TESE DEFENDIDA POR MARCILIO HADDAD ANDRINO E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 07/04/2003

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico

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

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

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

Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico

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

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

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

Campinas, 2003
S.P. – Brasil

UNIDADE BC
Nº CHAMADA T/UNICAMP
An28a
V ____ EX
TOMBO BC/ 58500
PROC. 16.117-04
C ☐ D ☒
PREÇO 11,00
DATA 29-06-04
Nº CPD

CM00198058-9
BIB ID 317223

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

An28a

Andrino, Marcilio Haddad
Avaliação de tensões residuais em soldas de dutos utilizando o efeito acustoelástico / Marcilio Haddad Andrino.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

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

1. Ondas ultra-Sônicas. 2. Ondas elásticas. 3. Juntas soldadas. I. Santos Júnior, Auteliano Antunes dos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico

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

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

Prof. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan
FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Alfredo Lamy
IEN / CNEN

Campinas, 7 de Abril de 2003

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus Pais Joaquim Manuel Ferreira Andrino e Meyri Haddad Andrino, ícones de todo o direcionamento positivo de minha vida. Suas bênçãos, seus olhares, seus exemplos, seus cuidados e sua dedicação são o alimento de minha existência.

Agradecimentos

Presto a minha homenagem as seguintes pessoas:

Aos meus irmãos Márcia, Mauro e Mauricio, por sempre estarem ao meu lado nos momentos mais dificeis. As minhas Tias Mahiba, Munira, Manuela e Ermelinda e meus Tios José Carlos, Fouad, Américo e Jacinto, que constantemente trazem alegria e para as minhas Avós Rachide (In Memorian) e Beatriz.

Ao meu Amigo e Médico Professor Doutor Gentil Alves Filho que cuida de minha vida como se fosse a sua própria e que deu a oportunidade de enxergar a vida com diferentes cores.

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.

Às Professoras Roseana da Exaltação Trevisan e Raquel Gonçalves pelas ajudas prestadas durante a execução deste trabalho.

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

Aos Técnicos , Rosangela , Oswaldo e Miro, pela ajuda prestada em diversos momentos.

À FINEP pelo incentivo financeiro e a todos os funcionários da FEM 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, 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)

Técnicas com geração de ondas ultra-sônicas são não destrutivas e são baseadas na dependência da velocidade destas ondas em relação a variação da deformação elástica do material na direção em que elas se propagam ou perpendicular a esta. O presente estudo investigou a possibilidade de aplicação do método ultra-sônico para a avaliação de tensões em juntas soldadas de placas de Aço API 5L X65 e Aço API 5L X70, e para a determinação da relaxação em placas de aço API 5L X70. Para a medição destas tensões foram utilizadas Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas (L_{cr}). A sensibilidade dessas ondas é maior quando a tensão de interesse é uniaxial e é aplicada paralelamente à direção de propagação. Dez placas de aço API 5L X65 e vinte placas de API 5L X70 foram ensaiadas para a determinação das tensões longitudinais nas juntas soldadas. Essas placas foram soldadas duas a duas e foram medidas após soldagem e após o alívio de tensões. A diferença foi atribuída às tensões pré-existentes. Os resultados mostram um perfil de tensão residual coerente com a literatura, mostrando uma área de tração na região da solda, tendendo ao valor nulo longe desta. A investigação da relaxação para chapas de aço API 5L X70 mostrou um decréscimo médio da tensão residual de cerca 350 MPa depois de dezoito dias. Ambas as aplicações mostraram que o método ultra-sônico pode ser utilizado na avaliação de tensões, atendendo plenamente aos objetivos do trabalho.

Palavras Chave:

Avaliação não Destrutiva, Ultra-Som, Tensão Residual, Ondas L_{cr}, Juntas Soldadas, Aços API.

Abstract

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)

Techniques with generation of ultrasonic waves are non destructive and are based on the dependence of the speed of these waves in relation to the variation of the elastic deformation of the material in the direction of their propagation or perpendicular to it. The present study investigated the possibility of application of the ultrasonic method to evaluate stresses in welded joints in plates of Steel API 5L X65 and Steel API 5L X70, and to determinate of the stress relaxation in plates of steel API 5L X70. Longitudinal Critically Refracted Waves (L_{cr}) were used to measure the stresses. The sensibility of those waves is larger when the stress of interest is uniaxial and the load is applied parallel to the propagation direction. Ten plates of steel API 5L X65 and twenty plates of API 5L X70 were tested for the determination of the longitudinal stresses in the welded joints. Those plates were welded in pairs and they were measured after welding and after the stresses relief. The difference was attributed to the residual stress. The results show a profile of residual stress coherent with the literature, showing a traction area in the area of the welding, tending to the null value far away from this. The investigation of the relaxation for steel plates of API 5L X70 showed a decrease of the residual stresses of about 350 MPa after eighteen days. Both applications showed that the ultrasonic method can be used in the evaluation of stress, fully assisting to the objectives of the work.

Key words:

Non-Destructive Evaluation, Ultrasound, Residual Stress, L_{cr} Waves, Welded Joints, Steel API.

Sumário

Lista de Figuras ix

Lista de Tabelas xviii

Nomenclatura. xix

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 Relaxação e Magnitude de Tensões 5

1.2 Objetivos do trabalho 6

1.3 Apresentação do trabalho 6

2. REVISÃO DA LITERATURA 7

2.1 Tensão Residual 8

2.1.1 Origens e comportamento das tensões Residuais 11

2.1.2 Métodos de Medição de Tensões Residuais 16

2.1.3 Tensões residuais em soldas 22

2.1.4 Conseqüências das tensões residuais 36

2.1.5 Redução, Controle e Alívio de Tensões Residuais 41

2.2 Aplicação do ultra-som para caracterização de materiais e detecção de defeitos 44

2.2.1 Técnicas de inspeção 46

2.3 Aplicação do ultra-som para avaliação de tensões 49

2.3.1 Teoria Acustoelástica 50

2.3.2 Características das ondas L_{cr}. 57

2.3.3 Birefringência 60

2.3.4 Estudos relativos a determinação de tensões 61

3. MATERIAIS E MÉTODOS 81

3.1 Materiais utilizados 81

3.2 Geometria das placas 82

3.3 Usinagem das placas e tratamento térmico 87

3.4 Instrumentação e Métodos de aquisição de dados 89

3.4.1 Instrumentação para geração das ondas e determinação dos tempos de percurso 89

3.4.2 Equipamentos para soldagem das placas de aço 95

3.5 Descrição do programa de aquisição de dados 96

3.6 Procedimentos 98

3.6.1 Levantamento das constantes (L_{11}) para aços 1020 98

3.6.2 Levantamento das constantes (L_{11}) para aços API 5L X70 102

3.6.3 Levantamento das constantes (Ca) para aços API 5L X70 105

3.6.4 Procedimentos para soldagem das chapas e análise metalográfica das amostras 106

3.6.5 Determinação dos tempos de percurso nos conjuntos soldados 109

3.6.6 Procedimentos para determinação de tensões nas chapas com juntas soldadas 115

3.6.7 Verificação do fenômeno de relaxação nas chapas de Aço API 5L X70 116

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 119

4.1 Determinação do perfil de tensões residuais para aços API 5L X65 119

4.2 Determinação do perfil de tensões residuais para aços API 5L X70 129

4.3 Ensaios metalográficos antes e após o alivio de tensões para aços API 5L X70 150

4.4 Determinação da relaxação para aços API 5L X70 151

4.5 Discussões 154

5. CONCLUSÕES 158

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 160

APÊNDICE A 168

APÊNDICE B 183

Lista de Figuras

2.1 Tensões residuais desenvolvidas junto à superfície de uma peça sendo esmerilhada 9

2.2 Categorias de tensões residuais de acordo com seus níveis 11

2.3 Superposição das tensões residuais aplicadas 13

2.4 Características das distribuições de tensão residual em um aço duro para três diferentes operações de esmerilhamento 15

2.5 Variação do limite de escoamento σ_e, do modulo de elasticidade "E", e do Coeficiente de Expansão Térmica α de aços, com relação à temperatura 23

2.6 (a) Conjunto de barras presas nas extremidades. (b) Barra central sendo aquecida 25

2.7 Variação da tensão (σ_c) com a temperatura na barra central 25

2.8 Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões residuais longitudinais (x) formadas ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b) 28

2.9 Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem 29

2.10 Distribuição típica de tensões residuais em solda de topo. (a) Sistemas de coordenadas e tensões. (b) Tensões Longitudinais. (c) Tensões transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação) 32

2.11 Distribuição das tensões σ_x, σ_y e σ_z ao longo da espessura de uma solda. 33

2.12 Distribuição da tensão residual longitudinal calculada por um modelo computacional para um aço de baixo carbono (limite de escoamento de 250 MPa) e um aço de alta resistência (escoamento de 1400 Mpa) 34

2.13 Tensões residuais de soldagem de vários aços de alta resistência 35

2.14 Distribuição de tensões residuais em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1, 2 e 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento (curva 4) 36

2.15 Flambagem de uma coluna 38

2.16 Técnica impulso-eco 47

2.17 Técnica de transparência 49

2.18 Coordenadas para um material no estado natural, inicial e final 51

2.19 Velocidade de ondas planas e campo de tensões para um sistema de coordenadas ortogonais 52

2.20 Mudanças relativas das velocidades das ondas em relação a deformação para aço de trilhos 53

2.21 Esquema representativo dos ângulos e direções de ondas causadas pela incidência de um feixe obliquo 58

2.22 Desenho esquemático do transdutor para inspeção através de ondas longitudinais criticamente refratadas (acrílico/aço) 59

2.23 Perfil de radiação da onda "L_{cr}" 60

3.1 Dimensão das amostras e direção de laminação 83

3.2 Dimensão do chanfro (chapas API 5L X65) 84

3.3 Placas de aço API 5L X65 (Detalhe: Chanfro em "V") 84

3.4 Dimensão do chanfro (Chapas API 5L X70) 85

3.5 Placa de aço API 5L X70 (Detalhe: Chanfro em "V") 85

3.6 Dimensões da placa.(Aço API 5L X70/Relaxação) 86

3.7 Placa de aço API 5L X70 (Detalhe: Chanfro em duplo "V") 87

3.8 Forno para alívio de tensões 88

3.9 Arranjo e desenho para o conjunto de medição de tensões baseado em ultra-som 90

3.10 Condicionador de sinais e Célula de carga colocada no apoio da carga aplicada através do sargento. (Detalhe: célula montada no sargento) 91

3.11 Excitador-Receptor modelo 5073 PR 92

3.12 Esquema completo para aquisição de dados (ondas longitudinais) 93

3.13 Aparelhagem para determinação dos tempos de percurso 93

3.14 Transdutor para ondas cisalhantes e caixa de controle 94

3.15 Fonte INVERSAL 300 IMC utilizada para a soldagem das placas 96

3.16 Placa de Aquisição de dados NI 5911 97

3.17 Resolução efetiva contra freqüência de amostragem com um alcance de voltagem de $\pm$ 10 V 97

3.18 Tela do programa L-Stress V1.0 referente a um osciloscópio comercial 98

3.19 Arranjo experimental para determinação das constantes acustoelásticas 100

3.20 Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas. (aço 1020) 101

3.21 (a) Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras Longitudinais com alívio 103

3.21 (b) Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras longitudinais sem alívio 103

3.21 (c) Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras Transversais com alívio 104

3.21 (d) Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras Transversais sem alívio 104

3.22 (a) Peça de aço API 5L X65 pronta para soldagem 107

3.22 (b) Detalhe da tocha na peça a ser ensaiada 108

3.23 Sistema de soldagem automatizado 108

3.24 Movimentação do conjunto de transdutores em relação ao cordão de solda 110

3.25 Trem de ondas captado pela placa. (ondas longitudinais) 111

3.26 Detalhe da localização dos pontos para determinação do tempo de percurso. (ondas longitudinais) 111

3.27 (a): Aparato para medição dos tempos de percurso em chapas soldadas. (Aço API 5L X65) 112

3.27 (b): Detalhe do posicionamento do sensor sobre a chapa ensaiada (Aço API 5L X65) 113

3.28 Trem de ondas captado pela placa. (ondas transversais ou cisalhantes) 114

3.29 Detalhe da localização dos pontos para determinação do tempo de percurso para ondas transversais ou cisalhantes 114

3.30 Detalhe do posicionamento do sensor sobre a chapa ensaiada (Aço API 5L X70) 115

4.1 Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 6 – 12. 121

4.2 Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 4 – 9 121

4.3 Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 19 – 36 122

4.4 Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 43 – 58 122

4.5 Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 41 – 59 123

4.6 Distribuição de Tensões Medidas na Solda antes e após Alívio de Tensões.(TMP 6-12) 124

4.7 Distribuição de Tensões Medidas na Solda antes e após Alívio de Tensões. (TMP 4-9) 124

4.8 Distribuição de Tensões Medidas na Solda antes após Alívio de Tensões.(TMP19-36) 125

4.9 Distribuição de Tensões Medidas na Solda antes após Alívio de Tensões.(TMP 43-58) 125

4.10 Distribuição de Tensões Medidas na Solda antes após Alívio de Tensões.(TMP41-59) 126

4.11 Perfis para conjuntos antes do alívio. 126

4.12 Perfis para conjuntos após alívio. 127

4.13 Distribuição das médias das tensões medidas dos conjuntos soldados antes e após alívio de tensões. 127

4.14 Distribuição da diferença das médias das tensões medidas dos conjuntos soldados antes e após alívio de tensões 128

4.15 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C11 131

4.16 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C12 131

4.17 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C13 132

4.18 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C14 132

4.19 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C15 133

4.20 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C21 133

4.21 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C22 134

4.22 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C23 134

4.23 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C24. 135

4.24 Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C25. 135

4.25 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C11 136

4.26 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C12. 136

4.27 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C13. 137

4.28 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C14. 137

4.29 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C15. 138

4.30 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C21. 138

4.31 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C22. 139

4.32 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C23. 139

4.33 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C24. 140

4.34 Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C25. 140

4.35 Perfis dos conjuntos soldados transversais antes do alívio de tensões 141

4.36 Perfis dos conjuntos soldados transversais após alívio de tensões. 142

4.37 Perfis dos conjuntos soldados longitudinais antes do alívio de tensões. 142

4.38 Perfis dos conjuntos soldados longitudinais após alívio de tensões. 143

4.39 Perfil da média dos conjuntos soldados transversais antes e após alívio de tensões 143

4.40 Perfil da média dos conjuntos soldados longitudinais antes e após alívio de tensões. 144

4.41 Perfil da diferença das tensões antes e após alívio para conjuntos soldados transversais. 144

4.42 Perfil da diferença das tensões antes e após alívio para conjuntos soldados longitudinais 145

4.43 Valores corrigidos de tensões médias medidas antes e após alívio de tensões para conjuntos soldados transversais 146

4.44 Comparação entre o perfil das diferenças de tensão antes e após o alívio de tensões para conjuntos transversais em relação ao perfil levantado pela fórmula empírica da distribuição de tensões residuais. 146

4.45 Comparação entre o perfil das diferenças de tensão antes e após o alívio de tensões para conjuntos longitudinais em relação ao perfil levantado pela fórmula empírica da distribuição de tensões residuais 147

4.46 Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C13. 148

4.47 Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C15. 149

4.48 Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C21. 149

4.49 Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C23. 150

4.50 Micrografia do metal fundido e da ZTA antes do alivio de tensões para o conjunto soldado C25. 151

4.51 Micrografia do metal fundido e da ZTA após alivio de tensões para o conjunto soldado C25. 151

4.52 Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas longitudinais. 152

4.53 Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas transversais. 152

4.54 Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas longitudinais (referência). 153

4.55 Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas transversais (referência). 153

A1 Tela de apresentação do programa L-Stress V1.0. 170

A2 Tela de dados iniciais do programa L-Stress V1.0 171

A3 Detalhe das dimensões do transdutor ultra-sônico. 172

A4 Detalhe do tracionador para medição dos tempos de percurso. 172

A5 Tela do osciloscópio do programa L-Stress V1.0. 174

A6 Tela de resultados do programa L-Stress V1.0 176

A7 Tela de resultados para constante acustoelástica conhecida. 177

A8 Tela de resultados com constante acustoelástica determinada. 178

A9 Tela de resultados com tensões determinadas. 179

A10 Tela de geração do relatório do programa L-Stress V1.0 180

B1 Micrografia do metal fundido e da ZTA antes do alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 200 X) 183

B2 Micrografia do metal fundido e da ZTA após alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 200 X) 184

B3 Micrografia do metal de base antes do alívio de tensões para chapa longitudinal C25. (Aumento 50 X) 184

B4 Micrografia do metal de base após alívio de tensões para chapa longitudinal C25. (Aumento 50 X) 185

B5 Micrografia do metal de base antes do alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 50 X) 185

B6 Micrografia do metal de base após alívio de tensões para chapa transversal C11 (Aumento 50 X) 186

Lista de Tabelas

2.1Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais 21

2.2 Resumo dos métodos para aliviar tensões residuais 43

2.3 Constantes acustoelásticas para ondas longitudinais e transversais 56

2.4Valores de velocidades e ângulos críticos para inspeção acrílico/aço e acrílico/alumínio 58

3.1 Composição Química e Propriedades Físicas do aço API 5L 82

3.2 Composição química do arame, fornecida pelo fabricante 96

3.3 Composição Química e Propriedades físicas do aço 1020 99

3.4 Resultados das constantes acustoelásticas para o aço 1020 102

3.5 Resultados das constantes acustoelásticas para o aço API 5L X70 105

3.6 Resultados das constantes acustoelásticas para ondas transversais para aços API 5L X70 105

3.7 Parâmetros de soldagem (Perfil de Tensões Residuais) 106

3.8 Parâmetros de soldagem (Relaxação das chapas) 107

3.9 Horários de soldagem e corte das chapas 117

4.1 Tempos de percurso para estado livre de tensões para aços API 5L X65 120

4.2 Tempos de percurso para estado livre de tensões para aços API 5L X70 129

Nomenclatura

Letras Latinas

B_0 - birefringência para o estado livre de tensões

B – Birefringência Acústica

b – largura do pico de tensões de tração [mm]

C_A- Constante acustoelástica para as ondas transversais [MPa^{-1}]

E - Módulo de Elasticidade [MPa]

E_t - Módulo de elasticidade do material a temperatura (T) da barra [MPa]

L_{11}- Constante acustoelástica para as ondas longitudinais

L, m, n - Constantes elásticas de terceira ordem

l – Comprimento final [m]

M – Momento resultante das tensões Residuais

t_θ - tempo de percurso na direção θ [s]

t_r - tempo de percurso na direção r [s]

T_0 – Temperatura inicial [°C]

t_0 – Tempo de percurso para o estado livre de tensões [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

λ- comprimento de onda [m]

ρ - massa específica [kg/m^3]

α_1, α_2, α_3- componentes da deformação principal homogênea triaxial

λ,μ - Constantes elásticas de segunda ordem de Lamé

θ_1 - ângulo de incidência

θ_2 - ângulo de refração

Abreviações

FCAW-G – Soldagem a arco com arame tubular

ZTA – Zona termicamente afetada

Capítulo 1

Introdução

Na indústria, é crescente o interesse em se identificar como o estado de tensões residuais pode afetar uma determinada estrutura. Sabe-se que quando uma estrutura falha, nem sempre a simples aplicação de um carregamento externo pode ser o causador desta falha. Tensões residuais que surgem em processos de soldagem são também um importante parâmetro a ser considerado. Estas tensões aparecem mesmo após a elaboração de um plano de soldagem adequado. A quantificação do estado de tensões residuais em juntas soldadas e em componentes mecânicos, em geral, se faz necessária durante as fases de projeto e manutenção. Na maioria dos processos de soldagem ocorrem irregularidades, seja no cordão de solda, na zona termicamente afetada (ZTA) ou mesmo no metal de base. Deste modo, existe a necessidade do prévio conhecimento destas tensões em componentes soldados. Atualmente diversas técnicas experimentais são utilizadas para esta determinação. Técnicas destrutivas e não destrutivas tem sido aplicadas com graus de sucesso.

Os principais métodos destrutivos, que se baseiam na medição do alívio de deformações, são: corte de serra e de rasgos, de remoção de camadas e do furo passante. Todos esses métodos baseiam-se na medição da relaxação da tensão através da medida da deformação por extensômetros. A partir da variação da deformação, pode-se determinar as tensões originais. Esses métodos não podem ser aplicados na avaliação da grande maioria dos elementos mecânicos em serviço, já que não se deseja que esses sejam destruídos.

Os principais métodos não destrutivos, algum dos quais também baseados na relaxação das deformações são: raios X, a difração de nêutrons, ferromagnetismo, método foto-elástico e o ultra-som. Todos esses métodos permitem a estimativa das tensões em pontos acessíveis ou não de um elemento através da avaliação em regiões acessíveis.

O método de raios X ainda é o método não destrutivo mais utilizado para determinação de tensões. Este é utilizado particularmente na determinação de tensões superficiais, já que a penetração dos mesmos, para essa aplicação, não ultrapassa alguns angstrons (A°). O custo da instrumentação envolvida, bem como a portabilidade desses instrumentos, torna o método difícil de ser empregado em condições de campo. O método da difração de nêutrons, que utiliza os mesmos princípios físicos dos raios X, permite a avaliação das tensões subsuperficiais. A desvantagem é que é necessário utilizar uma fonte de nêutrons. A determinação de tensões por método magnético está baseada no efeito que a deformação de um material ferromagnético causa em um campo eletromagnético que o envolve, e vice-versa (magnetoestricção). Assim, a presença de uma bobina sensível ao campo magnético pode detectar tensões, ou sensores de deformação podem detectar variações no campo magnético.

O ensaio por ultra-som caracteriza-se por ser um método não destrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são característicos do próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser examinado, como, por exemplo: bolhas de gás fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escorias em uniões soldadas e muitos outros. Portanto, o exame ultra-sônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidades. A partir da década de 60, o ensaio ultra-sônico começou a ser utilizado também para o conhecimento e a quantificação de tensões residuais em juntas soldadas.

As técnicas ultra-sônicas se baseiam nas variações da velocidade das ondas ultra-sônicas, que ocorrem quando estas se propagam através de um material que se submete à tensão. Esse efeito pode ser relacionado ao estado de tensão residual através das constantes elásticas de

terceira ordem do material. A esse fenômeno dá-se o nome de anisotropia acústica (Lamy, et al., 2002).

O método ultra-sônico, que será utilizado nesse trabalho, consiste na indução de ondas longitudinais e transversais no interior do material a ser testado e no registro do tempo de percurso destas. A velocidade das ondas no interior dos materiais é também função do estado de tensões interno, bem como de outras características como a textura (tamanho de grão, inclusões).

As tensões internas e as aplicadas aos materiais metálicos influenciam na velocidade das ondas ultra-sônicas. Esta variação da velocidade depende da sua direção de propagação e da direção de movimentação das partículas (polarização) no meio, devido a orientação da onda em relação ao estado de tensão do material e aos planos cristalinos. A este fenômeno dá-se o nome de "efeito acustoelástico".

Para a geração de ondas ultra-sônicas dois tipos de transdutores são utilizados: Transdutores Eletromagnéticos ("Eletromagnectic Transducers - EMAT") e Piezoelétricos ("Piezoelectric Transducers - PZT"). O primeiro tem a vantagem de não necessitar do fluído de acoplamento acústico, o que o torna menos susceptível à variações ambientais de temperatura e umidade e também elimina o efeito da pressão entre o sensor e a peça sob teste. O segundo, que será utilizado neste trabalho, tem como característica o baixo custo de seu sistema de instrumentação e controle, a maior relação entre sinal e ruído e o fato de que tem sido utilizado desde o início da década de 70 em outras aplicações, permitindo o desenvolvimento de diversos transdutores e sistemas comerciais de alta confiabilidade.

Apesar da significativa melhora da tecnologia da soldagem, alguns problemas tecnológicos ainda existem. Uma grande variedade de defeitos pode aparecer no cordão de solda e podem estar associados a varias causas, tais como: o projeto da junta soldada, processos, procedimentos de soldagem e comportamento metalúrgico dos materiais soldados. Estes defeitos de soldagem podem estar localizados na zona termicamente afetada pelo calor, nos metais de base, ou no metal de solda. As alterações das tensões residuais no metal de solda ou na ZTA estão relacionadas com as descontinuidades causadas por processos, procedimentos e projeto. As descontinuidades

metalúrgicas também podem alterar a distribuição local de tensões e, além disso, afetar as propriedades mecânicas da solda e da ZTA.

A presença de defeitos de soldagem pode provocar uma amplificação e/ou uma concentração das tensões atuantes na junta soldada. As tensões são amplificadas quando o defeito diminui a área da seção resistente da junta e são concentradas quando o defeito provoca um entalhe na junta. Alguns tipos de defeitos provocam tanto amplificação quanto concentração de tensões.

Para sanar os problemas descritos anteriormente, importantes considerações devem ser feitas no projeto de soldas quanto à qualidade dos materiais empregados e procedimentos de soldagem utilizados. A qualidade da solda determinará se ela vai possuir defeitos que comprometerão a utilização da peça ou da estrutura, ou mesmo se esta será susceptível a falha por fadiga, para uma determinada aplicação.

A garantia da qualidade da solda requer a avaliação da junta soldada. A inspeção e aceitação de determinada solda devem ser feitas com critérios preestabelecidos, tais como em normas especificas. Em vários paises desenvolvidos, onde a qualidade do produto é um fator determinante para a aceitação no mercado, o desenvolvimento de normas de inspeção e aprovação do produto tornou-se uma necessidade.

Durante o processo de soldagem, são geradas tensões devido a contração e expansão desiguais no cordão de solda, na zona afetada pelo calor (ZTA) e no metal de base. A completa eliminação destas tensões é dificil. Entretanto, elas podem se tornar bastante prejudiciais a uma estrutura ou componente devido às solicitações em serviço. Nestes casos, o alívio destas tensões não é desejável e sim necessário. Daí a importância de saber que tipo de tensões existe numa chapa soldada, a sua magnitude e sua localização, principalmente em juntas soldadas que fazem parte de componentes de alta responsabilidade, isto é, de alto custo ou que coloquem vidas humanas em risco.

1.1 Relaxação e Magnitude de Tensões.

A soldagem, apesar de ser um processo comum e largamente utilizado, requer para a sua realização profissionais capacitados, máquinas e instrumentos modernos e tempo de serviço. Todos esses fatores unidos acrescentam tempo para a realização total de uma soldagem adequada e, conseqüentemente, causam um aumento do custo envolvido. Saber que existe o fenômeno de relaxação de tensões em uma estrutura soldada é fundamental para a definição do fator de segurança envolvido no projeto de estruturas metálicas e componentes mecânicos. Saber quantificar corretamente esta relaxação pode significar uma grande economia em termos de materiais e processos. O efeito da relaxação pode ser observado no caso de componentes que não falham, mesmo após serem solicitados com cargas teoricamente suficientes para leva-los à falha. Isto ocorre porque as tensões internas reais existentes no elemento podem chegar a ser até 30% menores do que as previstas no projeto.

Moffat, em seu trabalho de mestrado, no ano de 1951, mostrou que o fenômeno de relaxação poderia ocorrer em baixas temperaturas. Ele observou que as tensões residuais, distantes dos filetes de solda, alcançavam um valor máximo imediatamente após o processo de soldagem. Com as placas colocadas na temperatura ambiente, Moffat observou que, nas horas e dias que se seguiam à soldagem, o valor das tensões se reduzia significativamente. No ano de 2000, Chance deu continuidade ao trabalho feito por Moffat, com apenas algumas modificações que foram feitas nas placas originais e na instrumentação utilizada. Esta por ser mais precisa, permitiu a análise mais criteriosa do fenômeno.

Além da relaxação, conhecer a magnitude das tensões também é um fator crucial para a avaliação de juntas soldadas. Métodos destrutivos poderiam ser utilizados para avaliar a magnitude e a relaxação, mas não são desejáveis justamente por serem destrutivos, conforme dito. O método ultra-sônico tem tido grande aceitação para este tipo de avaliação (Shneider, 1998) e será utilizado neste trabalho.

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 a superficie, mostraram-se mais sensíveis a variação da tensão (Santos & Bray, 2000). Assim, este trabalho faz uso de ondas L_{cr} para atingir seus objetivos. Tanto a relaxação como a magnitude das tensões foram avaliadas para o aço API 5L X70.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho de mestrado tem como objetivo verificar a possibilidade de aplicação de ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}) na avaliação da magnitude das tensões residuais em juntas soldadas e no estudo do fenômeno da relaxação de tensões após a soldagem. Foram utilizados aços API 5L X70 e API 5L X65, este último somente para a avaliação da magnitude de tensões.

1.3 Apresentação do trabalho

No capítulo 2 é apresentada uma ampla revisão da literatura sobre os seguintes assuntos: teoria sobre tensão residual, tensão residual em conjuntos soldados, aplicação do ultra-som para detecção de defeitos, aplicação do ultra-som para determinação de tensões, características e aplicações de ondas L_{cr}.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia para a realização dos experimentos. Descrição dos equipamentos, instrumentação e explicação do programa de aquisição de dados.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, mostrando os diversos perfis de tensões residuais longitudinais para as diversas chapas medidas através de ondas longitudinais e transversais e os resultados para a relaxação de tensões.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas e listadas observações adicionais que podem nortear a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

Antes da segunda guerra mundial, o sonar, técnica que consiste em enviar ondas de som por água e observar o retorno dos ecos para descobrir objetos submergidos, já era utilizado. Em 1929 e 1935, Sokolov apresentou estudos sobre o uso de ondas de ultra-som em objetos de metal. Mulhauser, em 1931, obteve a patente para usar ondas de ultra-som empregando dois transdutores para descobrir falhas em sólidos. Firestone, em 1940, e Simons, em 1945, desenvolveram testes de ultra-som usando a técnica de pulso eco. Esta técnica consiste na emissão de uma onda e através de seu eco a determinação da presença de defeitos.

Aproveitando as pesquisas sobre os avanços da técnica ultra-sônica, alguns pesquisadores investigaram o uso de ultra-som para aplicações no setor médico. Logo após o fim da segunda guerra mundial, investigadores do Japão começaram a avaliar a capacidade de diagnóstico para este fim. Os primeiros instrumentos de ultra-som necessitavam da tela de um osciloscópio para mostrar as ondas. Seguiu-se a apresentação em duas dimensões, com imagem em escala cinza.

O trabalho feito no Japão sobre ultra-som era relativamente desconhecido nos Estados Unidos e Europa até os anos cinqüenta. Nessa época, investigadores japoneses apresentaram a pesquisa sobre o uso de ultra-som para descobrir tumores e pedras nos rins à comunidade médica internacional. O Japão também foi o primeiro país a empregar o ultra-som "Doppler", uma aplicação que permite descobrir objetos com movimento interno, como por exemplo, o curso de sangue pelo coração, para investigação cardiovascular. Mais recentemente, também foi usado

para investigar o curso de sangue em órgãos transplantados para verificação do bom funcionamento e evitar eventuais anomalias que possam ocorrer em pacientes pós-transplantados. Em especial, nos transplantes renais.

