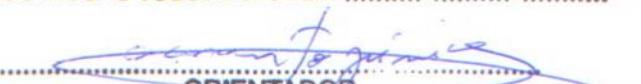


TESE DEFENDIDA POR Marcilio Haddad  
Andrino ..... F. APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27, 07, 2007

  
.....  
ORIENTADOR

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

**Aplicação de Ondas Longitudinais  
 criticamente Refratadas para a Medição de  
 Tensões em Dutos**

Autor: **Marcilio Haddad Andrino**  
Orientador: **Auteliano Antunes dos Santos Júnior**

09/2008

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

# **Aplicação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas para a Medição de Tensões em Dutos**

**Autor: Marcilio Haddad Andrino**

**Orientador : Auteliano Antunes dos Santos Júnior**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2007  
S.P. – Brasil

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

An28a      Andrino, Marcilio Haddad  
            Aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas  
            para a medição de tensões em dutos / Marcilio Haddad  
            Andrino.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

            Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Júnior  
            Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,  
            Faculdade de Engenharia Mecânica.

            1. Testes não-destrutivos. 2. Ultra-som. 3. Ondas ultra-  
            sonicas. 4. Gasodutos. 5. Oleodutos. I. Santos Júnior,  
            Auteliano Antunes dos. II. Universidade Estadual de  
            Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Application of longitudinal critically refracted waves to measure stress  
in pipelines

Palavras-chave em Inglês: Non-destructive evaluation, Ultrasound,  $L_{cr}$  waves, Gas  
pipeline, Oil pipeline

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Roseana da Exaltação Trevisan, Marco Lucio Bitterncourt, Raquel  
Gonçalves e Vera Lucia da Silveira Nantes Button

Data da defesa: 27/07/2007

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

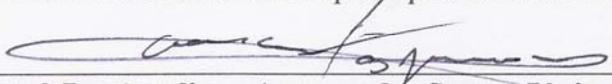
TESE DE DOUTORADO

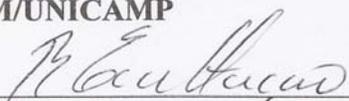
**Aplicação de ondas longitudinais criticamente  
refratadas para a medição de tensões em dutos**

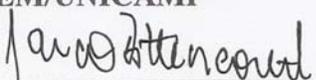
Autor: **Marcelio Haddad Andrino**

Orientador : **Auteliano Antunes dos Santos Júnior**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

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

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan**  
FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marco Lucio Bittencourt**  
FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Raquel Gonçalves**  
FEAGRI/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Vera Lucia da Silveira Nantes Button**  
FEEC/UNICAMP

Campinas, 27 de Julho de 2007

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus Pais Joaquim Manuel Ferreira Andrino e Meyri Haddad Andrino, ícones de todo o direcionamento positivo de minha vida.

## **Agradecimentos**

Presto a minha homenagem as seguintes pessoas:

Aos meus Pais Joaquim e Meyri e irmãos, Márcia, Mauro e Mauricio, por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis.

À Fernanda pelo carinho, companhia e compreensão prestados por todos os anos de dedicação a essa pesquisa.

Ao meu Orientador Professor Doutor Auteliano Antunes dos Santos Júnior, pelo incentivo durante a realização deste trabalho, e por sempre acreditar no meu potencial, oferecendo sua ajuda nas horas que mais precisei.

Aos meus amigos, Mauricio Baldi, Carlos Souto, Sidney Caetano, Francisco Carvalho e Flávio Napolitano pela amizade e companheirismo.

Aos Técnicos, Rosangela, Oswaldo, Ferreira, Flávia, Gisleiva, Luis e Francisco, pela ajuda prestada em diversos momentos.

Ao CNPQ e PETROBRAS pelo incentivo financeiro e a todos os funcionários da FEM e FEAGRI que me ajudaram na execução deste trabalho.

Aprender é a única coisa  
de que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo e nunca se arrepende.

*Leonardo da Vinci*

## Resumo

ANDRINO, Marcilio Haddad, *Aplicação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas para a Medição de Tensões em Dutos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 203p. Tese (Doutorado)

Os dutos têm se tornado o principal meio de transporte para gás natural, petróleo e derivados nas últimas décadas. Diversos novos projetos, visando a extensão da malha dutoviária atual estão sendo implantados e as dimensões das redes de distribuição de países desenvolvidos mostram que este tipo de modal será cada vez mais utilizado, acompanhando o crescimento do Brasil. Dutovias com tais dimensões requerem esquemas de manutenção adequados, com técnicas otimizadas de inspeção. A falha, em muitos casos, pode levar a desastres ambientais, com conseqüências econômicas e sociais imensuráveis. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma nova metodologia para a medição de tensões mecânicas em dutos baseada na variação da velocidade de ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas  $L_{cr}$ ). Como objetivos específicos foram estudadas a influência da temperatura sobre o resultado da medição, a influência da textura do material para dutos e a determinação e validação do método matemático mais adequado para emprego na determinação das tensões. Para a determinação das tensões no duto foi construído um dispositivo especial para movimentar o conjunto de transdutores ao longo dos pontos de medição. Foram realizadas medições na direção longitudinal e transversal do duto e esses levantamentos foram comparados com medidas de tensão determinadas através de extensômetros. Os resultados finais da tese mostraram a excelente correlação entre a tensão aplicada e a resposta do sistema indicando que a técnica pode ser empregada em campo.

### Palavras Chave:

Avaliação não Destrutiva, Ultra-Som, Ondas  $L_{cr}$ , Gasodutos e Oleodutos.

## **Abstract**

ANDRINO, Marcilio Haddad, *Application of Longitudinal Critically Refracted Waves to Measure Stress in Pipelines*, Campinas: Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2007. 203p. Ph.D. Thesis

Pipelines have become the main transport means for natural gas, petroleum and derivatives in the last decades. Several new projects aiming the extension of the current pipeline mesh are being deployed and the size of distribution networks in developed countries show that this kind of modal will be increasingly used, following the growth of Brazil. Pipelines with such dimensions require proper schedules for maintenance, with optimized techniques of inspection. In many cases a flaw can lead to environmental disasters with economic and social consequences. This work is aimed to develop a new methodology for the measurement of mechanical stress in pipelines based in the variation of the speed of longitudinal critically refracted waves ( $L_{cr}$  waves). A more specific objectives, this study treats with the influence of the temperature on the measurement results, the influence of the texture of the material for pipelines and the determination and validation of the most suitable mathematical method for determination of the stress. For the determination of the stress in the pipeline a special device was constructed to move the set of transducers along the points of measurement. Measurements were performed in the longitudinal and transversal directions of the pipeline and the results were compared with stress measures determined by strain gages. The final results of the thesis showed the excellent correlation between the applied stress and the response of the system indicating that the technique can be employed in field.

### **Key words:**

Non-Destructive Evaluation, Ultrasound,  $L_{cr}$  Waves, Gas pipeline and Oil pipeline

# Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xx
Nomenclatura	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do trabalho	3
1.2 Apresentação do trabalho	4
2. REVISÃO DA LITERATURA E ASPECTOS TEÓRICOS	5
2.1 História do transporte dutoviário	5
2.2 Conceitos sobre tubulações	7
2.3 A importância das tecnologias ultra-sônicas	8
2.4 História das pesquisas sobre ondas acústica superficiais	9
2.5 História de técnicas de medidas de tensão com ondas ultra-sônicas	16
2.6 Teoria sobre propagação de ondas acústicas	18
2.6.1 Determinação da equação de propagação de uma onda acústica	19
2.6.1.1 Equação de Estado	21
2.6.1.2 Equação da Continuidade	22
2.6.1.3 Equação de Euler	23
2.7 Determinação das equações para o cálculo do módulo de elasticidade	28
2.8 Acustoelasticidade	32
2.8.1 Tensões elásticas	33
2.8.2 Energia de deformação	34
2.8.3 Característica estrutural do material	36

2.8.4	Determinação das propriedades elásticas com ondas mecânicas	38
2.8.5	Determinação das tensões mecânicas utilizando ultra-som	40
2.9	Equacionamentos dos métodos matemáticos para determinação dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas	47
2.9.1	Correlação cruzada	47
2.9.2	Transformada de Hilbert	48
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1	Planejamento dos experimentos	51
3.1.1	Duto de Aço API 5L X65	55
3.1.2	Chapas de Aço API 5L X70	57
3.1.3	Bloco padrão	58
3.1.4	Sapatas de acrílicos	60
3.2	Equipamentos e programas utilizados	61
3.2.1	Transdutores ultra-sônicos	61
3.2.2	Conjunto para geração de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ )	64
3.2.2.1	Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ (1 transmissor – 1 receptor)	64
3.2.2.2	Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ (1 transmissor – 2 receptores)	65
3.2.3	Cilindros pneumáticos para aplicação de força controlada	65
3.2.4	Suportes para fixação dos cilindros pneumáticos e conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$	67
3.2.4.1	Posicionador estático	67
3.2.4.2	Posicionador dinâmico	68
3.2.5	Bomba para aplicação de pressão controlada para teste hidrostático no duto	71
3.2.6	Sistema para tração dos corpos de prova	72
3.2.7	Equipamentos utilizados para automatização do sistema	76
3.2.7.1	Automatização do tracionador original	76
3.2.7.2	Sistema para aplicação em laboratório	80
3.2.7.3	Sistema para aplicação em campo	84
3.2.7.4	Condicionador de sinais NI SC-2345 com blocos configuráveis	86
3.2.8	Programas utilizados para controle e aquisição de dados	89
3.3	Procedimentos	99
3.3.1	Calibração dos transdutores com o bloco padrão	99

3.3.2 Cálculo das espessuras das chapas utilizadas para confecção do duto	100
3.3.3 Determinação do módulo de elasticidade	102
3.3.4 Determinação de tensões atuantes no duto através do método da birrefringência acústica	104
3.3.5 Determinação das forças de aplicação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ sobre duto com posicionador dinâmico	106
3.3.6 Levantamento da influência da temperatura sobre tempo de percurso	108
3.3.6.1 Aparelhagem completa e materiais sofrendo ação da temperatura	109
3.3.6.2 Apenas os corpos de prova (C.P.) sofrendo ação da temperatura	110
3.3.6.3 Influência da temperatura sobre posicionador dinâmico	111
3.3.7 Determinação das tensões mecânicas no duto através de extensômetros	111
3.3.8 Determinação das tensões mecânicas na direção transversal do duto	112
3.3.9 Determinação das tensões mecânicas na direção longitudinal do duto	114
4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE PERCURSO	117
4.1 Metodologia para determinação dos tempos de percurso	118
4.1.1 Tempo de percurso determinado pelo cruzamento com zero	118
4.1.2 Tempo de percurso determinado pela correlação cruzada	120
4.1.3 Tempo de percurso determinado pela transformada de Hilbert aplicada após correlação cruzada	123
4.1.4 Interpolação do sinal ultra-sônico	125
4.2 Problemas ocorridos e soluções encontradas para determinação dos tempos de percurso	127
4.3 Comparação entre métodos para determinação dos tempos de percurso	133
4.4 Conclusões sobre melhor método para determinação dos tempos de percurso	140
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	142
5.1 Verificação da repetibilidade	142
5.2 Efeito da força de acoplamento	144
5.3 Determinação das espessuras da parede do duto	146
5.4 Medição do módulo de elasticidade	147
5.5 Medição das tensões mecânicas por extensômetros	148

5.6 Levantamento das tensões através do método da birrefringência acústica	153
5.7 Influência da temperatura sobre o tempo de percurso	155
5.8 Medição das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ – direção longitudinal	160
5.8.1 Comparação da tensão aplicada no duto na direção longitudinal com o levantamento feito através de extensômetros	172
5.9 Levantamento das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ – direção transversal	174
5.9.1 Comparação da tensão aplicada no duto na direção transversal com a tensão obtida com os extensômetros	176
5.10 Levantamento das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ para outras frequências de transdutores	178
5.11 Método $L_{cr}$ – Conjunto ultra-sônico $L_{cr}$ – 1 transmissor – 2 receptores	180
5.12 Comparação entre o sistema para campo e o sistema para laboratório	181
5.13 Resumo das contribuições e complementação das discussões	183
6. CONCLUSÕES	187
Referências Bibliográficas	190
Apêndice A	201

## Lista de Figuras

3.1 Duto construído com aço API 5L X65. Detalhe: Com e sem camada protetora	55
3.2 Vista geral do duto com detalhes da montagem	56
3.3 Dimensões do duto feito de aço API 5L X65	57
3.4 Chapa de aço utilizada nos experimentos – API 5L X70	58
3.5 Medidas das chapas de aço utilizadas nos experimentos	58
3.6 Bloco padrão Panametric ASTM E 164	59
3.7 Dimensões padronizadas do bloco padrão V1	59
3.8 Peças de acrílicos utilizadas. a) sapata para acomodação dos transdutores usada na verificação da influência da temperatura. b) sapatas de acrílico com o transdutor na posição para a verificação da influência da temperatura	61
3.9 Transdutores ultra-sônicos. a) 3,5 MHz - 0,5'' x 1'' b) 2,25 MHz - 0,5'' x 1'' c) 2,25 MHz - Ø 0,5'' d) 5 MHz - Ø 0,5''	62
3.10 Transdutor ultra-sônico para geração de ondas transversais – 5MHz – Ø 0,25''	63
3.11 Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ – 1 emissor 1 receptor	64
3.12 Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ – 1 emissor 2 receptores	65
3.13 a) Cilindro pneumático para colocação no centro do conjunto de transdutores	66
3.13 b) Cilindro pneumático para colocação sobre cada sapata de acrílico	66
3.14 a) Detalhe do posicionamento do cilindro hidráulico no centro da chapa de aço	66
3.14 b) Detalhe do posicionamento do cilindro sobre cada sapata de acrílico	66
3.15 Utilização de três cilindros pneumáticos para posicionamento e aplicação de força sobre sapatas de acrílico	67
3.16 Posicionador estático	68
3.17 Dimensões do suporte de alumínio para construção do posicionador dinâmico	69

3.18 Desenho do parafuso especial de fixação entre haste da base magnética e suporte de acrílico	70
3.19 Posicionador dinâmico montado sobre duto com dois cilindros pneumáticos	71
3.20 posicionador dinâmico montado sobre duto com três cilindros pneumáticos	71
3.21 Bomba para teste hidrostático. Detalhe: Válvulas de segurança e manômetro	72
3.22 Nova construção do tracionador para levantamento das constantes acustoelásticas	73
3.23 Detalhe do rasgo para colocação das chapas para tração	73
3.24 Espaçadores de inox para centralização das chapas para tração	74
3.25 Detalhe dos parafusos para posicionamento dos espaçadores de inox	74
3.26 Desenho esquemático do tracionador novo	75
3.27 Sub-posicionador utilizado na nova construção do tracionador	76
3.28 a) Tracionador para levantamento das constantes acustoelásticas	77
3.28 b) Intensificador de pressão (Booster)	77
3.29 a) Válvula pneumática proporcional (1 entrada, 1 saída)	79
3.29 b) Válvula pneumática direcional (1 entrada, 2 saídas)	79
3.29 c) Válvula pneumática direcional (1 entrada 1 saída)	79
3.30 a) Acoplador óptico	80
3.30 b) Base e relê para acionamento	80
3.31 Válvula reguladora de velocidade	80
3.32 Sistema completo para aquisição de dados	81
3.33 a) Bloco conector CB 68 LP	82
3.33 b) Mapa de localização dos canais da placa de aquisição NI PCI-6024E	82
3.34 Painel contendo as válvulas para acionamento e controle do sistema ultra-sônico	82
3.35 Válvula direcional, 1 entrada 2 saídas, utilizada para movimentação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ do posicionador dinâmico	84
3.36 Sistema portátil para aplicação em campo	85
3.37 a) Condicionador de sinais NI SC-2345 – blocos configuráveis	86
3.37 b) Condicionador de sinais NI SC-2345 – Placa de energização e terminal de parafusos	86
3.38 Condicionador de sinais NI SC-2345	87
3.39 Configuração de um quarto de ponte do bloco configurável NI SCC-SG01	88

3.40 Painel de controle do programa Measurement & Automation para verificação da conectividade de placas de aquisição	90
3.41 Telas de configuração dos acessórios de placas de aquisição de sinais	91
3.42 Programa ULTRA_TEST utilizado para visualização do sinal ultra-sônico em tempo real	92
3.43 Programa TEMP_PAR utilizado para leitura e gravação da temperatura através do módulo de condicionamento de sinais NI SC-2345	93
3.44 Programa para leitura de extensômetros através do condicionador de sinais NI SC-2345	94
3.45 Tela do osciloscópio mostrando algumas das funções básicas do programa L_Stress V2.0	96
3.46 Tela mostrando o programa Met_Num_L_Stress	98
3.47 Transdutores localizados sobre bloco padrão para calibração	99
3.48 Pontos na direção radial do duto	100
3.49 Transdutor ultra-sônico de 2,25 MHz colocado sobre duto para medição de espessura	101
3.50 Transdutores ultra-sônicos de 5 MHz colocados sobre duto para medição do módulo de elasticidade	102
3.51 Conjunto válvula de esfera, engate rápido e mangueira de alta pressão para utilização em duto para teste hidrostático	105
3.52 Posicionador dinâmico para medição da influência da força aplicada sobre o tempo de percurso da onda ultra-sônica	107
3.53 Peças de acrílico utilizadas para determinação da influência da temperatura sobre tempo de percurso	109
3.54 Extensômetros colocados sobre dutos para medições de tensões	112
3.55 Sapatas de acrílico unidas por perfis em L posicionadas sobre duto através de uma cinta	113
3.56 Equipamento utilizado para controle da leitura dos tempos de percurso dos transdutores receptores do conjunto ultra-sônico $L_{cr}$	116
4.1 Trem de pulsos adquirido pelo método para geração de ondas $L_{cr}$	118
4.2 Detalhe da onda longitudinal criticamente refratada ( $L_{cr}$ )	119
4.3 Ondas geradas através do método pulso-eco	120

4.4 Primeiro eco do sinal para aplicação da correlação cruzada (onda $L_{cr}$ )	121
4.5 Trem de pulsos completo do sinal ultra-sônico (onda $L_{cr}$ )	121
4.6 Resultado da correlação cruzada entre os sinais (onda $L_{cr}$ )	122
4.7 Trem de pulsos completo do sinal ultra-sônico adquirido (pulso-eco)	122
4.8 Primeiro eco do sinal para aplicação da correlação cruzada (pulso-eco)	123
4.9 Resultado da correlação cruzada entre os sinais (pulso-eco)	123
4.10 Amplitude instantânea após aplicação da correlação cruzada relacionada ao sinal adquirido pelo método pulso-eco	124
4.11 a) Exemplo de sinal real	125
4.11 b) Sinal discretizado para sete níveis	125
4.12 Sinal original e interpolado mostrando a melhora em relação à frequência de amostragem	126
4.13 Sinal original adquirido	127
4.14 Pico máximo do sinal ampliado para visualização do sinal discretizado	127
4.15 Detalhe do segundo cruzamento com o zero utilizado para determinação dos tempos de percurso	128
4.16 Sinal obtido com sistema portátil, frequência de amostragem de 20 MHz	129
4.17 Sinal interpolado a partir do obtido com o sistema portátil	130
4.18 Sinal puro e sinal interpolado sobrepostos para comparação	130
4.19 Correlação cruzada para determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica	132
4.20 Correlação cruzada e transformada de Hilbert sobrepostas para comparação entre picos máximos	132
4.21 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tracionador)	136
4.22 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto)	137
4.23 Comparação entre correlação cruzada e transformada de Hilbert	138
4.24 Detalhe de dois picos de mesma amplitude para determinação através da transformada de Hilbert	139
4.25 Problema encontrado na amplitude instantânea determinada através da transformada de Hilbert	140

5.1 Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> – Transdutor 2,25 MHz (0,5'' x 1'')	144
5.2 Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> – Transdutor 3,5 MHz (0,5'' x 1'')	144
5.3 Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> – Transdutor 5 MHz (0,5'' x 1'')	145
5.4 Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> – Transdutor 5 MHz ( φ 0,5'')	145
5.5 Tensão medida através de extensômetros – Longitudinal superior	149
5.6 Tensão medida através de extensômetros – Longitudinal inferior	150
5.7 Tensão medida através de extensômetros – Transversal superior	150
5.8 Tensão medida através de extensômetros – Transversal inferior	151
5.9 Comparação entre tensão teórica e tensão medida por extensômetros	152
5.10 Tensão medida em relação a pressão aplicada ponto 2(45°) (Birrefringência acústica)	153
5.11 Tensão medida em relação a pressão aplicada ponto 4(135°)(Birrefringência acústica)	154
5.12 Tensão medida em relação a pressão aplicada ponto 6(315°)(Birrefringência acústica)	154
5.13 Tensão medida em relação a pressão aplicada ponto 7(225°)(Birrefringência acústica)	155
5.14 Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 40 mm – todo sistema aquecendo – transdutor 2,25 MHz (φ 0,5'')	156
5.15 Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 10,8 mm – todo sistema aquecendo – transdutor 2,25 MHz (1'' x 0,5'')	156
5.16 Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no aço = 10,8 mm - todo sistema aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1'' x 0,5'')	157
5.17 Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 10,8 mm – apenas peças aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1'' x 0,5'')	157
5.18 Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no aço = 10,8 mm – apenas peças aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1'' x 0,5'')	158
5.19 Influência da temperatura sobre tempo de percurso Aço - conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> apenas peças aquecendo - transdutor 3,5 MHz (1'' x 0,5'')	158
5.20 Influência da temperatura sobre tempo de percurso para conjunto sobre duto	160

5.21 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 19°C)	161
5.22 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 22,5°C)	162
5.23 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 26°C)	162
5.24 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 19°C)	163
5.25 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 22,5°C)	163
5.26 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 26°C)	164
5.27 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 19°C)	164
5.28 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 22,5°C)	165
5.29 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 26°C)	165
5.30 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 19°C)	167
5.31 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 22,5°C)	167
5.32 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 26°C)	168
5.33 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 19°C)	168
5.34 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 22,5°C)	169
5.35 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 26°C)	169

5.36 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 19°C)	170
5.37 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 22,5°C)	170
5.38 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 26°C)	171
5.39 Comparação entre tensões experimentais em relação a temperatura (Ponto central 2)	172
5.40 Comparação entre tensões médias medidas e tensões levantadas por extensômetros	173
5.41 Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (direção transversal)	175
5.42 Comparação entre tensão teórica e tensão média medida – direção transversal	176
5.43 Comparação entre tensões médias medidas e tensões levantadas por extensômetros. (direção transversal)	177
5.44 Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto - Transdutor de 3,5 MHz (0,5'' x 1'')	178
5.45 Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto - Transdutor de 5 MHz (0,5'' x 1'')	179
5.46 Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto - Transdutor de 5 MHz ( $\varnothing$ 0,5'')	179
5.47 Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto- Conjunto ultra-sônico L <sub>cr</sub> – 1 transmissor – 2 receptores	180
5.48 Tensão medida em relação a pressão aplicada levantada pelo sistema para aplicação em campo	182
A1 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tracionador)	201
A2 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto)	202
A3 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tracionador)	202
A4 Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto)	203

## Lista de Tabelas

2.1 Relação entre as constantes elásticas e a velocidade, direção e propagação das ondas ultra-sônicas para materiais levemente ortotrópicos	40
3.1 Propriedades do acrílico comercial	60
3.2 Modelo, frequência e dimensão do elemento piezelétrico de transdutores ultra-sônicos	63
3.3 Valores de pressão para determinação das forças de aplicação sobre duto	106
4.1 Tempos de percurso do sinal ultra-sônico interpolado – equipamento para laboratório.	133
4.2 Tempos de percurso do sinal ultra-sônico interpolado – equipamento para campo	134
4.3 Diferença dos tempos de percurso do sinal ultra-sônico – Correlação cruzada X Transformada de Hilbert	139
5.1 Padrão de repetibilidade para conjunto ultra-sônico $L_{cr}$	143
5.2 Determinação das espessuras para duto.	146
5.3 Módulos de elasticidade para pontos de medição do duto em MPa	147
5.4 Tensões determinadas por extensômetros	148
5.5 Medidas de tensões experimentais e através de extensômetros – direção longitudinal	173
5.6 Medidas de tensões levantadas através de extensômetros e experimentais – direção transversal	177

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$A(t)$  – Amplitude instantânea

$B_0$  - Birefringência para o estado livre de tensões

$B$  – Birefringência Acústica

$C_{AB(\tau)}$  – Correlação cruzada entre duas funções contínuas

$C_{ijkl}$  - Constantes elásticas ou de rigidez

$E$  - Módulo de Elasticidade Longitudinal [MPa]

$G$  - Módulo de elasticidade transversal [MPa]

$H[x(t)]$  - transformada de Hilbert

$k$  - Constantes acustoelásticas normalizadas

$L_{11}$ - Constante acustoelástica para as ondas longitudinais

$l, m, n$  - Constantes elásticas de terceira ordem

$P$  – Pressão instantânea

$P_0$  - Pressão instantanea na posição de equilíbrio

$T_0$  – Temperatura inicial [°C]

$t_0$  – Tempo de percurso para o estado livre de tensões [s]

$V$  - Velocidade do som no fluido [m/s]

$V_L$ - Velocidade da onda longitudinal	[m/s]
$V_S$ – Velocidade das ondas superficiais de Rayleigh	[m/s]
$V_T$ - Velocidade da onda cisalhante	[m/s]
$V_{11}$ – Velocidades das partículas na mesma direção do carregamento	[m/s]
$V_{12}$ – $V_{13}$ - Velocidades das partículas na direção perpendicular ao carregamento	[m/s]

### ***Letras Gregas***

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - componentes da deformação principal homogênea triaxial

$\gamma$  - coeficiente isentrópico

$\Delta$  - expansão volumétrica

$\delta_{ik}$  - delta de Kroenecker

$\rho$  - densidade [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_0$  – densidade instantânea [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – tensões principais

$\tau$  - tensão de cisalhamento

$\lambda, \mu$  - Constantes elásticas de segunda ordem de Lamé

$\nu$  - coeficiente de Poisson

$\eta$  - módulo de compressibilidade volumétrico

$\nabla^2$  - Operador laplaciano

$\nabla$  - operador divergente

$\chi$  - condensação

$\omega$  - frequência angular

### *Abreviações*

LSAW - Ondas acústicas superficiais longitudinais

SAW – Ondas acústicas superficiais

BLW - Ondas superficiais de volume

BTW – Ondas transversais de volume

# Capítulo 1

## Introdução

Os dutos têm se tornado o principal meio de transporte para gás natural, petróleo e derivados nas últimas décadas. Diversos novos projetos, visando a extensão da malha dutoviária atual estão sendo implantados e as dimensões das redes de distribuição de países desenvolvidos mostram que este tipo de modal será cada vez mais utilizado, acompanhando o crescimento do Brasil. Dutos com tais dimensões requerem esquemas de manutenção adequados, com técnicas otimizadas de inspeção. A falha, em muitos casos, pode levar a desastres ambientais, com conseqüências econômicas e sociais imensuráveis.

A manutenção da integridade estrutural dos dutos, evitando a falha, é o objetivo maior da implantação de novas técnicas e tecnologias para a previsão de falhas. A detecção de vazamentos e sua localização em grandes dutovias é apenas um dos aspectos do problema. Evitar que tais vazamentos ocorram, prevendo que problemas possam vir a ocorrer, é geralmente mais econômico e muito mais prático do que corrigir os problemas causados.

A substituição de um trecho do duto já danificado é, sem dúvida, a opção mais cara, pois implica em uma parada operacional não programada de toda uma linha. Para evitar vazamentos de produtos e interrupções forçadas de operação, as linhas de transporte de óleo e gás devem ser inspecionadas periodicamente. Com base nos resultados da avaliação estrutural do duto, é tomada a decisão de realizar reparos imediatamente ou manter o duto em operação no estado em que ele se encontra.

A crescente instalação de dutos terrestres ao longo de regiões remotas no país deu origem a um problema específico: a necessidade de planejamento de atividades de manutenção e substituição de trechos de longas dutovias. Planejar exige que se conheça quando a falha vai ocorrer, com confiança adequada. Com tal informação, ações de manutenção podem ser tomadas antes que o problema ocorra. No caso de dutos terrestres, um fator importante na propensão a falhas é o estado de tensões ao qual o duto está sendo submetido. Essas tensões são praticamente nulas na instalação dos dutos, mas se alteram em função da movimentação do terreno.

Um critério para a remoção preventiva de trechos que poderiam estar sob tensão excessiva é que a tensão estimada esteja abaixo de 30 ou 40% do limite de escoamento. A forma de estimar a tensão é com base na deformação sofrida pelo duto. Esse método tem grande dispersão e o erro cometido pode ser da mesma ordem da tensão estimada, ou maior. Trabalhar ainda mais longe do limite de escoamento seria uma solução, que implicaria na remoção prematura do trecho.

Um benefício óbvio de tal remoção prematura é a redução dos custos de operação e manutenção corretiva da rede dutoviária; o outro benefício é a prevenção de acidentes (ruptura e vazamento de produtos), e que tem um valor considerável, pois envolve a preservação da integridade de pessoas e a prevenção de danos ao meio ambiente, danos à imagem da instituição e danos materiais à mesma. No entanto, há uma perda econômica significativa, pois grande parte dos dutos removidos provavelmente sofreria tensões muito inferiores às definidas como críticas. Porções dos dutos retiradas preventivamente poderiam ser utilizadas durante muito tempo ainda.

A busca pelo desenvolvimento de procedimentos otimizados para a medição de tensões tem levado as operadoras dutoviárias a destinar montantes de recursos cada vez maiores para o desenvolvimento de novas tecnologias. Um método para essa finalidade teria que ser não destrutivo, já que a amostra sob inspeção estaria instalada e operando. Fibras óticas, interferometria laser, raios X, difração de neutrons e métodos ultra-sônicos têm se despontado como as principais alternativas para emprego em campo. Cada um destes possui características que dificultam sua aplicação em campo.

O desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados de elevada velocidade aliado a uma sensível redução nos custos, simplicidade de aplicação e resolução adequada, fazem do método ultra-sônico a principal alternativa atual para essa finalidade. Várias técnicas podem ser empregadas, destacando-se a da birrefringência e a de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{CR}$ ), cada uma necessitando de sensores especiais dedicados e com vantagens para determinadas aplicações. As limitações características de cada técnica impedem o mapeamento completo das tensões: ondas longitudinais  $L_{CR}$  têm alta sensibilidade, mas trafegam próximas à superfície; ondas cisalhantes podem ser utilizadas para avaliar o interior de componentes mecânicos, mas medem apenas um valor representativo do estado de tensões e têm menor sensibilidade.

Trabalhos de mestrado anteriores ligados ao Laboratório de Acustoelástica da Unicamp (Caetano, 2003; Andrino, 2003; Santos, 2003; Miniccuci, 2003; Santos, 2007; Fraga, 2007) avaliaram diversos aspectos necessários para a utilização do método ultra-sônico, em particular para o emprego de ondas  $L_{CR}$ . No entanto, nem os trabalhos citados nem a literatura científica atual permitiam a aplicação do método diretamente na medição de tensões em dutos. Este trabalho tem como principal contribuição o desenvolvimento de um método para aplicação direta do ultra-som na medição de tensões em dutos, que inclui as principais variáveis de influência na medição em campo.

## **1.1 Objetivos do trabalho**

Este trabalho de doutoramento tem como objetivo desenvolver uma nova metodologia para a medição de tensões mecânicas em dutos baseada na variação da velocidade de ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas  $L_{cr}$ ). A técnica, já utilizada em outras aplicações, relaciona a variação da velocidade às tensões através da combinação de parâmetros elásticos e acústicos, definindo o ramo de estudo que se convencionou chamar de acustoelasticidade.

Como objetivos específicos, foram estudados ainda os seguintes tópicos:

- Influência da temperatura sobre o resultado da medição
- Influência da textura do material para dutos
- Determinação e validação do método matemático mais adequado para emprego na determinação das tensões.

## 1.2 Apresentação do trabalho

No capítulo 2 é apresentada uma breve história da rede dutoviária no Brasil, com suas características peculiares. O método ultra-sônico baseado na geração de ondas longitudinais criticamente refratadas foi descrito e o estudo das ondas acústicas superficiais foi mostrado desde o início de seu aparecimento. Uma revisão dos principais métodos para a determinação dos tempos de percurso realizados nos últimos anos também foi apresentada. O capítulo termina com as formulações da equação de propagação de ondas acústicas, determinação das equações para determinação do módulo de elasticidade, teoria de propagação de ondas mecânicas e acustoelasticidade, além do equacionamento dos métodos matemáticos para determinação dos tempo de percurso das ondas ultra-sônicas.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia para a realização dos experimentos. Inclui a descrição dos equipamentos, instrumentação, materiais utilizados, como o sistema automático atua para a determinação de tensões mecânicas e a explicação dos programas de aquisição de dados e controle para determinação das tensões no duto.

No capítulo 4 é apresentada a comparação entre métodos matemáticos para determinação dos tempos de percurso. É mostrado um histórico apresentando os problemas encontrados nos sinais adquiridos e como foi feito o tratamento destes, com a conseqüente determinação do tempo de percurso através do método matemático mais indicado.

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões, mostrando o levantamento das tensões aplicadas no duto com as ondas  $L_{cr}$  e os resultados desse trabalho. Como resultado adicional, para fins de comparação, é feito o levantamento das tensões com o método da birrefringência acústica. Para que as tensões pudessem ser avaliadas, foi necessário ainda medir o módulo de elasticidade e as espessuras em cada ponto do duto sob análise, cujos resultados também são apresentados. .

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e listadas observações adicionais que podem nortear a continuidade do trabalho.

## **Capítulo 2**

### **Revisão da Literatura e Aspectos teóricos**

#### **2.1 História do transporte dutoviário.**

A história dos dutos apresenta pontos interessantes na cronologia dutoviária do Brasil, tais como marcos legais e épocas de lançamento de dutos, que mais tarde vieram a sofrer tipos de acidentes diferentes. As tubulações eram conhecidas como meio de transporte de líquidos desde a antigüidade, os chineses com bambus, os egípcios e astecas em material cerâmico e os gregos e romanos com o emprego de tubos de chumbo. Em 1865, foi construído o primeiro oleoduto para transporte de hidrocarbonetos, com 2" (50,8 mm) de diâmetro. Era feito de ferro fundido e ligava uma estação de carregamento de vagões à um campo de produção, a uma distância de 8 km na Pensilvânia. Em 1930 teve início o transporte de produtos refinados entre a Refinaria de Bayway, próximo à Nova York e a cidade de Pittsburg. A primeira linha que se tem registro no Brasil foi construída na Bahia, com diâmetro de 2" (50,8 mm) e 1 km de extensão, ligando a "Refinaria Experimental de Aratu" ao Porto de Santa Luzia. Recebia o petróleo dos "Saveiros-Tanques" vindos dos campos de Itaparica e Joanes e no ano de 1942 teve seu início de operação (Terzian, 2005).

A atividade petrolífera no País teve um impulso inicial com a criação do Conselho Nacional do Petróleo (CNP), que "declarou de utilidade pública e regulou a importação, a exportação, o transporte inclusive a construção de oleodutos, a distribuição e a comercialização de petróleo e seus derivados no território nacional, bem como a indústria de refinação". Assim,

no período de 1939 até 1953, o CNP supervisionou, regulamentou e executou as atividades petrolíferas no Brasil. Foi com ele que teve início a história oficial dos oleodutos no Brasil, e em 1946 teve a atribuição de analisar o ante-projeto dos oleodutos entre Santos e São Paulo, com possibilidade de seguir até Campinas (Terzian, 2005).

O oleoduto Candeias-Mataripe foi instalado no final dos anos quarenta, com diâmetro de 6" (152,4 mm) e extensão de 4 km. A partir da criação da Petrobras, o transporte por dutos foi intensificado com a construção dos oleodutos na Região de Produção da Bahia (RPBa). Nesta época as obras de dutos eram executadas com pessoal e equipamentos próprios ou gerenciados por sua Divisão de Oleodutos (DIVIDUTO). O CNP, em 1954, criou a "Comissão da Rede Nacional de Oleodutos" - CRENO - com a finalidade de realizar estudos técnicos e econômicos para a organização da Rede Nacional de Oleodutos. O Oleoduto Rio/Belo Horizonte (ORBEL) entrou em operação na década de 1960 e foi o primeiro duto de grande extensão no País, transferindo produtos refinados provenientes da Refinaria Duque de Caxias (REDUC) para Belo Horizonte, com diâmetro de 18" (457,2 mm) e 365 km de extensão (Terzian, 2005).

A década de 70 caracteriza-se pela execução de importantes obras na área de dutos, dentre elas, a construção do oleoduto São Sebastião / Paulínia (OSPLAN), oleodutos São Sebastião / Guararema / Paulínia e Paulínia / Barueri (OPASA). O oleoduto São Sebastião / Paulínia foi uma grande obra da década, com diâmetro de 24" (609,6 mm) e 226 km de extensão. O Departamento de Transporte da Petrobras "DETRAN" foi o executor do plano básico e do projeto. Os oleodutos (OPASA) responsáveis pelo escoamento dos derivados da Refinaria de Paulínia (REPLAN) para a grande São Paulo entraram em funcionamento em 1972. O primeiro gasoduto interestadual (GASEB) entrou em operação em 1975 ligando os estados de Sergipe e Bahia, cuja extensão é de 235 km e o diâmetro de 14" (355,6 mm). Em 1976 foram concluídas obras importantes: o Terminal de São Francisco do Sul (TEFRAN), em Santa Catarina e o Oleoduto (OSPAR), ligando este terminal à Refinaria do Paraná, em Araucária, numa extensão de 117 km e 30" (762 mm). Fez parte deste conjunto de obras o poliduto (OLAPA), ligando essa refinaria ao Porto de Paranaguá, com 98 km de extensão e 12" (304,8 mm) de diâmetro. O maior terminal marítimo da Petrobras, o Terminal da Baía da Ilha Grande, TEBIG, em Angra dos Reis, entrou em operação em 1977. Neste terminal, a ligação do píer à área de tanques é através de 3 linhas com 42"

(1066,8 mm) e uma extensão de 4,6 km. O oleoduto Angra dos Reis/Refinaria Duque de Caxias tem 40" (1016 mm) numa extensão de 125 km (Terzian, 2005).

A década de 80 caracterizou-se pela construção de um grande número de gasodutos, ampliando o aproveitamento do gás natural produzido no Espírito Santo e principalmente na Bacia de Campos, litoral do Rio de Janeiro. O gasoduto Guamaré/Cabo, denominado "Nordestão" entrou em operação em 1986, suprindo de gás produzido no Rio Grande do Norte, os estados da Paraíba e de Pernambuco. O "Nordestão" tem um diâmetro de 12" (304,8 mm) e uma extensão de 423 km, além dos ramais de distribuição naqueles 3 estados (Terzian, 2005).

Nos anos 90, os rápidos avanços de informática deram um grande impulso aos sistemas de controle e de aquisição de dados nos oleodutos e gasodutos, tais como o sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), permitindo um acompanhamento e supervisão das operações em tempo real. Nos projetos dos novos dutos foram utilizados, ainda, outros equipamentos e sistemas avançados da informática, permitindo levantamentos e mapeamentos com a ajuda de satélites, como o GPS (Global Positioning System) e o GIS (Geographic Information System), além do emprego do CAD (Computer Aided Design) na elaboração dos desenhos. A informática possibilitou ainda várias simulações de condições operacionais, concorrendo não só para uma melhor qualidade do projeto, mas também para a redução do prazo de sua execução. Na construção de dutos novos foram introduzidos alguns avanços que permitiram aumento da velocidade na instalação, principalmente a utilização cada vez maior de aços especiais, obtendo-se tubos mais resistentes e mais leves, associados à aplicação de revestimentos plásticos em plantas junto aos fabricantes de tubos, (Petrobras, 2004; Terzian, 2005).

## **2.2 Conceitos sobre tubulações.**

Tubulação é uma estrutura conceitualmente simples, porém requer uma alta tecnologia de projeto, fabricação do aço e do tubo, transporte, construção e operação da linha. A força motriz para o desenvolvimento tecnológico das tubulações, assim como de outras áreas correlatas, foi resultado do aumento da demanda de energia associado à crise do petróleo na década de 70. O Brasil teve como meta a pesquisa voltada, principalmente, para a obtenção de petróleo de águas

profundas na bacia de Campos. Já os Estados Unidos, Canadá, Inglaterra e outros países do hemisfério norte voltaram-se para a obtenção e transporte de petróleo de regiões árticas ou de climas bem severos, que envolvem temperaturas abaixo de zero grau centígrado (Santos, 2001).

A combinação do aumento da demanda de energia com tecnologia refletiu-se no desenvolvimento das tubulações da seguinte forma (Terzian, 2005):

- aumento da eficiência de transporte pelo uso de tubulações de maiores diâmetros;
- aumento da pressão de operação refletindo no aumento da espessura e/ou da resistência mecânica;
- aumento da tenacidade para uso no ártico;
- aumento da resistência à corrosão para transporte de óleo/gás agressivos (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S);
- melhoria da soldabilidade, especialmente com respeito às soldas de campo.

Os requisitos relacionados acima estão associados a questões econômicas e a disponibilidade de tecnologia. Comumente, os dois primeiros itens são referenciados como capacidade operacional, o terceiro como medida do controle de fratura, o quarto de fatores ambientais e o último como preocupação construcional. A tecnologia precisa combinar simultaneamente todos esses fatores, uma vez que há um sinergismo entre eles.

### **2.3 A importância das tecnologias ultra-sônicas.**

A indústria do gás natural atravessa no Brasil um momento ímpar, caracterizado por uma considerável tendência de expansão. Vários fatores contribuem para esta nova realidade, tais como a importação do gás natural da Bolívia e possivelmente de outros países, a desestatização do setor, o esgotamento dos recursos hídricos nas regiões mais industrializadas da nação, a crescente importância da questão do meio ambiente, etc. Assim, após décadas e décadas de estagnação deste setor, prevê-se que este energético passe a ocupar o lugar de destaque que lhe cabe na matriz brasileira, o que faz que o momento atual seja extremamente oportuno para a introdução de novas tecnologias.

Uma dessas novas tecnologias é a utilização de métodos ultra-sônicos para determinação de tensões aplicadas ou residuais em materiais de dutos. Este é um método ainda pouco utilizado para esta aplicação e que mostra ter um grande potencial.

Além do método ultra-sônico existem diversas técnicas de medidas de tensões mecânicas ou residuais, como as já bem desenvolvidas e utilizadas técnicas do furo, a neutrografia e a por difração de raios-X, todas de metodologia bem estabelecidas e precisas. Notadamente, elas apresentam limitações: por serem métodos destrutivos, ou difíceis de serem transportados ou pela aplicação restrita as camadas superficiais dos materiais. Por isso cresce o interesse no desenvolvimento de outros métodos capazes de preencher estas lacunas complementando as investigações do estado de tensões em materiais.

O ultra-som, apesar de sua limitação referente à sensibilidade microestrutural dos materiais, é um desses novos métodos. Ele pode ser empregado para a análise de tensões. O fenômeno mais utilizado nessa aplicação é o da variação na velocidade da onda ultra-sônica que ocorre quando esta se propaga através de um material que se encontra submetido a tensão. O principal método ultra-sônico utilizado na avaliação de tensões baseia-se na variação do tempo de percurso de ondas cisalhantes. No entanto, ondas longitudinais criticamente refratadas, ou seja, propagando-se paralelas à superfície, mostram-se mais sensíveis à variação da tensão em diversas aplicações (Santos, 2000).

Atualmente o método ultra-sônico utilizando a geração de ondas longitudinais criticamente refratadas( $L_{cr}$ ) é largamente utilizado por pesquisadores no mundo todo. Sua base teórica vem do estudo de ondas acústicas superficiais que foi desenvolvido por vários autores, seu estudo vem desde o século passado e a sua história é descrita a seguir.

#### **2.4 História das pesquisas sobre ondas acústica superficiais.**

Ondas acústicas superficiais compreendem uma classe de fenômeno ultra-sônico encontrado na natureza. Laurent Lord Rayleigh foi o primeiro a descrevê-las no seu trabalho no evento “*Surface Ground Motion*” no final do século 19. Como resultado, ondas acústicas

superficiais (*acoustic surface waves – SAW*), propagando na superfície de sólidos são chamadas de ondas de Rayleigh. Desde então, muitos tipos de ondas superficiais foram descobertas. Elas propagam-se em sólidos isotrópicos, em cristais, como também em materiais piezelétricos. Se manifestam não somente em superfícies lisas e planas, mas também em contornos de meios e quando dois sólidos estão unidos através de um filme líquido.

A teoria e prática das ondas acústicas superficiais (SAW), que apareceu na segunda metade do século XX, foi motivada pela eletrônica de altas frequências, seguindo as possibilidades de miniaturização e a demanda por criação de dispositivos eletrônicos para a leitura desse tipo de onda.

A faixa útil de frequências para placas de aquisição usadas para utilização e leitura de ondas acústicas superficiais agora excedem 10GHz. O principal interesse para a microeletrônica compreende a microminuturização. Entretanto, o alcance da frequência de interesse também vem a ser um impedimento para a eletrônica acústica. O comprimento da onda excede a distância atômica de sólidos em 100 vezes, resultando em obstáculos tecnológicos complexos para a manufatura. A única solução é encontrar novos materiais e cortes especiais de cristais, nos quais as ondas acústicas superficiais se propagariam com altas velocidades de fase, muito maiores que ondas Rayleigh.

Como já dito, ondas acústicas superficiais sem atenuação e em superfícies sólidas livres de tensões foram descobertas e descritas por Lord Rayleigh no final do século 19 (Rayleigh, 1885). Ultimamente o tema vem sendo um instrumento insubstituível em eletrônica acústica, ciência dos materiais, testes ultra-sônicos não destrutivos e pesquisas sísmicas. Desde que ondas Rayleigh são não dispersivas (sua velocidade de fase não depende da frequência) e sua atenuação em sólidos é nula, elas são usadas especialmente em testes não destrutivos (Sajauskas, 2004). Ondas Rayleigh são usadas para determinar defeitos em superfície, determinar espessura e grau de dureza, tensão residual e avaliar a qualidade final da superfície.

Diferentes tipos de ondas acústicas superficiais foram descobertas, ligadas à propagação em outros meios, diferentes do citado anteriormente, onde a superfície dos corpos sólidos é livre de

tensões. A. Love encontrou e descreveu, em 1911, ondas acústicas superficiais transversais, em superfícies de corpos sólidos cobertas por uma camada fina de material de propriedades acústicas diferentes. Atualmente, são chamadas de ondas de Love. Dispersão é a característica significativa de ondas Love. Sua velocidade de fase é sempre menor que a velocidade de ondas transversais em corpos sólidos e maior do que a velocidade de volume.

Descrita primeiramente por H. Lamb, em 1916, ondas Lamb constituem um caso de ondas acústicas superficiais Rayleigh propagando-se em placas finas. Entretanto, diferentemente de ondas Rayleigh, elas são de natureza dispersiva. Elas podem ser simétricas ou não simétricas (flexíveis) e sua velocidade depende não somente da frequência, mas também da espessura desta. Na literatura, ondas Lamb as vezes são referenciadas como ondas normais de polarização vertical. Outros tipos de ondas normais propagando em placas são as ondas normais tangenciais, de polarização horizontal transversal, nos casos onde a superfície das placas não deformam durante a propagação.

Outra categoria de ondas eletro-acústicas descobertas por J. L. Bleustein e J. V. Gulyaev, diferem das ondas Rayleigh por se propagarem em alguns cristais piezelétricos. A velocidade de fase é menor do que a de ondas transversais propagando-se na mesma direção dos cristais piezelétricos.

Ondas superficiais propagando-se nas junções de dois sólidos foram encontradas por R. Stoneley e são chamadas pelo mesmo nome. Ondas Stoneley são não dispersivas e sua espessura de penetração é aproximadamente igual a um comprimento de onda. Sua velocidade de fase é sempre menor que a velocidade de ondas transversais e longitudinais de volume em contornos de corpos sólidos.

L. Sereikaite Juozoniene foi a primeira a descobrir, em 1972, um novo tipo de ondas acústicas superficiais diferentes das ondas Rayleigh (Juozoniene, 1973). Elas são chamadas de ondas acústicas superficiais longitudinais (LSAW), de acordo com sua origem física que é dominada por sua componente de vibração longitudinal. Reconhecida essa distinção, ondas superficiais acústicas de Rayleigh poderiam ser chamadas de ondas acústicas superficiais

transversais- TSAW. Após as ondas acústicas superficiais transversais terem sido descobertas, por muitos anos tem havido um debate sobre sua aplicação prática devido a seu amortecimento inerente.

I. Viktorov negou a existência de ondas acústicas superficiais (Viktorov, 1976). Mas alguns pesquisadores como Juozoniene, Sajauskas, Couchman, Ermolov, Razygraev não somente demonstraram esse novo tipo de onda superficial, mas também obtiveram uma aceitação internacional desse novo fenômeno. Testes ultra-sônicos com a presença de ondas acústicas superficiais estão incluídos em manuais de procedimentos da grande maioria das maiores companhias internacionais.

L. Sereikaite Juozoniene foi a primeira a descrever as ondas acústicas longitudinais superficiais (LSAW) (Juozoniene, 1973). Medindo a velocidade das ondas acústicas superficiais com um interferômetro acústico ela observou um efeito estranho. Às vezes, aparentemente, um falso valor de velocidade de fase diferenciava apreciavelmente da velocidade das ondas Rayleigh, com valor próximo da velocidade das ondas longitudinais de volume (BLW). Investigando a razão ela determinou que o fato era devido à manifestação na superfície, associada com o ângulo de incidência da geração das ondas superficiais de volume (BLW).

Esse ângulo de incidência também chamado de primeiro ângulo crítico, é igual ao ângulo de refração das ondas longitudinais. Trafegando sobre a superfície do sólido, as ondas superficiais de volume (BLW), excitam as ondas longitudinais acústicas superficiais (LSAW). Esse fenômeno observado foi publicado no jornal científico “*Ultrasound*” na Rússia (Juozoniene, 1973). Essa inesperada manifestação física atraiu o interesse científico por todo o mundo. Entretanto, esse fenômeno não foi reconhecido como uma descoberta devido à negação do cientista I. Viktorov. Contudo, esta dúvida não foi apoiada por outros pesquisadores.

O grande impulso da pesquisa sobre ondas acústicas longitudinais superficiais no mundo iniciou-se por volta de 1976 e continua até os dias atuais. Pesquisadores validaram resultados experimentais publicados anteriormente (Andrino, 2003, Santos, 2000, Couchman, 1978, Basatskaja, 1978) confirmando assim a existência das ondas acústicas longitudinais superficiais.

Além disso, eles determinaram aspectos distintos das ondas acústicas longitudinais superficiais, como a propagação da velocidade de fase próximo ao valor da velocidade da onda longitudinal e da propagação da onda transversal de volume (BTW) (Ermolov, 1978). A descoberta das ondas acústicas longitudinais superficiais foi explicada como um fenômeno inevitável. As ondas acústicas longitudinais superficiais são mais rápidas do que algumas outras ondas, transversais por exemplo. Usando dados de transdutores ultra-sônicos angulares foi obtida a influência da difração sobre a excitação das ondas acústicas longitudinais superficiais.

Esses resultados experimentais apareceram aproximadamente ao mesmo tempo dos trabalhos teóricos de I. Viktorov (Viktorov, 1981) que mais tarde sugeriu que ondas acústicas longitudinais superficiais seriam somente uma possibilidade teórica, não tendo aplicação prática porque o trajeto de propagação não excedia um comprimento de onda. Isso causou uma discussão sobre o assunto. Debates em meios científicos mostraram que as conclusões do autor estavam erradas. Viktorov não somente ignorou os resultados obtidos por Juozoniene, mas também aqueles anunciados por outros autores (Ermolov e Razygrajev, 1978). Duas posições divergentes surgiram, uma exposta por Viktorov e outra por Ermolov, sobre a posição das ondas acústicas longitudinais superficiais no contato de ondas superficiais e testes não destrutivos. Viktorov manteve que o efluente de ondas superficiais propagando no contorno com uma camada de líquido é rapidamente dissipado. Enquanto Ermolov analisou o desenvolvimento e a efetividade de testes não destrutivos, teoria e prática dos testes ultra-sônicos e as possibilidades de aplicações práticas com ondas acústicas longitudinais superficiais (LSAW).

Juozoniene publicou o artigo sobre a teoria das ondas acústicas longitudinais superficiais (LSAW), em 1980 (Juozoniene, 1980). Com análise de ondas clássicas usando as equações de *Helmholtz* e as soluções das equações de *Rayleigh*, ela calculou as amplitudes das vibrações tangencial e normal das ondas acústicas longitudinais superficiais e apresentou estudos para as aplicações dessas ondas. Logo a seguir, Basatskaja e Ermolov (Basatskaja, 1980) resolveram as mesmas equações com integrais de *Fourier*, calculando características direcionais dos componentes longitudinais e transversais das ondas acústicas longitudinais superficiais e sua dependência sobre o produto  $fD$ , onde  $f$  é a frequência e  $D$  é o diâmetro do disco do elemento

piezolétrico. Foi mostrado que uma variação do valor desse produto causou alteração na excitação das ondas acústicas longitudinais superficiais e na sua direção de propagação.

Atualmente um grande número de trabalhos científicos têm sido desenvolvido juntamente com aplicações práticas de ondas acústicas longitudinais superficiais. Em especial, trabalhos têm sido feitos sobre transdutores ultra-sônicos para geração dessas ondas, que descrevem sua construção e também características técnicas. Existem transdutores angulares onde o prisma é feito de um material caracterizado com uma pequena velocidade sônica e amortecimento, por exemplo acrílico.

Idéias de aplicações de ondas acústicas longitudinais superficiais foram sendo inventadas e patenteadas rapidamente. Os primeiros inventos usando ondas acústicas longitudinais superficiais para testes não destrutivos foram registrados em 1975 (Hayward, 2001). Algumas invenções foram anunciadas por Juozoniene e Sajauskas sobre medidas de constantes mecânicas físicas (Juozoniene, 1980, Sajauskas, 1981) e velocidades de ondas acústicas (Sajauskas, 1984).

O grupo de A. Erhard, H. Wusterberg, M. Kronung, E. Shulz, começou seu trabalho em ondas acústicas longitudinais superficiais em 1981, na Alemanha. Tendo patenteados transdutores ultra-sônicos, eles pesquisaram o emprego dessas ondas em testes não destrutivos e controle de qualidade de soldas austeníticas. Também descreveram a segunda energia (onda transversal) de ondas acústicas sobre superfícies internas de vasos de pressão e componentes de reatores nucleares (Erhard, 1981). Aplicações de ondas longitudinais superficiais por outros autores foram feitas para reatores nucleares e paredes internas de vasos de pressão (Hayward, 2001, Davis, 1998).

Problemas práticos usando ondas acústicas longitudinais superficiais, como construção de transdutores para geração de ondas acústicas longitudinais superficiais (Schmid, 1997, Zheng, 1998), metodologia de testes de ondas acústicas (Krautktamer, 1986), desenvolvimento de modelos (Hoppenbrouwers, 2000), posteriormente receberam apreciável atenção de cientistas do mundo.

A pesquisa de ondas longitudinais acústicas superficiais gerou alguns incômodos na comunicação devido à redundância de diferentes terminologias para o mesmo fenômeno. Assim o termo “*creeping waves*” começou a se fortificar na literatura, denotando uma onda propagando não na superfície como a onda *Rayleigh*, mas um pouco mais profunda e com interação na superfície mais fraca (Charlesworth, 1981). Entretanto, outros autores tenderam a enfatizar a velocidade máxima de ondas longitudinais acústicas superficiais, chamando de “*Kopfwellen*” na Alemanha e “*golovnyie volny*” na Rússia. Muitos outros autores chamam também essas ondas como ondas longitudinais criticamente refratadas, “ $L_{cr}$ ” (Bray, 2000, Andrino, 2003, Santos, 2007).

Após a grande utilização de ondas longitudinais criticamente refratadas por autores em todo o mundo, foi necessário que a determinação das medidas dos tempos de percurso fossem cada vez mais precisas, acarretando assim em equipamentos mais modernos e mais precisos, desencadeando a necessidade da descoberta de melhores métodos matemáticos para a sua determinação. Os métodos empregados para a obtenção da velocidade da onda ultra-sônica medem o tempo que a onda leva para percorrer o material. A partir desse tempo e conhecido o espaço percorrido pela onda, é calculada sua velocidade. Para obter dados de velocidade para a avaliação de tensão por ultra-som, a técnica deve ter suficiente precisão. As variações de velocidade induzidas pela tensão são muito pequenas, nas situações mais críticas a literatura cita valores entre  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  %. Assim é necessário que o sistema de medida usado tenha resolução capaz de alcançar a variação dessas medidas. As variações no tempo de percurso são da ordem de nanosegundos. Para se ter uma idéia do que corresponde a resolução dessa ordem de tempo necessária às medidas, vale observar que, para as frequências normalmente utilizadas, de 500 KHz a 10 MHz, os períodos das ondas variam entre 100 ns e 2  $\mu$ s, portanto as variações esperadas no percurso correspondem apenas a uma pequena fração do período da onda. Alguns autores, há décadas atrás, começaram a pesquisar melhorias para a determinação dos tempos de percurso para a determinação da velocidade correta da onda ultra-sônica. A seguir é mostrada a história dessas técnicas.

## **2.5 História de técnicas de medidas de tensão com ondas ultra-sônicas.**

Benson e Raelson, em 1959, desenvolveram uma das primeiras técnicas experimentais empregadas com o uso do ultra-som como forma de medida de tensão. Essa técnica (chamada de interferência ultra-sônica) mede, utilizando o efeito da birrefringência, a amplitude do pulso transmitido ou do eco refletido. Ela consiste em determinar a variação de fase  $\Phi$  entre as ondas birrefratadas. A variação da velocidade ultra-sônica é diretamente proporcional a variação dessa fase. A interferência entre os dois componentes fora de fase causará uma variação na intensidade acústica permitindo a determinação do efeito acustoelástico (Bittencourt, 2000). São empregados dois transdutores de ondas cisalhantes colocados em lados opostos do corpo de prova, com a movimentação das partículas orientadas a  $45^\circ$  em relação ao eixo principal de tensão (sinal de amplitude máxima), o que corresponde a mesma função do polarizador na fotoelasticidade (Bergman, 1958). Com o corpo de prova sendo tracionado, a variação na amplitude do sinal recebido é tomada como base para calcular a quantidade de variação de fase, que é então relacionada ao nível de tensão do corpo de prova (Bensom, 1959).

A técnica da interferência não se mostrou muito atraente na acustoelasticidade embora na fotoelasticidade seja muito utilizada. A diferença do comprimento de onda da luz em relação ao ultra-som, cerca de 1000 vezes menor que o do som, além da influência na amplitude do sinal do espelhamento do feixe ultra-sônico, do acoplamento dos transdutores e da falta de paralelismo entre as superfícies do corpo de prova são algumas das características do ultra-som que foram consideradas determinantes para a baixa eficiência do método (Bittencourt, 2000).

A técnica pulso-eco vinculando as medidas pela base de tempo do osciloscópio para um pulso ultra-sônico que se propagou através da amostra foi utilizada por Hughes e Kelly em 1953, autores que estabeleceram as relações básicas para o estudo da avaliação de tensão por ultra-som (Bittencourt, 2000). Bergman e Shahbender em 1958, refinaram esse método (pulso-eco) para garantir maior precisão em suas medidas. Eles introduziram um pulso que tinha o mesmo atraso da amostra na condição sem tensão (chamado linha de atraso) simultaneamente ao pulso que transitava no material sob tensão. Em um dos canais do osciloscópio capturavam o sinal correspondente à condição de tensão e no outro a linha de atraso. Através de um ajuste de chaves

foi possível fazer as medidas comparativas de variações de tempo de trânsito com uma velocidade de base de tempo mais elevada. Isso permitiu resolução de variações de velocidade de  $10^{-4}$  % em alumínio com 4 polegadas de espessura (Bittencourt, 2000).

Uma vez que as medidas da velocidade da onda ultra-sônica, em amostras de tamanho conveniente, necessitam de medidas exatas de tempo muito pequenos, poucos microsegundos e em vista das críticas sobre a técnica da interferência na acustoelasticidade, um passo natural foi converter o tempo em frequência, que pode ser medida com a exatidão necessária. Assim alguns pesquisadores e Crecraft, em 1967, desenvolveram uma técnica baseada neste procedimento e bastante utilizada, conhecida como “*Sing-Around*” (Bittencourt, 2000).

O “*Sing Around*” envolve basicamente a transmissão de um pulso por um lado da amostra (corpo de prova) e usa o sinal elétrico recebido pelo transdutor do outro lado para acionar novamente o transmissor, de forma a reciclar o pulso de som. O pulso de energia sonora recicla o sistema a uma frequência de repetição de pulso determinada pelo tempo de trânsito da onda ultra-sônica. Esse método tem sensibilidade muito grande a variações de temperatura (Bittencourt, 2000).

Diversos pesquisadores (Hsu, 1974, Lynnworth, 1977) empregaram outra técnica denominada “*Pulse-Echo-Overlap*” para a determinação do tempo de trânsito da onda ultra-sônica e usada com muita frequência pela facilidade que traz ao se empregar apenas um transdutor. Isso elimina a necessidade de acesso pelos dois lados do material.

O *Pulse-Echo-Overlap* apresenta a facilidade de necessitar para emissão e recepção um único transdutor. Dois ecos de um trem de ondas são observados no osciloscópio. Estes dois pulsos e a varredura horizontal do osciloscópio são sincronizados por um sinal senoidal de onda contínua, cujo período é aproximadamente igual ao tempo de trânsito entre os dois ecos. Um ajuste apropriado da frequência da onda contínua permite o alinhamento deste sinal com os dois ecos (sobreposição) de forma que o período da onda contínua corresponda exatamente ao tempo de trânsito entre os dois ecos. Imprecisões nas medidas de tempo de trânsito são devidas principalmente a erro na sobreposição dos dois sinais no osciloscópio (Bittencourt, 2000).

Todas as técnicas escolhidas de medida de tensão por ultra-som, apresentam aspectos que dificultam uma aplicação prática, como o problema de fixação dos transdutores, cuja pressão empregada pode algumas vezes mascarar os resultados de medidas de tensão residual. A dificuldade com o acoplamento é conhecida em técnicas onde se usa a birrefringência, já que se empregam ondas cisalhantes e estas não se propagam em meios líquidos. A sensibilidade dos sistemas eletrônicos usados, que devem ser capazes de registrar variações de tempo com precisão na ordem de nanosegundos para serem capazes de medir a variação da velocidade da onda ultra-sônica devido a tensão residual, é outra dificuldade a ser superada (Bittencourt, 2000).

Alguns pesquisadores usaram a correlação cruzada em seus experimentos adotando para cada caso particular um enfoque próprio (Bittencourt, 2000). Lu, em 1990, desenvolveu um sistema de medida de velocidade da onda ultra-sônica na Universidade de *Kentucky*, onde aplicou a correlação na técnica do *Pulse-Echo-Overlap*. Em seu trabalho, utilizou ondas superficiais empregando um transdutor como emissor e dois outros iguais, como receptores. Com a distância entre os transdutores fixa, foram adquiridos os sinais dos transdutores receptores. A medida do tempo de trânsito é feita entre esses dois transdutores sobrepondo os sinais pelo “*Pulse-Echo-Overlap*” e desta forma obtendo o atraso entre os sinais. Feito isso a correlação é utilizada para melhorar esta medida funcionando como um ajuste fino do atraso entre os sinais, o que, segundo os autores, permitiu medida do tempo de trânsito com precisão de 1 ns de um sinal amostrado com taxa de 50 ns. Tanala e colaboradores, em 1995, utilizaram a correlação cruzada apenas para medida da variação de tempo em relação à espessura de um material (Bittencourt, 2000).

## **2.6 Teoria sobre propagação de ondas acústicas.**

Para o entendimento das técnicas e procedimentos utilizados nesse trabalho alguns conceitos teóricos devem ser vistos. A seguir serão detalhadas as principais teorias e seus respectivos desenvolvimentos.

### 2.6.1 Determinação da equação de propagação de uma onda acústica.

O desenvolvimento da equação de ondas requer o entendimento da propagação de uma onda acústica em três dimensões. A característica das chamadas ondas planas implica em cada variável acústica (deslocamento de partícula, densidade, pressão, etc) e têm amplitude constante num plano perpendicular à direção de propagação.

Ondas planas podem ser produzidas num fluido confinado numa tubulação pela movimentação de baixa frequência de um pistão localizado numa das extremidades dessa tubulação. Para grandes distâncias dessa fonte, espera-se um comportamento das ondas similar ao das ondas planas (Santos, 2006).

Algumas grandezas importantes são necessárias para iniciar essa abordagem. A posição de equilíbrio  $r^p$  de uma partícula de fluido é dada por:

$$r^p = r_1^p a_1^p + r_2^p a_2^p + r_3^p a_3^p \quad (2.1)$$

onde  $r_1, r_2, r_3$  são as projeções do vetor posição da partícula nas direções  $a_1^p, a_2^p, a_3^p$  do sistema de coordenadas cartesianas.

O deslocamento da posição de equilíbrio pode ser escrito por:

$$\xi^p = \xi_1^p a_1^p + \xi_2^p a_2^p + \xi_3^p a_3^p \quad (2.2)$$

onde  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  são as projeções do vetor deslocamento da partícula nas direções  $a_1^p, a_2^p, a_3^p$  do sistema de coordenadas cartesianas.

Derivando-se a equação (2.2) obtém-se a velocidade da partícula de fluido.

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} = u_1 a_1 + u_2 a_2 + u_3 a_3 \quad (2.3)$$

onde  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  são as projeções do vetor velocidade da partícula nas direções  $a_1, a_2, a_3$  do sistema de coordenadas cartesianas.

A condensação  $\chi$  num ponto qualquer do sistema de coordenadas é definida por:

$$\chi = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (2.4)$$

onde  $\rho$  é a densidade instantânea e  $\rho_0$  é a densidade instantânea na condição de equilíbrio do fluido num ponto qualquer do sistema de coordenadas.

A pressão acústica é definida como o excesso de pressão num ponto qualquer quando a onda acústica passa por esse ponto, isto é:

$$P = P - P_0 \quad (2.5)$$

onde  $P$  é a pressão instantânea e  $P_0$  é a pressão instantânea na condição de equilíbrio do fluido para um ponto qualquer do sistema de coordenadas.

O termo partícula de fluido significa um elemento de volume grande o suficiente para conter milhões de moléculas de modo que o fluido pode ser considerado um meio contínuo. Esse elemento de volume deve ser pequeno suficiente para que todas as variáveis acústicas possam ser consideradas aproximadamente constantes por todo elemento. As moléculas não têm posições fixas nesse elemento (Santos, 2006).

