanala, E. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods. *NDT&E International*, v.28, No 2, 1994, pp 83-88.

Trétrout, H., Review of advanced ultrasonic techniques for aerospace structures, *7th ECNDT – European Conference on Non-destructive Testing*, Copenhagen, v.3, n.9, 1998.

Anexos

Tempos de percurso (η_s) em temperaturas entre 21,2 a 22,4°C

Pressão (bar)	0	50	100	150	190
1	38,893129	38,91771	38,931982	38,941319	38,945506
2	38,896732	38,915964	38,932604	38,939881	38,945529
3	38,896114	38,915973	38,931173	38,940952	38,946302
4	38,895468	38,916371	38,932714	38,940633	38,946585
5	38,898135	38,917196	38,932433	38,940687	38,946792
Média (η_s)	38895,916	38916,6428	38932,181	38940,6944	38946,1428
Desvio (η_s)	1,8437118	0,77913779	0,628925	0,529605325	0,5967853

Tabela A1 – Barra R1 na temperatura 1

Pressão (bar)	0	50	100	150	190
1	38,930891	38,94967	38,966007	38,979618	38,985859
2	38,932572	38,950145	38,966811	38,980566	38,987433
3	38,933603	38,949568	38,967054	38,979	38,986758
4	38,934321	38,951664	38,969414	38,979287	38,986958
5	38,934228	38,950931	38,968088	38,980973	38,987898
Média (η_s)	38933,123	38950,3956	38967,475	38979,8888	38986,9812
Desvio (η_s)	1,4293402	0,89018386	1,3142156	0,845510319	0,76719209

Tabela A2 – Barra R2 na temperatura 1

Pressão (bar)	0	50	100	150	190
1	38,857955	38,881688	38,902097	38,92059	38,933282
2	38,858272	38,881114	38,900435	38,920975	38,933475
3	38,859102	38,88287	38,901181	38,920826	38,932131
4	38,858425	38,880613	38,901483	38,921722	38,932592
5	38,859159	38,884125	38,902134	38,920384	38,931923
Média (η_s)	38858,583	38882,082	38901,466	38920,8994	38932,6806
Desvio (η_s)	0,5284896	1,41818669	0,7051347	0,512137482	0,68494912

Tabela A3 – Barra R3 na temperatura 1

Pressão (bar)	0	51	101	154	193
1	38,851765	38,884347	38,913908	38,933866	38,943444
2	38,853695	38,88454	38,914194	38,932083	38,944028
3	38,853853	38,883703	38,916748	38,931822	38,942478
4	38,854065	38,883623	38,915938	38,93182	38,942049
5	38,855567	38,884646	38,917107	38,931694	38,94237
Média (η_s)	38853,789	38884,1718	38915,579	38932,257	38942,8738
Desvio (η_s)	1,3552645	0,47751618	1,4612231	0,910538302	0,82886561

Tabela A4 – Barra R4 na temperatura 1

Pressão (bar)	0	51	102	154	193
1	38,904672	38,930697	38,946813	38,963404	38,972408
2	38,906038	38,930174	38,947353	38,962418	38,97262
3	38,907519	38,9306	38,946685	38,963328	38,973509
4	38,907065	38,930511	38,94748	38,962625	38,973336
5	38,907201	38,930705	38,947339	38,962725	38,974208
Média (η_s)	38906,499	38930,5374	38947,134	38962,9	38973,2162
Desvio (η_s)	1,1623263	0,21808095	0,3585889	0,440390168	0,72325528

Tabela A5 – Barra R5 na temperatura 1