Testes não destrutivos foram aplicados durante muitas décadas, o objetivo principal destes testes era a detecção de defeitos em materiais. Isso foi facilitado com o desenvolvimento rápido da instrumentação causado pelos avanços tecnológicos que aconteceram durante a segunda guerra mundial. Para um maior tempo de operação segura de peças metálicas, era desejável que uma estrutura não desenvolvesse defeitos macroscópicos durante a sua vida. Com a detecção de cada falha, haveria a remoção do componente de serviço. Para suprir essa necessidade emergiram técnicas sofisticadas, que usavam ultra-sonografia, raio-X, líquidos penetrantes, partículas magnéticas e outras formas.

Por volta de 1970, aconteceram dois eventos que causaram uma mudança sensível no setor de ensaios não-destrutivos. Primeiro, com uma melhora significativa da tecnologia, em particular da habilidade de descobrir pequenas falhas, cada vez mais peças tiveram que ser rejeitadas, embora a probabilidade de falha não tivesse mudado. Segundo, a ciência da mecânica da fratura foi desenvolvida. Esta permitiu predizer se uma trinca de determinado tamanho levaria a falha sob uma carga em particular, conhecidas as propriedades do material. Foram desenvolvidas diversas leis para predizer a taxa de crescimento de trincas solicitadas a carregamentos cíclicos (fadiga). Com o desenvolvimento destas ferramentas, tornou-se possível aceitar estruturas que continham defeitos, desde que esses defeitos fossem conhecidos (www.cnde.iastate.edu).

2.1 Tensão Residual.

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as solicitações externas são removidas. Estas tensões aparecem freqüentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, tempera, etc). As deformações plásticas não uniformes que ocorrem ao longo de uma seção da peça são as principais causas de seu aparecimento. Podem ser causadas por defeitos mecânicos ou térmicos, ou ambos agindo simultaneamente. Um exemplo simples,

que pode ser visto na figura 2.1, é o surgimento de tensões residuais localizadas na superfície de uma peça submetida a processos como esmerilhamento ou jateamento com granalhas, que causam o escoamento plástico do material próximo à superfície. Neste caso, as tensões formadas junto à superfície da peça são compressivas, obtendo-se assim um efeito benéfico na sua resistência à fadiga.

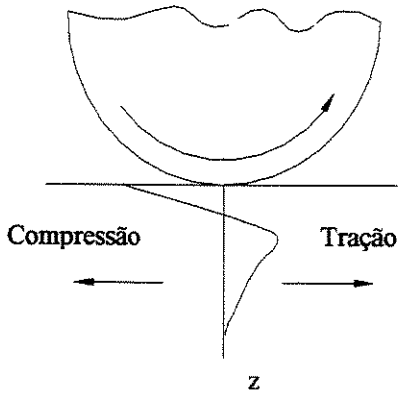


Figura 2.1: Tensões residuais desenvolvidas junto à superfície de uma peça sendo esmerilhada (Masubuchi, 1965, em Modenesi, 2001).

Um outro caso, diz respeito às expansões e contrações, associadas com transformações estruturais do material, que podem ser também responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais.

Um exemplo para o entendimento do conceito de tensões residuais ocorre em sistemas compostos por vários componentes. Quando estes são colocados em posição, desenvolvem-se forças de reação que podem gerar tensões residuais. Por exemplo, quando se necessita aparafusar uma estrutura, no momento em que os parafusos são apertados, tensões se formam nos parafusos e nos componentes presos por eles. Como estas tensões independem de solicitações externas, estas podem ser consideradas como tensões residuais, embora conceitualmente não a sejam.

Uma vez que as tensões residuais existem na ausência de uma solicitação externa, o sistema é auto-equilibrado. Assim, a força e o momento (M) resultantes dessas tensões, em uma dada seção da peça, devem ser nulos, ou seja:

$$\int_A \sigma \times dA = 0 \text{, e} \tag{2.1}$$

$$\int_A dM = 0 \tag{2.2}$$

Há três principais categorias de tensões residuais, definidas pela forma sob a qual são feitas as observações. Essas tensões residuais podem ser definidas como macro tensões ou micro tensões e ambas podem estar presentes em um componente a qualquer momento. As macro tensões residuais, que são designadas como tensões residuais do tipo I, variam dentro do corpo de um componente em uma escala maior que o tamanho de grão. As micro tensões residuais, que resultam das diferenças dentro da microestrutura de um material, podem ser classificadas como tensões residuais do tipo II ou do tipo III. As tensões residuais do tipo II são micro tensões residuais que operam no nível do tamanho de grão. O tipo III é gerado em nível atômico.

As micro tensões residuais freqüentemente resultam da presença de fases diferentes e manifestam diferentes características físicas. Podem mudar o sinal e/ou a magnitude sobre distâncias comparáveis ao tamanho de grão do material sob a análise.

Ao comparar resultados de técnicas de medições de tensões residuais diferentes (técnicas semi-destrutivas), algumas considerações devem ser feitas quanto ao volume da amostra a ser retirada e a resolução de cada método de medida com relação ao tipo de tensão residual que está sendo medido, particularmente em relação aos tipos II e III. É importante considerar o conceito de volume característico, que pode ser usado para descrever o volume sobre o qual dado tipo de tensão residual se aproxima de zero. A maioria das técnicas de remoção de material remove grandes volumes de material. Desse modo, as tensões do tipo II e III se aproximam de zero e, por conseqüência, somente as macro tensões residuais podem ser medidas. A figura 2.2 mostra um esquema detalhado dos tipos de tensões residuais.

Nessa figura, pode-se notar o patamar médio, descrito como tensão σ^{I}, a variação em torno dessa média, ocorrida de grão para grão, chamada de tensão σ^{II}, e a variação em cada grão, definida como tensão σ^{III}.

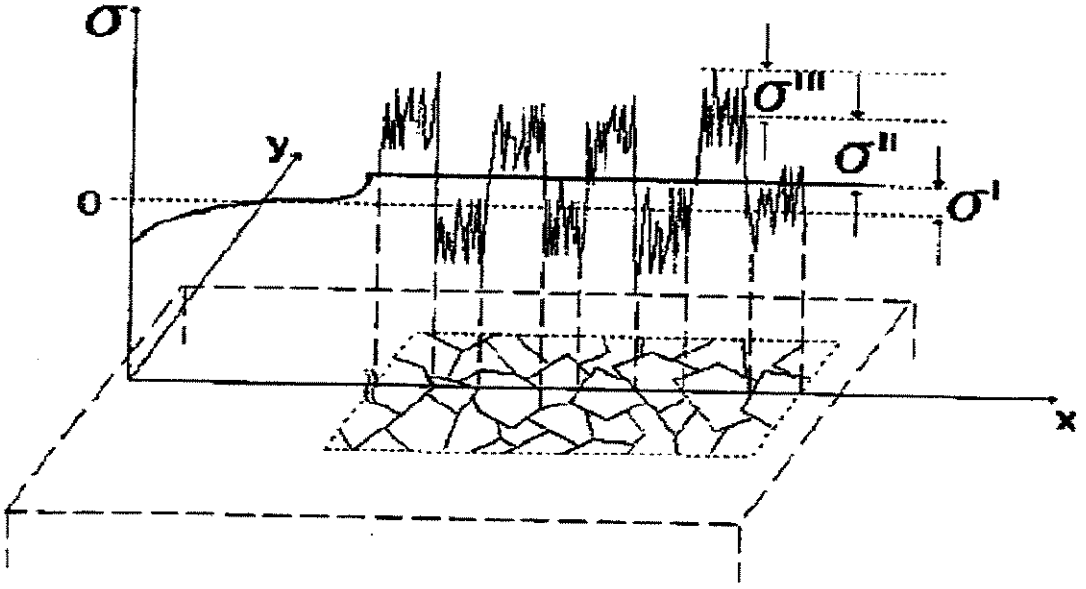


Figura 2.2: Categorias de tensões residuais de acordo com seus níveis (Kandil et al., 2001).

2.1.1 Origens e Comportamento das Tensões Residuais.

Conforme já dito, tensões residuais se desenvolvem durante a maioria dos processos de manufatura que envolvem deformação de material, tratamento térmico, usinagem ou operações de processamento que transformam a forma ou mudam as propriedades de um material. Elas surgem de fontes diferentes, como influências termodinâmicas ou qualquer outro tipo de carregamento, e podem estar presentes no material ainda não processado, introduzidas durante a manufatura para aumentar o tempo de vida dos componentes, ou podem originar-se de carregamentos em serviço. As tensões residuais podem ser suficientemente elevadas e podem

levar a deformação plástica em um nível microscópico e macroscópico. Podem ser indesejáveis, mas podem aparecer como parte inerente à manufatura e aos processos. Desse modo, podem afetar severamente o desempenho dos componentes. Por esta razão, é vital algum conhecimento do estado interno de tensões, que pode ser deduzido de medidas experimentais ou de predições através de um modelo. Caso seja utilizada a primeira forma, é importante que sejam empregadas técnicas de medidas de tensão residual confiáveis.

A magnitude e a distribuição de tensões residuais podem ser críticas para o desempenho e devem ser considerados no projeto de um componente. Em todo corpo livre, o equilíbrio de tensões deve ser mantido (equação 2.1), o que significa que a presença de tensão residual de tração no componente estará balanceada por uma tensão compressiva em outra parte no corpo. As tensões residuais de tração na superfície de um componente são geralmente indesejáveis, já que podem contribuir para a falha por fadiga e para o aparecimento de trincas superficiais. As tensões residuais de compressão nas camadas da superfície são geralmente benéficas, já que aumentam a resistência à fadiga e a resistência à corrosão sob tensão.

Para melhor esclarecer o mecanismo das tensões residuais que surgem em um componente, pode-se utilizar elementos mecânicos que tenham deformações residuais internas. As partes de um corpo que são previamente solicitadas e que não sofrem deformação plástica tendem a retornar à sua forma original após a retirada da solicitação externa. No entanto, as partes deformadas plasticamente restringem o retorno dos volumes elásticos à sua forma original. Isso causa o aparecimento de energia potencial elástica. Devido a essa restrição à deformação, tensões internas surgirão no corpo. Para a relaxação dessas tensões, solicitações externas devem ser aplicadas.

Como dito anteriormente, o efeito das tensões residuais sobre um elemento pode ser benéfico. Isso ocorre caso as solicitações externas sejam no mesmo sentido da solicitação que levou à deformação plástica. Como exemplo, um corpo que sofre deformação plástica de tração desenvolverá tensões residuais de compressão quando a solicitação for retirada. Desse modo, solicitações de tração posteriores serão somadas à compressão residual inicial e podem ser de valor mais alto sem que atinjam novamente o limite elástico.

Seja o caso de uma placa com um campo de tensão residual. Caso a placa esteja sujeita a uma tensão residual (σ_r), proveniente de alguma fonte em um ponto definido do plano de tensão aplicado, e se uma dada tensão seja aplicada (σ_A) for superposta no mesmo ponto e mesmo plano, a tensão resultante (σ_n) será dada pela equação:

$$\sigma_n = \sigma_A + \sigma_r \tag{2.3}$$

A Figura 2.3 mostra a superposição das tensões residuais e aplicadas durante um teste de fadiga por flexão. Caso seja feito um tratamento para criar tensões residuais de compressão (σ_r) em uma região, estas vão se opor a tensão de tração aplicada (σ_A) na mesma região, resultando assim em uma tensão resultante (σ_n) menor que a tensão aplicada. Muitos tratamentos mecânicos e termo-mecânicos utilizam esse conceito para introduzir tensões residuais nos elementos antes que sejam colocados em uso, permitindo desse modo uma condição de trabalho muito mais favorável. Portanto, as tensões residuais de compressão reduzem a tensão total em zonas críticas de tração, podendo afetar o desempenho de componentes (fadiga,fratura, corrosão por fadiga).

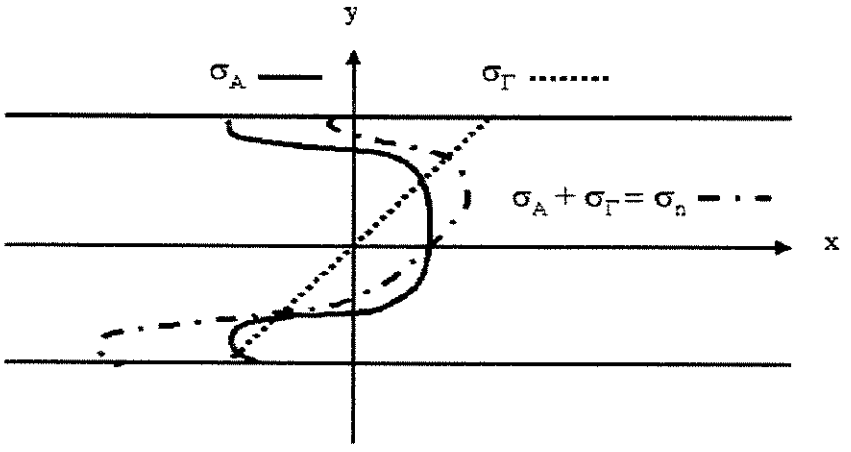


Figura 2.3: Superposição das tensões residuais aplicadas (James e Lu, 1996, em Chance, 2000).

As tensões residuais de tração são as principais responsáveis por falhas em elementos mecânicos e pelas falhas de maior impacto. Como existe a possibilidade de surgir uma trinca em uma região qualquer do corpo e caso exista uma região com tensões residuais de tração de elevada magnitude, isto permitirá uma propagação para regiões onde a área resistente à fratura seja inferior à mínima necessária. Nesse momento, ocorrerá o súbito rompimento do corpo, podendo resultar em danos catastróficos.

As origens das tensões residuais em um componente podem ser classificadas como:

- Mecânicas
- Térmicas
- Químicas

As tensões residuais mecânicas são geradas do resultado de processos de manufatura que produzem deformação plástica não uniforme. Podem desenvolver-se naturalmente durante processamento ou tratamento, ou podem ser introduzidas propositalmente para desenvolver um perfil particular de tensão em um componente. Exemplos de operações que produzem tensões de tração de superfície indesejáveis ou gradientes de tensão residual são: soldagem, usinagem (torneamento, fresagem), retificação e esmerilhamento (circunstâncias normais ou ásperas). A figura 2.4 mostra características de perfis de tensão residual resultantes de três tipos diferentes de esmerilhamento. Pode ser visto que o esmerilhamento altamente abrasivo e o convencional produzem tensões de tração perto da superfície, quando comparados com as tensões de compressão com esmerilhamento delicado. Tensões residuais de compressão geralmente conduzem a performances benéficas e podem ser introduzidos por jateamento.

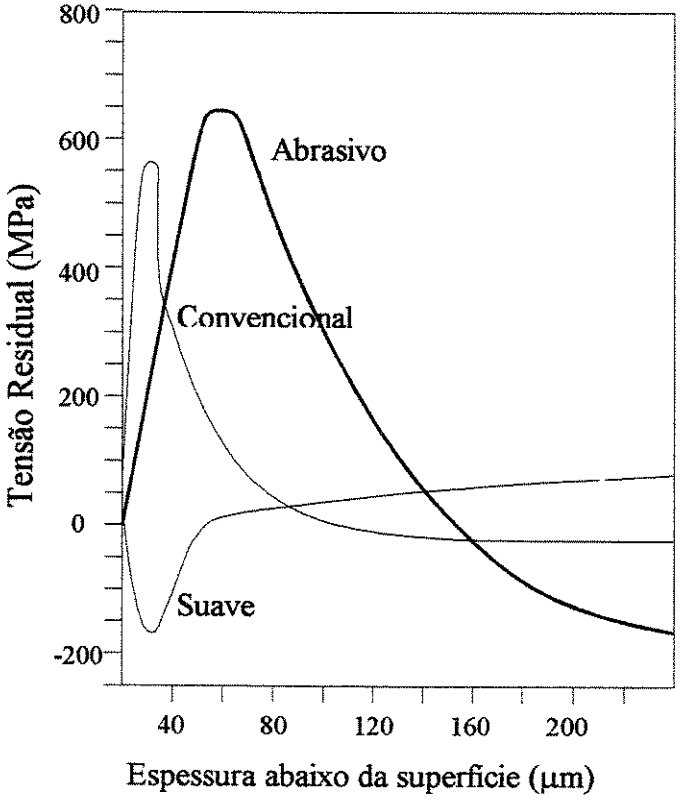


Figura 2.4: Características das distribuições de tensão residual em um aço duro para três diferentes operações de esmerilhamento (Kandil et al., 2001).

Em um nível macroscópico, tensões residuais geradas termicamente são freqüentes, em conseqüência de tratamentos não uniformes ou operações de refrigeramento. Devido ao tamanho excessivo de alguns componentes, alguns tratamentos térmicos são feitos de um modo severo com grandes gradientes térmicos. Este processo causa o aparecimento de tensões residuais de grande magnitude. Como exemplo, destaca-se a têmpera das ligas de aço ou de alumínio, que conduz a tensões compressivas na superfície, balanceadas por tensões de tração no volume do componente. As tensões residuais térmicas microscópicas podem se desenvolver em um material

durante a manufatura ou através de seu processamento, em conseqüência da má combinação dos constituintes entre fases diferentes.

As tensões residuais químicas podem se desenvolver devido às mudanças de volume associadas com as reações químicas, precipitação ou a transformação de fase. Os tratamentos de superfície químicos e os revestimentos podem conduzir à geração de gradientes de tensão residual substanciais nas camadas da superfície do componente. Como exemplo, destaca-se a nitrificação que produz tensão de compressão na região da difusão por causa da expansão da estrutura e da precipitação dos nitretos. Observa-se um efeito similar quando a carburização é aplicada. O valor das tensões residuais geradas nos revestimentos pode ser muito elevado. As tensões de compressão são da ordem de 6 a 8 GPa. Para alguns revestimentos térmicos esse nível de tensão pode ser ainda maior.

2.1.2 Métodos de Medição de Tensões Residuais.

Existem vários métodos diferentes de determinação de tensão residual. De um modo geral a tensão residual não é medida diretamente, e sim calculada através de medidas de deformações causadas pelo alivio das tensões residuais. Para determinação de tensões internas, técnicas destrutivas e não destrutivas vem sendo utilizadas com sucesso na medida de deformação. As técnicas não-destrutivas são aquelas que utilizam a difração ou as que utilizam propriedades sensíveis à tensão. As técnicas destrutivas são aquelas que necessitam de um certo grau de destruição, utilizando técnicas mecânicas que podem até introduzir tensões residuais adicionais, dependendo da operação a ser feita. As técnicas de relaxação de tensões são baseadas na medida da deformação elástica que ocorre quando uma parte do corpo de prova contendo tensões residuais é removida. A mudança de forma resultante da deformação pode ser medida por diferentes sensores. Assim, dependendo do tipo de sensor usado, de sua forma de colocação e de remoção do material, diferentes técnicas são empregadas. Quando sensores elétricos (Strain Gauges) ou mecânicos são usados, as deformações elásticas associadas a remoção do material podem ser determinadas quantitativamente e, com a aplicação de equações da teoria da elasticidade, as tensões residuais inicialmente existentes no material podem ser determinadas.

Embora sejam técnicas destrutivas, estas são as mais usadas para a determinação de tensões residuais.

As técnicas de difração de raios X baseiam-se na determinação dos parâmetros cristalinos de pequenas regiões da peça e na associação de eventuais variações deste parâmetro com as deformações elásticas presentes no material submetido a tensões residuais. Esta técnica permite medir deformações superficiais em pequenas áreas (= 3 μm de diâmetro) e não é destrutiva. Contudo, tende a ser mais demorada e menos precisa que as destrutivas.

Técnicas baseadas em propriedades sensíveis a tensão, de forma similar a anterior, medem alterações de alguma propriedade do material e as associam com as deformações elásticas presentes na região medida. São também técnicas não destrutivas. Técnicas com ultra-som baseiam-se na determinação da velocidade de propagação do som para estimar o estado de tensão no material. Técnicas de dureza são baseadas em pequenas variações na dureza do material com a presença de tensões elásticas. Finalmente, técnicas magnéticas baseiam-se em variações de propriedade magnéticas de materiais ferromagnéticos (basicamente aços) com as tensões elásticas. Destas técnicas, apenas a ultima tem aplicação atual fora de laboratórios, existindo dispositivos portáteis para a determinação não destrutiva de tensões residuais.

Finalmente, técnicas de fissuração são baseadas na avaliação qualitativa do padrão de fissuração desenvolvido em corpos de prova colocados em ambientes capazes de formar trincas induzidas pelo estado de tensões dos corpos de prova. As trincas são, em geral, desenvolvidas por fragilização pelo hidrogênio ou por corrosão sob tensão.

Os principais métodos para determinação de tensão são descritos a seguir:

- **Extensometria**

A extensometria é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas. Os extensômetros elétricos são largamente utilizados para medir deformações em estruturas como pontes, máquinas, locomotivas, navios e ainda associados

a transdutores para medir pressão, tensão, força e aceleração. São ainda associados a outros instrumentos de medida para uso desde análise experimental de tensão até investigação e práticas médicas e cirúrgicas.

Na sua forma mais completa, o extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante. Este é colado sobre à estrutura em teste com auxílio de adesivos, como o epóxi. Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao extensômetro, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Por esta razão, os extensômetros são definidos como transdutores.

Os extensômetros são usados para medir variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão, compressão, aceleração, vibração. A seleção do extensômetro apropriado para determinada aplicação é influenciada pelas seguintes características: material da grade metálica e sua construção, material do suporte isolante, material do adesivo, tratamento e proteção do medidor e configuração. O design dos extensômetros incorpora várias funcionalidades como alto fator de medição, alta resistividade, baixa sensibilidade à temperatura, alta estabilidade elétrica, alta resistência mecânica, facilidade de manipulação, baixa histerese, baixa troca térmica com outros materiais e durabilidade. A sensibilidade à temperatura é um ponto fundamental no uso de extensômetros. Freqüentemente o circuito de medição contém um compensador de temperatura. Da mesma forma, o tipo de adesivo usado para fixar o extensômetro à estrutura a ser monitorada é de suma importância. O adesivo deve transmitir as variações mecânicas com o mínimo de interferência possível, por isso deve ter alta resistência mecânica, alta resistência ao cisalhamento, resistência dielétrica e capacidade de adesão, baixa restrições de temperatura e facilidade de aplicação.

Extensômetros medem deformação apenas ao longo de seu eixo longitudinal. Arranjos especiais, chamados de rosetas, permitem medir as deformações ao longo de várias direções. Em especial, rosetas de três eixos a 45 ° permitem determinar as deformações nas direções principais de tensão num plano.

- **Métodos destrutivos ou semi-destrutivos**

Os métodos mais comuns para determinação de tensões residuais em componentes metálicos são destrutivos e baseiam-se na medição do alívio de deformações. Os métodos mais conhecidos utilizam ou o corte perpendicular à direção de tensão desejada ("saw-cut method" - em Ueda, 1996), ou a abertura de um furo superficial ("hole drilling method" - Zhou & Rao, em Kypa, 1999) ou ainda a usinagem de um pequeno rasgo na forma de anel na superfície de interesse ("ring core method" - em Schajer et al, 1996). Estes métodos baseiam-se na medição da relaxação da tensão através da medida da deformação por extensômetros. A partir da variação da deformação, pode-se determinar as tensões originais. Esses métodos não podem ser aplicados na avaliação da grande maioria dos elementos mecânicos em serviço, já que não se deseja que esses sejam destruídos.

O método "hole drilling" requer a usinagem de um pequeno furo, com medidas aproximadas de 1 a 3 mm no diâmetro com uma profundidade igual ao diâmetro. Uma roseta mede a deformação superficial no material em volta do furo. O método "ring core" é similar, exceto que um anel, tipicamente com diâmetro interno de 15 a 150 mm, é usinado em vez de ser feito apenas um orifício.

- **Método da difração de Raio-X**

Este método é baseado na medição do espaçamento interplanar de materiais cristalinos. O ângulo de refração dos raios X tem uma relação direta com esse espaçamento. A tensão atuante no elemento que causa a variação no espaçamento interatômico (deformação), pode ser calculada a partir da deformação utilizando as constantes elásticas (Proctor, 1982; Cullity, 1978; Prevey, 1991; Ruddy, 1991). Existem alguns limitantes que dizem respeito à técnica de Raios X. Primeiro, este método é utilizado particularmente na determinação de tensões superficiais, já que a penetração dos mesmos, para essa aplicação, não ultrapassa alguns angstrons (A^{o}). Sendo assim esta técnica não é aplicada quando se necessita de medições dos gradientes de tensão ao longo da espessura. Segundo, o custo da instrumentação envolvida, bem como a portabilidade dos instrumentos, torna o método difícil de ser empregado em condições de campo, tais como em

pátios de manutenção de vagões ferroviários ou oficinas de verificação de aeronaves. Apesar das peculiaridades desse método, ele ainda é o ensaio não destrutivo mais utilizado para determinação de tensões.

- **Método da difração de Nêutrons**

Como no método de raios X, este método também permite a medição do espaçamento interplanar e, portanto, também pode ser utilizado na avaliação das tensões. Ele tem como princípio básico a utilização de um feixe de nêutrons que penetra no material (Pintschovious & Jung, 1983), sendo essa a única diferença em relação ao método raios X. De resto, tem os mesmos princípios físicos envolvidos neste. Uma das principais vantagens é que o feixe penetra mais profundamente na superfície, permitindo a avaliação das tensões subsuperficiais. A desvantagem é que é necessário utilizar uma fonte de nêutrons, ou seja, um reator nuclear. Medição em campo, portanto, é praticamente impossível e os elementos a serem inspecionados devem ser levados ao laboratório, e não o contrário (Holden & Roy, 1996).

- **Métodos magnéticos.**

A determinação de tensões por método magnético está baseada no efeito que a deformação de um material ferromagnético causa em um campo eletromagnético que o envolve, e vice-versa (magnetoestricção). A variação do campo está relacionada à reordenação de micro-domínios ferromagnéticos no interior de grãos, ao longo de direções cristalográficas favoráveis. Barkhausen estudou as emissões acústicas que ocorrem durante o alinhamento na direção de magnetização, no interior desses micro-domínios, mostrando a influência das deformações (ou variações no campo magnético) nas mudanças nas fronteiras dos mesmos (Tiito, 1996, em Chance, 2000). Assim, a presença de uma bobina sensível ao campo magnético pode detectar tensões, ou sensores de deformação podem detectar variações no campo magnético.

- **Métodos ultra-sônicos**

O método ultra-sônico consiste na indução de ondas longitudinais ou transversais no interior do material a ser testado e no registro do tempo de percurso destas. A velocidade das ondas no interior dos materiais é função do estado de tensões interno, bem como de outras características como a textura, tamanho de grão, inclusões,etc. As ondas transversais polarizadas ("shear waves") são normalmente utilizadas para medições perpendiculares à superfície e as ondas longitudinais para medidas na superfície dos sólidos. Ondas transversais têm sensibilidade à textura. Essas ondas normalmente não são aplicadas para tensões na superfície devido a maior interação das mesmas com a interface e devido a maior sensibilidade das ondas longitudinais à deformação na direção de propagação.

Tabela 2.1: Técnicas para a determinação experimental de tensões residuais (Modenesi, 2001).

Grupo	**Técnica**
• Técnica de relaxação de tensão	• Técnicas com "strain Gages" elétricos
	• Técnicas com "strain Gages" mecânicos
	• Técnicas com revestimentos frágeis
	• Técnicas com revestimento fotoelástico
• Técnicas de difração de Raios-X	• Difração em filme
	• Difração com difratômetro
• Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão.	• Técnicas com ultra-som
	• Técnicas com medidas de dureza
	• Técnicas magnéticas
• Técnicas de fissuração.	• Fissuração pelo hidrogênio
	• Fissuração por corrosão sob tensão

2.1.3 Tensões Residuais em Soldas.

A soldagem por fusão é caracterizada pelo aquecimento de regiões localizadas das peças, permanecendo o restante em temperaturas inferiores. As regiões aquecidas tendem a se expandir, mas esta expansão é dificultada por partes vizinhas submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no material aquecido. Como conseqüência, ao final do processo de soldagem, tensões internas (tensões residuais) e mudanças permanentes de forma e de dimensões (distorções) ocorrem na peça. Para melhor entender estes dois fenômenos decorrentes do processo de soldagem pode-se utilizar como exemplo a soldagem de topo de duas chapas. A região do cordão de solda é fundida e a ZTA (zona termicamente afetada) é submetida a temperaturas próximas à temperatura de fusão do material. Isto se dá pelo aquecimento localizado provocado pela fonte de calor. Este aquecimento não se distribui uniformemente, ou seja, as regiões são aquecidas em diferentes velocidades e em diferentes temperaturas.

Como resultado deste aquecimento, como visto anteriormente, o material tende a se expandir, mas é barrado pelas regiões vizinhas que se encontram a temperaturas mais baixas. Por não poder se expandir adequadamente, o material gera tensões de compressão que, devido às altas temperaturas, facilmente atingem o valor do seu limite de escoamento e, portanto se deformam plasticamente. Este fenômeno pode ser melhor visualizado através da figura 2.5, onde pode-se ver que o valor do limite de escoamento (σ_e), decresce com o aumento da temperatura. A região que sofre tensão de compressão durante o aquecimento, no resfriamento passa a sofrer tensão de tração pela contração do material.

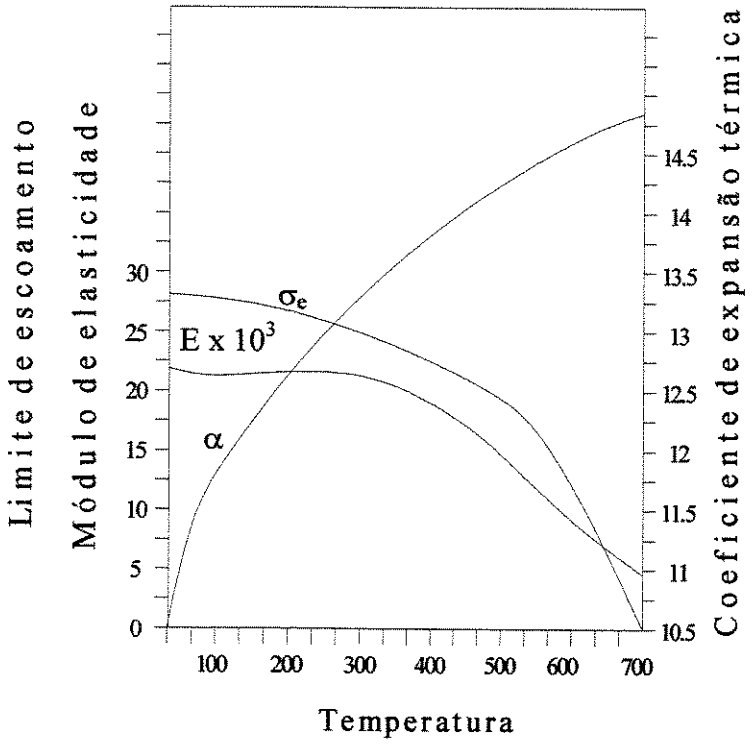


Figura 2.5: Variação do limite de escoamento σ_e, do modulo de elasticidade "E", e do Coeficiente de Expansão Térmica α de aços, com relação à Temperatura (Souza, 1982).