Mesmo quando há a passagem da onda acústica, as partículas estão em constante movimento, com velocidade média muito menor que a velocidade de uma molécula associada

com o movimento da onda. Uma outra hipótese importante é que esse elemento de volume pode ser tratado como um volume fechado, de tal forma que as moléculas que saem desse elemento são repostas pela mesma quantidade de moléculas (Santos, 2006).

Nessa análise sendo  $\rho_0$  e  $P_0$  uniformes em todo o fluido, os efeitos gravitacionais são desprezados,. Finalmente, limita-se a análise a ondas com amplitude relativamente pequenas tal que a mudança na densidade do meio será pequena, quando comparada com o valor de equilíbrio ( $|\chi| \leq 1$ ).

### 2.6.1.1 Equação de Estado.

A equação seguinte mostra um gás perfeito em condições isotérmicas.

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.6)$$

Os processos acústicos são aproximadamente adiabáticos, pois não há trocas significativas de energia térmica de uma partícula para outra. O comportamento de um gás perfeito sob essas condições pode ser dado por:

$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (2.7)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente isentrópico (razão entre os calores específicos a volume constante e a pressão constante). A equação de estado em condições adiabáticas para gases reais é mais complicada. Tomando-se uma expansão em série de *Taylor* da equação (2.7), escreve-se:

$$P = P_0 + \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho_0} (\rho - \rho_0) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2} \right) \Big|_{\rho_0} (\rho - \rho_0)^2 + \dots \quad (2.8)$$

Se as flutuações são pequenas, os termos de segunda e ordens subseqüentes podem ser desprezados. A equação (2.8) pode então ser escrita como:

$$P - P_0 = \eta \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (2.9)$$

Onde  $\eta = \rho_0 \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0}$  é o módulo de compressibilidade volumétrico. Em termos da pressão acústica

$P$  e condensação  $\chi$ , (2.9) pode ser escrita como:

$$P = \eta \chi \quad (2.10)$$

### 2.6.1.2 Equação da Continuidade.

Para relacionar o movimento do fluido com sua compressão ou dilatação é necessária uma relação entre a velocidade da partícula  $u$  e a densidade instantânea  $\rho$  do fluido. A equação de conservação da massa na forma diferencial estabelece que (Santos, 2006):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho u \right) = 0 \quad (2.11)$$

onde  $\nabla$  é o operador divergente.

Por outro lado, quando se escreve que  $\rho = \rho_0 (1 + \chi)$  e assumindo que  $\chi$  é muito pequeno, pode-se concluir que:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho u \right) = 0 \quad (2.12)$$

### 2.6.1.3 Equação de Euler.

Em fluidos, a existência da viscosidade e o fato dos processos acústicos não serem perfeitamente adiabáticos introduzem termos dissipativos. Esses efeitos estão sendo ignorados nessa análise.

Para o elemento de volume  $d\mathcal{V} = dr_1 dr_2 dr_3$  e massa  $dm$ , a força líquida  $\overset{p}{df}$  que irá acelerá-lo conforme a segunda lei de Newton será  $\overset{p}{df} = dm \overset{p}{a}$ . Desprezando-se as forças viscosas, a força líquida atuante no elemento de volume na direção  $a_1$  será:

$$\overset{p}{df}_{a_1} = \left[ P - \left( P + \frac{\partial P}{\partial x} da_1 \right) \right] da_2 da_3 = -\frac{\partial P}{\partial a_1} d\mathcal{V} \quad (2.13)$$

Expressões análogas para as direções  $a_2$  e  $a_3$  podem ser obtidas. O vetor força para o diferencial de volume pode ser escrito como:

$$\overset{p}{d\bar{f}} = \overset{p}{df}_{a_1} \overset{p}{a}_1 + \overset{p}{df}_{a_2} \overset{p}{a}_2 + \overset{p}{df}_{a_3} \overset{p}{a}_3 = -\nabla P d\mathcal{V} \quad (2.14)$$

A velocidade da partícula  $\overset{p}{u}$  é uma função do tempo e do espaço. Quando um fluido se move com velocidade  $\overset{p}{u}(r_1, r_2, r_3, t)$  em  $(r_1, r_2, r_3)$  para uma nova posição  $(r_1+dr_1, r_2+dr_2, r_3+dr_3)$  num tempo  $t+dt$ , a nova velocidade é  $\overset{p}{u}(r_1+dr_1, r_2+dr_2, r_3+dr_3, t+dt)$ . A aceleração será:

$$\overset{p}{a} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\overset{p}{u}(r_1 + dr_1, r_2 + dr_2, r_3 + dr_3, t + dt) - \overset{p}{u}(r_1, r_2, r_3, t)}{dt} \quad (2.15)$$

Por outro lado, pode-se escrever:

$$dr_1 = u_1 dt \quad (2.16)$$

$$dr_2 = u_2 dt \quad (2.17)$$

$$dr_3 = u_3 dt \quad (2.18)$$

Realizando-se uma expansão em série de *Taylor* da nova velocidade e utilizando as equações (2.16) a (2.18), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} {}^p \mathbf{u}(r_1 + dr_1, r_2 + dr_2, r_3 + dr_3, t + dt) = & {}^p \mathbf{u}(r_1, r_2, r_3, t) + \\ & + \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_1} u_1 dt + \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_2} u_2 dt + \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_3} u_3 dt + \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (2.19)$$

Substituindo as equações (2.16) a (2.19) na equação (2.15), vem:

$${}^p \mathbf{a} = \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial t} + u_1 \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_1} + u_2 \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_2} + u_3 \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial a_3} \quad (2.20)$$

Utilizando a notação de produto escalar  $(\mathbf{u}^\omega \cdot \nabla)$ :

$$(\mathbf{u}^\omega \cdot \nabla) = u_1 \frac{\partial}{\partial a_1} + u_2 \frac{\partial}{\partial a_2} + u_3 \frac{\partial}{\partial a_3} \quad (2.21)$$

A aceleração pode então ser escrita:

$${}^p \mathbf{a} = \frac{\partial {}^p \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}^\omega \cdot \nabla) {}^p \mathbf{u} \quad (2.22)$$

Reescrevendo-se a segunda lei de *Newton* com  $dm = \rho d\mathcal{V}$  e utilizando a equação (2.22):

$$-\nabla P = \rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} + (\mathbf{u}^\omega \cdot \nabla) \mathbf{u}^p \right] \quad (2.23)$$

A equação (2.23) é chamada de equação de Euler. Algumas simplificações podem ser realizadas. Assumindo que  $(|\chi| \leq 1)$  e que  $|(u^\omega \cdot \nabla) u^p| \ll \left| \frac{\partial u^p}{\partial t} \right|$ , a densidade  $\rho$  pode ser substituída por  $\rho_0$  e pode-se escrever:

$$-\nabla P = \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} \quad (2.24)$$

A equação (2.24) é uma equação linear de balanço de forças, válida para processos acústicos de pequena amplitude (velocidade elevada da onda sonora).

As equações (2.10), (2.12) e (2.24) podem ser combinadas e fornecer uma equação diferencial de uma única variável dependente. A velocidade da partícula  $\mathbf{u}^p(r_1, r_2, r_3, t)$  pode ser eliminada entre as equações (2.12) e (2.24). Tomando-se o divergente da equação (2.24):

$$-\nabla(\nabla P) = \rho_0 \nabla \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} = \nabla^2 P = \rho_0 \nabla \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} \quad (2.25)$$

onde  $\nabla^2$  é o Laplaciano. Tomando-se a derivada temporal da equação (2.12) e utilizando  $\partial(\nabla \cdot \mathbf{u}^p) / \partial t = \nabla \left( \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} \right)$ , pode-se escrever:

$$\left( \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} \right) + \nabla \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{u}^p}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.26)$$

Da equação (2.26) na equação (2.25), obtem-se:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (2.27)$$

Para a eliminação de  $\chi$  utiliza-se a equação de estado (2.10)

$$\nabla^2 p = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.28)$$

onde pode-se definir  $V$  por:

$$V = \sqrt{\frac{\eta}{\rho_0}} \quad (2.29)$$

Na equação representada  $V$  indica a velocidade do som no fluido.

Quando uma onda ultra-sônica se propaga num sólido a situação é semelhante. Com as devidas hipóteses de uma situação isotrópica, homogênea e adiabática a velocidade de uma onda ultra-sônica longitudinal  $V_L$  num sólido é:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.30)$$

Sendo  $V_L$  a velocidade da onda longitudinal,  $E$  o módulo de elasticidade e  $\rho$  a densidade do material. Assim, pode ser notado que a velocidade de propagação de um pulso longitudinal (onde as partículas vibram na direção de propagação) em um sólido depende apenas do módulo de elasticidade e da densidade do meio.

As velocidades para as ondas cisalhantes ( $V_T$ ) (onde as partículas vibram perpendicularmente a direção de propagação) e superficiais de *Rayleigh* ( $V_S$ ) também podem ser demonstradas utilizando modelos semelhantes e suas respectivas fórmulas são:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.31)$$

Onde  $G$  é o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento.

$$V_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (2.32)$$

Em função dos valores dos coeficientes de *Poison* dos materiais, pode-se admitir que a relação entre as velocidades da onda cisalhante ( $V_T$ ) e longitudinal ( $V_L$ ), e da onda superficial de *Rayleigh* ( $V_S$ ) e cisalhante sejam:

$$V_T \cong 0,50V_L \quad (2.33)$$

$$V_S \cong 0,92 V_C \quad (2.34)$$

Assim a velocidade da onda cisalhante é em torno de 50% da velocidade da onda longitudinal e a velocidade da onda superficial de *Rayleigh* cerca de 92% da onda cisalhante (Lamy, 1990).

É interessante observar que a velocidade da onda ultra-sônica discutida anteriormente é conhecida como velocidade de fase, uma vez que é obtida a partir da comparação da fase de oscilação relativa de átomos vizinhos. Um meio dispersivo é aquele em que a velocidade de fase depende da frequência de oscilação. Muitas situações não exibem qualquer variação nesse sentido, e podem ser representadas pelas equações convencionais de propagação das ondas sonoras, que resultam de um número de simplificações práticas que ignoram qualquer

dependência entre a frequência e a velocidade. Quando, entretanto, o meio de propagação é dispersivo a definição de velocidade, a partir da energia, requer uma atenção especial e será visto ser diferente da velocidade de fase. Isso porque, quando as velocidades de fase são distorcidas através do meio, esta distorção dificulta definir sua velocidade média. Introduce-se então o conceito de velocidade de grupo, que é a velocidade média de um grupo ou pacote de ondas, que é um sinal de comprimento finito compreendendo um número limitado de comprimentos de onda (Bittencourt, 2000).

## 2.7 Determinação das equações para o cálculo do módulo de elasticidade.

A constante de proporcionalidade que relaciona a tensão e a deformação é chamada de módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ), definindo a Lei de *Hooke*. Para o caso de solicitação à torção, a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento aplicada ( $\tau$ ) e a deformação angular ( $\gamma$ ) é chamada de módulo de elasticidade transversal ( $G$ ). O coeficiente de *Poisson*  $\nu$  é a variável que relaciona a deformação na direção da carga às deformações transversais a esta. A unidade dos módulos de elasticidade é a mesma da tensão (MPa) e o coeficiente de Poisson é adimensional. Os valores de  $E$ ,  $\nu$  e  $G$ , para o aço, são geralmente determinados por medidas estáticas diretas em testes de tração, para se determinar o módulo de elasticidade longitudinal, ou torção, para se determinar o módulo elasticidade transversal.

Uma forma alternativa de obter as propriedades elásticas é através do uso de técnicas dinâmicas. Estas utilizam medições de frequência ou tempo decorrido. Uma dessas técnicas dinâmicas, que consiste em medir o tempo decorrido para um pulso ultra-sônico percorrer a amostra e retornar, é chamada de método pulso-eco. A velocidade da onda pode ser calculada conforme a equação:

$$V = \frac{2e}{(T')} \quad (2.35)$$

Onde: ( $e$ ) é a espessura da peça em teste.

( $T'$ ) é o tempo de percurso da onda (ida e volta)

Quando o material sofre um impulso causado por um transdutor ultra-sônico, ondas são geradas em seu interior. Estas podem ser longitudinais ou transversais, dependendo do ângulo de incidência do pulso. As equações de movimento que descrevem o comportamento dessas ondas, através do deslocamento das partículas do material, são apresentadas a seguir (GE Panametrics, 2000):

$$\begin{aligned}
 (\lambda + G)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + G\nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\
 (\lambda + G)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + G\nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\
 (\lambda + G)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + G\nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

Onde: ( $\rho$ ) é a densidade do meio

( $t$ ) o é o tempo

( $\lambda$ ) é constante de Lamé

( $G$ ) módulo de elasticidade transversal ou de cisalhamento

( $\Delta$ ) é a expansão volumétrica

( $u, v, w$ ) são os deslocamentos em relação à ( $x, y, z$ )

( $\nabla^2$ ) é o operador Laplaciano  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

A partir destas equações observa-se que a propagação das ondas está associada à expansão volumétrica e à rotação e distorção cisalhantes. Rearranjando as equações gerais para propagação de ondas tem-se:

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2G)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + \nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\
(\lambda + 2G)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + \nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\
(\lambda + 2G)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + \nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0
\end{aligned}
\tag{2.37}$$

Para ondas longitudinais se propagando na direção (x), tal que o deslocamento de (u) é uma função apenas de (x) e (t), e (v = w = 0) as equações (2.37) tornam-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_L^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}
\tag{2.38}$$

Para a determinação da velocidade desse tipo de onda utiliza-se a seguinte equação, que relacionada as propriedades elásticas e mecânicas de um determinado material:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[ \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-\nu)} \right]}
\tag{2.39}$$

Onde: ( E ) é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de *Young*

(  $\nu$  ) é o coeficiente de *Poisson*

(  $\rho$  ) é a densidade do material.

Se, por outro lado, a deformação produzida consiste apenas de distorção e rotação, sem expansão de volume ( $\Delta= 0$ ), as equações (2.36) tornam-se:

$$\begin{aligned}
G\nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0 \\
G\nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0 \\
G\nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0
\end{aligned}
\tag{2.40}$$

Estas equações se aplicam às ondas cisalhantes ou transversais. Normalmente, este tipo de onda apresenta uma velocidade correspondendo à metade da velocidade de uma onda longitudinal. Para uma onda cisalhante propagando-se na direção (x), com o deslocamento das partículas na direção transversal (y), ( $u = w = 0$ ), o deslocamento (n) é função de (x) e (t). Então, a partir da equação (2.37) tem-se:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = V_T^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}
\tag{2.41}$$

A velocidade das ondas transversais ou cisalhantes pode ser determinada conforme a seguinte equação, reproduzida da equação 2.31:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}
\tag{2.42}$$

Onde: (G) é o módulo de elasticidade transversal

( $\rho$ ) é a densidade do material

( $V_T$ ) é a velocidade transversal

Assim, o módulo de elasticidade transversal pode ser determinado através da seguinte equação:

$$G = V_T^2 \rho
\tag{2.43}$$

O coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) pode ser obtido da relação entre as ondas longitudinais ( $V_L$ ) e transversais ( $V_T$ ) propagando-se em um material de acordo com a equação:

$$\nu = \frac{\left[ 1 - 2 \left( \frac{V_T}{V_L} \right)^2 \right]}{\left[ 2 - 2 \left( \frac{V_T}{V_L} \right)^2 \right]} \quad (2.44)$$

Da mesma forma, o módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ) também pode ser encontrado através da relação entre a densidade e as velocidades de propagação das ondas longitudinais ( $V_L$ ) e das ondas transversais ( $V_T$ ) conforme seguinte equação:

$$E = \frac{\rho V_T^2 (3V_L^2 - 4V_T^2)}{(V_L^2 - V_T^2)} \quad (2.45)$$

Outra forma de determinação do módulo de elasticidade longitudinal é através da relação entre a densidade do material, a velocidade de propagação da onda longitudinal no material ( $V_L$ ) e o do coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) segundo a equação:

$$E = \left\{ V_L^2 \rho \left[ \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right] \right\} \quad (2.46)$$

## 2.8 Acustoelasticidade.

À teoria que envolve tanto a propagação de ondas mecânicas como a elasticidade dá-se o nome de Acustoelasticidade. Para estudá-la é necessário entender os princípios básicos de ambos os ramos da Mecânica. Assim, o estudo teórico abordará tanto a elasticidade como a propagação de ondas elásticas. A seguir, são apresentados esses conceitos de elasticidade e de propagação de onda, que são necessários para compreender as relações entre a velocidade de onda e o estado de tensões, e os métodos propostos para avaliar tensões utilizando ultra-som.

### 2.8.1 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.

Conforme já dito, 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:

$$T = T(E') \Leftrightarrow T_{ij} = C_{ijkl} E'_{kl} \quad (2.47)$$

Nessa equação, o termo T se refere à tensão; o termo E' se refere à deformação e o termo  $C_{ijkl}$  se refere ao 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.

A equação (2.47) pode ser expandida para a forma:

$$\begin{aligned} T_{11} &= C_{1111} E'_{11} + C_{1112} E'_{12} + \dots + C_{1133} E'_{33} \\ T_{12} &= C_{1211} E'_{11} + C_{1212} E'_{12} + \dots + C_{1233} E'_{33} \\ &\dots \dots \dots \\ T_{33} &= C_{3311} E'_{11} + C_{3312} E'_{12} + \dots + C_{3333} E'_{33} \end{aligned} \quad (2.48)$$

O significado dos índices está relacionado à sua direção e ao plano onde está aplicada a tensão ou a deformação. Assim,  $T_{11}$  se refere à tensão que está aplicada no plano perpendicular à direção 1 (segundo índice), na direção 1 (primeiro índice). De uma forma bastante simplificada, a equação mostra que tensões aplicadas em uma determinada direção têm reflexos em deformações em todas as outras direções, e a forma de relacioná-las é através das constantes elásticas. A notação apresentada já está simplificada, uma vez que os termos  $T$  e  $E'$  também têm quatro índices na notação completa, mas estes são desnecessários para a apresentação do equacionamento.

A equação (2.48) tem 81 constantes elásticas, mas como as deformações opostas têm o mesmo valor:

$$E'_{kl} = E'_{lk} \quad (2.49)$$

Assim, é possível combinar os coeficientes elásticos em novos valores, levando a uma redução do número de constantes desconhecidas. Com isso as constantes originais se reduzem a 54. Ainda, por equilíbrio, tensões aplicadas em sentidos opostos em uma mesma direção em um ponto do corpo têm que ser iguais. Isso leva à seguinte relação:

$$T_{ij} = T_{ji} \quad (2.50)$$

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.

### **2.8.2 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:

$$T_{ij} = \frac{\partial U}{\partial E'_{ij}} \quad (2.51)$$

Com base na equação (2.47) pode-se calcular a variação da tensão com a deformação em relação a um plano  $s$ , numa direção  $r$  qualquer:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial E'_{rs}} = C_{ijrs} \quad (2.52)$$

Combinando com a equação (2.51), tem-se:

$$C_{ijrs} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial E'_{rs}} = \frac{\partial^2 U}{\partial E'_{rs} \cdot \partial E'_{ij}} \quad (2.53)$$

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

$$\frac{\partial^2 U}{\partial E'_{rs} \cdot \partial E'_{ij}} = \frac{\partial^2 U}{\partial E'_{ij} \cdot \partial E'_{rs}} \quad (2.54)$$

A segunda parte da equação (2.54), de acordo com a equação (2.53), é o coeficiente  $C_{rsij}$ . Como a primeira é o coeficiente  $C_{ijrs}$ , tem-se:

$$C_{ijrs} = C_{rsij} \quad (2.55)$$

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 (2.48) com a igualdade da equação (2.55) torna-se:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{1222} \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & C_{2333} & C_{1333} & C_{1233} \\ C_{1123} & C_{2223} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{1213} \\ C_{1113} & C_{2213} & C_{1333} & C_{2313} & C_{1313} & C_{1213} \\ C_{1112} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{11} \\ E'_{22} \\ E'_{33} \\ 2.E'_{23} \\ 2.E'_{31} \\ 2.E'_{12} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Simplificando os índices, a relação (2.56) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \\ 2.E'_{23} \\ 2.E'_{31} \\ 2.E'_{12} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

### 2.8.3 Característica estrutural do material.

Completar a equação (2.57) 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:

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \\ 2.E'_{23} \\ 2.E'_{31} \\ 2.E'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

O valor E, sem índice, representa o módulo de elasticidade do material; o valor G representa o módulo de elasticidade transversal e  $\nu$  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:

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \\ 2.E'_{23} \\ 2.E'_{31} \\ 2.E'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Com base na relação expressa em (2.59), é possível avaliar o efeito da anisotropia do material sobre a resposta de tensões. A presente avaliação, quando baseada apenas em parâmetros da teoria da elasticidade, não envolve os efeitos da ortotropia sobre os parâmetros acústicos. Isso ocorre porque os parâmetros de terceira ordem não foram levados em conta nessa análise. Eles são fundamentais para o cálculo da variação das tensões em sólidos. Também são significativos quando da avaliação da anisotropia, o que torna a análise mais complexa.

O caso em estudo desejado é o de uma deformação causada por movimentação da dutovia. A tensão predominante aplicada é longitudinal. Essa tensão é a predominante, mas também existem tensões devido à presença do fluido. Se a medição de tensões for no mesmo sentido da aplicação da carga (tração/compressão pela flexão no duto), a equação (2.59) mostra que o efeito sobre a deformação nessa direção será o mesmo que para materiais isotrópicos. Haverá um efeito que pode ser significativo na deformação nas direções transversais, mas não influenciará na direção da carga. Qualquer efeito sobre a velocidade da onda longitudinal na direção da carga deverá vir de parâmetros acústicos ou acoplados, e não diretamente dos parâmetros até a segunda ordem. Ao longo deste relatório será discutido o efeito combinado da textura e tensão.

#### **2.8.4 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:

$$\rho \ddot{u}_i = T_{ij,j} + \rho \cdot g_i \quad (2.60)$$

onde o índice j na tensão significa a derivada em relação à coordenada cartesiana  $x_j$ ; o último termo significa as forças de corpo;  $\rho$  é a densidade;  $u_i$  são os deslocamentos e sua segunda derivada é a aceleração. Desprezando as forças de corpo, inserindo a equação (2.47) em (2.60) e rearranjando, tem-se:

$$\rho \ddot{u}_i - C_{ijkl} u_{k,lj} = 0 \quad (2.61)$$

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):

$$u_k = A \cdot p_k \cdot \exp[i \cdot \omega \cdot (s_r \cdot x_r - t)] \quad (2.62)$$

onde  $p_k$  é o vetor que define a direção de polarização;  $\omega$  é a frequência angular;  $s_r$  é um vetor de relacionado à velocidade e direção de propagação, e A é um fator para a amplitude. Inserindo a equação (2.62) em (2.61) 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 *Christofel*):

$$\left| C_{ijrs} \cdot n_j \cdot n_l - \rho \cdot v^2 \cdot \delta_{ik} \right| = 0 \quad (2.63)$$

Onde:  $\delta_{ik}$  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 2.1). No mesmo trabalho, determinaram as constantes utilizando ondas ultra-sônicas. Brown (1989) também determinou as relações entre as diversas ondas e as velocidades.

**Tabela 2.1: 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 $v_{QT}$	$45^\circ$ de $x_1$ e $x_2$	plano ( $x_1$ - $x_2$ )
$C_{33}$	$v_{33}$	$x_3$	$x_3$	$C_{13}$	$v_{QL}$ ou $v_{QT}$	$45^\circ$ 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 $v_{QT}$	$45^\circ$ 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 $x_1$ )				

### 2.8.5 Determinação das tensões mecânicas utilizando ultra-som.

Os metais são bons condutores de ondas mecânicas, devido à sua baixa impedância acústica. Devido ao deslocamento das partículas do material durante a passagem da onda, tensões são criadas em seu interior. As tensões criadas se superpõem ao estado de tensões original do material, influenciando neste. Devido à baixa potência envolvida, o efeito da superposição sobre as características de propagação das ondas é pequeno e pode ser desprezado.

A equação para a determinação das tensões em sólidos homogêneos e isotrópicos é bem conhecida e baseia-se no desenvolvimento apresentado por Hughes e Kelly (1953). Eles mostraram que a velocidade de uma onda ao se propagar na direção 1, mesmo sentido da carga aplicada, em um corpo inicialmente isotrópico sujeito a um campo de tensão triaxial homogêneo em um sistema de coordenadas retangulares, tendo o deslocamento das partículas nas direções 1, 2 e 3, as expressões a seguir são obtidas (Lu, 1996).

$$\rho_0.V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad (2.64)$$

$$\rho_0.V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu.\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad (2.65)$$

$$\rho_0.V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu.\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad (2.66)$$

Onde  $\rho_0$  é a densidade inicial e  $V_{11}$  é a velocidade da onda longitudinal que se propaga na direção 1, com o deslocamento das partículas também na direção 1.  $V_{12}$  e  $V_{13}$  são as velocidades das ondas ultra-sônicas cisalhantes que se propagam na direção 1 com o deslocamento das partículas nas direções 2 e 3, respectivamente.  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes elásticas de segunda ordem, ou constantes de Lamé. Além disso,  $l$ ,  $m$  e  $n$  são as constantes elásticas de terceira ordem denominadas constantes de Murnaghan,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ , são as componentes de deformações principais nas direções 1, 2, 3 e  $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ .

Para o caso do estado uniaxial de tensões, existem cinco modos de propagação de ondas cujas velocidades podem ser determinadas a partir das equações (2.64), (2.65) e (2.66). Considerando a tensão atuando na direção 1, as deformações valem:  $\alpha_1 = \varepsilon$  e  $\alpha_2 = \alpha_3 = \nu\varepsilon$ . Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. Com essas considerações as equações (2.64), (2.65) e (2.66) são reduzidas para (Bray & Stanley, 1997).

$$\rho_0.V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[ 4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu \left( 1 + \frac{2l}{\lambda} \right) \right] \varepsilon \quad (2.67)$$

$$\rho_0.V_{12}^2 = \rho_0.V_{13}^2 = \mu + \left[ 4\mu + \nu \left( \frac{n}{2} \right) + m(1 - 2\nu) \right] \varepsilon \quad (2.68)$$

As velocidades das ondas propagando no plano perpendicular a direção da tensão uniaxial também podem ser determinadas a partir das equações (2.64), (2.65) e (2.66) e são:

$$\rho_0.V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1-2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon \quad (2.69)$$

$$\rho_0.V_{21}^2 = \rho_0.V_{31}^2 = \mu + \left[ (\lambda + 2\mu + m)(1-2\nu) + \frac{n\nu}{2} \right] \varepsilon \quad (2.70)$$

$$\rho_0.V_{23}^2 = \rho_0.V_{32}^2 = \mu + \left[ (\lambda + m)(1-2\nu) - 6\nu\mu - \frac{n}{2} \right] \varepsilon \quad (2.71)$$

Onde  $V_{22}$  é a velocidade da onda longitudinal se propagando na direção 2 e as partículas do sólido vibrando na direção 2.  $V_{21}$  e  $V_{23}$  são as velocidades das ondas cisalhantes que se propagam na direção 2 e as partículas do sólido vibram na direção 1 e 3 respectivamente.

A partir dessas equações, considerando as relações elásticas entre tensão e deformação, é possível estabelecer as relações fundamentais entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica, longitudinal e cisalhante, e as tensões existentes no material.

Para a propagação da onda paralela à direção da tensão aplicada, tem-se (Hughes, 1953, Lu, 1997):

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3K)[2l + \lambda + (\lambda + \mu)(4m + 4\lambda + 10\mu)/u] \quad (2.72)$$

$$\rho V_T^2 = \mu + (\sigma/3K)[m + (\lambda n/4\mu) + 4\lambda + 4\mu] \quad (2.73)$$

Para a propagação da onda perpendicular à direção da tensão aplicada.

$$\rho V_L^2 = \lambda + 2\mu + (\sigma/3K)[2l - (2\lambda/\mu)(m + \lambda + 2\mu)] \quad (2.74)$$

$$\rho V_{T1}^2 = \mu + (\sigma/3K)[m + (\lambda n/4\mu) + \lambda + 2\mu] \quad (2.75)$$

$$\rho V_{T2}^2 = \mu + (\sigma/3K)[m - (\lambda + \mu) + n/2\mu - 2\lambda] \quad (2.76)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão uniaxial (positiva para tensão compressiva e negativa quando trativa); Subscrito T corresponde a onda cisalhante; subscrito T<sub>1</sub> corresponde a onda cisalhante com polarização paralela a direção da tensão; subscrito T<sub>2</sub> corresponde a onda cisalhante com polarização perpendicular a direção de tensão; subscrito L corresponde a onda longitudinal;  $\lambda$  e  $\mu$  são as constantes elásticas de Lamé de segunda ordem, de um meio isotrópico; l, m e n são constantes elásticas de terceira ordem apresentadas por Murnaghan;  $\rho$  é a densidade do meio livre de tensões e K é igual a  $\lambda + 2\mu/3$

O primeiro fator do lado direito das equações (2.72) a (2.76) descreve a velocidade da onda ultra-sônica propagando em um corpo livre de tensão. Assim nas equações (2.72) e (2.73) esse fator é  $\lambda + 2\mu$ , nas equações (2.74), (2.75) e (2.76) é  $\mu$ .

As equações desenvolvidas por Hughes e Kelly podem ser combinadas de maneira a facilitar sua utilização na prática. Elas podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma (Lu, 1996, Ortega, 2001, Schneider, 1997).

$$\frac{V_{ii} - V_L^0}{V_L^0} = k_1\sigma_i + k_2(\sigma_j + \sigma_k) \quad (\text{ondas longitudinais}) \quad (2.77)$$

$$\frac{V_{ij} - V_T^0}{V_T^0} = k_3\sigma_i + k_4\sigma_j + k_5\sigma_k \quad (\text{ondas transversais}) \quad (2.78)$$

Onde  $V_L$  e  $V_T$  são as velocidades das ondas longitudinais e cisalhantes respectivamente no material sem tensão,  $V_{ij}$  é a velocidade de uma onda ultra-sônica propagando na direção i e polarizada na direção j,  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  e  $\sigma_k$  são as tensões principais nas respectivas direções e  $k_1$  a  $k_5$  são chamadas de constantes acustoelásticas normalizadas. Cada constante acustoelástica corresponde

a uma relação entre direção de propagação da onda e a direção de polarização das partículas, em relação a tensão e são obtidas a partir da variação relativa das ondas de um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas, a partir das cinco equações (2.72 a 2.76), cada equação gerando uma constante.

Através da equação (2.78), obtemos a equação para a determinação da birrefringência acústica (Lu, 1996). Nesta técnica a onda é propagada perpendicularmente à superfície do material (direção da espessura) podendo a polarização da onda ser alinhada ou não com a direção de tensão ou de laminação do material. Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, a onda ultra-sônica incidindo perpendicularmente retornará o mesmo tempo. Quando no material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante, equação (2.78), combinada com as duas direções, pode ser expressa da seguinte forma ( Lu, 1996):

$$B = \frac{(V_{31} - V_{32})}{V_c^0} = -\frac{(t_{31} - t_{32})}{t^0} (K_4 - K_5) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.79)$$

onde B é a birrefringência,  $K_4$  e  $K_5$  são constantes acustoelásticas para o material em questão e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  as tensões principais.

Em geral, como visto, os materiais não são completamente isotrópicos, o que pode influenciar na medida de tensão por ultra-som uma vez que uma pequena variação na orientação dos grãos pode produzir anisotropia acústica da ordem produzida pela tensão. Outra dificuldade é que pode ocorrer dos eixos das tensões principais não estarem necessariamente alinhados com o eixo de simetria do material. Iwashimizu, 1973, verificando que nesse caso ocorre um desvio da direção de polarização, propõe equações da técnica da birrefringência no estado plano de tensões de uma forma mais geral e com algumas considerações em relação às tensões no plano de simetria do material chega-se à equação (2.80).

$$B = B_0 + Ca (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.80)$$

Através da equação (2.77), para o caso de ondas propagando na mesma direção da aplicação da carga obteremos a seguinte equação para determinação da constante acustoelástica  $L_{11}$  (Lu, 1996, Hughes, 1953, Bray, 2002).

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_o} dt \quad (2.81)$$

Nessa equação,  $L_{11}$  é a constante acustoelástica para uma onda longitudinal se propagando na direção da aplicação da força,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $t_o$  é o tempo de referência para o estado livre de tensões e  $dt$  é a variação no tempo de percurso da onda entre dois estados de tensão.

A constante  $L_{11}$  é dada por:

$$L_{11} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} \quad (2.82)$$

Como já citado, os termos  $\mu$  e  $\lambda$ , representam as constantes de *Lamé*, as variáveis  $l$  e  $m$  são constantes elásticas de terceira ordem ( $C_{ijklmn}$ ) que vêm da expansão em série da tensão em relação à variação da energia de deformação com a deformação:

$$T_{ij} = \frac{\partial U(E')}{\partial E'_{ij}} = C_{ijkl}E'_{kl} + C_{ijklmn}E'_{kl} E'_{mn} \quad (2.83)$$

As constantes de *Lamé* são dadas em função do módulo  $E$ , do módulo transversal  $G$  e do coeficiente  $\nu$  por:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.84a)$$

$$\mu = G \quad (2.84b)$$

As constantes elásticas de terceira ordem podem ser obtidas pela relação com a velocidade das ondas elásticas.

O problema torna-se extremamente complicado quando da inclusão da anisotropia do material entre os parâmetros considerados. Isso ocorre porque a presença das tensões influencia na velocidade de propagação da onda, que é o que se deseja. No entanto, também pode influenciar nas constantes elásticas. Assim, o primeiro termo do determinante da equação de *Christofel* também sofre influência da tensão.

Uma forma alternativa de descrever o efeito é reescrever a equação na forma:

$$\left| G_{il} - \rho \cdot v^2 \cdot \delta_{ik} \right| = 0 \quad (2.85)$$

onde foi feita apenas a substituição do primeiro termo conforme:

$$G_{il} = C_{ijrs} \cdot n_j \cdot n_l \quad (2.86)$$

Para o caso de materiais anisotrópicos

$$\left| \overline{G}_{il} - \rho \cdot v^2 \cdot \delta_{ik} \right| = 0 \quad (2.87)$$

Nesse caso, o efeito da tensão e das características do material é considerado levando em conta uma nova forma para o primeiro termo:

$$\overline{G}_{il} = (\overline{C}_{ijrs} + \sigma_{jk} \cdot \delta_{il}) \cdot n_j \cdot n_l \quad (2.88)$$

Duas diferenças são notadas: a inclusão de um segundo termo em  $G_{il}$ , com o efeito direto da tensão, e o fato de que as constantes elásticas agora sofrem a influência da tensão aplicada, sendo representadas por um novo conjunto de valores para  $\overline{C}_{ijrs}$ , denotados pela barra superior.

A solução da equação (2.87), para onda longitudinal propagando-se ao longo de um dos eixos de simetria de um material levemente ortotrópico sofrendo tensão uniaxial, como o aço laminado API para dutos, é da forma:

$$\rho.c_{11}^2 = \overline{C_{11}} + \sigma_1 \quad (2.89)$$

Assim, não basta medir a velocidade da onda longitudinal ao longo da direção de aplicação de carga, é necessário conhecer o efeito que a variação da tensão tem sobre as propriedades elásticas e como separar esse efeito da tensão, já que o que é medido é a velocidade da onda.

## 2.9 Equacionamentos dos métodos matemáticos para determinação dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas.

Neste tópico será mostrado o equacionamento para a determinação dos tempos de percurso para ondas ultra-sônicas. Dois tipos de processamentos de sinais serão mostrados, a correlação cruzada e a transformada de *Hilbert*. Outros tipos de métodos para determinação dos tempos serão mostrados nesse trabalho no capítulo 4, mas eles não têm um método matemático complexo incorporado e os tempos de percurso serão determinados diretamente ou em união com os métodos que serão mostrados aqui. Inicialmente será mostrado o equacionamento da correlação cruzada, seguida da transformada de *Hilbert*.

### 2.9.1 Correlação cruzada.

A correlação entre duas funções contínuas  $A(t)$  e  $B(t)$ , chamada  $C_{AB}(\tau)$  é definida pela relação (Champney, 1973, Lu, 1990, Bittencourt, 2000):

$$C_{AB}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t)B(t - \tau)dt \quad (2.90)$$

Com as funções  $A(t)$  e  $B(t)$  diferentes, mas com conjunto de dados similares, o termo correlação cruzada é normalmente usado. No caso especial em que as funções  $A(t)$  e  $B(t)$  podem ser consideradas iguais e temporariamente defasadas, a função correlação é denominada autocorrelação e indicada por  $C_{AA}$  e a equação (2.90) fica da seguinte forma:

$$C_{AB(\tau)} = p \cdot C_{AA}(\tau_c + \tau) = p \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) \cdot A(t - \tau_c - \tau) dt \quad (2.91)$$

onde p é uma constante e  $\tau_c$  o tempo de atraso.

A descrição acima é a forma geral considerando funções contínuas. No caso de funções discretizadas com um intervalo de tempo  $\Delta_t$  fixo, que são os casos práticos comuns, faz-se  $A_i = A(t_i)$  e  $B_i = B(t_i)$ , onde  $t_i = i\Delta_t$ . Dentro da faixa de interesse,  $t-r \leq t_i \leq t_r$ , a integração na forma discreta é realizada como mostrado a seguir:

$$C_i = \sum_{j=-r}^r A_j \cdot B_{j-1} \quad (2.92)$$

onde  $C_i = C(\tau_i)$ . Então o tempo de atraso seria dado por  $\tau = \alpha \Delta_t$ , onde  $C_a \geq C_i$ , para todos os i.

Como o nome dá a entender, a função correlação cruzada é uma medida da existência de alguma correlação entre duas funções. O conceito é especialmente usado para funções periódicas ou para certos tipos de funções aleatórias. Duas funções diferentes e não relacionadas, terão a correlação zero para todos os t, ao passo que, duas funções associadas com quantidades físicas entre as quais existe uma conexão terão frequentemente uma correlação cruzada finita para alguns ou todos os valores de t. No uso comum do sinal ultra-sônico, o somatório do produto de duas funções desloca uma função sobre a outra comparando as duas, no caso dois sinais ultra-sônicos, e como consequência gera uma função, também no domínio do tempo, cujo máximo indica o tempo de atraso entre essas funções, ou sinais ultra-sônicos (bittencourt, 2000).

### 2.9.2 Transformada de *Hilbert*.

A transformada de *Hilbert* é utilizada para a extração das funções de modulação em amplitude e frequência. Dado um sinal qualquer  $x(t)$ , com a aplicação da transformada de *Hilbert* é possível a decomposição do sinal  $x(t)$  na seguinte forma (Poularikas, 1999, Santos, 2006):

$$x(t) = A(t) \text{sen}(\Phi(t)t) \quad (2.93)$$

onde  $A(t)$  e  $\Phi(t)$  são amplitude e fase instantâneas, ambas desconhecidas inicialmente. Uma outra grandeza é a frequência instantânea  $\omega(t)$ , que é a taxa de variação da fase com o tempo  $t$ . A transformada de *Hilbert* é definida por:

$$w(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\mathcal{G})}{t - \mathcal{G}} d\mathcal{G} \quad (2.94)$$

onde  $H[x(t)]$  é a transformada de *Hilbert* de  $x(t)$ . A transformada inversa de *Hilbert* é definida por:

$$x(t) = H^{-1}[w(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w(\mathcal{G})}{t - \mathcal{G}} d\mathcal{G} \quad (2.95)$$

Seja  $z(t)$  a extensão analítica associada ao sinal de  $x(t)$  definido por:

$$z(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (2.96)$$

A partir da expressão do sinal analítico, podemos determinar a amplitude e fase instantânea como sendo:

$$A(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + [H[x(t)]]^2} \quad (2.97)$$

$$\phi(t) = \text{artg} \left[ \frac{H[x(t)]}{x(t)} \right] \quad (2.98)$$

A frequência instantânea pode ser obtida derivando-se a equação (2.98):

$$\omega(t) = \frac{\frac{dH[x(t)]}{dt} x(t) - H[x(t)] \frac{dx(t)}{dt}}{x^2(t) + H^2[x(t)]} \quad (2.99)$$

A banda passante de um sinal pode ser entendida como o maior intervalo em frequência no qual a amplitude desse sinal é diferente de zero. Fora desse intervalo, a amplitude será nula. Para um modelo proposto de modulação do sinal  $x(t)$  em amplitude e fase, a validação desse modelo será concretizada se for atendido o Teorema de *Bedrosian*. Por esse teorema, a amplitude e a fase instantâneas, inicialmente desconhecidas, seguirão esse modelo proposto se a maior frequência da banda passante “  $f$  “ for menor que a frequência instantânea “  $\omega(t)$  ” para qualquer valor de “  $t$  ” (Santos, 2006).

Uma vez atendido o teorema de *Bedrosian*, teremos um sinal  $x(t)$  descrito segundo (2.93), sendo a amplitude e fase instantânea dadas pelo modelo proposto (senoidal, por exemplo). O desacoplamento entre a amplitude e frequência instantâneas propiciado pela transformada de *Hilbert* permite que a frequência instantânea  $\omega(t)$  ou a amplitude instantânea estejam relacionadas com um fenômeno físico (Santos, 2006, Seleghim, 2004).

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais escolhidos, suas geometrias, propriedades e os métodos e procedimentos utilizados para a determinação dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas. Dois tipos de materiais para dutos foram utilizados na avaliação experimental. O duto utilizado foi construído com o aço API 5L X65 enquanto para a determinação dos tempos de percursos em relação a influência da temperatura, o material utilizado foi o API 5L X70. Esses aços foram escolhidos por serem atualmente de grande uso na indústria petrolífera para a construção de oleodutos e gasodutos espalhados pela extensa rede dutoviária brasileira.

#### 3.1 Planejamento dos experimentos

Visando atingir os objetivos desse trabalho, foi necessário desenvolver um planejamento dos experimentos adequado. O objetivo de desenvolver um sistema e método ultra-sônico que pudessem ser usados na medição de tensões em dutos só poderia ser confirmado através de um conjunto de experimentos comprobatórios. Para a realização destes experimentos, uma gama de atividades seqüenciais deveria ser desenvolvida. Assim, após a análise aprofundada das alternativas, as seguintes etapas foram adotadas:

- a) **Calibração dos transdutores.** A primeira etapa do trabalho consistiu na verificação dos transdutores. O objetivo foi verificar se, sob as mesmas condições, os transdutores que seriam utilizados apresentariam resultados semelhantes. Foram utilizados para confirmação da medida de distância em um bloco padrão adquirido para essa finalidade.

Os resultados, não apresentados ao longo deste texto, mostraram que não havia desvios entre os diversos transdutores.

- b) ***Medição do efeito da força entre o conjunto ultra-sônico e a amostra.*** As pesquisas feitas desde o mestrado do autor dessa tese (Andrino, 2003) mostraram que a força aplicada sobre o conjunto ultra-sônico durante as medições poderia influenciar nos resultados. Como a proposta foi desenvolver um novo sistema, foi necessário caracterizá-lo, conhecendo como essa força influenciaria no resultado obtido e como evitar sua influência.
- c) ***Verificação da repetibilidade.*** Qualquer novo sistema e método de medição devem levar sempre aos mesmos resultados, mantidas as condições que podem ser controladas durante o processo de medição. O novo sistema, com o novo método proposto e estudado no capítulo 4, deveria ser capaz de responder da mesma forma quando utilizado nas mesmas condições. Assim, foi feita a checagem da repetibilidade do conjunto antes que as medições de tensão fossem feitas.
- d) ***Cálculo das espessuras do duto.*** Como o duto foi fornecido à Unicamp já montado, uma das dúvidas que deveria ser sanada era se a medida nominal informada representaria realmente a espessura do duto. Normalmente a espessura nominal corresponde à chapa original e não ao duto após a construção. Assim, foi necessário medir as espessuras em cada ponto de interesse e esta foi utilizada para o cálculo das tensões aplicadas.
- e) ***Determinação do módulo de elasticidade em cada posição de medida.*** Uma das principais fontes de variação identificadas em trabalhos anteriores do grupo de pesquisa estava relacionada à variação das propriedades elásticas dos materiais analisados, que é influenciada pela textura. As teorias de avaliação de tensões por ultra-som utilizam o módulo de elasticidade e uma composição de outras propriedades elásticas, chamada de coeficiente acustoelástico. A avaliação deste último parâmetro está além dos objetivos deste trabalho. No entanto, como forma de reduzir as incertezas no processo, foi medido o módulo de elasticidade para cada posição de medida, para que o valor local deste fosse utilizado ao calcular a tensão em cada ponto.
- f) ***Determinação das tensões aplicadas por extensômetros.*** Para a comparação com o valor da tensão obtido com o método ultra-sônico, foi necessário calcular a tensão

aplicada. Duas formas foram utilizadas: através da pressão aplicada e com o uso de extensômetros previamente colados ao corpo de prova (duto). Essa etapa foi necessária, pois estudos preliminares indicaram que a determinação pela pressão seria dificultada pela resolução da bomba hidráulica empregada.

g) ***Avaliação da influência da temperatura.*** A principal fonte de variação nos resultados obtidos pelo método  $L_{cr}$  em todas as pesquisas anteriores do grupo de pesquisa da Unicamp foi a temperatura. Todos os estudos anteriores foram feitos em sistemas utilizados para a medição em chapas. Como um novo sistema seria apresentado como resultado desta tese, seria necessário caracterizá-lo quanto à susceptibilidade à variação da temperatura. Esse estudo foi feito em três etapas, visando identificar qual seria a fonte principal de influência.

g.1) ***Aparelhagem e corpo de prova aquecendo juntos.*** Nessa etapa, tanto o sistema de medição quanto o corpo de prova (duto) estariam na mesma temperatura quando da medida da tensão.

g.2) ***Apenas o corpo de prova aquecendo.*** Nesse experimento, uma chapa seria aquecida gradativamente e o conjunto ultra-sônico seria mantido na mesma temperatura inicial antes de ser colocado em contato. O objetivo era verificar se o aquecimento diferencial levaria aos mesmos resultados.

g.3) ***Avaliação do componente crítico.*** Em vista da suspeita de que apenas o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  estivesse sendo influenciado pela temperatura, já que não havia o novo sistema mecânico nem o duto nas pesquisas anteriores, um terceiro experimento foi realizado. Permitiu a verificação do efeito da temperatura em separado para o acrílico das sapatas e para o material do duto (chapa), visando identificar qual seria o componente mais influenciado pela temperatura.

h) ***Medição das tensões longitudinais no duto com ondas  $L_{cr}$ .*** Com os parâmetros principais conhecidos, o novo sistema foi utilizado para a medição das tensões em dutos. Primeiramente, foi feita a medição na direção de maior interesse, já que os dutos são retirados de serviço quando a flexão na direção longitudinal causa tensões que se aproximam do valor do limite de escoamento.

- i) ***Medição das tensões transversais no duto com ondas  $L_{cr}$*** . Para confirmação da efetividade do método, mesmo sem o novo sistema mecânico, foi medida também a tensão na direção transversal (ou circunferencial) do duto.
- j) ***Avaliação das tensões por ondas cisalhantes (birrefringência)***. O principal método ultra-sônico para a medição de tensões atualmente utilizado se baseia no princípio da birrefringência acústica. No entanto, pesquisadores de outros institutos têm tido dificuldades em empregá-lo na medição em dutos. Como forma de verificar seu desempenho nessa tarefa e compará-lo com o descrito no item h), foi feita também a medição de tensões com este método.
- k) ***Avaliação das tensões por ondas  $L_{cr}$  com transdutores de outras frequências***. Como a frequência dos transdutores também é um fator de variação importante para o sistema, embora o transdutor de 2,25 MHz seja o mais indicado para aços em geral, foi verificado o desempenho do novo sistema desenvolvido com outras frequências de transdutores, para comparação.
- l) ***Medição de tensões com ondas  $L_{cr}$  usando receptores duplos***. O principal método de tratamento de sinais empregado necessita de duas ondas similares para sua aplicação. O uso de dois receptores foi sugerido como forma de permitir que as duas ondas sejam determinadas numa mesma medição, já que nos experimentos iniciais uma das ondas era gerada no estado livre de tensões externas.
- m) ***Comparação dos sistemas para laboratório e campo***. Como último experimento, foi montado um sistema portátil para a medição de tensões, com uma taxa de aquisição cinco vezes inferior à do sistema de laboratório. Os mesmos métodos foram empregados como forma de testar se seria possível utilizar o sistema portátil em campo. Os resultados foram comparados com os obtidos com o sistema de laboratório.

A descrição detalhada de cada item listado está apresentada ao final deste capítulo. Inicialmente, para permitir o entendimento do detalhamento, são apresentados o corpo de prova, outros materiais ensaiados e os equipamentos. Também são apresentados os programas desenvolvidos, que serão empregados nas medições, com suas funções.

### 3.1.1 Duto de Aço API 5L X65.

Este material foi escolhido para a construção do duto utilizado para as medições tanto com geração de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ), como também com as geradas através de ondas transversais, método pulso-eco. Os testes experimentais realizados no duto foram: levantamento das tensões atuantes através da pressurização do sistema, determinação da influência da temperatura em relação ao tempo de percurso da onda ultra-sônica, verificação da rigidez do sistema de posicionamento do conjunto de transdutores ultra-sônicos, determinação do módulo de elasticidade do material do duto em várias posições e, nestas mesmas posições, verificação das espessuras através do método pulso-eco. Este duto foi cedido pela equipe técnica do CENPES da Petrobrás e fornecido à Unicamp para a realização dos experimentos dessa tese. O duto já veio construído e pronto para o início das medições. Um primeiro procedimento necessário a ser realizado foi a remoção de uma camada protetora. Isso foi necessário devido à necessidade dos transdutores ultra-sônicos ficarem em contato direto com o aço, exigência necessária para que as ondas ultra-sônicas penetrem no material. A figura 3.1 mostra o duto e no detalhe a região com e sem a camada protetora.



Figura 3.1: Duto construído com aço API 5L X65. Detalhe: Com e sem camada protetora.

Após a remoção da camada, foi observado que o duto foi construído através da junção de duas chapas que foram unidas através de solda sem costura. A figura 3.2 mostra o duto com os detalhes construtivos. Em suas extremidades dois flanges (detalhe A) foram soldados de modo

que o duto fique fechado para pressurização. O diâmetro do flange utilizado é de 626,4 mm e sua espessura é de 50 mm. Em um dos flanges dois orifícios com diâmetros de ½ “ foram feitos. Em um desses orifícios foi colocado um manômetro (detalhe B) para a leitura da pressão interna do duto, e no outro orifício foi colocada a válvula tipo esfera com engate rápido (detalhe C) para abrir ou fechar a entrada do fluido para a pressurização do sistema.

O duto está apoiado e soldado em perfis I (detalhe D). Uma das extremidades está apoiada em um calço que deixa esse ponto como um apoio fixo (detalhe E). E em sua outra extremidade foi colocado um rolete (detalhe F) de forma que esse ponto possa ter grau de liberdade em sua direção horizontal.

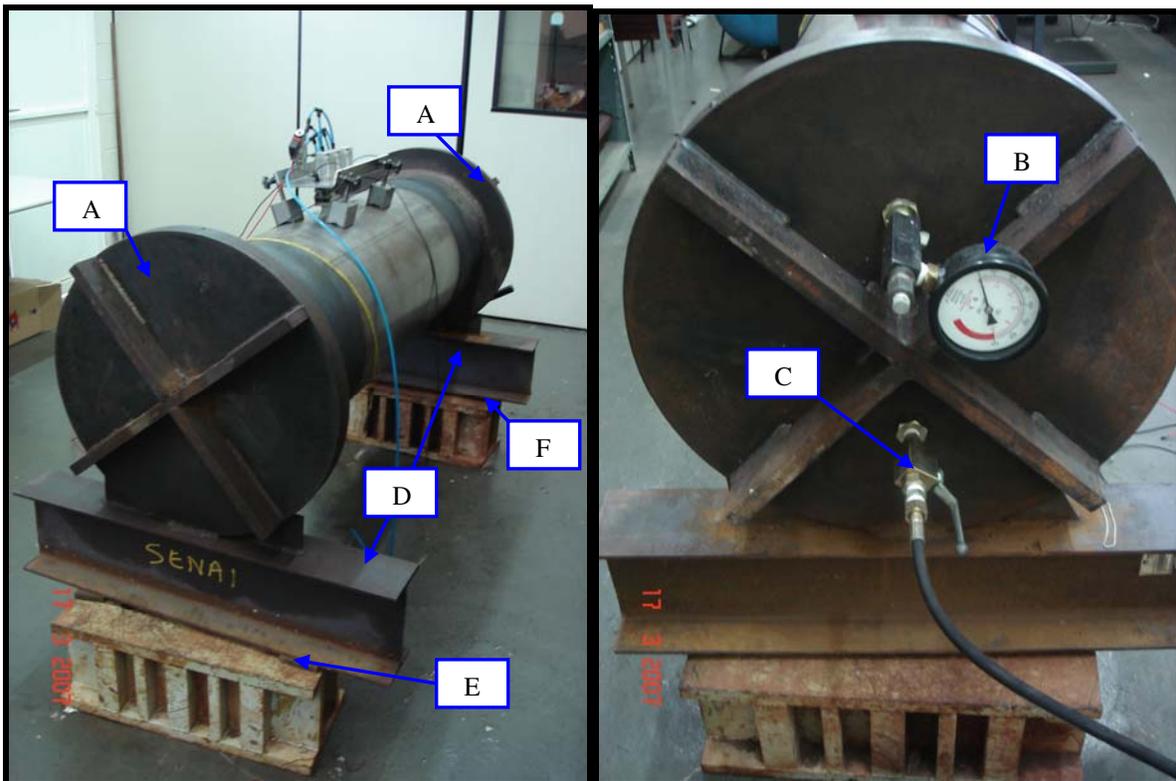


Figura 3.2: Vista geral do duto com detalhes da montagem.

As principais características dos dutos utilizados na indústria de petróleo e gás são as seguintes (Peixoto, 2003): diâmetro nominal: 304,8 a 1066,8 mm (12 a 42 polegadas); espessura de parede: 6,35 a 12,70 mm (0,25 a 0,5 polegadas); composição do material: aços API 5L graus B, X42, X46, X52, X56, X60 e X65; faixa de pressão de operação: até 147 bar (150 kgf/cm<sup>2</sup>).

Para o caso desse trabalho o duto tem as seguintes dimensões: comprimento do duto igual a 1500 mm; diâmetro nominal igual a 458,36 mm; espessura da parede igual a ¼" (6,35 mm), essa é a espessura original antes a construção do duto. O material, como já dito, foi o aço API 5L X65. A faixa de pressão que será utilizada nos testes será até 30 bar. Como pode ser visto todas as características do duto utilizados no trabalho estão dentro das faixas das especificações dos dutos utilizados na indústria de petróleo e gás. A figura 3.3 mostra um desenho esquemático do duto com suas dimensões.

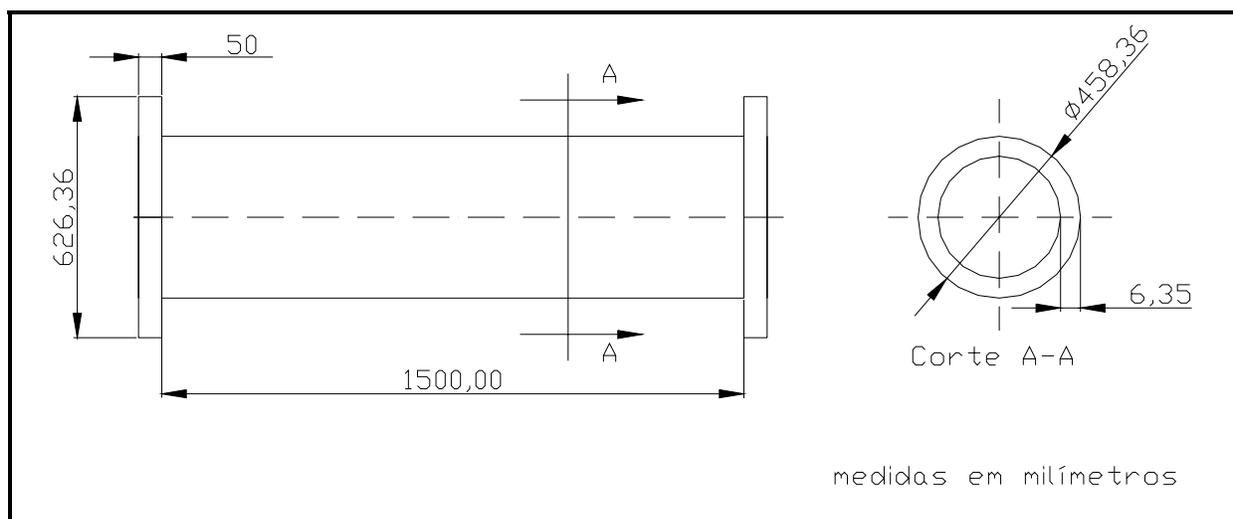


Figura 3.3: Dimensões do duto feito de aço API 5L X65.

### 3.1.2 Chapas de Aço API 5L X70.

Este material foi utilizado para a verificação da influência da temperatura sobre o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas utilizadas nesse trabalho. Esse fator é de extrema importância para medições de tensões mecânicas em dutos, principalmente para medições em campo.

As dimensões das chapas para os testes tem comprimento de 760 mm por 70 mm de largura. As chapas tinham espessuras variadas pois foram retificadas para se tornarem planas. Para a aplicação da carga as chapas possuem um furo de 38 mm onde são inseridos os pinos para tração. O equipamento foi aplicado no levantamento das constantes acustoelásticas, e também na verificação da influência da temperatura (Santos, 2007). Os procedimentos e métodos para este levantamento são discutidos em trabalhos anteriores com detalhes (Andrino, 2003, Santos, 2007).

As figuras 3.4 e 3.5 mostram a chapa e seus detalhes. Informações adicionais sobre o material podem ser encontradas em outros trabalhos do grupo de pesquisa (Santos, 2007, Fraga, 2007). Como estes testes fizeram parte do estudo inicial das influências de interesse para essa tese de doutorado, eles foram aqui também revistos.

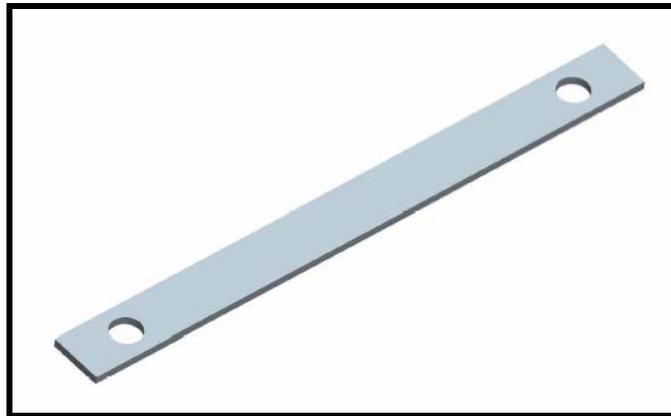


Figura 3.4: Chapa de aço utilizada nos experimentos – API 5L X70 (Fraga, 2007).

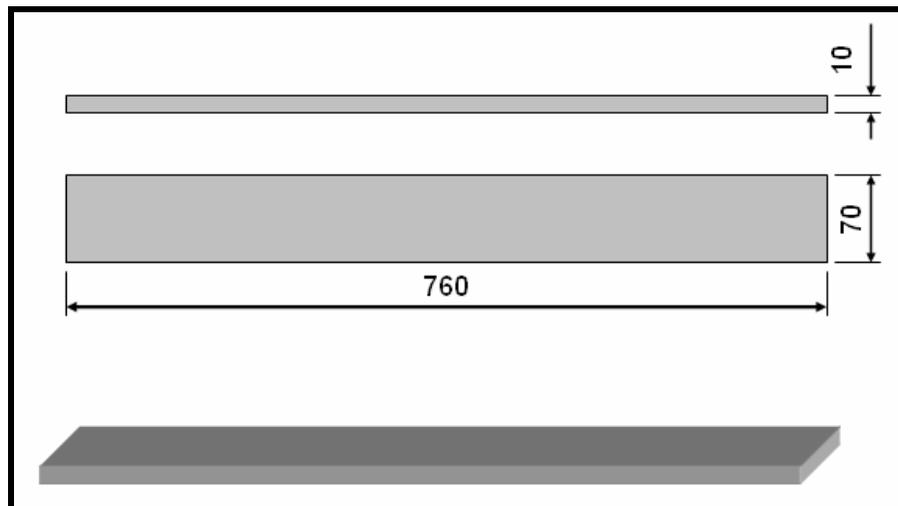


Figura 3.5: Medidas das chapas de aço utilizadas nos experimentos (Fraga, 2007).

### 3.1.3 Bloco padrão

O bloco padrão foi utilizado para calibração dos tempos de percurso dos transdutores ultrassônicos utilizados nesse trabalho. O bloco é da marca *Panametrics*, modelo TB1054-1, feito de aço 1018, mostrado na figura 3.6.

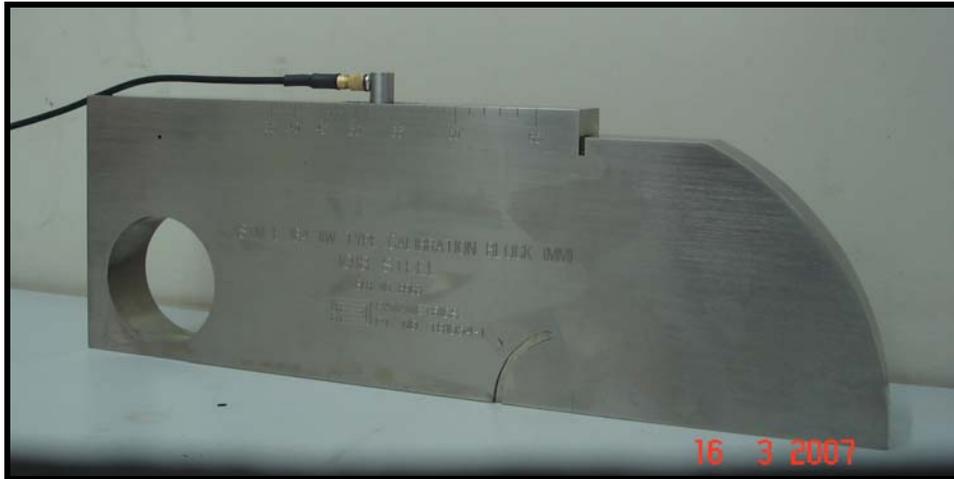


Figura 3.6: Bloco padrão Panametric ASTM E 164.

Existem dois tipos de blocos padrão utilizados para a calibração, chamados de bloco padrão V1 e Bloco padrão V2. No caso desse trabalho foi utilizado o bloco padrão V1. Tais blocos são construídos segundo normas DIN 54120, DIN 54122 ou BS 2704, de materiais que permitem o exame ultra-sônico em aço carbono não ligado ou de baixa liga, com velocidade sônica de 5920 +/- 30 m/s para ondas longitudinais e 3255 +/- 15 m/s para ondas transversais. Os blocos de calibração devem ser apropriadamente calibrados quanto às suas dimensões, furos, entalhes e quanto à velocidade sônica do material que constitui o bloco (Andreucci, 2002). A figura 3.7 mostra o bloco padrão V1 com algumas de suas dimensões.

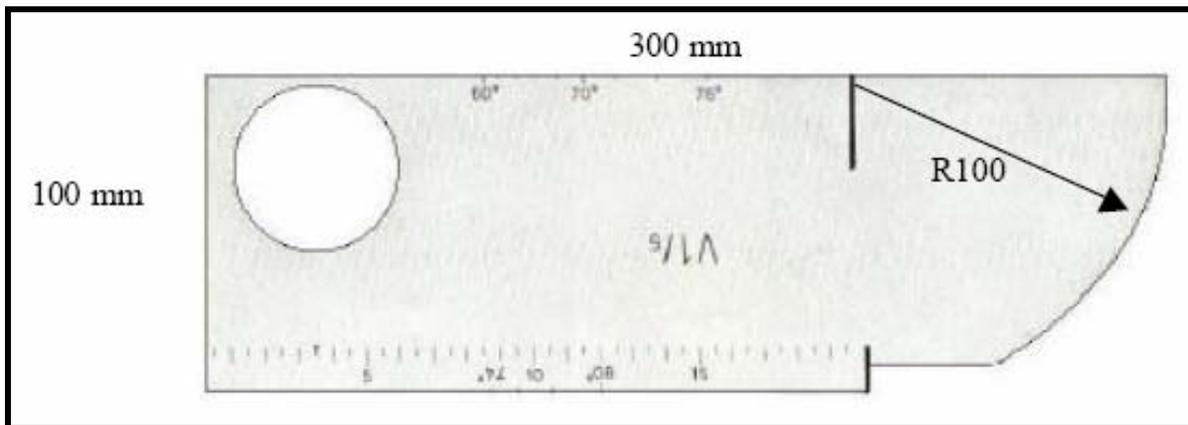


Figura 3.7: Dimensões padronizadas do bloco padrão V1 (Andreucci, 2002).

Algumas das funções do bloco V1 são a verificação das escalas do aparelho usando as dimensões padronizadas, a verificação da saída do feixe sônico e a verificação do ângulo de refração para transdutores angulares. Estes tipos de calibração são mais utilizados quando a aplicação é a verificação de defeitos decorrentes de processos de soldagem ou na própria solda (Andreucci, 2002). No caso desse trabalho os transdutores foram de incidência normal colocados em sapatas de acrílico para que o feixe sônico penetre no material em uma certa angulação. Esse ângulo já foi pré-determinado na construção das sapatas de acrílico. Assim sendo, para o caso desse trabalho a função do bloco padrão foi verificar o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas e sua respectiva velocidade.

### 3.1.4 Sapatas de acrílicos

Este material foi utilizado como sapata de acomodação dos transdutores ultra-sônicos para a geração das ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ). Para a utilização das sapatas no duto, duas dimensões diferentes foram feitas para acomodação de transdutores de diferentes tamanhos. Conforme o diâmetro do duto, citado anteriormente, tomou-se o cuidado de confeccionar as sapatas de acrílico de modo que estas assentem no contorno do duto. Para a verificação da influência da temperatura no tempo de percurso através do acrílico foram utilizadas as mesmas sapatas de acomodações dos transdutores com as devidas modificações. A figura 3.8(a) mostra a sapata de acrílico com o transdutor montado e a figura 3.8 (b) a sapata de acrílico com o transdutor colocado na posição para a medida do tempo de percurso para verificação da influência da temperatura. O transdutor colocado na posição da figura 3.8(a) serviu também para a verificação dessa mesma influência. As propriedades do acrílico estão listadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades do acrílico comercial (RD tech, 2005).

Densidade	Velocidade Longitudinal	Impedância Acústica	Coefficiente de expansão térmica	Coefficiente de dilatação linear
kg/m <sup>3</sup>	m/s	10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> .s	cm/°C	cm/cm°C
1270	2730	3,51	0,000056	7X10 <sup>-5</sup>

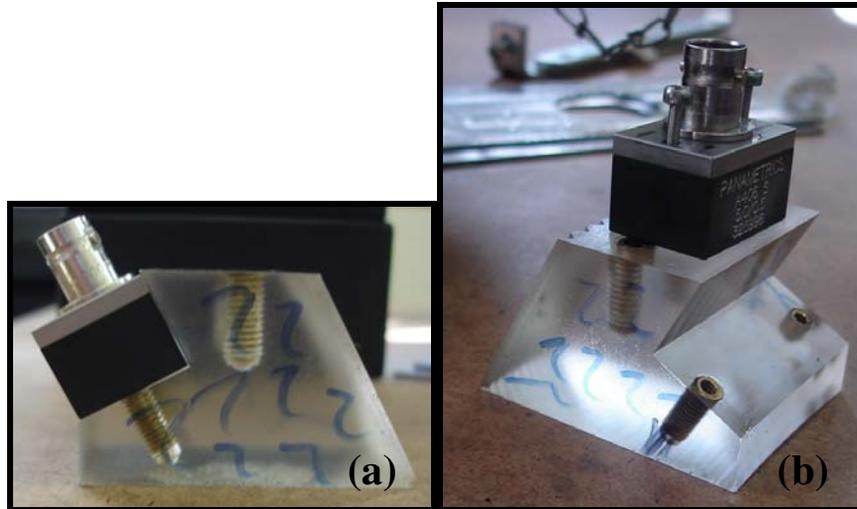


Figura 3.8: Peças de acrílicos utilizadas. a) sapata para acomodação dos transdutores usada na verificação da influência da temperatura. b) sapata de acrílico com o transdutor na posição para a verificação da influência da temperatura.

### 3.2 Equipamentos e programas utilizados.

O trabalho permitiu desenvolver a integração de vários instrumentos e equipamentos de controle de medida por *software*, a fim de automatizar parte do processo, mecânico e repetitivo, dando uma confiabilidade maior para os dados adquiridos, tornando as medidas mais precisas. Os equipamentos utilizados podem ser classificados em hardware, *software* e os mecanismos que puderam ser controlados através de programações. A variação da velocidade de ondas ultra-sônicas requer resolução em termos de tempo da ordem de nanosegundos. Isto causa certa dificuldade na determinação dos tempos de percurso. Nos itens seguintes serão descritos os equipamentos utilizados, concluindo o sub-item com a descrição dos dois tipos de sistemas utilizados no trabalho: o primeiro que utiliza aparelhagem para medições em laboratório e o segundo para medições em campo.

#### 3.2.1 Transdutores ultra-sônicos.

O transdutor é um dos componentes mais críticos de todo o sistema ultra-sônico. Grande atenção deve ser dada na seleção do transdutor apropriado para cada aplicação. Variações nas

características do instrumento, nos ajustes e nas propriedades dos materiais ensaiados e nas condições do acoplamento têm um papel importante no desempenho do sistema e na escolha dos transdutores. *Panametrics* foi a marca escolhida para os transdutores ultra-sônicos utilizados nesse trabalho. Três tipos de séries diferentes de transdutores dessa marca estão a disposição para responder à necessidade de cada tipo de uso, ou seja cada série tem suas próprias características. A configuração do transdutor tem também um impacto no desempenho do sistema. As considerações que devem ser feitas para seleção dos transdutores ultra-sônicos, são a escolha da frequência apropriada e do diâmetro do elemento piezelétrico.

Três frequências diferentes foram utilizadas, 2,25 MHz, 3,5 MHz e 5 MHz. Para o caso do transdutor de 3,5 MHz foi utilizado apenas uma dimensão do elemento piezelétrico e para os transdutores de 2,25 MHz e 5 MHz duas dimensões do elemento piezelétrico. A figura 3.9 mostra os transdutores selecionados, um dos transdutores de 5 MHz não está na figura mas sua construção é idêntica a dos outros. A tabela 3.2 mostra detalhes de cada transdutor com relação ao modelo e dimensão do elemento piezelétrico.

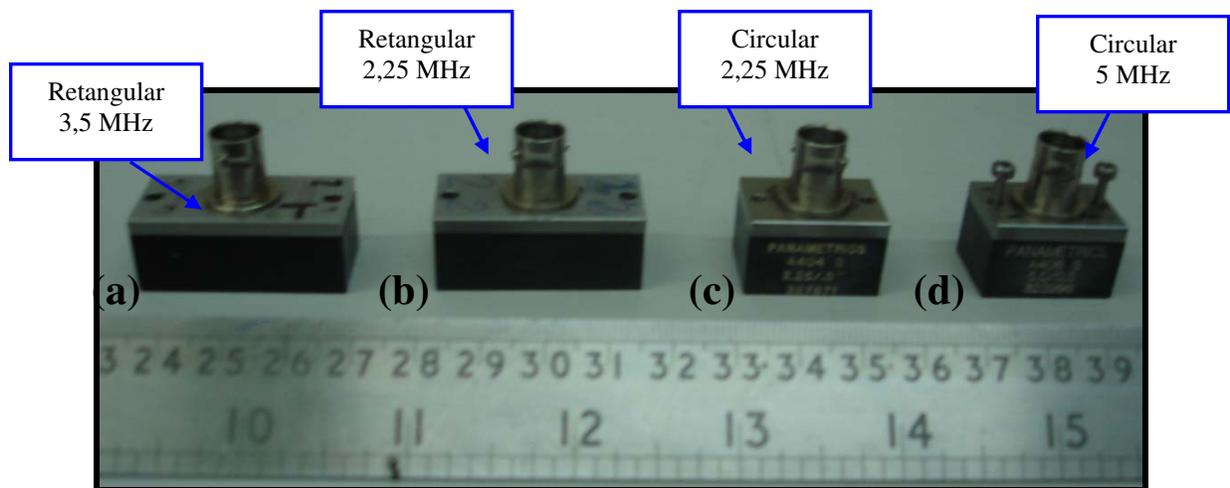


Figura 3.9: Transdutores ultra-sônicos. a) 3,5 MHz - 0,5'' x 1'' b) 2,25 MHz - 0,5'' x 1''  
c) 2,25 MHz -  $\varnothing$  0,5'' d) 5 MHz -  $\varnothing$  0,5''

Tabela 3.2: Modelo, frequência e dimensão do elemento piezelétrico de transdutores ultra-sônicos.

<i>Modelo</i>	<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Tamanho nominal do elemento Polegadas - milímetros</b>
<b>A403S</b>	2,25	0,5 x 1 - 13 x 25
<b>A405S</b>	5,00	0,5 x 1 - 13 x 25
<b>A412S</b>	3,50	0,5 x 1 - 13 x 25
<b>A406S</b>	5,00	0,5 - 13
<b>A404S</b>	2,25	0,5 - 13

Um segundo tipo de transdutor foi utilizado para o levantamento do módulo de elasticidade do material em estudo. O transdutor gera ondas transversais de incidência normal, introduzidas diretamente na peça em teste sem o uso de refração. A marca do transdutor também é *Panametrics*, modelo V156-RM, 5 MHz e diâmetro do elemento piezelétrico igual a 0,25'' (6mm). A figura 3.10 mostra o transdutor.



Figura 3.10: Transdutor ultra-sônico para geração de ondas transversais – 5 MHz –  $\varnothing$  0,25''

Para facilidade de entendimento durante o transcorrer desse trabalho, sempre que os transdutores forem citados eles virão inicialmente com a sua frequência seguida entre parênteses pela dimensão do elemento piezelétrico. Por exemplo: 2,25 MHz (0,5'' x 1'') para o transdutor modelo A403S; 5 MHz ( $\varnothing$  0,5'') para o transdutor modelo A406S. E assim para todos os outros transdutores utilizados nesse trabalho.

### 3.2.2 Conjunto para geração de ondas longitudinais criticamente refratadas ( $L_{cr}$ ).

Neste tópico será mostrado o conjunto montado que utiliza os transdutores descritos no item 3.2.1 para a geração das ondas longitudinais criticamente refratadas. Este conjunto neste trabalho será chamado de “*conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$* ”. Dois tipos de conjuntos serão apresentados. O primeiro usa uma sapata de acrílico para alojar o transdutor que gera as ondas e uma outra sapata de acrílico onde está o transdutor receptor. No segundo caso, duas sapatas serão utilizadas para recepção da onda ultra-sônica, cada uma com seu respectivo transdutor.

#### 3.2.2.1 Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ (1 transmissor – 1 receptor)

Para a geração e recepção das ondas longitudinais foram utilizados dois transdutores montados em um suporte com duas sapatas de acrílico, que permitem que as ondas atinjam e sejam captadas da superfície do material em um ângulo de cerca de  $28^\circ$  (Andrino, 2003, Caetano, 2003). A ligação entre as sapatas é feita por uma chapa de aço, que serve para aplicar a pressão necessária para obter o contato com a superfície de interesse e manter fixa a distância entre sapatas. Esta disposição dos transdutores é necessária para excitar as ondas criticamente refratadas ou ondas  $L_{cr}$ . O arranjo do conjunto pode ser visto na figura 3.11. Para cada tipo de aplicação do trabalho um tipo de transdutor ultra-sônico (tabela 3.2) será colocado no conjunto.

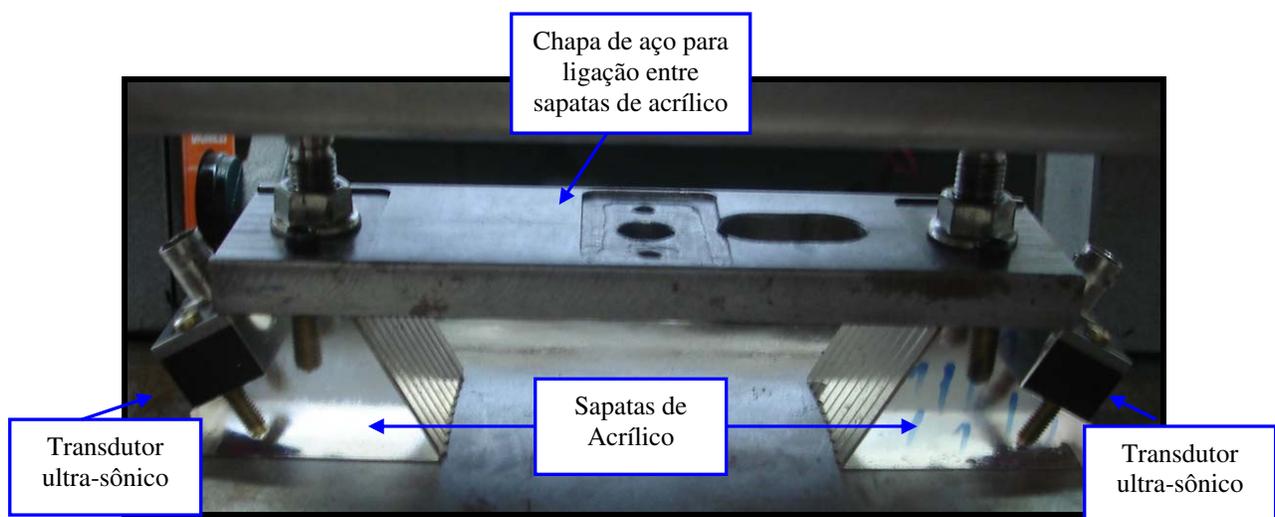


Figura 3.11: Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  – 1 emissor 1 receptor.

### 3.2.2.2 Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ (1 transmissor – 2 receptores)

A geração das ondas longitudinais criticamente refratadas é feita da mesma maneira que o caso anterior. A diferença aqui é que ao invés de um transdutor para a recepção das ondas ultra-sônicas, agora dois transdutores servirão de receptores. Do mesmo modo, uma chapa de aço será usada para a ligação das sapatas. O conjunto será um pouco maior, como pode ser visto na figura 3.12. Acima de cada transdutor foi feito um furo para a colocação da haste do cilindro para aplicação de força controlada sobre o conjunto. A figura 3.12 mostra o conjunto montado com os transdutores.

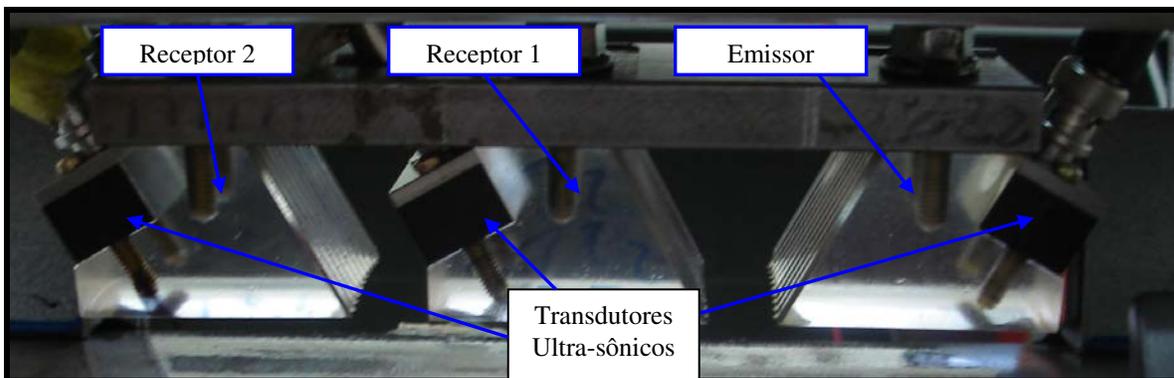


Figura 3.12: Conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  – 1 emissor 2 receptores.

### 3.2.3 Cilindros pneumáticos para aplicação de força controlada.

Um dos fatores que pode influenciar no resultado é a pressão de contato. Para manter a pressão constante do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  sobre as peças que serão analisadas, foi necessário utilizar cilindros pneumáticos. Dois tipos foram utilizados. Para as verificações da influência da temperatura sobre tempo de percurso, o cilindro utilizado foi da Marca *Festo*, Modelo DNC 40-25 PPV-A, com amortecimento regulável nas posições finais. Este cilindro tem uma força de avanço para uma pressão teórica de 6 bar igual a 754 N e força de retorno igual a 633 N (figura 3.13a). Para essas medições o cilindro ficou posicionado no centro da peça de aço que une as duas sapatas que formam o conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  (Figura 3.14a). A fixação da haste do cilindro foi feita por uma porca na parte de baixo da peça de aço que une as duas sapatas do

conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ . Esse cilindro foi utilizado apenas nas medições com um transdutor emissor e um transdutor receptor.

Para o levantamento dos tempos de percurso no duto, o cilindro utilizado foi da marca Micromecânica, modelo CP 10 com força de avanço para uma pressão teórica de 6 bar igual a 482,54N e força de retorno igual a 209,2N (figura 3.13b). Diferentemente do caso anterior, foram utilizados dois cilindros, cada um sobre uma sapata de acrílico (figura 3.14 b). A fixação sobre a peça de aço que une as sapatas de acrílico é feita rosqueando a haste no cilindro em uma rosca feita previamente na peça de aço. Nos testes no duto utilizou-se também o conjunto de transdutores com dois receptores, o que tornou necessário a utilização de mais um cilindro sobre uma terceira sapata de acrílico (figura 3.15).

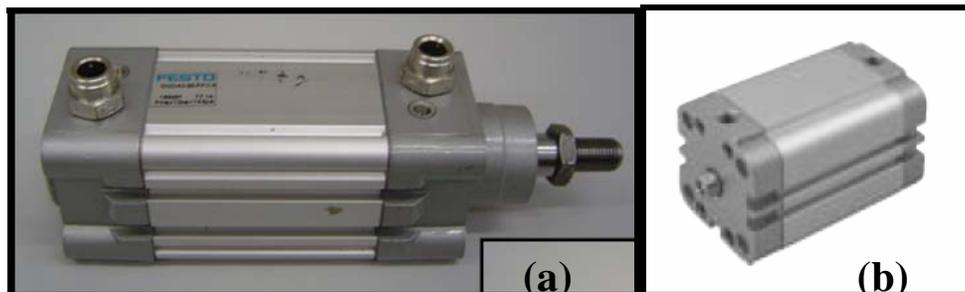


Figura 3.13: a) Cilindro pneumático para colocação no centro do conjunto de transdutores. b) Cilindro pneumático para colocação sobre cada sapata de acrílico.

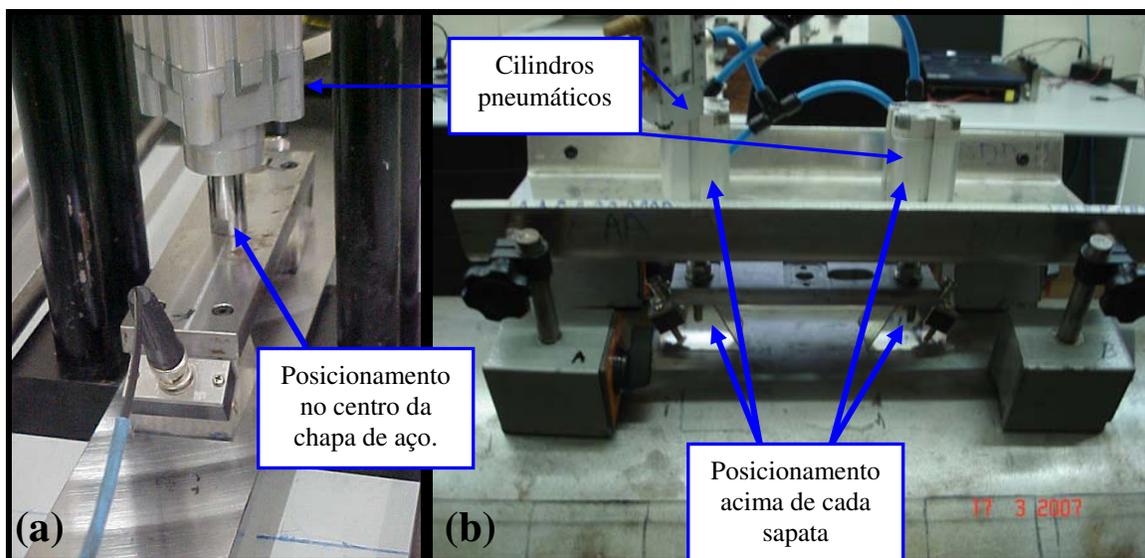


Figura 3.14: a) Detalhe do posicionamento do cilindro hidráulico no centro da chapa de aço. b) Detalhe do posicionamento do cilindro sobre cada sapata de acrílico.

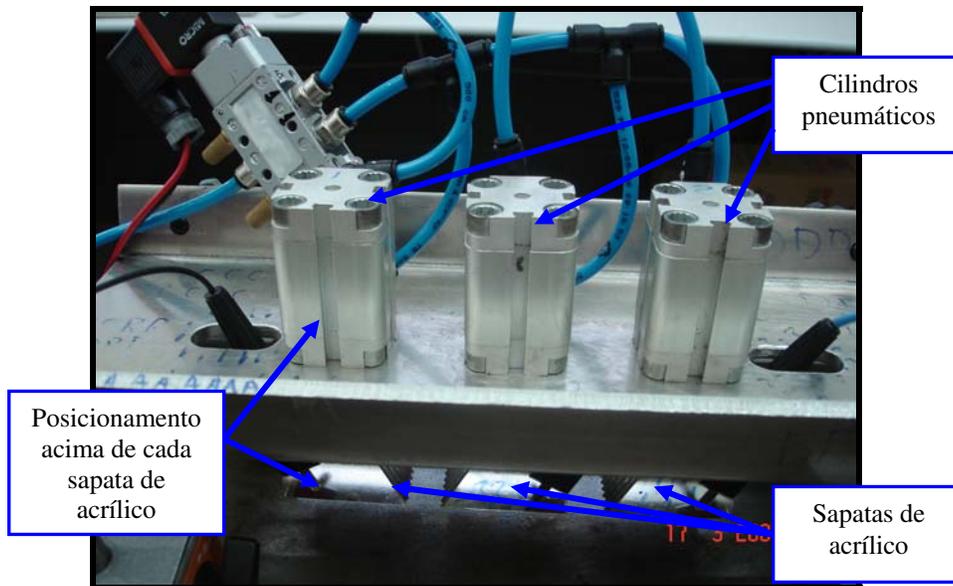


Figura 3.15: Utilização de três cilindros pneumáticos para posicionamento e aplicação de força sobre sapatas de acrílico.

### 3.2.4 Suportes para fixação dos cilindros pneumáticos e conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ .

É necessário, conforme discutido por Caetano, 2003, aplicar a mesma força na mesma posição, para que o efeito da textura não afete a precisão das medições. A aplicação da força na mesma posição está diretamente ligada à construção dos suportes, enquanto a aplicação da mesma força está diretamente ligada ao tipo de cilindro utilizado, discutido anteriormente. Dois tipos de suportes foram empregados no trabalho. O primeiro foi usado para o posicionamento do conjunto de transdutores para as medições das influências do tempo de percurso em relação a temperatura. No decorrer do trabalho chamaremos esse suporte de “posicionador estático”. O segundo foi usado para as medições dos tempos de percurso no duto. Também para uma fácil identificação deste no decorrer do texto, o chamaremos de “posicionador dinâmico”.

#### 3.2.4.1 Posicionador estático.

Este equipamento (figura 3.16) é composto por quatro hastes cilíndricas de ferro (detalhe A), rosqueadas em uma base inferior (detalhe B), e unidas na parte superior por uma outra base e quatro porcas (detalhe C). O cilindro pneumático utilizado nesse caso é o DNC 40-25 PPV-A (detalhe D), localizado no centro do suporte superior. Como já dito, a haste do cilindro

para movimentação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  está colocada no centro da peça de aço que une as duas sapatas de acrílico (detalhe E). Como para as medições do tempo de percurso existe a necessidade que as sapatas de acrílico sejam sempre ajustadas na mesma posição, o posicionador estático foi fixado na bancada de teste por parafusos (detalhe F), de modo que este não se mova na hora dos experimentos. Optou-se por deslocar a peça que está sendo medida por facilidade em relação o peso e à movimentação.

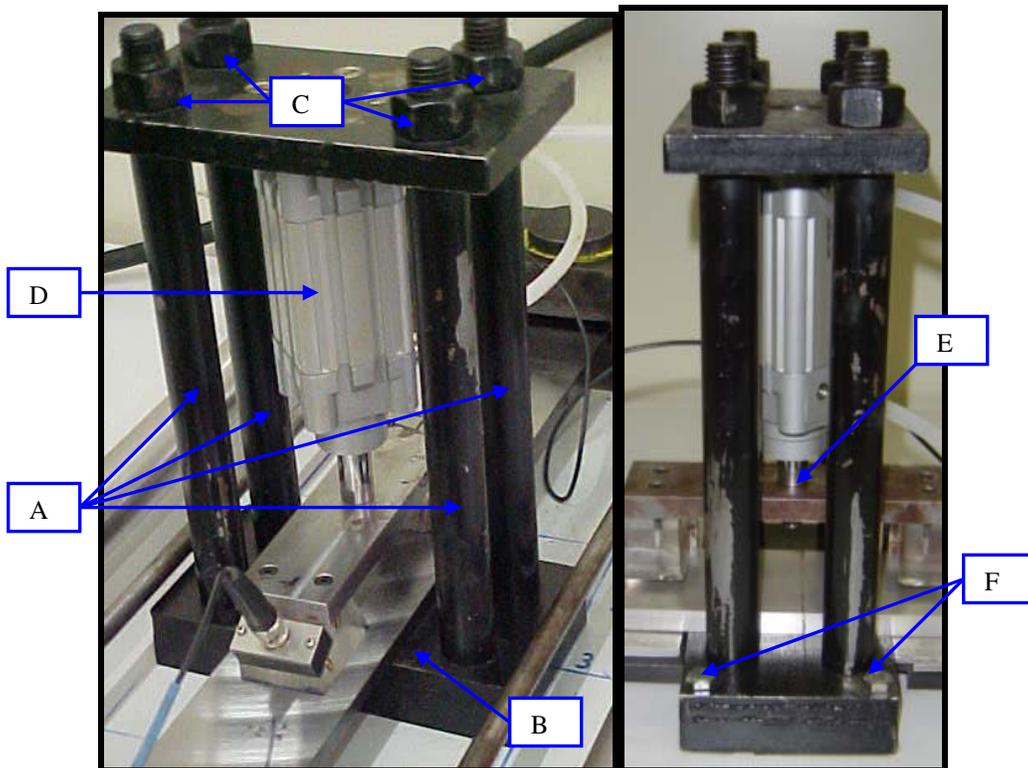


Figura 3.16: Posicionador estático.

### 3.2.4.2 Posicionador dinâmico.

Este equipamento foi construído para permitir o posicionamento do conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  sobre o duto de forma a obter com a máxima precisão possível o mesmo ponto para medição. Este equipamento é composto, além do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ , de quatro bases magnéticas que servem para fixar o posicionador dinâmico sobre o duto. As bases magnéticas são da marca *Digimess* com dimensões da base de 64 x 50 x 54 (mm), com fixação especial para superfícies cilíndricas, a altura da haste é de 280 mm e a força de resistência de cada imã é igual a 60 kgf.

Essas bases magnéticas são fabricadas para serem usadas com relógios comparadores ou apalpadores. Para a construção do posicionador dinâmico algumas modificações e adaptações foram feitas.

A primeira etapa foi construir um suporte, que além de servir para a colocação das bases magnéticas com as modificações, serviu também de base para a colocação dos cilindros pneumáticos para aplicação da força controlado sobre o duto. Em um primeiro projeto foi proposto fazê-lo em aço, mas após algumas análises ficou claro que este material não seria totalmente funcional para o fim proposto do posicionador dinâmico, que é a sua utilização em várias posições do duto. Além de ser pesado, seria necessária uma dobra para a colocação de acessórios que farão as ligações entre o suporte e as hastes das bases magnéticas. Optou-se então por fazê-lo em alumínio. Algumas vantagens ficaram claras ao fato desse material ser bem mais leve para o seu deslocamento nas várias posições do duto, fácil usinabilidade para a execução dos furos e material fácil de ser dobrado.

A chapa original de alumínio, antes de ser dobrada, tinha as dimensões de 225 x 377 x 6,35 (mm). Após o dobramento da chapa, furos foram feitos nas quatro extremidades do suporte. A figura 3.17 mostra o desenho da chapa dobrada com suas respectivas dimensões.

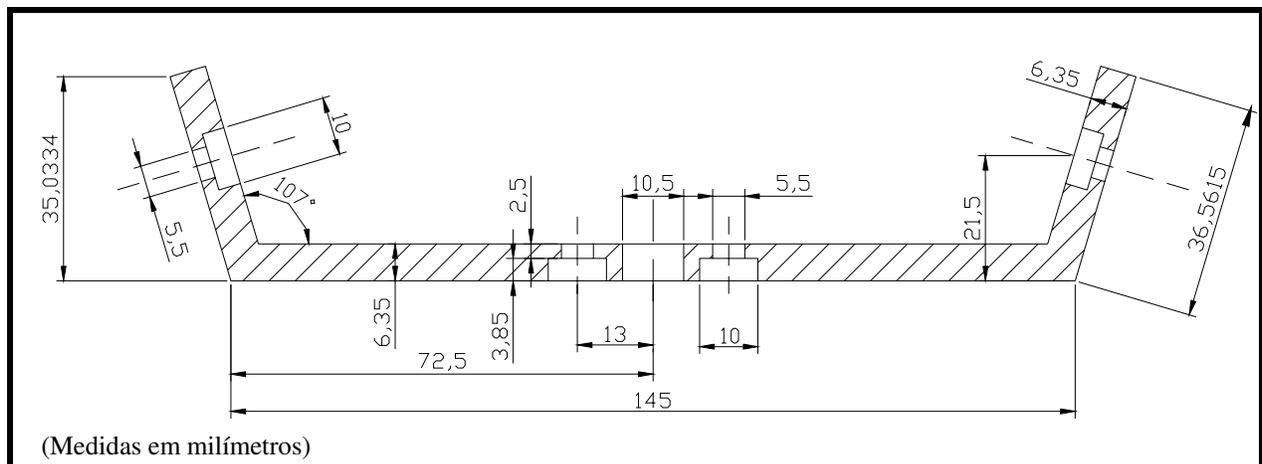


Figura 3.17: Dimensões do suporte de alumínio para construção do posicionador dinâmico.

A primeira modificação que foi feita nas bases magnéticas foi trocar a haste original por uma de menor altura para que o posicionador dinâmico se ajustasse perfeitamente à curvatura do duto. O acessório necessário para a união entre haste da base magnética e suporte de alumínio é um parafuso especialmente construído, de forma que as duas peças fiquem solidárias. A figura 3.18 mostra o desenho do parafuso com as suas dimensões e a figura 3.19 mostra o parafuso montado no posicionador dinâmico. Do lado do suporte esse parafuso especial foi fixado através de uma rosca interna, como mostrado na figura 3.18, por um parafuso *Allen* M6, e ao lado da haste, uma borboleta e uma guia, que pertenciam a base magnética, foram adaptados para fazer a fixação.

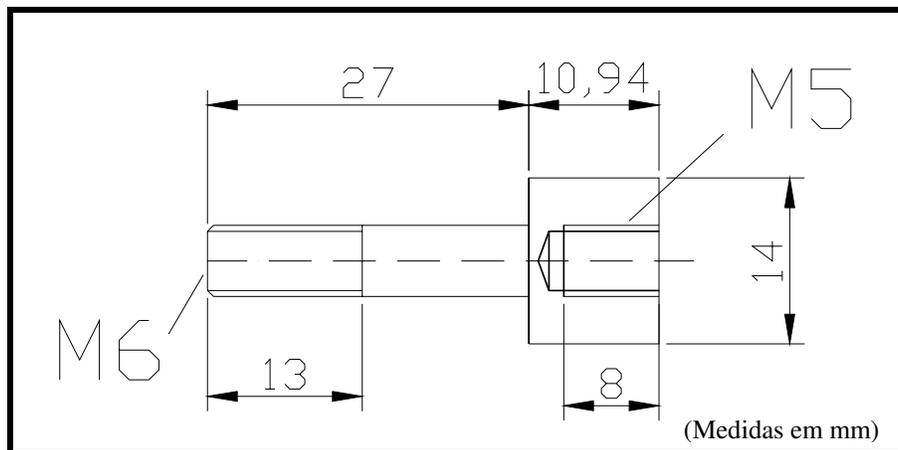


Figura 3.18 : Desenho do parafuso especial de fixação entre haste da base magnética e suporte de acrílico.

Os cilindros pneumáticos foram colocados centralizados sobre cada sapata de acrílico. O mesmo posicionador dinâmico foi empregado para o caso de utilização de um receptor ou dois receptores no conjunto de transdutores, sendo necessária apenas a montagem e desmontagem do cilindro extra para a conversão. A figura 3.19 mostra o posicionador dinâmico montado sobre o duto para a utilização com dois cilindros, e a figura 3.20 mostra o mesmo posicionador dinâmico, só que agora com três cilindros pneumáticos.

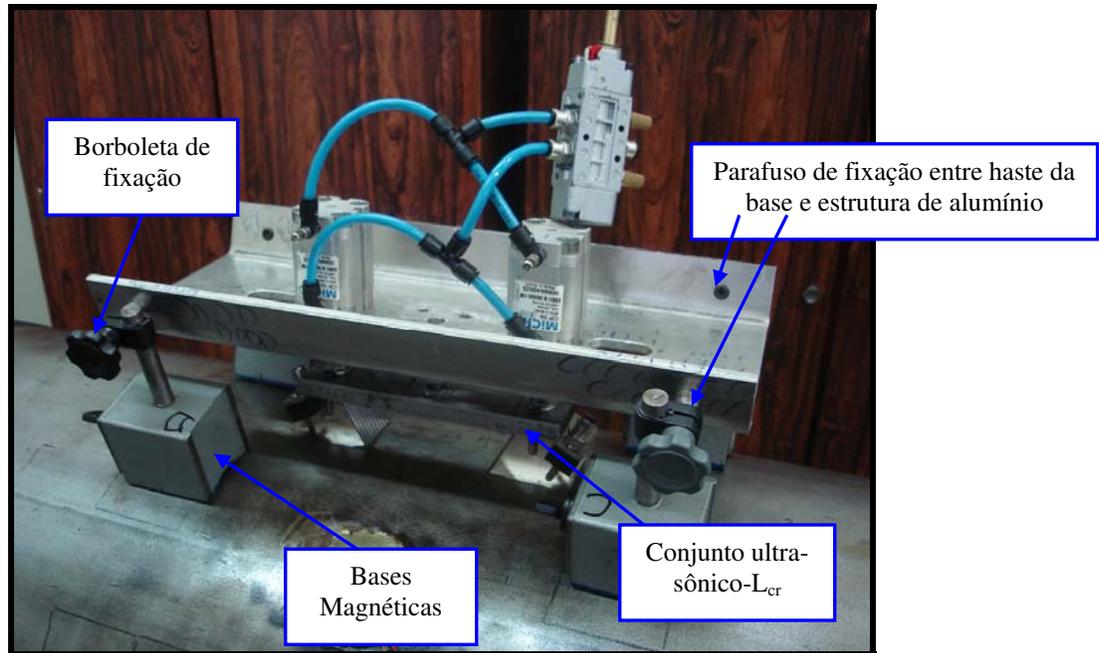


Figura 3.19: posicionador dinâmico montado sobre duto com dois cilindros pneumáticos.

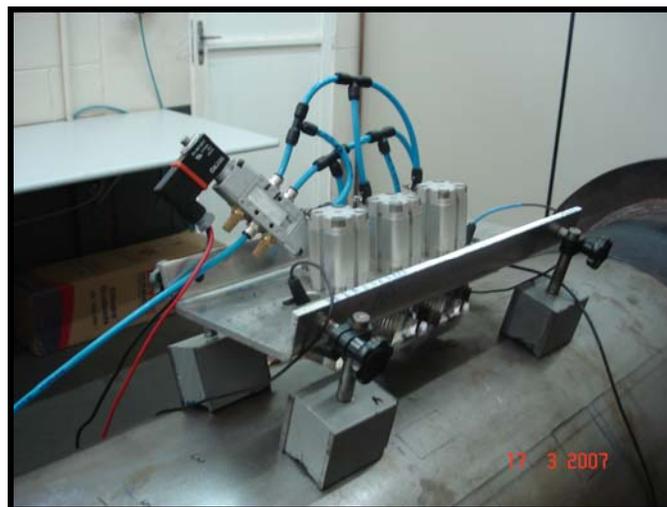


Figura 3.20: posicionador dinâmico montado sobre duto com três cilindros pneumáticos.

### 3.2.5 Bomba para aplicação de pressão controlada para teste hidrostático no duto.

A bomba utilizada para a pressurização do duto para os experimentos foi da marca *Rothenberger*, com capacidade até 60 bar, com uma escala de 1 bar. Ela é provida de duas válvulas chamadas de VA1 e VA2. A válvula VA2 serve para manter a pressão atuante no

sistema após esse ter sido pressurizado, e a válvula VA1 serve como uma válvula de segurança, mais especificamente para o caso de elevadas pressões. A válvula VA1 também tem a função de fazer uma sangria no sistema de modo que não permaneça ar na linha. A figura 3.21 mostra a bomba utilizada e no detalhe as válvulas VA1, VA2 e manômetro incorporado.



Figura 3.21: Bomba para teste hidrostático. Detalhe: Válvulas de segurança e manômetro.

### 3.2.6 Sistema para tração dos corpos de prova.

Este equipamento foi amplamente discutido na dissertação de mestrado do autor e em outras teses e publicações (Andrino, 2003, Caetano, 2003, Santos, 2007). O objetivo principal aqui é mostrar um melhoramento deste, com sua total automatização para o levantamento das constantes acustoelásticas. Com isso, foi utilizado como uma ferramenta para a verificação do melhor método de determinação dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas. Este tópico visa mostrar a sua nova construção com as melhorias propostas.

Os cilindros hidráulicos que foram utilizados para a tração das chapas na versão original do tracionador antes eram de 10 toneladas, nessa nova construção (figura 3.22), foram utilizados cilindros de 20 toneladas. O intuito dessa mudança foi aumentar a tensão teórica atuante no centro da barra e verificar a influência desse aumento nas medições experimentais com ondas  $L_{cr}$ . As bases laterais que antes eram de 80 X 80 (mm) foram agora construídas com dimensões de 100 x 100 (mm). Essa mudança foi feita pois, além das bases anteriores estarem fora de esquadro, optou-se por bases mais rígidas e pesadas para se aproximar ao máximo de máquinas de tração tradicionais. O comprimento das bases continuou com a dimensão original de 430 mm. Os furos

centralizados nas bases que servem para a colocação de pinos para a tração das barras sofreram apenas uma modificação, aumentou-se a sua profundidade devido ao aumento das dimensões da base.

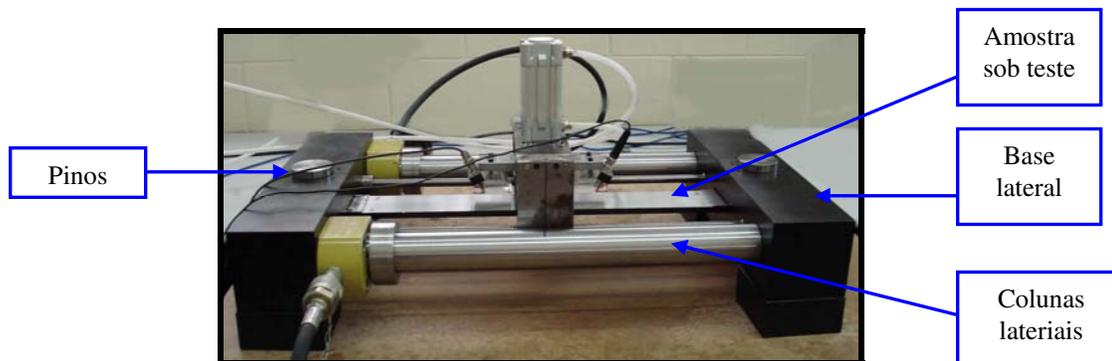


Figura 3.22: Nova construção do tracionador para levantamento das constantes acustoelásticas.

Uma outra mudança da nova concepção do tracionador foi o aumento dos rasgos localizados no centro da base (figura 3.23). Os rasgos que antes mediam 70 x 13 (mm), agora passaram a ter 70 x 17 (mm). A melhora aqui se refere ao perfeito alinhamento da peça que esta sendo tracionada em relação as duas bases. Na construção antiga do tracionador, as peças sofriam torção quando tracionadas e a cada tração elas respondiam de uma forma. Esse problema foi sanado utilizando espaçadores acima e abaixo das chapas nas regiões dos furos (figura 3.24). Esses espaçadores foram feitos de aço Inox e seu perfeito posicionamento para que a chapa fique alinhada em relação as duas bases foi feito através de quatro parafusos (figura 3.25). Destaca-se aqui que, essas pequenas chapas de aço Inox sevem apenas para posicionar a peça em teste, não tendo nenhuma influência na tração destas, uma vez que elas apenas encostam na peça, sem pressioná-la.

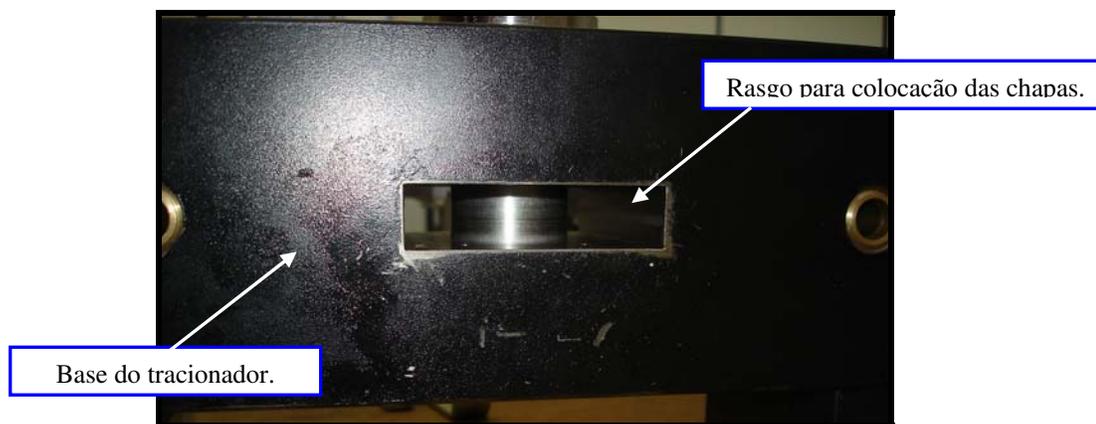


Figura 3.23: Detalhe do rasgo para colocação das chapas para tração.

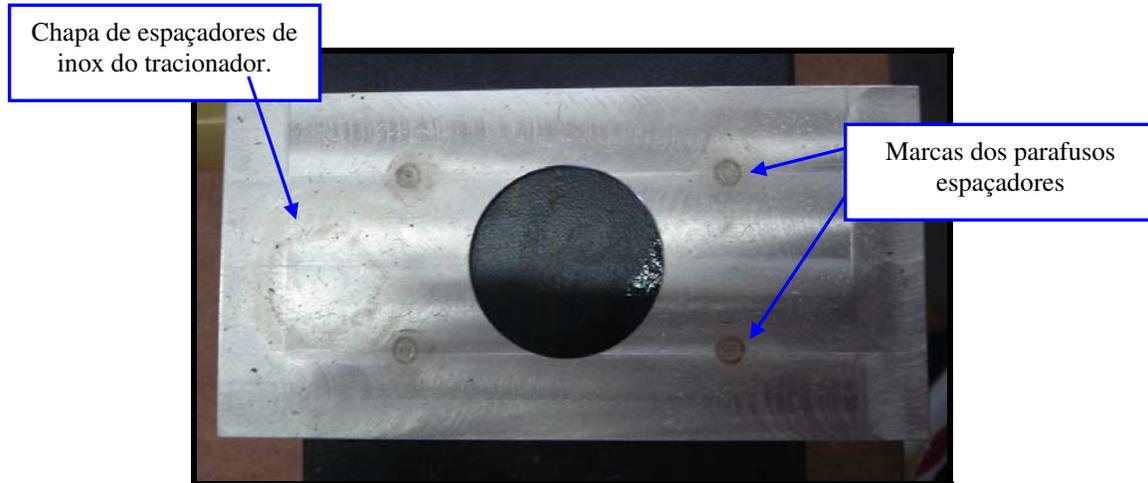


Figura 3.24: Espaçadores de inox para centralização das chapas para tração.

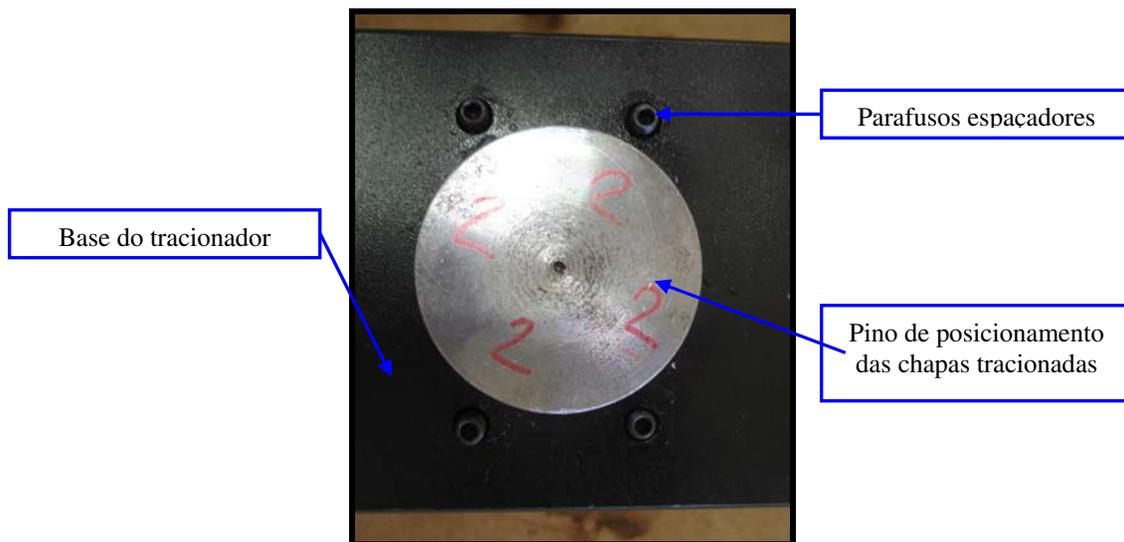


Figura 3.25: Detalhe dos parafusos para posicionamento dos espaçadores de inox.

As duas versões do tracionador tiveram importância significativa no decorrer dessa tese. A primeira concepção foi utilizada para a verificação do funcionamento do equipamento construído para automatização do sistema através de programas e equipamentos pneumáticos. A segunda concepção foi utilizada para a comparação dos métodos de determinação dos tempos de percurso, que serão detalhados no capítulo 4 e cuja teoria já foi vista no capítulo 2.

No emprego do tracionador original foi utilizado o posicionador estático, item 3.2.4.1. E para o novo tracionador um outro tipo de posicionador foi construído. A figura 3.26 mostra a nova versão do tracionador com o posicionador (Santos, 2007).

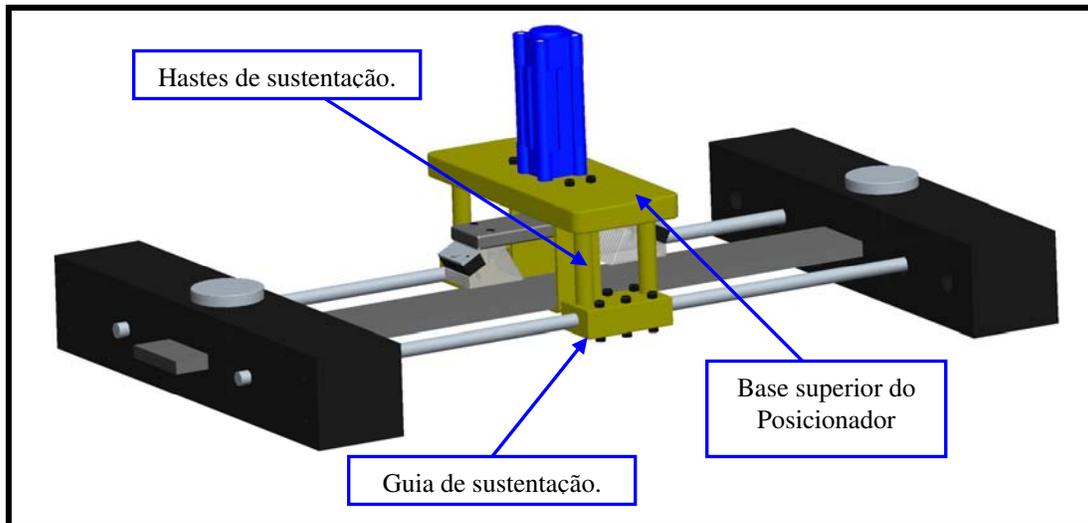


Figura 3.26: Desenho esquemático do tracionador novo (Santos, 2007).

O posicionador mostrado em amarelo no desenho, de forma esquemática, foi construído de maneira que a chapa que está sendo tracionada não sofra flexão. Guias foram incluídas no posicionador com as seguintes funções: primeiro, suportar o peso do posicionador evitando que ele próprio cause flexão a barra e segundo, servir para deslocar todo o posicionador para a posição que for necessária para as medições que podem ser realizadas.

A figura 3.27 mostra o sub-posicionador do novo arranjo que é colocado entre a base superior do posicionador e abaixo da peça em teste. Uma função de extrema importância desse sub-posicionador foi a de não permitir a flexão da barra quando o cilindro pneumático pressionava o conjunto de transdutores em contato com a barra em teste. Esse sub-posicionador tinha uma regulagem variável para se adaptar a diversas espessuras de chapas. Parafusos foram utilizados para fazer essa regulagem. Uma vez que a peça fosse colocada na posição para início dos testes, os parafusos eram apertados até que a base ficasse solidária com a chapa.

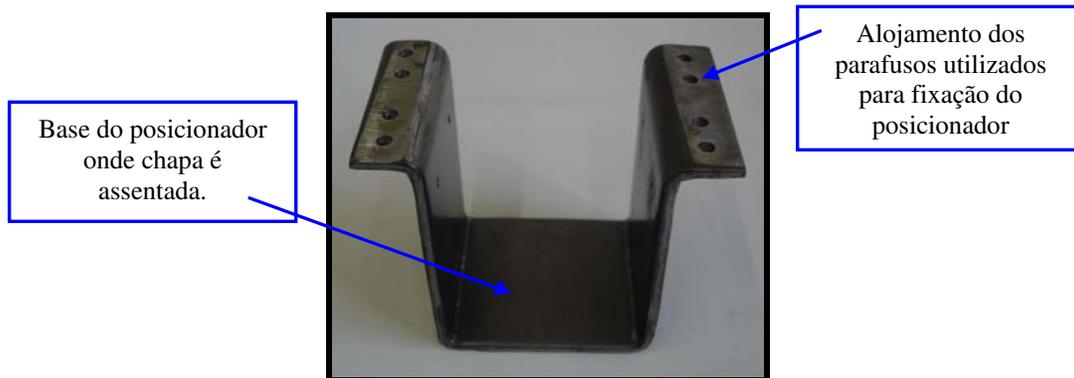


Figura 3.27: Sub-posicionador utilizado na nova construção do tracionador.

### 3.2.7 Equipamentos utilizados para automatização do sistema.

Esse tópico mostra os equipamentos utilizados para a automatização do tracionador original, suas funcionalidades e detalhes construtivos importantes. Muitos dos equipamentos apresentados foram utilizados no decorrer do trabalho para os outros tipos de aplicações. No transcorrer de cada item será mostrado como esses equipamentos funcionam e será mostrado o tipo de modificação feita para suprir cada necessidade dos testes que foram realizados. Será mostrado ainda como esses equipamentos foram utilizados para as medições em laboratório e como seriam para futura aplicação em campo. Será descrito também o condicionador de sinais *NI SC-2345* e os detalhes dos conectores configuráveis utilizados no decorrer do trabalho.

#### 3.2.7.1 Automatização do tracionador original.

Como visto na seção anterior, o tracionador é utilizado para a tração dos corpos de prova e levantamento das constantes acustoelásticas. A figura 3.28a mostra mais uma vez esse aparelho, onde pode-se observar, como indicado na figura, os dois cilindros de 10 toneladas que são utilizados para a tração da amostra. Estes dois cilindros são acionados pôr um intensificador de pressão (figura 3.28b) que é acionado através de uma linha de ar comprimido. Este intensificador transforma força pneumática em força hidráulica, a sua multiplicação é de 1:33. Este aparelho tem duas entradas de ar, e duas saídas de óleo, uma das entradas de ar é utilizada para que o

pistão hidráulico avance, e a outra entrada é utilizada para o retorno deste pistão. No caso das saídas de óleo, qualquer uma das duas podem ser utilizadas, a única diferença está no tipo de conexão. No caso deste trabalho foi utilizada a saída C como mostrado na figura 3.28b, a outra saída foi fechada, mas se necessário poderia ser colocado um manômetro adicional para verificação visual da pressão atuante na linha de óleo.

Este intensificador de pressão, como no caso do cilindro pneumático para controle e aplicação de força no conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ , também é controlado por computador, este tópico relativo ao controle dos instrumentos será visto com mais detalhes em itens sub-seqüentes. O projeto do tracionador foi feito de forma que os ensaios fossem realizados de forma que limites de segurança pré-definidos não fossem ultrapassados.

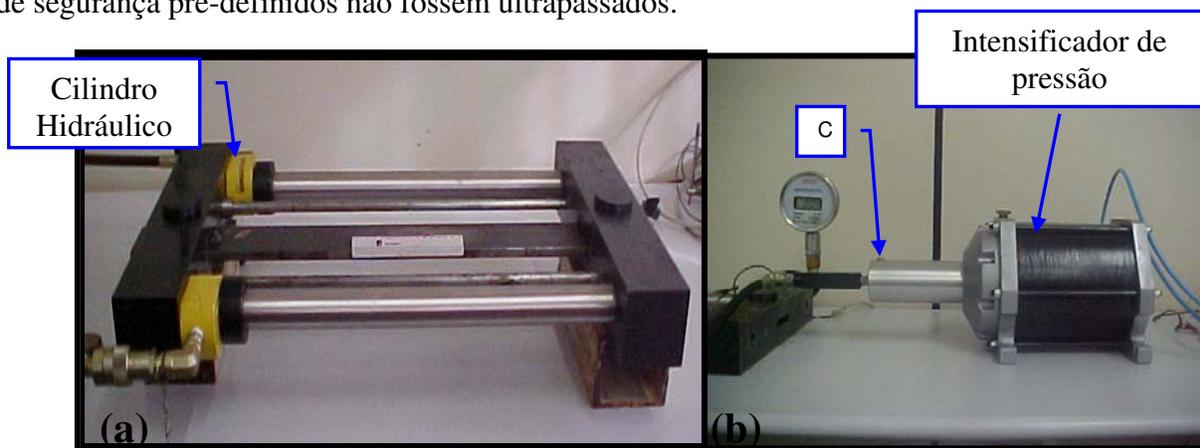


Figura 3.28: a) Tracionador para levantamento das constantes acustoelásticas. b) Intensificador de pressão (*booster*).

Para o controle dos equipamentos mecânicos, foram utilizadas válvulas eletro-pneumáticas, quatro tipos de válvulas foram usadas:

- Válvula proporcional para acionamento do intensificador de pressão (figura 3.29a). Esta válvula é controlada através do computador. Através de sinais elétricos enviados à válvula se obtém a pressão desejada. No caso desta válvula, a relação tensão elétrica /pressão é de 0 a 10 volts proporcional a 0 a 6 bar. A alimentação da válvula é de 24 volts.

- Válvula reguladora de fluxo 3 vias - uma entrada e duas saídas (figura 3.29b). Esta válvula também é controlada pelo computador. Diferentemente da válvula anterior, esta não é acionada diretamente através de sinais elétricos oriundos da placa de aquisição de sinais instalada dentro do computador. Seu controle é feito através de uma bobina conectada a esta válvula, detalhe C da figura 3.29b. Esta bobina é acionada e controlada através de um computador. Como no caso anterior, a alimentação desta válvula é de 24 volts. Esta alimentação elétrica que é controlada para ser enviada ou não para a bobina, e esta ser acionada ou não. O controle é feito através de dois equipamentos ligados entre si. O primeiro é um acoplador óptico acionado diretamente pela placa de aquisição de sinais (figura 3.30a). Este acoplador funciona como uma chave liga desliga desta alimentação de 24 volts vinda de uma fonte externa. As letras indicadas pôr A e B da figura 3.30a, mostram a conexão da tensão elétrica de acionamento. No caso deste acoplador a tensão elétrica para acionamento é de 5 volts. E as letras C e D, da mesma figura, a linha de 24 volts que será ou não interrompida para acionar a bobina elétrica. O segundo equipamento, que fica localizado entre acoplador óptico e bobina, é um relê colocado em uma base, que é utilizada para as ligações elétricas (figura 3.30b). Este relê é necessário uma vez que o acoplador óptico tem uma baixa corrente e na ligação diretamente na bobina, pode sobrecarregar seus circuitos.

Resumindo, o acionamento ou não do acoplador óptico alterna a aplicação da pressão entre as linhas A e B da válvula da figura 3.29b. Quando um sinal de 5 volts é enviado do computador, ar sob pressão passa pela via A e o intensificador aciona o tracionador. Sem o sinal, há o alívio da pressão.

- Válvula reguladora de fluxo 2 vias (uma entrada, uma saída) figura 3.29c – O acionamento desta válvula é semelhante ao da válvula citada anteriormente. Esta válvula controla o cilindro pneumático que dá a pressão constante para o conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ . Uma bobina elétrica também será acionada por computador. Tanto o acoplador óptico como relê e sua base também são utilizados neste caso. Com a bobina sem energia, o ar vindo da linha será direcionado para o escape da válvula, mostrado com a letra B na figura 3.29c, uma vez que essa bobina é energizada, o ar será direcionado para a saída da válvula, e o cilindro pneumático será acionado (Letra A da figura).

• Válvula reguladora de velocidade 2 vias (uma entrada, uma saída) – Essa válvula foi utilizada para que o avanço e retorno dos cilindros pneumáticos para posicionamento e pressão do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  não seja feito de modo abrupto. O ar vindo da saída da válvula reguladora de fluxo utilizada para o controle dos cilindros é direcionada à entrada dessa válvula, como mostra a figura 3.31 (detalhe A). A saída dessa válvula (detalhe B) da mesma figura, é conectada diretamente a entrada do cilindro pneumático. O detalhe C mostra o pino para regulagem da velocidade. Foi utilizada uma válvula reguladora de velocidade para cada entrada do cilindro pneumático. O mais importante para esse caso é que a aproximação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  à peça em teste seja feita de modo mais suave possível, para ter uma perfeita acomodação entre acrílico e peça e também para o fluido acoplante se distribuir de forma mais homogênea entre o contato. É usada para regular também o retorno do cilindro, pois se este for feito de modo rápido pode ocorrer um deslocamento da posição do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ , o que prejudicará a próxima medição devido a dificuldade de posicionamento.

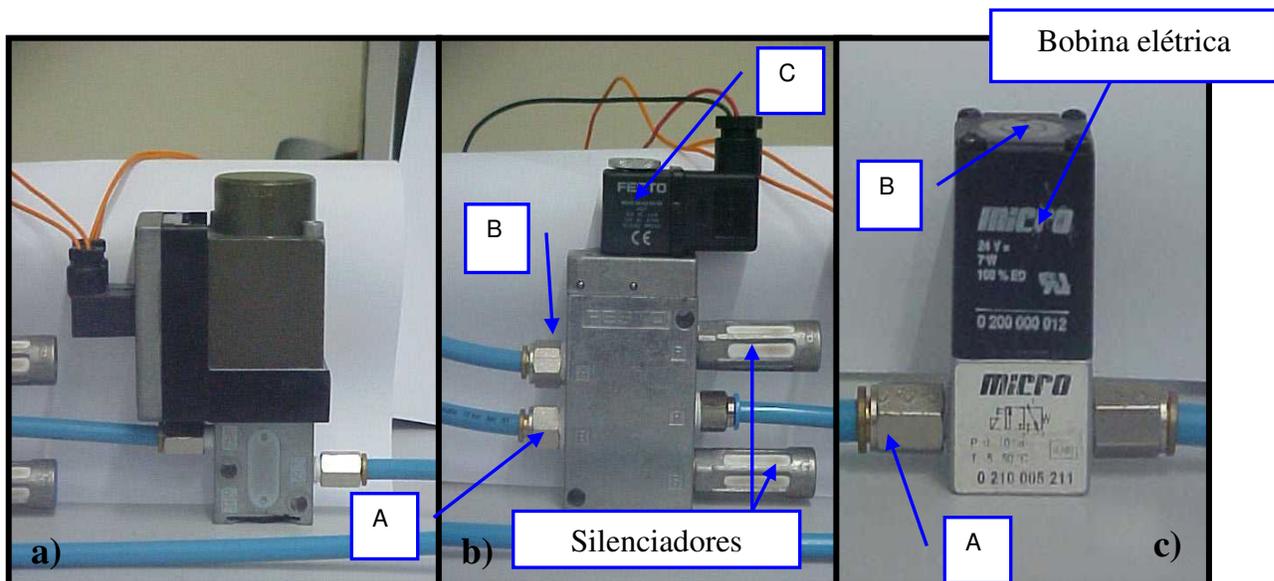


Figura 3.29: a) Válvula pneumática proporcional (1 entrada, 1 saída); b) Válvula pneumática direcional (1 entrada, 2 saídas); c) Válvula pneumática direcional (1 entrada 1 saída).

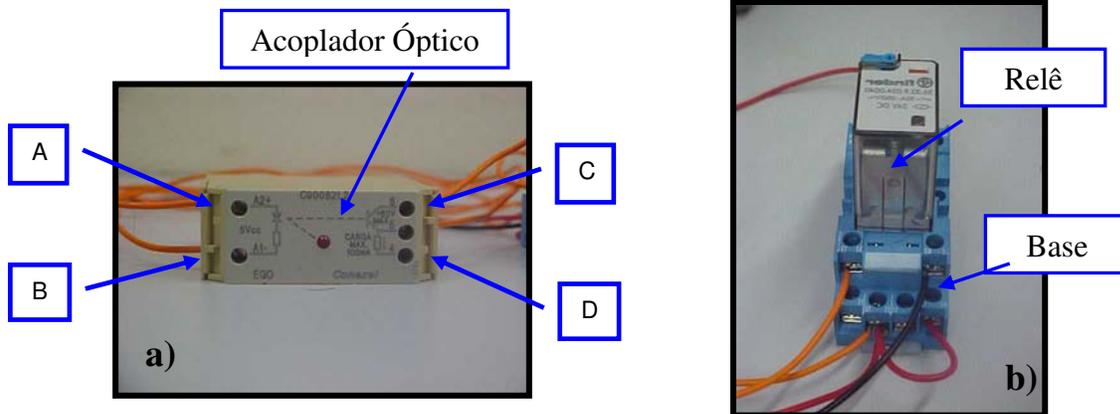


Figura 3.30: a) Acoplador óptico; b) Base e relê para acionamento

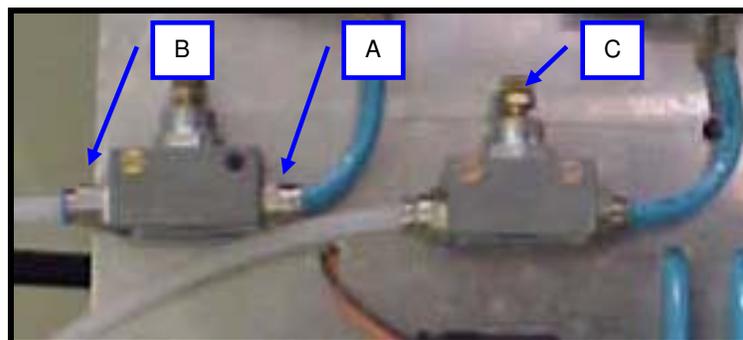


Figura 3.31: Válvula reguladora de velocidade.

### 3.2.7.2 Sistema para aplicação em laboratório.

Na realização da maior parte dos experimentos em laboratório, foi utilizado um conjunto testado em outros trabalhos de pesquisa do grupo. Este sistema é composto pôr um computador IBM PC, com velocidade de 750 MHz e 256 Mb de memória RAM para o processamento dos dados. Em seu interior foram colocados duas placas de aquisição de sinais, uma placa de osciloscópio NI PCI-5911 com um canal de entrada e saída para *trigger*, com uma freqüência de amostragem de 100 MHz, e uma outra placa para aquisição e geração de sinais, NI PCI-6024E. Esta última placa tem freqüência de amostragem de 20 MHz, resolução de 12 *bits* e possui 16

canais analógicos de entrada, dois canais analógicos de saída, e 8 canais de entrada e saída digitais, além de 2 contadores. A placa de osciloscópio, é ligada diretamente ao excitador-receptor de pulsos, que é o responsável pela captação e envio dos dados elétricos que serão adquiridos. A figura 3.32 mostra o sistema completo montado para levantamento das constantes acustoelásticas.

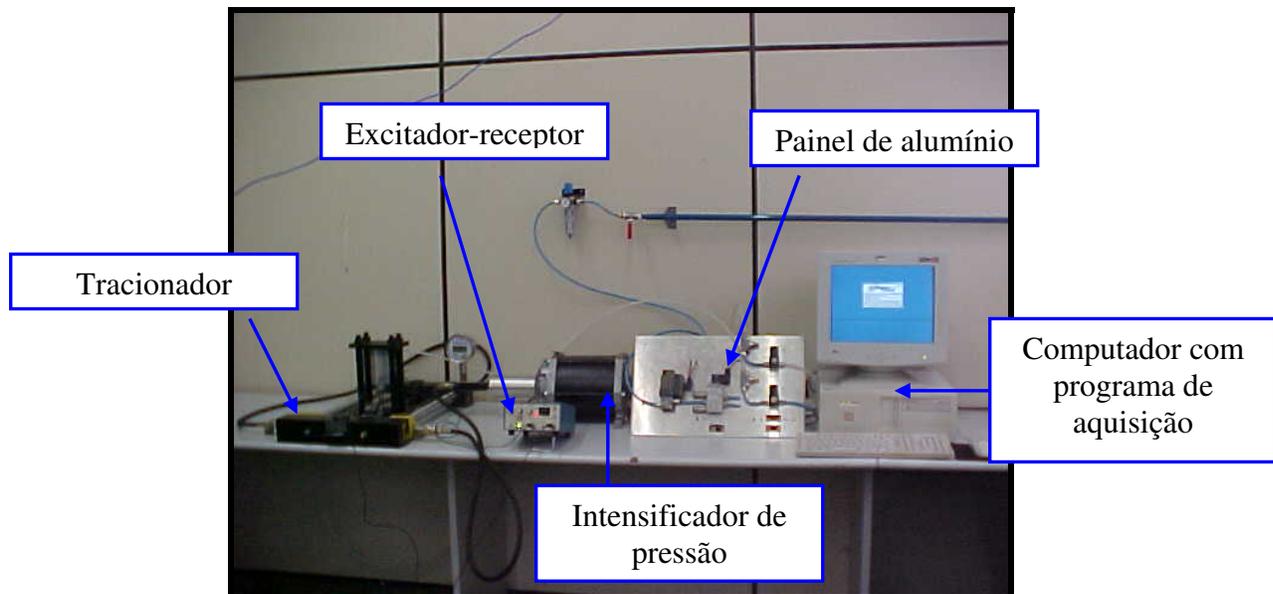
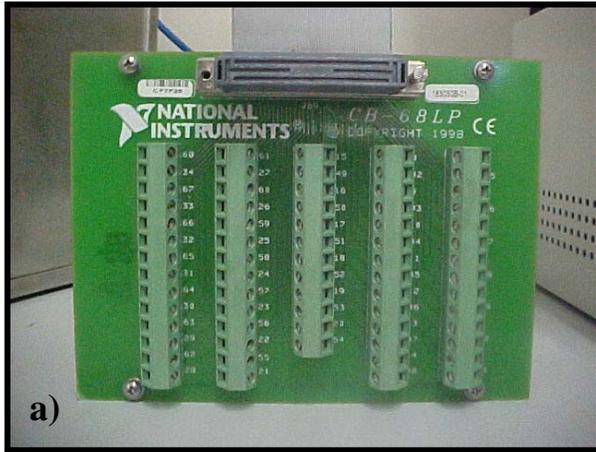


Figura 3.32: Sistema completo para aquisição de dados.