Como já citado, o aparecimento de tensões residuais e distorções em uma estrutura soldada pode gerar diversos problemas como a formação de trincas, uma maior tendência da estrutura a apresentar fratura frágil, falta de estabilidade dimensional e dificuldade no ajuste de peças ou componentes devido à mudança de forma. Observa-se, em varias situações, que medidas para a redução de distorções causam um aumento no nível de tensões residuais e vice-versa.

- **Origem Térmica.**

Tensões residuais são de elevada importância para soldagem. Nesse tópico, discute-se as associadas com a de deformação plástica não uniforme por efeitos térmicos.

Quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de temperatura, isto é:

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \qquad (2.4)$$

Onde:

$\Delta l \Rightarrow$ Variação do comprimento inicial (l_0)

$\alpha \Rightarrow$ Coeficiente de dilatação térmica linear

$\Delta T \Rightarrow$ Variação da temperatura inicial (T_0) $\Rightarrow$ ($\Delta T = T - T_0$)

$l \Rightarrow$ comprimento final

Se um objeto for aquecido e resfriado uniformemente e não existirem restrições as suas variações dimensionais, o processo não resulta em efeitos mecânicos importantes. Contudo, se a variação de temperaturas não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver.

Para explicar o aparecimento de tensões residuais, pode-se citar como um exemplo um arranjo experimental com três barras metálicas de mesmo comprimento e seção, conectadas firmemente a bases comuns em suas extremidades, de maneira que nenhuma delas possa ter modificadas suas dimensões independentemente das outras (figura 2.6). Um aquecimento é imposto apenas a barra central. Devido a este aquecimento, ela tenderá a se dilatar, mas será restringida pelas barras laterais. Por causa dessa dilatação, tensões de compressão se desenvolverão na barra central e, nas laterais, aparecerão tensões de tração de magnitude igual à metade do valor da barra central, segundo a equação 2.1. A figura 2.7 mostra a evolução da tensão longitudinal média na barra central em função da sua temperatura.

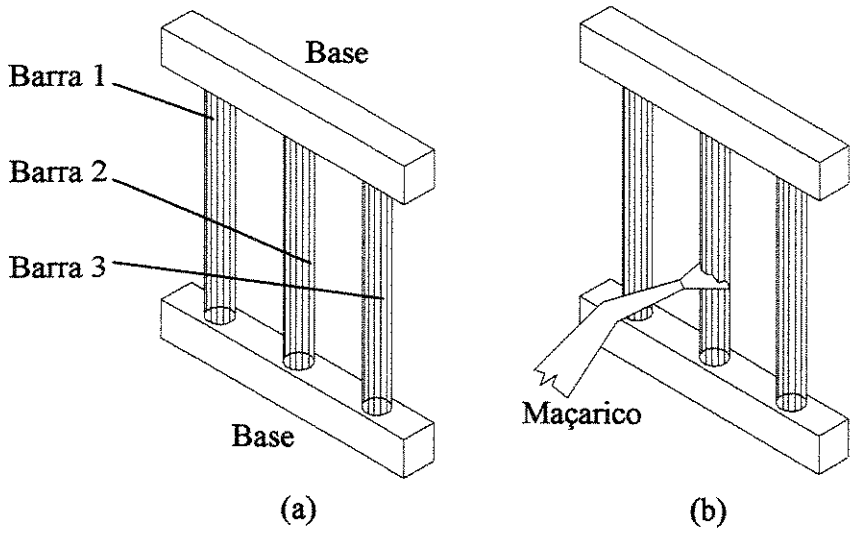


Figura 2.6: (a) Conjunto de barras presas nas extremidades. (b) Barra central sendo aquecida (Modenesi, 2001).

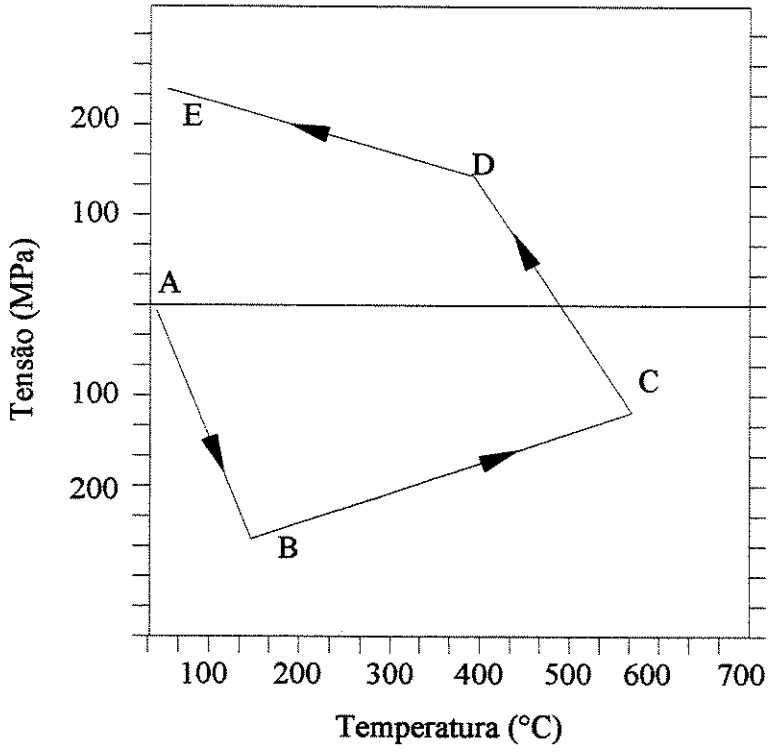


Figura 2.7: Variação da tensão (σ_c) com a temperatura na barra central (figura 2.6) (Masubuchi, 1980).

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Na figura (2.7), no início do aquecimento (reta A-B) as tensões e deformações na barra central são elásticas. Como dito anteriormente, as barras devem manter o mesmo comprimento, portanto a dilatação térmica deve ser compensada por deformações elásticas. A equação (2.5) mostra a relação que deve ser obedecida devido ao equilíbrio (Masubuchi, 1980).

$$\frac{\sigma_c}{E_t} + \alpha.\Delta T + \frac{\sigma_l}{E} = 0 \qquad (2.5)$$

$E \Rightarrow$ Módulo de elasticidade do material a temperatura ambiente

$E_t \Rightarrow$ Módulo de elasticidade do material a temperatura (T) da barra

$\sigma_c \Rightarrow$ Valor da tensão na barra central

$\sigma_l \Rightarrow$ Valor total da tensão nas barras laterais.

Como uma das condições iniciais era de que as barras teriam a mesma seção, desse modo tem-se $\sigma_l = 0{,}5\sigma_c$. Substituindo essa relação na equação (2.5) e fazendo algumas operações matemáticas tem-se:

$$\sigma_c = -\alpha.\Delta T.\frac{2E}{1+\frac{2E}{E_t}} \qquad (2.6)$$

Através da equação (2.6) pode-se estimar a temperatura na qual a tensão na barra central (σ_c) atinge o seu limite de escoamento, a partir desse momento a barra passa a se deformar plasticamente (ponto B). Para análise será utilizado um aço 1020. A seguir serão listadas algumas de suas propriedades:

$\Rightarrow$ Limite de escoamento (σ_e) = 250 MPa,

$\Rightarrow$ Módulos de elasticidade (E=Et) = 210 GPa

$\Rightarrow$ Coeficiente de dilatação térmica (α) = $1{,}3X10^{-5}$ (m/m°C)

$\Rightarrow$ Temperatura Ambiente (T) = 25°C.

Substituindo esses valores na equação (2.6), chega-se a temperatura para a barra central de 165 °C no início da deformação plástica. Para essa análise considerou-se uma temperatura ambiente de 25°C. Deve-se ressaltar que esta análise pode ser feita para qualquer material.

Como visto anteriormente, acima da temperatura calculada a barra começa a se deformar plasticamente, portanto ela não é mais capaz de retornar ao seu comprimento inicial após ser resfriada. Devido o aumento de temperatura o limite de escoamento tende a diminuir e o valor da tensão na barra central tende a cair. A partir desse momento a barra se deforma plasticamente (curva BC). No momento em que o aquecimento é retirado no ponto C, uma queda de temperatura é registrada e a barra central passa a se contrair. Como as barras laterais restringem o movimento, as tensões de compressão na barra central são reduzidas. A partir de um certo momento tensões de tração passam a atuar nela até que seja atingido o ponto D.

Quando o processo chega a seu final, a barra central retorna a temperatura ambiente e, por ter se deformado plasticamente, esta terá um comprimento menor que o das barras externas. Assim, como as barras estão unidas, como pode ser visto na figura 2.6, tensões residuais de tração existirão na barra central (ponto E). Estas tensões terão a magnitude tão altas quanto o limite de escoamento do material. Para manter o equilíbrio de forças, como mostrado na equação 2.1, as barras laterais terão tensões de compressão de valor igual à metade da tensão na barra central.

Fazendo uma analogia do que foi exposto anteriormente, o processo pode ser comparado com uma junta soldada, associando a região de solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, como as barras laterais. Com base neste raciocínio, pode-se esperar, como conseqüência da operação de soldagem, o desenvolvimento de tensões residuais de tração na região da solda e de tensões de compressão no metal de base. A figura 2.8 compara, esquematicamente, a distribuição de tensões residuais na montagem das barras com a que é esperada em uma solda.

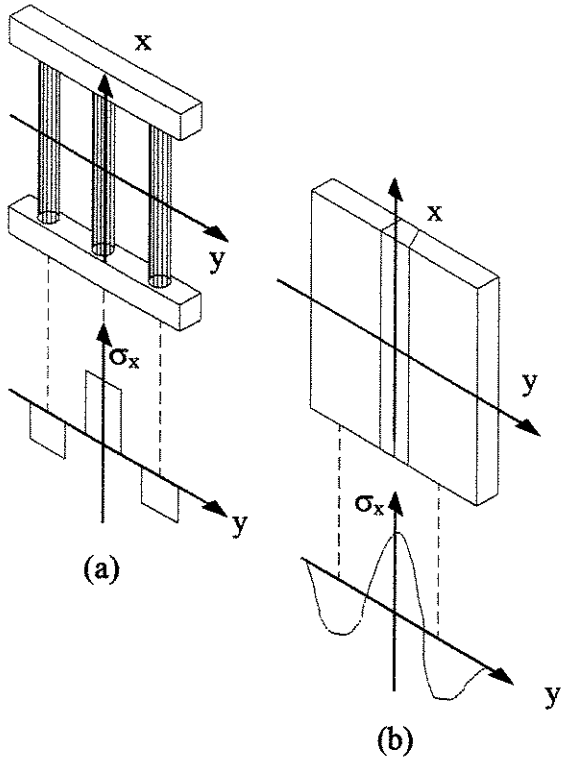


Figura 2.8: Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões residuais longitudinais (x) formadas ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b) (Modenesi, 2001).

- **Distribuição das tensões residuais e temperaturas em soldas.**

As mudanças na temperatura e nas tensões durante o processo de soldagem são mostradas na figura 2.9. Um cordão de solda é depositado ao longo do eixo "x" do plano de uma chapa. A fonte de calor é movimentada com uma velocidade "v". No momento presente está localizada sobre o ponto "O". A distribuição de temperatura e tensão ao longo do eixo "x" é representada pelos gráficos das seções A-A, B-B C-C e D-D. Para a distribuição de tensões, consideraremos as tensões ao longo do eixo "x" como σ_x. A tensão de cisalhamento τ_{xy} e a tensão σ_y também existem no campo bidirecional, mas não são mostradas na figura 2.9.

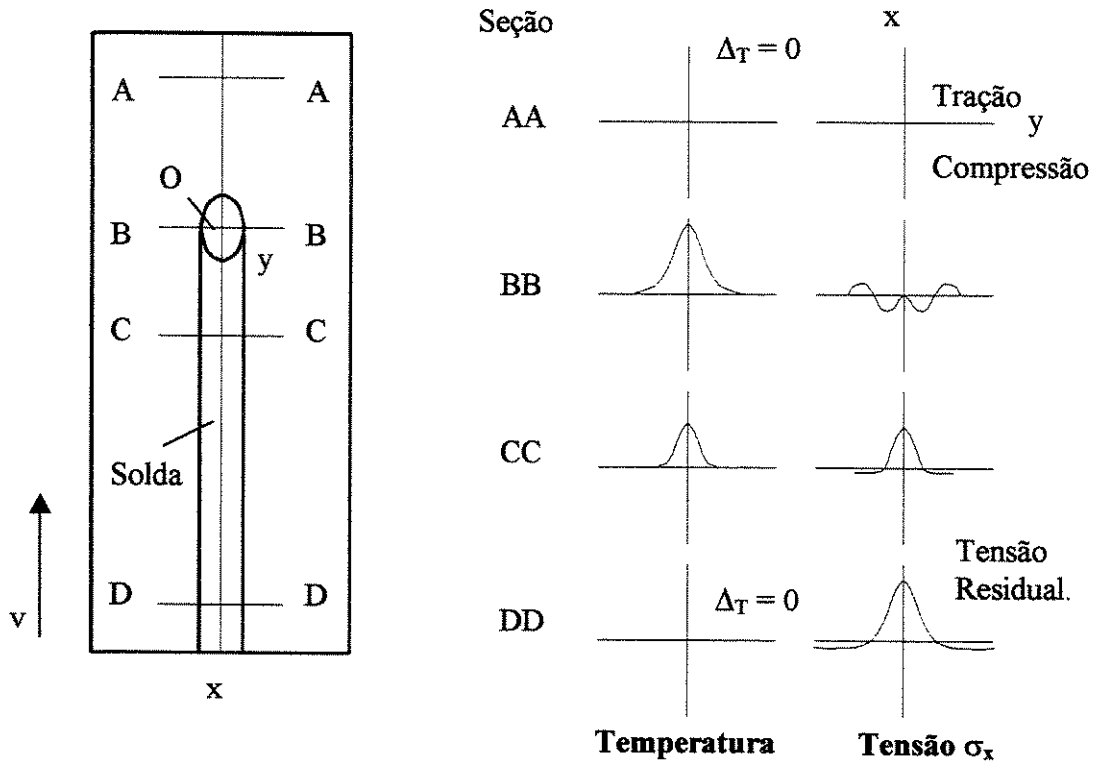


Figura 2.9: Desenvolvimento de tensões residuais longitudinais durante a soldagem (Masubuchi, 1980).

⇒ **SEÇÃO A-A**

➢ *Temperatura:*

Esta região esta muito distante da poça de fusão e ainda não esta aquecida pela fonte de calor, portanto não existem variações de temperatura.

➢ *Tensão:*

Como esta região esta distante da poça de fusão, o material ainda esta isento de tensões.

⇒ **SEÇÃO B-B**

➢ *Temperatura:*

A distribuição de temperatura para esta seção é extremamente alta, pois nesta posição está localizada a fonte de calor e conseqüentemente a poça de fusão.

➢ *Tensão:*

Na seção BB, junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando assim tensões de compressão em ambos os lados das regiões próximas a Zona Fundida, ou seja, na Zona termicamente afetada (ZTA) e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. A temperatura próxima à fonte de calor é alta, resultando num limite de escoamento baixo. As tensões de compressão que se formam devido à deformação plástica que ocorre no material aquecido aumentam conforme a temperatura do metal. A magnitude da tensão de compressão aumenta até um valor máximo, conforme o decréscimo da temperatura pelo distanciamento do cordão de solda. Para qualquer distância do cordão de solda, as tensões de tração são balanceadas com as tensões de compressão na ZTA, pela condição de equilíbrio. Na poça de fusão, como o material esta líquido, as tensões são quase nulas, pelo fato do metal aquecido não suportar cargas.

⇒ **SECÃO C-C**

➢ *Temperatura:*

Para esta seção, a distribuição de temperatura é menos severa, pois já há alguma distância da fonte de calor.

➢ *Tensão:*

Nesta seção com o resfriamento do metal de solda e da ZTA e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias

e afastadas da solda. Portanto surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas.

⇒ **SEÇÃO D-D**

➢ *Temperatura:*

Nesta seção, a distância para a fonte de calor é tão grande que a distribuição de temperatura já se uniformizou.

➢ *Tensão:*

Ao longo desta seção, após o resfriamento, tensões de tração elevadas, que chegam a níveis tão altos quanto o limite de escoamento do material, são encontradas no cordão de solda e na ZTA, enquanto tensões de compressão surgem nas outras regiões do metal de base. Esta distribuição pode ser melhor observada pela figura 2.8b.

- **Detalhamento da Distribuição Resultante.**

As tensões residuais, presentes em uma estrutura soldada durante a sua fabricação e seu uso, são de dois tipos:

✓ Tensões residuais que são produzidas na operação de soldagem de seus membros sem restrição.

✓ Tensões de reação resultantes da ligação entre os diversos membros da estrutura e entre estes e outras estruturas.

A figura 2.10 mostra esquematicamente a distribuição de tensões residuais longitudinais e transversais em uma solda de topo. A distribuição de tensões longitudinais foi discutida anteriormente e pode ser aproximada empiricamente por:

$$\sigma_x = \sigma_m \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right] e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{b}\right)^2} \tag{2.7}$$

Onde b, a largura do pico de tensões de tração, que depende das condições de soldagem e do material, e σ_m é a tensão máxima (no centro da solda), cujo valor é, em geral, próximo do limite de escoamento do material.

A distribuição de tensões transversais (figura 2.10 (c)) é caracterizada, em soldas isoladas, por valores menores de tensão. Contudo, quando a solda faz parte de uma estrutura incluindo outras peças e soldas, tensões de reação tendem a se somar às tensões de origem térmica, resultando em maiores valores de tensões residuais (linha tracejada na figura 2.10 (c)). Em outros tipos de juntas (soldas de vigas em T ou tubulações, por exemplo), uma distribuição mais complexa de tensões residuais tende a se formar em função das forças de reação que se desenvolvem pela própria geometria do componente soldado.

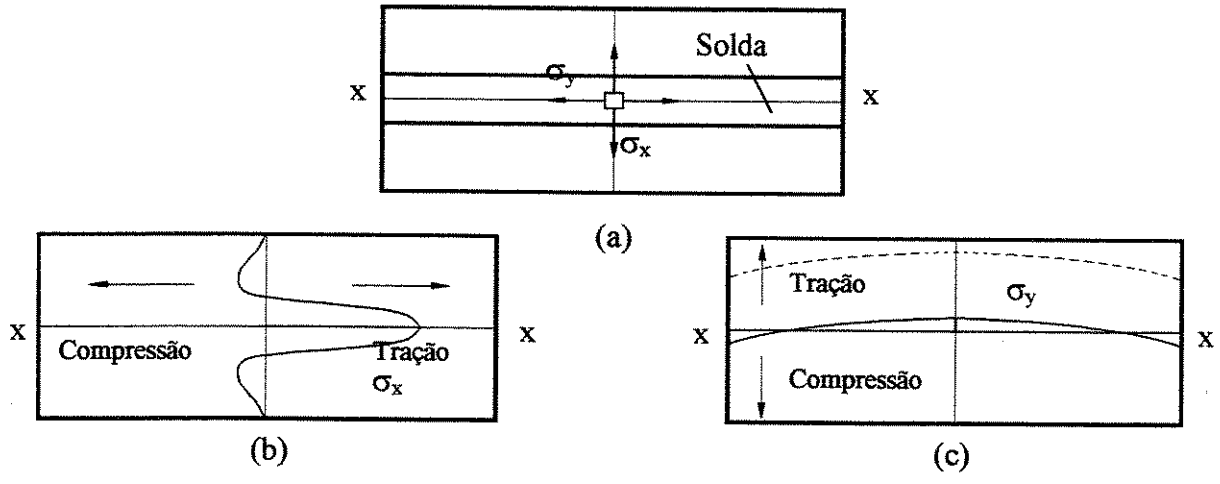
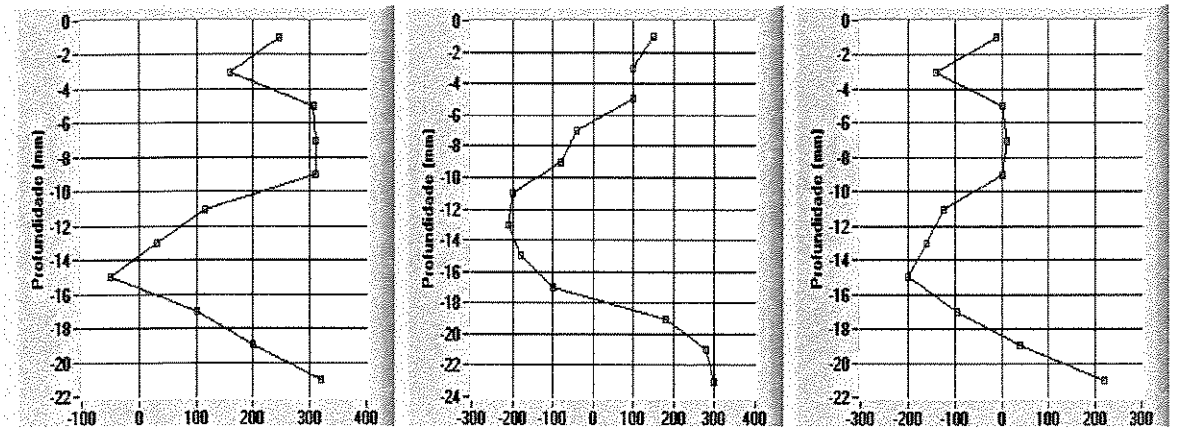


Figura 2.10: Distribuição típica de tensões residuais em solda de topo. (a) Sistemas de coordenadas e tensões. (b) Tensões Longitudinais. (c) Tensões Transversais (linha tracejada: distribuição de tensões quando a solda faz parte de uma estrutura e está sujeita a tensões de reação) (Masubuchi, 1980, em Modenesi, 2001).

Quando o componente soldado apresenta uma grande espessura (superior a cerca de 25 mm), as tensões residuais na direção (z) e a variação das tensões em outras direções com a espessura podem se tornar significativas. A figura 2.11 ilustra a distribuição das tensões σ_x, σ_y e σ_z ao longo da espessura de uma solda de 25 mm de espessura de aço carbono depositada com o processo SMAW, de acordo com dados de Gunnert (1958). O processo de soldagem a Arco com Eletrodos Revestidos (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) é um processo no qual a união dos metais é obtida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo especial revestido e a peça.



Tensão longitudinal σ_x (MPa) Tensão transversal σ_y (MPa) Tensão perpendicular σ_z (MPa)

Figura 2.11: Distribuição das tensões σ_x, σ_y e σ_z ao longo da espessura de uma solda (Gunnert, 1958, em Masubuchi, 1980).

Estruturas soldadas tendem a apresentar uma distribuição complexa de tensões residuais que pode ser caracterizada, na região da solda, por esforços de tração em duas (ou três) dimensões. Este estado de tensão tende a dificultar a deformação plástica da região da solda podendo favorecer o desenvolvimento de rupturas localizadas (trincas) nessa região, quando essa apresenta baixa ductilidade ou quando a estrutura é colocada em um ambiente agressivo ou submetida a solicitações severas.

Em resumo a distribuição de tensões residuais em um componente soldado é afetada por diversos fatores, incluindo as características do metal de base e da solda (à temperatura ambiente e em altas temperaturas), a geometria da junta soldada e a sua ligação com outros componentes e as condições de soldagem, além da distribuição de temperaturas na peça durante a soldagem.

A figura 2.12 mostra distribuições estimadas, através de modelos computacionais (Andrews e outros, 1970), de tensões residuais em soldas de um aço de baixo carbono e de um aço ligado de elevada resistência mecânica. Este último é caracterizado, em relação ao primeiro, por um maior valor da tensão residual máxima e por um pico mais estreito de tensões de tração no centro do cordão. Este efeito foi associado a maior resistência mecânica do aço ligado em temperaturas elevadas, o que restringiu a região deformada plasticamente a uma faixa mais estreita da junta.

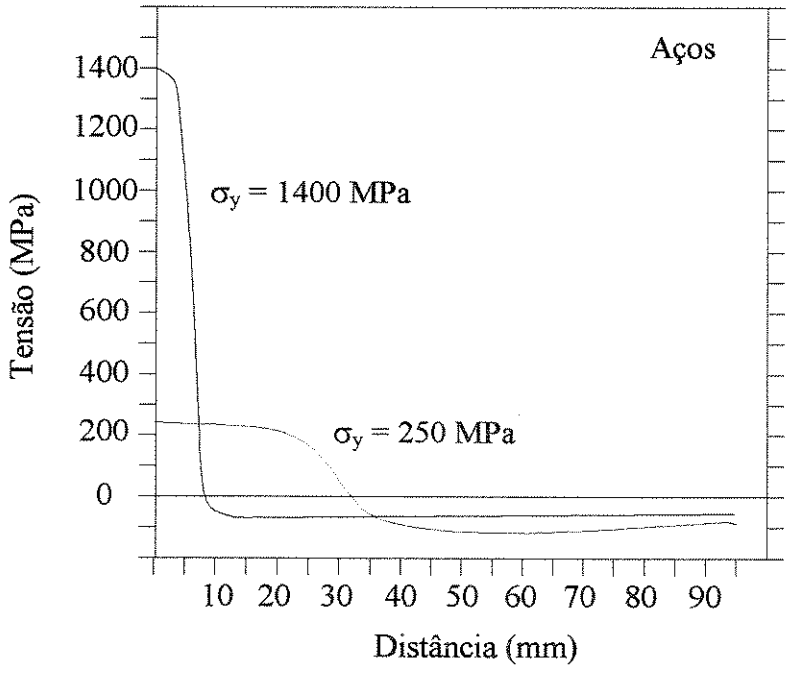


Figura 2.12: Distribuição da tensão residual longitudinal calculada por um modelo computacional para um aço de baixo carbono (limite de escoamento de 250 MPa) e um aço de alta resistência (escoamento de 1400 Mpa) (Andrews et al., 1970, em Masubuchi,1980).

Resultados experimentais (Yada, 1965, em Masubuchi, 1980) indicam que, para aços, a tensão residual máxima no centro do cordão acompanha o limite de escoamento à medida que este ultimo é aumentado (figura 2.13). Este resultado inesperado estaria associado à tendência dos aços de maior resistência mecânica apresentarem uma maior temperabilidade a uma menor temperatura. Assim, a decomposição da austenita durante a soldagem ocorre a menores temperaturas e, como esta reação é acompanhada por um aumento de volume, ela tenderia a reduzir tensões residuais no cordão de solda associadas com a contração do material durante o resfriamento da solda.

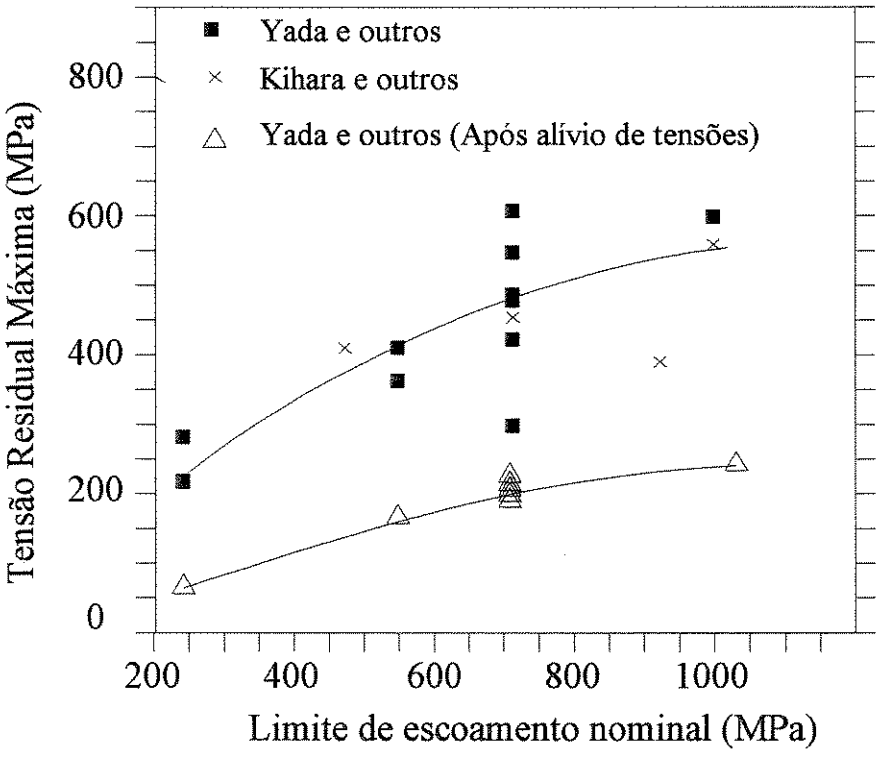


Figura 2.13: Tensões residuais de soldagem de vários aços de alta resistência (Yada, 1965, em Masubuchi, 1980).

2.1.4 Conseqüências das Tensões Residuais.

➢ Variações nas tensões residuais devido a um carregamento de tração.

Quando um componente soldado, contendo uma distribuição inicial de tensões residuais (curva 0, figura 2.14), é submetido a um carregamento de tração, as tensões residuais se somam diretamente as tensões de carregamento enquanto as deformações plásticas permanecem elásticas (e lineares). Assim, as regiões da solda, nas quais as tensões residuais são mais elevadas, atingem condições de escoamento plástico antes do resto do componente (curvas 1,2 e 3, figura 2.14). O desenvolvimento de deformações plásticas, localizadas principalmente na região da solda, tende a diminuir as variações dimensionais que eram responsáveis pela existência das tensões residuais. Desta forma, quando o carregamento externo é retirado, o nível das tensões fica reduzido (curva 4 figura 2.14).