A placa *NI PCI-6024E* é ligada a um bloco de conectores da marca *National Instruments* modelo *CB-68 LP*. Este bloco de conectores, mostrado na figura 3.33a, é onde os sinais elétricos serão enviados ou captados dos instrumentos físicos (reais). Será através desse bloco que os sinais elétricos serão enviados para os acopladores ópticos que controlam as bobinas das válvulas direcionais e para a válvula proporcional. O que gera os sinais elétricos é a placa de aquisição de sinais, o bloco serve apenas de interface para que esses sinais elétricos sejam enviados para seus respectivos usos. Cada terminal do bloco conector, mostrado na figura 3.33, representa os canais de entrada e saída analógicos e digitais, além dos contadores, *triggers* e demais funções específicas da placa de aquisição. A figura 3.34 mostra o painel de alumínio com todas as válvulas posicionadas.



ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT1	22	56	AIGND
DAC1OUT1	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3

Figura 3.33: a) Bloco conector CB 68 LP; b) Mapa de localização dos canais da placa de aquisição NI PCI-6024E.

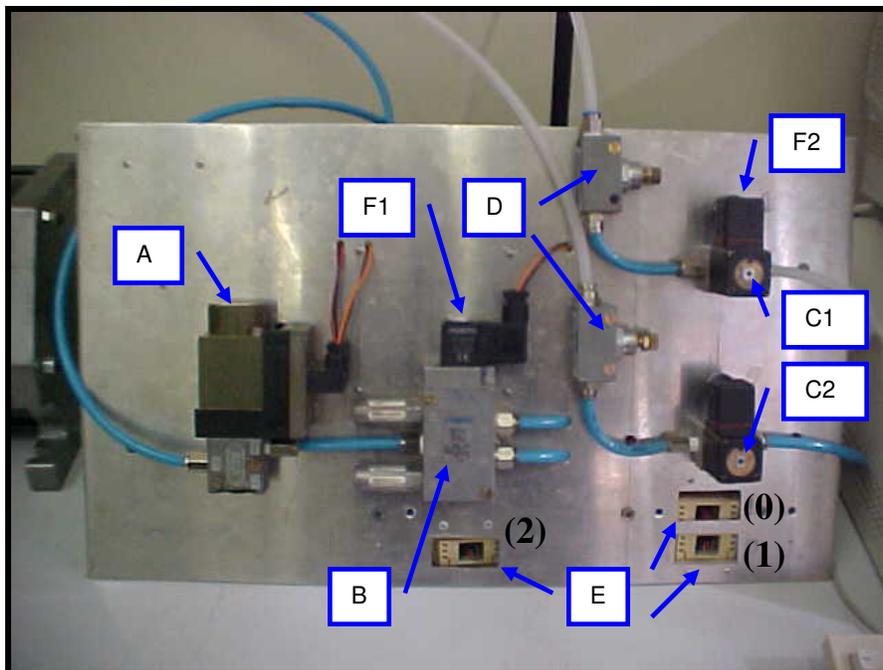


Figura 3.34: Painel contendo as válvulas para acionamento e controle do sistema ultra-sônico.

O ar sai da válvula proporcional com a pressão ajustada para a aplicação no sistema e entra na válvula direcional de uma entrada e duas saídas (B). O Acoplador óptico (E2) manda o comando para a bobina (F1) e essa faz o controle entre as saídas de ar da válvula. As duas saídas da válvula direcional vão direto para o intensificador de pressão para o avanço e recuo desse para o acionamento da máquina de tração, tanto do dispositivo original como do novo.

As válvulas direcionais de uma entrada e uma saída (C), são utilizadas para o controle do cilindro pneumático. Cada lado direito da válvula é alimentado por ar vindo da linha de pressão e passa pela unidade integrada por filtro e válvula reguladora de pressão. Cada alimentação de ar tem uma unidade independente. Para o avanço e retorno do cilindro, dependendo do caso, um tipo de ajuste e escolha da pressão de trabalho é feito. Cada válvula também é acionada através do comando que um acoplador óptico manda para sua respectiva bobina (F2). O acoplador óptico (E0) controla a válvula direcional (C1) e o acoplador óptico (E1) controla a válvula direcional (C2). O controle desses acopladores também é feito por programas específicos que serão apresentados nas seções seguintes. Antes de chegar ao cilindro, o ar que sai pelo lado esquerdo das válvulas direcionais passam por válvulas reguladoras de velocidade (D). Esse é o sistema básico usado nessa tese de doutorado e que foi utilizado para todas as medições realizadas nesse trabalho.

Para a automatização do posicionador dinâmico, apenas a válvula (C1) do painel de alumínio foi utilizada. O seu lado direito foi alimentado pela linha de pressão do mesmo modo, a diferença é que o ar que sai do lado esquerdo, que passa primeiramente pela válvula proporcional, como no caso anterior, foi direcionado a uma válvula direcional de uma entrada e duas saídas, semelhante a do painel de alumínio, apenas com dimensões menores (figura 3.35) para que pudesse ser montada no posicionador dinâmico.

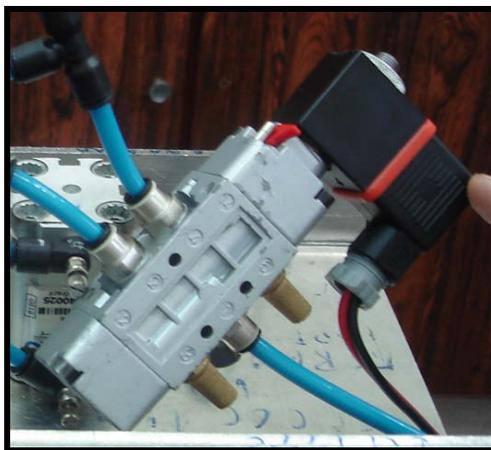


Figura 3.35: Válvula direcional, 1 entrada 2 saídas, utilizada para movimentação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  do posicionador dinâmico.

Essa nova válvula direcional de menores dimensões é que fará a movimentação de subida e descida do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  do posicionador dinâmico, substituindo as válvulas (C1) e (C2) utilizadas para esse fim no conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  acoplados ao posicionador estático. O controle também foi feito por uma bobina acoplada sobre a válvula direcional e seu acionamento foi realizado pelo acoplador óptico (E2) do painel de alumínio. Também foram utilizadas válvulas reguladoras de velocidade de menores dimensões e estas foram acopladas diretamente aos cilindros pneumáticos. E essa concepção, com as válvulas acopladas diretamente ao posicionador dinâmico, foi desenvolvida para dar ao sistema uma simplicidade e praticidade adequadas para que possa ser aplicado em campo, no futuro.

### 3.2.7.3 Sistema para aplicação em campo.

Um primeiro protótipo para aplicação em campo foi implementado. Neste caso foi utilizado um *Notebook* com 2.4 GHz e 512 MHz de memória RAM. Como no caso anterior, duas placas de aquisição de sinais foram acopladas a estes, uma placa de osciloscópio NI PCMCIA-5102, com duas entradas e saídas para *trigger*, com frequência de amostragem de 20 MHz por canal, e uma outra placa, NI PCMCIA-6024E, com as mesmas especificações da placa utilizada para aplicação em laboratório. Para a placa NI PCMCIA-5102 (osciloscópio) um bloco de conexão foi ligado diretamente à placa, detalhe da figura 3.36. É através deste conector que são feitas as ligações entre o computador e o excitador-receptor de pulsos.

A placa *NI PCMCIA-6024E* foi ligada a um sistema de aquisição e condicionamento de sinais *NI SC-2345*. Este é um sistema que possui 16 entradas, duas saídas analógicas e 8 entradas/saídas digitais. Este equipamento também substitui o bloco de conectores utilizado no sistema em laboratório. Módulos configuráveis conforme a necessidade são colocados no interior deste equipamento para fazer as leituras ou envio dos sinais. Estes blocos configuráveis já são condicionados e filtrados, eliminando desta forma o uso de condicionadores de sinais externos, que com certeza seria um fator dificultador para medidas em campo.

A figura 3.36, mostra o equipamento completo para utilização em campo.

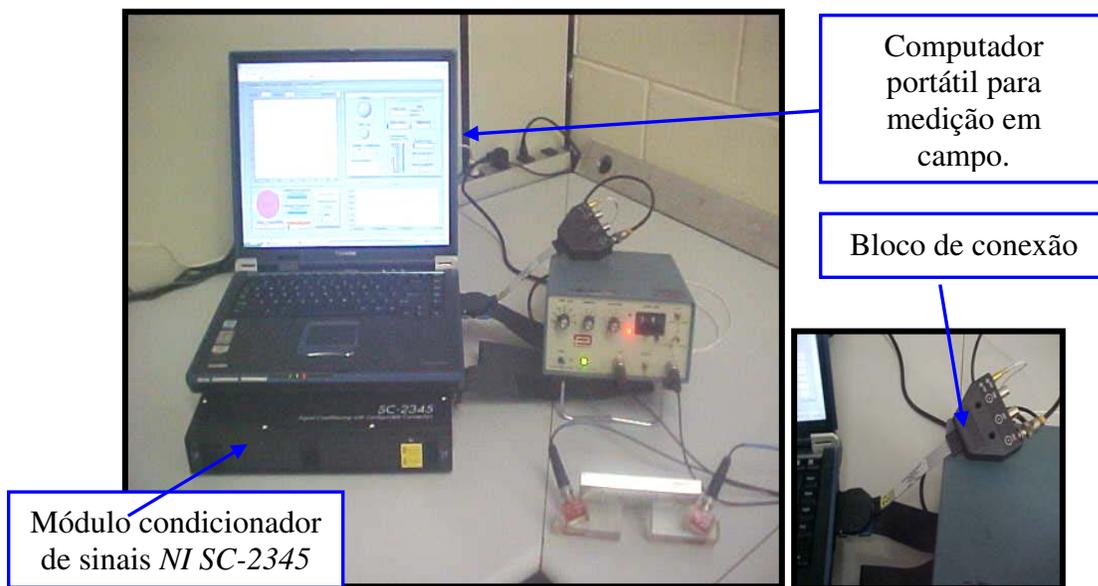


Figura 3.36: Sistema portátil para aplicação em campo.

Como um dos propósitos desse trabalho foi verificar os fatores de influência para uma futura aplicação em campo, esse sistema portátil foi testado primeiramente no duto em condições controladas e seus resultados foram comparados com os levantados com o sistema para laboratório. Os métodos numéricos de determinação do tempo de percurso foram utilizados nesse caso também, como será mostrado no capítulo 4.

### 3.2.7.4 Condicionador de sinais *NI SC-2345* com blocos configuráveis.

Esse condicionador de sinais foi utilizado para: leitura das temperaturas nas medições dos tempos de percurso no duto; leitura das temperaturas no acrílico e aço para determinação da sua influência em relação aos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas; determinação das tensões atuantes no duto lidas através de extensômetros.

O condicionador de sinais, mostrado na figura 3.38, pode ser energizado por três tipos de alimentação, chamados de alimentação tipo 1, alimentação tipo 2 e alimentação tipo 3. Cada tipo tem sua peculiaridade e um tipo de placa para energização é colocada dentro do condicionador. O tipo utilizado nesse trabalho foi a alimentação tipo 3 e a placa utilizada esta indicada na figura 3.37b. Esta placa gera uma tensão elétrica de 5 volts e alimenta cada *slot* onde os blocos configuráveis serão fixados com uma tensão elétrica de  $\pm 15$  volts. A placa de energização necessita de uma tensão elétrica entre 7 volts e 42 volts para que possa acionar e gerar os 5 volts que ligam o condicionador. Para esse fim foi utilizado um conversor estabilizado de 24 volts. No lado direito do condicionador de sinais estão localizados *leds* de indicação das alimentações de 5 volts para acionamento do condicionador de sinais e da alimentação de  $\pm 15$  volts de cada *slot* para colocação dos blocos configuráveis (Figura 3.37a).

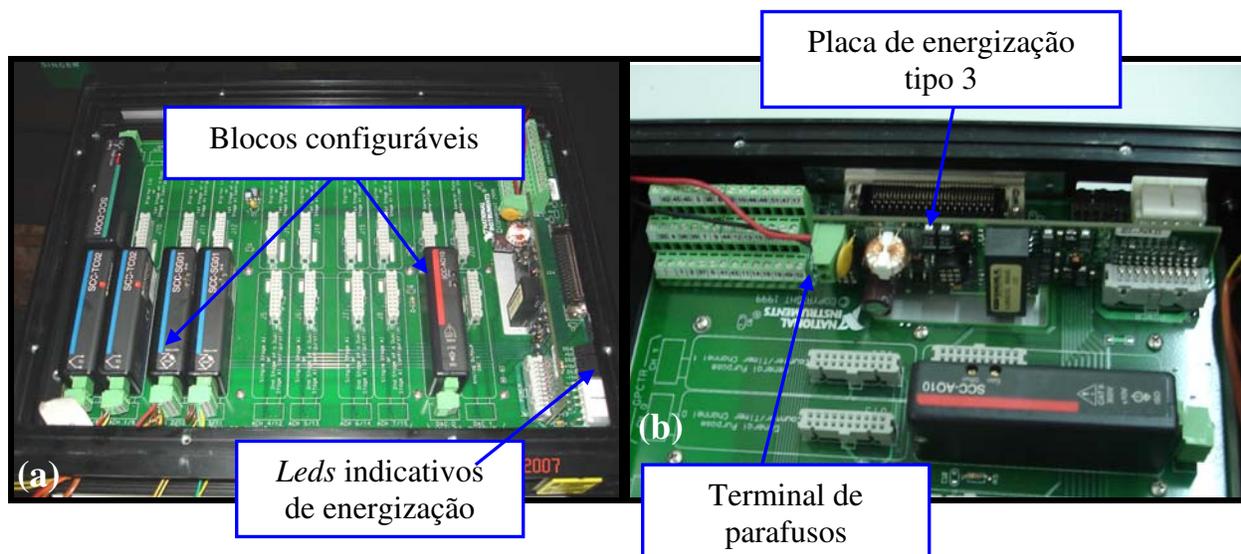


Figura 3.37: a) Condicionador de sinais *NI SC-2345* – blocos configuráveis; b) Condicionador de sinais *NI SC-2345* – Placa de energização e terminal de parafusos.



Figura 3.38: Condicionador de sinais *NI SC-2345*.

Os blocos configuráveis tem posições específicas em cada *slot* do condicionador de sinais. As entradas analógicas devem ser inseridas nos *slots* J1 ao J8. As entradas e saídas digitais nos *slots* J9 ao J16, as saídas analógicas nos *slots* J17 e J18 e os contadores nos *slots* J19 e J20. Os blocos configuráveis utilizados nesse trabalho estão descritos a seguir.

- Bloco configurável *NI SCC-TC02* - Módulo de entrada analógica para leitura de termopares.

Esse módulo é utilizado para leitura de termopares tipos: B, E, J, K, N, R, S, e T. Ele possui um canal com um ganho de 100. O termopar utilizado para a leitura foi do tipo K. Esse bloco conector tem três conectores de parafusos chamados de: TC+, TC- e AI GND. Para o caso dessas medidas o fio positivo do termopar foi inserido em TC+ e o fio negativo em TC -.

- Bloco configurável *NI SCC-SG01* - Módulo de entrada analógica para leitura de extensômetros.

Esse módulo é utilizado para leitura de extensômetros. Para esse tipo de bloco a configuração das resistências foi de um quarto de ponte com valor de  $350 \Omega$  (figura 3.39). As resistências R1 e R2 são os complementares de meia ponte, a resistência R3 é a complementar de um quarto de ponte, chamado também de resistor espelho, e a resistência R4 é o elemento ativo

de medição da deformação. A ponte será alimentada com uma tensão,  $V_{EX}$ , de 2,5 volts, característica desse bloco configurável.

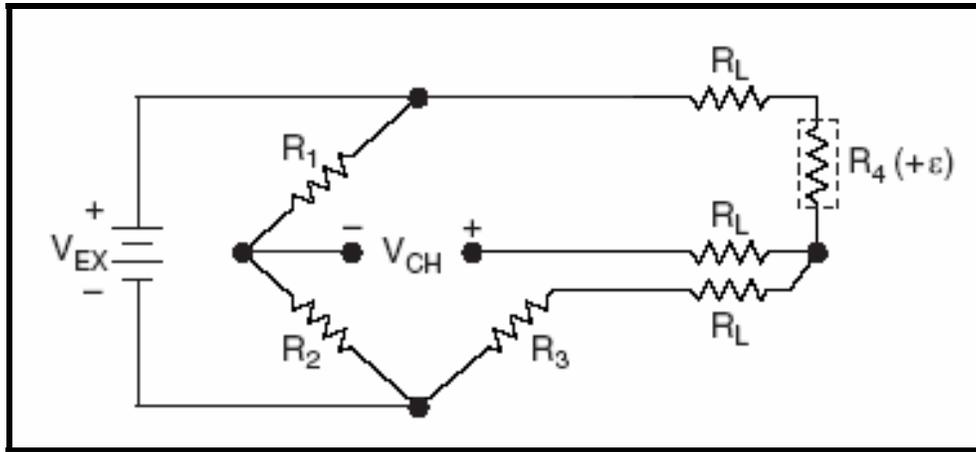


Figura 3.39: Configuração de um quarto de ponte do bloco configurável *NI SCC-SG01*.

No caso desse trabalho, um dos fios vindos do extensômetro foi conectado em  $ACH(X)+$  e o fio de alimentação em  $V_{ex+}$ . Para a ligação do local designado como  $R(X)$ , que se refere a resistência espelho  $R3$ , foi feita uma união entre  $ACH(X)$  e  $R(X)$  com um fio.

- Bloco configurável *NI SCC-AO10* - Módulo de saída analógico  $\pm 10$  volts.

Esse módulo é utilizado para enviar tensões elétricas de  $\pm 10$  volts. Nos seus conectores por parafusos, um fio deve ser ligado no local designado como 3 e um outro fio no local designado como 2. Através do comando da placa de aquisição é enviada a tensão elétrica específica para cada aplicação. Cada bloco possui um canal.

Além dos *slots* para colocação dos blocos configuráveis o condicionador de sinais possui três fileiras de conectores de parafusos, figura 3.37b, para envio de sinais digitais, alguns conectores terra e um conector que gera uma tensão elétrica de 5 volts. Esse terminal de parafusos foi utilizado para envio dos sinais digitais para os acopladores ópticos, no caso da utilização do sistema usado em campo com *notebook*, e para o controle de leitura dos receptores ultra-sônicos, para o caso do conjunto com duas sapatas de acrílico para recepção.

### 3.2.8 Programas utilizados para controle e aquisição de dados.

Os programas utilizados nesse trabalho foram desenvolvidos na plataforma *LabVIEW* versão 6.i. Para controle dos instrumentos duas formas de programação foram utilizadas. A primeira desenvolvendo programas específicos para cada tipo de aplicação e a segunda maneira utilizando os próprios programas já desenvolvidos pelos programadores da *National Instruments* que vem junto com os *drivers* da placa para instalação dos programas. O início do tópico descreverá os programas que são instalados juntamente com os *drivers* da placa mostrando como esses foram utilizados e como foram configurados os itens que fazem parte do sistema de hardware. Em seguida será mostrado os programas desenvolvidos utilizando as ferramentas disponíveis para programação.

O programa *Measurement & Automation V.2.2* é instalado juntamente com os *drivers* das placas de aquisição de dados. Este serve para configurar tais placas e verificar o perfeito funcionamento delas, testando sua conectividade através de painéis de controles específicos. O painel de teste mostrado na figura 3.40 é o utilizado para essa função. Quatro telas são utilizadas nesse painel para a verificação dos sinais. Cada tela, localizada no canto superior esquerdo, diz respeito a um tipo de função da placa de aquisição de dados como foi comentado anteriormente. A sub-tela mostrada na figura diz respeito as entradas e saídas digitais, e será através dessa tela que os acopladores ópticos serão acionados e controlados. A válvula proporcional será acionada com o envio de sinais às saídas analógicas localizada na sub-tela “*Analog Output*”. Será através desse programa que o posicionador dinâmico será controlado para as medidas de tensões no duto e também para as medidas da influência da temperatura sobre o tempo de percurso e rigidez do posicionador dinâmico.

Algumas outras funções são desempenhadas por esse programa. A configuração do condicionador de sinais *NI SC-2345* e dos blocos configuráveis são as principais. Também são criados canais virtuais para a leitura direta de temperatura e dos extensômetros, através dos blocos configuráveis *NI SCC-TC02* e *NI SCC-SG01*.

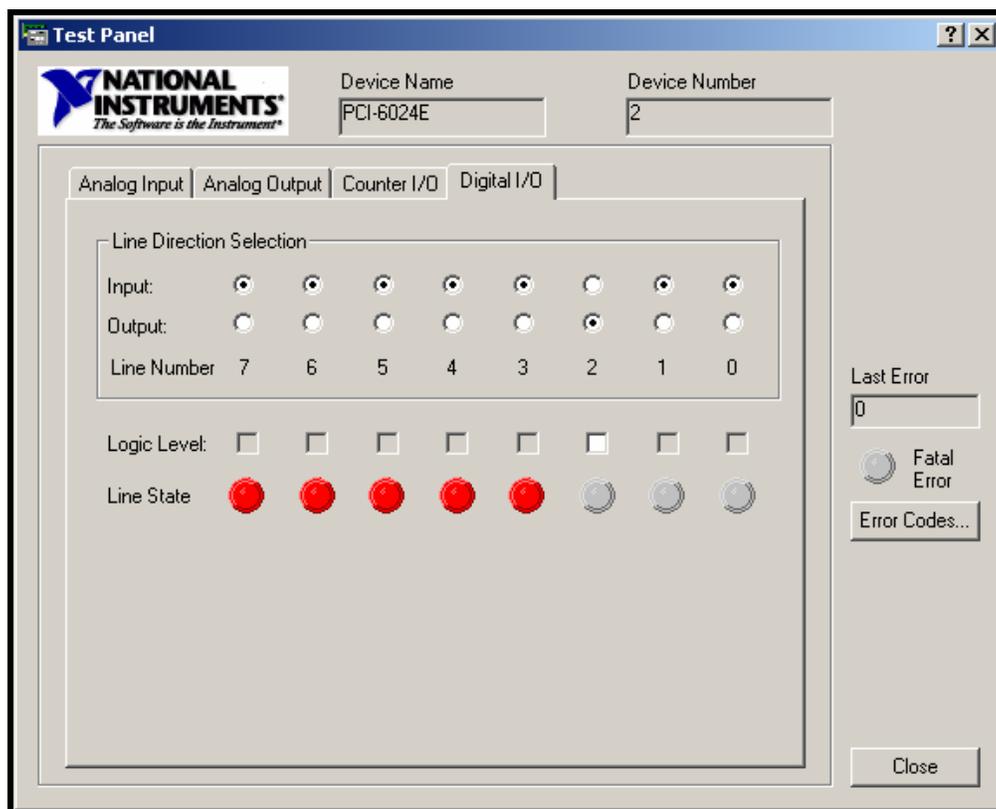


Figura 3.40: Painel de controle do programa *Measurement & Automation* para verificação da conectividade de placas de aquisição.

Para a configuração da placa de aquisição basta selecioná-la como mostrado na figura 3.41. A partir de uma tela de configuração que se abre, também mostrada na figura, as configurações podem ser feitas. Na sub-tela “AI”, será escolhido entre canais diferenciais ou referenciado por terra, que no caso do trabalho foi o escolhido. E na sub-tela “*accessory*” é o local onde é feita a seleção entre bloco CB 68 LP e condicionador de sinais *NI SC-2345*. Quando a escolha é o condicionador ainda se torna necessário a configuração de cada bloco configurável no seu respectivo *slot*.

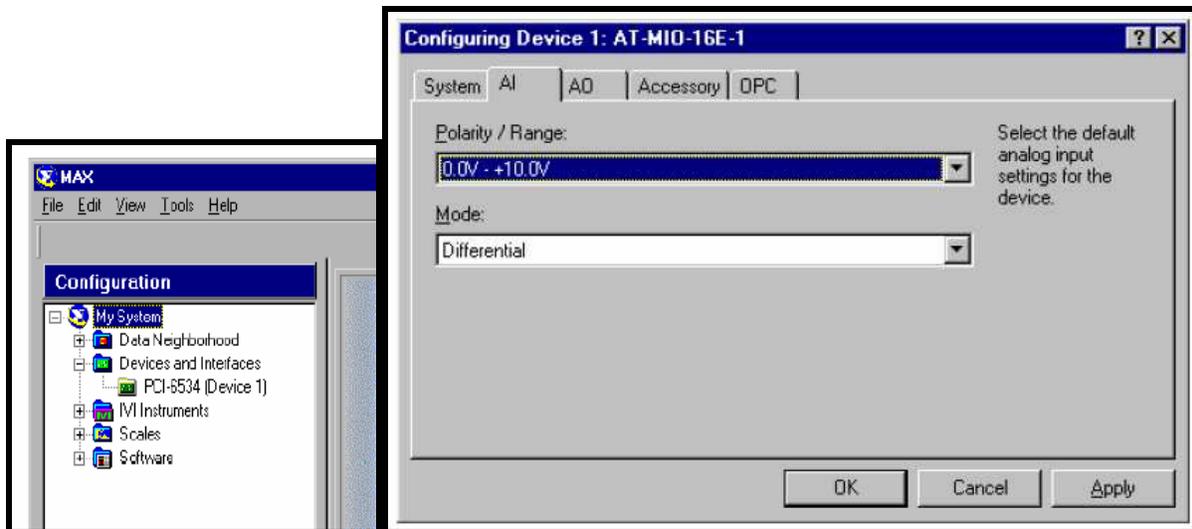


Figura 3.41: Telas de configuração dos acessórios de placas de aquisição de sinais.

Canais virtuais são criados através da tarjeta “*Data Neighborhood*”, vista na figura 3.41. A partir desta criaram-se os canais virtuais para leitura da temperatura e extensômetros, através dos respectivos blocos configuráveis. Quando se faz a escolha por cada tipo de medição, um tutorial é aberto e alguns dados que dizem respeito ao instrumento são necessários. Para a temperatura dados como o tipo de termopar utilizado, se a temperatura será medida em graus *Celsius* ou *Fahrenheit* e se a ligação será feita como diferencial ou referenciada por terra, são necessárias durante a configuração do canal virtual. Para o caso da leitura de extensômetros são necessárias as entradas de dados como valores das resistências da ponte, tipo de ponte, valor inicial da tensão elétrica quando a ponte é zerada e fator do extensômetro.

Nos itens seguintes são mostrados os programas desenvolvidos pelo autor deste trabalho para emprego nos diversos experimentos realizados.

- Programa ***ULTRA\_TEST***

Este programa foi utilizado para a verificação da amplitude do sinal com geração de ondas cisalhantes. Este é um programa que reproduz um osciloscópio simples e que mostra o sinal em tempo real. Funções básicas de um osciloscópio são utilizadas, como funções de *trigger*, escolha da placa de aquisição para leitura dos sinais, canal que será lido, frequência de amostragem do

sinal adquirido e funções de ajuste do sinal na tela em relação aos eixos X e Y. Este programa foi utilizado tanto para o caso da aplicação em laboratório com a *CPU* como aplicado em campo com *notebook* e condicionador de sinais *NI SC-2345*. Foi com esse programa que os primeiros testes visando a melhora do sinal ultra-sônico através da interpolação dos dados foram realizados. A figura 3.42 mostra a tela do programa.

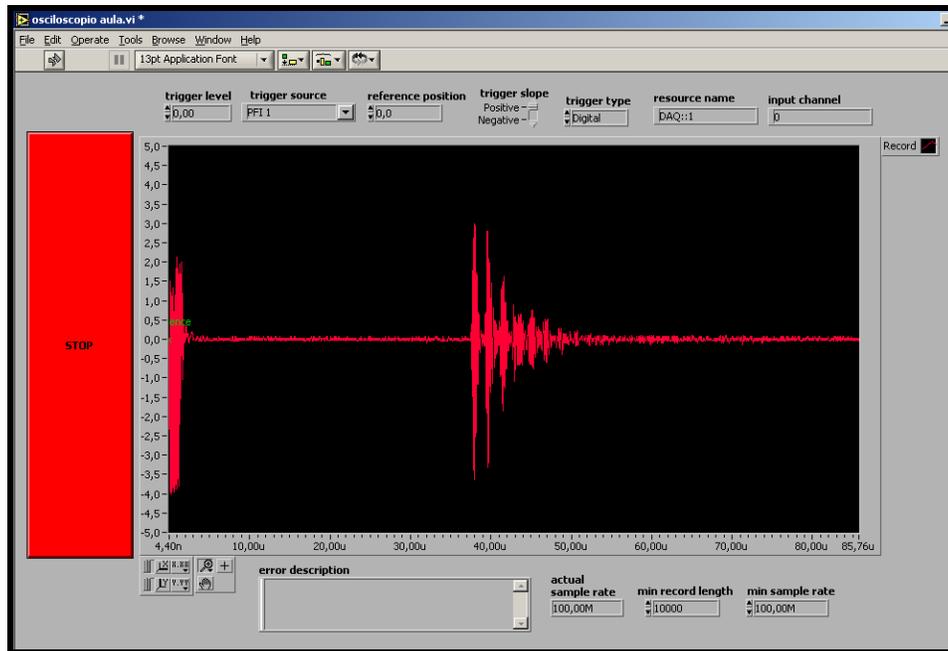


Figura 3.42: Programa *ULTRA\_TEST* utilizado para visualização do sinal ultra-sônico em tempo real.

- Programa *TEMP\_PAR*

Este programa foi utilizado juntamente com o módulo de condicionamento de sinais *NI SC-2345* e com o bloco configurável *NI SCC-TC02* para a leitura das temperaturas na superfície do duto e nas peças de acrílico e aço para determinação dos tempos de percurso. As temperaturas são adquiridas em tempo real e armazenadas na memória virtual até o final da aquisição, momento no qual esses dados são gravados no disco rígido para posterior análise. Alguns itens são vistos na tela principal do programa. Alguns são utilizados para mudanças serem feitas em relação a aquisição e leitura dos dados e outros dizem respeito a programação em si e são utilizados apenas para verificação. A figura 3.43 mostra a tela do programa. Nesta tela pode-se escolher o número de amostras para aquisição e o número de amostras por segundo.

Foram escolhidos os valores de 150 e 300, respectivamente, acarretando em uma medida a cada meio segundo. O número do canal e a placa utilizados e a seleção entre graus *Celsius* ou *Fahrenheit* são opções que podem ser feitas também. A temperatura é mostrada a cada instante de aquisição enquanto o botão horizontal estiver na posição “adquirir temperatura”. O programa será interrompido e os dados de temperaturas gravados quando esse botão for deslocado para a opção “gravar”.

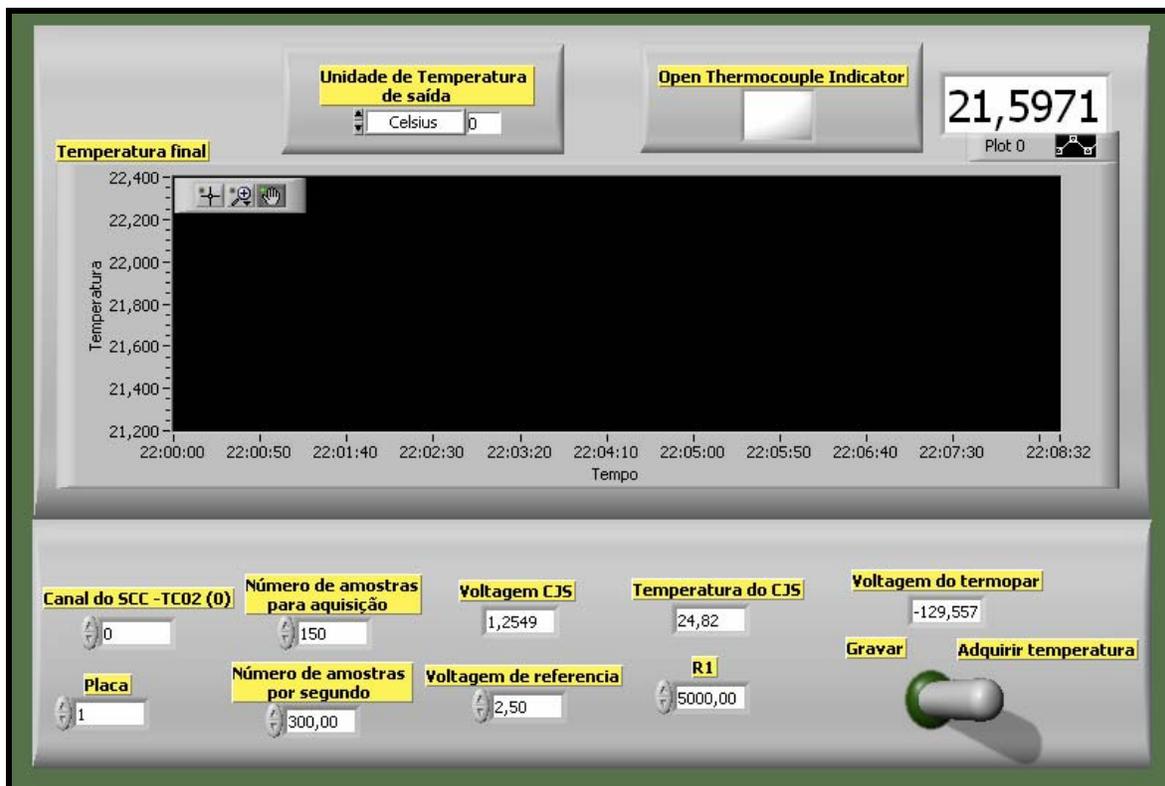


Figura 3.43: Programa *TEMP\_PAR* utilizado para leitura e gravação da temperatura através do módulo de condicionamento de sinais *NI SC-2345*.

- Programa *STRESS\_GAGES*

Este programa foi utilizado juntamente com o módulo de condicionamento de sinais *NI SC-2345* e com o bloco configurável *NI SCC-SG01* para a leitura dos extensômetros colados no duto. Dois tipos de leitura podem ser feitas. O valor de deformação, pelo canal virtual, e a leitura da tensão elétrica para posterior aplicação em fórmulas específicas para determinação da deformação. O valor da tensão foi calculado de duas formas: primeiramente utilizando o valor da

deformação lida no canal virtual e aplicando a lei de *Hooke*, a segunda forma foi pela medição das tensões elétricas aplicando fórmulas contidas no manual da placa para a situação específica. Na tela do programa (figura 3.44) pode-se ver os dados tanto da deformação como das tensões elétricas, que são adquiridos em tempo real. No final da aquisição uma média desses sinais é feita. O número de médias é escolhida de acordo com o número de amostras contidas no painel frontal. Ao final do processo de aquisição, os dados são gravados acionando-se o botão de controle localizado no canto inferior direito do painel frontal.

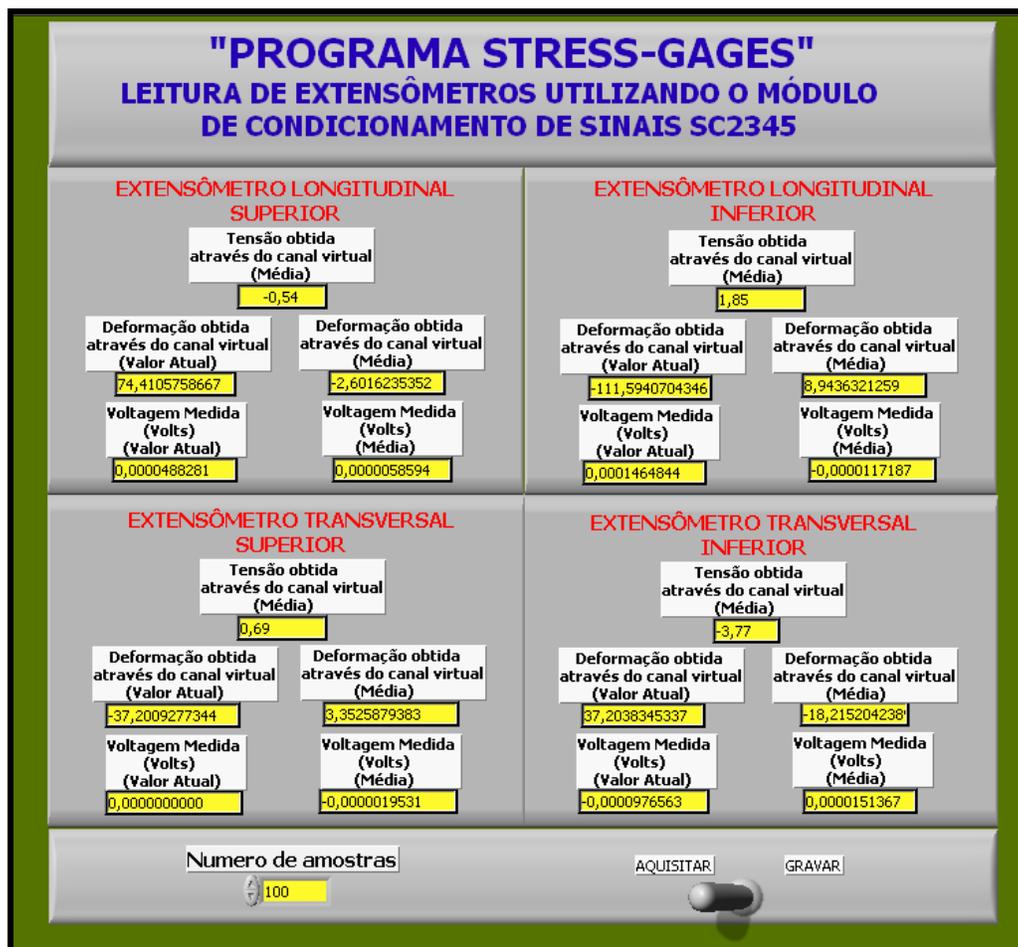


Figura 3.44: Programa para leitura de extensômetros através do condicionador de sinais

NI SC-2345

- **Programa *L\_STRESS V2.0***

Uma atualização do programa *L\_STRESS*, desenvolvido na dissertação de mestrado do autor, foi feita e uma nova versão foi gerada. O programa foi chamado de *L\_STRESS V2.0*.

A versão anterior era semi-automática e era necessário a presença de uma bomba manual para a aplicação das forças sobre o sistema mecânico quando do uso do tracionador. O programa indicava a pressão que devia ser aplicada e o operador manualmente acionava a bomba. Uma outra etapa que era também manual é o assentamento do conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  sobre as chapas sendo ensaiadas. A cada pressão colocada pela bomba manual, o conjunto era aplicado e retirado sobre a área de contato manualmente. As outras funções do programa já eram automáticas, como os cálculos dos resultados finais e as informações que o programa mostra para o usuário que realiza os testes experimentais.

A nova concepção do programa utilizou o painel de alumínio (figura 3.34) para a movimentação automática do tracionador, através do intensificador de pressão, e a subida e descida do cilindro pneumático sobre as peças sendo ensaiadas. O restante da automatização continuou a mesma, mostrando ao final da aquisição os resultados extraídos. Esses dados são gravados em um disco rígido, além de serem mostrados na tela ao final da execução.

As telas do programa continuaram semelhantes (Andrino, 2003), com exceção da tela de osciloscópio, onde um indicador da subida e descida do cilindro pneumático e outro para indicação do acionamento do intensificador de pressão foram acrescentados, para que o executor do experimento saiba o que está acontecendo durante o ensaio. A figura 3.45 mostra a tela com essa modificação.

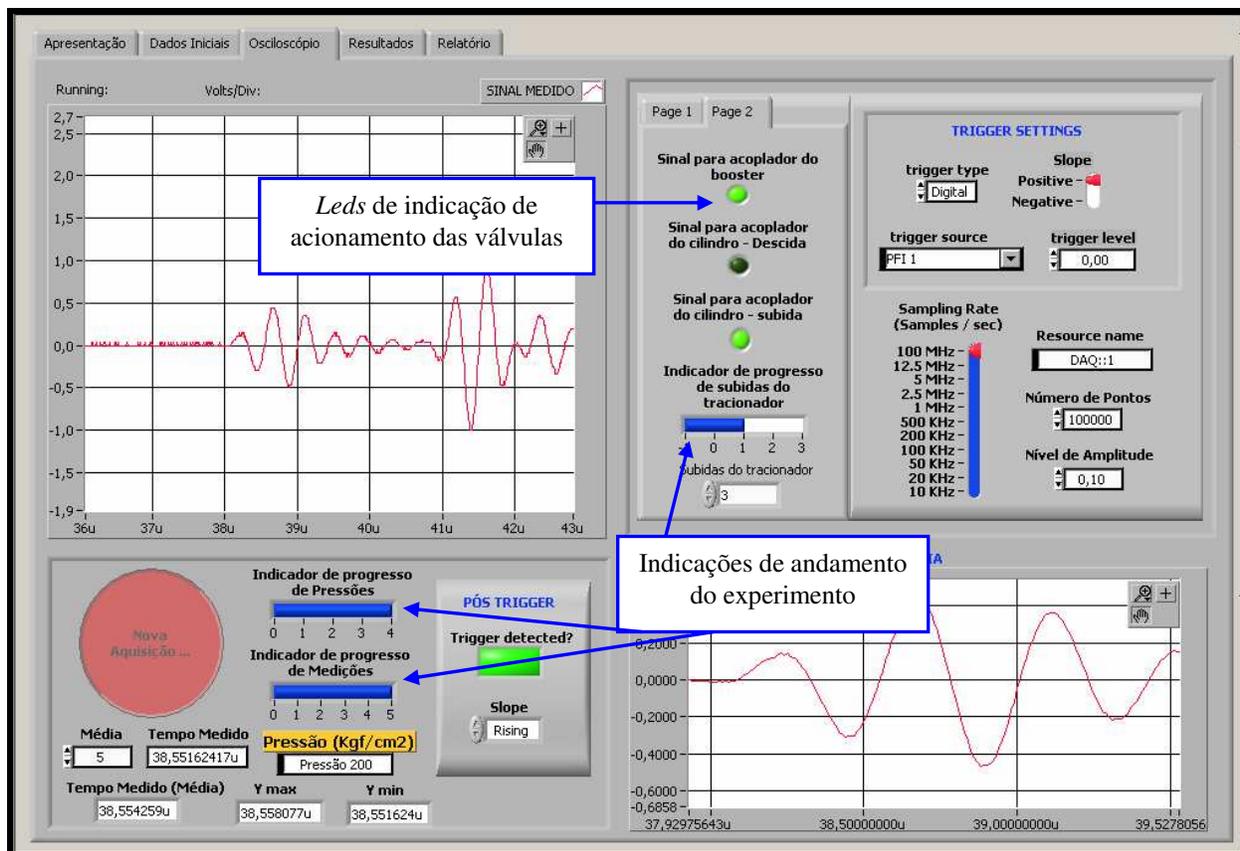


Figura 3.45: Tela do osciloscópio mostrando algumas das funções básicas do programa *L\_STRESS V2.0*.

Uma outra inovação desta nova versão é que o operador do programa escolhe o número de vezes que a peça a ser ensaiada deve ser tracionada. A cada tração, da mínima até a máxima, os valores dos tempos de percurso de cada passo de pressão, que também é escolhida no programa, são armazenados na memória virtual, até que todos os passos em cada subida sejam efetuados. Com cada medida, em cada passo, o programa calcula automaticamente a média simples dos valores. Será com esses valores que o programa irá fazer os cálculos de tensões e traçar os gráficos. Para o caso do acionamento do tracionador pelo intensificador de pressão o programa irá aplicar as pressões, da mínima até a máxima, nos passos pré-determinados. No último passo de pressão o programa automaticamente irá retornar o intensificador de pressão de modo que a pressão atuante no tracionador volte a zero. A partir daí uma nova etapa de subidas será iniciando o número de vezes determinado pelo operador no início dos testes. Em todas as etapas de subida

e descida do cilindro pneumático, o fluido acoplante deve ser adicionado. Essa foi a única etapa não automatizada do sistema. Isso acontece quando o fluido acoplante em questão é o óleo mineral, no caso de gel, devido a sua consistência mais densa, não é necessário que seja adicionado a cada medição e sim em intervalos regulares e não muito curtos, havendo casos que não se necessita adicionar gel. Uma facilidade desse programa é a indicação do estágio em que as medidas dos tempos de percurso e pressão aplicada se encontram. Isso elimina a necessidade do executor do ensaio ficar ao lado dos equipamentos. A qualquer instante a tela inicial mostra o estágio em que as medições se encontram, o valor de pressão e o número da medição do tempo de percurso atual. Os detalhes da figura 3.45 mostram essas indicações. Ao final dos testes, uma tela irá aparecer perguntando se deseja fazer uma nova aquisição ou encerrar o programa.

Este é o programa utilizado para todas as aquisições e gravações dessa tese de doutorado. Modificações foram feitas para cada tipo de procedimento como será exposto adiante. Em todas as medições o painel frontal foi o mesmo, apenas modificando os dados de entrada. A opção completa de acionamento de todas as válvulas através do acoplador óptico foi utilizada apenas para a automatização do tracionador, para as demais medições essas configurações foram desabilitadas através do diagrama de programação.

- **Programa *MET\_NUM\_L\_STRESS***

Este programa foi utilizado para a determinação dos tempos de percurso através dos métodos matemáticos discutidos nessa tese para uma melhor resolução na determinação das tensões atuantes. A formulação da correlação cruzada e da transformada de *Hilbert*, discutidas no capítulo 2, foram introduzidas na programação de forma que os tempos de percurso das ondas ultra-sônicas adquiridas e gravadas pelo programa *L\_STRESS V2.0* fossem carregadas e processadas por este programa. Como será visto com mais detalhes no capítulo 4, quando for discutida a aplicação experimental dos métodos, é necessário escolher valores iniciais e finais de tempos da onda ultra-sônica para a separação da onda de interesse para o caso do processamento da correlação cruzada. O programa mostra tanto o sinal original, adquirido do programa *L\_STRESS V2.0* e restaurado nesse programa, como também os gráficos mostrando a correlação cruzada do sinal de interesse e sua respectiva transformada de *Hilbert*. Outro gráfico mostrado é

o do sinal adquirido e interpolado. No ato em que o sinal original é carregado, o programa automaticamente reconhece qual a sua taxa de amostragem e através de um novo valor de amostragem ele ajusta uma nova curva para o dado escolhido.

A seqüência de processamento dos sinais é a seguinte: Inicialmente o sinal é carregado e dependendo do caso a ser utilizado, escolhe-se o valor da freqüência de amostragem para a interpolação do sinal; em seguida esse sinal interpolado é processado através do algoritmo de correlação cruzada e por fim a transformada de *Hilbert* do sinal adquirido pela correlação cruzada é calculada. Ao final de todo processamento, os valores dos tempos de percurso são vistos na tela para cada caso etapa. A figura 3.46 mostra a tela do programa.

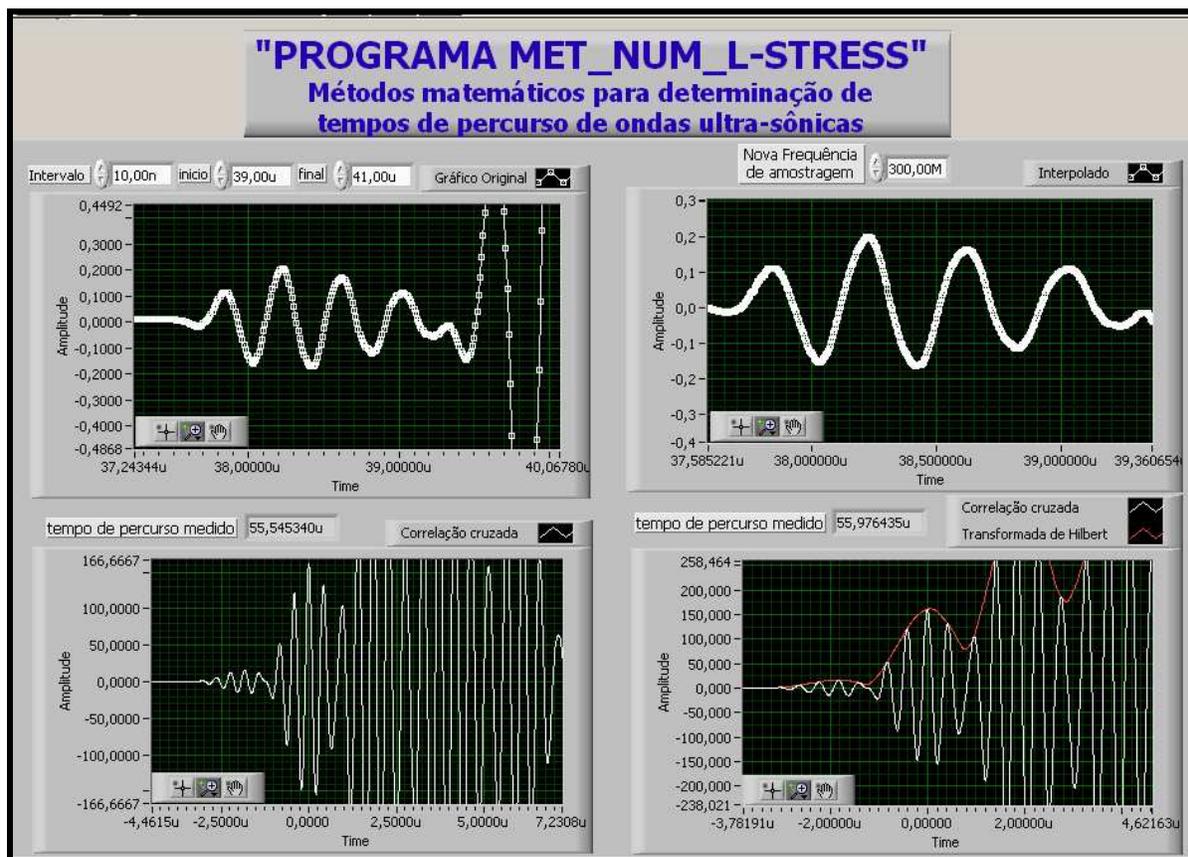


Figura 3.46: Tela mostrando o programa *MET\_NUM\_L\_STRESS*.

### 3.3 Procedimentos.

Os procedimentos mostrados fazem uso dos equipamentos descritos na seção anterior. Todos os procedimentos aqui mostrados usaram como plataforma de trabalho os programas apresentados no item anterior. Sempre será indicado o programa utilizado com seu respectivo nome e se foi necessário algum tipo de modificação desse para se adequar a cada procedimento de medição.

#### 3.3.1 Calibração dos transdutores com o bloco padrão.

Os transdutores de 2,25 MHz (0,5''x 1''), 3,5 MHz (0,5''x 1''), 5 MHz (0,5''x 1''), 2,25 MHz ( $\varnothing$  0,5'') e 5 MHz ( $\varnothing$  0,5'') foram calibrados. Cada transdutor foi colocado individualmente e diretamente sobre o bloco padrão de modo que a onda ultra-sônica percorresse a espessura de 100 mm como mostra a figura 3.47. A finalidade foi determinar a variação possível na resposta quando a mesma dimensão fosse medida. O método utilizado foi o pulso-eco.



Figura 3.47: Transdutores localizados sobre bloco padrão para calibração.

Em cada medição, o transdutor ultra-sônico foi retirado e uma nova camada de fluido acoplante foi colocada. Foram realizadas três medições para cada transdutor. O programa utilizado para análise dos resultados foi o *MET\_NUM\_L\_STRESS* e para a aquisição dos dados foi utilizado uma modificação do programa *L\_STRESS V2.0*.

A metodologia básica foi apenas adquirir o sinal da onda com o programa *L\_STRESS V2.0*, desabilitando as opções de acionamentos das válvulas e equipamentos. Essa modificação foi feita diretamente na programação, fazendo com que o programa apenas adquirisse o sinal e gravasse em arquivo. Cada sinal gravado foi carregado no programa *MET\_NUM\_L\_STRESS* para análise e determinação dos tempos de percurso.

### 3.3.2 Cálculo das espessuras das chapas utilizadas para confecção do duto.

O transdutor utilizado para cálculo das espessuras foi o de 2,25 MHz ( $\varnothing$  0,5"). Essas medidas foram realizadas no duto em posições pré determinadas. Como no caso anterior, o método utilizado foi o pulso-eco. Foram realizadas medições na direção longitudinal e radial do duto. Três pontos foram escolhidos para a direção longitudinal e sete pontos para a direção radial. Os pontos na direção radial foram relacionados com posições angulares. Foi chamado de ponto 1 a posição situada na linha neutra relativa ao ângulo de zero graus e à direita da válvula com engate rápido. Para facilidade de entendimento, sempre que for citado os pontos de medição no decorrer do trabalho, eles serão chamados pelo número seguido entre parênteses pelo seu respectivo ângulo, por exemplo: 1(0°). Sendo assim os outros pontos escolhidos foram: 2(45°); 3(90°); 4(135°); 5(180°); 6(315°); 7(225°). A figura 3.48 mostra o desenho com os pontos da direção radial.

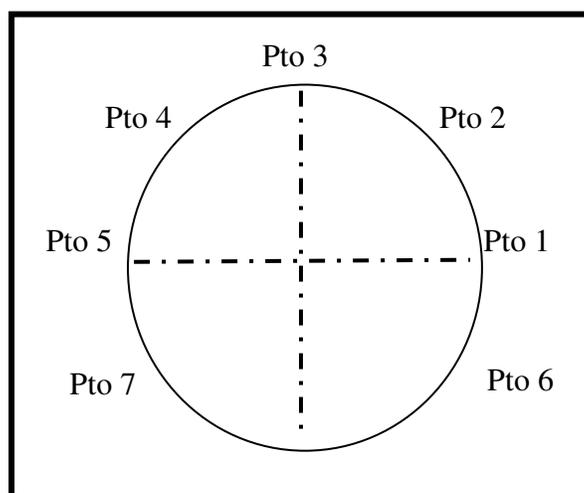


Figura 3.48: Pontos na direção radial do duto.

No caso da direção longitudinal foi escolhido como ponto de referência o centro do duto. Este ponto foi designado com o próprio número citado anteriormente. Dois outros pontos foram escolhidos, a direita e a esquerda do ponto principal (central), tomando como referência a válvula com engate rápido à esquerda do ponto 1. A distância desses pontos foi de 160 mm. Para o ponto da direita foi colocado o subscrito d e para o da esquerda o subscrito e. Por exemplo: 1d, 1e.. Os outros seis pontos relativos as posições radiais seguem o mesmo conceito.

Escolhidos os locais de medição, o primeiro ponto para determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica foi o 1(0°). Foi então colocado o fluido acoplante e o transdutor diretamente em contato com o duto. Como essa aplicação foi feita diretamente com a mão e sem o controle de força, foi necessário um certo cuidado para que as medições fossem feitas sempre na mesma posição para evitar erros. Três medidas foram feitas, sempre colocando fluido acoplante a cada medida. Os pontos seguintes de medição foram o 1e(0°) e 1d(0°), seguidos pelos pontos 2(45°), 2e(45°) e 2d(45°) e assim sucessivamente até o ponto 7. A figura 3.49 mostra o transdutor colocado sobre o duto pronto para medição.



Figura 3.49: Transdutor ultra-sônico de 2,25 MHz colocado sobre duto para medição de espessura.

Os programas utilizados foram os mesmos do caso anterior. Programa *L\_STRESS V2.0* modificado para adquirir e gravar o sinal das ondas ultra-sônicas e o programa *MET\_NUM\_L\_STRESS* para leitura desses sinais e processamento.

### 3.3.3 Determinação do módulo de elasticidade.

A frequência do transdutor utilizado para o levantamento do módulo de elasticidade foi de 5 MHz. Foram utilizados tanto o transdutor que gera ondas longitudinais como o que gera ondas transversais. O método foi o pulso-eco. As dimensões dos elementos piezelétricos foram de 0,5'' e 0,25'' respectivamente. Os pontos escolhidos seguiram a mesma nomenclatura já citada anteriormente, com a adição de pontos intermediários entre os pontos principais, estes pontos foram chamados de: e' e d'. Os sete pontos na direção radial continuaram os mesmos nessas medições. A figura 3.50 mostra os transdutores longitudinal e transversal na posição de medição.



Figura 3.50: Transdutores ultra-sônicos de 5 MHz colocados sobre duto para medição do módulo de elasticidade.

Os tempos de percurso nesse caso devem ser determinados para os dois tipos de transdutores, geração de ondas longitudinais e transversais, como foi visto no capítulo 2. Nota-se aqui que o tipo de fluido acoplante muda para cada tipo de transdutor. Para o transdutor longitudinal o mesmo fluido acoplante utilizado anteriormente é aplicado. No caso do transdutor transversal um outro tipo de fluido acoplante é utilizado, a glucose de milho, um acoplante viscoso apropriado para esse tipo de transdutor (Bittencourt, 2000).

O primeiro ponto para a realização das medições foi o  $1e(0^\circ)$ , seguido dos pontos  $1e'(0^\circ)$ ,  $1(0^\circ)$ ,  $1d'(0^\circ)$  e  $1d(0^\circ)$ . Terminada as medições nessa direção longitudinal foram realizadas medições nas posições radial 2,  $2e(45^\circ)$ ,  $2e'(45^\circ)$ ,  $2(45^\circ)$ ,  $2d'(45^\circ)$  e  $2d(45^\circ)$ , e assim sucessivamente até o ponto 7.

Devido à diferença de fluido acoplante o transdutor que gera ondas longitudinais foi o primeiro a ser utilizado em todos os pontos já citados, devido á facilidade de limpeza do fluido. Após essas medições o duto foi limpo e o transdutor que gera ondas transversais foi utilizado nos mesmos pontos. Para esse transdutor em cada ponto as duas direções principais X e Y foram medidas. A temperatura ambiente foi mantida em  $20^\circ\text{C}$ .

Para a utilização do transdutor longitudinal o mesmo cuidado já citado em relação à força e posicionamento foi tomado. Esse tipo de controle deve ser muito mais rigoroso para o caso do transdutor transversal. Como o fluido acoplante, glucose de milho, é muito mais viscoso que o óleo mineral utilizado para o transdutor longitudinal, uma camada mais espessa surge entre transdutor e a peça e essa camada deve ser controlada de alguma forma para que ela seja sempre a mesma, para que as medidas do tempo de percurso não sofram nenhuma modificação indesejada. Como já é conhecido (Andrino,2003), diferenças na ordem de milímetros do espaço percorrido pela onda ultra-sônica podem acarretar diferenças grandes de tempo de percurso, que podem influenciar significativamente na determinação do valor correto de tensão.

Para controlar essa influência foi utilizado o programa *ULTRA\_TEST*, detalhado na seção anterior. Antes da aquisição e gravação do sinal propriamente dito, este é visto diretamente na tela do programa em tempo real para verificar o aspecto do sinal. Inicialmente o sinal não aparece na tela do programa ou tem uma amplitude muito pequena. Após algum tempo o sinal vai aumentando em amplitude até chegar a um valor fixo.

Com essa metodologia definida os sinais das ondas ultra-sônicas geradas por ambos os transdutores puderam ser adquiridos, gravados e analisados. Abaixo está a seqüência do procedimento utilizada para um ponto, que será seguido para outros até a finalização do experimento.

a-) Aquisição e gravação do sinal ultra-sônico gerado pelo transdutor longitudinal para cada ponto definido, colocando o transdutor em cada posição três vezes, sempre adicionando uma nova camada de fluido acoplante (óleo mineral). O programa utilizado foi o *L\_STRESS V2.0* modificado.

b-) Visualização do sinal ultra-sônico de onda cisalhante na tela do programa *ULTRA\_TEST*. Tempo de espera para todas as medidas entre 25 e 30 segundos até que a amplitude do sinal ultra-sônico se estabilize em um patamar.

c-) Aquisição e gravação do sinal ultra-sônico para cada ponto três vezes. As medidas foram feitas nas duas direções principais, X e Y, como citado anteriormente. As medidas foram feitas primeiro na direção Y e depois na direção X. No intervalo de cada medição o transdutor foi retirado, mais fluido acoplante foi adicionado, o sinal foi novamente visto no programa *ULTRA\_TEST*, o mesmo tempo de espera foi respeitado e novamente o sinal foi adquirido e gravado. Lembrando que o programa para a aquisição e gravação do sinal é o *L\_STRESS V2.0* modificado.

d-) Leitura dos dados e análise dos resultados no programa *MET\_NUM\_L\_STRESS*.

### **3.3.4 Determinação de tensões atuantes no duto através do método da birrefringência acústica.**

Como visto no capítulo 2, para a determinação das tensões através da birrefringência acústica, as duas direções de polarização devem ser medidas. Foi visto também que esse é um método exclusivo para utilização de transdutores que geram ondas transversais, assim o transdutor utilizado aqui foi o V156-RB com diâmetro do elemento piezelétrico de 0,25". Os pontos escolhidos para as medições foram: 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). O procedimento utilizado foi o mesmo do caso anterior a partir do item b). A diferença aqui é que para cada medida, em cada ponto escolhido, uma pressão diferente é aplicada no duto através da bomba para teste hidrostático.

O duto detalhado no item 3.1.1 foi preenchido com água misturada com óleo solúvel. O óleo é da marca *Castrol*, tipo *COOLEGE BI*. Este óleo foi escolhido pois ele é usado

habitualmente como fluido hidráulico na forma de emulsões óleo-água. Além disso possui propriedades adequadas, tais como evitar a corrosão e produzir emulsões com grande estabilidade e alto poder lubrificante e refrigerante, mesmo em baixas concentrações. A proporção utilizada para a mistura foi de 6 litros de óleo para cada 96 litros de água, proporção essa recomendada pelo catálogo do fabricante.

Para a colocação da mistura óleo-água no interior do duto este foi posicionado na posição vertical, de modo a evitar a permanência de ar no seu interior. Com esse ainda na posição vertical, as conexões foram rosqueadas nos dois orifícios existentes no flange. Após essa etapa, o duto foi colocado na posição horizontal com um guindaste (girafa), sobre os perfis em I, como mostrado e explicado no item 3.1.1. Em seguida a mangueira da bomba para teste hidrostático foi conectada diretamente ao engate rápido. A figura 3.51 mostra o detalhe da válvula de retenção tipo esfera, engate rápido e mangueira da bomba interligados.



Figura 3.51: Conjunto válvula de esfera, engate rápido e mangueira de alta pressão para utilização em duto para teste hidrostático.

Nota-se ainda a partir dessa figura a alavanca da válvula de esfera que é usada para abrir ou fechar a entrada de mistura água-óleo que vem da bomba. Uma vez o sistema pressurizado e essa

alavanca fechada, a mangueira da bomba pode ser desconectada através do engate rápido e as medidas podem ser feitas com mais segurança uma vez que a capacidade da válvula é de 7500 PSI. Desse modo a pressurização do sistema não fica dependente apenas das válvulas da bomba.

A pressão máxima escolhida para estes testes e para o restante das medições experimentais dessa tese foi de 30 bar em passos de 5 bar. Através de fórmulas específicas (Peixoto, 2007) e das especificações e características do material do duto, foi obtida a máxima pressão que pode ser aplicada. Foi determinado que a pressão máxima de trabalho deve ser inferior a 70 bar. Como o duto já veio construído e desconhecendo seu projeto, optou-se por aplicar menor pressão para os testes realizados.

### **3.3.5 Determinação das forças de aplicação do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ sobre duto com posicionador dinâmico.**

Para a correta determinação dos tempos de percurso utilizando ondas ultra-sônicas é importante que a força de aplicação sobre o conjunto de transdutores seja conhecida e sempre a mesma.

Para a determinação dessas forças o procedimento utilizado foi colocar pressões crescentes nos cilindros pneumáticos através da válvula proporcional. Foi definido tensões elétricas de 0,5 em 0,5 volt, iniciando em 2,5 volts e finalizando em 9,5 volts. Para cada tensão elétrica a pressão foi calculada. As respectivas pressões para cada tensão elétrica estão mostradas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Valores de pressão para determinação das forças de aplicação sobre duto.

<b>Tensão (volts)</b>	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
<b>Pressão (bar)</b>	73,6	88,4	103,1	117,8	132,5	147,3	161,9	176,7
<b>Tensão (volts)</b>	6,5	7	7,5	8	8,5	9,0	9,5	
<b>Pressão (bar)</b>	191,4	206,2	220,9	235,6	250,3	265,1	279,8	

A primeira pressão escolhida foi equivalente a 2,5 volts devido a falta de sensibilidade da válvula proporcional que só era acionada a partir desse valor.

Definidas as tensões elétricas e conseqüentemente as pressões, o passo seguinte foi a determinação dos tempos de percurso relativos a cada pressão aplicada. O controle das tensões elétricas da válvula proporcional e o acionamento da subida e descida dos cilindros pneumáticos foi realizado pelo programa “*Measurement & Automation*”, descrito na seção anterior. As válvulas do painel utilizadas nesse caso foram as válvulas proporcional e direcional ( 1 entrada – 1 saída). As outras válvulas utilizadas foram as que estão acopladas no posicionador dinâmico como descrito em seções anteriores.

Foram realizados levantamentos com os transdutores de 2,25 MHz (0,5” x 1”), 3,5 MHz (0,5” x 1”), 5 MHz (0,5” x 1”) e 5 MHz ( $\varnothing$  0,5”). Os dois tamanhos de conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  foram utilizados. O primeiro conjunto para a realização dos experimentos foi montado com o transdutor de 5 MHz ( $\varnothing$  0,5”) sobre o conjunto pequeno. Ele foi colocado no ponto 3(90°) na direção longitudinal do duto como mostra a figura 3.52. A temperatura para o levantamento foi mantida constante.

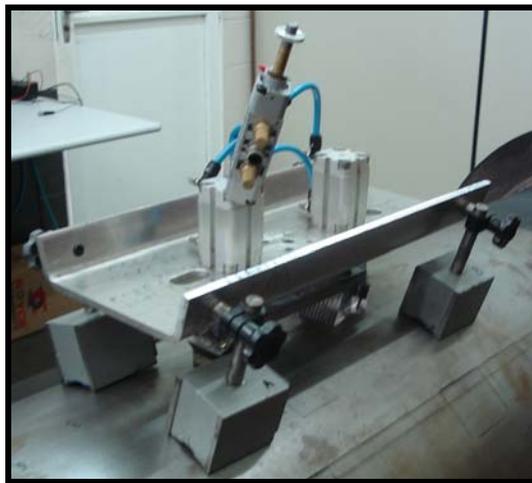


Figura 3.52: Posicionador dinâmico para medição da influência da força aplicada sobre o tempo de percurso da onda ultra-sônica.

O procedimento adotado é mostrado a seguir:

- a-) Colocação do posicionador dinâmico na posição escolhida, 3(90°) para o caso desse levantamento.
- b-) No programa “*Measurement & Automation*” ajustar tensão elétrica para 2,5 volts.

- c-) Colocar camada de fluido na área de medição.
- d-) Acionar acoplador óptico 2 para o conjunto de transdutores, aplicando a força sobre o duto.
- e-) Adquirir e gravar os sinais com o programa *L\_STRESS V2.0* modificado.
- f-) Desligar o acoplador óptico 2 para o conjunto de transdutores, desaplicar a força sobre o duto.
- g-) Repetir itens b-), c-), d-) e-) f-) ajustando a tensão elétrica para 3 volts repetindo a operação até 9,5 volts.
- h-) Com os dados gravados utilizar o programa *MET\_NUM\_L\_STRESS* para análise dos dados.

O procedimento descrito acima foi repetido para os demais transdutores. Foi necessário especial cuidado na hora da desmontagem e montagem do posicionador dinâmico e transdutores, de modo que essa montagem fosse sempre semelhante.

### **3.3.6 Levantamento da influência da temperatura sobre tempo de percurso.**

A temperatura tem influência significativa nos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas. É importante saber separar e quantificar essa influência sobre as demais.

Como visto, o percurso que a onda ultra-sônica faz entre o transdutor emissor e o receptor passa por dois tipos de materiais. As sapatas de acrílico que acomodam os transdutores e o material utilizado para as medições. Esses dois materiais são influenciados de forma diferente pela temperatura.

Para a verificação dessa influência, os materiais foram analisados separadamente e dois tipos de condição de medição foram testadas: (a) equipamento completo com os materiais analisados sofrendo a ação do aquecimento do ambiente, e (b) apenas os materiais analisados sofrendo a ação do aquecimento com o sistema completo permanecendo no ambiente com temperatura controlada e constante. Um terceiro tipo de influência analisado foi o do posicionador dinâmico colocado diretamente sobre o duto, para o levantamento da curva da influência da temperatura sobre o tempo de percurso para o conjunto completo. Essa curva foi utilizada para correção dos tempos de percurso para futuras medições em campo. As duas situações de medição e seus procedimentos são explicados a seguir.

### 3.3.6.1 Aparelhagem completa e materiais sofrendo ação da temperatura.

Para início dos testes o laboratório precisou ser resfriado a uma temperatura pré-determinada. No dia anterior aos testes o ar condicionado foi ligado de forma que todos os equipamentos e materiais estivessem na mesma temperatura. Tomou-se o cuidado de preparar os materiais e equipamentos antes desse resfriamento de modo que houvesse o mínimo contato manual com as peças para não haver nenhum tipo de influência nas medidas do tempo de percurso.

Com as devidas modificações no excitador-receptor de pulsos, os experimentos foram iniciados para a temperatura em que o laboratório se encontrava. Dois transdutores de 2,25 MHz (1" x 0,5") e o transdutor de 2,25 MHz ( $\varnothing$  0,5") foram utilizados. Para a verificação da influência da temperatura na determinação do tempo de percurso no acrílico, dois caminhos para que a onda ultra-sônica percorresse foram analisados. Primeiramente o transdutor de 2,25 MHz ( $\varnothing$  0,5") foi posicionado sobre a sapata de modo que a onda ultra-sônica percorresse a distância de 30 mm. Num segundo conjunto de medições, o transdutor de 2,25 MHz (1" x 0,5") foi posicionado para que a distância percorrida fosse 10 mm. As dimensões das peças foram determinadas medindo-se diretamente a peça com paquímetro. A figura 3.53 mostra os transdutores posicionados para as medições citadas.

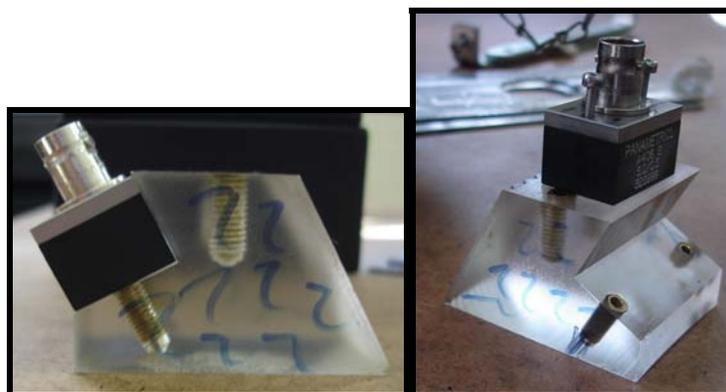


Figura 3.53: Peças de acrílico utilizadas para determinação da influência da temperatura sobre tempo de percurso.

Para o aço o transdutor de 2,25 MHz (1" x 0,5") foi usado e a distância percorrida foi igual a 10,8 mm. Para todos os casos o fluido acoplante foi colocado entre peça e transdutor uma única vez. As medidas foram realizadas nessa configuração até a leitura da última temperatura. Onze temperaturas diferentes foram utilizadas para as determinações dos tempos de percurso. Cada temperatura foi medida com o termopar colocado sobre o material e foi registrado e gravado seu valor através do programa *TEMP\_PAR*. A primeira medida foi feita com dois aparelhos de ar-condicionado ligados no laboratório, que mantiveram o ambiente com temperatura estável. A regulação do ar-condicionado foi modificada no final de cada medida do tempo de percurso de modo que a temperatura aumentasse gradativamente até a próxima medição. Em horários variados os tempos de percurso foram registrados e as temperaturas anotadas e gravadas.

O programa utilizado para aquisição e gravação dos dados foi o *L\_STRESS V2.0* modificado e para análise dos dados o *MET\_NUM\_L\_STRESS*.

### **3.3.6.2 Apenas os corpos de prova (C.P.) sofrendo ação da temperatura.**

As mesmas condições de temperatura e cuidados relativos à preparação das peças para início dos testes foram utilizadas nesse caso. O procedimento adotado neste caso foi aquecer os C.P. fora do laboratório enquanto o sistema completo permanecia sob temperatura controlada. A primeira medição foi idêntica ao caso anterior, a aparelhagem e os C.P. foram preparados para medição no dia anterior e ficaram sobre a ação do ar-condicionado do laboratório durante um longo período para equalização da temperatura. O fluido acoplante também foi colocado entre o C.P. e o transdutor, uma única vez, e as medições foram feitas sem a retirada dos transdutores colocados sobre os C.P. Foram utilizadas as mesmas frequências dos transdutores ultra-sônicos do caso anterior e das duas peças de acrílico usadas apenas a com espessura igual a 10 mm foi utilizada aqui. A peça de aço foi a mesma. As medidas no acrílico e na peça de aço foram feitas utilizando o método pulso-eco colocando os transdutores diretamente sobre as peças.

Um terceiro procedimento foi realizado, o C.P. de aço utilizado para o levantamento das constantes acustoelásticas foi colocado no posicionador estático e a influência da temperatura também foi verificada. A diferença foi que o conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$ , constituído por, barra de

aço, sapatas de acrílico e transdutor ultra-sônico permaneceu em temperatura controlada, diferentemente das medidas feitas com o método pulso-eco, nos quais os transdutores ultra-sônicos também foram juntos com os C.P. para a parte externa do laboratório para aquecimento. Após a primeira medição com os equipamentos e C.Ps. em condições controladas de temperatura, os C.Ps. foram retirados do laboratório e, após mais ou menos duas horas, tempo necessário para que as peças chegassem a temperatura externa, eles novamente foram levadas para o laboratório e os tempos de percurso e as temperaturas foram medidos. Além dessas duas temperaturas uma terceira temperatura foi utilizada, colocando dessa vez os C.Ps dentro de um automóvel ao sol, para que esse sirva de estufa, para que as temperaturas dos C.Ps ultrapassassem os 40 °C.

### **3.3.6.3 Influência da temperatura sobre o posicionador dinâmico.**

O último teste da influência da temperatura sobre o tempo de percurso foi feito com o posicionador dinâmico colocado diretamente sobre o duto. A força de aplicação sobre o conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  utilizado na construção do posicionador dinâmico foi de 330 N, e os transdutores de 2,25 MHz (1" x 0,5") foram utilizados. Como esse é um caso semelhante ao item 3.3.6.1, os mesmos procedimentos foram adotados. Uma diferença é que nesse caso a camada de fluido acoplante foi adicionada antes de cada medição. Quinze medições do tempo de percurso em temperaturas diferentes foram gravados. O termopar foi posicionado sobre o duto ao lado do posicionador dinâmico que foi colocado no ponto 3 (90°). Os programas utilizados na aquisição e gravação dos dados, leitura e processamento e aquisição das temperaturas usados nos outros procedimentos foram também utilizados nesse levantamento.

### **3.3.7 Determinação das tensões mecânicas no duto através de extensômetros.**

Medições experimentais, sempre que possível, devem ser comparadas com outros métodos experimentais reconhecidos como válidos. Para a verificação das tensões aplicadas no duto medidas com ultra-som, estas foram comparadas com as tensões determinadas com extensômetros. A máxima pressão aplicada na bomba para pressurizar o sistema e os passos dessas pressões foram os mesmos utilizados para o levantamento das tensões com ultra-som. Durante todo o experimento a temperatura permaneceu constante. A leitura dos dados foi

realizada pelo programa *STRESS\_GAGES*, utilizando os módulos que são acoplados no condicionador de sinais *NI SC-2345*, como foi descrito no item 3.2.7.4.

A leitura dos extensômetros foi feita em cada passo de pressão, no aumento ou redução desta (subida ou descida). Os extensômetros foram colados na posição média entre os pontos 2(45°) e 3(90°) para a parte superior do duto. Na parte inferior foram colados na posição oposta a 180° destes. Eles foram colados nas duas direções, longitudinal e transversal. Para a parte superior eles foram chamados de longitudinal superior e transversal superior e para posição oposta de longitudinal inferior e transversal inferior. Para cada passo de pressão, três medidas de deformação foram gravadas para o cálculo das tensões. A figura 3.54 mostra os extensômetros colados sobre o duto.

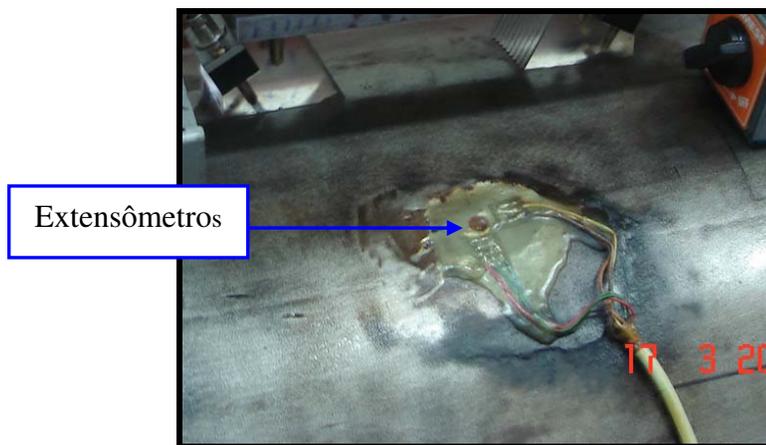


Figura 3.54: Extensômetros colocados sobre dutos para medições de tensões.

### 3.3.8 Determinação das tensões mecânicas na direção transversal do duto.

Para pressurização do duto os mesmo procedimentos citados anteriormente foram adotados. Para cada passo de pressão, o tempo de percurso da onda ultra-sônica foi adquirido e gravado. O posicionamento do conjunto ultra-sônico- $L_{cr}$  sobre o duto não foi feito pelo posicionador dinâmico e sim através de uma cinta de modo que as sapatas de acrílico pudessem ser assentadas de forma correta sobre o duto. As sapatas de acrílico estavam unidas por perfis em L, como mostra a figura 3.55. Esses perfis foram feitos de modo que a distância entre sapatas possa ser modificada. No caso destes testes a distância foi de 90 mm. O transdutor utilizado foi de 5 MHz

(1'' x 0,5''). Sapatas especiais de acrílico foram confeccionadas para esses testes. Os transdutores foram embutidos no acrílico e fixados por um parafuso para que esses não se movessem durante os testes.



Figura 3.55: Sapatas de acrílico unidas por perfis em L posicionadas sobre duto através de uma cinta.

Os pontos escolhidos para medições foram: 2(45°); 4(135°); 6(315°) e 7(225°). O primeiro ponto para medição foi o 2(45°), pois este está em um local no duto de fácil acesso e fixação da cinta com transdutores no duto. Diferentemente do posicionador dinâmico, nesse caso não foi criado um dispositivo especial de fixação dos transdutores sobre o duto. Em uma primeira tentativa utilizou-se o próprio aperto da cinta para fazer o posicionamento com pressão constante, mas surgiram dificuldades inesperadas. Primeiramente, foi difícil conseguir que os transdutores ficassem sempre na mesma posição em medidas diferentes; o aperto da cinta fez os transdutores escorregarem na direção radial do duto, ocasionando assim um descolamento das sapatas de acrílico e conseqüentemente levando a erros nas medições. Em alguns casos o sinal ultra-sônico não aparecia na tela do programa de aquisição. Um segundo problema foi a falta de repetibilidade da força de aplicação devido à construção da cinta, que apertava um dos lados enquanto o outro lado ficava frouxo. A solução encontrada então foi dar um primeiro aperto com a cinta para o fluido acoplante se espalhar de forma homogênea entre sapata e duto e, com a força manual, apenas encostando o transdutor sobre o duto, fazer as medições.

Definido esse procedimento de assentamento, as medidas puderam ser iniciadas. Como dito o primeiro ponto medido foi o 2 (45°). Três medições foram feitas em cada passo de pressão, de 0 até 30 bar. Salientando-se que nas três medidas de cada passo de pressão, o fluido acoplante foi adicionado apenas no início da medição, permanecendo os transdutores ultra-sônicos sobre o duto para a realização da segunda e terceira medida. O fluido acoplante foi adicionado sempre antes da variação da pressão hidráulica no duto. Todas as medições foram efetuadas com temperatura constante. Evitou-se ao máximo tocar nas sapatas de acrílico para não haver variação do tempo de percurso. A aquisição e gravação dos dados foram feitas pelo programa *L\_STRESS V2.0* modificado e o processamento pelo programa *MET\_NUM\_L\_STRESS*.

### **3.3.9 Determinação das tensões mecânicas na direção longitudinal do duto.**

Esta medição é a mais importante do trabalho pois os valores obtidos estão relacionados ao principal modo de falha dos dutos. Os pontos escolhidos para as medições destes testes foram: 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). O posicionador dinâmico foi utilizado e os transdutores de 2,25 MHz (0,5'' x 1''), 3,5 MHz (0,5'' x 1''), 5 MHz (0,5'' x 1'') e 2,25 MHz (0,5'') foram utilizados com as respectivas sapatas de assentamento. A pressurização do sistema foi realizada da mesma forma que nos casos anteriores; as pressões aplicadas seguiram as mesmas ordens de valores e passos de aplicação. Os procedimentos utilizados também foram os mesmos, porém eles serão aqui descritos novamente por simplicidade, já que alguns novos conceitos serão adicionados.

Os pontos principais de medição na direção radial encontram-se na região central do duto. Para cada ponto outros dois, na direção longitudinal, à direita e à esquerda foram medidos. Estes pontos estavam localizados a uma distância de 160 mm do centro e para sua designação, como em casos anteriores, foi utilizado o subscrito “d” ou “e” para indicar a posição à esquerda ou à direita do ponto principal da direção radial. Dessa forma doze pontos foram determinados para essas medições a saber: 2e(45°), 2(45°), 2d(45°); 4e(135°), 4(135°), 4d(135°); 6e(315°), 6(315°) 6d(315°); 7(225°)e, 7(225°) e 7(225°)d.

Para o início das medições, a temperatura no interior do laboratório foi mantida em cerca de 19 °C. O primeiro ponto de medida foi o 2e(45°), o transdutor montado no conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  foi de 2,25 MHz (0,5'' x 1'') e foi utilizado um transmissor e um receptor. As pressões utilizadas foram de 0 bar a 30 bar em passos de 5 bar. Para cada nível de pressão, o fluido acoplante foi colocado sobre a área de medição e três medidas foram feitas. O mesmo procedimento foi utilizado para os pontos 2 (45°) e 2d (45°). O sistema para laboratório foi utilizado e os procedimentos para acionamento das válvulas e controle dos cilindros pneumáticos sobre o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  estão descritos na seção 3.2.7.2. Esses procedimentos foram realizados para os outros pontos mantida a mesma temperatura,.

A etapa seguinte das medições foi esperar o laboratório aquecer, desligando os aparelhos de ar-condicionado, de forma que a temperatura atingisse cerca de 22,5°C. Nesse patamar de temperatura, todo o procedimento descrito foi repetido para todos os pontos. Para finalizar, mais uma vez, esperou-se o ambiente aquecer dentro do laboratório até a temperatura de 26°C, para uma nova etapa de medidas, com os mesmos procedimentos, para todos os pontos. A temperatura variou menos que 1°C entre medidas no mesmo patamar. As etapas descritas foram repetidas com os transdutores de 3,5 MHz (0,5'' x 1''), 5 MHz (0,5'' x 1'') e 5 MHz ( $\phi$  0,5') para uma única temperatura, 19 °C, e para os pontos 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). Os programas utilizados para esses experimentos foram o *L\_STRESS V2.0* modificado para aquisição e gravação dos sinais ultra-sônicos e o *MET\_NUM\_L\_STRESS* para leitura e processamento dos dados.

O ensaio seguinte foi realizado utilizando o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  com um transmissor e dois receptores. Os procedimentos foram os mesmos. A diferença é que apenas os pontos na direção radial, da parte central do duto foram utilizados, pontos 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). O controle para aquisição dos tempos de percursos foi feito com um equipamento montado para realizar a leitura dos receptores de forma independente. Isso é necessário, uma vez que o excitador-receptor de pulsos tem apenas uma entrada para a leitura do pulso ultra-sônico vindo do transdutor receptor. A figura 3.56 mostra o equipamento.

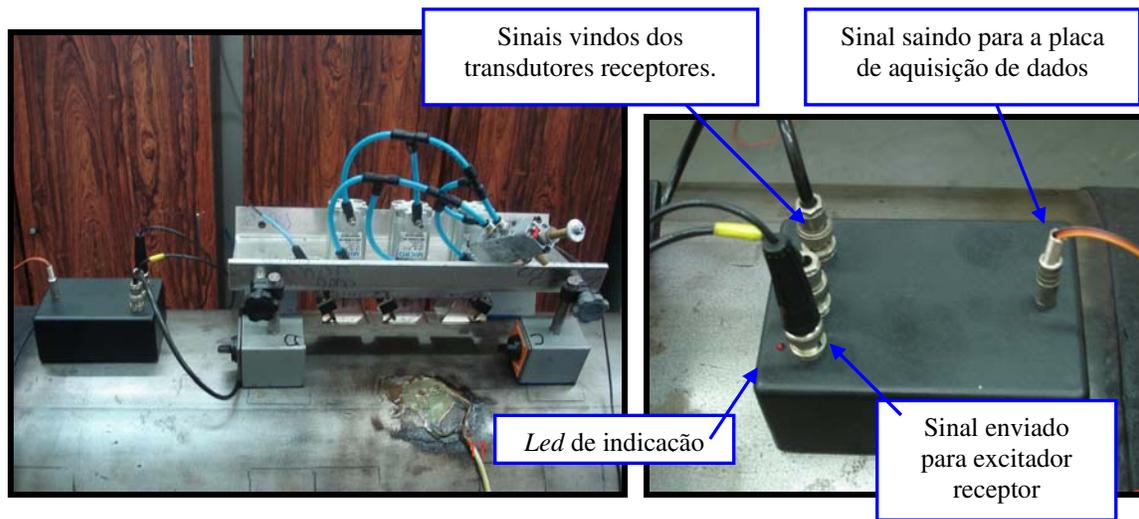


Figura 3.56: Equipamento utilizado para controle da leitura dos tempos de percurso dos transdutores receptores do conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$ .

A função básica desse equipamento é escolher qual transdutor receptor será utilizado para a leitura dos tempos de percurso. Esse controle é feito pela placa de aquisição onde o *plug* da direita do equipamento está ligado. Deste *plug* saem três fios que são ligados ou ao conector CB 68 LP ou ao condicionador NI SC-2345. Um fio é ligado ao canal chamado 5V, outro a um canal digital e o terceiro ao seu respectivo terra. Acionando-se o canal no qual foi ligado o fio, o *led* indicativo mostra qual receptor está sendo usado para leitura dos tempos de percurso. Através do programa de aquisição de dados o sinal é adquirido e gravado para posterior processamento para determinação do tempo de percurso. Uma vez desligado esse canal o comando se inverte e o outro receptor é acionado, o seu respectivo *led* de indicação acende e é feita a leitura do tempo de percurso para pós-processamento.

## Capítulo 4

### Avaliação comparativa dos métodos para determinação do tempo de percurso

Nesse capítulo será mostrada a aplicação de métodos matemáticos, tanto para o método pulso-eco como para o método de transmissão, que é usado para a geração das ondas  $L_{cr}$ . Serão mostradas as melhorias em relação a métodos anteriores, os problemas encontrados e como estes foram resolvidos. Determinado o melhor método, este será usado para o processamento dos sinais ultra-sônicos adquiridos. Os dois tipos de processamentos utilizados foram: correlação cruzada e a transformada de *Hilbert*. Outros tipos de métodos para determinação dos tempos serão mostrados também, mas eles não têm um método matemático complexo incorporado e os tempos de percurso serão determinados diretamente ou em combinação com a correlação cruzada e a transformada de *Hilbert*. Os métodos avaliados neste trabalho foram:

- Determinação do tempo de percurso através do segundo cruzamento com zero da primeira onda de chegada do trem de pulsos.
- Interpolação do sinal adquirido, seguido da determinação através do segundo cruzamento com zero
- Interpolação do sinal adquirido seguido de aplicação da correlação cruzada
- Interpolação do sinal adquirido seguido de aplicação da correlação cruzada e transformada de *Hilbert*.

#### 4.1) Metodologia para determinação dos tempos de percurso.

Para cada método, um tipo diferente de procedimento é necessário. A seguir cada método será descrito para mostrar o procedimento específico, detalhando como o sinal ultra-sônico é tratado para a obtenção do tempo de percurso.

##### 4.1.1) Tempo de percurso determinado pelo cruzamento com zero.

Para um melhor entendimento desse método, é necessário analisar a figura 4.1.

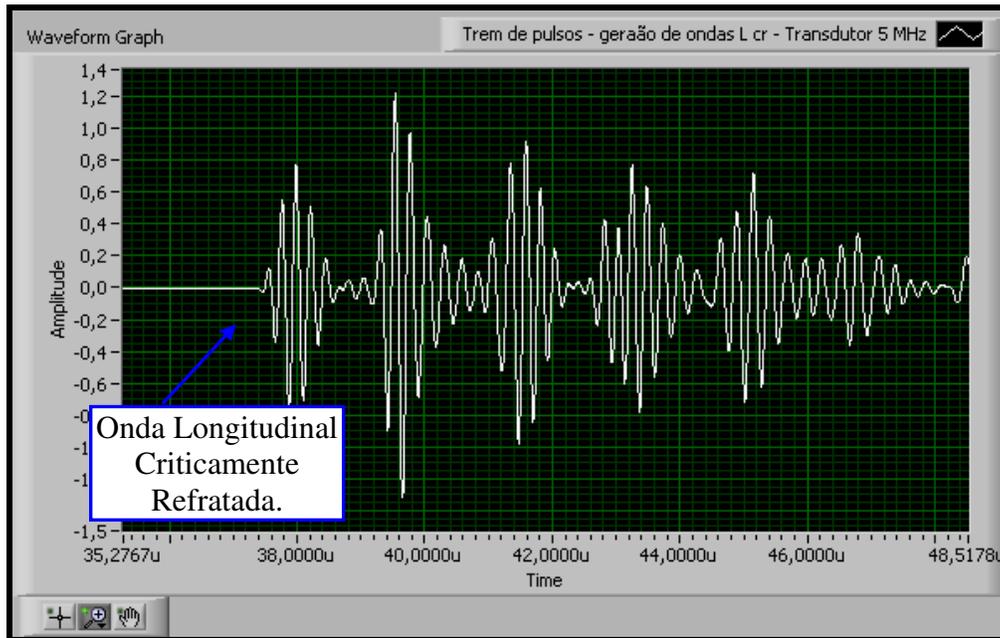


Figura 4.1: Trem de pulsos adquirido pelo método para geração de ondas  $L_{cr}$ .

Pela figura podemos observar um trem de pulsos. A primeira onda desse conjunto representa a onda ultra-sônica que percorre a superfície do material, a onda  $L_{cr}$ . Essa onda está mostrada em detalhe na figura 4.2

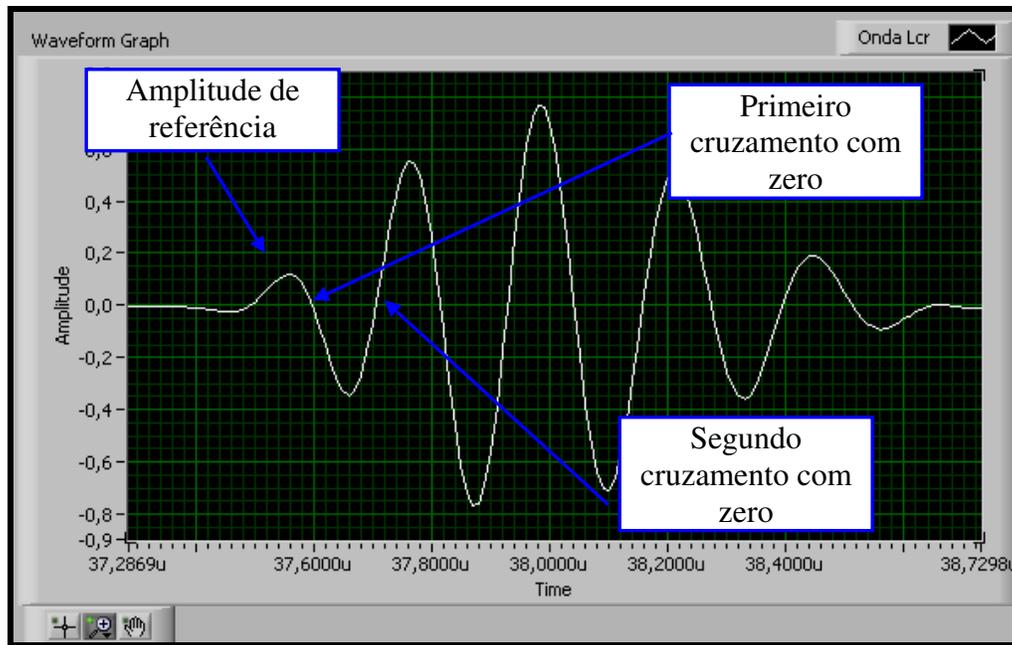


Figura 4.2: Detalhe da onda longitudinal criticamente refratada ( $L_{cr}$ )

A frequência de amostragem desse sinal, para o caso da figura mostrada, é de 100 MHz, o que acarreta em uma distância entre pontos que constituem a onda de 10 ns. Esse primeiro método de medida do tempo de percurso consiste em determinar o tempo do ponto inicial da onda, representado pelo *trigger*, até o cruzamento com o eixo X da primeira onda do trem de pulsos. Os pontos escolhidos que cruzam o eixo X, são o primeiro ou o segundo cruzamento com o zero após o primeiro pico da onda  $L_{cr}$ . A localização desses pontos é feita de forma automática pelos programas de aquisição de dados, sendo necessário apenas escolher entre o primeiro cruzamento ou o segundo cruzamento com o zero.

Essas considerações são utilizadas para o caso da determinação através do método de medição com ondas  $L_{cr}$ . O método pulso-eco também pode ser utilizado com a determinação através do cruzamento com o zero, a diferença é que o tempo de percurso da onda ultra-sônica é determinado através de duas ondas consecutivas, e a posição de referência para a determinação dos cruzamentos com o zero normalmente é o pico máximo da onda. Esse sinal pode ser visto na figura 4.3.

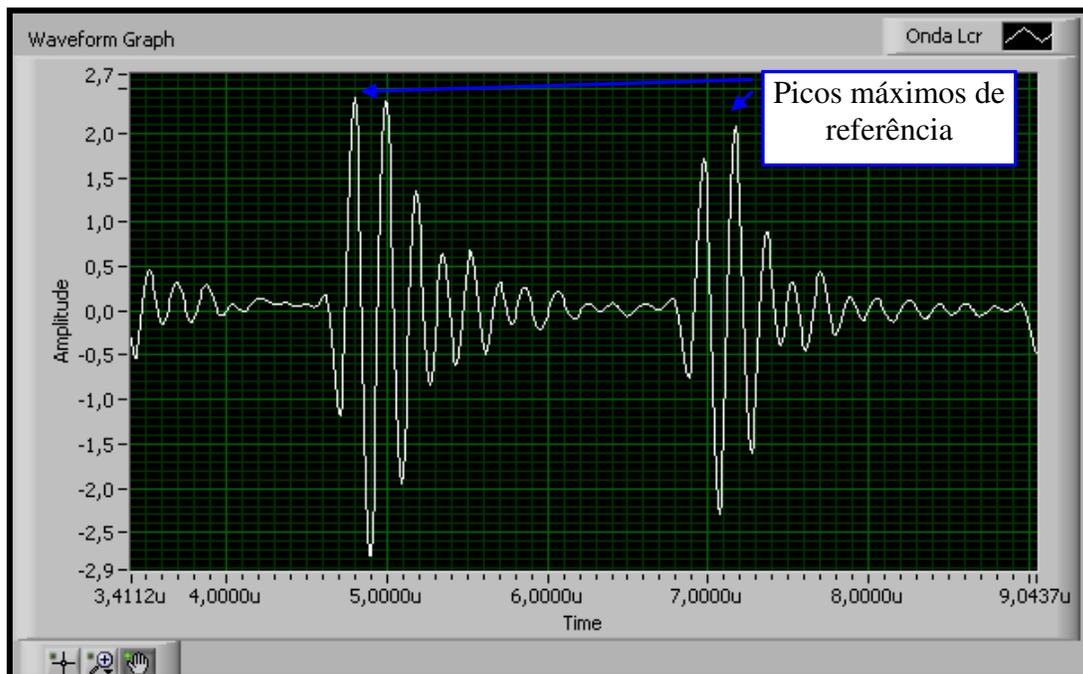


Figura 4.3: Ondas geradas através do método pulso-eco.

#### 4.1.2) Tempo de percurso determinado pela correlação cruzada.

Esse método de medida do tempo de percurso consiste em separar a primeira onda do trem de pulsos, onda  $L_{cr}$ , e correlacioná-la com o sinal completo. Isso significa que cada ponto do sinal separado é multiplicado e somado a todos os outros pontos do sinal, resultando em uma outra função, cujo máximo indica o valor do atraso entre os dois sinais.

O sinal foi separado através do programa *MET\_NUM\_L\_STRESS*. Para se separar o primeiro eco do sinal escolhe-se o ponto inicial e final fornecendo valores de tempo na tela principal do programa, o restante do sinal é zerado de forma a gerar apenas o sinal que será correlacionado (figura 4.4).

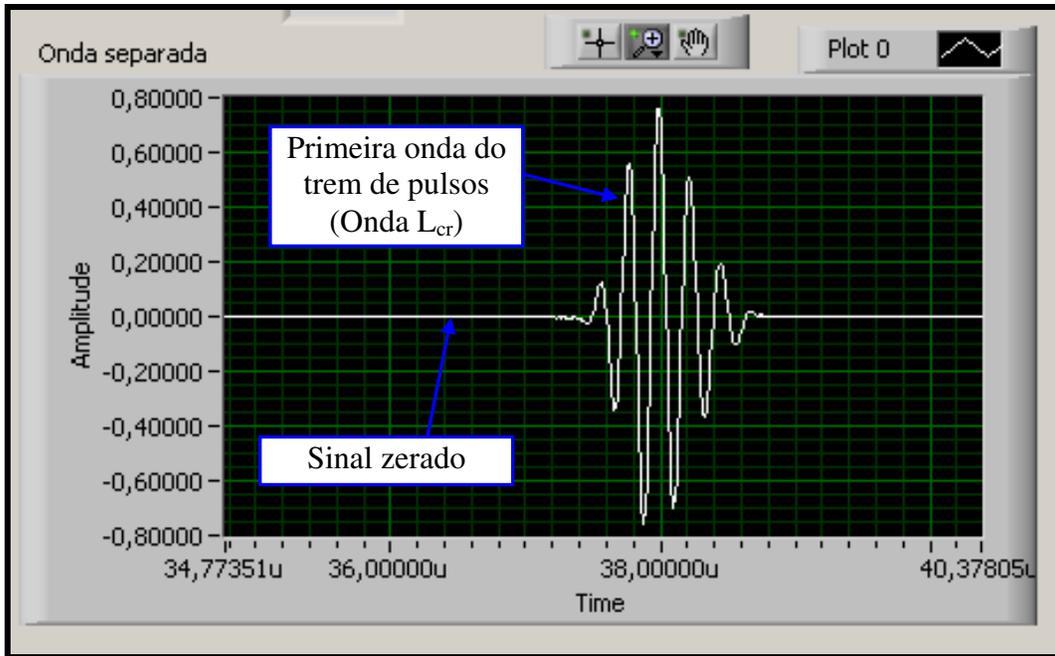


Figura 4.4: Primeiro eco do sinal para aplicação da correlação cruzada (onda  $L_{cr}$ ).

A figura 4.5 mostra o sinal completo dessa mesma onda e a figura 4.6 o resultado da correlação cruzada mostrando, no detalhe, o pico máximo que corresponde ao valor da correlação entre os dois sinais.

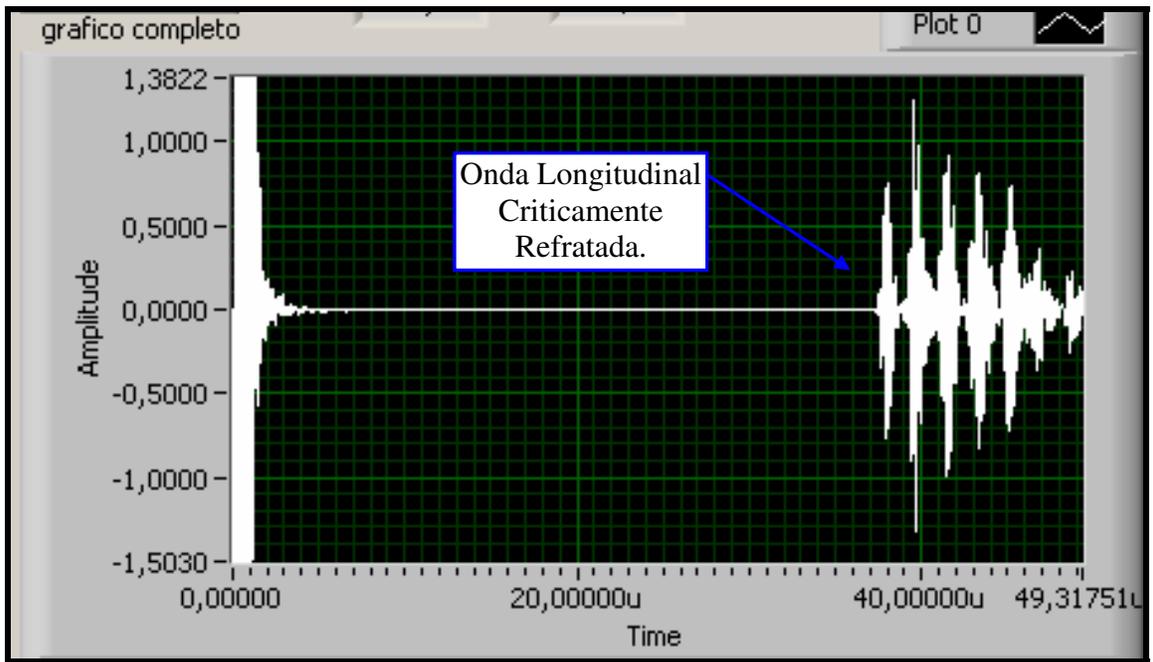


Figura 4.5: Trem de pulsos completo do sinal ultra-sônico (onda  $L_{cr}$ )

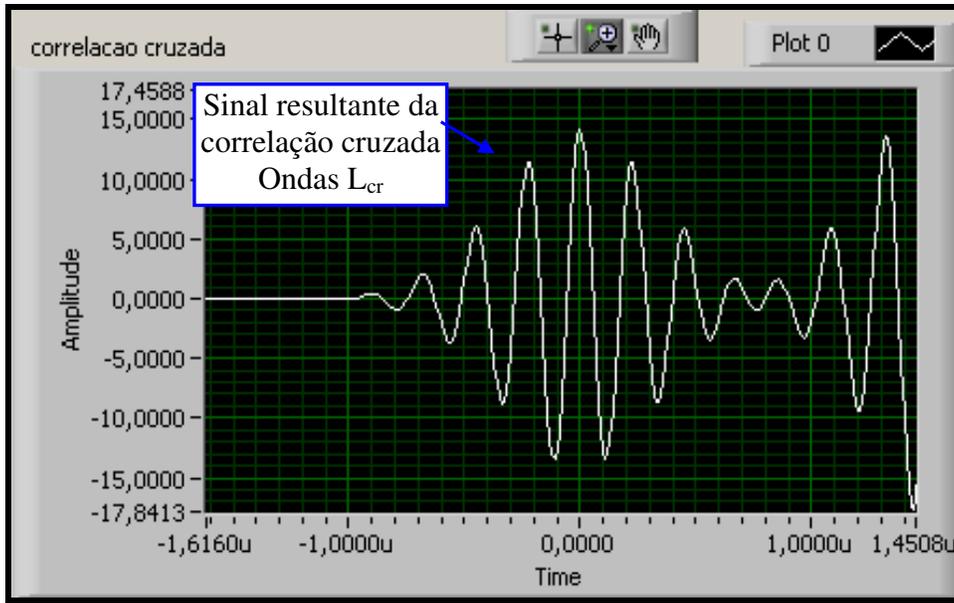


Figura 4.6: Resultado da correlação cruzada entre os sinais (onda  $L_{cr}$ )

Para o caso exposto os sinais foram adquiridos através do método de geração de ondas longitudinais criticamente refratadas. Para o caso do método pulso-eco, as mesmas considerações podem ser feitas, apenas tomando o cuidado da escolha certa do sinal que será separado para a realização da correlação com o seu respectivo sinal completo. As figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram respectivamente o sinal completo, o sinal separado e a correlação cruzada para o caso do método pulso-eco.

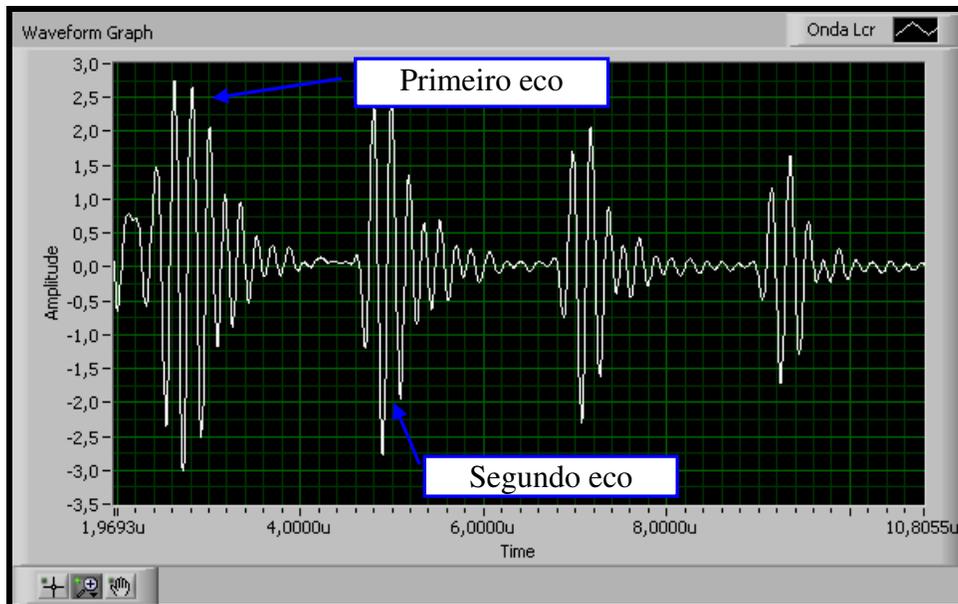


Figura 4.7: Trem de pulsos completo do sinal ultra-sônico adquirido (pulso-eco).

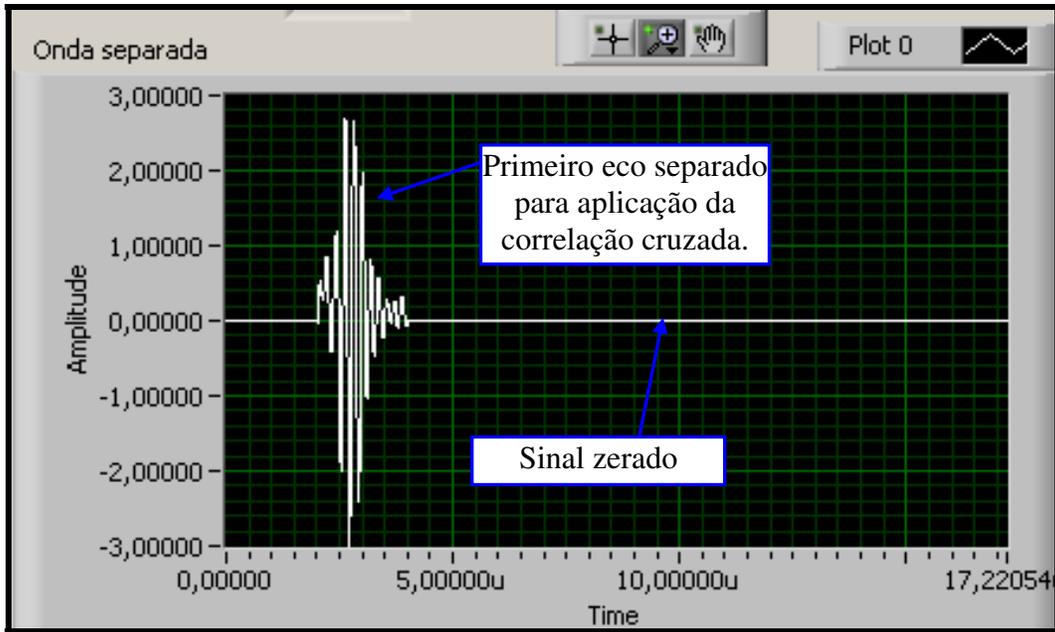


Figura 4.8: Primeiro eco do sinal para aplicação da correlação cruzada (pulso-eco).

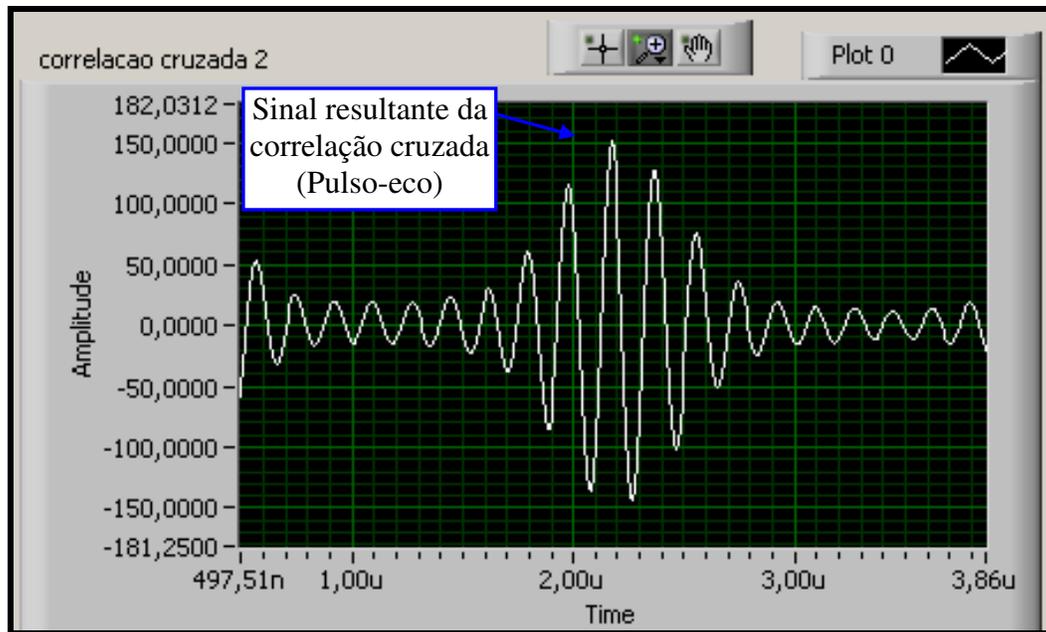


Figura 4.9: Resultado da correlação cruzada entre os sinais (pulso-eco).

#### 4.1.3) Tempo de percurso determinado pela transformada de *Hilbert* aplicada após correlação cruzada.

A determinação do tempo de percurso através do método ultra-sônico num determinado meio pode ser realizada utilizando-se a transformada de *Hilbert*. O sinal que será aplicado à

transformada de *Hilbert* é a correlação cruzada entre o sinal separado, primeira onda do trem de pulsos para o caso de ondas  $L_{cr}$  ou primeiro eco para caso do método pulso-eco, e a onda completa como mostrado no item anterior. A correlação cruzada entre o sinal original e o sinal separado é definida pela equação 2.90, mostrada no capítulo 2, seção 2.2.4.1. As figuras 4.6 e 4.9 da seção anterior mostram os resultados dessas correlações para os casos da geração de ondas  $L_{cr}$  e pelo método pulso-eco, respectivamente. Essas considerações são citadas aqui novamente por conveniência.

A segunda etapa do processo para levantamento dos tempos de percurso é a determinação da amplitude e frequência instantânea a partir da extensão analítica  $z(t)$  associada ao sinal de correlação cruzada  $R_A$ . Esse procedimento foi descrito com as equações de (2.93) a (2.99), do capítulo 2, seção 2.2.4.1, substituindo-se a variável independente  $x(t)$  nessas equações pelo sinal de correlação cruzada  $R_A$ . A figura 4.10 mostra a amplitude instantânea relacionada ao sinal da figura 4.9, que é relacionada ao sinal pulso-eco. As mesmas considerações podem ser feitas para as ondas geradas pelo método  $L_{cr}$ .

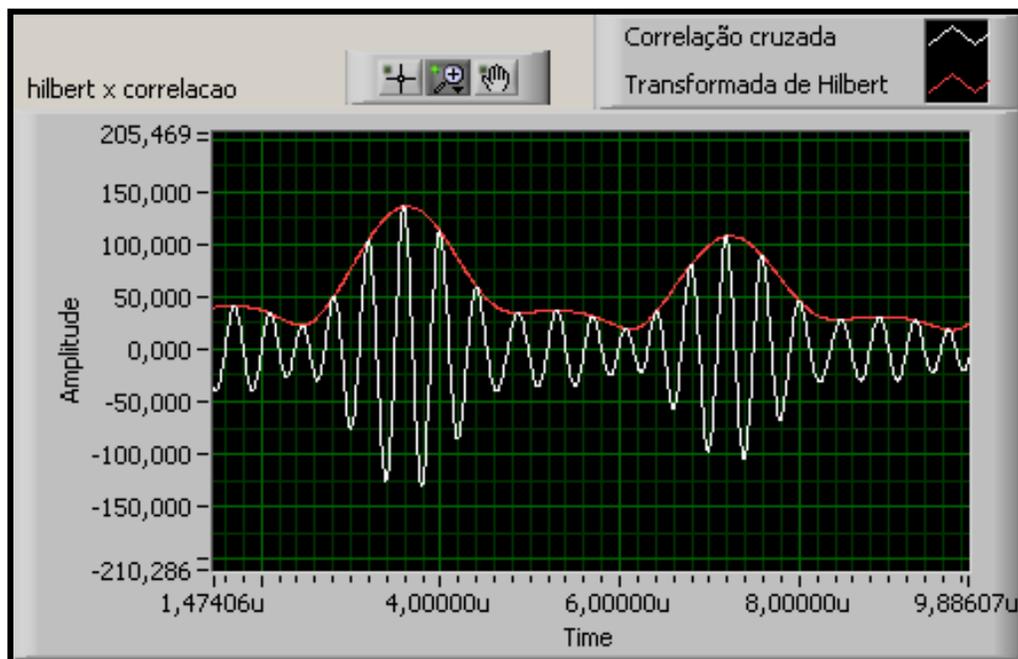


Figura 4.10: Amplitude instantânea após aplicação da correlação cruzada relacionada ao sinal adquirido pelo método pulso-eco

A terceira etapa consiste na detecção dos picos do sinal de amplitude instantânea. Essa detecção é feita através de programação específica pelo *software LabVIEW*, no qual já existem os chamados instrumentos virtuais que são rotinas apropriadas para a determinação desses picos.

#### 4.1.4) Interpolação do sinal ultra-sônico.

Durante o processamento do sinal ultra-sônico, os sinais adquiridos não representam todos os níveis de amplitude do sinal real, pois as placas de aquisição *NI PCI-5911* e *NI PCMCIA-5102* têm limitação de memória de armazenamento, o que influencia na quantidade total de níveis que podem armazenar. Isto significa que, se o sinal real fosse como o mostrado no gráfico da figura 4.11a, um sinal representado na placa de osciloscópio com sete níveis, ficaria como no gráfico da figura 4.11b.

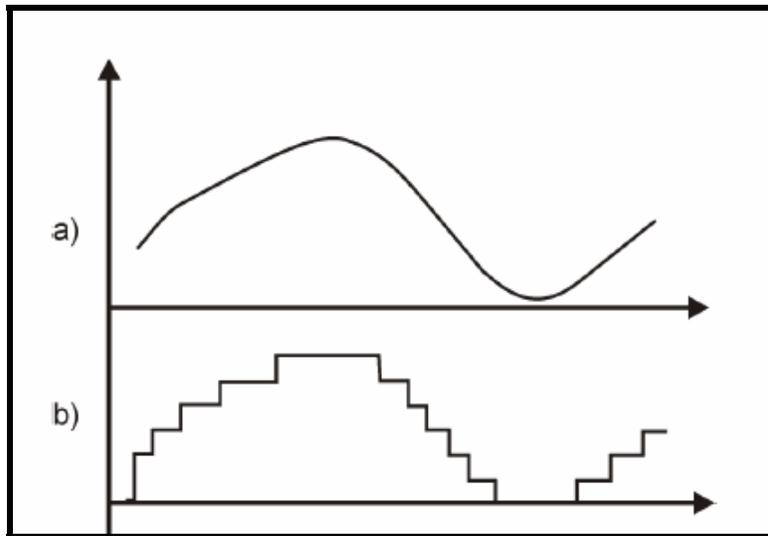


Figura 4.11: a) Exemplo de sinal real. b) Sinal discretizado para sete níveis (Marqueze, 2002).

Para este trabalho são utilizadas placas de 12 *bits*, tanto para o sistema em laboratório como o sistema para aplicação em campo, o que resulta em um sinal com 4096 níveis para representação. Além do nível, a frequência de amostragem é outro limitante do sinal discretizado. As placas utilizadas no trabalho são de 100 MHz e 20 MHz acarretando respectivamente em um tempo de discretização de 10 ns e 50 ns. A frequência de amostragem expressa a taxa na qual são

tomadas às amostras do sinal na entrada do conversor A/D (Analógico/Digital), que são armazenadas na memória para produzir um registro no domínio do tempo.

Torna-se então necessária reconstruir o sinal para diminuir a incerteza das medições dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas. Utiliza-se para isso um método de aumento da taxa de amostragem ou inserção de amostras artificiais entre as existentes, que é conhecido como interpolação. Foi feita uma programação na plataforma *LabVIEW* de forma que a interpolação é feita a partir de uma frequência de amostragem escolhida. A figura 4.12 mostra esquematicamente o sinal original e um sinal discretizado utilizando a interpolação.

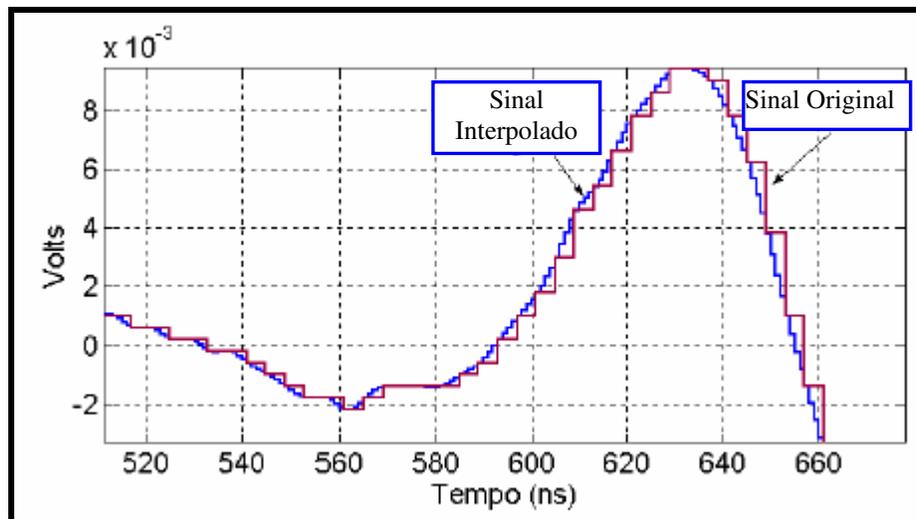


Figura 4.12: Sinal original e interpolado mostrando a melhora em relação à frequência de amostragem (Marqueze, 2002).

A interpolação do sinal foi feita sempre antes da aplicação dos métodos de determinação dos tempos de percurso, cruzamento com o zero, correlação cruzada e aplicação da transformada de *Hilbert*, da onda ultra-sônica. Cabe ressaltar também que o acréscimo nas taxas de interpolação não necessariamente trazem um aumento infinito na resolução, porque o processamento digital, presente no cálculo da correlação, introduz incertezas e erros decorrentes da precisão finita com que são representados os valores numéricos no computador.

#### 4.2) Problemas ocorridos e soluções encontradas para determinação dos tempos de percurso.

Para apresentar as dificuldades encontradas será mostrado o sinal original para a onda  $L_{cr}$  sem aplicação de pressão no duto (figura 4.13). Conforme já dito o equipamento utilizado foi o computador com suas placas de aquisição e o posicionador dinâmico. A placa de aquisição utilizada para a discretização foi de 100 MHz, o que leva a um tempo entre medidas de 10 ns. Para uma melhor visualização da resolução obtida com essa taxa de amostragem, a figura 4.14 mostra uma visão ampliada do pico máximo do sinal.

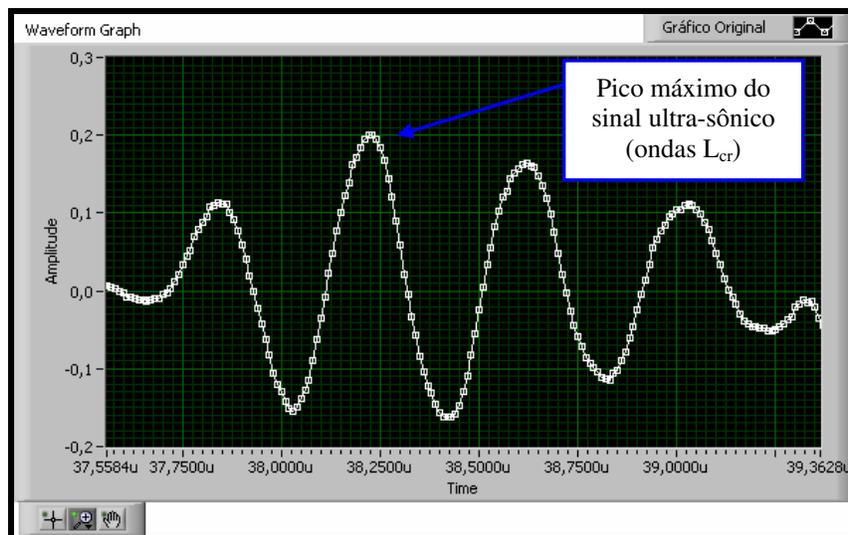


Figura 4.13: Sinal original adquirido

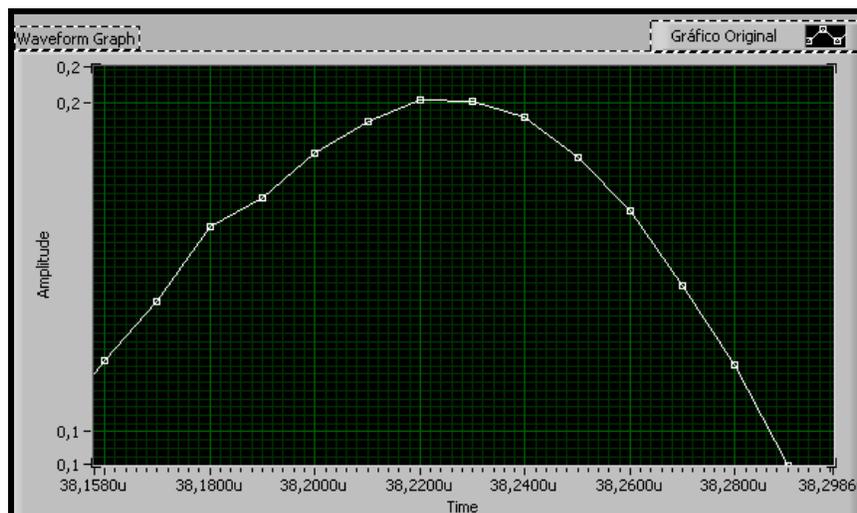


Figura 4.14: Pico máximo do sinal ampliado para visualização do sinal discretizado

Apesar desse sinal apresentar pontos distribuídos de forma regular, apenas um ponto saiu da curva, alguns erros de medidas do tempo de percurso podem ocorrer. Muitas vezes o sinal obtido apresenta vários pontos fora da curva. Isso pode piorar no caso de uma taxa de amostragem menor, que é a situação encontrada neste trabalho quando da utilização da placa de aquisição para *notebook*, sistema portátil. A frequência da placa é de 20 MHz, o que leva a um tempo de discretização de 50 ns. Nota-se que as linhas entre pontos na figura anterior são retas, que não foram adquiridas e estão traçadas para visualização apenas. O que se tem registrado é o valor nos pontos.

O método utilizado em trabalhos anteriores sobre o tema emprega o segundo cruzamento com o zero para as medidas do tempo de percurso. Alguns erros podem ocorrer quanto à aplicação desse método. O cruzamento com o zero é feito entre dois pontos consecutivos do sinal, quando este cruza o eixo horizontal (tempos). A primeira onda do trem de pulsos com o detalhe do cruzamento com o zero é mostrada na figura 4.15.

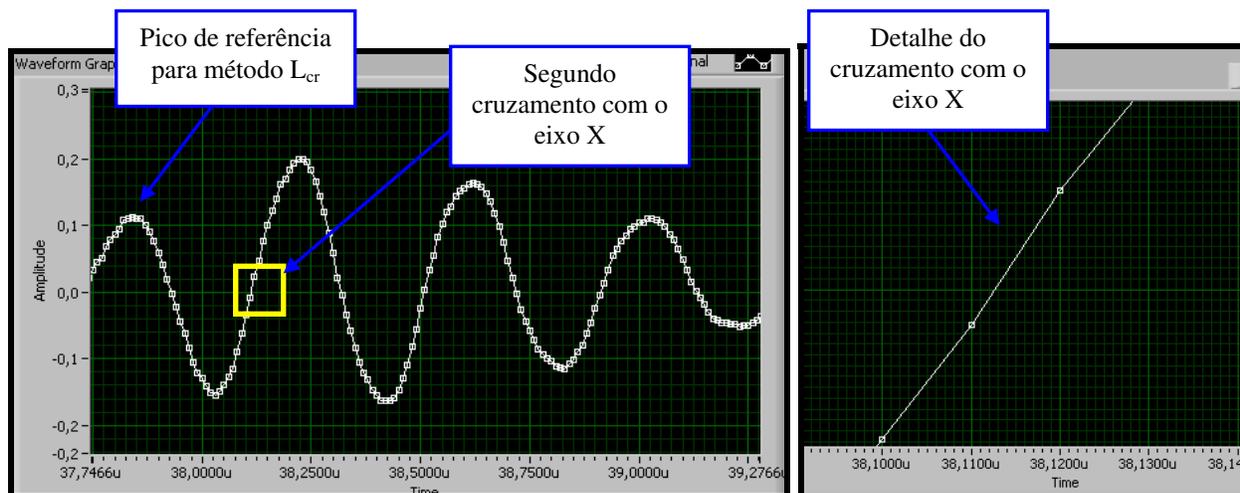


Figura 4.15: Detalhe do segundo cruzamento com o zero utilizado para determinação dos tempos de percurso.

Como pode ser visto nesta figura, existe um desalinhamento entre pontos consecutivos que cruzam o zero. Para cada medida do sinal esses pontos flutuam. Devido a isso, o cruzamento com o zero muda de localização a cada medida e essa diferença é da ordem de nanosegundos. Como já é conhecido da literatura (Andrino, 2003), essa diferença ocasiona erros consideráveis nas medidas das tensões. Cada nanosegundo para o conjunto ultra-sônico utilizado no trabalho

equivale a cerca de 3,5 MPa; como cada medida do tempo de percurso varia até 10 ns para o caso da placa com 100 MHz, a dispersão pode chegar a 35 MPa. Para o caso do sistema para aplicação em campo, a variação do tempo de percurso chega até a 22 ns, o que leva a 77 MPa.

Um outro problema observado para esse caso foi devido à localização do *trigger*. Para o caso de medidas utilizando o cruzamento com o eixo horizontal, o instante do *trigger* foi usado como referência. Algumas variações podem surgir na diferença de tempos dos sinais adquiridos devido à possibilidade dessa referência se mover entre medições.

Um primeiro procedimento adotado para melhora do sinal, foi fazer uma interpolação dos sinais, de modo que novos pontos entre os originais sejam criados, para que a onda se aproxime ao máximo da sua forma senoidal conhecida. Um programa foi desenvolvido na plataforma *LabVIEW* para esse fim. Este programa automaticamente carrega o sinal original, reconhece qual a sua taxa de amostragem e através de uma taxa de amostragem fictícia escolhida ele automaticamente cria novos pontos para o sinal. Para exemplificar o método será empregado um sinal adquirido pelo sistema para aplicação em campo com um transdutor de 5 MHz e o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  montado no posicionador dinâmico. O sinal obtido está mostrado na figura 4.16.

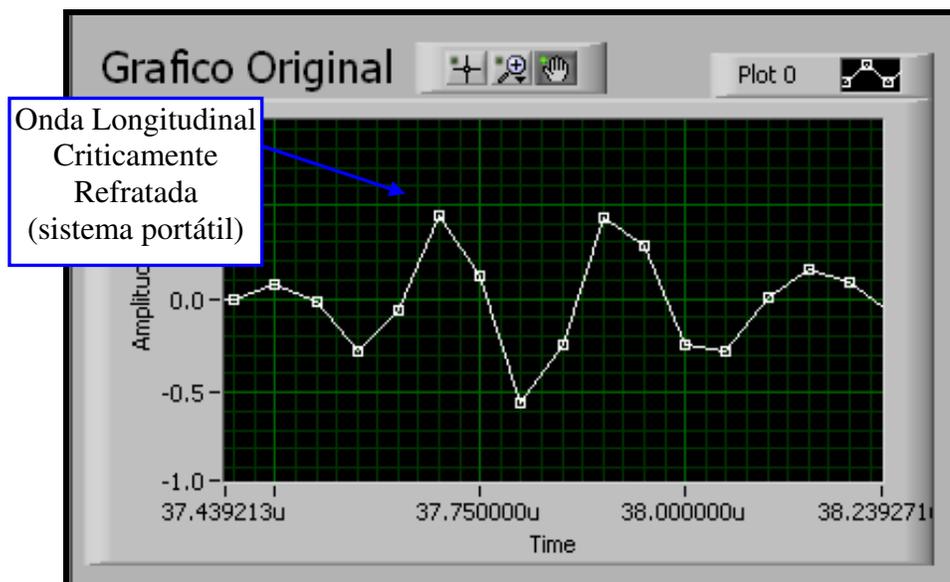


Figura 4.16: Sinal obtido com sistema portátil, frequência de amostragem de 20 MHz.

Como pode ser visto o sinal não tem resolução adequada para realização de medições de tempo de percurso. Os pontos parecem estar ligados formando retas. Analisando as considerações feitas para o cruzamento com o zero, fica claro que uma melhora do sinal é necessária. Supondo que tenha sido escolhida a taxa fictícia de amostragem de 500 MHz, o programa automaticamente faz a interpolação, grava o sinal e exibe-o na tela. A figura 4.17 mostra o sinal já tratado.

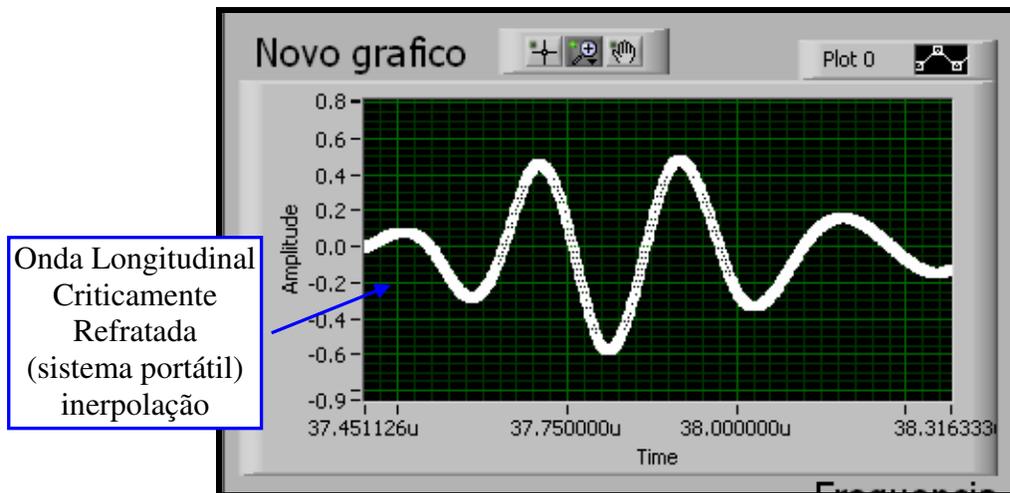


Figura 4.17: Sinal interpolado a partir do obtido com o sistema portátil

Pela figura, fica clara a melhora do sinal. Uma desvantagem dessa programação é a demora do processamento pelo computador quando a escolha da taxa de amostragem é muito alta. A figura 4.18 mostrada a seguir faz uma comparação entre sinais. Eles são mostrados sobrepostos para uma melhor visualização. O detalhe dessa figura mostra o cruzamento com o zero.