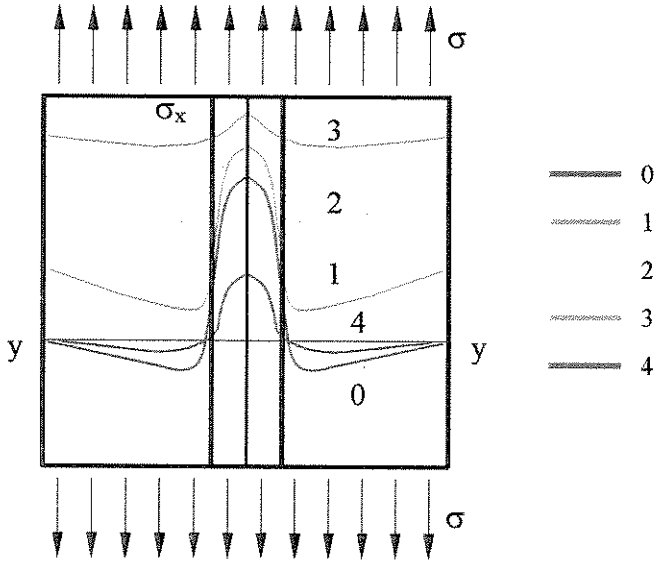


Figura 2.14: Distribuição de tensões residuais em um componente com solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1,2 e 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento (curva 4) (Modenesi, 2001).

A análise anterior permite destacar os seguintes aspectos relativos ao efeito das tensões residuais:

- Presença de tensões residuais afeta significantemente apenas aqueles fenômenos que ocorrem em baixos níveis de tensão (inferiores ao limite de escoamento do material) como a fratura frágil, a fragilização pelo hidrogênio e a corrosão sob tensão.

- Em estruturas submetidas a carregamento adicional, quanto maior for o nível das tensões aplicadas, menor será o efeito das tensões residuais. Quando o nível de carregamento for suficientemente elevado, parte da peça pode escoar e, como resultado, as tensões residuais são reduzidas.

- Se a estrutura é carregada além de seu limite de escoamento, as tensões residuais se tornam desprezíveis.

- Métodos que utilizam alguma forma de solicitação mecânica podem ser usados para diminuir as tensões residuais em um componente soldado.

➢ Flambagem dos componentes soldados.

Flambagem é a falha instável de componentes delgados submetidos a cargas compressivas quando, sob ação destas cargas, passam a apresentar distorção transversal critica, δ (figura 2.15).

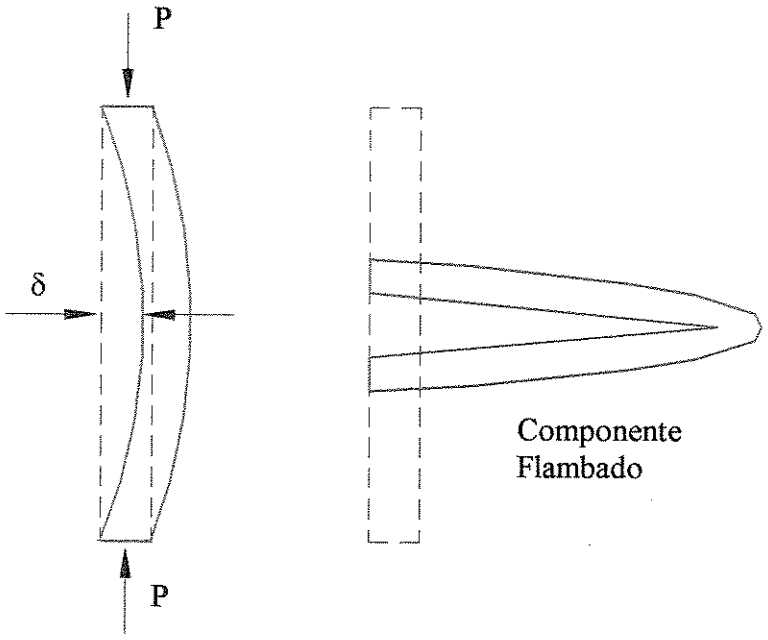


Figura 2.15: Flambagem de uma coluna (Modenesi, 2001).

Uma vez que as tensões residuais são de compressão em regiões longe da solda e de tração próximos desta, estas tensões podem tanto aumentar como reduzir a resistência a flambagem de estruturas soldadas. Como estruturas soldadas tendem a apresentar também distorções e como a flambagem esta associada com deformações perpendiculares ao eixo ou plano do componente (figura 2.15), distorções de soldagem neste podem comprometer seriamente a resistência a este problema. Distorção por flambagem devido às tensões térmicas e residuais pode também ocorrer em chapas finas soldadas, dando a estas um aspecto irregular.

➢ Fadiga.

A presença de tensões residuais de compressão na superfície de um componente é um fator para redução da chance de iniciação de trincas de fadiga. Em um componente soldado, as tensões residuais de tração devem ter um efeito negativo no seu desempenho à fadiga, embora não existam resultados claros quanto a este efeito devido possivelmente a: (a) sob a ação de cargas variáveis, as tensões residuais de soldagem devem ser, pelo menos parcialmente, aliviadas e (b) as irregularidades superficiais (reforço e escamas) tem um efeito predominante na redução da resistência a fadiga.

➢ Fratura frágil.

Estruturas soldadas são particularmente propensas a falha por fratura frágil devido a diversos fatores, destacando-se:

- Uma estrutura soldada é monolítica, não apresentando interfaces (como em uma estrutura rebitada ou aparafusada) que possam interromper a propagação de uma trinca de fratura frágil.

- A região da solda apresenta alterações estruturais caracterizadas, freqüentemente, por um aumento do tamanho de grão em relação ao metal de base, o que, em materiais de estrutura cristalina CCC, tende a diminuir a tenacidade do material.

- A região da solda pode apresentar diversas descontinuidades ou defeitos, tais como trincas, inclusões de escoria e deficiências de fusão, que podem atuar como concentradores de tensão e pontos de iniciação de fratura.

- Tensões residuais elevadas de tração existem na região da solda.

Fratura frágil é favorecida por baixa temperatura, elevada taxa de deformação, elevada espessura do componente, pela presença de concentradores de tensão e por uma microestrutura de baixa tenacidade. Diversos destes fatores podem estar presentes em uma estrutura soldada. Neste caso, uma trinca pode se propagar sob tensões inferiores ao limite de escoamento, praticamente sem deformação plástica. Nestas situações, as tensões residuais associadas à solda podem ser suficientemente elevadas ou podem se adicionar às tensões externas para causar a fratura frágil. Devido a este risco, em diversas situações, componentes soldados devem ser tratados termicamente para alivio de tensões residuais e/ou refino da estrutura na região da solda.

Existem muitos exemplos de falha por fratura frágil de componentes soldados, muitos com grande perda material e de vidas humanas.

➢ Formação de trincas em soldas.

Trincas são freqüentemente formadas em soldas. Estas trincas podem ser associadas basicamente a dois fatores: (a) solicitação, isto é tensões mecânicas de tração e (b) incapacidade (fragilização), muitas vezes momentânea, do material em acomodar esta solicitação deformando-se plasticamente. Fragilização da região da solda e de regiões adjacentes a solda podem ocorrer por diversos fatores: formação de filmes de liquido em contornos de grão, crescimento de grão, presença de hidrogênio dissolvido no material, precipitação, etc, durante e após a soldagem.

➢ Corrosão sob tensão.

Na presença de um ambiente agressivo, trincas de corrosão podem desenvolver-se de forma acelerada devido a presença de tensões de tração. No caso de aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, esse fenômeno é desencadeado pelo contato com hidróxidos ou com sulfeto de hidrogênio. Em estruturas soldadas, as tensões residuais são muitas vezes suficientes para o desenvolvimento de corrosão sob tensão, dependendo do material e do ambiente. Neste sentido, por exemplo, certos códigos impõem limitações quanto a dureza máxima da ZTA (inferior a 325 HV) como uma forma de prevenir corrosão sob tensão em tubulações soldadas para transporte de petróleo, cujo ambiente pode apresentar teores perigosos de H_2S.

➢ Instabilidade dimensional

Quando um componente soldado é usinado ou submetido à outra operação de remoção de material, as equações 2.1 e 2.2 deixam de ser satisfeitas. Para restaurar o equilíbrio de forcas e de momento, o componente sofre pequenas distorções que causam uma redistribuição das tensões residuais. Este processo é usado para a medição de tensões residuais pelo método da relaxação de tensões (seção 2.3), mas pode causar problema na usinagem de precisão de componentes com tensões residuais.

2.1.5 Redução, Controle e Alívio de Tensões Residuais.

O nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de material depositado ou o calor fornecido a junta. Isto pode ser feito na prática de duas maneiras:

- Otimizando o desenho do chanfro.
- Evitando depositar material em excesso.

No primeiro caso, pode-se reduzir o ângulo do chanfro ou usar preparações simétricas. Para o segundo caso, deve-se evitar reforço excessivo em soldas de topo ou minimizar o tamanho de soldas de filete.

A seleção de processos de maior eficiência térmica (fonte de maior intensidade) é uma possível alternativa de controle, mas difícil de ser justificada economicamente na maioria dos casos. Tensões residuais também podem ser reduzidas pelo uso de metal de adição com a menor resistência permissível no projeto, assim como uma redução dos vínculos externos da junta soldada (minimizando-se, assim, as tensões de reação).

A redução de tensões residuais que são causadas devido à soldagem pode ser realizada através de dois métodos básicos: método mecânico e método térmico.

O método mecânico pode ser dividido em dois casos:

- Alívio de tensões por sobrecarga.
- Alívio de tensões por vibração.

No primeiro caso, é aplicada uma tensão de tração até um valor máximo imposto em projeto. A seguir, essa tensão é decrescida gradativamente. Dessa forma, obtem-se o alívio de tensões pela transformação de deformações elásticas em deformações plásticas. Na prática este método é muito utilizado no alívio de tensões de vasos de pressão e tubulações.

No segundo caso é feita a aplicação de vibrações em uma estrutura, até ela entrar em ressonância de baixa freqüência, o que acasiona a deformação plástica. As tensões residuais são aliviadas por essas deformações resultantes. Na prática, esse método é adequado para estruturas de pequenas dimensões ou chapas finas.

Um terceiro caso ainda pode ser citado, o martelamento. Este processo não deixa de ser também uma forma de sobrecarga localizada, realizada durante a deposição dos cordões de solda. Porém não é aplicado à primeira e última camada. Esse método baseia-se na introdução de um campo de tensões de compressão, o que acarreta um aumento da resistência a fadiga da junta soldada. Pode ser aplicado também na forma de jateamento de granalhas.

O método térmico pode ser dividido em três casos:

- alívio de tensões a baixas temperaturas.
- recozimento para alívio de tensões.
- recozimento a alta temperatura.

No primeiro caso, aquece-se o cordão de solda e sua região adjacente até temperaturas entre 150 a 200 °C e, em seguida, resfria-se com água. Este método é muito utilizado para estruturas de grande porte.

No segundo caso, o material é homogeneamente aquecido até uma temperatura abaixo do limite inferior da zona crítica (entre 600 e 900 °C), e resfriado lentamente, obtendo-se uma elevada eficiência no alívio das tensões. Deve-se observar que a temperatura de aquecimento deve ser a mínima compatível com as condições da peça e com o tipo de material. Isso deve ser feito para que não ocorram alterações sensíveis de suas propriedades mecânicas.

No terceiro caso, o material deve ser aquecido acima da zona crítica durante tempo suficiente para ocorrer a solução do carbono ou dos elementos de liga, após o que deve ser feito um resfriamento muito lento. Este método envolve uma considerável mudança nas propriedades do material e em sua estrutura. Entre essas mudanças podemos citar a diminuição de dureza, maleabilização e formação de novos arranjos granulares.

A tabela 2 mostra, de uma maneira simplificada, os tipos de métodos de alívio de tensões, citando sua descrição, principais características e suas limitações.

Tabela 2.2: Resumo dos métodos para aliviar tensões residuais. (a) Métodos Mecânicos e (b) Métodos Térmicos (Modenesi, 2001).

Procedimento		Descrição	Características	Limitações
(a)	**Martelamento**	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem	Método simples pode causar refino de grão.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade.
	Encruamento	A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração	Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações.	Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes
	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando ressonância de baixa freqüência, o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. Alívio de tensões não é uniforme
(b)	**Recozimento para alívio de tensões**	Aquecimento a 600-700 C(aços ferríticos) ou 900 C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente	Inaplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo elevado
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento a 900-950 C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Pode eliminar completamente as tensões residuais	Não aplicável para grandes estruturas e difícil de ser executado no campo. Custo muito elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200 C em uma largura total de 60 a 130 mm.	Adequado para grandes estruturas	O alívio de tensões é reduzido.

2.2 Aplicação do Ultra-Som para Caracterização de Materiais e Detecção de Defeitos.

A técnica ultra-sônica baseia-se na emissão de sons de elevada freqüência na superfície que se deseja avaliar. O som provoca a vibração mecânica do material constituinte dos componentes de acordo com a sua geometria, massa e material e, naturalmente em função da freqüência e amplitude da excitação provocada.

A excitação da peça é originada por equipamentos portáteis de fácil manuseio, através da produção interna de uma vibração mecânica que é, posteriormente, transmitida à peça através de um transdutor.

Através de um outro transdutor ou do mesmo são recebidas as ondas emitidas pelo transdutor de excitação. Este transdutor é designado de receptor e está, na maioria dos equipamentos, instalado no mesmo componente que aloja o transdutor de excitação. Neste caso são designados transdutores duplo cristal ou SE. Estes tipos de transdutores são mais indicados para detecção de defeitos, porém existem outros tipos sob a forma de transdutores separados, que são mais utilizados para outras aplicações.

As ondas são distorcidas se existirem vazios de material (fissuras, ocos, poros, etc.) porque a velocidade do som através do ar (que existe nestes vazios) é menor. Os ecos recebidos assinalam todas as arestas, faces, furações e demais acidentes de contorno e de interface existentes na peça a avaliar.

Também no método ultra-sônico é necessário existir um padrão (um corpo equivalente e representativo do que avaliar) para se comparar à resposta deste isento de defeitos com a obtida em um com anomalias. Uma vez mais a competência e experiência dos executantes e intérpretes são fundamentais para a correta distinção entre anomalias inócuas e verdadeiros defeitos.

Para uma correta aplicação do método ultra-sônico é necessário minimizar os efeitos decorrentes da interface que surgem devido o acoplamento dos transdutores com a superfície da peça a ser avaliada. Para aumentar à eficácia é necessário aplicar um gel em toda a zona de

contato, para minimizar a diferença de impedâncias acústicas entre as superficies de contato dos componentes e aumentar a transmissão das ondas sonoras para a peça que será avaliada. Esse gel pode ser pouco ou muito denso, dependendo do tipo de onda.

Com este método, através de uma calibração adequada dos padrões utilizados, é possível obter informações das dimensões dos defeitos e a profundidade que se encontram. Com o auxílio de um sistema de coordenadas e em função da orientação do componente em relação aos transdutores é possível localizar o defeito no interior da peça.

O método ultra-sônico é muito utilizado em grande escala e em série, sobretudo para a avaliação de componentes semelhantes através da utilização comum dos mesmos padrões. Além da detecção de defeitos, este método também é usado para medir espessuras de peças e, como será visto na próxima seção, para determinação de tensões.

Como todo ensaio não-destrutivo, o ensaio ultra-sônico possui limitações e vantagens como segue:

➢ ***Vantagens em relação a outros ensaios:***

- No caso da interpretação das indicações de defeitos, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção.

- Em relação aos ensaios por radiações penetrantes (Raios X), o ensaio através do método ultra-sônico não requer plano especial de segurança ou qualquer outro tipo de acessórios para sua aplicação.

- A avaliação do tamanho, a localização e a interpretação das descontinuidades que são encontradas num teste ultra-sônico são fatores facilmente mensuráveis neste tipo de teste. Estes não podem ser avaliados com outros exames, pois não medem tais variáveis. Por exemplo, num ensaio por filme radiográfico o defeito mostrado define o tamanho, mas não sua profundidade, e este é um fator importante para proceder um reparo.

- No caso de ensaio por Raios-X necessita-se de um processo para revelação do filme. Isso acaba ocasionando tempo adicional para avaliação dos resultados.

- Trincas devido a fissuras, tratamento térmico e outros, de difícil detecção por ensaio de radiações penetrantes (radiografia ou gamagrafia), podem ser avaliadas por ultra-som.

➢ ***Limitações em relação a outros ensaios.***

- Faixas de pequenas espessuras constituem uma dificuldade para aplicação do método.

- Necessita-se do preparo da superfície para sua aplicação. Em casos de inspeção de solda, por exemplo, existe a necessidade da remoção total do reforço da solda, o que demanda tempo de preparação.

- Requer experiência e conhecimento teórico por parte do inspetor que executará o ensaio.

Apesar do que foi exposto anteriormente, nenhum ensaio não destrutivo deve ser considerado o mais completo ou o mais sensível. As vantagens e limitações fazem com que a aplicação de cada ensaio seja objeto de estudo e análise da viabilidade caso a caso, em conjunto com as Normas e Códigos de fabricação.

2.2.1 Técnicas de Inspeção.

- **Técnica de impulso-eco ou pulso-eco.**

Esta é uma técnica onde apenas um transdutor é o responsável por transmitir e receber as ondas ultra-sônicas que se propagam no material que esta sendo testado. O transdutor é acoplado em um dos lados do material, podendo ser obtida a profundidade de uma possível descontinuidade, suas dimensões e localização na peça.

O processo "impulso eco" é o ensaio por ultra-som mais utilizado para detecção de defeitos e é amplamente utilizado no ensaio de chapas, barras e superfícies paralelas. Este processo também pode ser chamado de "Reflexão do impulso", pois aproveita a porção refletida do som para avaliar as descontinuidades.

Para um melhor entendimento, um exemplo é apresentado na figura 2.16. Esta figura mostra um transdutor ultra-sônico acoplado numa peça com espessura de 8 mm. Ao lado, um gráfico simbolizando a tela do aparelho mostrando o eco "E2" , proveniente da espessura da peça.

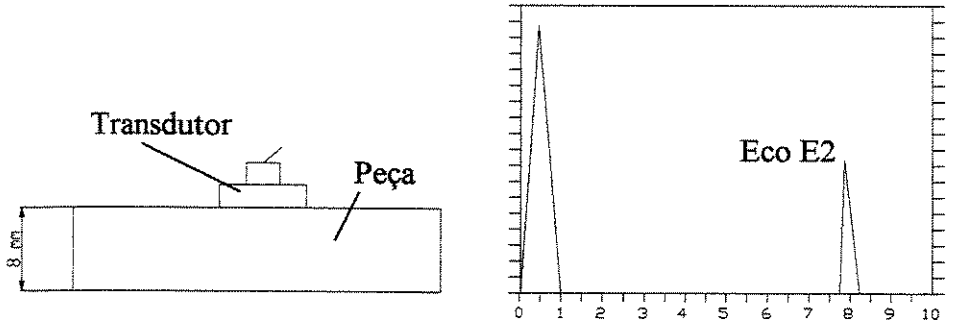


Figura 2.16: Técnica impulso-eco (Andreucci, 2002)

Na figura destaca-se que:

- O cristal piezelétrico do transdutor transmite à peça uma onda ultra-sônica perpendicularmente à superfície que percorre a espessura total de 8 mm do metal;

- A onda incide na interface no fundo da peça, retorna ao cristal e este produz um sinal elétrico que será amplificado e registrado na tela do aparelho na forma do pulso ou eco, identificado na figura como "E2";

- O caminho do som percorreu a espessura de 8 mm de ida e mais 8 mm na volta – isto sempre ocorre na inspeção por ultra-som. Os circuitos do aparelho compensam este fenômeno dividindo por 2 os registros na tela.

Assim, o eco na tela do aparelho representa o caminho percorrido pelo som, em apenas uma vez a espessura, denominado de "Eco de Fundo", que no caso da figura foi de 8 mm.

É importante mencionar que o som que percorre a espessura do metal se reflete nas interfaces formadas pela fundo da peça e a superfície da peça, de forma contínua, isto é, o ultra-som emitido pelo cristal do transdutor realiza no interior da peça um movimento de zig-zag de ida e volta , se refletindo no fundo da peça e superfície, continuamente.

Para cada incidência do ultra-som na superfície oposta de acoplamento do cristal, um sinal será transmitido ao aparelho e um eco correspondente a este sinal será visualizado na tela. Portanto, será possível observar vários ecos de reflexão de fundo correspondente à mesma espessura.

- **Técnica de transparência.**

Esta técnica utiliza dois transdutores independentes e separados, um servindo como transmissor e outro como receptor das ondas ultra-sônicas. Para esta técnica é necessário colocar os transdutores em lados opostos da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados (figura 2.17). Este é um tipo de inspeção que não permite determinar a posição em que se encontra a descontinuidade, localização na peça ou sua extensão. É somente um ensaio do tipo passa-não passa, ou seja, apenas determina se existe ou não algum defeito na peça a ser ensaiada. Existem várias aplicações para esse tipo de técnica como, por exemplo, na detecção de descontinuidades em chapas, barras, juntas soldadas, etc. O principal intuito deste tipo de ensaios é estabelecer um critério comparativo de avaliação do sinal recebido, ou seja, da posição do eco na tela. A magnitude do sinal recebido por esta técnica varia em função do tamanho e quantidade das descontinuidades que estão presentes no percurso das vibrações ultra-sônicas. Deste modo, o inspetor não tem informações suficientes para saber as características das indicações, todavia consegue fazer uma comparação do eco da peça analisada com uma peça sem descontinuidades, podendo aplicar os critérios de aceitação do material fabricado, antes que este seja colocado em serviço. Algumas aplicações deste método podem ser, por exemplo, chapas fabricadas em usinas siderurgicas, barras forjadas ou fundidas e em soldas.

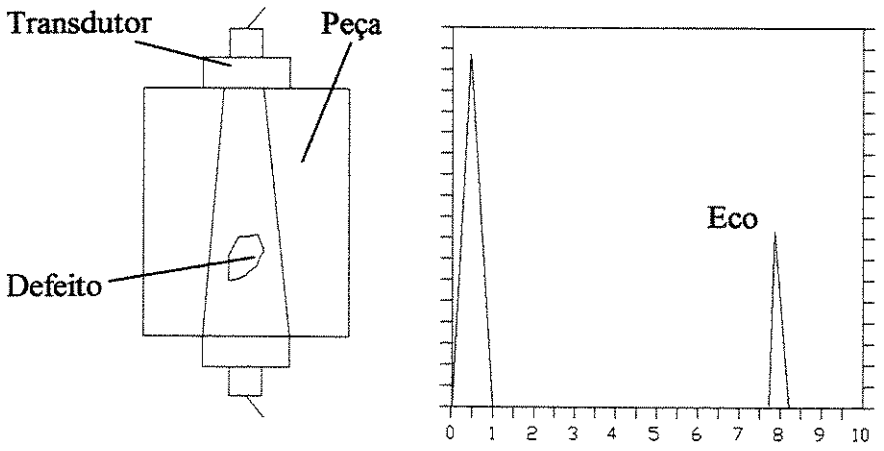


Figura 2.17: Técnica de transparência (Andreucci, 2002).

2.3 Aplicação do Ultra-Som para Avaliação de Tensões.

A teoria ordinária da elasticidade é limitada para deformações infinitesimais de sólidos elásticos perfeitos, ou seja, para sólidos onde as deformações são funções somente da tensão e temperatura. Para muitos casos e materiais esta teoria é adequada e pode ser aplicada sem maiores problemas. Entretanto, muitos sólidos ordinários não são adequadamente descritos por ela. Existem duas causas principais que podem explicar a não aplicabilidade da teoria ordinária da elasticidade. Primeiro, o sólido pode ser anelástico ou plástico. Segundo, as deformações podem ser tão grandes que a teoria infinitesimal não é precisa.

Muitas tentativas foram feitas para desenvolver a teoria de deformações finitas. Brillouin, em 1925, formulou a teoria elástica em uma notação tensorial e derivou algumas das equações fundamentais para deformações finitas. Mais tarde, ele estendeu seu trabalho e deu uma formulação completa da teoria básica. Murnaghan, em 1937, desenvolveu a teoria em uma notação tensorial geral. Biot, em 1940, desenvolveu a teoria particularmente para a elasticidade de sólidos pré-tracionados e considerou o efeito das tensões sobre a propagação de ondas. Cauchy, em1948, derivou algumas equações fundamentais. Murnaghan, em 1951, reescreveu seu trabalho de 1937 em uma notação matricial.

Um fato que deve ser ressaltado em relação a teoria das deformações finitas diz respeito a não aplicabilidade de duas características da teoria infinitesimal. Primeiro, como as deformações são grandes, as coordenadas finais não são intercambiáveis com as coordenadas originais, como na teoria infinitesimal. Segundo, as expressões de energia de deformação devem ser revisadas. Desde que as coordenadas não são intercambiáveis, ambas devem ser consideradas como variáveis independentes. As coordenadas iniciais são chamadas de "coordenadas lagrangeanas" e as coordenadas finais são chamadas de "coordenadas Eulerianas". A formulação em ambos os sistemas foi desenvolvida por Murnaghan (1937) e Brillouin (1925). Mais tarde, Murnaghan (1951) usou exclusivamente sistemas lagrangeanos.

Baseados nesses estudos, Hughes e Kelly desenvolveram a teoria acustoelástica, em 1953. Eles descreveram a mudança nas velocidades ultra-sônicas como uma função da deformação elástica para sólidos isotrópicos. Derivando estas funções, obtiveram a relação entre as tensões e a velocidade das ondas, medidas pelo tempo de percurso, utilizando as propriedades do material.

Em estudos recentes autores, como os de Thompson, Lu e Clarck (1996) e Schneider (1997), descrevem diversos métodos ultra-sônicos para medir tensão residual. Medidas de tensão com ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}), também chamadas de "skimming waves", foram discutidas por Bray e Stanley, em 1997. Tensões residuais nunca são medidas diretamente, mas indiretamente através da deformação induzida. Métodos não destrutivos são baseados na relação entre parâmetros fisicos ou cristalográficos com a tensão residual. Técnicas ultra-sônicas baseiam-se na variação da diferença do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas, que podem ser relacionadas com o estado de tensão através de constantes elásticas de terceira ordem do material. Estas constantes devem ser utilizadas, pois a energia de deformação expressa em termos de deformação deve incluir ordens acima da segunda, em vez de usar apenas termos lineares.

2.3.1 Teoria Acustoelástica.

Para determinação de tensões residuais do tipo macroscópico, que são encontradas em processos de manufatura, a teoria da elasticidade não pode ser aplicada como visto na seção anterior. Deste modo, deve ser usada a teoria das deformações finitas. É necessário definir

diferentes estados que o material terá antes de alcançar o estado final. Estes estados são chamados de: estado natural, estado inicial e estado final (figura 2.18).

O estado natural do corpo refere-se ao estado inicial livre de tensões e deformações, e é definido por ξ na figura 2.18. O estado inicial (X) refere-se ao corpo que foi deformado ou está sobre a ação de alguma carga aplicada. O estado final do corpo (x) ocorre quando o movimento da onda ou deformações elásticas são superpostas sobre o corpo no inicio ou no estado previamente deformado.

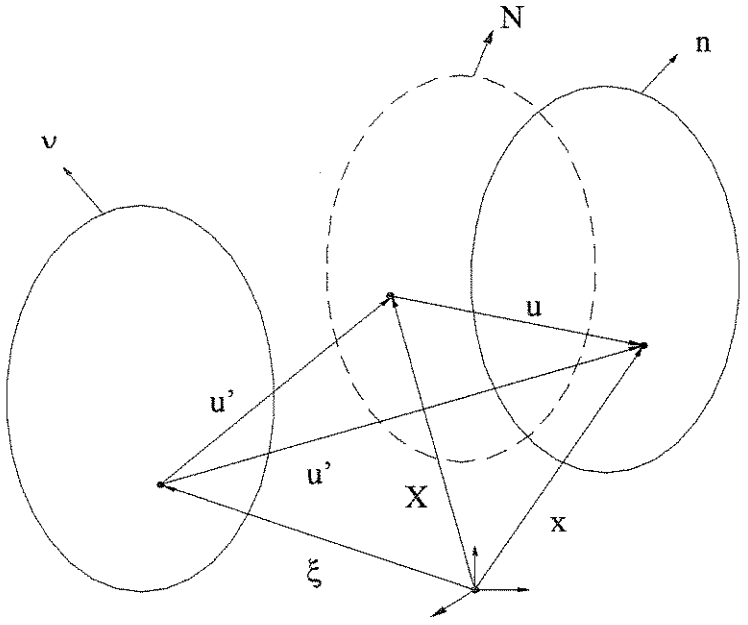


Figura 2.18: Coordenadas para um material no estado natural, inicial e final (Leon-Salamanca, 1988).

A figura 2.19 mostra elementos de uma barra sobre tensão e ondas que se propagam em três direções perpendiculares. O primeiro índice na velocidade representa a direção de propagação da onda e o segundo representa a direção do movimento das partículas. Na figura 2.19 (a) as ondas se propagam paralelas à carga; V_{11} representa a velocidade das partículas na mesma direção (ondas longitudinais) e as velocidades V_{12} e V_{13} representam polarização em planos perpendiculares à estes (ondas cisalhantes). Nas figuras 2.19 (b) e 2.19 (c) as ondas propagam-se em outras direções e as velocidades são também mostradas. A sensibilidade destas ondas com

relação à deformação é mostrada na figura 2.20 para aço de trilhos (Egle e Bray, 1976). A variação mais significativa do tempo de percurso com a deformação foi encontrada para ondas longitudinais propagando-se na direção da carga, seguida pelas ondas cisalhantes quando as partículas vibram na direção da carga e se propagam perpendicularmente a esta. As outras ondas não mostram sensibilidades significativas a deformação.

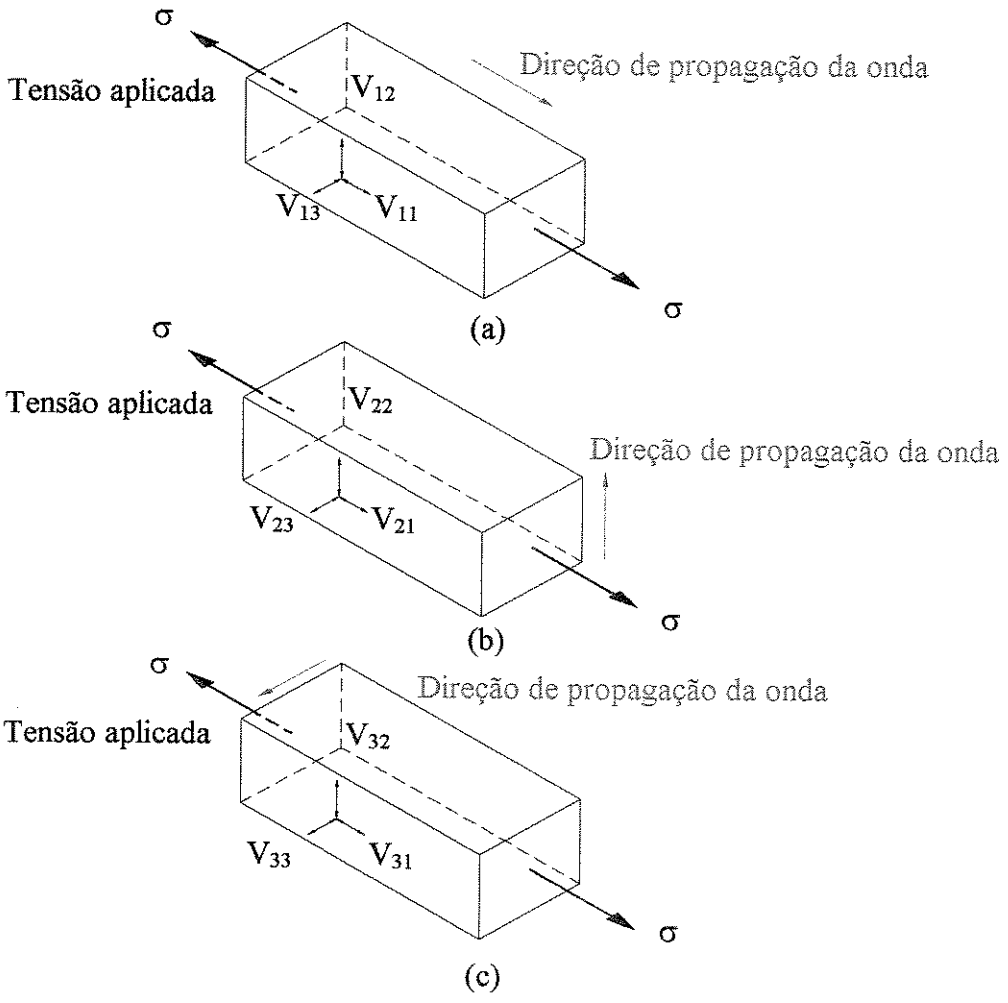


Figura 2.19: Velocidade de ondas planas e campo de tensões para um sistema de coordenadas ortogonais (Bray e Stanley, 1997).

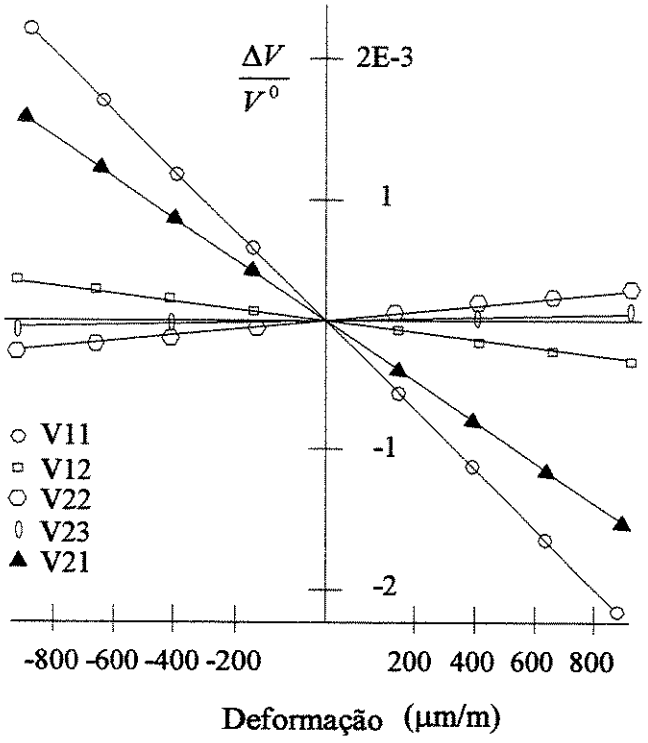


Figura 2.20: Mudanças relativas das velocidades das ondas em relação a deformação para aço de trilhos (Egle e Bray,1976).

As velocidades das ondas planas viajando paralelas a carga podem ser descritas pela deformação (α) dada pelas seguintes equações (Bray e Stanley, 1997):

$$\rho_0 . V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \tag{2.8}$$

$$\rho_0 . V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu.\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \tag{2.9}$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu.\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \tag{2.10}$$

Para um estado uniaxial de tensões, $\alpha_1 = \varepsilon$, $\alpha_2 = \alpha_3 = \eta\varepsilon$ onde ε é a deformação na direção 1 e η é o coeficiente de Poisson. Usando estas relações na equação 2.8, determina-se a equação 2.11, e usando nas equações 2.9 e 2.10, determina-se a equação 2.12, mostradas a seguir.

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \nu\mu\left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right)\right]\varepsilon \tag{2.11}$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \rho_0 V_{13}^2 = \mu + \left[4\mu + \nu\left(\frac{n}{2}\right) + m(1 - 2\nu)\right]\varepsilon \tag{2.12}$$

A velocidade das ondas planas viajando perpendicularmente ao estado de tensão uniaxial também pode ser determinada pelas equações 2.8, 2.9 e 2.10 e podem ser expressas por:

$$\rho_0 V_{22}^2 = \lambda + 2\mu + [2l(1 - 2\nu) - 4\nu(m + \lambda + 2\mu)]\varepsilon \tag{2.13}$$

$$\rho_0 V_{21}^2 = \rho_0 V_{31}^2 = \mu + \left[(\lambda + 2\mu + m)(1 - 2\nu) + \frac{n\nu}{2}\right]\varepsilon \tag{2.14}$$

$$\rho_0 V_{23}^2 = \rho_0 V_{32}^2 = \mu + \left[(\lambda + m)(1 - 2\nu) - 6\nu\mu - \frac{n}{2}\right]\varepsilon \tag{2.15}$$

A sensibilidade relativa para ondas longitudinais é a variação da velocidade com a deformação e pode ser calculada derivando-se a equação 2.11 e dividindo a derivada pela

equação original, conforme a equação 2.16. Para as demais ondas, as equações 2.17 a 2.20 mostram a sensibilidade.

$$\frac{dV_{11}/V_{11}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\mu + 2m + \nu\mu(1 + 2l/\lambda)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \tag{2.16}$$

$$\frac{dV_{12}/V_{12}^{0}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{\nu n}{4\mu} + \frac{m}{2(\lambda + \mu)} = L_{12} \tag{2.17}$$

$$\frac{dV_{22}/V_{22}^{0}}{d\varepsilon} = -2\nu\left[1 + \frac{m - \mu l/\lambda}{\lambda + 2\mu}\right] = L_{22} \tag{2.18}$$

$$\frac{dV_{21}/V_{21}^{0}}{d\varepsilon} = \frac{\lambda + 2\mu + m}{2(\lambda + \mu)} + \frac{\nu n}{4\mu} = L_{21} \tag{2.19}$$

$$\frac{dV_{23}/V_{23}^{0}}{d\varepsilon} = \frac{m - 2\lambda}{2(\lambda + \mu)} - \frac{n}{4\mu} = L_{23} \tag{2.20}$$

Na equação 2.16, L_{11} é a constante (ou coeficiente) acustoelástica para ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}). O superescrito 0 indica velocidades das ondas para deformações axiais nulas.

Valores experimentais para coeficientes acustoelásticos para várias ondas e materiais são dados na tabela 2.3. A variação da velocidade V_{11}, controlada pelo coeficiente L_{11} é muito maior do que as outras, indicando que estas ondas são melhores candidatas para serem usadas na avaliação de tensões.

Tabela 2.3: Constantes acustoelásticas para ondas longitudinais e transversais (Bray e Stanley, 1997).

Material	Carga	L_{21}	L_{23}	L_{22}	L_{11}	L_{12}
Alumínio (Becker, 1973)	*Compressão*	*-2,0*	*+0,6*			
Alumínio (Tanala, et al, 1995)	*Tração*		*+0,46*	*+0,68*	*-2,7*	
Aço fundido dúctil.						
Sem tratamento	*Compressão*				*-2,15*	
Recozido	*Compressão*				*-3,89*	
Normalizado	*Compressão*				*-3,92*	
Temperado	*Compressão*				*-2,98*	
Aço de trilho de ferrovias (1080). (Eagle e Bray, 1976)	*Tensão*	*-1,5*	*+0,09*	*+0,27*	*-2,38*	*-0,15*
	Compressão				*-2,45*	*-0,15*
Aço 4140 (Tang e Bray, 1996)	*Tensão (2,25 MHz)*				*-2,2*	
	Tensão (5 MHz)				*-2,36*	
Aço inoxidável 316 L (Tanala, et al, 1995)	*Tensão*	*-1,5*	*-1,2*	*~0*	*-2,1*	
Acrílico (Shaikh,1992)	*Tensão*				*-2,14*	

Tensões unidimensionais podem ser calculadas pela aplicação da relação tensão deformação em sólidos elásticos. A equação 2.16 pode ser rearranjada para dar a variação de tensão em termos do tempo de percurso (dt/to) como mostrado na equação 2.21, onde t_0 é o tempo de percurso que a onda leva para atravessar um trajeto livre de tensões do material que esta sendo investigado.

$$d\sigma = \frac{E(dV_{11}/V_{11})}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}.t_o}dt \qquad (2.21)$$

A mesma equação pode ser usada para outras direções ou ondas, apenas notando que o valor de L é outro.

2.3.2 Características das Ondas L_{cr}.

Como foi dito em seções anteriores, as técnicas ultra-sônicas eram inicialmente utilizadas apenas para a detecção de defeitos. A maioria dos cristais piezelétricos dos transdutores direcionavam seus feixes perpendicularmente a superfície das peças. Porém esta técnica não era sempre adequada, pois havia defeitos que não eram facilmente detectáveis por localizarem-se em pontos de difícil acesso dos transdutores. Para sanar estas limitações, algumas técnicas para posicionamento do ângulo do feixe ultra-sônico em posições obliquas foram investigadas. A técnica de geração de ondas longitudinais criticamente refratadas "L_{cr}" é um caso especial de inspeção de posicionamento do ângulo do feixe. Estas ondas, para serem geradas, devem ser introduzidas no material com um ângulo de incidência ligeiramente maior do que o ângulo criticamente refratado (primeiro ângulo critico).

O primeiro ângulo crítico é calculado através da lei de Snell (equação 2.22). Para este ângulo, é necessário que o ângulo θ_2, mostrado na figura 2.21, seja igual a 90°. Para isso, deve-se aumentar o ângulo de incidência θ_1 até que o ângulo de refração θ_2 aproxime-se da interface, acabando por coincidir com ela.

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{velocidade \cdot meio_1} = \frac{\operatorname{sen}\theta_2}{velocidade \cdot meio_2} \qquad (2.22)$$

Observando a figura 2.21, uma onda longitudinal (representada pelo raio XY), incidindo obliquamente no plano de separação (ou interface) entre o meio "1" e o meio "2", segundo a direção XY, é refletida e refratada segundo as direções YW e YZ respectivamente (ondas longitudinais). A incidência obliqua da onda XY da origem ainda a duas outras ondas de tipos diferentes, que se propagam segundo as direções YW' e YZ', e que são ondas transversais. Este fenômeno ocorre, então, nas bordas ou interfaces dos dois meios. θ_1 indica o ângulo de incidência e θ_2 o ângulo de refração.

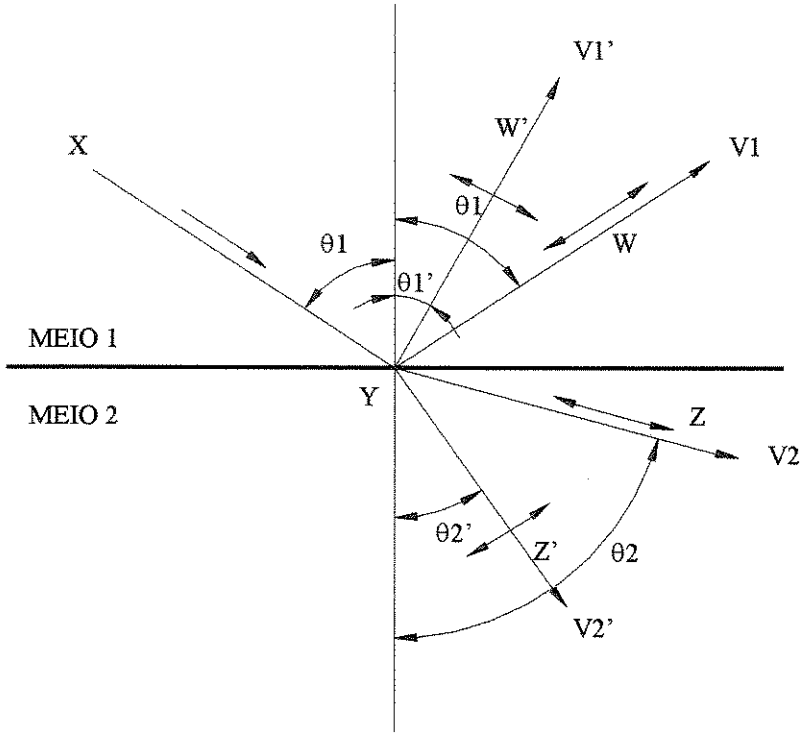


Figura 2.21: Esquema representativo dos ângulos e direções de ondas causadas pela incidência de um feixe obliquo (Matarezi, 2001).

Para a determinação do ângulo crítico, basta substituir na fórmula 2.22 os valores das velocidades de cada material. A tabela 2.4 mostra os valores nominais destas velocidades com os respectivos ângulos críticos para o aço e o alumínio. E a figura 2.22 mostra o desenho representativo para o caso acrílico/aço.

Tabela 2.4: Valores de velocidades e ângulos críticos para inspeção acrílico/aço e acrílico/alumínio.

Material	*Acrílico*	*Aço*	*Alumínio*
Velocidade (m/s)	*2730*	*5900*	*6300*
Ângulo critico (acrílico/aço)		**Ângulo critico (acrílico/alumínio)**	
27,56°		*25,67°*	

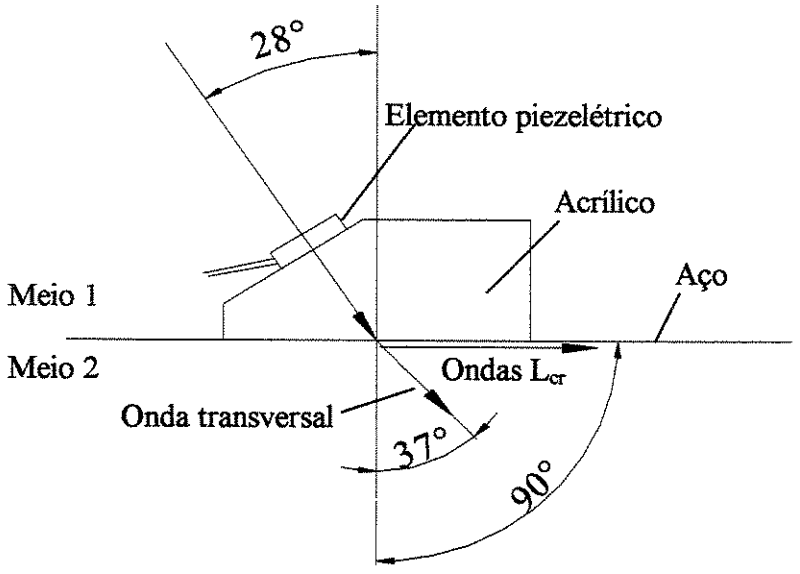


Figura 2.22: Desenho esquemático do transdutor para inspeção através de ondas longitudinais criticamente refratadas (acrílico/aço).

Existem duas classificações propostas para ondas excitadas no modo criticamente refratado. Uma chamada de ondas superficiais longitudinais "creeping" e a outra, vista anteriormente, chamada de ondas longitudinais subsuperficiais (L_{cr}). As ondas "creeping" podem ser caracterizadas como ondas que decaem rapidamente nos primeiros centímetros após ter deixado o transdutor, diferentemente das ondas L_{cr}, que percorrem longas distâncias, acima de 300 mm, e também têm como característica uma amplitude de elevada magnitude. Os lóbulos laterais da forma do feixe sônico para ondas L_{cr} são muito mais fortes que das ondas "creeping". O que indica que as ondas L_{cr} são mais indicadas para a medição de tensão utilizando a teoria acustoelástica, por não serem puramente ondas longitudinais polarizadas.

O perfil do feixe da onda longitudinal criticamente refratada (L_{cr}) pode ser visto na figura 2.23. Através deste perfil, pode-se observar que a onda L_{cr} esta sendo gerada na superfície da placa de aço. Esta energia está dentro do lóbulo principal do sinal refratado. A máxima energia do lóbulo principal esta em um ângulo de refração de 84 °; existe um lóbulo forte para 67° , mas este é apenas um lóbulo lateral. Desde que a forma do lóbulo é afetada pela freqüência, existem razões para acreditar que os gradientes de tensão ao longo da espessura possam ser medidos (Bray e Tang, 1997). Uma outra importante característica desta onda é que, em comparação com

a onda cisalhante ela é mais sensível a tensão. Em contrapartida, estas ondas são menos sensíveis à mudanças localizadas da textura do material, o que é uma vantagem adicional.

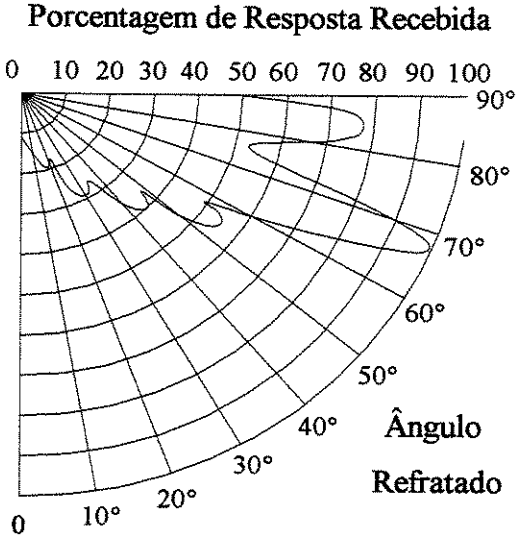


Figura 2.23: Perfil de radiação da onda "L_{cr}" (Bray e Stanley, 1997).

2.3.3 Birefringência.

Birefringência é o termo utilizado para expressar a diferença de velocidades entre duas ondas cisalhantes polarizadas ortogonalmente que se propagam ao longo do material. O valor da birefringência pode ser expresso por (Okada, 1980):

$$B = 2.\frac{(V_\theta - V_r)}{(V_\theta + V_r)} = -2.\frac{(t_\theta - t_r)}{(t_\theta + t_r)} \tag{2.23}$$

Onde V_θ e V_r são as velocidades das ondas nas direções perpendiculares e t_θ e t_r são os tempos de percurso. A diferença entre as tensões está relacionada a birefringência segundo a equação:

$$B = B_0 + C_A(\sigma_\theta - \sigma_r) \tag{2.24}$$

Onde B_0 é a birefringência para o estado livre de tensões e C_A é a constante acustoelástica que relaciona as variações de tensão com a birefringência. Esses valores dependem do tipo de material e da textura interna e podem depender de fatores ambientais também. A partir da Equação 2.24 é possível relacionar os tempos de percurso com as diferenças de tensão. Certamente o maior problema envolvido na determinação dessas tensões é que a sensibilidade acústica, medida pelo coeficiente C_A, é baixa em aços. Por isso a variação do tempo de percurso é da ordem de dezenas de nanosegundos, dificultando sua determinação.

2.3.4 Estudos Relativos à Determinação de Tensão.

A determinação não destrutiva das propriedades dos materiais está se tornando cada vez mais importante no projeto e nas considerações da avaliação da vida de componentes e sistemas. Tensões residuais, dureza e tamanho da falha, devem ser levados em consideração em decisões sobre a necessidade de reparar ou substituir itens encontrados em serviço. Tensões residuais e dureza são de preocupação não só em componentes novos, mas também em componentes antigos, nos quais o meio ambiente e o tempo induzem à mudanças de propriedades, que precisam ser monitoradas. Além disso, a isotropia e a homogeneidade devem ser de interesse na escolha do material para construção de componentes críticos. Progressos estão sendo feitos no desenvolvimento de técnicas não destrutivas para determinação dessas propriedades. Técnicas não destrutivas capazes de investigar condições de materiais anormais não só permitiriam ao engenheiro otimizar o projeto, mas também otimizar o ciclo de manutenção. Muitos autores discutem possibilidades e meios de aplicar métodos ultra-sônicos para medidas de tensão, estudos de textura, determinação do tamanho de grão e inspeção de materiais de múltiplas camadas para defeitos de interface. Discutem também soluções para os mais variados tipos de problemas experimentais, metodologias analíticas, modelos matemáticos computadorizados, entre outros.

Moffat, em 1951 (em Chance,2000), na sua tese de mestrado, mostrou o fenômeno de relaxação de tensões em estruturas soldadas. Em suas investigações, o autor mostrou que as tensões residuais diminuíam de valor após a permanência das peças na temperatura ambiente. Moffat não utilizou ondas ultra-sônicas, mas extensômetros. No entanto, seu trabalho é relevante para o estudo da relaxação de tensões, discutido neste trabalho de mestrado.

Hughes & Kelly, em 1953, desenvolveram expressões para velocidades de ondas elásticas em materiais tracionados a partir da teoria de Murnaghan das deformações finitas, utilizando termos de terceira ordem da equação de energia. Os autores mostram que, para materiais isotrópicos além das constantes de Lamé, λ e μ, três constantes adicionais l, m e n, chamadas de constantes de Murnaghan, são necessárias para descrever o material. Hughes & Kelly determinaram as velocidades das ondas longitudinais e transversais como função da tensão aplicada medindo o tempo de transmissão de pulsos elásticos através do material. Em seus experimentos, os autores sujeitaram o material à pressão hidrostática como compressão simples. Através das medidas experimentais e das sete funções contendo as três constantes l, m e n puderam calcular seus valores numéricos. Os autores usaram três tipos de materiais, o polistireno, o ferro e o vidro.

Em 1958, Bergman, Shahbender, Benson e Raelson mostraram que a velocidade de ondas cisalhantes polarizadas em dois eixos perpendiculares variava de forma diferente com a tensão. Em seus experimentos, os autores utilizaram amostras metálicas que foram tracionadas. Desta forma, observaram que houve uma variação mais significativa na sensibilidade da onda polarizada na direção da tração, e que a sensibilidade na direção perpendicular a esta não foi tão significativa. Os autores concluíram, após vários testes, que a principal causa desta diferença de tensão estava relacionada diretamente à tensão aplicada, já que outros efeitos estariam incluídos em ambos os termos. Bergman, Shahbender, Benson e Raelson deram o nome de birefringência para esta característica especial de ondas acústicas.

Egle e Bray, em 1976, obtiveram experimentalmente a variação das velocidades das ondas ultra-sônicas devido à mudança de tensão induzida em aços usados em trilhos de ferrovias. Os autores estudaram cinco possibilidades para as ondas que relacionavam mudanças de velocidades de ondas para o estado uniaxial de tensão. Dentro dos limites de precisão das medidas, os autores confirmaram a predição da teoria da segunda ordem de Hughes e Kelly. Através da determinação das velocidades e dos dados acustoelásticos, Egle e Bray calcularam as constantes elásticas de terceira ordem dos materias testados.

Para as medidas experimentais, três tipos corpos de prova foram utilizados. Estes foram retirados de trilhos e usinados. Foram a seguir tracionados em uma máquina de tração convencional. Em cada material testado, as mudanças de velocidades das ondas propagando-se perpendicularmente ao eixo de tensão foram medidas com transdutores ultra-sônicos comerciais com freqüências entre 2,5 e 5 Mhz. Estes foram acoplados diretamente ao material em um dos dois lados. Para o caso das ondas propagando-se paralelamente ao eixo de tensão, foi montado um arranjo especial onde os transdutores longitudinais, transmissores e receptores, foram colocados em cunhas de acrílico, com inclinação de 28 ° do transdutor em relação a normal do eixo de tensão para gerar ondas longitudinais e 55 ° para gerar ondas transversais. O transdutor longitudinal utilizado para a transmissão possui uma placa de quartzo de 25,4 mm^2 e uma espessura de 1,27 mm; sua freqüência de ressonância é de 1,61 MHZ. Para a recepção foi usado um transdutor comercial de 5 MHZ.

Egle e Bray, através das medidas experimentais, traçaram um gráfico (figura 2.20) onde mostram as mudanças relativas das velocidades das ondas como função da deformação axial para os cinco tipos de ondas. Através deste gráfico, observaram-se que a maior mudança relativa da velocidade da onda está associada com as ondas longitudinais propagando paralelamente à carga aplicada, e que a menor mudança relativa esta associada com as ondas cisalhantes propagando-se perpendicularmente à carga e polarizadas perpendicularmente ao eixo de tensão. Este fato já havia sido comentado por Bergman, em 1958.

Basatskaya e Ermolov, em 1979, desenvolveram uma formulação para determinação da amplitude das ondas subsuperficiais em meios sólidos. Para seus estudos, os autores utilizaram como referência uma transdutor montado em uma peça de acrílico que faz um ângulo com a interface de separação entre dois meios. Este ângulo é determinado através da lei de Snell e equivale ao primeiro ângulo crítico, ou seja, para ondas longitudinais criticamente refratadas. Através das formulações, os autores determinaram alguns tipos de diagramas de radiação das ondas. As amplitudes das ondas sub-superficiais foram calculadas para vários tipos de ângulos, freqüências e vários diâmetros da placa piezocerâmica do transdutor.

A fim de avaliar a influência dos ângulos na potência sônica irradiada, os autores utilizaram três valores de ângulo: um ângulo de 27°16', que equivale ao primeiro ângulo critico calculado pela lei de Snell, um ângulo de 25° e um de 30°. Para todas as análises, a freqüência natural do transdutor foi de 1.8 Mhz e o diâmetro deste igual a 18 mm. Os autores observaram, através do diagrama de radiação para um ângulo igual ao primeiro angulo crítico, uma grande concentração de energia da onda subsuperficial perto da interface. A amplitude máxima do lóbulo principal estava situada num ângulo de 72°. Pôde-se notar, através do diagrama de radiação apresentado no trabalho, que a amplitude localizada na superfície é 20 dB menor do que amplitude máxima. Este fato confirma que uma onda subsuperficial longitudinal não é muito sensível a defeitos superficiais. As experiências com os demais valores de ângulos mostraram que a máxima potência irradiada ocorre com o ângulo crítico e que, neste ângulo, a onda caminha abaixo da superfície.

Em 1979, Egle e Bray desenvolveram um transdutor ultra-sônico que foi capaz de avaliar mudanças de tensão longitudinal em trilhos de ferrovias. O trabalho baseia-se no efeito da tensão aplicada sobre a velocidade da onda, efeito acustoelástico, como visto em sua publicação anterior. Este sensor foi utilizado e testado tanto em condições laboratoriais como também em condições de campo. Através de vários testes, os autores verificaram que o transdutor foi capaz de medir mudanças de tensão com uma precisão de 6,9 MPa/m^2. Egle e Bray verificaram que a temperatura causa uma mudança na velocidade da onda. Como o tempo de percurso é medido através do diferencial ao longo do trilho com a medida de tensão para um estado livre, utilizaram dois transdutores. Esta técnica promove um meio de cancelar os efeitos indesejáveis da temperatura.

Em mais uma de suas publicações sobre trilhos de ferrovias, Egle e Bray, em 1981, investigaram experimentalmente as velocidades das ondas longitudinais e transversais propagando-se em direções diferentes em camadas forjadas e camadas vizinhas, indicando que grandes mudanças de velocidades podem ocorrer como resultado do trabalho a frio do material. Os autores determinaram vários padrões de velocidades e compararam estes com os encontrados para varias texturas ideais já conhecidas e investigadas de aços laminados. Os resultados

encontrados concordaram com a maioria das orientações já conhecidas, validando deste modo os experimentos.

Bray e Salamanca, em 1985, dando continuidade aos trabalhos das publicações de Egle e Bray nos anos anteriores, apresentaram resultados para trilhos de ferrovias. Os autores utilizaram ondas ultra-sônicas denominadas de "Head-Waves" (ondas de topo), para a determinação da magnitude da tensão superficial existente no material. Diferentemente do arranjo dos transdutores que foram utilizados em publicações iniciais, neste experimento Bray e Salamanca utilizam um transdutor atuando como transmissor e dois transdutores atuando como receptores. Os três transdutores estão rigidamente fixos a uma barra de ferro e possuem uma angulação de 28 graus em relação à normal do eixo de tensão. Cada placa piezoelétrica possui 25,4 mm^2 e a freqüência de ressonância é de aproximadamente 2,0 MHz. Para validar a instrumentação utilizada e verificar a eficácia do arranjo dos transdutores, os autores utilizaram seis amostras de trilhos. Cada amostra possuía aproximadamente 1 metro de comprimento e foram selecionadas de uma população de 40 trilhos. Os resultados se mostraram satisfatórios e os autores verificaram uma variação do desvio padrão de 3 ns para três amostras e de 4 ns para as amostras restantes. Bray e Salamanca também investigaram o efeito da temperatura no tempo de percurso e verificaram que, na faixa em torno de 4 °C à 24 °C , o valor obtido foi de 3,3 ns/°C para todos os trilhos.

Clark, Moulder, Mignogna e Delsanto, em 1987, utilizaram técnicas ultra-sônicas para determinar tensões absolutas em ligas de alumínio e aço. O método também foi utilizado para medir tensões aplicadas em corpos de prova com fraturas padrão, e para calcular parâmetros da mecânica da fratura. Nos dois experimentos, tanto para a placa de alumínio como para a placa de aço, o método da birefringência acústica (Bergman, 1958) foi usado para medir a diferença das tensões principais. Os autores dividiram seus experimentos em duas etapas: primeiro realizaram experimentos em placas de alumínio finas soldadas, e depois, os experimentos foram feitos para placas de aço grossas também soldadas. Ambos os casos foram confirmados através de ensaios destrutivos, com os quais obtiveram resultados coerentes fora da zona termicamente afetada. No caso das placas de alumínio, além do método ultra-sônico, também foi utilizado extensômetria para a medida da tensão absoluta. Para as placas de aço grossas, a previsão de tensão na solda foi

feita baseada nas medidas ultra-sônicas em placas de referência. Os autores encontraram uma diferença de 20% da tensão medida quando comparada aos métodos destrutivos.

Salamanca, em sua tese de doutorado, no ano de 1988, investigou as tensões residuais causadas no processo de soldagem de placas de aço. Duas placas de dimensões 762 mm x 508 mm x 19 mm foram utilizadas para análise. Para as medidas das tensões, o autor utilizou ondas do tipo L_{cr}, que foram empregadas nas placas após a soldagem e após o alívio de tensões. Dois tipos de sensores para avaliação de tensão em profundidades diferentes das placas foram utilizados. Para a verificação dos resultados obtidos pelo método L_{cr}, o autor utilizou um método semi-destrutivo chamado "hole drilling", descrito anteriormente. Pôde-se observar que o processo de alívio de tensão causou uma diminuição da tensão, como esperado. O autor também investigou a textura do material por meio da difração de nêutrons. Através da análise metalográfica, observou uma distribuição similar entre a solda e o metal de base. Pode-se concluir, portanto, que o tempo de percurso da onda ultra-sônica através do método L_{cr} não foi influenciada pelo tipo de textura das peças em análise.