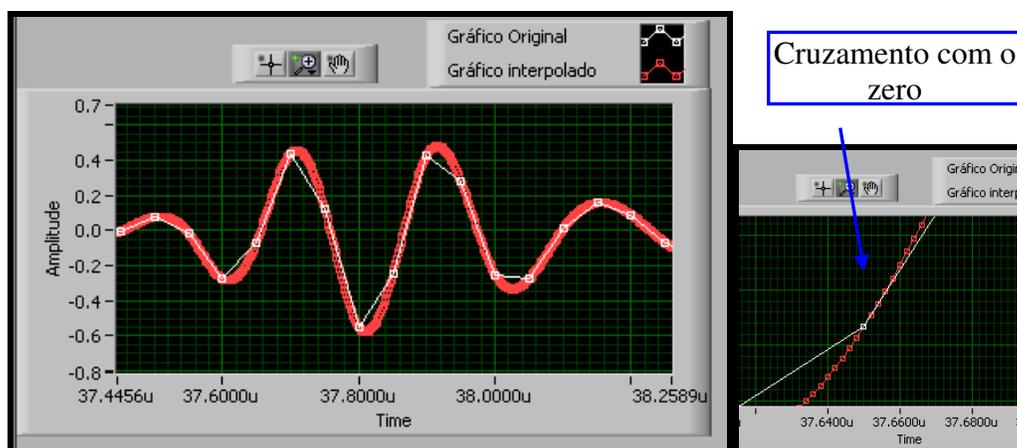


Figura 4.18: Sinal puro e sinal interpolado sobrepostos para comparação.

O método sugerido reduz o problema do cruzamento com o eixo horizontal (amplitude nula) mas a influência do *trigger* continua. O método da correlação cruzada elimina o problema citado, pois mede o tempo de percurso correlacionando o sinal de interesse e o sinal completo, como visto na seção 4.2.1. Esse método elimina a necessidade da localização de um ponto de referência.

A figura 4.15 mostra o pico que é escolhido como ponto de referência para o método  $L_{cr}$ . Para o método de cruzamento com o zero citado, é necessária a localização desse ponto de referência para a determinação do ponto posterior de cruzamento com o eixo horizontal. Dois tipos de pontos de referência podem ser usados para esse caso. Nos trabalhos anteriores do grupo de trabalho do Laboratório de Acustoelástica da Unicamp, tomou-se como referência o primeiro pico da onda (figura 4.15). A figura 4.18 demonstra bem esse problema. Como pode ser visto a amplitude do primeiro pico é pequena e em processamentos automáticos com o *software* desenvolvido, algumas vezes esse pico passa despercebido e o programa identifica o segundo pico, ocasionando assim um erro no tempo de percurso da ordem de 100 ns.

Para a solução desse problema, foi desenvolvido um programa cujo princípio se baseou em dividir o sinal adquirido de maneira a gerar dois sinais, em parte idênticos. Para o caso pulso-eco um deles é formado apenas pelo primeiro eco do sinal e o outro pelo sinal completo. O resultado da correlação cruzada entre esses dois sinais será conceitualmente, o atraso entre eles. A defasagem entre os sinais corresponde ao tempo de percurso que a onda ultra-sônica levou na sua propagação através da espessura do material. Para o caso da geração de ondas longitudinais criticamente refratadas, a primeira onda do trem de pulsos também é separada anulando o resto do sinal, mas ao invés de ser correlacionada com o próprio sinal, ela é correlacionada com um sinal diferente como será visto em detalhes no próximo item. A figura 4.19 exemplifica a correlação cruzada para o sinal para o caso pulso-eco.

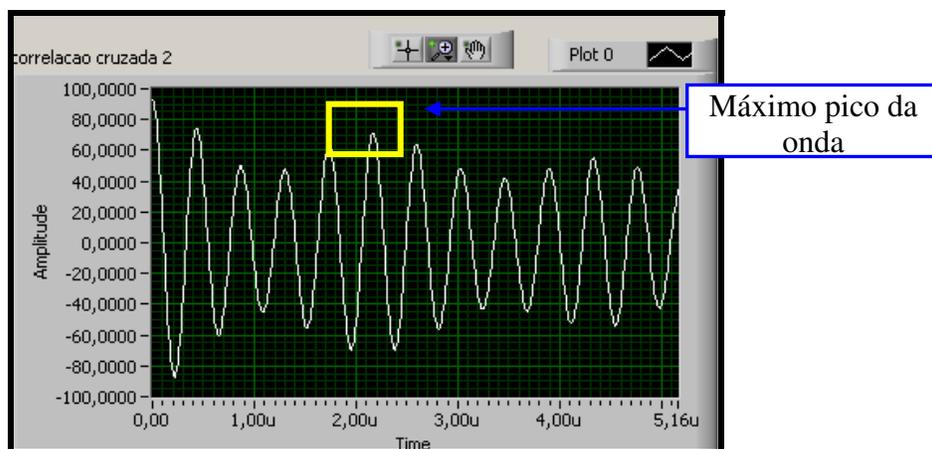


Figura 4.19: Correlação cruzada para determinação do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Para a determinação correta do tempo de percurso é necessário um método que identifique com exatidão o máximo pico da onda, destacado na figura 4.19, obtida na correlação cruzada. Uma primeira tentativa para a determinação desse pico foi a utilização da transformada de *Hilbert* aplicada ao sinal adquirido através da correlação cruzada, utilizando as fórmulas mostradas no capítulo 2. A figura 4.20 mostra os sinais da correlação cruzada e da transformada de *Hilbert* sobrepostas no mesmo gráfico.

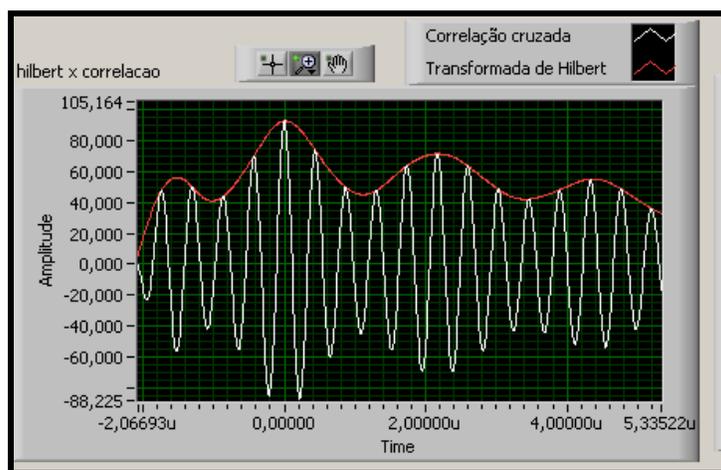


Figura 4.20: Correlação cruzada e transformada de *Hilbert* sobrepostas para comparação entre picos máximos.

Especificamente para esse caso, a transformada de *Hilbert* se mostrou extremamente satisfatória, devido o fato de existir apenas um pico máximo predominante. Porém, em muitos

dos sinais adquiridos para esse trabalho apareciam dois picos máximos predominantes dificultando sua localização. Com isso a solução encontrada foi determinar esse pico através de uma ferramenta existente na própria programação *LabVIEW* diretamente do sinal adquirido pela correlação cruzada pura. Esta ferramenta utiliza o método por mínimos quadrados para encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados.

#### 4.3) Comparação entre métodos para determinação dos tempos de percurso.

Inicialmente será feita uma comparação entre valores do tempo de percurso determinados através das ondas ultra-sônicas geradas pelo método pulso-eco e pelo método da geração de ondas longitudinais criticamente refratadas interpolando o sinal original para cinco novas frequências de amostragem. Cada método de medida foi utilizado tanto com o equipamento utilizado em laboratório como com o para aplicação em campo. Foi utilizado o transdutor de 5 MHz (0,5'' x 1'') montado no conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  e colocado no posicionador dinâmico para medição sobre o duto e o transdutor de 5 MHz ( $\phi$  0,5'') para aplicação do método pulso-eco.

A eficiência do processamento de interpolação do sinal ultra-sônico pode ser verificado pelos resultados da média e desvio padrão das medidas do tempo de percurso mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2. A primeira tabela mostra os resultados para os tempos de percurso determinados pelo sistema para aplicação em laboratório e a tabela 4.2 para o sistema para aplicação em campo. As linhas das tabelas indicam os valores das médias e do desvio padrão para o sinal e as colunas apresentam as frequências de amostragem de interpolação escolhidas.

Tabela 4.1: Tempos de percurso do sinal ultra-sônico interpolado – equipamento para laboratório.

	<b>Geração de ondas <math>L_{cr}</math></b>					
<b>Frequência (MHz)</b>	Sem interpolação	200	300	400	500	1000
<b>Média (ns)</b>	37709,9	37710,1	37711,5	37708,5	37710,5	37711,6
<b>Desvio</b>	4,13	3,89	1,26	0,98	0,99	0,98
	<b>Método pulso-eco</b>					
<b>Frequência (MHz)</b>	Sem interpolação	200	300	400	500	1000
<b>Média (ns)</b>	2171,4	2172,6	2173,9	2172,9	2173,6	2171,8
<b>Desvio</b>	4,65	3,96	1,59	1,03	0,99	0,99

Tabela 4.2: Tempos de percurso do sinal ultra-sônico interpolado – equipamento para campo.

	<b>Geração de ondas <math>L_{cr}</math></b>					
<b>Frequência (MHz)</b>	Sem interpolação	200	300	400	500	1000
<b>Média (ns)</b>	37683,2	37684,3	37685,7	37683,2	37684,7	37685,2
<b>Desvio</b>	7,43	4,25	2,16	1,1	0,99	0,99
	<b>Método pulso-eco</b>					
<b>Frequência (MHz)</b>	Sem interpolação	200	300	400	500	1000
<b>Média (ns)</b>	2165,3	2166,3	2165,1	2167,2	2167,9	2164,5
<b>Desvio</b>	7,76	4,22	1,44	1,01	0,99	0,99

Os tempos de percurso para o método pulso-eco foram medidos tomando como referência o máximo pico entre os dois ecos consecutivos, e os tempos obtidos através do método de geração de ondas longitudinais criticamente refratadas foram obtidos tomando como referência o primeiro pico do sinal da primeira onda do trem de pulsos. As médias foram calculadas através de 10 valores que correspondem a 10 ondas diferentes, para os transdutores colocados na mesma posição sem serem retirados do local de medição.

Pode ser visto pela tabela 4.1, sistema para aplicação em laboratório, que a dispersão dos valores obtidos das medidas de tempo de percurso foi reduzida conforme a frequência de amostragem foi aumentando. Isso é observado através do desvio padrão, que diminui de 4,13 para 0,98 para o método  $L_{cr}$  e de 4,65 para 0,99 para o método pulso-eco. É claro que o procedimento implica em calcular médias de um número cada vez maior de valores, o que diminui certamente a dispersão.

Outro fato observado foi que os valores da média final de cada medida, mesmo sendo próximos, não leva a valores de diferenças nulas. Para o transdutor colocado na mesma posição para os métodos pulso-eco e  $L_{cr}$ , as leituras de tempo variam entre o valor máximo e valor mínimo (10 valores que correspondem a 10 ondas diferentes) em até 10 ns entre ondas quando não é feita a interpolação do sinal, esses mesmos tempos variam 2 ns quando a interpolação é feita para 1000 MHz o que ainda poderia ser melhorado. Observou-se também que o desvio padrão e a diferença entre ondas estabilizou-se a partir da frequência de amostragem de 400 MHz

indicando que a partir dessa frequência não existe mais influência desta sobre a precisão das medidas do tempo de percurso.

Pela tabela 4.2, sistema para aplicação em campo, os tempos de percurso variaram entre o valor máximo e valor mínimo (10 valores que correspondem a 10 ondas diferentes) 20 ns entre ondas sem interpolação do sinal, e 2 ns quando a interpolação é feita para 1000 MHz. O desvio padrão foi de 7,43 ns para 0,99 ns para o método  $L_{cr}$  e de 7,76 para 0,99 para o método pulso-eco, indicando da mesma forma que o caso anterior que, mesmo a média final do tempo de percurso não sendo exatamente a mesma, a interpolação melhorou a precisão do resultado para o tempo de percurso.

- **Correlação cruzada**

As comparações feitas anteriormente foram realizadas para a determinação do tempo de percurso através do cruzamento com o eixo de amplitude nula. Nessa etapa é feita uma comparação desse método com o da aplicação da correlação cruzada. O sinal original obtido foi interpolado para uma frequência de 400 MHz já visando a melhora significativa da resolução dos tempos de percurso para a comparação que será feita. O transdutor utilizado foi o mesmo do caso anterior. Foram obtidos resultados com o sistema para laboratório e o sistema para aplicação em campo. Dez ondas diferentes foram adquiridas sem a retirada do transdutor da posição de medição. Outras quatro repetições desse mesmo procedimento foram feitas, adquirindo sempre em cada uma dez ondas sem a retirada do transdutor do local de medição.

Para as comparações dos tempos de percurso foram utilizados os resultados levantados com o tracionador na sua nova concepção e os resultados levantados para o duto com o posicionador dinâmico montado sobre este. Foi utilizado o método  $L_{cr}$ , onde o tempo de percurso é medido desde o ponto inicial, que é referenciado pelo *trigger*, até o segundo cruzamento com o eixo X da primeira onda do trem de pulsos, que corresponde ao tempo que a onda ultra-sônica levou para percorrer o material desde o transdutor emissor até o transdutor receptor do conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$ . Os tempos de percurso serão levantados para a situação sem tensão e sob tensão. Para o duto essa aplicação de tensão é feita pela bomba, item 3.2.5, e para o caso do tracionador o sistema automático como descrito no item 3.2.6 será utilizado.

O método  $L_{cr}$  diferentemente do método pulso-eco, não mede o tempo de percurso através de duas ondas consecutivas e sim através do “trigger” inicial até a primeira onda do trem de pulsos, onda  $L_{cr}$ . É necessário então fazer a correlação entre as ondas na condição sem tensão e sob tensão. Dessa forma o resultado permite verificar o atraso entre os dois sinais que corresponde à variação de tempo de percurso da onda no material entre essas duas condições diferentes. Como visto pela equação 2.81 do capítulo 2, a diferença de tempo de percurso nessas duas condições é necessária para a determinação da tensão consequentemente, não é necessário o valor absoluto da medida do tempo de percurso.

A figura 4.21 mostra o levantamento da tensão teórica em relação à tensão experimental calculada através dos dois métodos de medida, correlação cruzada e cruzamento com o eixo X para o tracionador. A figura 4.22 mostra a tensão teórica, calculada através da pressão aplicada no duto pela bomba, também em relação à tensão experimental calculada para os mesmos métodos citados.

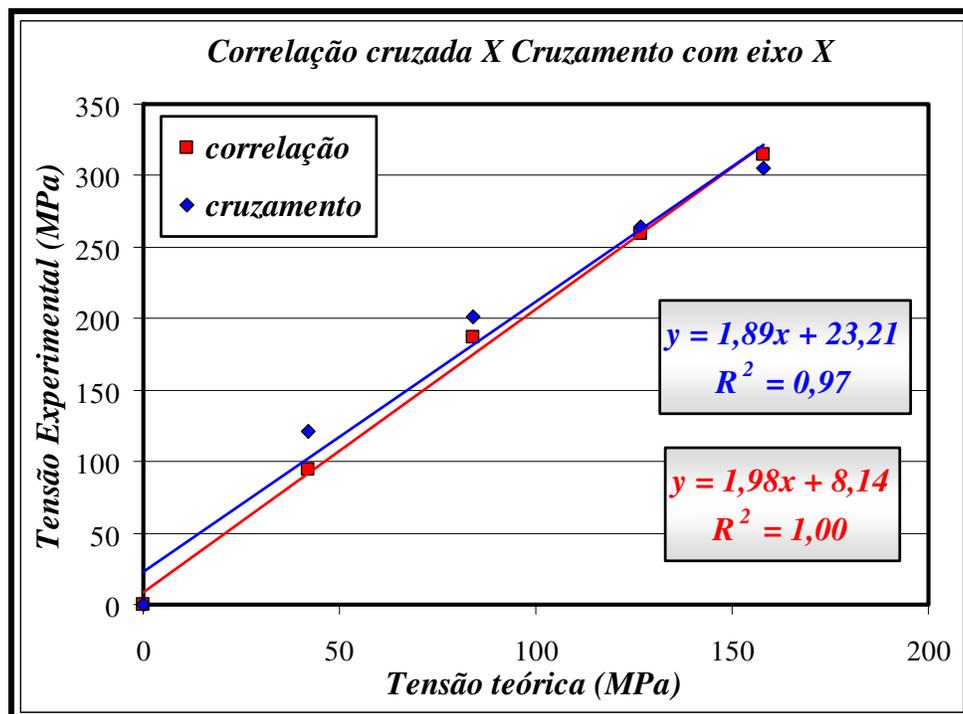


Figura 4.21: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tracionador).

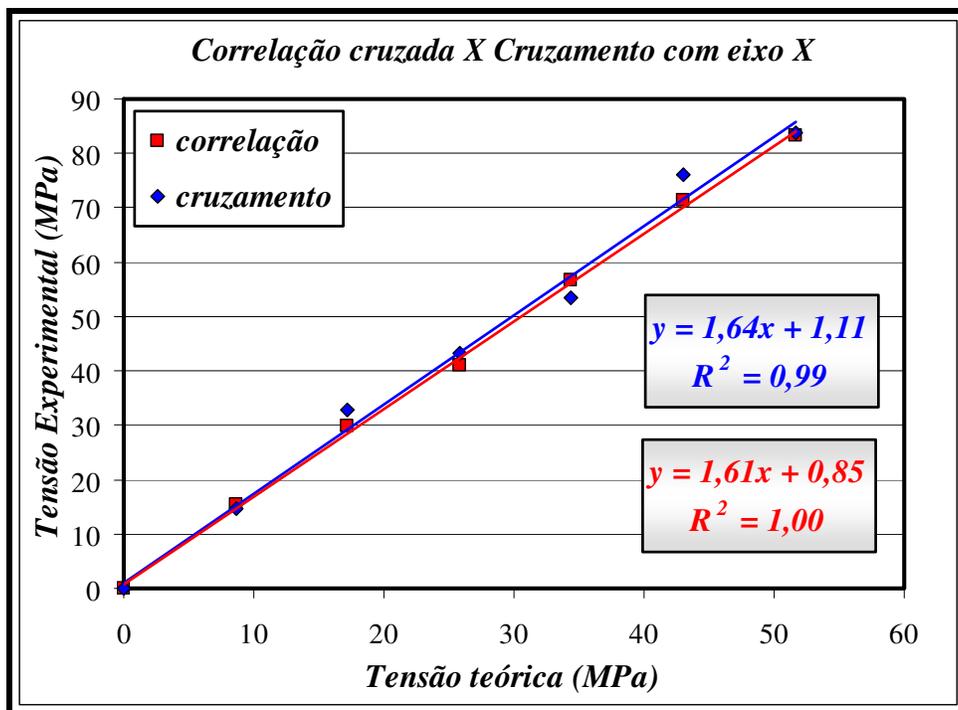


Figura 4.22: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto).

Como é largamente relatado na literatura, existe um comportamento linear entre o tempo de percurso da onda ultra-sônica e a tensão aplicada no material, comportamento esse que rege toda a teoria da análise de tensão por ultra-som. Embora visualmente seja difícil observar uma melhora no comportamento da tensão em função da tensão teórica calculada em cada sistema, o cálculo do coeficiente de correlação mostra que ao se utilizar a correlação cruzada os valores medidos foram alterados aprimorando o ajuste ao comportamento esperado. Outro fato observado foi uma melhor estabilidade dos tempos de percurso para a correlação cruzada que variaram menos que o cruzamento com o eixo X. Outros dois levantamentos semelhantes aos apresentados nas figuras 4.21 e 4.22 foram realizados e seus resultados estão apresentados no apêndice A.

- **Transformada de Hilbert**

Para a determinação dos tempos de percurso para posterior determinação da tensão aplicada, é necessário um método de medida do ponto máximo que resulta da correlação cruzada. Para os resultados mostrados anteriormente esse ponto máximo foi determinado diretamente

através da programação feita pelo programa *LabVIEW*. Esse ponto também pode ser determinado através da transformada de *Hilbert* aplicada diretamente sobre o sinal da correlação cruzada, conforme o início deste capítulo. A figura 4.23 mostra a comparação entre a tensão teórica e a tensão calculada através dos dois métodos de determinação dos pontos máximos do sinal determinado pela correlação cruzada.

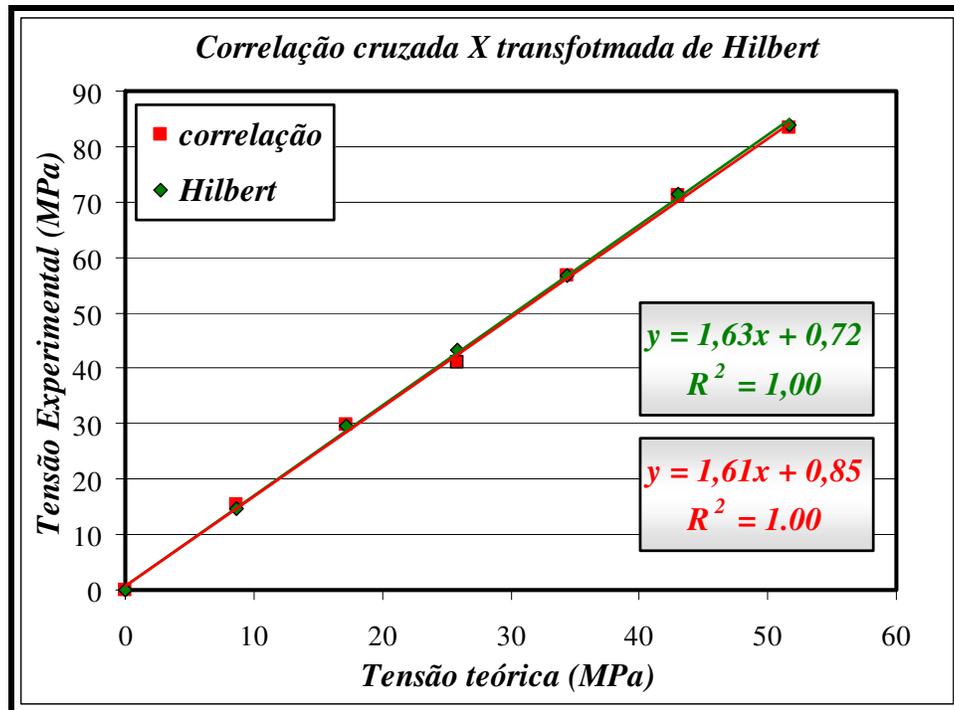


Figura 4.23: Comparação entre correlação cruzada e transformada de *Hilbert*.

Pela figura observamos que os pontos pertencentes às retas para os levantamentos, tanto pela correlação cruzada como pela transformada de *Hilbert*, estão alinhados e praticamente coincidentes, fato esse que também é evidenciado através do coeficiente de correlação. Porém, numa análise mais acurada dos tempos de percurso, as médias dos sinais, que são utilizados nos cálculos das tensões, não sofrem muita influência, já o desvio padrão entre os métodos é diferente, mostrando-se menor para o caso da correlação cruzada (tabela 4.3). Esse fato aconteceu devido à falta de precisão de localização do pico máximo que em algumas formas de ondas podem se confundir com picos de ondas de mesma amplitude, como é visto na figura 4.24 para o caso desse levantamento.

Tabela 4.3: Diferença dos tempos de percurso do sinal ultra-sônico  
Correlação cruzada X Transformada de *Hilbert*.

Correlação cruzada						
<b>Pressão (bar)</b>	5	10	15	20	25	30
<b>Média da diferença (ns)</b>	3,25	6,27	8,66	11,98	15,05	17,60
<b>Desvio</b>	0,21	0,31	0,12	0,18	0,1	0,32
Transformada de <i>Hilbert</i>						
<b>Pressão (bar)</b>	5	10	15	20	25	30
<b>Média da diferença (ns)</b>	3,07	6,24	9,12	11,97	15,09	17,70
<b>Desvio</b>	1,02	1,21	1,12	1,35	0,56	1,00

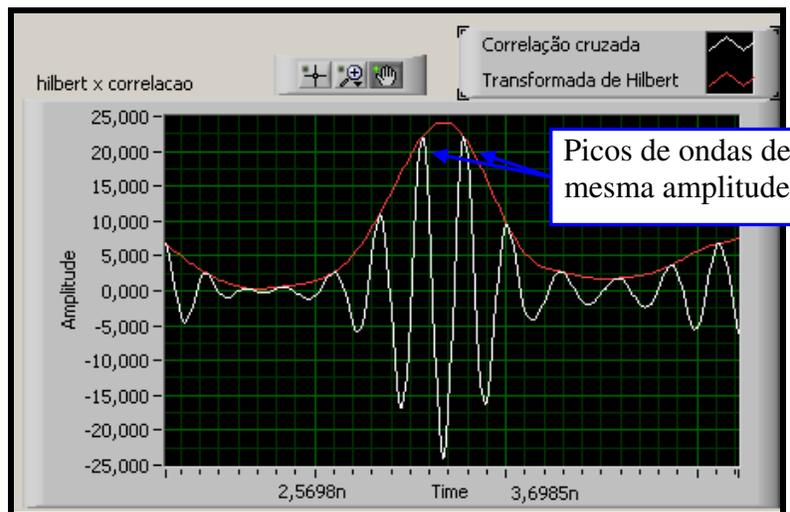


Figura 4.24: Detalhe de dois picos de mesma amplitude para determinação através da transformada de *Hilbert*.

Outro problema ocorrido com a aplicação da transformada de *Hilbert* foi a falta de precisão da amplitude instantânea. A figura 4.25 mostra que em determinadas ondas essa amplitude não se ajustou adequadamente ao sinal determinado pela correlação cruzada, desse modo o método não identificou o pico de amplitude máxima real, para determinação do tempo de percurso.

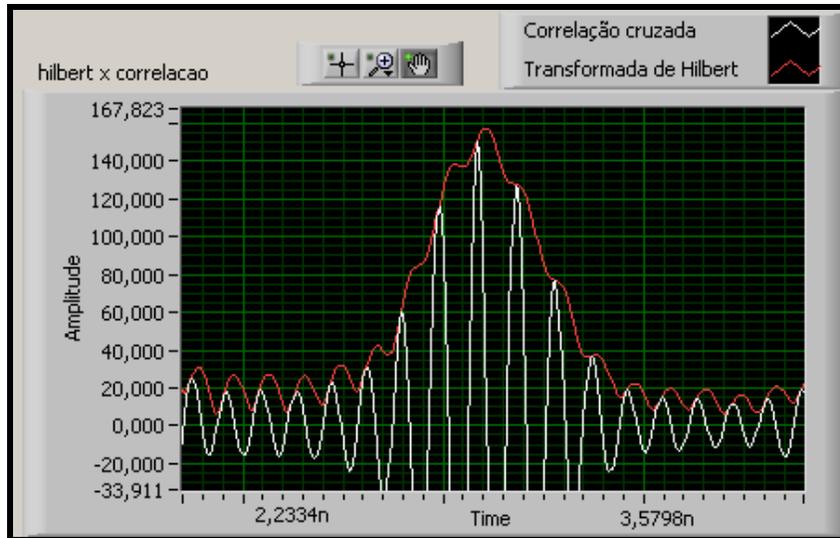


Figura 4.25: Problema encontrado na amplitude instantânea determinada através da transformada de *Hilbert*.

#### 4.4) Conclusões sobre melhor método para determinação dos tempos de percurso.

Com os resultados apresentados algumas conclusões foram obtidas, listadas a seguir.

- A interpolação do sinal é necessária para uma melhor resolução dos tempos de percurso. A frequência de amostragem mais adequada para as medições foi a de 400 MHz que indica uma diferença entre pontos do sinal de até 2,5 ns.
- A correlação cruzada aplicada no sinal ultra-sônico mostrou um melhor coeficiente de correlação em relação aos resultados encontrados com o método de cruzamento com o eixo X. Isso ocorreu devido à dispersão causada pela falta de precisão do ponto de referência, que é utilizado para localização do ponto de cruzamento com o eixo X.
- A aplicação da transformada de *Hilbert* mostrou-se satisfatória para os casos onde havia apenas um pico máximo predominante no sinal adquirido através da correlação cruzada. Em algumas ondas esse método não se mostrou adequado devido o aparecimento de dois picos que se confundiam em amplitude. Isso causou resultados de medidas do tempo de

percurso diferentes para as ondas ultra-sônicas, para o transdutor ultra-sônico posicionado na mesma posição.

A partir dessas conclusões adotou-se para os levantamentos dos tempos de percurso para este trabalho que as ondas adquiridas fossem interpoladas para uma frequência de amostragem de 400 MHz e que em seguida fosse aplicada a correlação cruzada. Para a determinação dos picos máximos das ondas que representam os tempos de percurso de interesse foram utilizados as ferramentas existentes na programação *LabVIEW*. Com esse método a resolução do sistema alcança o nível considerado satisfatório para as aplicações de medidas de tensão tanto em campo como em laboratório.

Utilizando esse método proposto nesse trabalho de doutoramento o tempo de percurso do sinal é determinado diretamente eliminando a necessidade da localização de um ponto de referência entre dois ecos, o que é fonte de erros, seja por dificuldades de localização da referência ou pela falta de precisão na sua localização devido a existência de ruídos no sinal.

Para as medidas em que o método pulso-eco foi utilizado, a correlação foi feita sempre entre dois ecos consecutivos e para o caso da aplicação do método  $L_{cr}$  a aplicação foi feita sempre em relação um primeiro sinal de referência, sistema sem aplicação de tensão, e pelo sinal obtido quando era aplicada uma pressão ao sistema.

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a medição das tensões aplicadas no duto com as ondas  $L_{cr}$ . Serão mostrados os valores calculados das espessuras e módulos de elasticidade encontrados para os pontos de medição para posterior substituição nas fórmulas específicas para determinação das tensões experimentais e teóricas. Serão levantados os perfis de tensão tanto para o caso do transdutor colocado na posição longitudinal como transversal do duto. Para fins de validação, os perfis levantados serão comparados com as tensões calculadas por extensômetros e através do método da birrefringência acústica.

#### 5.1 Verificação da repetibilidade.

O primeiro passo para a aplicação do método é a verificação de sua repetibilidade. Com isso, elimina-se a necessidade de verificação posterior de sua dispersão, já demonstrada nesse item.

As medidas de repetibilidade em chapas foram objeto de trabalhos anteriores no Laboratório de Acustoelástica da Feagri (Caetano, 2003; Santos, 2007; Fraga, 2007). No entanto, optou-se por realizar os experimentos nesse trabalho para incluir o novo dispositivo (posicionador dinâmico) na análise. Para esta parte do trabalho a força de aplicação por cilindro foi mantida constante no valor de 235,6 N, conforme justificado no próximo item.

Para essas medidas foi utilizado o transdutor de 5 MHz ( $\phi$  0,5'') e os pontos de medidas foram: 1(0°), 2(45°); 3(90°); 4(135°); 5(180°); 6(315°); 7(225°). Três rodadas de medidas foram feitas retirando o posicionador dinâmico do duto, soltando as bases magnéticas. Uma primeira rodada de medidas é feita do ponto 1(0°) até o ponto 7(225°), repetindo as medidas três vezes em cada ponto. Não foi aplicada pressão no duto e a temperatura foi mantida constante durante o experimento. A tabela 5.1 mostra o resultados médios de cada rodada para cada ponto de medida.

Tabela 5.1: Padrão de repetibilidade para conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$ .

Pontos	1(0°)	2(45°)	3(90°)	4(135°)	5(180°)	6(315°)	7(225°)
<b>Rodada 1 (ns)</b>	37680,2	37704,2	37719,2	37684,6	37700,5	37673,5	37704,9
<b>Rodada 2 (ns)</b>	37688,1	37702,5	37722,9	37685,4	37702,9	37670,5	37705,1
<b>Rodada 3 (ns)</b>	37681,9	37700,9	37720,5	37682,9	37699,6	37671,9	37703,8
<b>Média Total</b>	37683,4	37702,5	37720,9	37684,3	37701,1	37672,1	37704,6
<b>Desvio</b>	4,15	1,66	1,89	1,27	1,71	1,51	0,67

A tabela mostra que o desvio padrão para cada ponto de medição foi pequeno e que os tempos de percurso ficaram próximos, isso permite realizar os demais testes do trabalho com o posicionador dinâmico, para cada ponto de medição, sem a necessidade de repetição.

No tocante à variação do tempo de percurso entre pontos, é interessante notar que a média dos valores de todos os pontos nas três rodadas ficou muito próxima, com magnitude de 37695,6 ns e dispersão de 1,2 ns. Excluindo o ponto 1, onde há uma costura no duto, a média pouco se altera, mas a dispersão se reduz ainda mais, para 0,84 ns.

Isso mostra que a diferença dos resultados é mínima para o mesmo ponto, mas é significativa entre pontos. O desvio padrão para todas as medidas é 1,5 ns e, para cada rodada, é cerca de 17 ns. Em todas as medições subsequentes o ponto será identificado.

## 5.2 Efeito da força de acoplamento.

Inicialmente será mostrado o efeito da pressão do conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  sobre o tempo de percurso da onda ultra-sônica seguindo o exposto no item 3.3.5. As figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 mostram as curvas para os transdutores de 2,25 MHz (0,5'' x 1''), 3,5 MHz (0,5'' x 1''), 5 MHz (0,5'' x 1'') e 5 MHz ( $\phi$  0,5'') montados sobre o posicionador dinâmico e colocados no ponto 3(90°) do duto, a temperatura nos testes foi mantida constante.

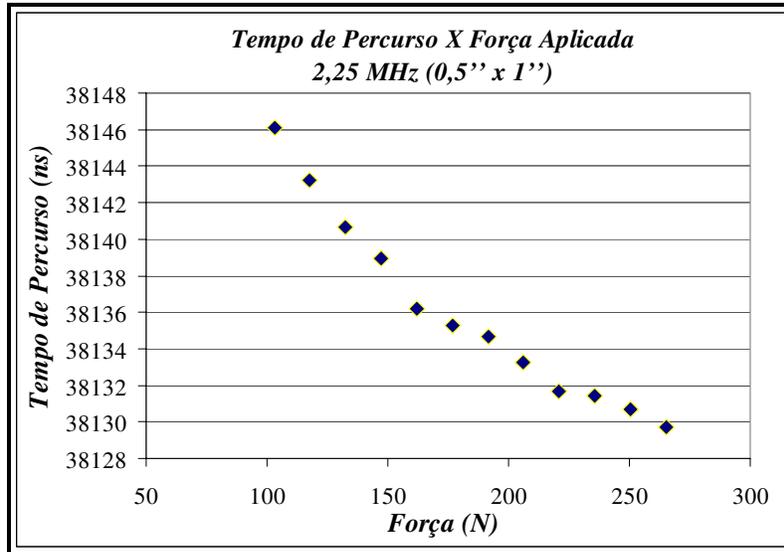


Figura 5.1: Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico

$L_{cr}$  – Transdutor 2,25 MHz (0,5'' x 1'')

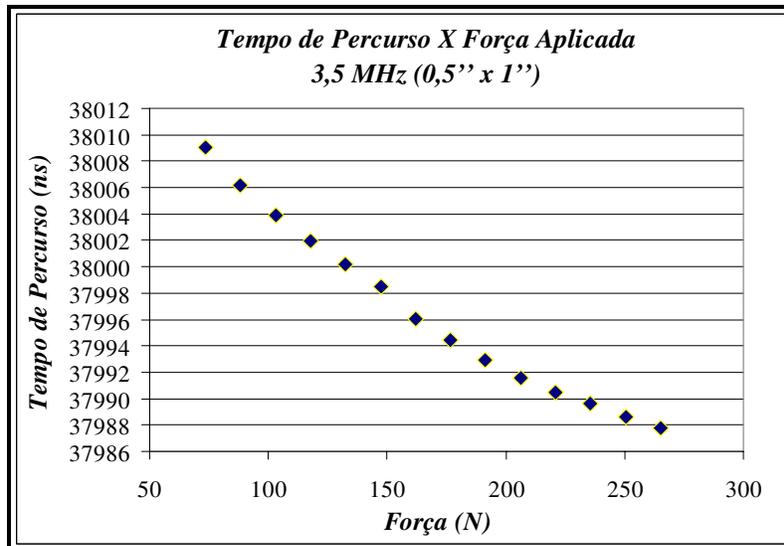


Figura 5.2: Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico

$L_{cr}$  – Transdutor 3,5 MHz (0,5'' x 1'')

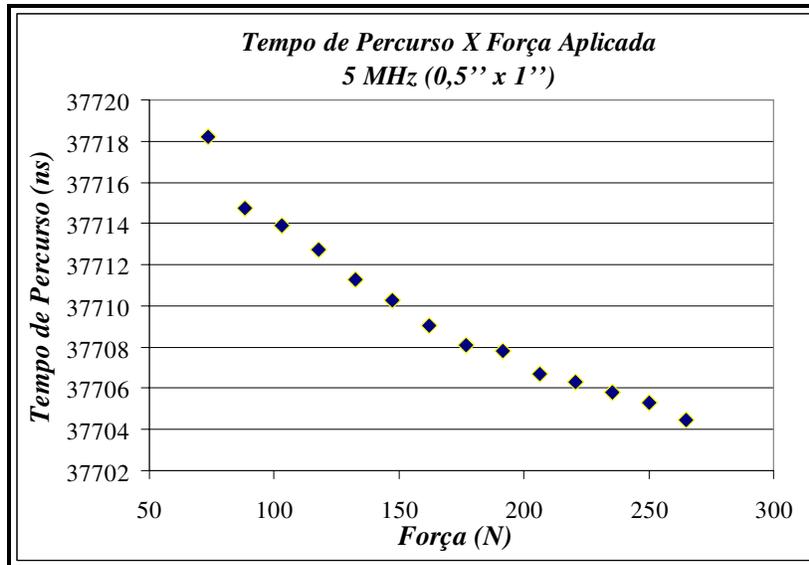


Figura 5.3: Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico

$L_{cr}$  – Transdutor 5 MHz (0,5'' x 1'')

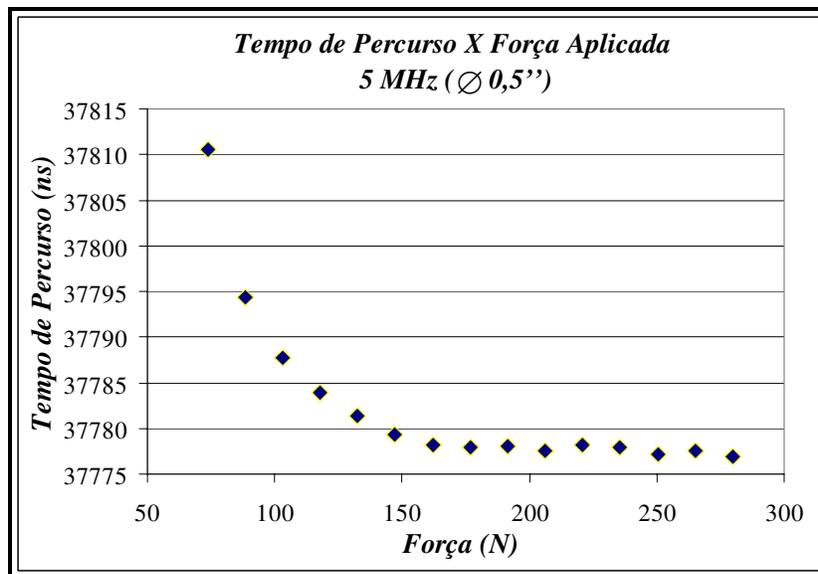


Figura 5.4: Variação do tempo de percurso com relação à força aplicada no conjunto ultra-sônico

$L_{cr}$  – Transdutor 5 MHz ( $\phi$  0,5'')

Pelas figuras podemos observar um perfil semelhante nos gráficos apresentados das figuras 5.1, 5.2 e 5.3. À medida que a força aumenta, o tempo de percurso diminui e não chega a um patamar de estabilidade. Pela figura 5.4 observamos que esse patamar existe e que a força se estabilizou a partir de 160 N para o conjunto com o transdutor de  $\phi$  0,5''. Os transdutores utilizados para as três primeiras figuras utilizaram sapatas de acrílico de maiores dimensões

enquanto para a figura 5.4 a sapata de acrílico foi menor. Esse fato causou rigidez diferente nas montagens dos conjuntos ultra-sônicos  $L_{cr}$ . Esse levantamento mostra a importância do controle da força na aplicação do método. Mantê-la constante é fundamental para obter resultados coerentes

Para as medições desse trabalho adotou-se a pressão de 4,8 bar, o que significa uma tensão elétrica aplicada na válvula proporcional de 8 volts, de forma que a força aplicada em cada cilindro pneumático seja de 235,6 N.

### 5.3 Determinação das espessuras da parede do duto.

Para a determinação das tensões teóricas é necessário conhecer o valor da espessura da parede do duto. Como já citado, a espessura do duto na construção foi de 1/4" informado pelo CENPES, porém devido a corrosão e ao processo de fabricação do mesmo pode ter ocorrido a mudança dessa espessura. A seguir é mostrado o cálculo das espessuras feitas nos pontos de medição do duto através do método pulso-eco. O transdutor utilizado foi o de 2,25 MHz ( $\phi$  0,5") e a temperatura para essas medições foi mantida constante. Os pontos de medida são os descritos nos procedimentos. Para cada ponto três medidas do tempo de percurso foram feitas. Os resultados estão mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Determinação das espessuras para duto.

	1e	1	1d	2e	2	2d	3e	3	3d
<b>Espessuras (mm)</b>	6,49	6,54	6,49	6,48	6,41	6,47	6,46	6,46	6,45
	4e	4	4d	5e	5	5d	6e	6	6d
<b>Espessuras (mm)</b>	6,46	6,47	6,42	6,46	6,46	6,44	6,50	6,49	6,47
	7e	7	7d						
<b>Espessuras (mm)</b>	6,48	6,47	6,44						

Como visto as espessuras não foram as mesmas para cada ponto de medição, mas foram muito próximas. Para o cálculo das tensões teóricas cada espessura calculada será utilizada para os respectivos pontos de medição. Essa decisão significa supor que a distribuição dos esforços

que causam as tensões é uniforme. Essa hipótese não necessariamente é verdadeira, o valor médio também poderia ser usado. Como a média das espessuras foi 6,47 mm e o desvio padrão 3 centésimos de milímetros, os resultados não serão influenciados significativamente por ela.

#### 5.4 Medição do módulo de elasticidade.

A tabela 5.3 mostra os valores calculados para os módulos de elasticidade para todos os pontos de medida através da determinação dos tempos de percurso. Em cada ponto de medida os transdutores, tanto longitudinal como o transversal, foram retirados e recolocados para a medição três vezes. A temperatura para esses testes permaneceu constante durante o experimento. Os valores na tabela foram obtidos para a direção longitudinal (L) e circunferencial (T) do duto.

Tabela 5.3 : Módulos de elasticidade para pontos de medição do duto, em MPa.

	<b>1e (0°)</b>	<b>1e'(0°)</b>	<b>1 (0°)</b>	<b>1d' (0°)</b>	<b>1d (0°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	210053,4	210097,4	222634,4	211257,3	212329,0
<b>E (MPa) – T</b>	200589,7	199590,6	211894,1	200447,4	201306,1
	<b>2e (45°)</b>	<b>2e' (45°)</b>	<b>2 (45°)</b>	<b>2d' (45°)</b>	<b>2d (45°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	208926,1	208536,6	213327,5	209051,1	209465,8
<b>E (MPa) – T</b>	199707,2	200172,9	204225,9	199828,6	200228,4
	<b>3e (90°)</b>	<b>3e' (90°)</b>	<b>3 (90°)</b>	<b>3d' (90°)</b>	<b>3d (90°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	210282,2	210786,2	211351,8	211390,3	211799,8
<b>E (MPa) – T</b>	202963,8	202825,7	203483,1	203295,3	203736,4
	<b>4e (135°)</b>	<b>4e' (135°)</b>	<b>4 (135°)</b>	<b>4d' (135°)</b>	<b>4d (135°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	210017,6	210485,3	210709,1	212501,9	212535,1
<b>E (MPa) – T</b>	202257,8	202600,9	202617,8	203808,3	202309,4
	<b>5e (180°)</b>	<b>5e' (180°)</b>	<b>5 (180°)</b>	<b>5d' (180°)</b>	<b>5d (180°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	210737,1	209235,8	210501,7	212167,8	211872,8
<b>E (MPa) – T</b>	202809,8	201787,9	204078,7	203652,7	203819,6

	<b>6e (315°)</b>	<b>6e' (315°)</b>	<b>6 (315°)</b>	<b>6d' (315°)</b>	<b>6d (315°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	206873,0	207906,4	208654,5	208509,6	210459,7
<b>E (MPa) – T</b>	198687,9	198848,1	200431,1	199930,5	201406,7
	<b>7e (225°)</b>	<b>7e' (225°)</b>	<b>7 (225°)</b>	<b>7d' (225°)</b>	<b>7d (225°)</b>
<b>E (MPa) – L</b>	209531,9	209232,7	210514,7	211860	212289,6
<b>E (MPa) – T</b>	208534,9	207233,7	211512,7	210863	213287,6

Os resultados mostrados na tabela foram substituídos para cada ponto respectivo para a medição das tensões experimentais, conforme a fórmula 2.81.

### 5.5 Medição das tensões mecânicas por extensômetros.

A tabela 5.4 mostra os resultados das tensões calculadas a partir da deformação medida pelos extensômetros. Para esses cálculos apenas um valor do módulo de elasticidade foi utilizado, igual a 207 GPa. As medidas foram feitas quando o duto esta sem tensão aplicada pela bomba e conforme a bomba aplica pressão. Foram determinadas as tensões para as posições superiores e inferiores do duto, chamadas de longitudinais superior e inferior e transversais superior e inferior. A temperatura permaneceu constante durante todo o experimento com os aparelhos de ar condicionado no laboratório ligados.

Tabela 5.4: Tensões determinadas por extensômetros.

	<b>Longitudinal Superior</b>	<b>Longitudinal Inferior</b>
<b>Pressão (bar)</b>	<b>Tensão calculada (MPa)</b>	<b>Tensão calculada (MPa)</b>
<b>0</b>	0	0
<b>5</b>	6,87	7,01
<b>10</b>	13,60	14,70
<b>15</b>	20,07	20,38
<b>20</b>	27,70	28,11
<b>25</b>	35,91	34,14
<b>30</b>	44,34	40,54

	Transversal Superior	Transversal Inferior
Pressão (bar)	Tensão calculada (MPa)	Tensão calculada (MPa)
0	0	0
5	17,07	19,43
10	32,75	36,71
15	48,86	53,02
20	65,99	71,84
25	84,72	88,95
30	103,42	107,97

Pela tabela podemos verificar que as medidas de tensão são um pouco diferentes em cada posição dos extensômetros. As figuras 5.5 a 5.8 apresentam os gráficos que mostram a linearidade da resposta no levantamento das tensões através dos extensômetros. Os resultados mostram ainda que a tensão máxima no extensômetro inferior é cerca de 10 % menor que a do extensômetro superior, para a direção longitudinal. Para a direção transversal o comportamento se inverte, com menor diferença porcentual.

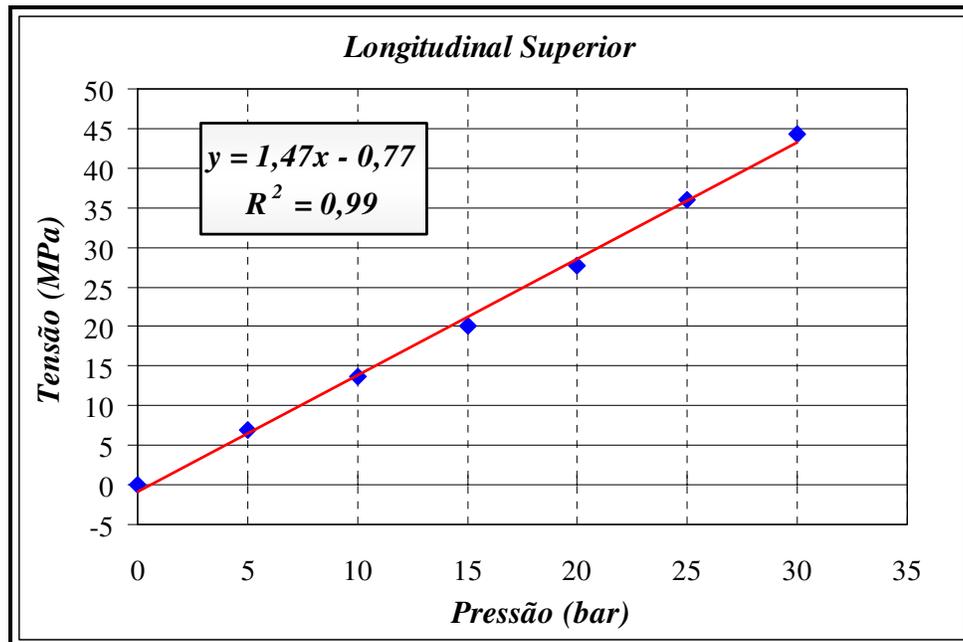


Figura 5.5: Tensão medida através de extensômetros – Longitudinal superior.

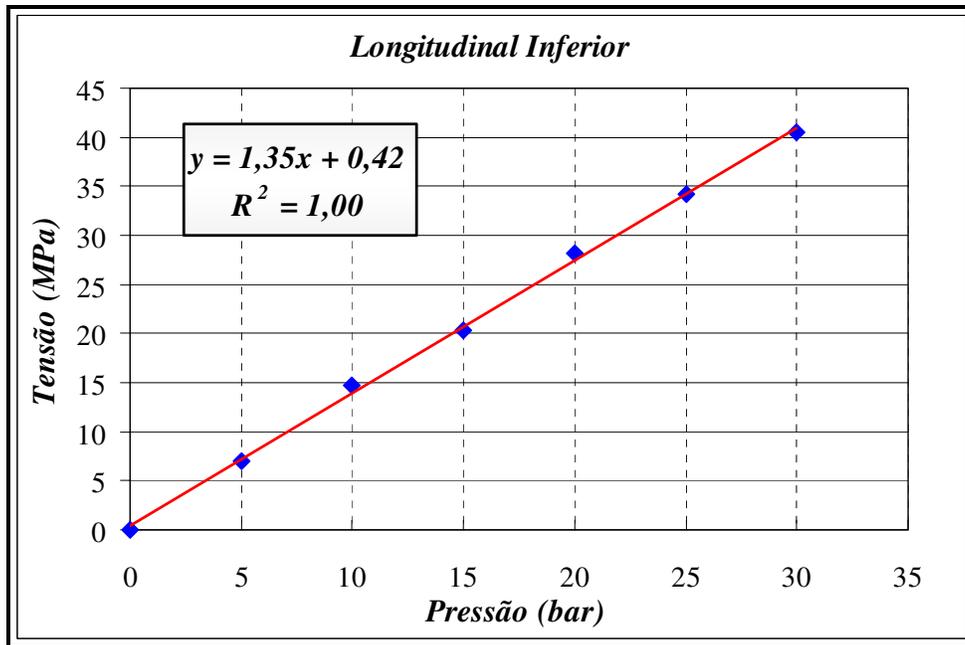


Figura 5.6: Tensão medida através de extensômetros – Longitudinal inferior.

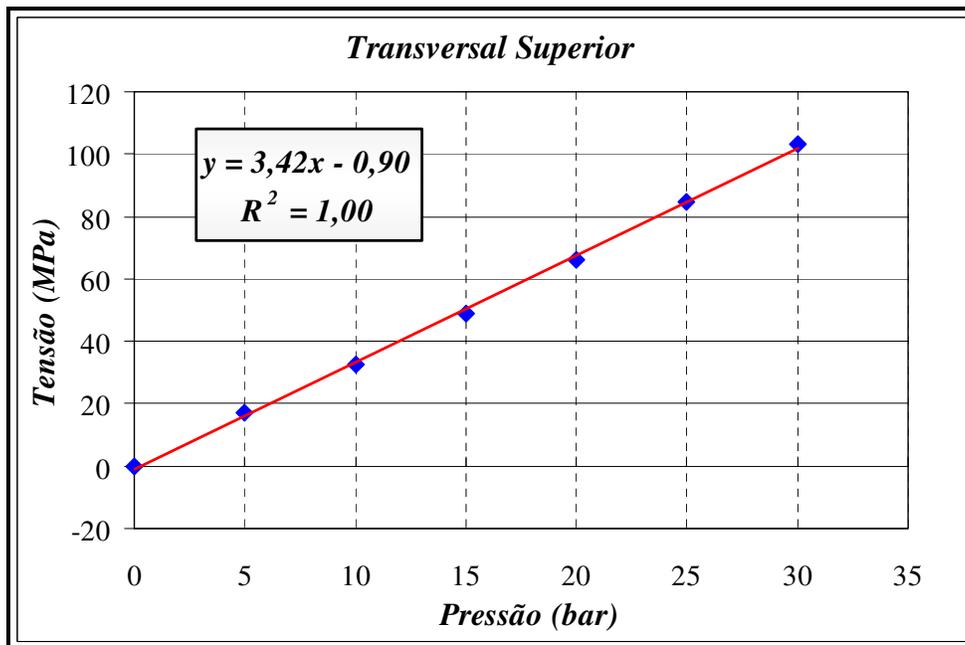


Figura 5.7: Tensão medida através de extensômetros – Transversal superior.

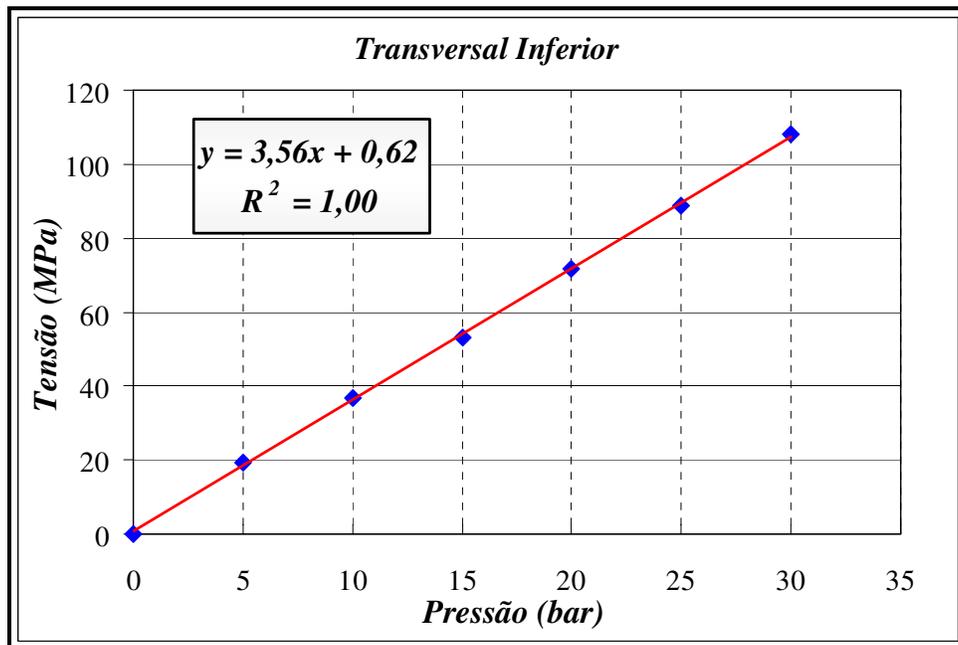


Figura 5.8: Tensão medida através de extensômetros – Transversal inferior.

A espessura da parede do cilindro ( $e$ ), cuja determinação foi descrita no item 5.3, foi utilizada para cálculo da tensão em cada ponto de medição. Como o diâmetro do duto é 458,36 mm, o cilindro pode ser considerado como de parede fina. Para esse caso, a tensão na direção longitudinal ( $T_l$ ) pode ser calculada pela equação 5.1 (Shigley, 2006). Nessa equação,  $p$  corresponde à pressão aplicada no interior do duto e  $D$  é o diâmetro externo do vaso

$$T_l = \frac{p \cdot D}{4 \cdot e} \quad (5.1)$$

A figura a seguir mostra a comparação da tensão calculada através da pressão aplicada com a medida pelos extensômetros, para a direção longitudinal. No eixo horizontal está a tensão, enquanto que os resultados nos dois extensômetros longitudinais estão no eixo vertical.

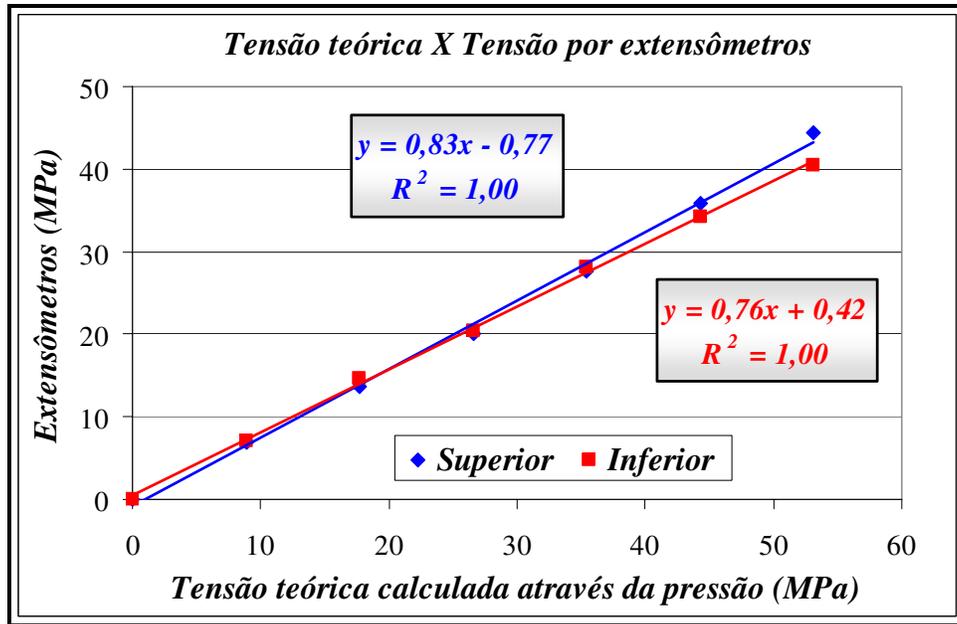


Figura 5.9: Comparação entre tensão teórica e tensão medida por extensômetros.

O primeiro aspecto notável na figura é a linearidade da resposta. Isso significa que, dentro da faixa analisada, um aumento da pressão causa um aumento proporcional na deformação dos extensômetros.

Uma segunda observação é quanto a diferença de resposta entre os dois extensômetros. Embora haja um rolete instalado em um dos suportes laterais do corpo de prova (duto), há uma resistência maior para a expansão do duto na parte inferior deste. Essa diferença, aliada ao fato de que a força longitudinal resultante da pressão não está alinhada com os suportes, causa um pequeno momento, que tende a tracionar a parte de cima do corpo de prova e comprimir a parte inferior. Essa diferença se intensifica com o aumento da pressão e pode gerar a diferença mostrada.

Um último aspecto a ser considerado é quanto à diferença entre os valores das tensões obtidas pelos dois métodos. Espera-se que o coeficiente angular das retas no gráfico seja próximo de 1. Uma possível explicação está relacionada aos valores utilizados nos cálculos das tensões medidas com os extensômetros. Estes foram instalados originalmente por um grupo de trabalho a serviço do CENPES-Petrobras. Não foi possível obter os valores do fator de extensômetro (*Gage Factor*). Assim, optou-se por usar  $GF=2,1$ , que é um valor representativo, baseado nos

extensômetros disponíveis para outras aplicações no Laboratório de Acustoelástica. Um valor de  $GF=1,7$  levaria o coeficiente angular a 1. Além disso, foi utilizado o módulo de elasticidade  $E=207$  GPa, o que também pode influenciar no resultado.

Em vista disso, as análises feitas nos experimentos mostrados a seguir são comparadas com a tensão obtida a partir da pressão aplicada.

### 5.6 Levantamento das tensões através do método da birrefringência acústica.

Para fins de comparação para verificação da efetividade do método de geração de ondas longitudinais criticamente refratadas, foi feito o estudo das tensões levantadas pelo método da birrefringência acústica. Para essa determinação foi utilizada a fórmula 2.80. do capítulo 2 e o procedimento descrito em 3.3.4. A constante acustoelástica utilizada foi igual a  $2,13 \times 10^{-5}$ . Essa constante foi determinada em um material semelhante ao material do duto (Caetano, 2003). As figuras 5.10 a 5.13 mostram os perfis de tensão para os pontos 2( $45^\circ$ ), 4( $135^\circ$ ), 6( $315^\circ$ ) e 7 ( $225^\circ$ ).

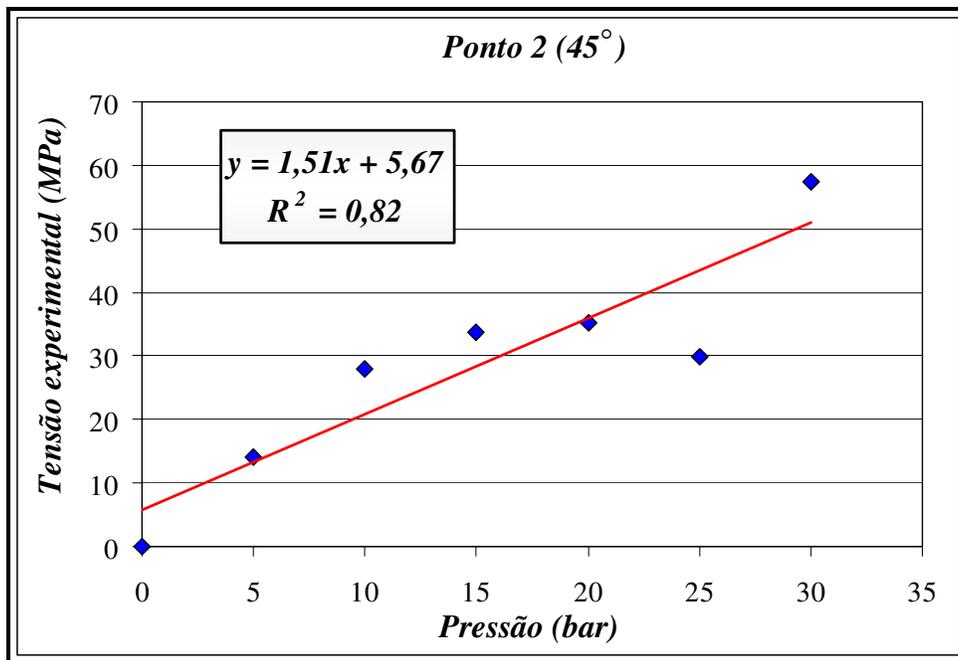


Figura 5.10: Tensão medida em relação a pressão aplicada, ponto 2( $45^\circ$ )  
(Birrefringência acústica)

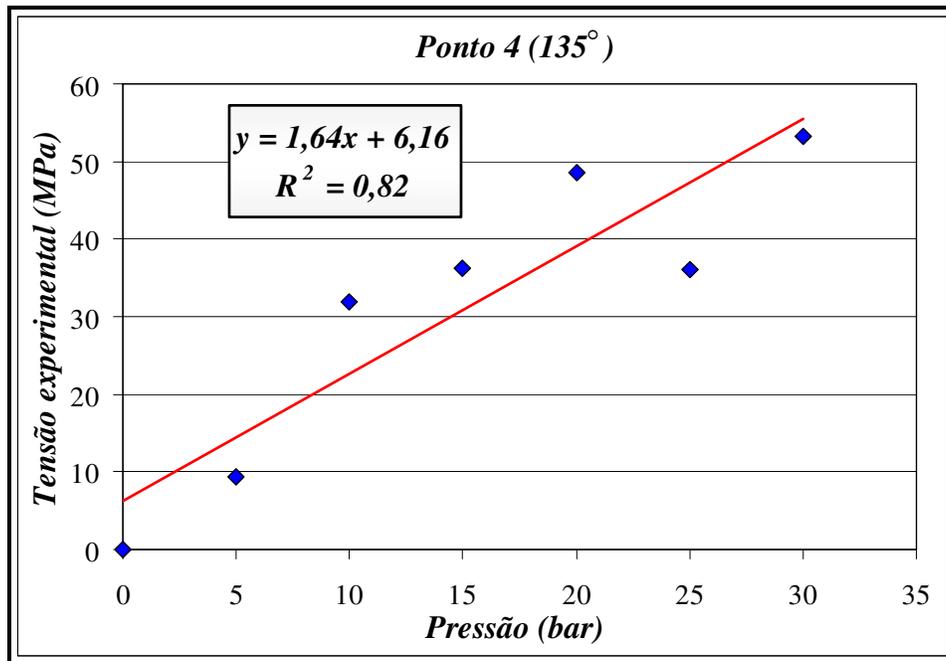


Figura 5.11: Tensão medida em relação a pressão aplicada, ponto 4(135°)  
 (Birrefringência acústica)

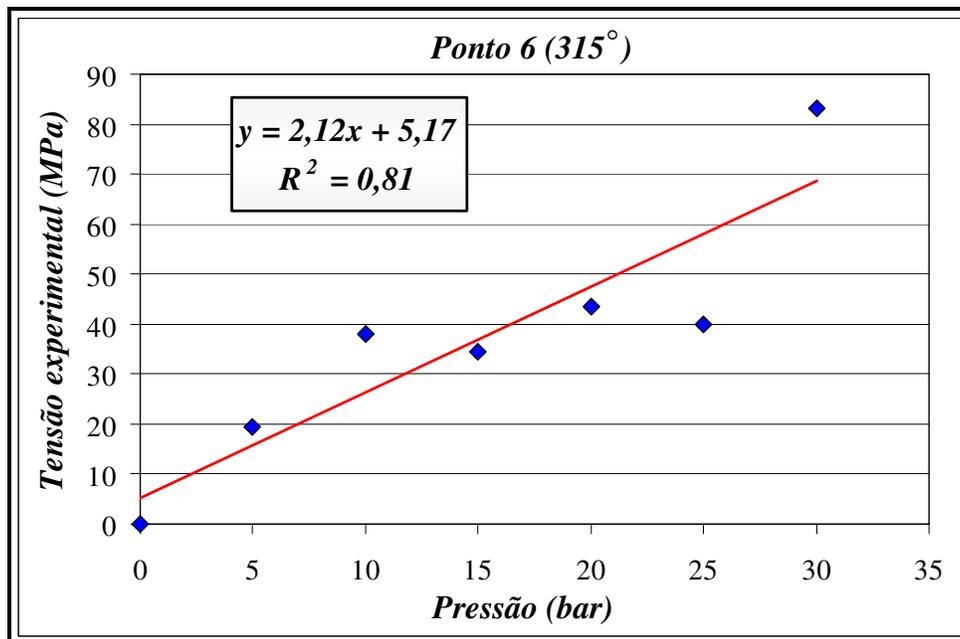


Figura 5.12: Tensão medida em relação a pressão aplicada, ponto 6 (315°)  
 (Birrefringência acústica)

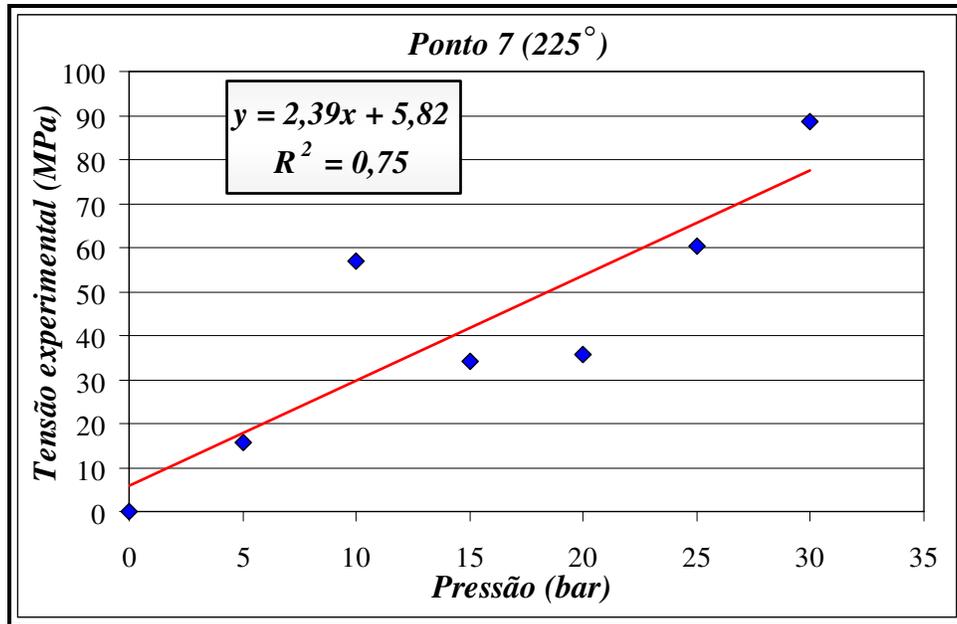


Figura 5.13: Tensão medida em relação a pressão aplicada, ponto 7(225°)  
(Birrefringência acústica)

As figuras mostram a grande dispersão obtida, além da grande variação nos coeficientes angulares das retas. Esses resultados mostram também a tendência de aumento da tensão com a pressão, mas é extremamente difícil estimar a magnitude da tensão real com tais resultados.