Chatellier e Touratier, em 1988, desenvolveram um método de determinação das constantes elásticas e de tensões planas em placas finas. Os autores enfatizaram em sua pesquisa que a textura do material deve ser levada em conta na análise de estruturas cristalinas. Desta forma, termos menores que de terceira ordem devem ser considerados na função da energia de deformação por volume inicial unitário. Esta função pode ser explicada como sendo a quantidade de trabalho armazenada dentro de um elemento de volume unitário quando deformado por uma força aplicada. No método desenvolvido, Chatellier e Touratier determinaram as constantes elásticas de segunda ordem da energia de deformação, sem precisar determinar explicitamente as constantes elásticas de terceira ordem. Para a análise experimental, os autores utilizaram um tipo especial de corpo de prova, que foi usado para simular um estado de tensão plano perfeito com uma carga de tração uniaxial. A textura foi introduzida por laminação a frio e o corpo de prova foi então recozido para eliminar tensões residuais devido ao processo de manufatura. Através dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas de volume polarizadas nas três direções ortogonais, os planos de tensão foram determinados. Para a medição das diferenças de velocidades nos

planos de tensão devido à textura do material, os autores utilizaram ondas transversas polarizadas.

Salamanca e Bray, em 1989, utilizaram as ondas longitudinais criticamente refratadas para verificar a sua eficácia na determinação de tensões. Os autores utilizaram dois métodos em seu trabalho. No primeiro, utilizaram duas placas de aço cujas dimensões e características são as mesmas da tese apresentada pelo primeiro autor. Uma das placas foi laminada a quente, enquanto a outra foi laminada a frio. Para obter o tempo de referência, uma terceira placa foi utilizada. A disposição dos transdutores foi à mesma utilizada por Bray, em 1985, para trilhos de ferrovias. Após os testes, os autores observaram que os valores encontrados são os mesmos para as chapas conformadas a quente e para as chapas conformadas a frio, antes das soldas. Também verificou-se que, após o alívio de tensões, o tempo de percurso próximo a linha de centro da solda mostrou agudo decaimento tanto para as placas conformadas a quente como para as placas conformadas a frio. Para ambas as placas, o tempo de percurso aumentou nas regiões distantes da solda. Porém, verificou-se que este aumento é maior na placa conformada a frio do que na placa conformada a quente.

No segundo método, as ondas longitudinais criticamente refratadas foram utilizadas em anéis retentores para a determinação de tensões. Diferentemente do caso anterior, foi utilizado um cabeçote com um transmissor e um receptor. Os transdutores utilizados, tanto para recepção como para transmissão, são de 2,25 MHz. Como as peças testadas têm um formato circular, houve a necessidade de confeccionar um cabeçote com um formato adequado. As medidas foram feitas tanto para com o anel montado no rotor como com o anel fora deste. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios: encontraram-se um valor de 69 MPa no centro do anel e 310 MPa na periferia. Os resultados mostraram-se totalmente de acordo com analises feitas por elementos finitos.

Bray, em 1989, realizou experimentos similares de sua publicação com Salamanca no ano de 1989. O principal intuito foi o de obter resultados que pudessem ser úteis na inspeção da industria de petróleo. O aparato e as placas foram os mesmos utilizados na publicação anterior. Após a execução dos experimentos o autor observou que ambas as placas, laminadas a quente e a

frio, tiveram o mesmo comportamento, apenas com uma redução na amplitude no centro da solda para as placas laminadas a frio. Bray pôde concluir que, devido a tensões internas na região da solda, houve uma variação do tempo de percurso da onda longitudinal criticamente refratada. Este fato foi observado depois que as amostram passaram por tratamento térmico para alivio de tensões. Estes resultados mostraram-se muito importantes para os profissionais ligados a industria de petróleo, uma vez que a integridade das soldas de dutos petrolíferos está intimamente ligada à presença de tensões residuais nesta região.

Junghans e Bray, em 1991, através de testes experimentais, investigaram e compararam as ondas emitidas por transdutores que geram ondas longitudinais criticamente refratadas ("L_{cr}") com as ondas longitudinais superficiais "Creeping". Os autores enfocaram principalmente a emissão de ondas para o primeiro ângulo critico.

Junghans e Bray, após alguns testes, verificaram dois importantes aspectos que diferenciam estes dois tipos de transdutores. Primeiro, as ondas "creeping" são muito mais amortecidas do que as ondas "L_{cr}". Segundo, os lóbulos laterais encontrados para o diagrama de radiação para as ondas "L_{cr}" são muito mais fortes do que para o diagrama encontrado para as ondas "creeping". Os autores, através destes testes, chegaram a conclusão que os transdutores que geram ondas "L_{cr}" são mais indicados para a medição de tensão utilizando a teoria acustoelástica.

Srinivasan, Chundu, Bray e Alagarsamy, em 1992, utilizaram a técnica ultra-sônica com ondas longitudinais criticamente refratadas "L_{cr}" para determinar as tensões em vergalhões fundidos de aço, para vários estados após diferentes tratamentos térmicos. Primeiramente, os autores determinaram os valores das constantes acustoelásticas para cada material com o seu respectivo tratamento térmico. O procedimento utilizado foi o mesmo usado por Bray, em 1976.

Nos testes experimentais foram selecionadas quatro barras; cada uma sofreu um tipo de tratamento térmico diferente. A primeira barra passou por recozimento a 950 °C por um período de 4 horas, seguido de resfriamento no forno a 690 °C num período de 12 horas. As barras foram então resfriadas no próprio forno a uma temperatura de 650 °C, e após isso, resfriadas ao ar até a temperatura ambiente. A segunda barra foi normalizada numa temperatura de 950 °C por 4 horas

seguido de resfriamento ao ar até a temperatura ambiente. A terceira barra foi temperada com a mesma temperatura e o mesmo tempo das anteriores. Após resfriamento esta levou um banho de óleo seguido de reaquecimento a 500 °C por um período de 4 horas. Finalmente, a barra foi resfriada ao ar até a temperatura ambiente. Para a quarta barra, antes de qualquer tratamento térmico, foi medido o tempo de percurso com ondas "L_{cr}". Após isso, esta barra foi levada a um forno até que este atingisse uma temperatura de 600 °C, com uma taxa de aumento de 20°C/h, onde ficou por um período de 16 horas. Ao final, o forno foi desligado e regulado para ser resfriado na mesma taxa de 20 °C/h, até chegar na temperatura ambiente.

Após o levantamento de cada constante acustoelástica, as tensões foram medidas e então comparadas pelo método "hole drilling". As tensões determinadas para o estado sem tratamento térmico e para o estado recozido mostraram que existe tensão de compressão nas peças enquanto os estados normalizado e temperado apresentaram tensões de tração.

Tanala, Bourge, Fremiot e De Belleval, em 1994, utilizaram o método ultra-sônico para determinação de tensão em juntas soldadas. Como em publicações anteriores referentes ao mesmo assunto, foram utilizadas ondas longitudinais subsuperficiais, mas os autores também utilizaram ondas do tipo "Rayleigh".

Os autores utilizaram dois tipos de materiais: cano de aço inoxidável soldado e placa de liga de alumínio 5086. Como na publicação de Srinivasan, em 1992, as constantes acustoelásticas tiveram que ser determinadas para uma posterior determinação das tensões residuais. Os mesmos procedimentos foram utilizados, tanto para o primeiro caso como para o segundo. As barras foram cortadas em corpos de prova, que foram tracionados para a determinação das constantes acustoelásticas.

Os resultados mostrados para o primeiro caso foram totalmente coerentes com os determinados com o método de raio X. Os autores frisaram que o sucesso das medições foi devido a uma boa preparação da placa testada e de seu tratamento térmico, ambos foram feitos minuciosamente e amplamente inspecionados. Para o segundo caso, placas de liga de alumínio 5086 soldadas, os resultados também foram comparados com o método de raio X. Na região da

solda os autores não obtiveram bons resultados na comparação entre os dois métodos, porém em locais distantes da solda a concordância foi satisfatória. Neste teste também foi utilizado o método da birefringência (Bergman, 1958) para a determinação da distribuição do perfil de tensões ao longo da espessura.

Bray e Junghans, em 1995, mostraram resultados obtidos na avaliação de tensões residuais após tratamento térmico em placas de aço. Em seus testes os autores utilizaram uma placa de 1,22 m^2 com uma espessura de 13 mm. No centro desta chapa foi feito um furo para posterior soldagem para criar um campo de tensões residuais. Foram utilizadas duas placas, uma que foi soldada e a outra foi utilizada para a determinação do tempo de percurso que serviu para a referência do estado livre de tensões. O transdutor utilizado foi o mesmo usado por Bray em 1976 e sua orientação foi mantida constante em relação à direção de laminação.

Como conclusão os autores verificaram que este método não só distinguiu o estado de tensão residual das placas como também deu uma informação de sua distribuição e magnitude. Além disso, verificou-se que este método não impõe nenhuma limitação geométrica rigorosa no teste de amostras.

Olabi e Hashmi, em 1996, utilizaram um método destrutivo para a determinação de tensões residuais após o tratamento térmico em peças de aço de baixo carbono soldadas. Os autores utilizaram vários tipos de tratamentos térmicos com variações nas temperaturas de equalização, taxa de aquecimento, taxa de resfriamento e tempo de permanência das peças na temperatura de equalização. Para a avaliação das tensões residuais, o método "hole drilling" foi aplicado antes e após os tratamentos térmicos.

Olabi e Hashmi utilizaram uma placa de 200 x 300 x 10 mm com um chanfro em duplo "V", onde foi depositada a solda. O cordão de solda foi feito em um passe através do processo de soldagem "MIG". Após o processo de manufatura das placas e de sua respectiva soldagem, os autores submeteram os corpos de prova a diferentes tipos de tratamentos térmicos. As temperaturas de equalização escolhidas foram de: 450, 550 e 650 °C, as taxas de aquecimento

foram de: 50, 100 e 400 °C/h, as taxas de resfriamento foram de: 10,40 e 125 °C/h, e os tempos de permanência das peças na temperatura de equalização foram de: 0,5, 2 e 10 horas.

Os autores, após os experimentos, concluíram que a temperatura de equalização tem uma grande influência na diminuição das tensões residuais para a temperatura de 650 °C, para uma distancia de 15 mm do centro da solda. Pode-se observar uma redução da tensão de 360 MPa para 10 MPa. As mesmas conclusões foram feitas para o tempo de duração da temperatura de equalização e para a taxa de resfriamento, onde observou-se uma redução das tensões residuais. Para o primeiro caso, a tensão diminuiu de 360 MPa para 110 MPa para a duração de 10 horas. Para o segundo caso, a tensão diminuiu de 360 MPa para 170 MPa para a taxa de resfriamento de 10 °C/h. No caso das taxas de aquecimento, nenhuma mudança significativa de tensões residuais foi observada. Os valores das tensões residuais para 50, 100 e 400 °C/h ficaram em torno de 180 a 205 MPa.

Gurova, Teodósio, Rebello e Monin, em 1997, estudaram a variação das tensões longitudinais e transversais durante a deformação plástica de aços ASTM A387 Gr5. Para a avaliação experimental, os autores preparam três tipos de corpo de prova. A primeira amostra foi submetida a um jateamento leve, a outras amostras foram submetidas a jateamentos mais pesados. Este processo foi empregado a fim de produzir tensões residuais de compressão na superficie do material. Para a determinação das tensões residuais foi empregado o método de raios X nas duas faces dos materiais, antes do processo de tração dos materiais, e durante o processo de tração até a fratura completa destes.

Os autores, através dos gráficos traçados do inicio da tração até a ruptura, verificaram uma similaridade no comportamento das tensões residuais longitudinais e transversais para os três tipos de amostras. No caso das tensões residuais longitudinais, foi verificado um nível de tensão residual de compressão de –120 MPa para o estado não tracionado da amostra 1, enquanto as amostras 2 e 3 apresentaram um nível de –500 MPa. Todas as amostras, após um nível de deformação plástica de 0,5%, passaram por uma tensão igual a zero e até uma tensão de tração, permanecendo assim até a ruptura do material. Para o caso das tensões residuais transversais, também houve uma mudança no valor nos primeiros 0,5 % de deformação plástica. As tensões

reduziram de –500 MPa, estado não tracionado, para –250 MPa. Ao contrario das tensões residuais longitudinais, estas tensões não passaram de tensões de compressão para tensões de tração, elas permaneceram praticamente constantes, em compressão, até a ruptura dos corpos de prova.

Schneider, em 1997, apresentou os avanços obtidos no IZFP ("Fraunhofer Institut Zerstorungsfreie Prufverfahren"), no campo de desenvolvimento de caracterização não destrutiva do estado e das propriedades de estruturas de alumínio. Através da medida dos tempos de percurso de ondas ultra-sônicas, o autor obteve resultados das constantes acustoelásticas para varias ligas de alumínio. Schneider investigou a influência do cordão de solda em estruturas de alumínio, tanto para tensões superficiais como para tensões no volume da amostra. Para o primeiro utilizou ondas longitudinais "skimming" e para o segundo ondas transversais polarizadas. Em ambos os casos, para a determinação precisa das tensões residuais, o autor utilizou o valor das constantes acustoelásticas determinado experimentalmente.

Schneider, para determinar a influência da textura nas ligas de alumínio, utilizou ondas transversais para a determinação do tempo de percurso da onda com a direção de laminação. O autor utilizou dois tipos de chapas, uma laminada a frio e outra a quente. Ambas as chapas mostraram resultados similares; observou-se uma maior diferença dos tempos de percurso em relação às direções principais (0 ° e 90 °).

Lubarda, em 1997, desenvolveu um método para a determinação das constantes elásticas de terceira ordem para agregados isotrópicos de cristais cúbicos. O método foi baseado como uma extensão do método da teoria linear. O autor confirmou seus resultados com os obtidos pelas estimativas de Voigt e Reuss-type, que são as únicas estimativas analíticas disponíveis para estas constantes. Lubarda mostrou uma ampla revisão da formulação para determinação das constantes elásticas de segunda e terceira ordem, determinação da função de energia de deformação por unidade de volume inicial e a formulação para a determinação das constantes através das estimativas de Voigt e Reuss-type.

Yang e Lee, em 1997, investigaram a influência de um método mecânico para alivio de tensões residuais para tubos com soldas de topo através do modelo de elementos finitos. Os autores estudaram três diferentes condições de carga para a redistribuição de tensões. Para o primeiro caso foi simulada uma pressão no sentido radial, que foi aplicada na superfície interna dos tubos soldados com um comprimento específico e com a distância a linha de centro da solda conhecida. No segundo caso, foi adotado o mesmo procedimento do primeiro caso, apenas a pressão radial foi aplicada na superfície externa. Para o terceiro caso, foi aplicada uma carga no sentido axial, no final do tubo.

Através dos resultados numéricos, os autores puderam observar que o primeiro caso, pressão no sentido radial na superfície interna, causou a maior redução de tensão residual entre os três casos de carga. Observou-se uma redução da quantidade da tensão residual de tração perto da linha da solda. Yang e Lee observaram também um aumento linear do alívio com a magnitude da carga aplicada. No caso da aplicação de carga de compressão na solda, terceiro caso, verificou-se que o valor do pico de tensão residual de compressão reduziu-se rapidamente.

Duquennoy, Ouaftouh e Ourak, em 1998, apresentaram um método baseado na medida da variação da velocidade das ondas de Rayleigh com o estado de tensão na espessura de chapas. O material investigado é uma liga de alumínio aeronáutica. Os corpos de prova analisados foram chapas grossas laminadas, processo que pode causar tensões residuais superficiais. A remoção de matéria por usinagem conduz a uma redistribuição destas tensões internas, que causam torção ou flexão nos componentes acabados. Estas deformações são inaceitáveis na indústria. A solução proposta para minimizar estas deformações é a estimativa dos perfis de tensão antes da usinagem com um método não destrutivo. O conhecimento dos perfis de tensão possibilitaria a redução da deformação final, com a escolha da melhor forma de usinagem (área do corte, escolha das ferramentas, escolha das velocidades de usinagem, etc.).

Para o levantamento da relação entre a tensão estática e a velocidade das ondas, os autores desenvolveram equações da propagação de ondas de "Rayleigh" em um material ortotrópico tracionado. Além disso, a fim de encontrar os perfis de tensão, os autores fizeram uma análise das velocidades em profundidades diferentes na espessura, propagando as ondas superficiais ao longo

do sentido de laminação e do sentido perpendicular a este. As medidas foram obtidas usando transdutores ultra-sônicos de 2,25 MHz. Os vários perfis obtidos com este método mostraram que as regiões centrais das chapas estavam sob tensão e as regiões laterais estão sob compressão. Os autores enfatizam que esse resultado é causado pelo o resfriamento sofrido pelas chapas durante o processo de têmpera no curso de sua fabricação. Diversos perfis de tensão foram levantados nas mesmas circunstâncias experimentais. Isto permitiu a avaliação da repetibilidade da técnica e dos fatores de influência, que são: a variação da temperatura e a natureza do contato entre os transdutores e o espécime.

Os resultados deste método ultra-sônico foram comparados com outros perfis estabelecidos por um método destrutivo (método da remoção da camada). Esta comparação mostrou que ambas as técnicas conduzem a perfis similares. Esta comparação confirma que o método ultra-sônico também pode ser usado na medida de tensão ao longo da espessura das chapas.

Schneider, em 1998, determinou o estado de tensões em rodas ferroviárias que sofrem grandes variações de temperatura. Para seus testes o autor utilizou o método da birefringência acústica. Foram medidos os tempos de percurso com ondas ultra-sônicas cisalhantes ao longo de duas direções ortogonais perpendiculares, uma circunferêncial e outra radial. Como em publicações anteriores, o autor verificou que existe uma mudança de velocidade quando ocorre uma variação do estado de tensão. Após alguns testes, Schneider percebeu que a textura do material teve grande influencia. Primeiro, o autor percebeu uma diferença no tempo de percurso nas direções perpendiculares e, segundo, a atenuação do sinal ficou demasiadamente alta em algumas medições. Este fato pode ser explicado porque a superficie das rodas, em geral, é demasiadamente rugosa e com imperfeições.

Walaszek, Abdallahoui e Lieurade, em 2000, apresentaram os avanços obtidos no CETIM ("Centre Technique des industries Mecaniques"), no campo de desenvolvimento de um método ultra-sônico para medidas de tensão. Os autores discutiram as aplicações no campo da avaliação de tensão residual em componentes soldados e os resultados obtidos com ultra-som em placas de aço soldadas. Foi feita uma comparação da medida de tensão obtida pelo método "hole drilling"

e Raios X. Os fatores que influenciam a exatidão das medidas também foram discutidos. Estes resultados foram validados pela relaxação das placas.

O estudo desenvolveu uma metodologia para peças mecânicas de comprimento menor que 10 milímetros. Os autores usaram a variação da velocidade de ondas ultra-sônicas para descrever o estado de tensão nas zonas subsuperficiais destas peças. Para a avaliação das tensões residuais experimentais, o valor do coeficiente acustoelástico foi determinado. O procedimento foi o mesmo utilizado por Tanala, em 1994.

Os autores discutiram a influencia da microestrutura nas medidas feitas por ultra-som e a precisão que foi alcançada. Após uma análise metalográfica observou-se uma estrutura do tipo ferrita-perlita no metal de base; para a zona térmicamente afetada foi encontrada bainita e para a zona derretida uma estrutura martensita-bainita. Após tratamento térmico, pôde ser observado que as três estruturas permaneceram estáveis (análise metalográfica). O Raio X que foi feito nestas três zonas mostrou que as tensões estão perto de zero após o tratamento térmico. Isto confirma que este tratamento conduz a relaxação de tensões, sem afetar a microestrutura.

As amostras usadas pelos autores são de 400 por 300 milímetros e espessuras de 8 ou 30 milímetros. Um chanfro em X foi feito no meio da placa onde a solda seria depositada, para análise. A resistência ao escoamento do metal de base, medida no sentido longitudinal ou transversal, é 400 MPa., sendo a mesma para o metal do depósito. As medidas foram feitas com um transdutor transmissor-receptor que gera ondas subsuperficiais longitudinais.

A tensão residual medida pelo método ultra-sônico esta localizada próxima à zona superficial . A profundidade da medida é estimada 1,5 milímetros para 10 megahertz e 2,5 milímetros para 5 megahertz. A textura metalúrgica é desenvolvida no sentido longitudinal e no transversal. Assim, a influência da textura foi estimada em 10 %. Este efeito pode ser subtraído da medida quando o sentido de laminação for conhecido.

As tensões foram avaliadas pela medida do tempo ultra-sônico em cada ponto. Um desses pontos, o valor médio do tempo ultra-sônico medido na extremidade da placa, e é

considerado como de referência. Conseqüentemente, os valores dados das tensões são relativos. Além disso, as tensões obtidas não levam em conta o efeito das variações da microestrutura induzidas pela soldagem.

Para a primeira validação das medidas ultra-sônicas, foi medida a tensão por "hole drilling". O erro foi estimado em ± 50 MPa. Tanto o método ultra-sônico como o "hole drilling" são medidos em uma profundidade de dois milímetros. Os autores mostram uma comparação entre as duas medidas de tensão e foi verificado que a evolução dos perfis de tensão obtidos usando os dois métodos de medida é o mesmo, seja qual for o ponto considerado de medida. Foi feita uma comparação dos perfis de tensão obtidos por estes métodos, especialmente na zona do metal de origem (em ± 120 milímetros), que mostra que a medida ultra-sônica deve ser corrigida por um "offset" ao redor de - 100 MPa, devido à escolha arbitrária do ponto de referência. Os valores obtidos por ultra-som em juntas soldadas são mais elevados do que aqueles obtidos pelo método "hole drilling", mesmo se for levada em conta à correção citada.

No caso da espessura de 8 mm, foi feita uma comparação entre método ultra-sônico e "hole drilling" após a relaxação completa. A diferença nos resultados obtidos por estes métodos é muito baixa. A única zona em que é visível uma diferença é a zona da junção soldada, para o qual o desvio máximo entre os dois perfis é 100 MPa. No caso da espessura 30 mm, foi feita uma comparação entre o método ultra-sônico e o método de raio X. Após a relaxação, os dois métodos mostraram resultados muito parecidos. Foi observado na solda um valor de tensão de 200 MPa pelo método ultra-sônico, comparado a 100 MPa pelo medido de raio X. Isso é causado pelo efeito da variação da microestrutura.

Sankar, em 2000, estudou a variação das velocidades das ondas ultra-sônicas, medidas com transdutores que utilizam ondas longitudinais criticamente refratadas "L_{cr}", em aços inoxidáveis austeníticos trabalhados a frio. Para as medidas das velocidades, Sankar utilizou transdutores ultra-sônicos comerciais da marca Krautkramer, com freqüência de 2 MHz. Estes foram montados em cunhas de acrílico, de modo que formaram um ângulo de 27,23 ° em relação ao plano de medida, segundo a lei de snell (Basatskaya e Ermolov, 1979). No experimento foram utilizadas 6 amostras com dimensões de 120 x 40 x 20 mm. Após as placas serem recozidas,

foram trabalhadas a frio para chegar em suas dimensões finais. As porcentagens em relação à espessura final foram de 10%, 20%, 30%,40% e 50%.

Através dos resultados Sankar observou que as velocidades das ondas ultra-sônicas decaiam de 0 a 10%; de 10% até 30% a velocidade se manteve praticamente constante sem nenhuma alteração significativa, e entre 30% e 50% a velocidade foi decaindo gradualmente.

Landa e Plesek, em 2000, investigaram várias técnicas não-destrutivas para a avaliação de tensões residuais. Quatro técnicas foram estudadas pelos autores: a técnica de impulso; técnica de ondas contínuas; técnica de medição das tensões a partir dos cálculos das constantes elásticas de terceira ordem e birefringência acústica.

Chance, em sua tese de mestrado no ano de 2000, a partir dos estudos iniciados por Moffat na década de 50, estudou o fenômeno de relaxação de tensões em estruturas soldadas de aço 1010. Para a medida das tensões residuais o autor utilizou dois tipos de equipamentos: extensômetros e transdutores ultra-sônicos que geram ondas do tipo "L_{cr}".

Os corpos de prova utilizados tinham medidas de 300 x 400 x 12,7 mm, e foram usinadas aberturas em forma de "T", cortadas em cada lado da placa. Estas aberturas tinham formato em duplo "V" para a posterior colocação do cordão de solda. Esta geometria da placa e dos espaços para a colocação da solda foi feita para a criação de um campo de tensão uniaxial na área de investigação.

Para a verificação da relaxação das placas, o autor utilizou tanto extensômetros como o transdutor ultra-sônico, verificando a variação da tensão para diferentes intervalos de tempo. Como conclusão, Chance observou que o alivio de tensão ocorre logo após a soldagem. Obteve uma tensão de aproximadamente 250 MPa depois de 375 minutos. Após 20 horas a tensão caiu para aproximadamente 220 MPa e depois de 700 horas verificou-se um nível de tensão de 180 MPa.

Chance confirmou as predições da tese de Moffat. Suas investigações confirmaram que existe um certo grau de relaxação em placas de aço soldadas. Verificou-se a existência da relaxação de aproximadamente 45 MPa.

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

Caetano, Andrino e Santos, em 2002, determinaram a direção de laminação em aços API 5L X70 utilizando ondas ultra-sônicas cisalhantes. Para a análise experimental os autores utilizaram 8 barras com medidas de 760 x 70 x 10,8 mm. Para a medida dos tempos de percurso foi utilizado um arranjo construído pela empresa americana QMI. Este arranjo possui no mesmo suporte 4 sensores dispostos a 90°.

Dois tipos de experimentos foram realizados pelos autores para a determinação do sentido de laminação. Primeiro, o transdutor de ondas cisalhantes foi colocado no corpo de prova de modo que os sensores ficassem alinhados em relação às direções principais de tensão, ou seja, um sensor estaria perpendicular em relação ao maior comprimento da barra, e o outro sensor perpendicular a este formando um ângulo de 90°. Como resultados, Caetano, Andrino e Santos obtiveram que 3 barras extraídas de uma chapa apresentaram sentido de laminação longitudinal, e as outras duas barras apresentaram sentido de laminação transversal. Os resultados foram coerentes com a informação dada pelo fabricante das peças. Para as barras restantes da outra chapa, os resultados foram similares, mostrando que duas barras estavam no sentido de laminação longitudinal e a outra no sentido transversal.

O segundo experimento foi realizado para a avaliação da uniformidade da variação do tempo de percurso. O mesmo arranjo utilizado para a verificação do sentido de laminação foi utilizado. Diferentemente do ensaio anterior, não foram medidos apenas os tempos de percurso

nas direções das tensões principais, para 0 ° e 90°, mas também para as posições de 30 ° e 60 ° para um sensor, e 120 ° e 150 ° para outro sensor. Verificou-se, através dos resultados, que a maior diferença ocorreu entre os ângulos de 0 ° e 90 °. Para os ângulos de 30 ° e 150 °, e 60 ° e 120 °, os tempos de percurso foram praticamente os mesmos.

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

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

No segundo caso foram determinadas as constantes acustoelásticas (C_a) através de ondas transversais. Para esta determinação foi construído um sistema para aplicação de cargas em barras e foi levantada a correlação entre as tensões aplicadas e a variação do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas.

Santos, Bray, Andrino e Caetano, em 2003, mostraram resultados dos perfis de tensão residual longitudinal para aços API 5L X70 usados em oleodutos e gasodutos. Os autores utilizaram para este levantamento ondas longitudinais criticamente refratadas (L_{cr}). Dez conjuntos soldados foram analisados, sendo cinco na direção longitudinal e outros cinco na direção transversal. Os resultados mostraram-se satisfatórios, apresentando na região da solda

tensões de tração e em regiões vizinhas e distantes do cordão tensões de menor magnitude. Os resultados mostraram excelente concordância com o perfil de tensões esperado.

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

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Para examinar o efeito do perfil de tensões residuais e da relaxação de tensões em juntas soldadas de placas de aço do grupo API 5L, geometrias especiais foram desenvolvidas. No primeiro caso, esta geometria se baseou em estudos feitos por outros autores para esta finalidade (Salamanca, 1988; Schneider,1997 e Walaszek, 2000). No segundo caso, o estudo se baseou no estudo feito por Mofat (1951) em sua dissertação de mestrado sobre análise da relaxação em placas de aço soldadas. Nesse caso, a geometria elaborada e os passos da preparação foram executados para causar um efeito de tensão de compressão na área a ser inspecionada.

3.1 Materiais Utilizados.

Foram utilizados dois tipos de aços usados na construção de oleodutos e gasodutos. Para a análise do perfil de tensões residuais em placas soldadas, foi utilizado tanto o aço API 5L X65 como o API 5L X70. Para o estudo da relaxação de tensões o ultimo aço foi utilizado. A composição química e as propriedades físicas dos aços estão listadas na tabela 3.1. Para maior facilidade do entendimento de cada experimento, em itens subseqüentes estes serão separados, descrevendo cada método de ensaio.

Tabela 3.1: Composição Química e Propriedades Físicas do Aço API 5L.