### 5.7 Influência da temperatura sobre o tempo de percurso.

Para o estudo da influência da temperatura sobre os tempos de percurso seguindo o item 3.3.6, foram feitos levantamentos separadamente para o acrílico e para o aço, já se sabia do efeito significativo desta sobre o tempo de percurso, a partir dos trabalhos de Santos(2007), Fraga(2007). No entanto, o estudo tinha por objetivo isolar a fonte principal, para que estudos posteriores pudessem reduzir seu efeito.

Em uma primeira etapa, a aparelhagem completa juntamente com as peças enunciadas sofreram a influência do aquecimento do ambiente; em uma segunda etapa apenas as peças sofreram esse mesmo aquecimento do ambiente. As figuras 5.14 a 5.19 mostram a influência das temperaturas sobre o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas para o aço e o acrílico.

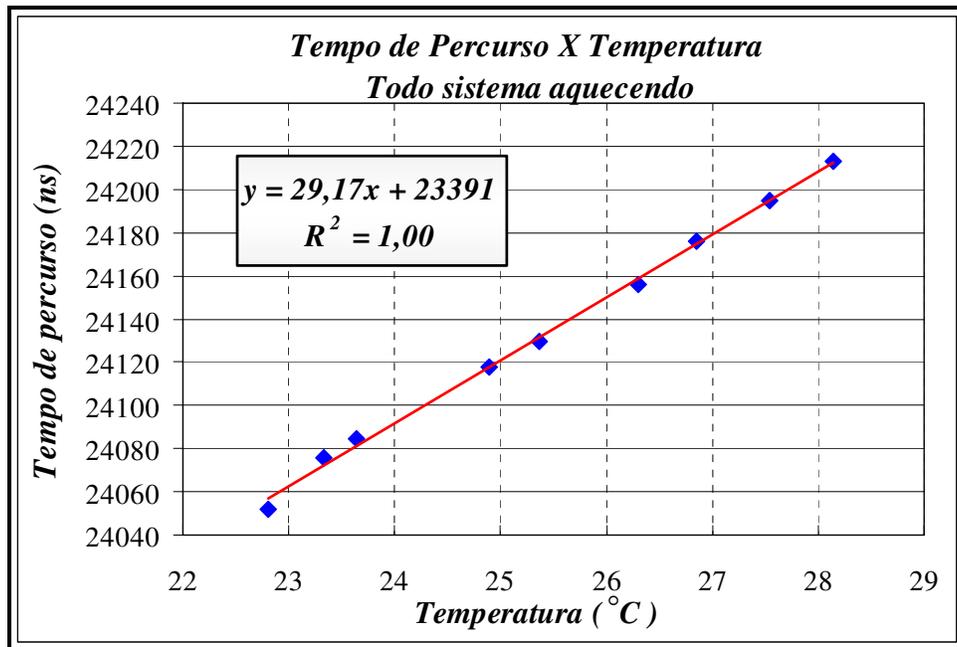


Figura 5.14: Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 40 mm – todo sistema aquecendo – transdutor 2,25MHz ( $\phi$  0,5’’)

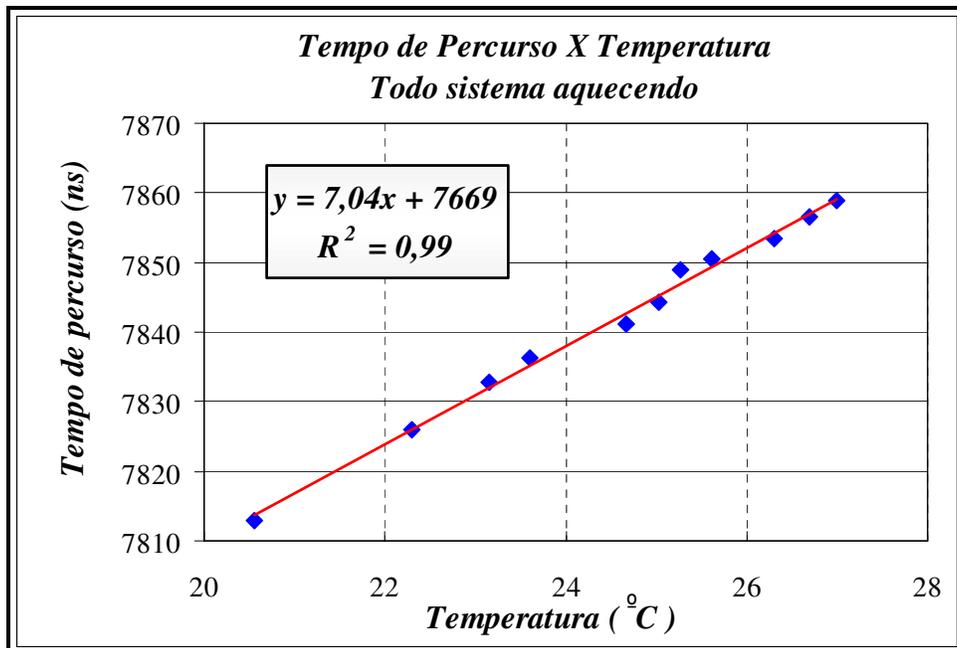


Figura 5.15: Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 10,8 mm - todo sistema aquecendo – transdutor 2,25 MHz (1’’ x 0,5’’)

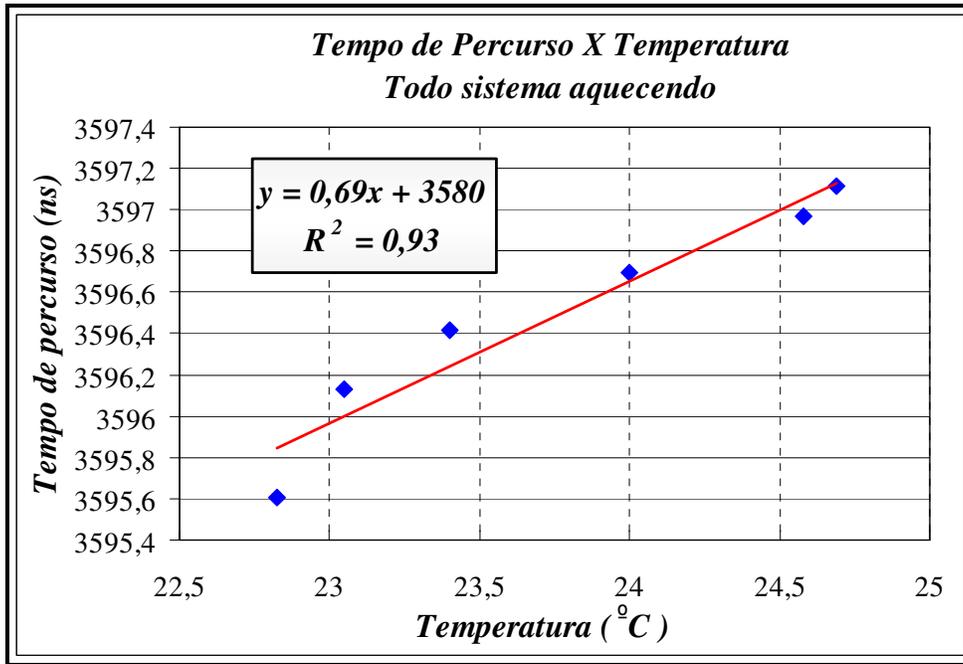


Figura 5.16: Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no aço = 10,8 mm - todo sistema aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1" x 0,5")

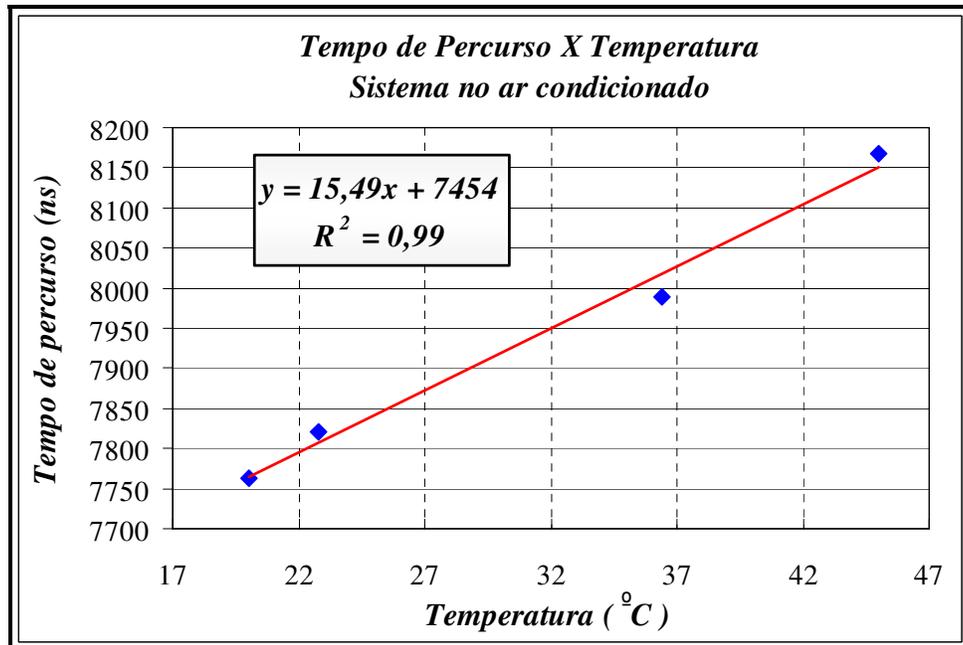


Figura 5.17: Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no acrílico = 10,8 mm – apenas peças aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1" x 0,5")

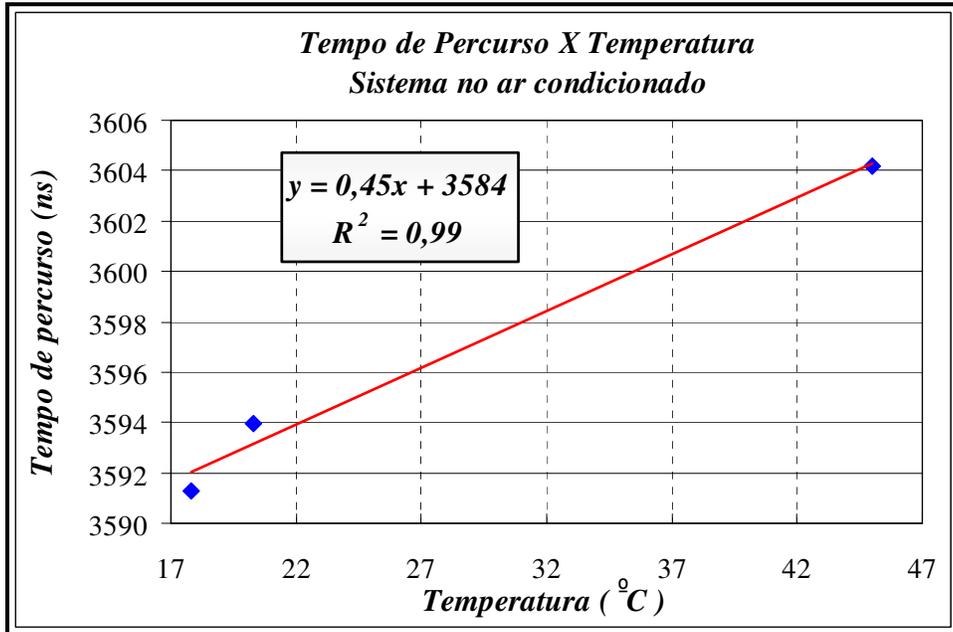


Figura 5.18: Influência da temperatura sobre tempo de percurso – distância percorrida no aço = 10,8 mm – apenas peças aquecendo - transdutor 2,25 MHz (1" x 0,5")

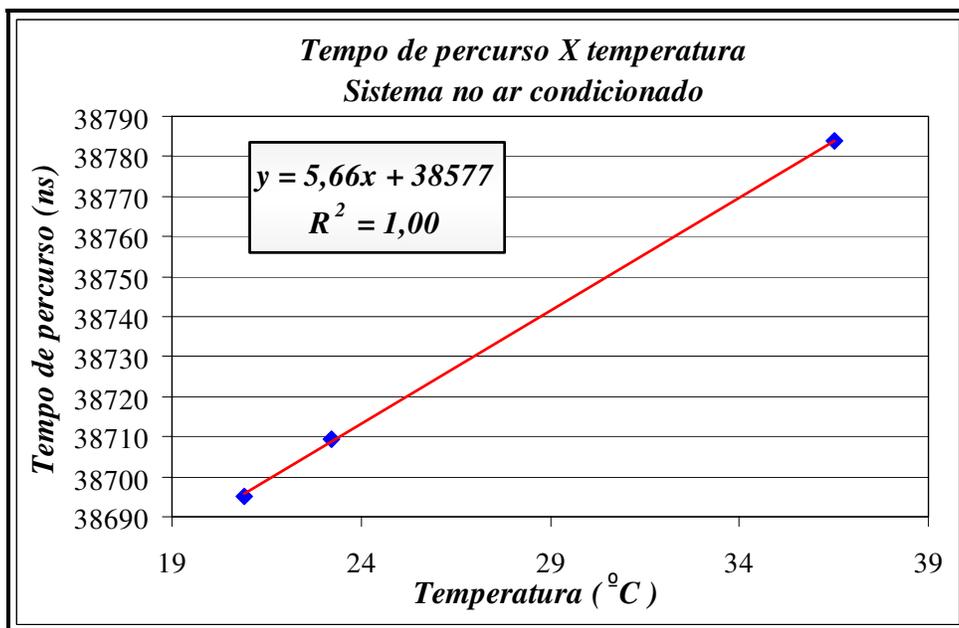


Figura 5.19: Influência da temperatura sobre tempo de percurso Aço - conjunto ultra-sônico L<sub>cr</sub> apenas peças aquecendo - transdutor 3,5 MHz (1" x 0,5")

Através das figuras 5.14, 5.15 e 5.16, para o caso do sistema e peças aquecendo em conjunto, pode-se verificar que a influência no acrílico é mais significativa do que no aço. O procedimento usado foi apresentado no item 3.3.6.1. Enquanto as variações no acrílico ficaram entre 29,173 ns/°C e 7,03 ns/°C respectivamente para o espaço maior e menor percorrido no acrílico, para o aço o valor encontrado foi de 0,687 ns/°C. A variação específica no acrílico por comprimento foi de 0,73 (ns/°C) / mm para a distância de 40 mm e foi de 0,99 (ns/°C) / mm para a distância de 10,8 mm. A diferença se explica pela posição onde se está medindo.

Para o aço, o valor encontrado foi 0,064 (ns/°C) / mm. Esse valor é cerca de 15 vezes menor que o do acrílico. Com isso, identifica-se a principal fonte de variação.

Como o coeficiente de expansão térmica do aço é 12/°C e o do acrílico é 70/°C, não se pode explicar a diferença encontrada apenas pela expansão dos elementos, mas sim por diferença na velocidade de propagação da onda.

Os levantamentos dos tempos de percurso das figuras 5.14 a 5.18 foram feitos através do método pulso-eco e para a figura 5.19 através do método  $L_{cr}$ . Analisando as figuras 5.17 e 5.18 onde apenas as peças em questão estão sendo aquecidas, podemos verificar que a influência da variação do tempo de percurso foi de 0,45 ns/°C para o aço e 15,48 ns/°C para o acrílico, indicando que a influência da temperatura sobre o tempo de percurso se alterou. O fato de que os resultados foram diferentes devem-se principalmente aos transientes, já que foram acoplados sistemas em níveis diferentes de temperatura. Isso mostra que não é possível, com os resultados obtidos até esse momento, corrigir os efeitos da temperatura quando o componente sob teste e o transdutor estiverem em temperaturas muito diferentes. O ideal é que os sistemas estejam na mesma temperatura, para qual um fator de correção pode ser aplicado.

A figura 5.19 mostra a variação do tempo de percurso em relação a temperatura quando o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  é fixado sobre o posicionador estático e apenas a peça que está sendo analisada está aquecida. O resultado mostra uma variação de 5,66 ns/°C. Da mesma forma que no caso das figuras 5.17 e 5.18, o resultado é afetado pelo transiente.

A figura 5.20 mostra o levantamento do tempo de percurso em relação a temperatura quando o posicionador dinâmico está posicionado sobre o duto na posição 3(90°) e o transdutor de 2,25 MHz ( $\phi$  0,5'') está montado no conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$ . O procedimento segue o descrito no item 3.3.6.3.

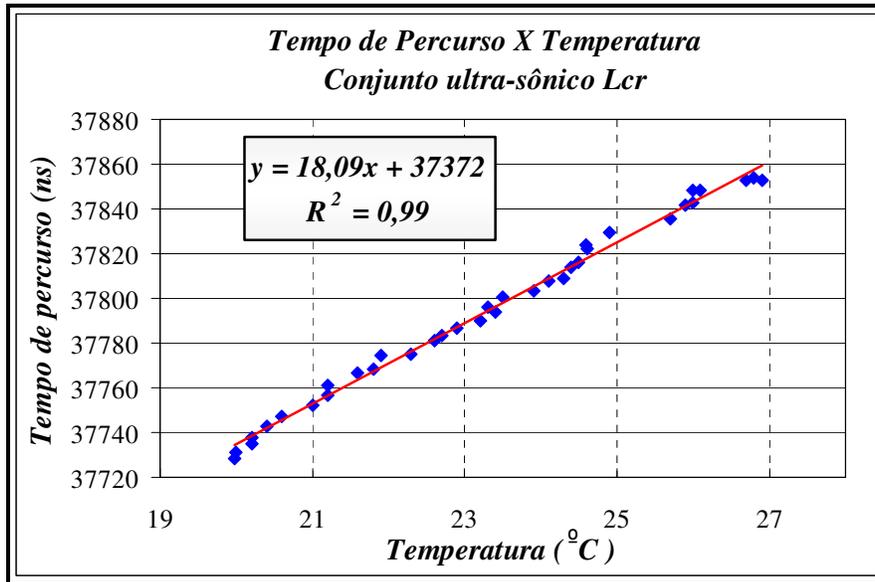


Figura 5.20: Influência da temperatura sobre tempo de percurso para conjunto sobre duto

A figura mostra que houve um aumento de cerca de 18 ns/°C. Para esse caso todo o sistema estava sendo aquecido. Fica claro que nesse caso tanto o acrílico como o material do duto influenciaram sobre o tempo de percurso. Conforme mostrado anteriormente, o acrílico tendo maior influência sobre esse aumento de tempo de percurso. O valor encontrado representa o coeficiente de correção do tempo de percurso para as aplicações com o posicionador dinâmico. Outros valores próximos a este foram encontrados para outros conjuntos ultra-sônicos aplicados em chapas de aço API 5L X70, Santos (2007) e Fraga (2007) encontraram valores entre 13 e 16 ns/°C.

### 5.8 Medição das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ - direção longitudinal.

Para a estimativa das tensões atuantes, foi utilizado o valor do coeficiente  $L_{11}$  na equação 2.81, obtido em ensaios de chapas semelhantes, na mesma direção de laminação. Segundo Caetano (2003) e Andrino (2003), o valor médio de  $L_{11}$  é de 1,71. Para (Santos, 2007), o valor médio é de 3,19. Como está além dos objetivos deste trabalho avaliar os coeficientes, foi

utilizado o valor médio entre os obtidos. Assim,  $L_{11} = 2,45$  foi empregado no cálculo das tensões. Os valores dos módulos de elasticidade utilizados foram os calculados no item 5.4 e o tempo de percurso de referência ( $t_o$ ) foi calculado pela divisão da distância percorrida pela onda dentro do material (155 mm) pela velocidade da onda longitudinal em aço (5900 m/s) e resultou em  $t_o = 26271$  ns. Os pontos medidos foram: 2e(45°), 2(45°), 2d(45°); 4e(135°), 4(135°), 4d(135°); 6e(315°), 6(315°), 6d(315°); 7(225°)e, 7(225°) e 7(225°)d. Cada medida do tempo de percurso foi repetida três vezes para cada ponto, utilizando para a sua determinação o método da correlação cruzada. Cada ponto foi medido em três temperaturas diferentes: 19 °, 22,5 ° e 26 °. As figuras 5.21 à 5.29 mostram os resultados para a variação da tensão calculada como função da pressão aplicada para os pontos centrais, a direita e a esquerda para as temperaturas escolhidas. O procedimento esta detalhado no item 3.3.9.

A partir desse ponto, somente os dados referentes aos pontos 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°) serão analisados. A razão é que o comportamento de cada ponto é diferente, mas espera-se que os dados médios sejam coerentes. Como o ponto 1 está sob uma costura, seus resultados não foram adequados; com isso o ponto 5, simétrico, foi excluído para não influenciar na média. Pela mesma razão o ponto 3, que não tem correspondente simétrico, foi excluído.

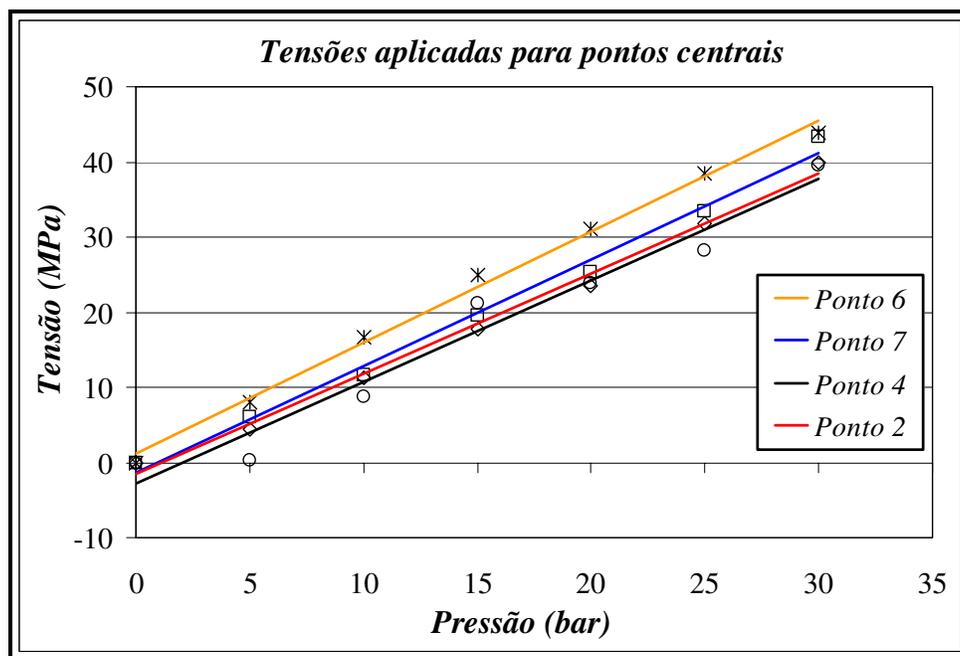


Figura 5.21: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 19°C)

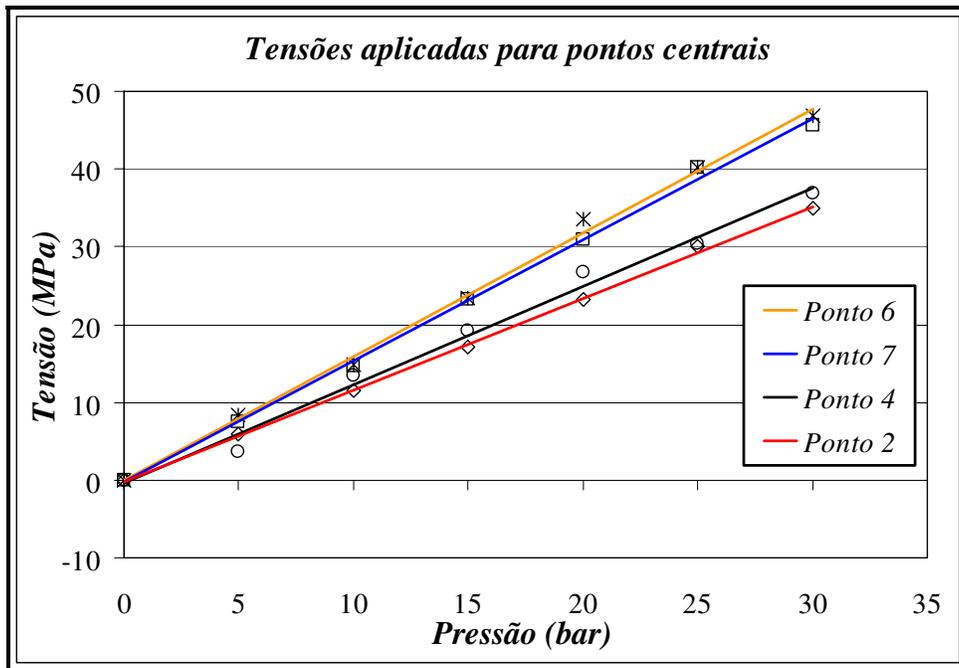


Figura 5.22: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 22,5°C)

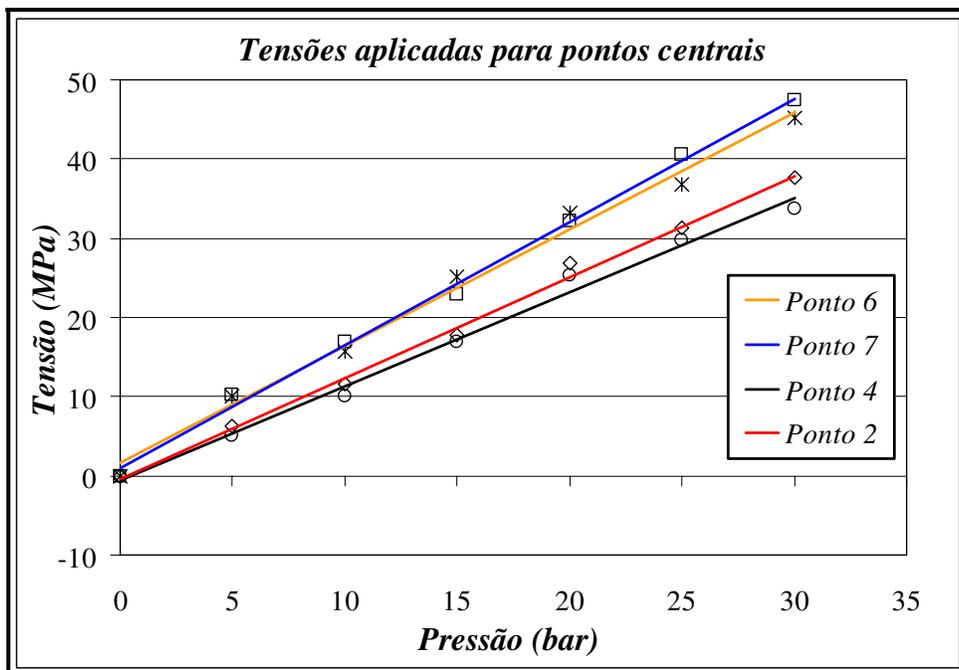


Figura 5.23: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (temperatura: 26°C)

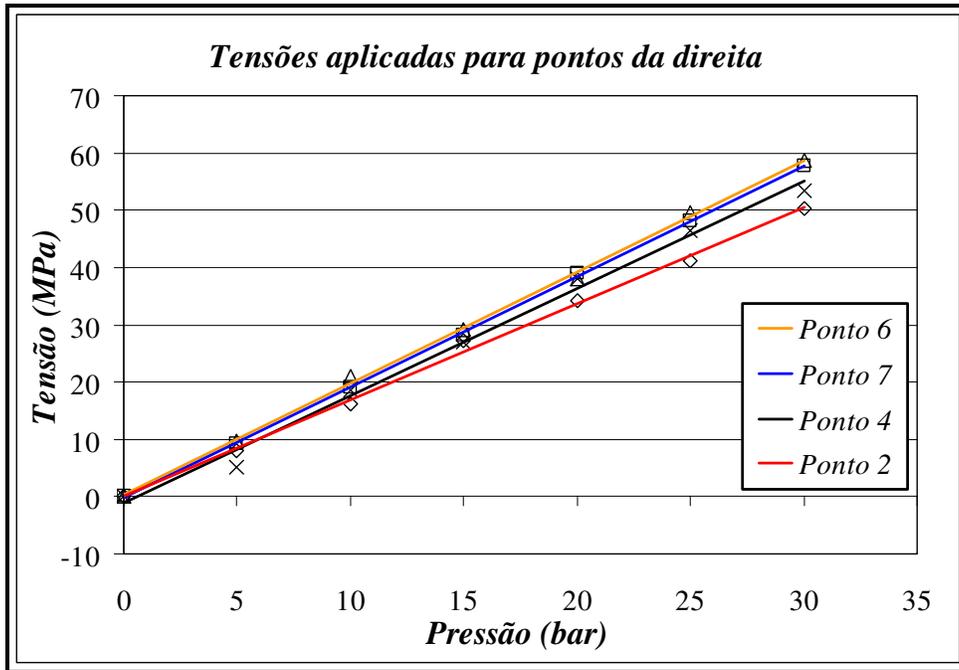


Figura 5.24: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 19°C)

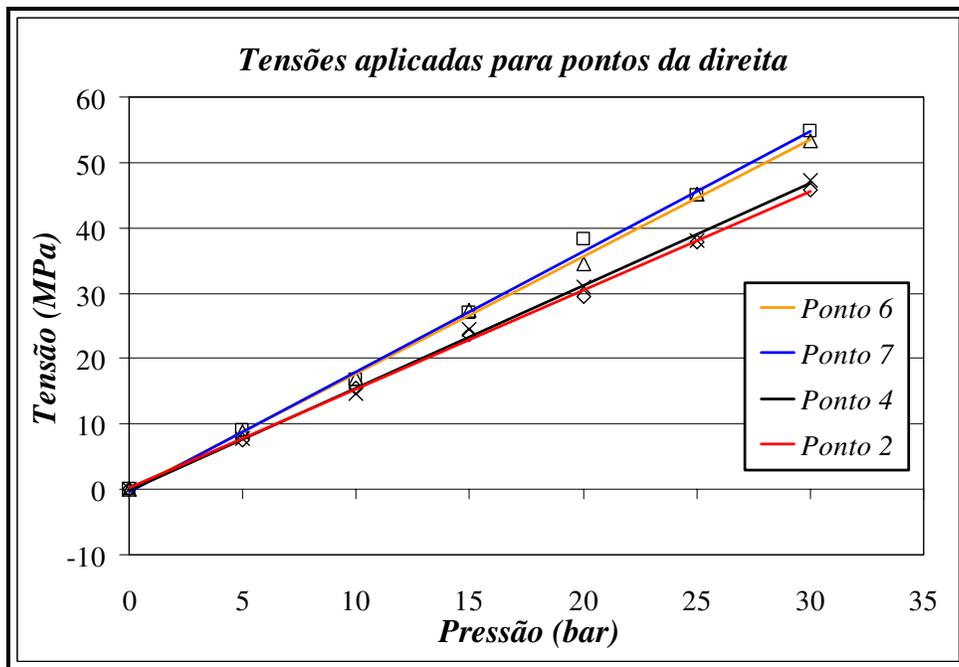


Figura 5.25: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 22,5°C)

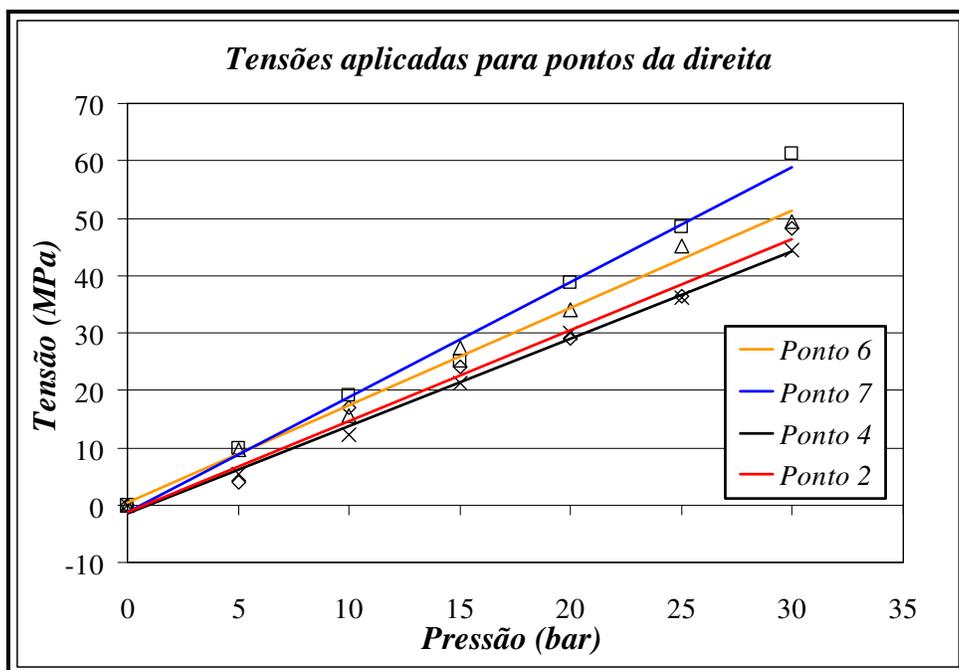


Figura 5.26: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da direita (temperatura: 26°C)

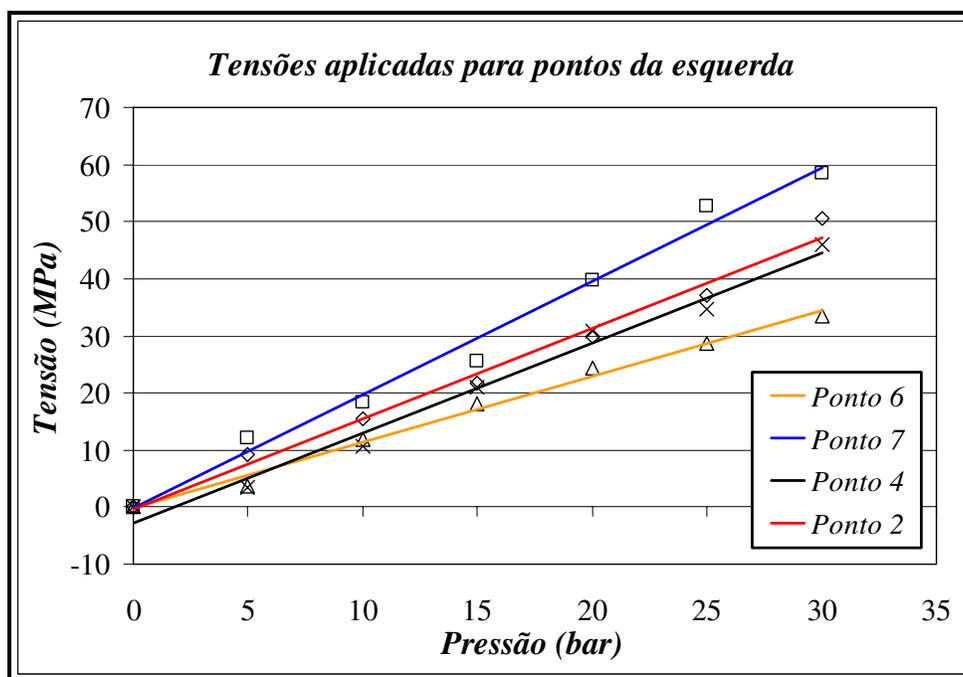


Figura 5.27: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 19°C)

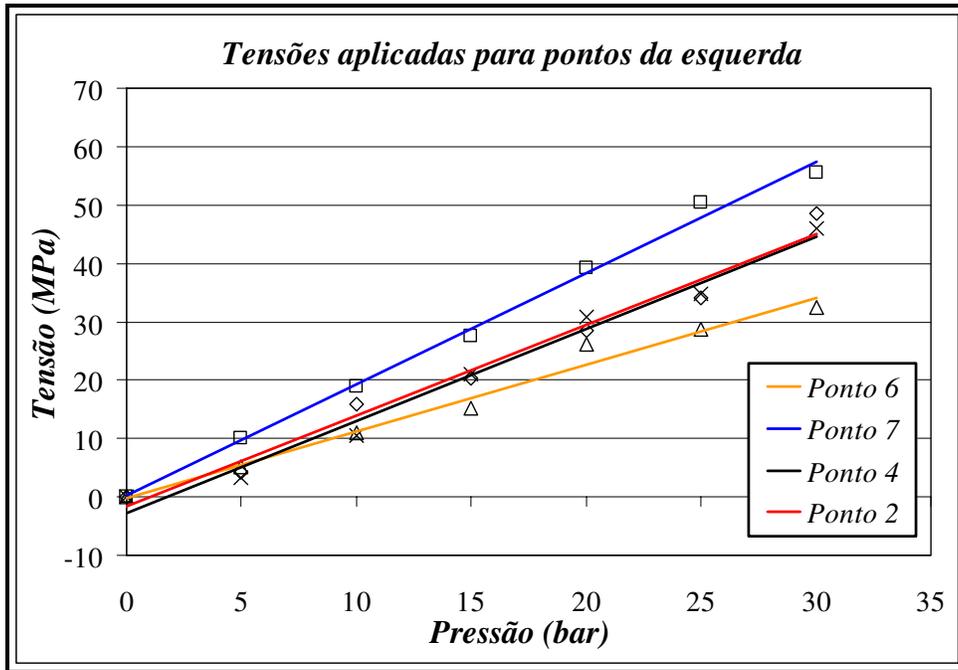


Figura 5.28: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 22,5°C)

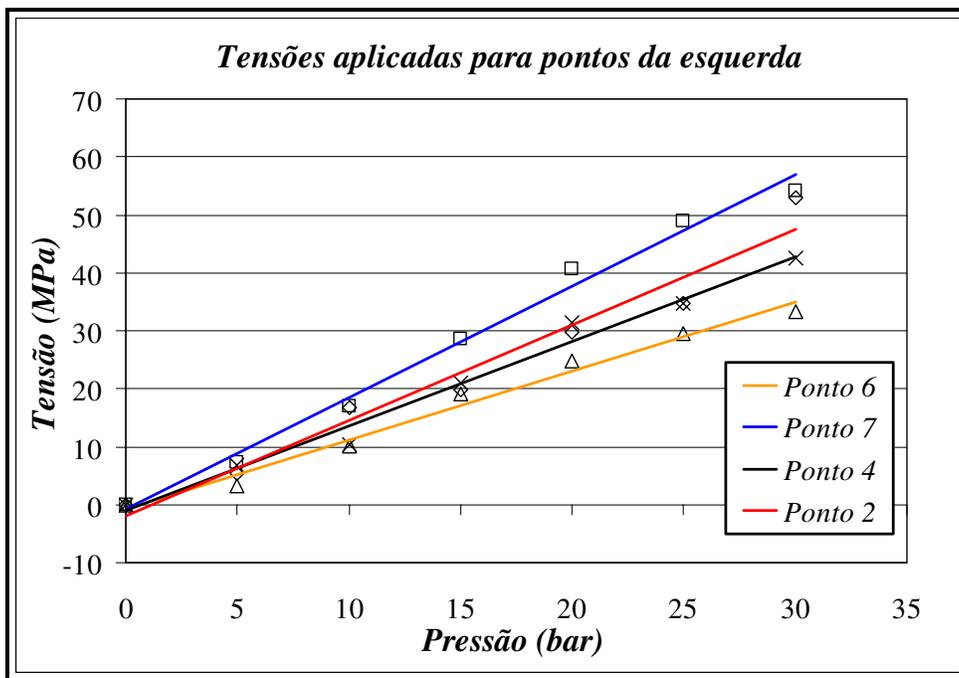


Figura 5.29: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos da esquerda (temperatura: 26°C)

Analisando as figuras encontrou-se certa dispersão nas respostas, que deve-se basicamente à variação na estrutura do material (textura) e a não-uniformidades geométricas. De forma coerente, para quase todos os gráficos, a tensão nos pontos 6 e 7 foram as maiores, devido aos efeitos do peso e da não uniformidade. As tensões nos pontos 2 e 4 apresentaram valores menores que as tensões em 6 e 7. A tensão no ponto 6 para os gráficos 5.27, 5.28 e 5.29 teve o valor abaixo das tensões nos pontos 2 e 4, mostrando que há alguma influência não computada, já que se esperava, como nos outros gráficos um valor acima dos pontos 2 e 4. A razão para uma menor tensão nos pontos inferiores poderia ser o peso do líquido, já que o corpo de prova é bi-apoiado. No entanto, tal afirmação não é coerente com a justificativa sugerida para a diferença de comportamento dos extensômetros, no item 5.5.

Uma segunda explicação pode estar na diferença da resposta de cada ponto, que pode levar a variações no módulo de elasticidade, já incluída, e no coeficiente  $L_{11}$ , até aqui considerado constante. Variação na textura é o principal fator que influencia no coeficiente acustoelástico.

As figuras anteriores mostram extrema coerência com o comportamento linear previsto pela equação 2.81. O valor de  $r^2$  para todos os caso foi superior a 0,98. Isso indica que, com as propriedades elásticas para cada ponto conhecidas, o valor real das tensões pode ser calculado. Indica também que, mesmo que haja um efeito significativo do processo de fabricação sobre o valor das propriedades elásticas, e sobre o resultado, este não implica em resposta não linear.

Adotando a hipótese de que os fatores que influenciaram na dispersão encontrada se distribuem aleatoriamente ao longo da circunferência, ou seja, desprezando os efeitos do peso e outros associados à posição e concentrando-se nos efeitos de textura, pode-se considerar o valor médio como representativo no experimento. Esse valor pode ser comparado à tensão teórica calculada.

As figuras 5.30 à 5.38 mostram os gráficos das tensões médias medidas para os 4 pontos centrais, da esquerda e da direita analisados, para cada temperatura, em função da tensão teórica prevista, calculada segundo a equação 5.1. A dispersão, como esperado, é muito pequena, conforme mostrado pelos coeficientes de correlação. As inclinações das retas mostram que os

valores da tensão calculada e da média se aproximam muito. Isso mostra que o método pode ser usado na determinação das tensões, dado que sejam conhecidas as propriedades elásticas corretas.

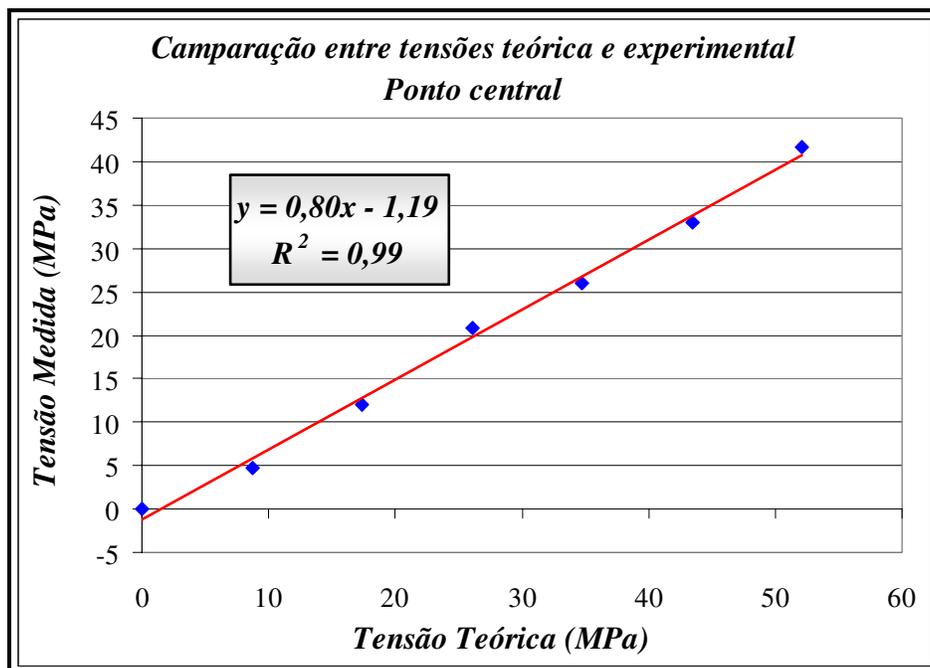


Figura 5.30: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 19°C)

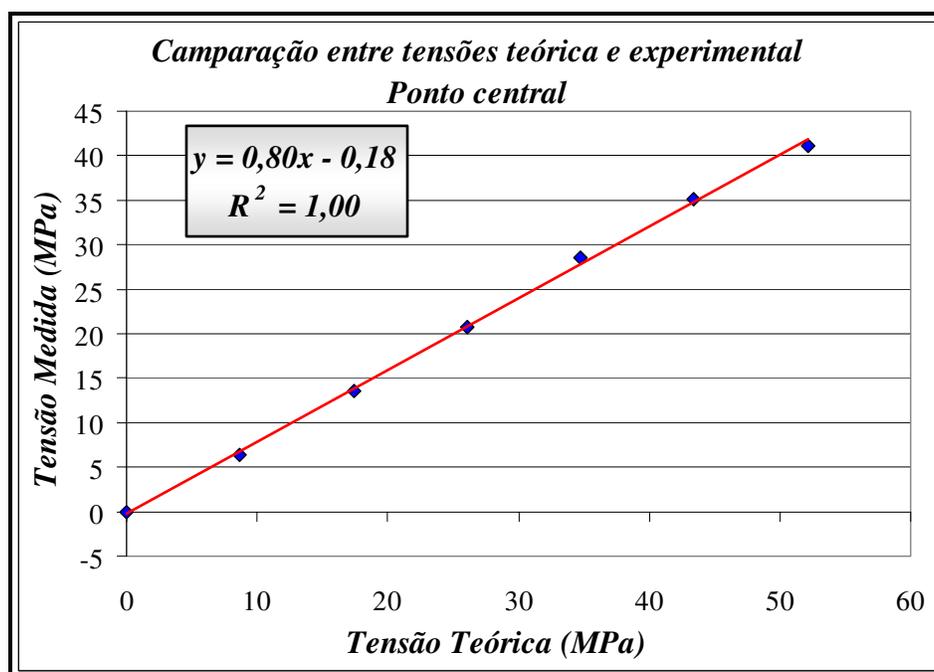


Figura 5.31: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 22,5°C)

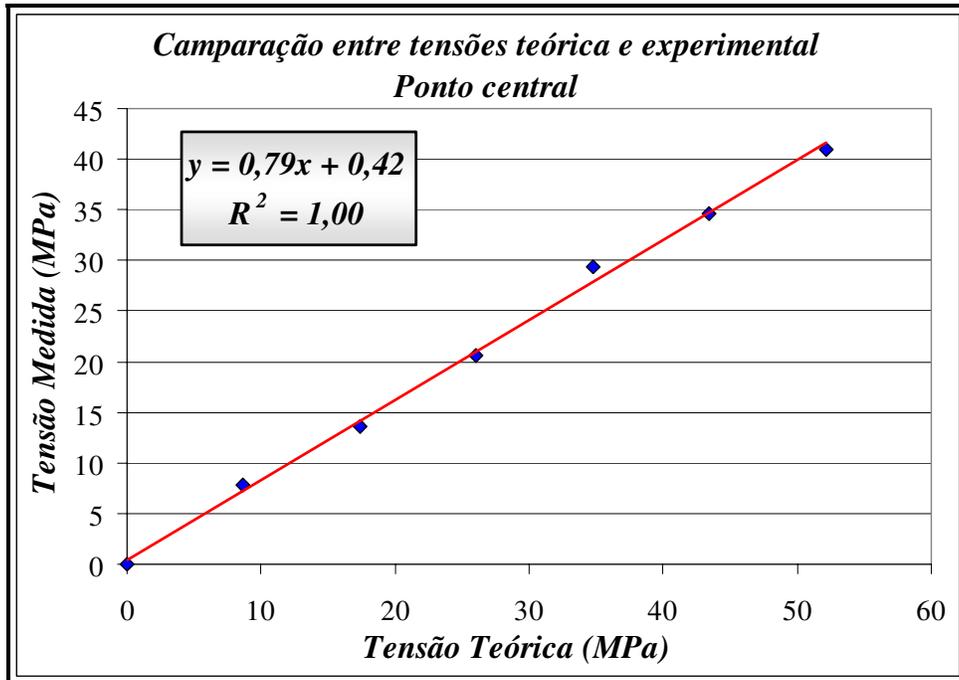


Figura 5.32: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos centrais (temperatura: 26°C)

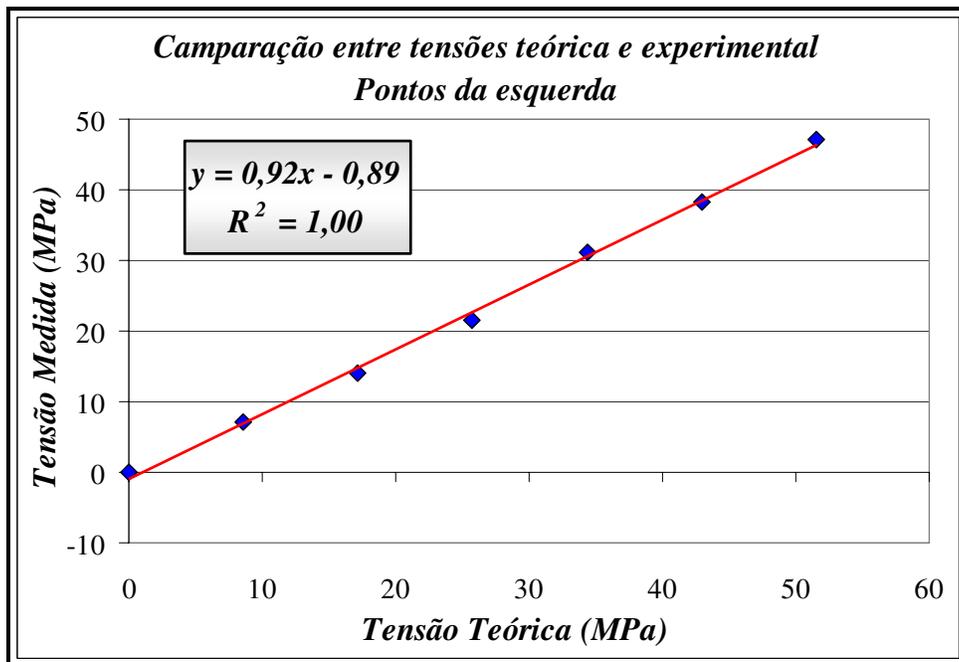


Figura 5.33: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 19°C)

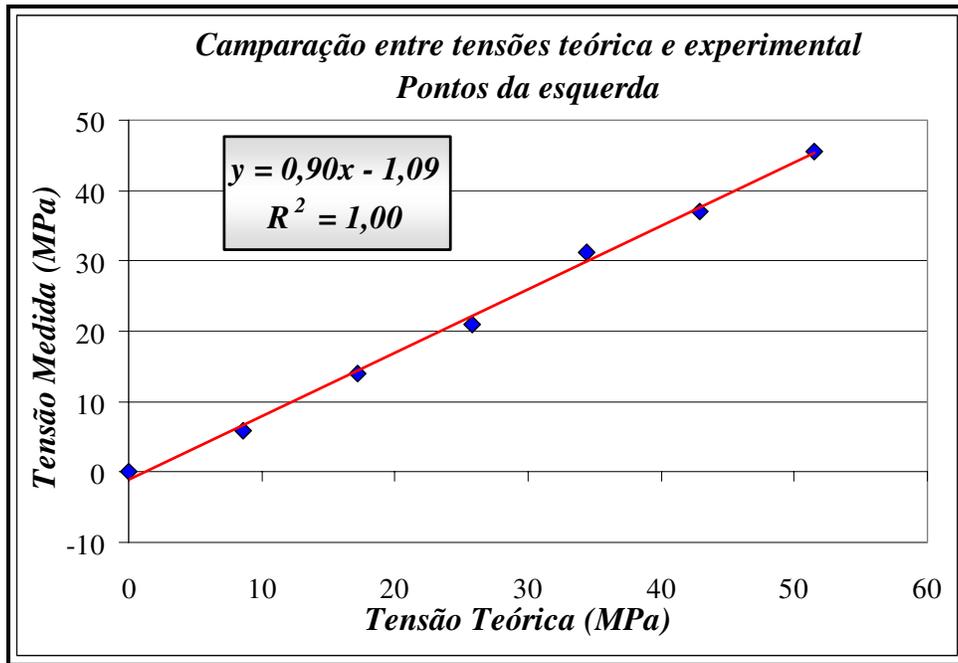


Figura 5.34: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 22,5°C)

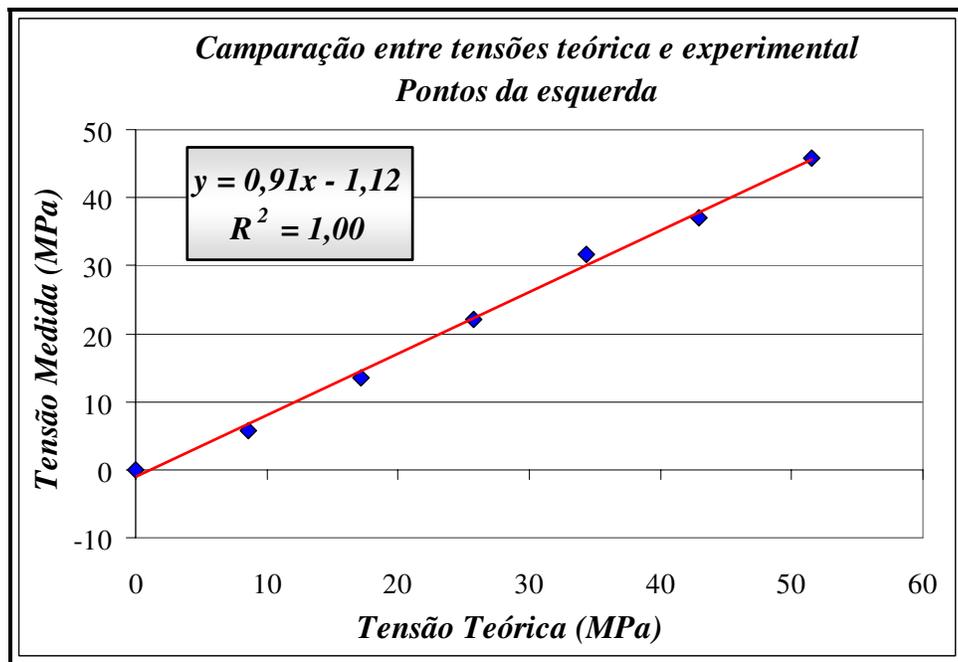


Figura 5.35: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da esquerda (temperatura: 26°C)

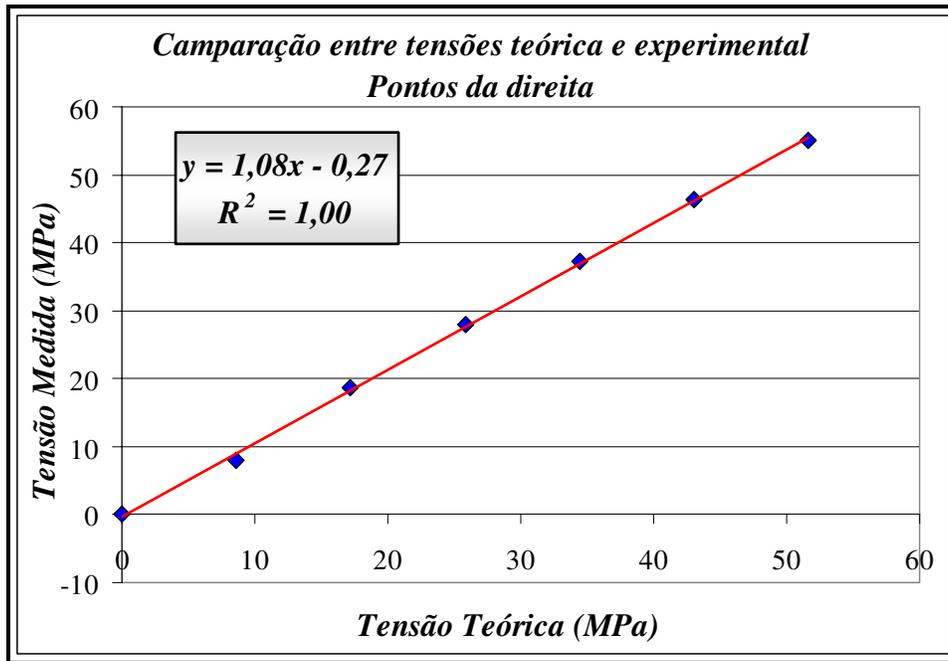


Figura 5.36: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 19°C)

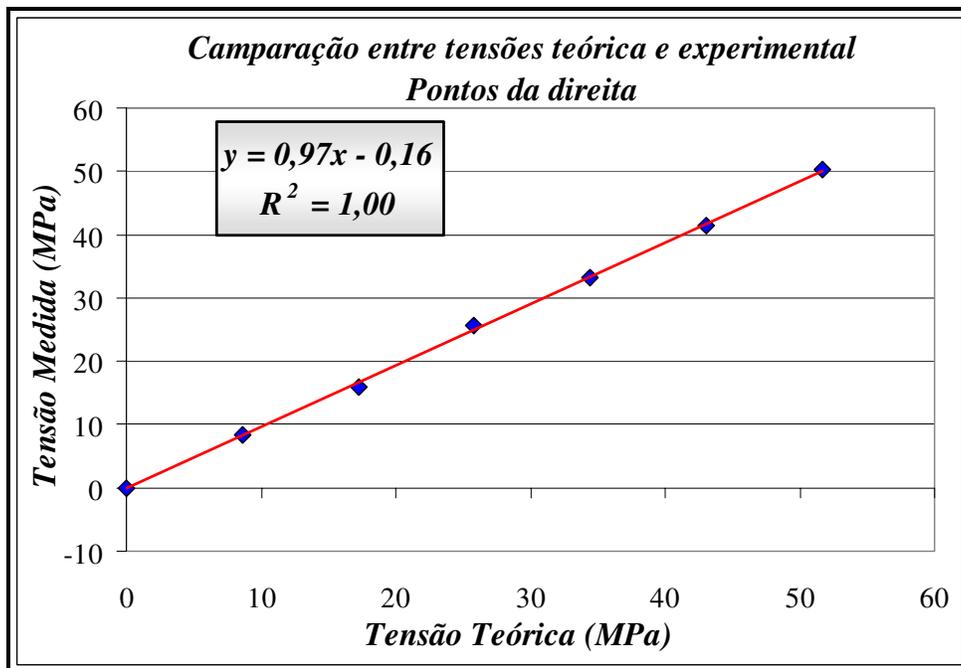


Figura 5.37: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 22,5°C)

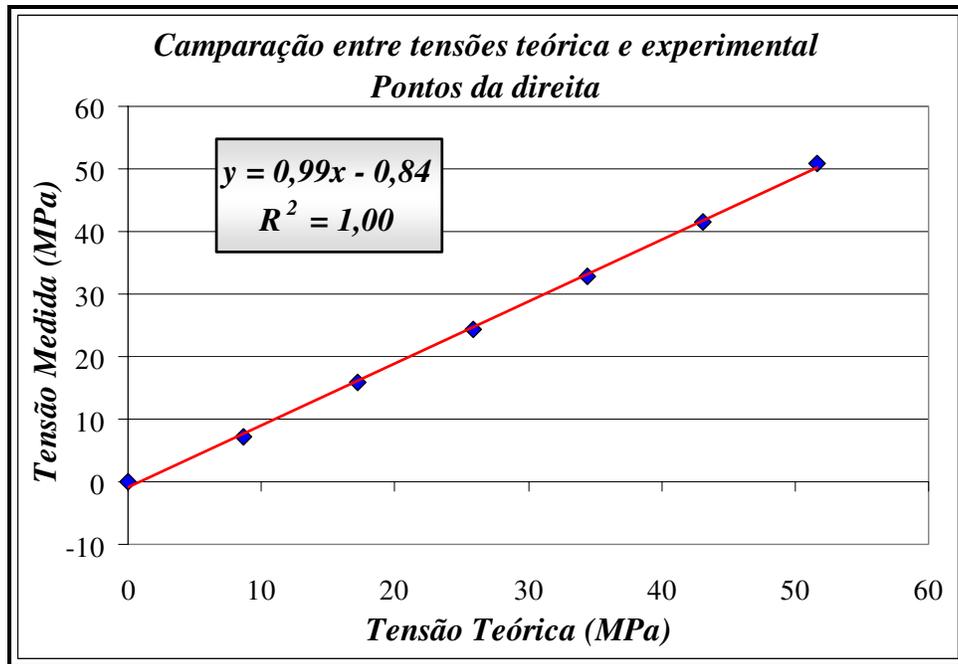


Figura 5.38: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida para pontos da direita (temperatura: 26°C)

Para uma análise da influência da temperatura sobre o levantamento das tensões, foi traçado um gráfico do ponto 2, localizado na direção central do duto em relação as temperaturas. A figura 5.39 mostra essa comparação. Conforme pode ser visto, há uma pequena variação dos valores da inclinação e não há uma tendência. O mesmo comportamento se repetiu para todos os outros pontos

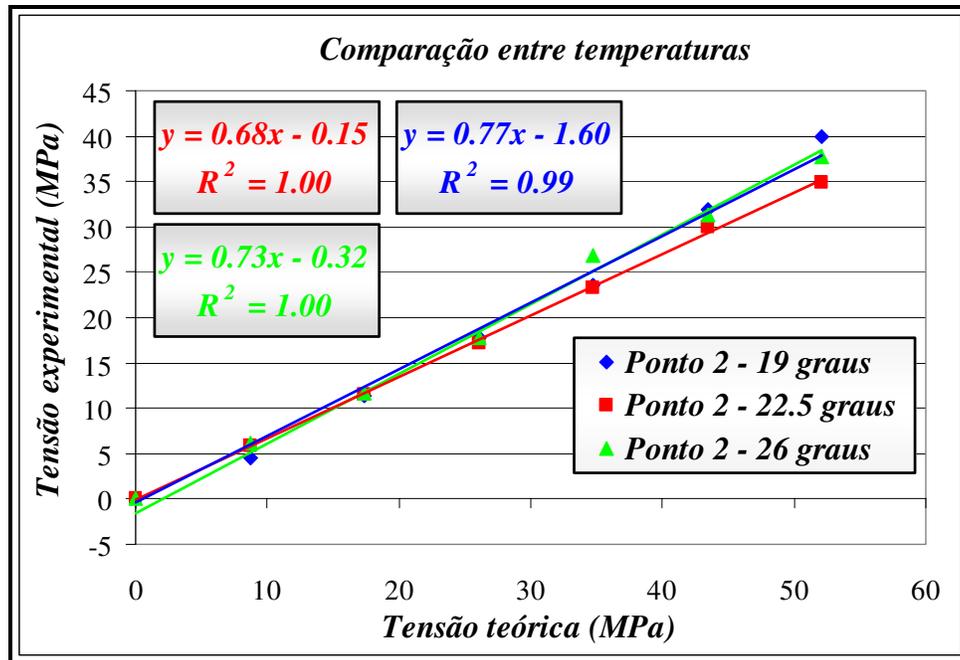


Figura 5.39: Comparação entre tensões experimentais em relação a temperatura (Ponto central 2).

Observa-se no gráfico que o valor de  $R^2$  para as medições realizadas ficou acima de 0,98. Como esse fator mede o quanto a variável de resposta é explicada pelo modelo, quanto mais próximo a “1”, melhor. Conclui-se então que a temperatura afetou o valor do tempo de percurso, mas não o cálculo da tensão atuante no duto.

### 5.8.1 Comparação da tensão aplicada no duto na direção longitudinal com o levantamento feito através de extensômetros.