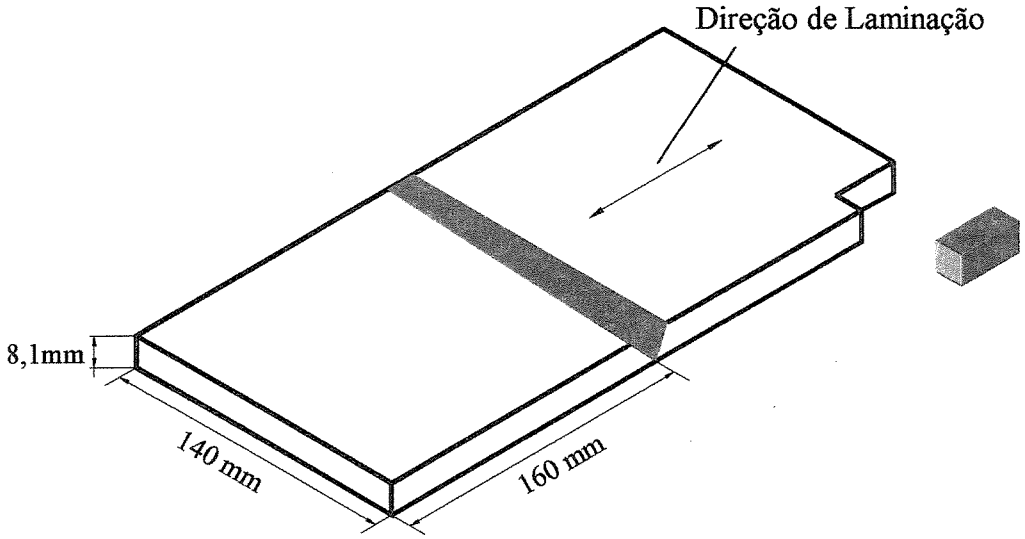
	API 5L X65				API 5L X70			
Composição Química	C (%)	0,08			C (%)	0,069		
	Si (%)	0,18	Mn (%)	1,54	Si (%)	0,339	Mn (%)	1,529
	P (%)	0,025	S (%)	0,005	P (%)	0,01	S (%)	0,0004
	Al (%)	0,029	Cu (%)	0,01	Al (%)	0,031	Cu (%)	0,017
	Nb (%)	0,041	V (%)	0,024	Nb (%)	0,043	V (%)	0,059
	Ti (%)	0,013	Cr (%)	0,03	Ti (%)	0,001	Cr (%)	0,02
	Ni (%)	0,02	Mo (%)	0,03	Ni (%)	0,02	Mo (%)	0,001
	Sn (%)	0,002	N (%)	0,0034	Sn (%)		N (%)	0,0054
	B (%)	0,0001	Ca (%)	0,0025	B (%)	0,0001	Ca (%)	0,0013
	Limite de Resistência (MPa)				Limite de Resistência (Mpa)			
	597				650			
	Limite de Escoamento (MPa)				Limite de Escoamento (MPa)			
	550				600			
	Dureza Vickers				Dureza Vickers			
	188				204			

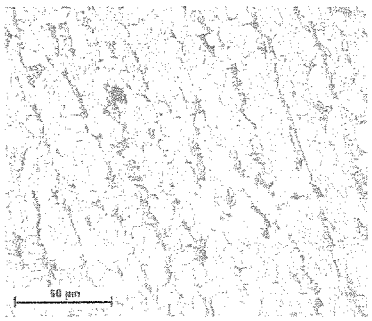
3.2 Geometria das Placas.

a) Conjuntos Soldados.

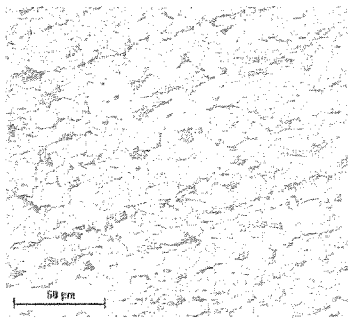
- <u>Aço API 5L X65</u>

A dimensão da placa original individual (antes da soldagem) é de 160 x 140 x 8,1 mm, com a direção de laminação perpendicular ao chanfro, conforme demonstrado por análises metalográficas. Estas mostram que as bandas de perlita são mais extensas na direção perpendicular, conforme a figura 3.1.





Face vermelha



Face azul claro

Figura 3.1: Dimensão das Amostras e Direção de Laminação.

Em uma das faces, do lado de menor comprimento, foi feito um chanfro para a posterior soldagem das chapas. A figura 3.2 mostra com detalhe este chanfro com as respectivas dimensões. A figura 3.3 mostra as placas dispostas lado a lado, como serão soldadas, e o chanfro utilizado.

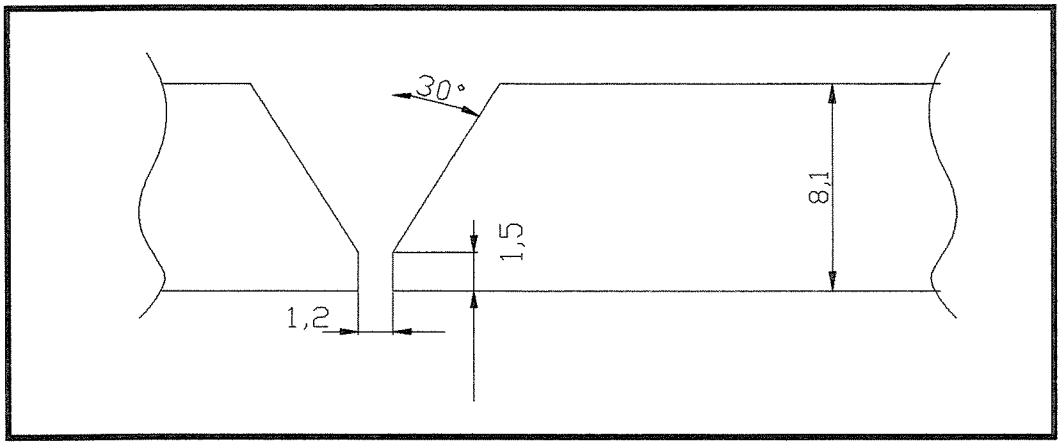


Figura 3.2: Dimensão do chanfro (Chapas API 5L X65).

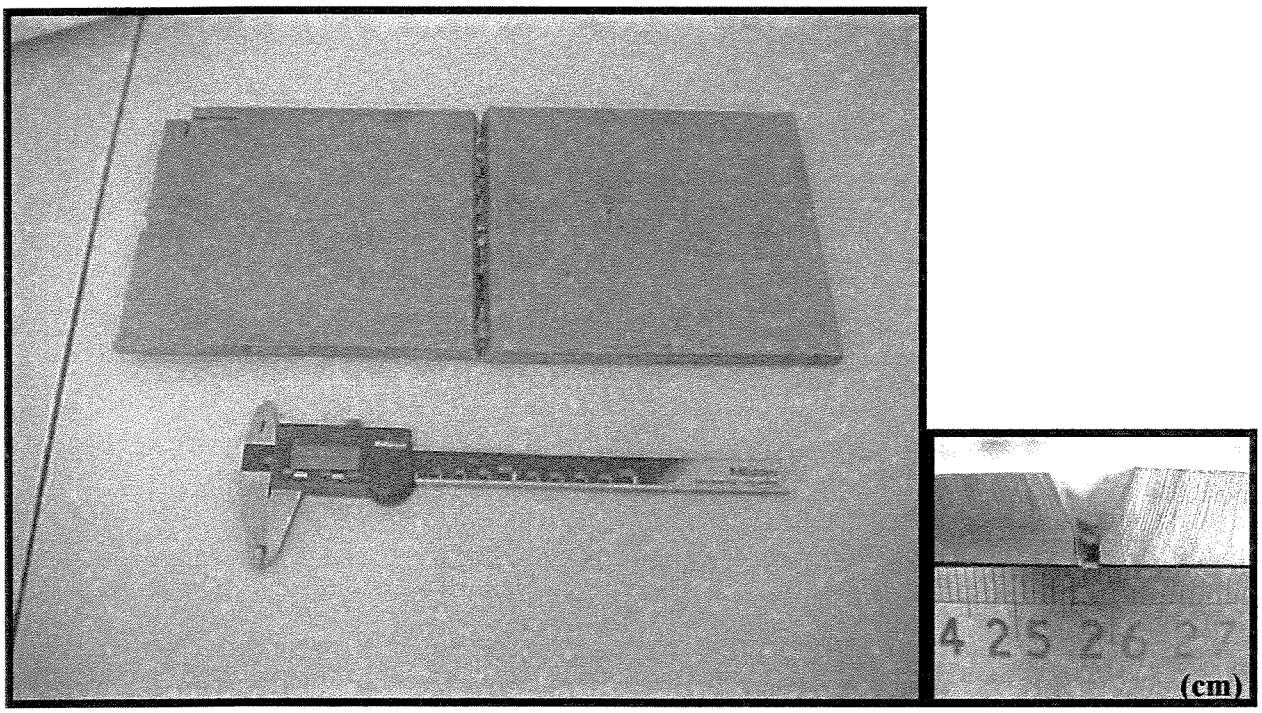


Figura 3.3: Placas de aço API 5L X65. Detalhe: Chanfro em "V".

- **Aço API 5L X70**

A dimensão da placa é de 300 x 200 x 12,7 mm. Neste caso não foi necessária à determinação da direção de laminação, pois esta já foi informada pelo fabricante no ato da aquisição. O chanfro foi feito na linha média do lado de maior comprimento e suas dimensões

podem ser vistas na figura 3.4. Aqui, como no caso anterior, o chanfro é feito em "V". Estas dimensões são determinadas através da norma API 1104/1999, que diz que aços usados na construção de oleodutos e gasodutos devem ter um nariz de 1,6 ± 0,8 (mm) para chapas até ½ polegada. A figura 3.5 mostra o chanfro utilizado e a placa, antes da soldagem, dispostas lado a lado.

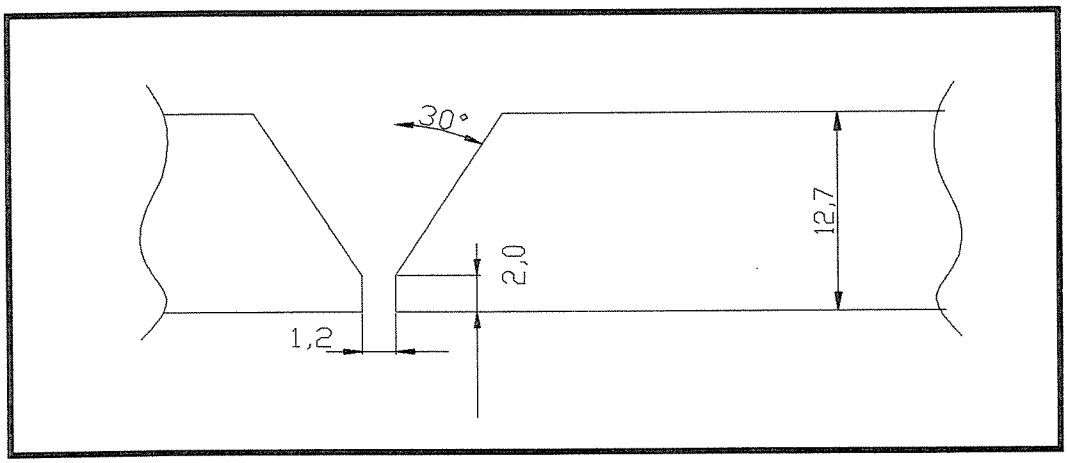


Figura 3.4: Dimensão do chanfro (Chapas API 5L X70).

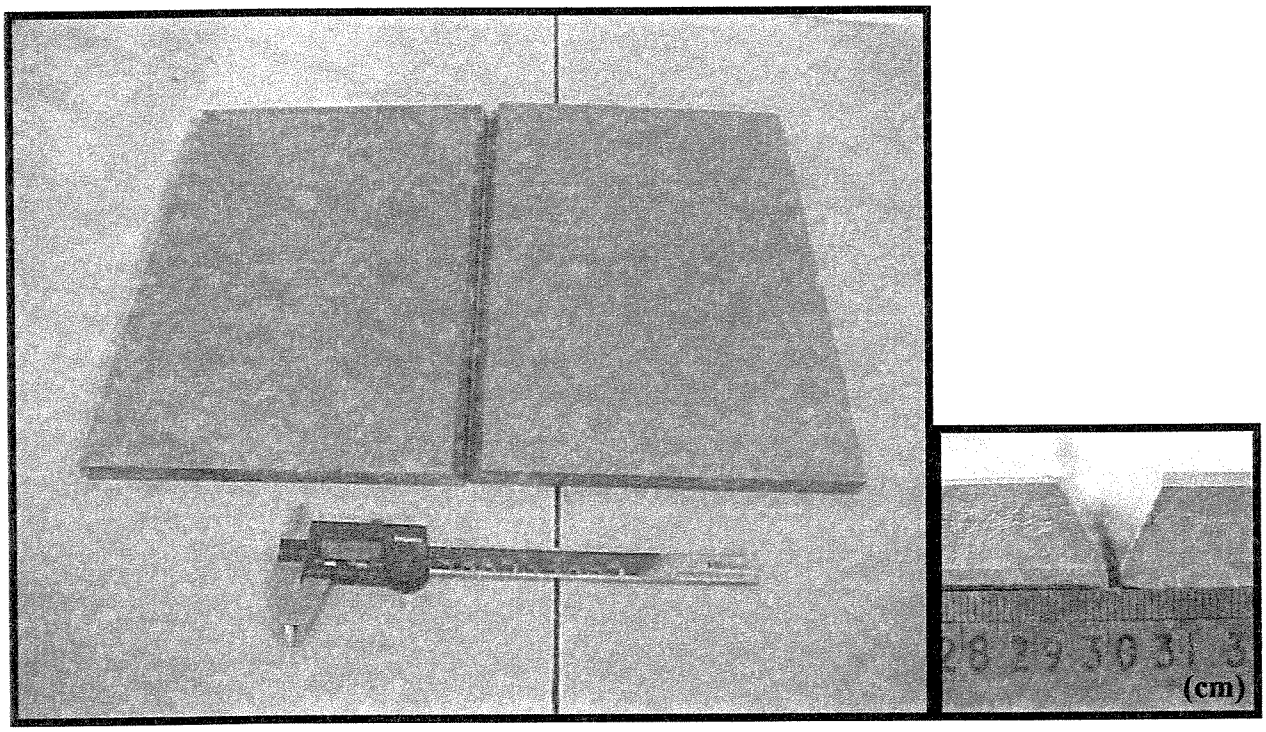


Figura 3.5: Placa de aço API 5L X70. (Detalhe: Chanfro em "V").

b) Relaxação de Tensões.

- **<u>Aço API 5L X70</u>**

A dimensão da placa é de 400 x 300 x 12,7 (mm). Nos dois lados da amostra serão usinados rasgos em forma de "T", sob a linha média relativa ao maior lado da placa. A Figura 3.6 mostra a placa utilizada no experimento com as respectivas dimensões. Basicamente, é a mesma chapa utilizada por Chance (2000).

A largura destes rasgos no topo do T é de aproximadamente 50,8 mm (2 pol) e a distância entre rasgos de 57,15 mm (2 ¼ pol). Os rasgos perpendiculares são de 6,35 mm (1/4 pol), local onde foi feito um chanfro em duplo "V" de 60 ° para a posterior aplicação da solda. A figura 3.7 mostra a placa utilizada no experimento e, no detalhe, o chanfro utilizado onde foi depositada a solda.

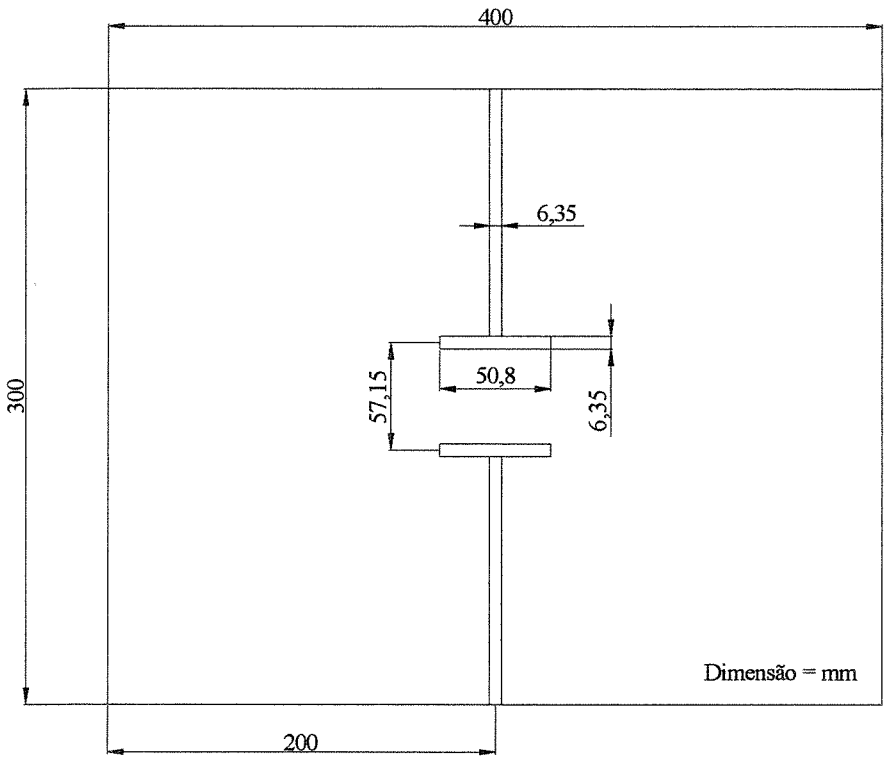


Figura 3.6: Dimensões da placa (Aço API 5L X70 / Relaxação).

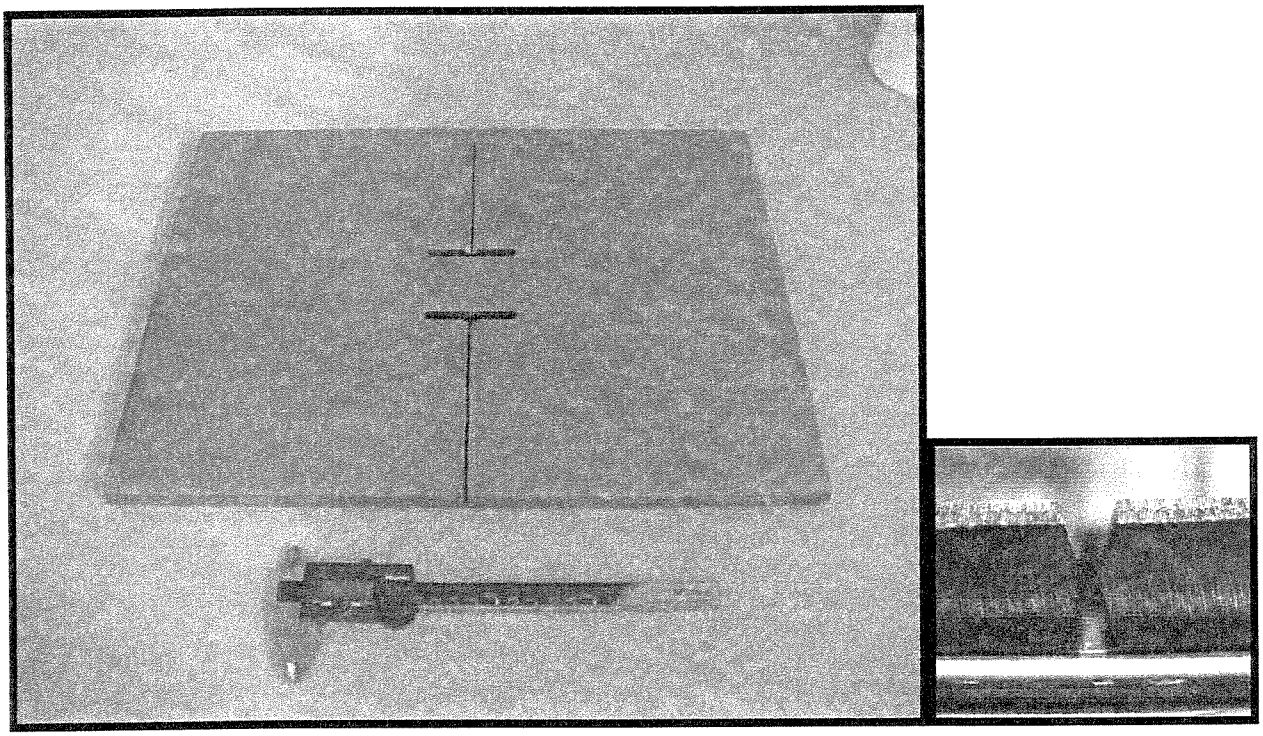


Figura 3.7: Placa de aço API 5L X70. (Detalhe: Chanfro em duplo "V").

3.3 Usinagem das Placas e Tratamento Térmico.

a) Conjuntos soldados.

- **Aço API 5L X65**

O processo de corte das placas foi efetuado por guilhotina, com o qual obteve-se as dimensões quase no seu tamanho final. As placas foram faceadas com uma fresa para que as dimensões finais especificadas no projeto fossem atingidas. Em seguida o chanfro foi usinado com uma fresa de topo. Após o processo de usinagem, foi feito um tratamento térmico para alívio de tensões, visando remover qualquer tensão residente no material causado pela usinagem. O tratamento térmico consistiu em levar a peça a um forno, que pode ser visto na figura 3.8. Elevou-se à temperatura até o valor de 620 °C, na velocidade de 8 °C por minuto (Netto et al.,

2002). Quando o forno atingiu a temperatura determinada, a chapa ficou no mesmo patamar por 30 minutos. Após isso, o forno se desligou automaticamente e a peça foi resfriada até a temperatura ambiente.

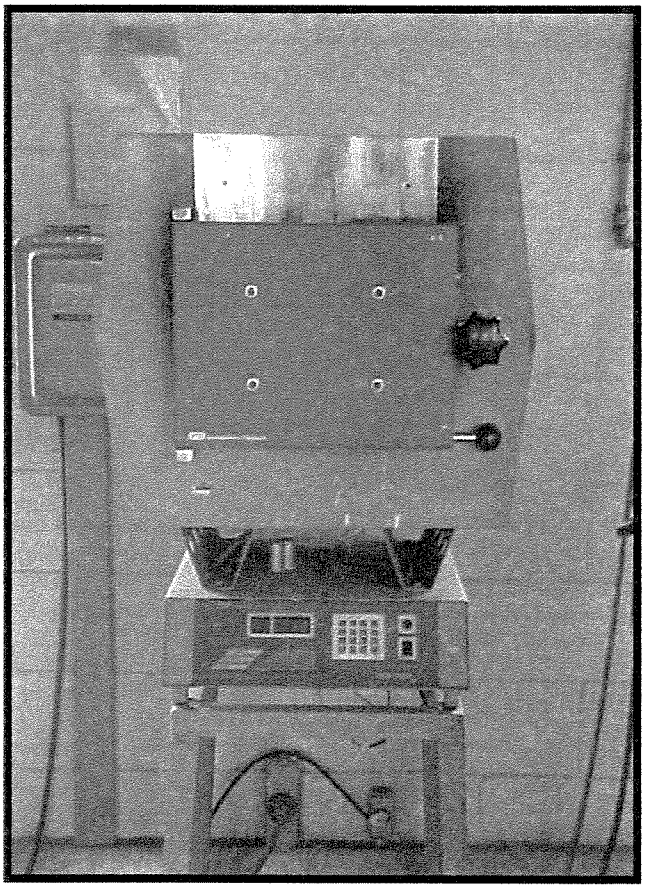


Figura 3.8: Forno para alívio de tensões.

- **Aço API 5L X70**

O processo de usinagem, o patamar de temperatura e a permanência da peça no forno são os mesmos utilizados para o caso anterior. Como estas peças são de maior dimensão que as peças anteriores, este alívio não foi feito no forno mostrado na figura 3.8, mas sim em outro de maiores proporções, com o mesmo procedimento.

b) Relaxação de Tensões.

- **Aço API 5L X70**

Como nos casos anteriores o processo de usinagem foi o mesmo, não tendo nenhuma mudança significativa. Aqui as peças serão colocadas no mesmo forno das peças de aço API 5L X70, não tendo sido alteradas permanência no forno e nem patamar de temperatura. Como nos casos anteriores as peças foram resfriadas dentro do próprio forno, até atingirem a temperatura ambiente.

3.4 Instrumentação e Métodos de Aquisição de Dados.

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. Atualmente, equipamentos modernos são utilizados para a determinação destes tempos. A descrição dos equipamentos utilizados nesse trabalho e suas funções são apresentados a seguir.

3.4.1 Instrumentação para Geração das Ondas e Determinação dos Tempos de Percurso.

Neste trabalho foram utilizados dois métodos de determinação do tempo de percurso. O primeiro baseado na propagação de ondas longitudinais criticamente refratadas, que percorrem a superfície do material, chamada de ondas L_{cr}, e o segundo baseado em ondas transversais ou cisalhantes, que percorrem o material perpendicularmente ao caso anterior, ou seja, na espessura do material.

- **Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas – L_{cr}**

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°. A ligação entre as sapatas é feita por uma chapa de alumínio, 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}, como indicado pelos estudos discutidos anteriormente. O arranjo do transdutor e seu respectivo desenho com suas dimensões podem ser vistos na figura 3.9. Os transdutores, em vermelho, montados nas sapatas de acrílico (figura 3.9), são da marca *HARISONIC* e seu cristal piezelétrico tem uma dimensão de 12,7 mm^2 e sua freqüência natural corresponde a 2,25 MHz.

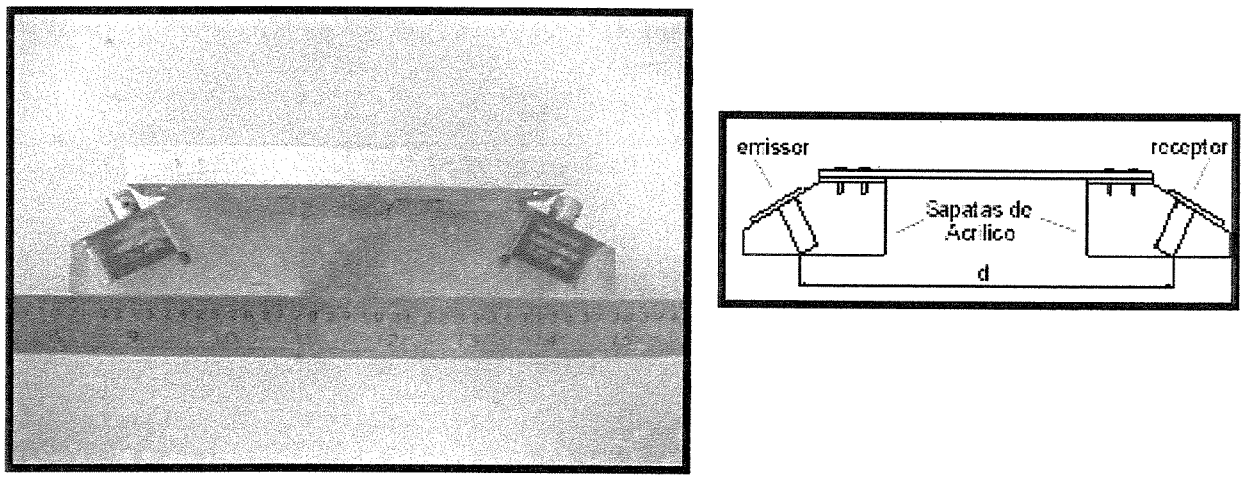


Figura 3.9: Arranjo e desenho para o conjunto de medição de tensões baseado em ultra-som.

Para a medição dos tempos de percurso foi necessário que a pressão fosse controlada sobre as peças analisadas. É desejável que esta força seja sempre a mesma, porque o arranjo mostrado na figura 3.9 não é infinitamente rígido e qualquer movimentação entre os dois transdutores, mesmo que mínima, pode significar erros que dificultariam as análises posteriores. Para um melhor entendimento da importância de controlar a força, pode-se calcular o valor em nanosegundos para cada milímetro adicional de distanciamento entre transdutores. Considerando a distância percorrida pela onda no acrílico de 1,3 cm e percorrida no aço de 11,2 cm e utilizando as velocidades de 2,8 x 10^5 cm\s e 5,9 x 10^5 cm/s respectivamente para acrílico e aço, obtem-se valores de 357 ns/mm para o acrílico e de 169,5 ns/mm para o aço. Levando em consideração que a sensibilidade é em média de 4,5 MPa/ns, isso pode significar erros significativos na medição das tensões. Para evitar este problema, um grampo ("sargento") foi utilizado para comprimir o conjunto contra a superfície das peças. Para o controle exato desta força, foi utilizada uma célula

de carga ligada a um condicionador de sinais. Ela foi fixada em um dos lados do sargento. A figura 3.10 mostra esta montagem.

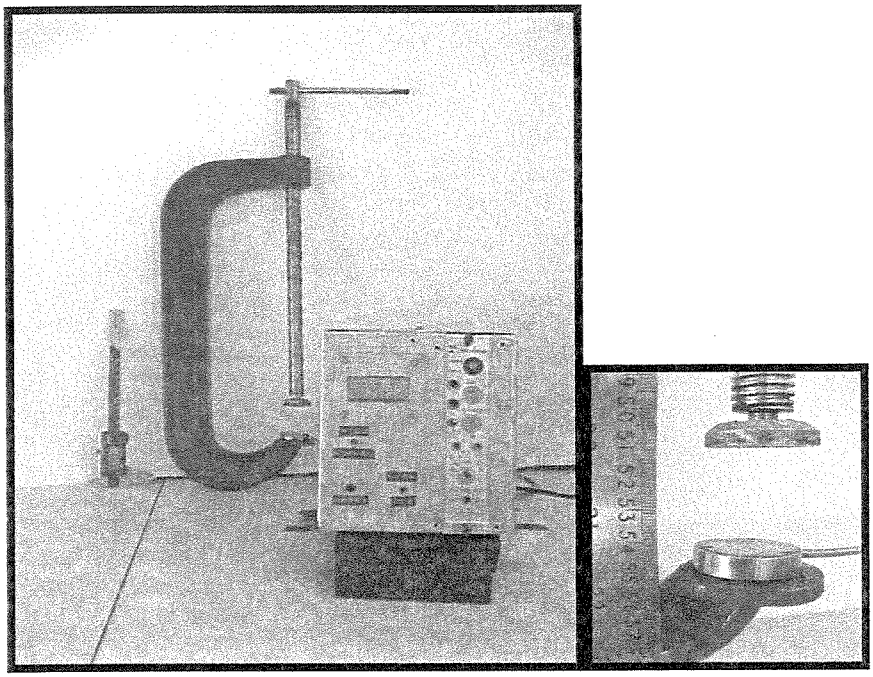


Figura 3.10: Condicionador de sinais e célula de carga colocada no apoio da carga aplicada através do sargento. (Detalhe: célula montada no sargento).

Para a geração e recepção dos pulsos ultra-sônicos foi usado um excitador-receptor de pulsos modelo 5073 PR da *Panametrics* (figura 3.11). Esse aparelho gera um pulso elétrico que é captado pelo transdutor montado na sapata, nesse caso o emissor; este estímulo aplicado ao cristal piezelétrico do transdutor transforma a energia elétrica vinda do excitador-receptor em oscilação mecânica na forma de vibração (onda) e chega ao outro transdutor, nesse caso o receptor. A energia que chega ao cabeçote de recepção é captada pelo cristal piezelétrico, que transforma a vibração mecânica em um pulso elétrico que é mandado novamente ao excitador-receptor. Para a leitura desse tempo de percurso e para o processamento dos dados para a determinação da tensão, o excitador é ligado a uma placa de aquisição de dados.