Além da comparação feita com a tensão teórica calculada a partir da pressão aplicada, a tensão média medida nos pontos centrais foi comparada com a levantada com os extensômetros. A figura 5.40 mostra essa comparação. Foi feita uma média das tensões calculadas pelos extensômetros localizados na parte superior e inferior.

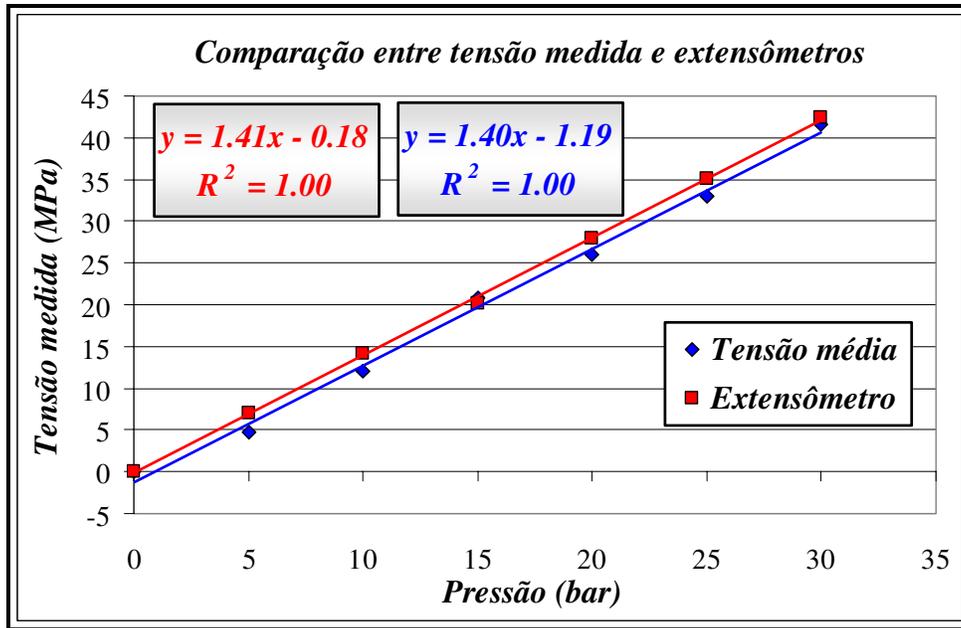


Figura 5.40: Comparação entre tensões médias medidas e tensões levantadas por extensômetros.

Pela figura observa-se uma excelente correlação entre retas mostrando que a dispersão, como esperado novamente, é muito pequena. A tabela 5.5 mostra as tensões medidas para cada caso.

Tabela 5.5: Medidas de tensões experimentais e através de extensômetros – direção longitudinal.

Pressão (bar)	Tensão média (MPa)	Extensômetros (MPa)
0	0	0
5	4,71	6,94
10	12,07	14,15
15	20,83	20,22
20	26,01	27,90
25	32,96	35,03
30	41,66	42,44

A figura 5.40 e a tabela 5.5 permitem ainda uma importante conclusão: dado que o valor da constante acustoelástica usado esteja correto, os extensômetros respondem exatamente como o sistema ultra-sônico. Essa nova observação contradiz o que foi discutido no item 5.5.

Com a hipótese do parágrafo anterior, os gráficos das figuras 5.30 a 5.32 mostrariam o coeficiente angular aproximadamente igual a 1,0, quando traçados em relação à tensão medida pelos extensômetros. Não é possível verificar para as duas outras posições, esquerda e direita, pois não há extensômetros colados nesses lugares.

Como está além dos objetivos desse trabalho verificar se o coeficiente acustoelástico é adequado, os resultados apresentados deste ponto em diante seguem o mesmo padrão já definido, ou seja, são comparados com a tensão calculada com a tensão aplicada.

### **5.9 Levantamento das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ – direção transversal.**

Da mesma forma que realizado para a direção longitudinal do duto, foram levantados os perfis de tensão em relação à pressão aplicada no sistema para a direção transversal. Os pontos escolhidos foram os pontos centrais 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). Para esse caso não foi verificada a influência da temperatura sobre os resultados das tensões resultantes. As tensões medidas foram calculadas da mesma forma que na direção longitudinal, apenas modificando os valores da constante acustoelástica e tempo de referência, que foram respectivamente iguais a  $L_{11} = 2,28$  e  $t_{ref} = 20338,9$  ns. O valor da constante acustoelástica foi retirada de ensaios de chapas semelhantes, na mesma direção de laminação (Caetano, 2003) e o tempo de referência foi calculado conforme a distância entre transdutores utilizados para o levantamento desse perfil. A figura 5.41 mostra o resultado para a variação da tensão calculada como função da pressão aplicada para os pontos centrais.

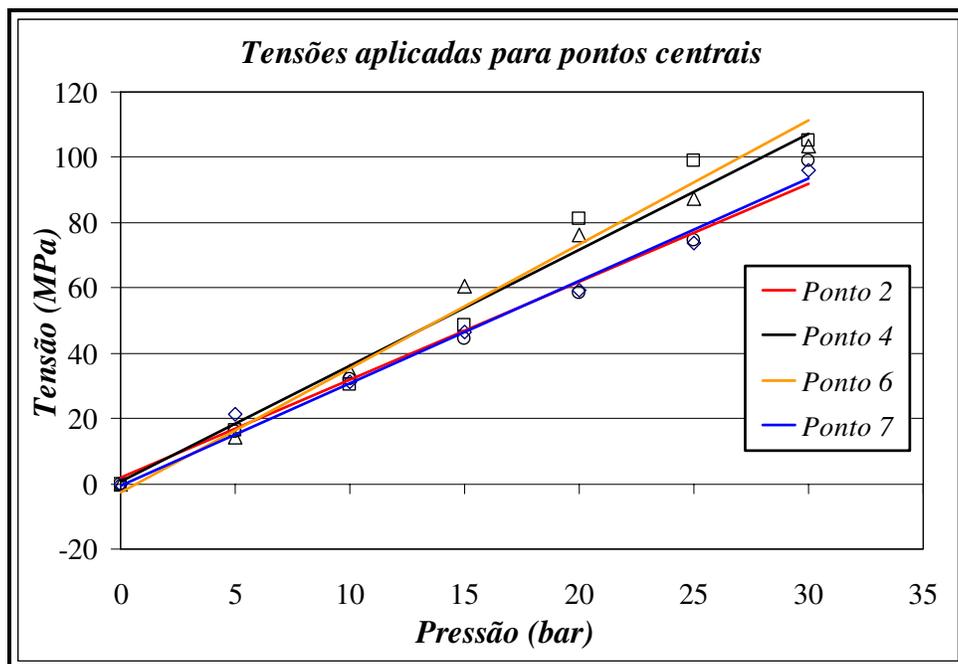


Figura 5.41: Tensão experimental calculada em função da pressão para pontos centrais (direção transversal)

Analisando a figura, diferentemente da direção longitudinal, não houve uma coerência em relação aos valores de tensão encontrados para os pontos. Isso pode ter sido causado pela falta de precisão na colocação dos transdutores ultra-sônicos sobre o duto, pois esse posicionamento foi feito de forma manual, não com o posicionador dinâmico. Porém os resultados mostram o comportamento linear esperado e o valor de  $r^2$  para todos os pontos foi superior a 0,97.

A figura 5.42 mostra a comparação entre as tensões médias medidas em função da tensão teórica calculada para a direção transversal (Shigley, 2006). Da mesma forma que para a direção longitudinal adota-se a hipótese de que os fatores que influenciaram na dispersão encontrada se distribuem aleatoriamente ao longo da circunferência.

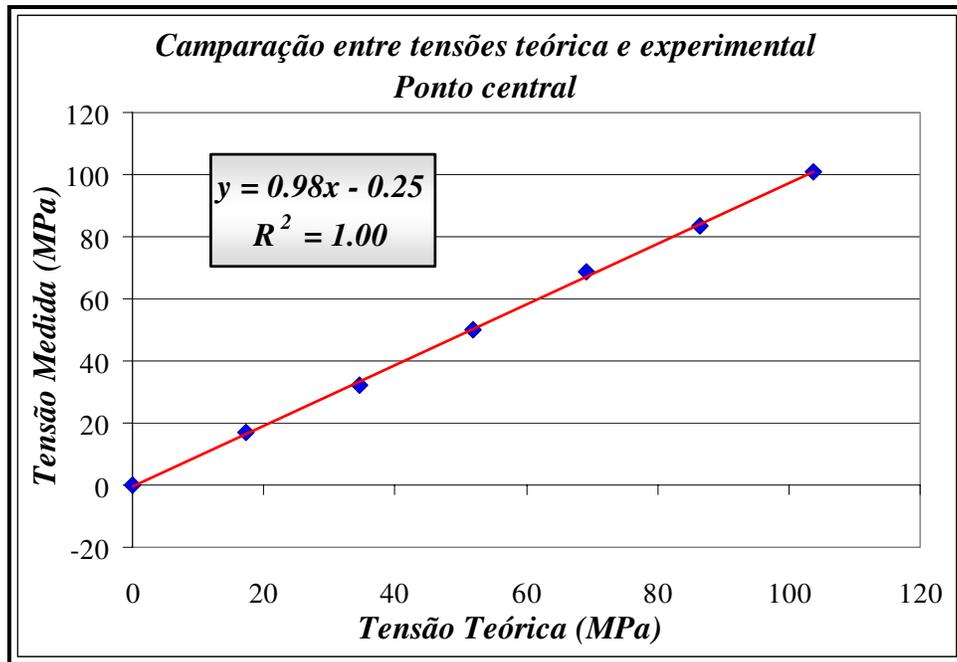


Figura 5.42: Comparação entre tensão teórica e tensão média medida – direção transversal.

Analisando a figura nota-se que a diferença é muito pequena, conforme mostrado pelo coeficiente angular. As mesmas conclusões da direção longitudinal podem ser feitas para a direção transversal.

### 5.9.1 Comparação da tensão aplicada no duto na direção transversal com a tensão obtida com os extensômetros.

Foram feitas também comparações com a tensão média medida nos pontos citados no item anterior com a calculada através de extensômetros. A figura 5.43 mostra essa comparação. Foi feito uma média das tensões calculadas pelos extensômetros localizados na parte superior e inferior.

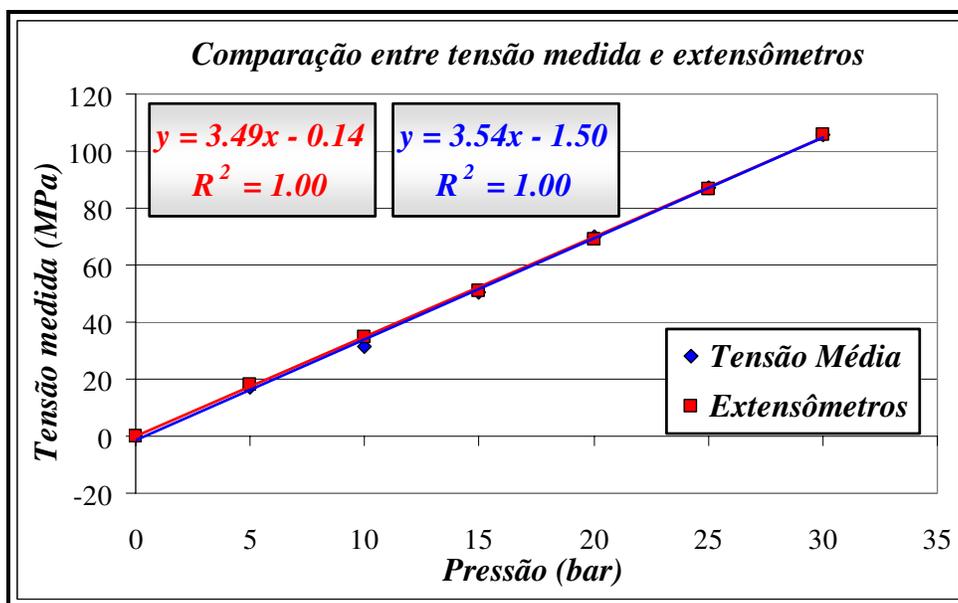


Figura 5.43: Comparação entre tensões médias medidas e tensões levantadas por extensômetros. (direção transversal)

Pela figura observa-se uma excelente correlação entre retas, mostrando que a diferença é muito pequena. A tabela 5.6 mostra as tensões obtidas para cada caso.

Tabela 5.6: Medidas de tensões levantadas através de extensômetros e experimentais. – direção transversal.

Pressão (bar)	Tensão média (MPa)	Extensômetros (MPa)
0	0	0
5	17,09	18,25
10	31,31	34,73
15	50,33	50,94
20	69,84	68,92
25	87,00	86,84
30	105,86	105,70

Os valores apresentados confirmam que as tensões medidas pelos extensômetros são um melhor parâmetro de comparação.

### 5.10 Levantamento das tensões aplicadas no duto através do método $L_{cr}$ para outras frequências de transdutores.

Como resultado adicional dessa tese de doutorado foi levantado o perfil das tensões atuantes no duto em relação à pressão aplicada para diferentes frequências de transdutores. Foram utilizados os transdutores de 3,5 MHz (0,5'' x 1''), 5 MHz (0,5'' x 1'') e 5 MHz ( $\varnothing$  0,5''). Para o cálculo das tensões, as mesmas considerações feitas para o transdutor de 2,25 MHz (0,5'' x 1'') são aplicadas aqui. As temperaturas foram mantidas constantes em 19°C e os pontos escolhidos foram: 2(45°); 3(90°); 4(135°); 5(180°); 6(315°); 7(225°) na posição central do duto. As figuras 5.44 à 5.46 mostram os perfis levantados.

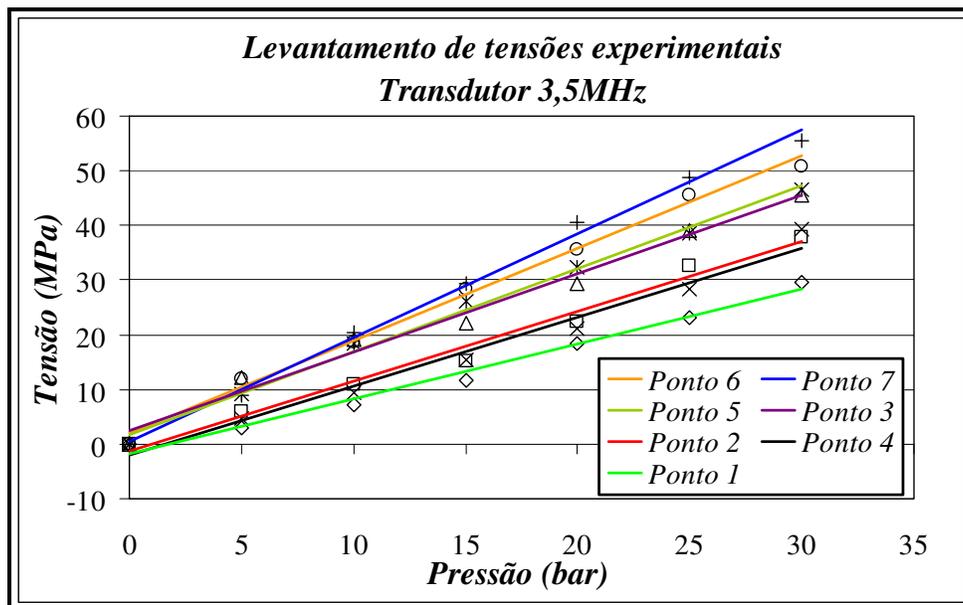


Figura 5.44: Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto  
Transdutor de 3,5 MHz (0,5'' x 1'')

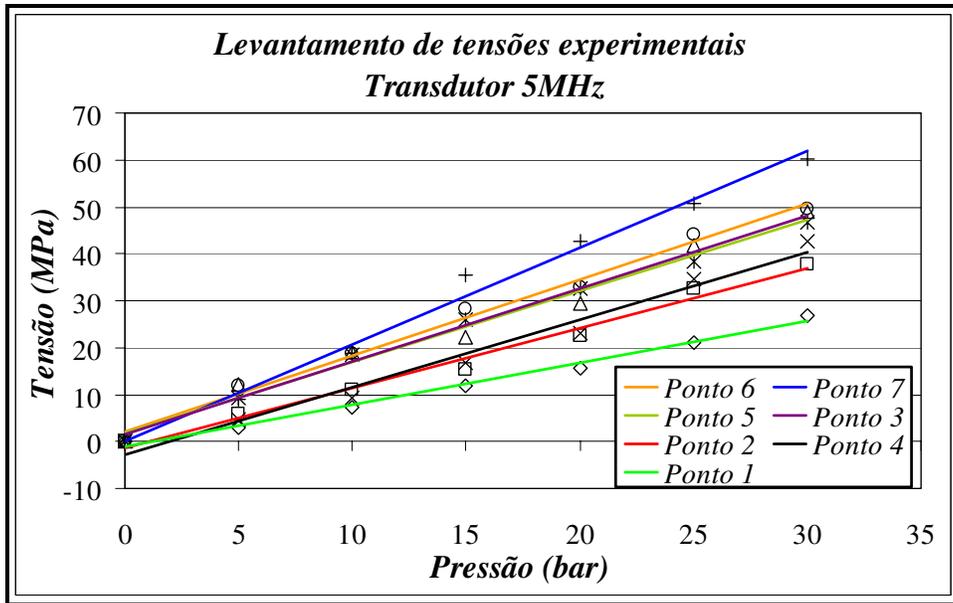


Figura 5.45: Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto  
Transdutor de 5 MHz (0,5'' x 1'')

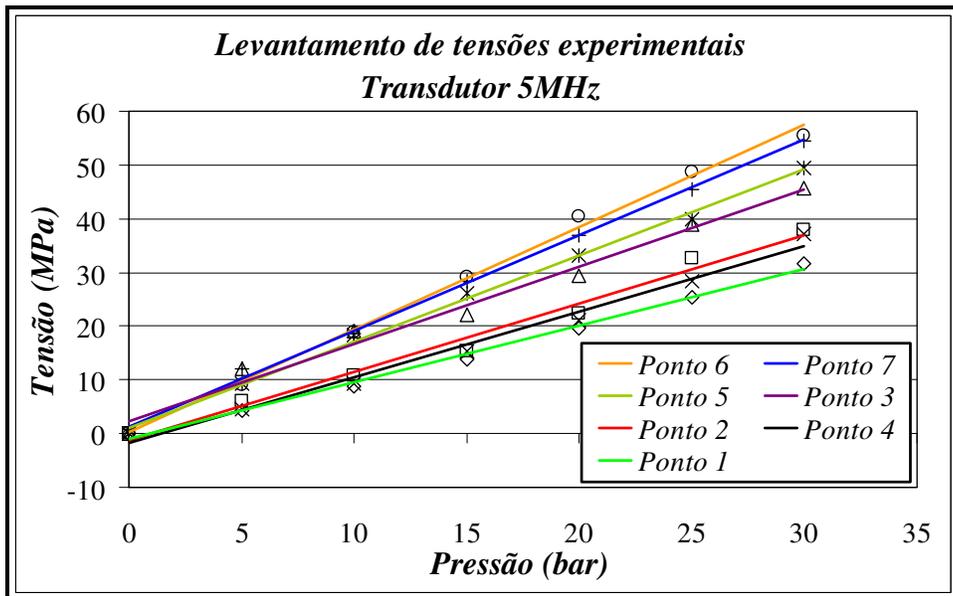


Figura 5.46: Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto  
Transdutor de 5 MHz ((Ø 0,5''))

Analisando as figuras, as mesmas considerações feitas para o caso do transdutor de 2,25MHz (1'' x 0,5'') podem ser feitas para esses levantamentos.

### 5.11 Método $L_{cr}$ – Conjunto ultra-sônico $L_{cr}$ – 1 transmissor – 2 receptores.

O processo de medição mostrado até o momento usa a correlação entre a onda obtida para o estado livre de tensões e a onda obtida com um valor de tensão aplicado. Para o trabalho atual, que permite conhecer a onda para o estado livre de tensões, o método atende de forma adequada. No entanto, para futuras aplicações em campo, tal onda não estará disponível. Por esse motivo, a instalação de um segundo transdutor foi proposta. A correlação seria entre o sinal obtido pelo primeiro receptor e o sinal obtido pelo segundo. A solução se mostrou extremamente satisfatória, conforme apresentado a seguir.

Para esse caso, os tempos de percurso foram determinados através da diferença entre medidas dos receptores e aplicada a correlação cruzada para sua determinação. O transdutor utilizado foi o 2,25 MHz (0,5'' x 1''), os pontos utilizados foram: 2(45°); 4(135°); 6(315°) e 7(225°) e a temperatura permaneceu constante em 20°C. Os mesmos dados utilizados na fórmula 2.81 para o transdutor de 2,25 MHz (0,5'' x 1'') do item 5.8 foram utilizados nessa etapa e os procedimentos adotados também foram os mesmos. A Figura 5.47 mostra os perfis das tensões medidas em relação às pressões exercidas no duto.

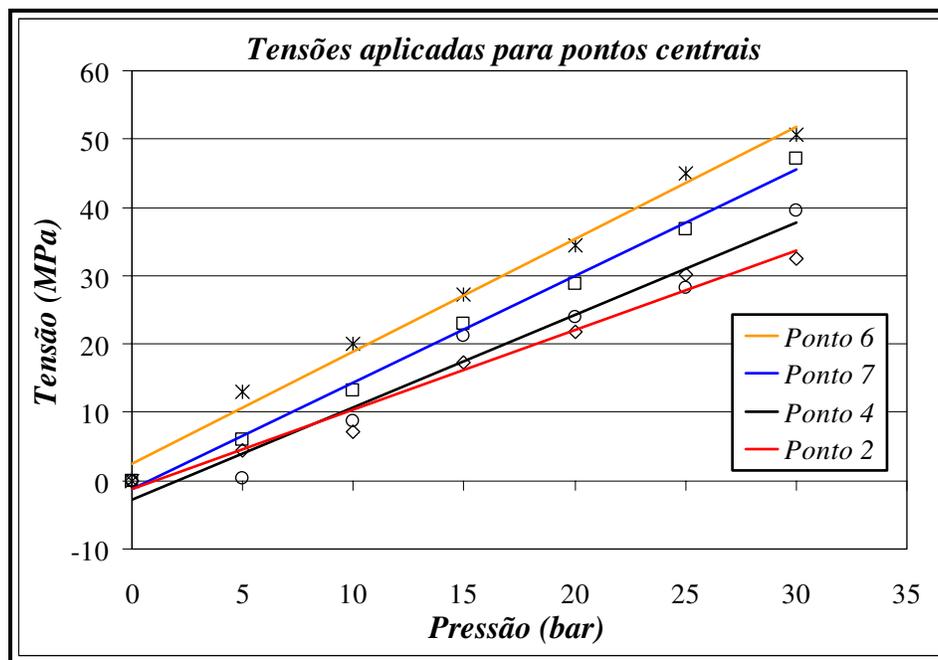


Figura 5.47: Tensão experimental calculada em função da pressão exercida no duto  
Conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  – 1 transmissor – 2 receptores.

Comparando a figura 5.47 com a figura 5.21, onde as condições de ensaio e os pontos escolhidos foram semelhantes, notou-se que a resposta de tensão para os pontos não foi a mesma, porém, como em casos anteriores, os pontos 6 e 7 localizados acima da linha neutra do duto mostram valores maiores que os pontos 4 e 2.

A explicação para a diferença é que este é um outro sistema. Embora o posicionador dinâmico seja o mesmo, inclui outro ponto de aplicação de força, outra sapata de recepção e equipamentos associados. Isso confirma a grande influência do arranjo experimental na resposta, o que indica que é necessário calibrar cada novo sistema antes da aplicação em campo.

Uma última constatação importante é que o tempo de referência  $t_0$  para o estado livre de tensões é sempre necessário. Portanto, a variação desse tempo é fundamental para a correta avaliação da tensão. Como exemplo, o valor de  $t_0$  para os pontos 2, 4, 6 e 7 para a temperatura de 19°C tem média de 38109,8 ns e desvio de 7,3 ns. Como a sensibilidade de  $(E/(L_{11} * t_{ref.}))$  é de cerca de 3,5 MPa, espera-se um desvio de cerca de 25 MPa somente em função da posição. Muito pouco dessa variação vem do processo de medição já que a variação para cada ponto ficou abaixo de 1ns, ou cerca de 3,5MPa.

### **5.12 Comparação entre o sistema para campo e o sistema para laboratório.**

Para a verificação da possibilidade de aplicação do sistema para uso em campo, foi feita a comparação entre os perfis de tensão obtido com este e com o sistema aplicado em laboratório. As medidas foram as mesmas realizadas para o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  posicionado sobre o duto, item 5.8. Os pontos de medição foram: 2(45°), 4(135°), 6(315°) e 7(225°). As condições e procedimentos também foram iguais. Para cada medida no ponto de interesse, o computador IBM PC com as respectivas placas de aquisição foram substituídos pelo *notebook* e o sistema para aplicação em campo. Para todos os pontos esse mesmo procedimento foi adotado. A figura 5.48 mostra o perfil de tensão levantado para o sistema para aplicação em campo.

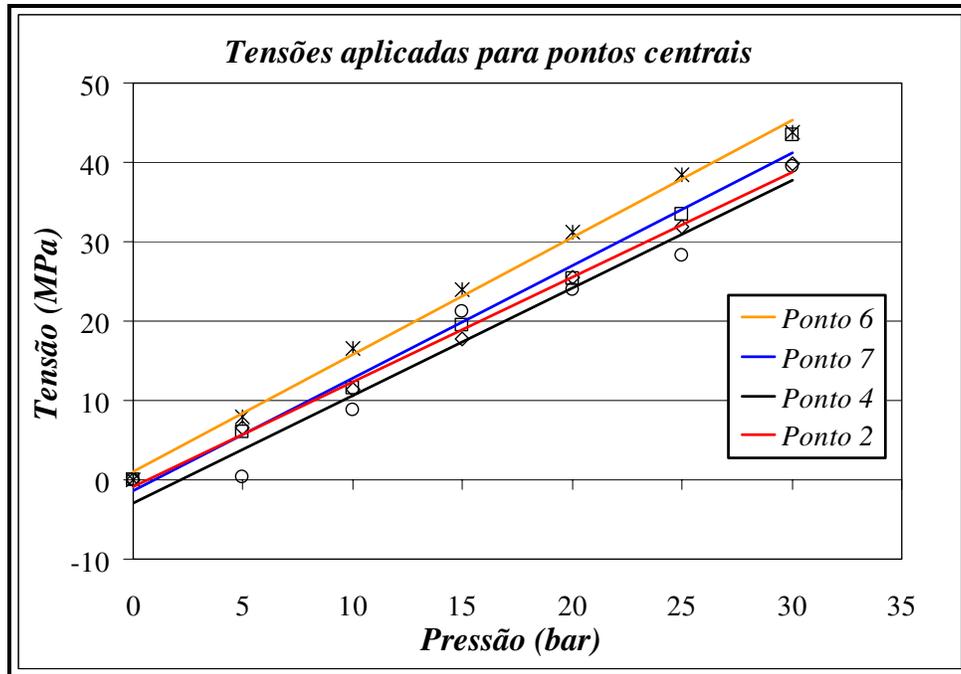


Figura 5.48: Tensão medida em relação a pressão aplicada levantada pelo sistema para aplicação em campo.

O perfil das tensões medidas levantadas para ambos os casos foi muito semelhante. A curva que representa a média dos resultados obtidos para campo teve inclinação de 1,39, enquanto que a curva para o sistema em laboratório teve inclinação 1,35. Esse é um erro de 3%, que para a faixa de tensão medida (<50 MPa) significa menos de 1,5 MPa. Com a sensibilidade discutida no item anterior, implica em menos que 0,5 ns e está dentro da dispersão prevista para medidas subsequentes do mesmo ponto. Assim, não há razão para considerar que as inclinações sejam diferentes.

Um fato percebido foi a mudança no tempo de percurso para cada ponto de medição, que teve uma diferença de 20 ns em relação ao sistema para aplicação em laboratório. Essa mudança foi percebida quando o método de cruzamento com o eixo horizontal foi utilizado. Vale lembrar que, para as medidas realizadas, foi utilizada a correlação cruzada que mede a diferença de tempo de percurso entre as ondas não importando valor absoluto dos tempos de percurso. Dessa forma, mesmo os tempos sendo diferentes, as tensões calculadas são semelhantes.

A explicação para a diferença nos tempos de percurso ratifica a discussão apresentada no item anterior. Como a diferença é a mesma para todos os pontos sua razão está ligada a troca de equipamentos de aquisição e controle. De fato, a diferença é menor do que a resolução da placa de aquisição do sistema de campo, que é de 50 ns.

O fato de que a diferença se manteve constante mostra a efetividade dos métodos empregados e confirma a necessidade de calibração prévia do sistema.

### **5.13 Resumo das Contribuições e Complementação das Discussões.**

Os resultados apresentados mostram que a metodologia desenvolvida pode ser usada para a determinação das tensões mecânicas em dutos. Um resumo das contribuições obtidas com esse trabalho, das discussões apresentadas e as conclusões obtidas é apresentado a seguir:

- Foi desenvolvido um sistema mecânico automático para a medição de tensões em dutos, denominado posicionador dinâmico, que permitiu que os experimentos fossem realizados de forma repetitiva. O fato de ser automatizado permitiu a realização de uma grande quantidade de experimentos em um tempo muito inferior ao obtido com sistemas manuais. O sistema é composto de suportes, fixadores magnéticos e válvulas pneumáticas controlados por computador.
- Foi desenvolvido um conjunto de programas computacionais para controle dos experimentos e análise dos resultados, na plataforma *LabVIEW*. O principal *software* desenvolvido foi uma nova versão do programa *L-stress*<sup>®</sup>, registrado pela Unicamp em 2001, que inclui ferramentas para controle do posicionador dinâmico quando da realização dos testes.
- Foi desenvolvida uma nova forma de tratamento dos sinais para ondas  $L_{cr}$ , baseada em métodos matemáticos consagrados, que permitiu uma melhoria significativa na resposta obtida com o método de ondas  $L_{cr}$ . Os sinais são primeiramente adquiridos, uma média é obtida e a correlação cruzada é aplicada. Com isso, os tempos de percurso para cada nível de tensão apresentam um desvio de menos de 1 ns, na maioria dos casos, o que significa diferenças de tensão inferiores a 3,5 MPa.

- Confirmou-se que há uma influência nítida da força com a qual o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  é pressionado contra o corpo de prova. Em estudos anteriores (Santos, 2007; Fraga, 2007; Caetano, 2003), com outros dispositivos aplicados na medição em chapas, parecia haver um limite acima do qual essa força não mais influenciaria. Com o novo dispositivo proposto neste trabalho (posicionador dinâmico), não há esse limite e há necessidade de controlar a força de aplicação para que não haja alteração no tempo de percurso entre medidas. O controle da força foi suficiente para eliminar a influência desse fator.
- Há uma influência significativa da temperatura, confirmando estudos anteriores já citados. Para eliminar essa influência, é necessário corrigir os tempos de percurso medidos. A abordagem adotada foi a de levantar os valores da variação do tempo com a temperatura para o sistema desenvolvido, de forma que esses fatores possam ser usados na correção das medições em campo. Foi mostrado que não é possível no momento realizar as medições se o conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  e o posicionador dinâmico não estiverem na mesma temperatura que o corpo de prova (duto). Isso acontece devido ao fato de que haverá sempre a variação de temperatura de pelo menos um dos componentes, impedindo a correção exata para a eliminação da influência.
- Através de experimentos, este trabalho mostrou que o componente do sistema onde a variação da temperatura é mais significativa é o acrílico. No entanto, devido à dimensão do caminho onde a onda trafega no material sob análise, a influência da variação no próprio material do corpo de prova também pode ser da mesma ordem de grandeza.
- O método desenvolvido permitiu obter uma excelente correlação entre as medidas de tensão obtidas com o novo sistema e as medidas obtidas por extensômetros colados no duto. A relação também foi bastante adequada para a comparação das tensões calculadas a partir das pressões aplicadas. No entanto, há uma diferença na magnitude das tensões medidas pelo método extensométrico e a partir da pressão. O ideal seria que um valor real fosse utilizado, mas essa diferença dificultou a definição sobre qual valor utilizar. Como não foi possível causar qualquer modificação no corpo de prova, tal como a retirada do extensômetro ou a abertura para a verificação do valor e uniformidade da espessura, o cálculo obtido a partir da pressão foi usado como base em todo o trabalho.

- A discussão sobre a tensão real no duto apresentada no item anterior não invalida qualquer conclusão obtida neste trabalho. Isso porque o levantamento da sensibilidade depende do sistema de medição utilizado. Para o caso desse trabalho, foi usado o valor de constante acustoelástica de 2,45, muito próximo do valor determinado por Bray (1976) para aço de trilho ferroviário, de 2,38. Esse valor, suposto adequado, foi obtido a partir de duas pesquisas anteriores do grupo (Caetano, 2003; Santos, 2007), que mostraram resultados diferentes. Além disso, o material do corpo de prova é o Aço API 5L X65, para o qual não existem valores da constante acustoelástica publicados em literatura. Não foi possível medir essa constante devido à dificuldade em obter chapas de material semelhante ao do corpo de prova, já que os dutos não são mais fabricados no país com esse material. Os valores obtidos nas pesquisas citadas referem-se ao aço API 5L X70.
- O valor de  $r^2$  para todos os casos de medição das tensões em relação as pressões aplicadas foi superior a 0,98, indicando que, com as propriedades elásticas conhecidas, o valor real das tensões pode ser calculado. Em comparação com às tensões teóricas e medidas através de extensômetros para a mesma direção longitudinal do duto o coeficiente de correlação para essa comparação foi superior a 0,99. Esse fato confirma que a resposta é linear, conforme previsto no capítulo 2.
- Quando aplicado ao levantamento das tensões circunferencias, mesmo com o sistema improvisado apoiado em cintas, as mesmas conclusões do item anterior se mantêm. Os coeficientes de correlação não são inferiores a 0,99.
- Comparando as tensões levantadas com o método  $L_{cr}$  com as determinadas pelo método da birrefringência acústica, fica claro que o método  $L_{cr}$  mostrou uma correlação melhor. O maior coeficiente para o caso da birrefringência acústica foi igual a 0,82.
- Os sistemas para aplicação em campo e para aplicação em laboratório levaram a resultados idênticos mostrando que o método matemático utilizado foi implementado com sucesso. Resultados anteriores obtidos com o sistema de campo não permitiam que a medição fosse feita. O resultado obtido mostra que o método sugerido pode ser usado em sistemas comerciais, mesmo com placas com taxas de aquisição inferiores.

- Foi determinado que a textura tem influência significativa, já que o tempo de percurso, mesmo para o estado livre de tensões externas, é diferente em cada um dos pontos medidos. Os resultados obtidos permitem propor uma forma de minimizar o seu efeito, para que o sistema possa ser usado em campo. As comparações com as tensões aplicadas mostram que a média dos valores obtidos em diversos pontos simétricos leva a um valor muito próximo do real. Isso indica que a distribuição da textura é aleatória ou simétrica. Com esse resultado, propõe-se que todas as medições sejam feitas em diversos pontos ao longo da circunferência do duto e o valor médio seja utilizado. Com um número maior de medições, a dispersão poderia ser menor e resultados muito distantes da média poderiam ser descartados com técnicas estatísticas usuais.
- Grande parte da diferença dos resultados do tempo de percurso entre pontos, senão toda ela, não depende da carga aplicada, ou seja, não influencia na constante acustoelástica. Essa afirmação ainda deve ser confirmada por estudos mais profundos mas, se for válida como em princípio parece ser, indica que o efeito da textura pode ser eliminado se esta for conhecida, para qualquer nível de tensão aplicado.
- Mesmo que o efeito da textura não seja eliminado, os resultados apresentados mostraram um desvio padrão de cerca de 25 MPa para a tensão medida em todos os pontos no estado livre de tensões. Isso significa aproximadamente 5% do limite de escoamento ( $S_y$ ) do aço ensaiado. Os métodos atuais empregados em campo têm grande dispersão e considera-se que devam ser executadas ações de manutenção quando a tensão estimada no trecho do duto atinge 30% de  $S_y$ . Considerando válido o valor nominal de  $S_y$ , o método ultra-sônico proposto poderia identificar tensões de até 85% do limite de escoamento e ainda assim estar, com 99% de certeza em uma região de segurança.

## Capítulo 6

### Conclusões

Nesse trabalho foi apresentado o método ultra-sônico para a medição de tensões mecânicas em dutos com ondas longitudinais criticamente refratadas. A teoria envolvida na aplicação do método foi discutida e foram definidas as hipóteses que permitem que seja empregada na avaliação de dutos. O material da amostra de duto analisada foi o aço API 5L x 65. Para os testes, essa amostra foi montada em dois flanges laterais e pressurizada com fluido hidráulico.

As principais conclusões desse estudo foram:

- O sistema ultra-sônico e a metodologia desenvolvidos podem ser empregados para a avaliação das tensões em dutos petrolíferos, atingindo assim o objetivo principal do trabalho. O sistema representa uma contribuição importante para a área de inspeção e um avanço significativo sobre o método atualmente empregado.
- O método de tratamento de sinais desenvolvido permite que as tensões sejam determinadas com repetibilidade adequada para as aplicações em campo.
- O sistema portátil apresentado, quando empregado em conjunto com o método de tratamento de sinais e o conjunto mecânico e ultra-sônico proposto, permite a mesma resolução em termos de tensão que o sistema desenvolvido para laboratório.

- O efeito da textura pode ser minimizado com o processo proposto de medição, que implica na avaliação de diversos pontos ao longo da circunferência transversal do duto e na exclusão de pontos cujo comportamento for muito diferente dos demais.
- A textura leva a uma dispersão do resultado da medição da ordem de 5% do limite de escoamento do material e este valor mostrou-se constante, independentemente da tensão aplicada para os experimentos realizados.
- A temperatura tem um efeito significativo sobre o sistema completo de medição e é necessário corrigir os resultados para levar em conta seus efeitos. Fatores de correção foram determinados para o sistema desenvolvido.
- É necessário calibrar o sistema desenvolvido para qualquer nova aplicação e após qualquer modificação, já que as tensões são obtidas com sensibilidade de cerca de 3,5 MPa/ns, sendo muito sensível a alterações estruturais e de equipamentos.
- A dispersão dos resultados, quando foi empregado o método da birrefringência acústica, foi muito superior à obtida com o método de ondas  $L_{cr}$ . Embora a sensibilidade seja semelhante, a dispersão dificulta seu emprego para determinação de tensões em dutos, confirmando que o método  $L_{cr}$  é mais adequado para esse fim.

Como resultado desse trabalho, novas linhas de pesquisa e desenvolvimento surgirão. As principais sugestões para pesquisas derivadas desse trabalho são:

- Desenvolvimento de um goniômetro ultra-sônico para emprego em conjunto com o sistema apresentado, como forma de eliminar a necessidade de medição das tensões em diversos pontos do duto. Esse dispositivo permitiria a avaliação da textura e a correção automática de sua influência.

- Desenvolvimento de novos transdutores angulares ultra-sônicos para ondas  $L_{cr}$ , com baixa sensibilidade à temperatura. O objetivo é eliminar o acrílico do conjunto, como forma de reduzir a influência da temperatura.
- Criação de um sistema para a aplicação do conjunto mecânico em dutos (posicionador dinâmico) de forma que a medição pudesse ser feita sem a necessidade de retirá-lo manualmente. O sistema poderia ser magnético, como uma cinta metálica, e o conjunto ultra-sônico ficaria preso em um carrinho, que se moveria ao longo da circunferência do duto durante a inspeção.
- Desenvolvimento de um conjunto ultra-sônico  $L_{cr}$  que não fosse influenciado pela curvatura do duto. A idéia é manter a distância percorrida pela onda na área de interesse, onde se quer medir a tensão, como forma de permitir o emprego da técnica na medição das tensões de flexão causadas pela movimentação de solo nos dutos.
- Aplicação do sistema proposto nessa tese diretamente na inspeção em campo, como forma de aprimorar seu desempenho e corrigir eventuais falhas. Poderia ser incluída nos programas a transmissão simultânea dos resultados para um banco de dados de manutenção centralizado.

Ao longo do desenvolvimento desse trabalho e decorrente dele foram publicados dois trabalhos científicos em revista internacional indexada, cinco trabalhos em anais de congresso internacional e sete trabalhos em eventos nacionais. Além disso, foi solicitado o registro de duas patentes.

## Referências Bibliográficas

Anderson, W. L. Subsurface stress detection using ultrasonics and time-varying temperature. In: 16<sup>th</sup> Symposium on Nondestructive Evaluation, San Antonio. *Proceedings...* San Antonio: Apr. 1987, pp. 70-73.

Andreucci, R. *Ensaio por ultra-som - Aspectos Básicos*, 3a ed. São Paulo: Abende, 2002, 78 p.

Andrino, M. H. Avaliação das tensões em chapas de alumínio 7050 utilizando o efeito acustoelástico. In: 6<sup>a</sup> Conferência sobre tecnologia de equipamentos - COTEQ, 2002, Salvador. *Anais...* Salvador: 2002. 10p.

Andrino, Marcilio Haddad. *Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 186p. Dissertação (Mestrado).

Andrino, M. H. Aplicação da acustoelasticidade para avaliação de tensões em soldas em aço API 5L X 65. In: III Conferência Pan-Americana de Ensaio Não Destrutivos (III PANNDT), 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: 2003.

Andrino, M. H. Sistema automático para determinação de tensões mecânicas em chapas metálicas baseado na teoria acustoelástica. In: 17th International Congress of Mechanical Engineering, 2003, São Paulo. *Anais...* São Paulo: 2003.

- Baby, S. Ultrasonic study for detection of inner diameter cracking in pipeline girth welds using creeping waves. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 139 – 146, 2003.
- Basatskaya, L. V., Vopilkin, A. K. Propagation of longitudinal ultrasonic waves near the surface of a solid. *Sov. Phys. Acoust.*, v. 24, n.1, pp. 15-20, 1978.
- Basatskaya, L. V., Ermolov, I. N. Theoretical study of ultrasonic longitudinal subsurface waves in solid media. *Soviet Journal of Nondestructive Testing*, v.16, n.7, pp. 524-530, 1980.
- Basatskaya, L. V., Ermolov, I. N. Field of angle-beam transducers with near-critical wedge angles. *Defektoskopiya*, n.4, pp. 3 – 11, 1985.
- Benson, R.W., Raelson, V.J., Acustoelasticity. *Product Engineering*, v.30, pp. 56-59, 1959.
- Bittencourt, Marcelo Siqueira. *Desenvolvimento de um sistema de medida de tempo decorrido da onda ultrasônica e análise do estado de tensões em materiais metálicos pela técnica de birrefringência acústica*. Rio de Janeiro: Engenharia de materiais e metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000, 115p. Tese (Doutorado).
- Bittencourt, M. S. Q. Research and development in the application ultrasonic testing techniques in Brazil. *Materials Evaluation*, v.58, n.4, pp.537 - 541, Apr. 2000.
- Bittencourt, M. S. Q., Payão Filho, J. C., Lamy, C. A. Medida de tempo de percurso da onda ultra-sônica para avaliação de tensões. In: III Conferência Pan-Americana de Ensaio Não Destrutivos (PANNDT), 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro : Gráfica Própria, 2003. v. 1. pp. 1-10.
- Bittencourt, M. S. Q., Payão Filho, J. C. Avaliação de tensões internas por ultra-som usando a técnica da birrefringência acústica. In: International Nuclear Atlantic Conference 2005 (INAC 2005), 2005, Santos (SP). *International Nuclear Atlantic Conference*, 2005.

- Bittencourt, M. S. Q., Lamy, C. A. Estudo acustoelástico de tubos API 5L X-70 com costura. In: Rio Oil & Gas 2006 Expo and Conference, 2006, Rio de Janeiro. *Rio Oil & Gas 2006 Expo and Conference*, 2006.
- Bray, D. E.; Leon-Salamanca, T. Zero-force travel-time parameters of ultrasonic head-waves in railroad rail. *Materials Evaluation*, v. 43, n. 7, pp. 854 – 858, June, 1985.
- Bray, D. E. Application of critically refracted ultrasonic waves for petroleum industry inspection. In: Topical, American Society for Nondestructive Testing, 1989, Houston. *Proceedings Petroleum Industry Inspection Technology*. Houston: June 1989, pp. 157-161.
- Bray, D. E., Junghans, P. Application of the  $I_{CR}$  ultrasonic technique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates. *NDT & E International*, v. 28, n.4, pp. 235-242, 1995.
- Bray, D. E., Stanley, R. K. *Nondestructive Evaluation. A tool in Design, Manufacturing, and Service*. Boca Raton: CRC Press, 1997, 586 p.
- Bray, D. E. Current directions of ultrasonic stress measurement techniques. *15<sup>th</sup> WCNDT*, Roma, 2000. Disponível : <<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm>>. Acesso em 11 de setembro de 2004.
- Cadzow, J. & Landingham, H. V. *Signal, Systems and Transforms*. Prentice Hall, 1985, 374p.
- Caetano, Sidney. Felix. *Determinação das constantes acustoelásticas para aço API 5L X70 para gasodutos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 167p. Dissertação (Mestrado).
- Caetano, S. F. et al. Determinação do módulo de elasticidade utilizando o método ultra-sônico em peças de alumínio aeronáutico e naval. 8<sup>a</sup>COTEQ - *Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, 2005 - Salvador - BA.

- Cardoso, B., R., Bittencourt, M. S. Q., Payão Filho, J. C. Estudo da acustoelasticidade de tubos sem costura usados no transporte de óleo e gás. In: Rio Oil & Gas 2006 Expo and Conference, 2006, Rio de Janeiro. *Rio Oil & Gas 2006 Expo and Conference*, 2006.
- Castagnede, B. Correlation method for normal mode tracking in anisotropic media using an ultrasonic immersion system, *Ultrasonic*, v.27, n.5, pp. 280-287, September 1939.
- Cauchman J. C. Detection and characterization of a pre-surface wave produced near the first critical angle. *Ultrasonics*, pp. 272 – 274, 1978.
- Champeney, D. C. Convolution and Correlation. In: Conn, G. K. T., Coleman, K. R., *Fourier Transforms and their Physical Applications*, chapter 5, London, Academic Press Inc., 1973.
- Davis J. M. Basic wave physics for sizing methods. Advanced ultrasonic flaw sizing handbook. Chapter I, 1998. Disponível em: < <http://www.ndt.net/article/1198/davis/davis2.htm> > Acesso em 09 de Novembro de 2004.
- Drai, R.; Sellidj, F.; Khelil, M.; Benchaala, A. Elaboration of some signal processing algorithms in ultrasonic techniques application to materials NDT. *Ultrasonics*, v.38, pp. 503-507, 2000.
- Egle, D. M., Bray, D. E. Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel. *Journal of the Acoustical Society of America*, v.60, n.3, pp. 741-744, 1976.
- Egle, D. M., Bray, D. E. Application of the acoustoelastic effect to rail stress measurement. *Materials Evaluation*, v.37, n.4, pp.41- 46, 1979.
- Erhard A. Reliability and redundancy in ultrasonic flaw sizing methods. NDT in the Nuclear Industry. *Metatl Park*, pp. 255-268, 1981.

Ermolov, I. N., Razygrajev, N. P. The use of acoustic creeping waves for ultrasonic control. *Defectoscopy*, n.1, pp. 33-40, 1978.

Ermolov, I. N., Razygrajev, N. P. Attenuation of ultrasonic main waves with distance. *Defektoskopiya*, n.1, pp. 37 – 40, January 1979.

Ermolov, I. N. Progress in the theory of ultrasonic flaw detection: Problems and Prospects. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v.40, n.10, pp. 655 – 678, 2004.

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

Ermolov, I. N. The wonders of ultrasound. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v.41, n. 3, pp. 193 – 202, 2005.

Ermolov, I. N.; Volpilkin, A. K. Sensitivity trimming in testing austenitic welds. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v.41, n.1, pp. 1 – 6, 2005.

Fraga, Ricardo dos Santos. *Avaliação da profundidade de penetração de ondas longitudinais criticamente refratadas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 167p. Dissertação (Mestrado).

Haykin ,S., Barry, V.V. *Signals and Systems*. 2ed. John Wiley & Sons, 1998, 816p.

Hayward P. Detection and sizing of craking from the inner surface using ID creeping waves. *10<sup>th</sup> APCNDT* , Australia, 2001. Disponível em: < [http:// www.ndt.net / apcndt2001 /papers/ 466 / 466.htm](http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/466/466.htm) >. Acesso em 13 de outubro de 2003.

Hoppenbrouwers, M.B. Advanced ultrasonic methods for in service condition assessment of industrial process installation. *Disponível: <http://www.ndt.net/article/v05n03/hoppend>*. Acesso em 12 de Novembro de 2004.

- Hsu, M. N., Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis. *Experimental Mechanics*, v.14, n.5, pp. 169-176, May 1974.
- Hughes, D. S. ; Kelly, J. L. Second - order elastic deformation of solids. *Physical Review*, v. 92, n.4, pp. 1145 - 1149, Dec 1953.
- Juozoniene L. V. Measurement of sound wave velocity propagation on the surface layer. *Materials of the 2<sup>nd</sup> Sovietic Union Conference on the methodics and technics of ultrasonic spectroscopic*. Kaunas, pp. 87 – 88, 1973.
- Juozoniene L. V. Elastic surface longitudinal waves and their use for non-destructive control. *Defectoscopy*, n.1, pp. 29-38, 1980.
- Kinsler, L. E, Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, 1982, 480 p.
- Krautkramer, H. *Ultrasonic Testing of Materials*. 4ed. New York, Springer-Verlag, 1990, 677p.
- Lamy, C. A. *Um estudo sobre o dimensionamento de descontinuidades superficiais pela técnica ultra-sônica do tempo decorrido*. Rio de Janeiro: Engenharia de materiais e metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990, Tese (Doutorado).
- Leon-Salamanca, Teodoro. *Ultrasonic measurement of residual stress in steels using critically refracted longitudinal waves ( $L_{cr}$ )*. Texas A&M University. Texas (EUA). 97p. Tese (Doutorado)
- Lynnworth, L. C. et al. Ultrasound propagation measurements and applications, *International advances in nondestructive testing*, Gordon and Breach science publishers Inc., v.5, pp.71-115, 1977.

- Love, A. E. H. A. *Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. New York: Dover Publication, 1944, 643p.
- Lu, J., James, M. R., Morfdin, L. *Comparative Study of different techniques*. In: Handbook of Measurement Residual Stresses. Lilburn: Fairmont Press, 1996, Cap. 9, p. 225-231.
- Lu, W. Y. *Ultrasonic velocity measurement by correlation method*, In: Proceeding of the 1990 Spring Conference on Experimental Mechanics, pp.279-284, Bethel, 1990.
- Matarezi, J. C. *Qualificação no ensaio por ultra-som*. Apostila do curso de treinamento – Centro Técnico Aeroespacial - São José dos Campos: 2001. 43p.
- Marquese, Cleide M. *Análise por ultra-som da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas*. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002, 113 p. Dissertação (Mestrado).
- 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).
- Minicucci, D. J. Stress evaluation of railroad forged wheels by ultrasonic testing. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 35, Estados Unidos da América, 2007.
- Murnaghan, T. D. *Finite deformation of an elastic solid*. New York: John Wiley and Sons, 1951, 140p.
- Okada, K. Acoustoelastic determination of stress in slightly orthotropic materials. *Experimental Mechanics*, Springer Boston, pp. 461 - 466, Dec. 1981.
- Oppenheim, A., Wilsky, A. *Signal and Systems*. Prentice Hall, 1996, 957p.

Ortega, L. P. C. *Análise de tensões por ultra-som Através da Refração de Ondas com Incidência Obliqua*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001, 178 p. Tese (Doutorado).

PANAMETRICS - ndt non destructive ultrasonic transducers, sensors and testing equipment, technical notes. Disponível em: <[http://www.panametricsndt.com/ndt/ndt\\_transducers/downloads/transducer\\_technotes.pdf](http://www.panametricsndt.com/ndt/ndt_transducers/downloads/transducer_technotes.pdf)> Acesso em: 13 de novembro de 2004.

Peixoto, F. T. *Avaliação de sistemas de medição de tensões residuais em dutos*. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004, 190 p. Dissertação (Mestrado).

Petrobras. Acesso ao site. Disponível em: [http://www.petrobras.com.br/tecnologia/portugues/programas\\_tecnologicos/produt.stm](http://www.petrobras.com.br/tecnologia/portugues/programas_tecnologicos/produt.stm) 03/2004. Acesso em: 09 de novembro de 2004.

Proakis,J., Manolakis,D. *Digital signal processing principles, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, 1996, 1004p.

Rayleigh, L. On waves propagated along the plane surfaces of an elastic solid. *Proceedings of London Math.*, v. 17, pp. 4-11, 1885.

Rose, J. L. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University Press, 1999, Cap. 7, 18 e 19, pp. 288-306.

Sajauskas, S., Juozoniene, L. V. Equipment for ultrasound velocity measurement in solid state. *Invention of USSR N 887940*. Published in Bulletin of Inventions. n.45, 1981.

Sajauskas, S. Acoustic means of physical mathematical control of solid surfaces. *Invention of USSR N 1073692*. Published in Bulletin of Inventions. n.6, 1984.

Sajauskas, S. Longitudinal surface acoustic waves (Creeping Waves). *Monograph. Kaunas: Technology*, 2004, 176 p.

- Santos, A. A., Bray, D. E. Ultrasonic stress measurement using PC based and commercial flaw detectors. *Review of Scientific Instruments*, v. 71, n. 9, pp. 3464 - 3469, Sep. 2000.
- Santos, A. A., Bray, D. E. Stress measurements in bars using  $L_{CR}$  waves. In: Aging management, component and piping analysis, Nondestructive Engineering, Monitoring and Diagnosis, 2000, Seattle, WA. *Proceedings...* Seattle: Ed. L. I. Ezekoye, Julho 2000, v. 409, pp. 223 - 228.
- Santos, A. A., Bray, D. E. Application of longitudinal critically refracted waves to evaluate stresses in railroad wheels. In: 2000 ASNT Spring Conference and 9th annual Research Symposium. 2000, Seattle. *Proceedings...* Alabama: Março, 2000.
- Santos, A. A., Kipa, J. M., Bray, D. E. Determination of stresses in plates using ultrasonic shear waves. In: : XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas Out. 1999.
- Santos, A. A. Avaliação da referência de tensões para ondas longitudinais criticamente refratadas, *Relatório de Projeto em Parceria: Universidade Estadual de Campinas e Petróleo Brasileiro S/A*. Janeiro 2006. 45 p.
- Santos, A. A. Application of acoustoelasticity to evaluate stress relaxation in API 5L X70 steel for pipelines, *Materials Evaluation*, v.63, n.5, pp.511-515, 2005.
- Santos, G. R., Seleglim Jr., P., Bannwart, A. C. Application of ultrasonic technique in core flow monitoring and control, *18º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica - COBEM*, Ouro Preto, 06 a 11 de novembro de 2005.
- Santos, Guilherme Rosário. *Desenvolvimento de técnicas de ultra-som para medida de espessura de filme de líquido em escoamentos gás-líquido e líquido-líquido*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 204p. Dissertação (Mestrado).

- Santos, Roselene Aparecida. *Efeito da temperatura sobre a medição de tensão por ondas  $L_{cr}$  em aços API 5L X70*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 134p. Dissertação (Mestrado).
- Sathish, S., Martin, R. W. Local surface skimming longitudinal wave velocity and residual stress mapping. *Journal of Acoustical Society of America*, v.115, n.1, pp. 165 – 171, January 2004.
- Selegim Jr., P. Sensoriamento ultra-sônico para medição de grandezas físico – químicas. 2004, 30f. *Apresentação - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas*.
- Schmid R. Ultrasonic testing of austenitic and dissimilar metal welds. Chapter IV, 1997. *Disponível em: < <http://www.ndt.net/article/pow1297/schmid/schmid.htm>>. Acesso em 12 de Novembro de 2004*.
- Schneider, E. Ultrasonic Techniques. In: HAUK, V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*. Elsevier: 1997, p.522-563.
- Shigley, J. E. *Projeto de Máquinas*. Bookman, 7 ed . 2004, 960 p.
- Terzian, Ricardo Luiz. *Conceitos e Metodologias de Gestão de Projeto e sua aplicação ao caso da Integridade da Malha Dutoviária*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, 2005, 137p. Dissertação (Mestrado).
- Thurler, L. M., Neves, D. L. C. Avaliação da técnica de ultra-som à distância aplicada a uma tubulação de petróleo da REDUC, In: *III Conferência Pan-Americana de Ensaio não destrutivos (III PANNDT)*, 2003, Rio de Janeiro. 2003.
- Viktorov I. A. About waves in isotropic solid expanse. *Acoustic Journal*, v. 22, pp. 675-678, 1976.

Viktorov I. A. About leaky surface waves in isotropic solid surface. *Reports of science academy USSR. Physics*, v. 33, pp. 579-581, 1976.

Viktorov I. A. About leaky surface waves. *Acoustic Journal*, v.27, pp.724-729, 1981.

Yuzonene L. V. Elastic longitudinal surface waves and their use for nondestructive inspection, *Defektoskopyia*, n. 8, pp 29 – 38, 1981.

Zheng, K., Chen, Y. A technique of ultrasonic testing without dead zone for coarse-grained tc4 extrusion pipe. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> European conference on Non-destructive testing*, 26-29 May 1998. Disponível em: < <http://www.ndt.net/ecndt98/476.htm>>. Acesso em 12 de Novembro de 2004.

## Apêndice A

### Comparação entre correlação cruzada e cruzamento com eixo X

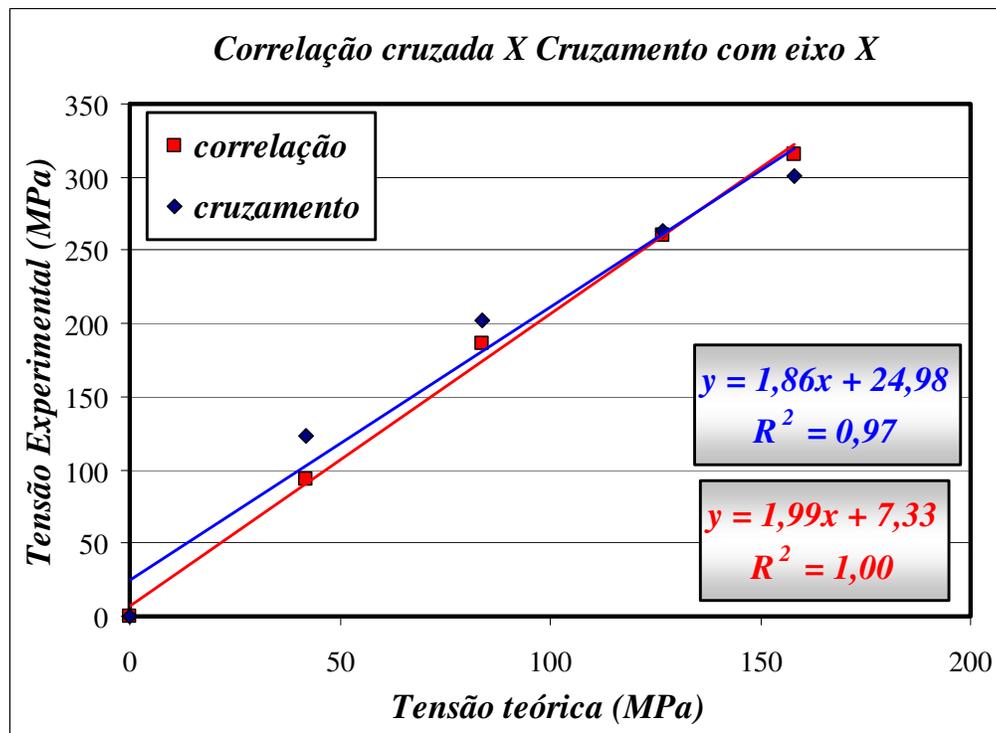


Figura A1: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tractionador).

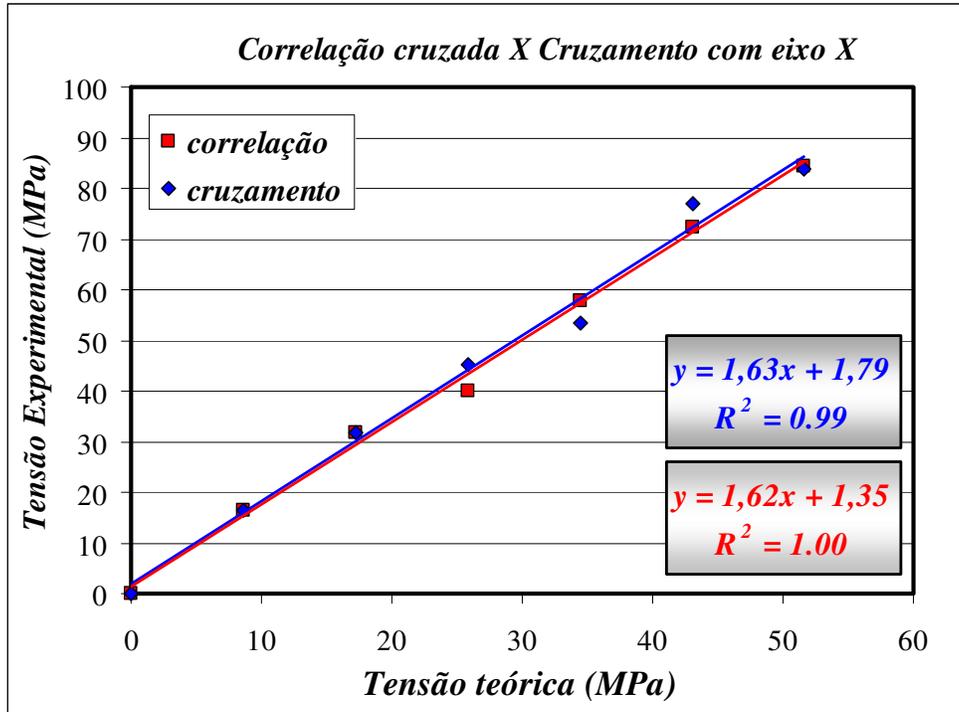


Figura A2: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto).

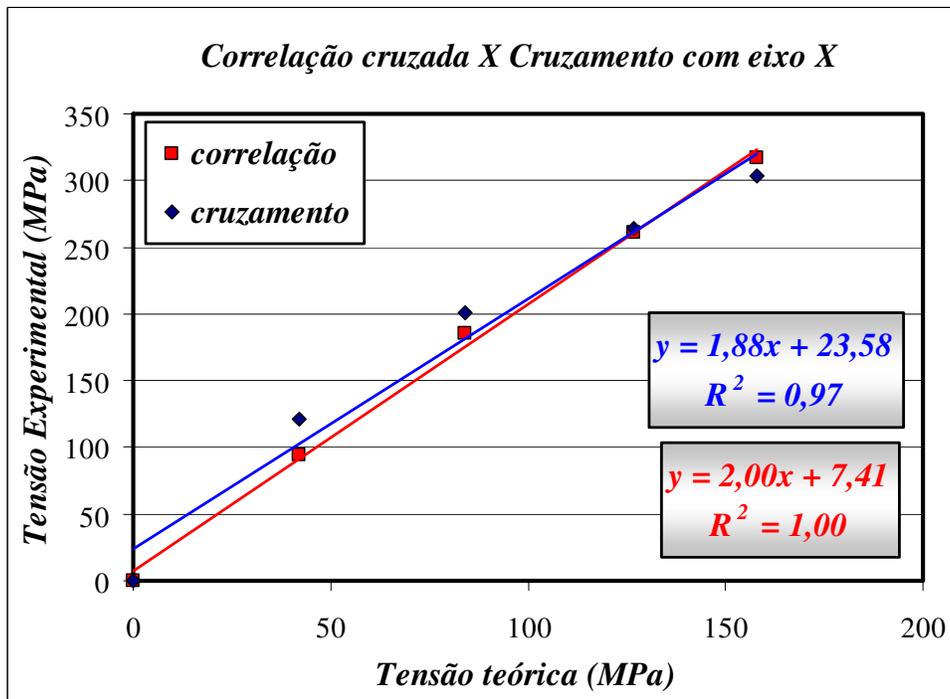


Figura A3: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Tracionador).

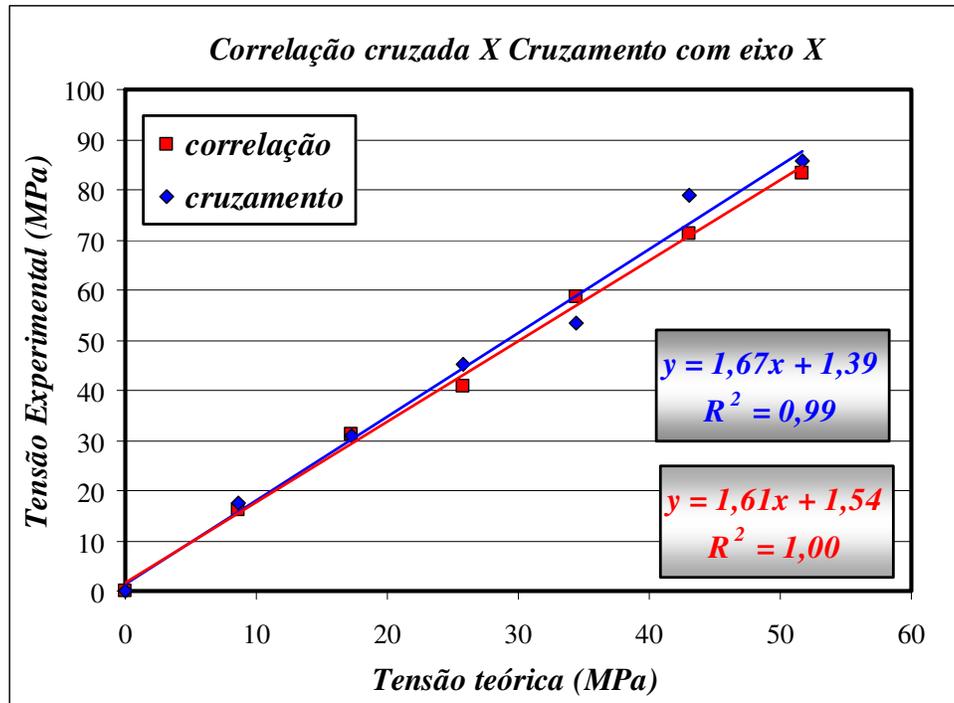


Figura A4: Tensão teórica em relação a tensão experimental para comparação entre correlação cruzada e cruzamento com o eixo X (Duto).