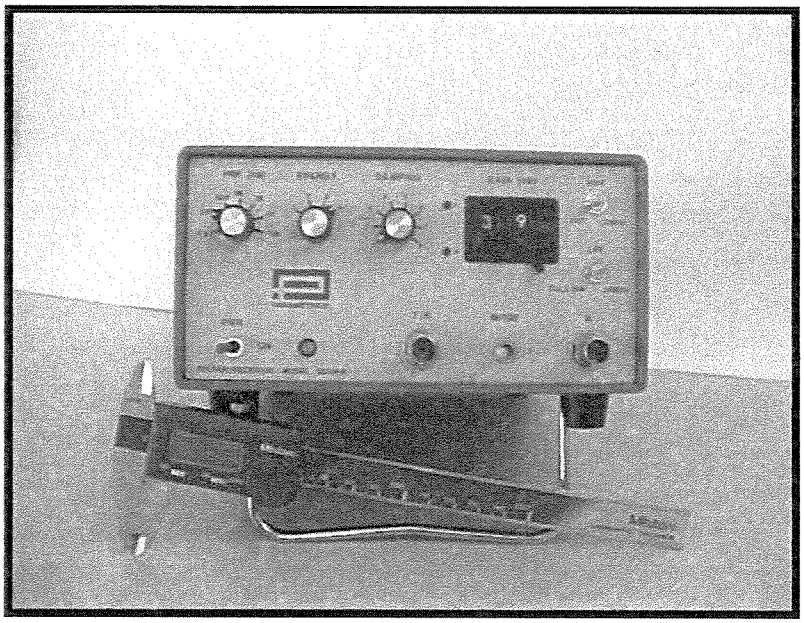


Figura 3.11: Excitador-Receptor modelo 5073 PR.

Os cabos para conexão dos transdutores ao excitador-receptor são coaxiais do tipo BNC. O cabeçote transmissor foi acoplado ao conector chamado T/R localizado na parte frontal do aparelho, enquanto o cabeçote receptor foi acoplado ao conector R localizado no mesmo painel. Os sinais analógicos provenientes do excitador-receptor, que são mandados através do conector chamado "RF out", localizado na parte traseira do aparelho, para o canal 1 da placa de aquisição para sua digitalização, também são mandados através de cabos coaxiais com conectores do tipo BNC. Para a sincronização do sinal, um cabo é ligado do conector SYNC OUT, através de um plug BNC, até a entrada da placa de aquisição de dados no conector PRF1, através de um plug SMB.

O desenho esquemático completo da aparelhagem com as respectivas designações de cabos e entradas pode ser visto na figura 3.12 e a aparelhagem completa pronta e montada para a aquisição dos sinais na figura 3.13.

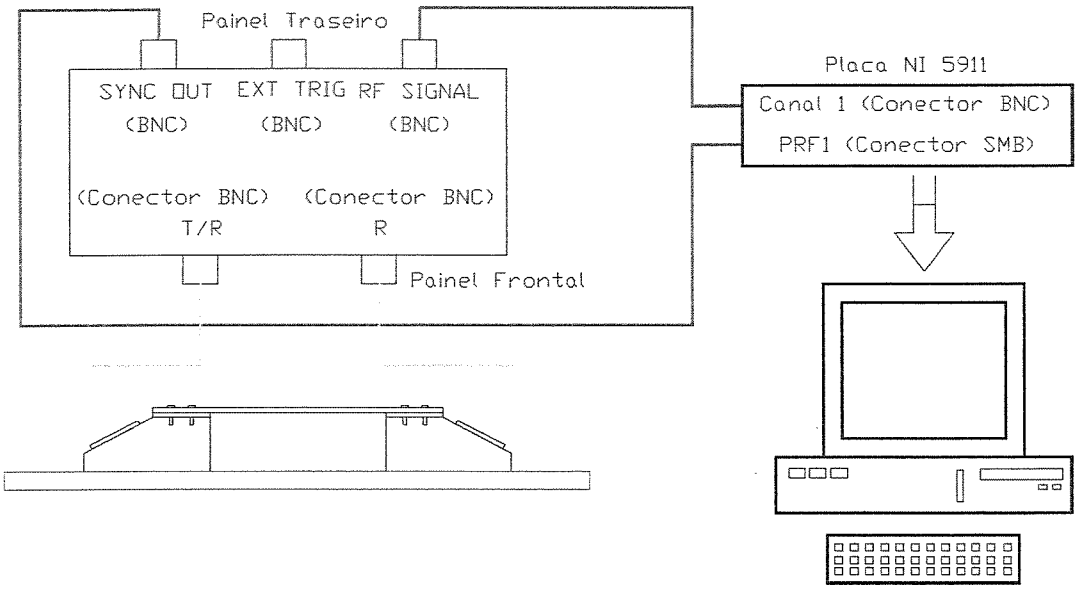


Figura 3.12: Esquema completo para aquisição de dados (Ondas Longitudinais).

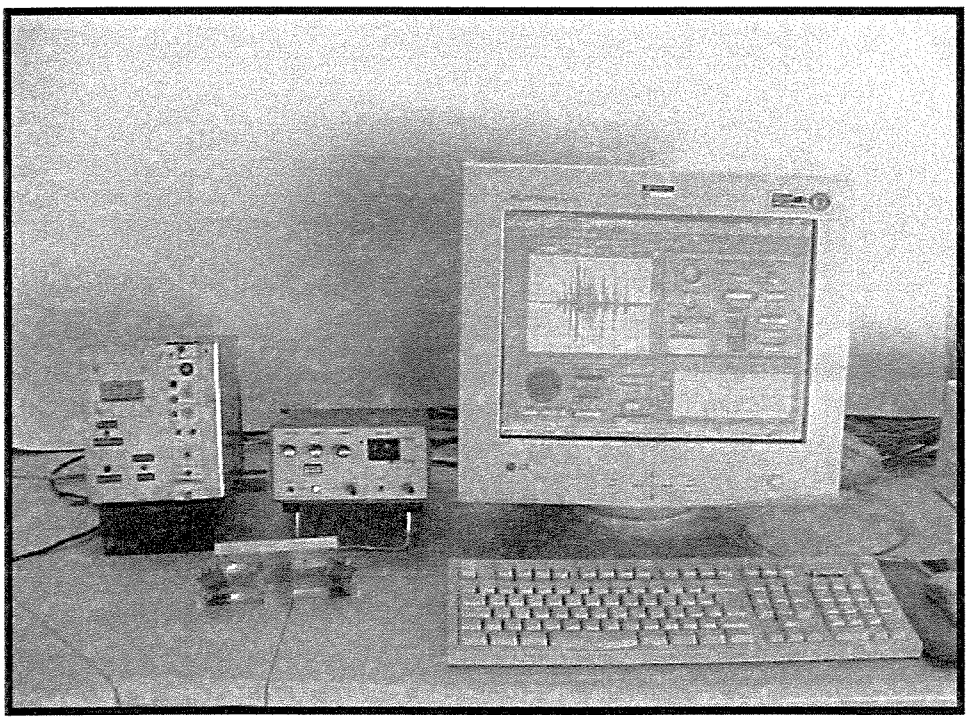


Figura 3.13: Aparelhagem para determinação dos tempos de percurso.

Um computador IBM PC de 750 MHz foi utilizado como base para a placa de aquisição de sinais e para a plataforma LabVIEW. Foi utilizado um programa especialmente feito para este propósito, que será apresentado com detalhes na seção 3.5 e no apêndice A.

- **Ondas Transversais ou Cisalhantes**

Para a geração das ondas transversais foi utilizado um transdutor especialmente desenvolvido para gerar duas ondas perpendiculares polarizadas ortogonalmente em um mesmo aparelho. Cada onda é gerada individualmente e uma caixa de comando conectada ao transdutor é que faz este comando. A figura 3.14 mostra o transdutor utilizado e a caixa de comando. Uma grande vantagem deste transdutor especial é que não precisa ser rotacionado para a obtenção dos tempos de percurso nas direções perpendiculares, obtendo-se assim um ganho de tempo e uma maior precisão nos resultados obtidos. As freqüências naturais dos sensores são de 2,25 MHz.

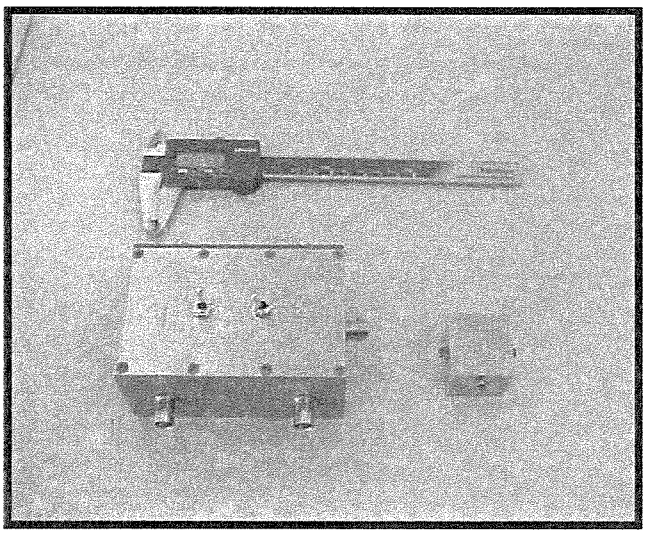


Figura 3.14: Transdutor para ondas cisalhantes e caixa de controle.

Os mesmos aparelhos utilizados no caso anterior também serão utilizados para ondas cisalhantes, com apenas algumas modificações de configuração no excitador-receptor. Apenas um transdutor servirá como transmissor e receptor. Deste modo, apenas um cabo axial será acoplado na parte frontal do excitador-receptor (conector T/R). As demais conexões com os respectivos conectores são iguais.

3.4.2 Equipamentos para Soldagem das Placas de Aço.

Para a soldagem dos aços API 5L X65 e API 5L X70, os seguintes equipamentos foram utilizados:

- Fonte INVERSAL 300 IMC para soldagem a arco com proteção gasosa contendo dispositivo de programação e de pulsação de corrente (figura 3.15).

- Arame ("Metal Cored Wire") E70C-3M com diâmetro de 1,2 mm, tendo a composição química mostrada na tabela 3.2.

- Cilindros de argônio com mistura de 25% de CO_2 e Hélio, e reguladores de pressão e de vazão

- Dispositivo de soldagem longitudinal

- Computador IBM PC com o programa chamado Aqdados, da Lynux Tecnologia, com placa de conversão A/D instalada.

Para todos os experimentos empregou-se juntas de topo, sendo as soldagens realizadas na posição plana, com o sistema automatizado.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

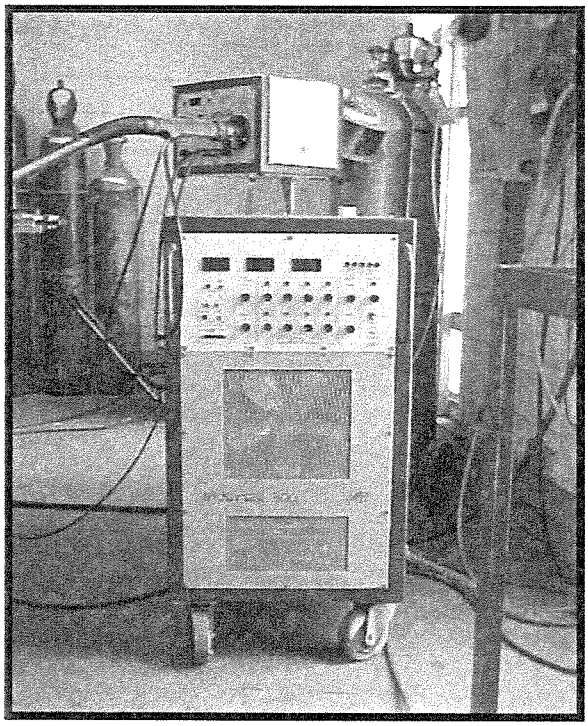


Figura 3.15: Fonte INVERSAL 300 IMC utilizada para a soldagem das placas.

Tabela 3.2: Composição química do arame, fornecida pelo fabricante.

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
0,03	1,74	0,84	0,009	0,017

3.5 Descrição do Programa de Aquisição de Dados.

O programa de aquisição de dados foi desenvolvido para calcular tensões em componentes mecânicos, através da medição do tempo de percurso de ondas longitudinais superficiais ("L_{cr} waves"), utilizando a teoria acustoelástica. Este programa, que pode ser carregado através do código L-Stress.exe, foi desenvolvido a partir da plataforma gráfica de programação LabVIEW V.6.i, da National Instruments. Para a sua confecção foram utilizadas as bibliotecas disponíveis para uso livre, que acompanham o programa. Programas LabVIEW, sejam disponíveis nas bibliotecas ou criados externamente, são chamados de VI "Virtual Instruments".

A placa de aquisição de dados NI 5911 (figura 3.16) possui trigger interno e externo e taxa de aquisição de 100 MHz, com um canal. Uma peculiaridade desta placa é a flexibilidade da resolução, dependendo da freqüência de amostragem escolhida. A figura 3.17 mostra o gráfico representativo dessa relação. Outras especificações da placa como também algumas peculiaridades podem ser encontradas em sites relacionados ao fabricante da placa (www.ni.com). O programa também poderá ser utilizado com outras placas de aquisição, com pequenas alterações internas, desde que estas tenham "drives" de comunicação com o LabVIEW ou estes sejam construídos. A maioria das placas importadas comerciais possuem esses "drives".

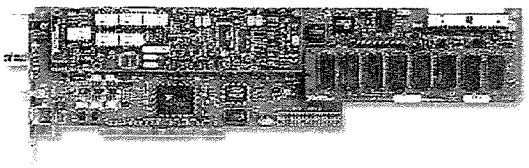


Figura 3.16: Placa de Aquisição de dados NI 5911.

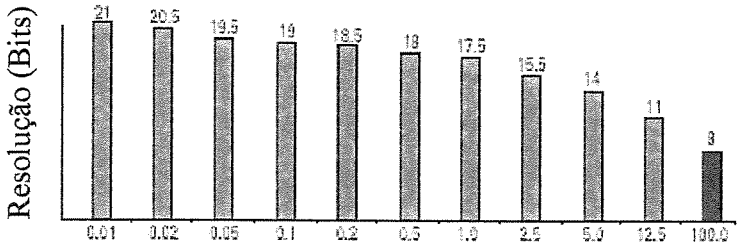


Figura 3.17: Resolução efetiva contra freqüência de amostragem com limite de voltagem de ± 10 V.

O programa L-Stress V1.0 é composto por cinco telas. A tela de dados iniciais é a tela onde os dados principais da aquisição são inseridos. Dados referentes ao excitador de pulsos, propriedades do material e suas dimensões devem ser inseridos nessa tela. A figura 3.18 mostra a tela do osciloscópio, a descrição detalhada do programa pode ser vista no apêndice A.

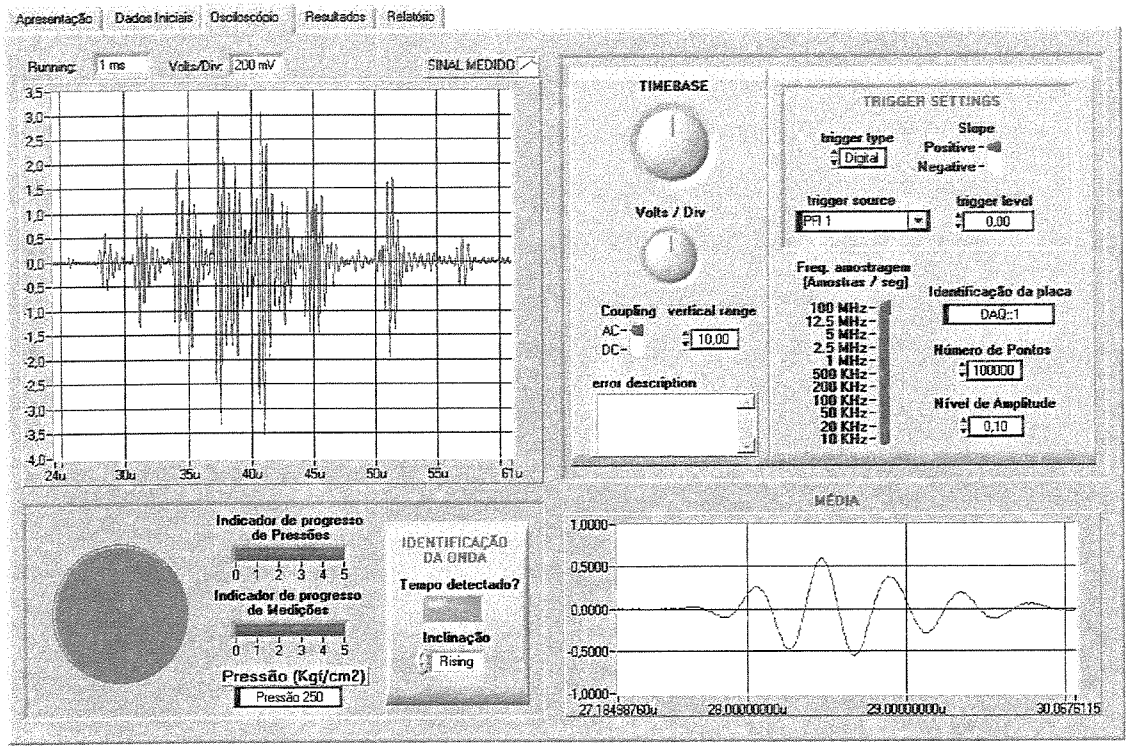


Figura 3.18: Tela do programa L-Stress V1.0 que simula um osciloscópio comercial.

3.6 Procedimentos

Para uma correta avaliação das tensões em materiais metálicos através de ondas ultra-sônicas, é necessário que alguns cuidados sejam tomados, principalmente no que diz respeito a um procedimento correto e bem elaborado. Os procedimentos utilizados neste trabalho com suas respectivas metodologias são descritos a seguir.

3.6.1 Levantamento das Constantes Acustoelásticas para Ondas Longitudinais (L_{11}) para Aços 1020.

A fim de validar o sistema utilizado para levantamento dos tempos de percurso e posterior determinação das tensões, foi levantada a constante acustoelástica do aço 1020 para ser comparada com publicações da literatura (Bray e Stanley, 1997). A composição química e as propriedades físicas do aço 1020 estão listadas na tabela 3.3.

Para estes testes foram cortadas 8 barras com dimensões de 760 x 70 x 12,7 mm. O fabricante não informou o sentido de laminação de cada barra, o que tornou necessária a determinação deste sentido através do método ultra-sônico chamado de birefringência (Caetano, 2003). Os resultados não foram conclusivos, não mostrando claramente o sentido de laminação. Um motivo provável seria a porcentagem de carbono existente nestes tipos de aço, superior as encontradas nos API.

Tabela 3.3: Composição Química e Propriedades Físicas do Aço 1020.

	AÇO 1020			
Comp. Química	**C (%)**		0,18 – 0,23	
	Mn (%)	0,3-0,6	**S (%)**	0,05
	P (%)	0,04	**Aço**	Restante
Propriedades Físicas	**Modulo de Elasticidade (MPa)**			
	207000			
	Limite de Escoamento (MPa)			
	280			
	Resistência a Tração (MPa)			
	420			
	Módulo de Cisalhamento (MPa)			
	79000			

Para a avaliação das propriedades acustoelásticas (levantamento das constantes), foi desenvolvido um sistema mecânico para aplicar cargas sobre as barras. Este sistema é basicamente uma máquina de tração, na qual cilindros hidráulicos permitem que a força aplicada na barra seja conhecida.

O sistema completo para a avaliação das constantes acustoelásticas está mostrado na figura 3.19. Além da máquina de tração, o sistema contém: o equipamento para posicionamento e aplicação da força controlada do sensor ultra-sônico sobre a barra; bomba hidráulica para

aplicação da força; excitador de pulsos *Panamétrics* 5073 PR; Computador IBM PC com a placa National Instruments NI 5911.

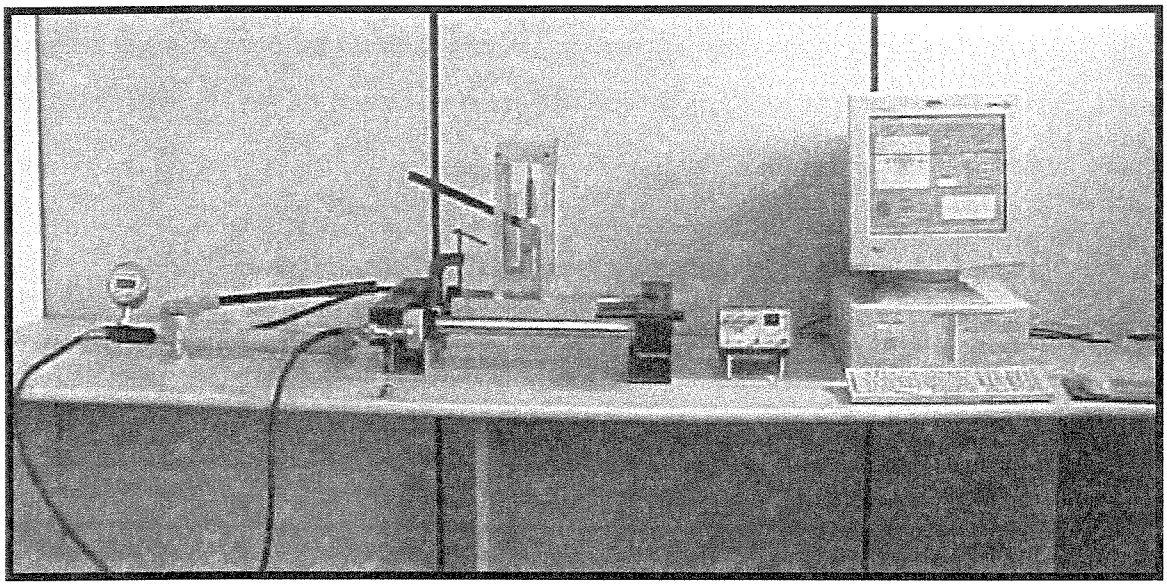


Figura 3.19: Arranjo experimental para determinação das constantes acustoelásticas.

O procedimento básico para avaliação de tensões e posterior cálculo das constantes acustoelásticas com o sistema consiste em aumentar progressivamente a carga através do sistema hidráulico e medir a variação do tempo de percurso das ondas ultra-sônicas entre os transdutores. Foi escolhida uma pressão máxima de 300 kgf/cm^2, que corresponde a uma tensão máxima aplicada na barra pelos cilindros hidráulicos de 95,3 MPa. A pressão foi dividida em quatro passos e, para cada um, o transdutor ultra-sônico foi colocado e retirado cinco vezes, sempre limpando e colocando nova camada de gel acoplante entre as medidas. Após vários testes do levantamento dos tempos de percurso, verificou-se uma inconsistência dos resultados em relação à literatura. Um primeiro procedimento adotado foi aplicar a pressão de 0 a 300 kgf/cm^2 em passos seguidos, isto é, primeiramente o sistema encontra-se no estado livre de tensões, ou seja, sem pressão nenhuma aplicada, mede-se cinco vezes o tempo de percurso, coloca-se o segundo passo correspondente a pressão de 100 kgf/cm^2, mede-se novamente cinco vezes o tempo assim por diante até a pressão máxima de 300 kgf/cm^2. Após esse primeiro procedimento observou-se que o tempo de percurso praticamente não se modificou ou teve uma variação de no máximo oito nanosegundos da pressão máxima até o estado livre de tensões. Não foi possível identificar com precisão os motivos desta inconsistência. Uma explicação é o escoamento localizado na região do

furo, o que pode ter afetado o resultado na primeira aplicação em cada barra, mas isso não foi comprovado.

Para sanar este problema um novo procedimento foi adotado. Primeiramente, para o estado livre de tensões, medem-se os cinco tempos de percurso. Aumenta-se a pressão para 100 kgf/cm^2 e mede-se um tempo de percurso apenas. Após isso aliviar a pressão, novamente subir para 100 kgf/cm^2 e mede-se o tempo de percurso, repetir até completar os cinco tempos necessários para análise. Repete-se este procedimento acrescentando-se 100 Kgf/cm^2, até a pressão máxima de 300 kgf/cm^2. Os resultados com este novo procedimento mostraram-se satisfatórios, com total concordância com os resultados determinados na literatura, que prevê o valor de 2,38 para a constante (Bray e Stanley, 1997).

A figura 3.20 mostra um gráfico com os resultados determinados para o aço 1020, a tabela 3.4 mostra o resultado determinado para cada barra e o resultado final da constante acustoelástica.

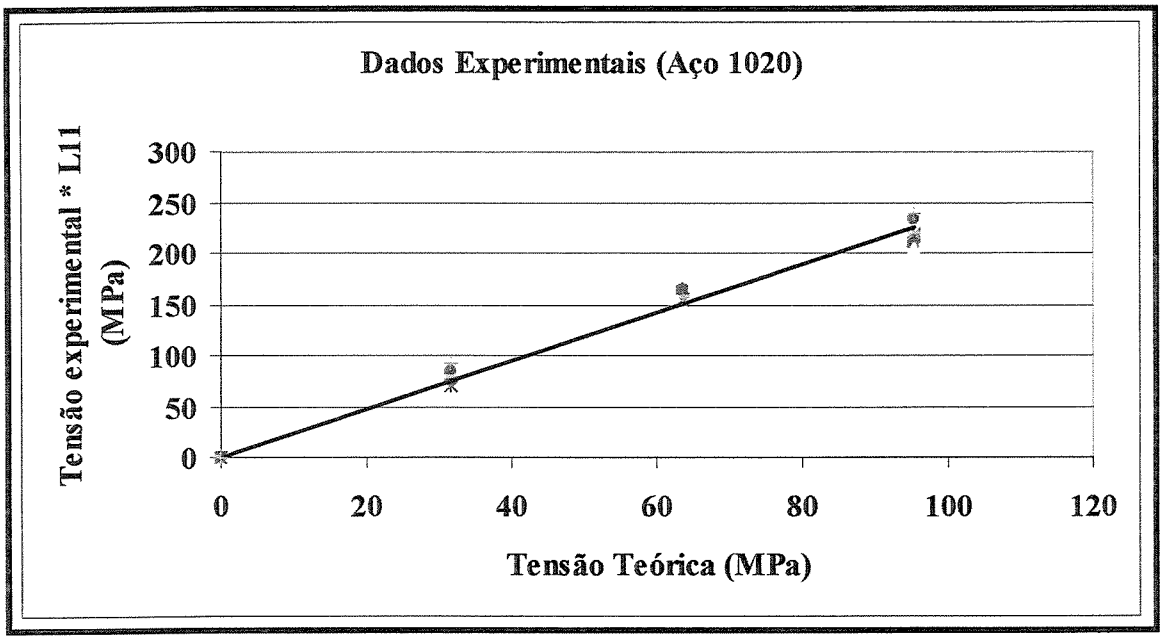


Figura 3.20: Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas (aço 1020).

Tabela 3.4: Resultados das constantes acustoelásticas para o aço 1020.

Barra 1	**Barra 2**	**Barra 3**	**Barra 4**
2,33375	*2,3244*	*2,16855*	*2,3777*
Barra 5	**Barra 6**	**Barra 7**	**Barra 8**
2,3234	*2,5033*	*2,5206*	*2,31975*
CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA FINAL			
2,36		*Desvio padrão = 0,112*	

3.6.2 Levantamento das Constantes Acustoelásticas para Ondas Longitudinais (L_{11}) para Aços API 5L X70.

Para estes testes foram cortadas 28 barras com dimensões de 760 x 70 x 10,8 mm. Estas amostras foram extraídas de chapas diferentes. De cada chapa foram retiradas 14 amostras para a determinação das constantes, dentre as quais 7 no sentido de laminação longitudinal e 7 no sentido de laminação transversal. Das barras longitudinais de cada chapa, 10 sofreram alívio de tensão, e 4 não passaram por esse processo. E para as barras transversais, também para cada chapa, 4 passaram por alívio de tensões e 10 não passaram. Maiores detalhes, conclusões e peculiaridades do levantamento das constantes acustoelástica do aço API 5L X70 podem ser vistas na tese de mestrado de Caetano (2003).

Os procedimentos para este tipo de levantamento são idênticos aos do levantamento das constantes do item anterior. As figuras 3.21 (a), (b), (c) e (d) mostram os gráficos com os resultados determinados para cada tipo de barra com o seu respectivo sentido de laminação e tratamento térmico para alívio de tensões, e a tabela 3.5 o resultado da constante acustoelástica final.

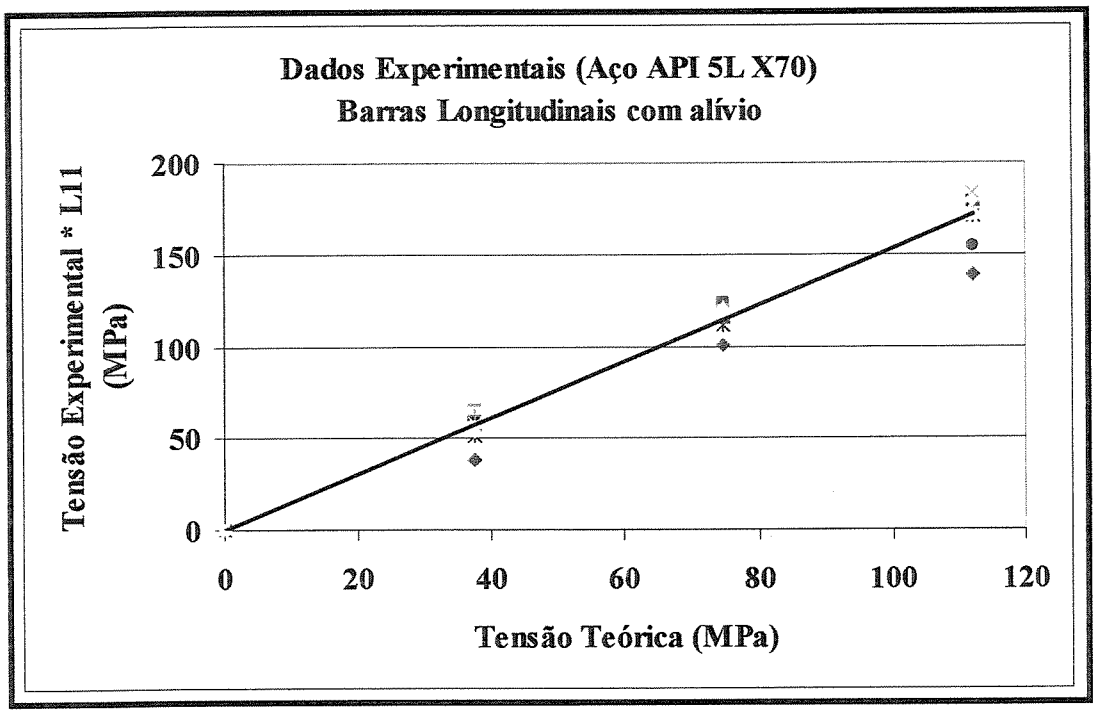


Figura 3.21 (a): Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras longitudinais com alívio.

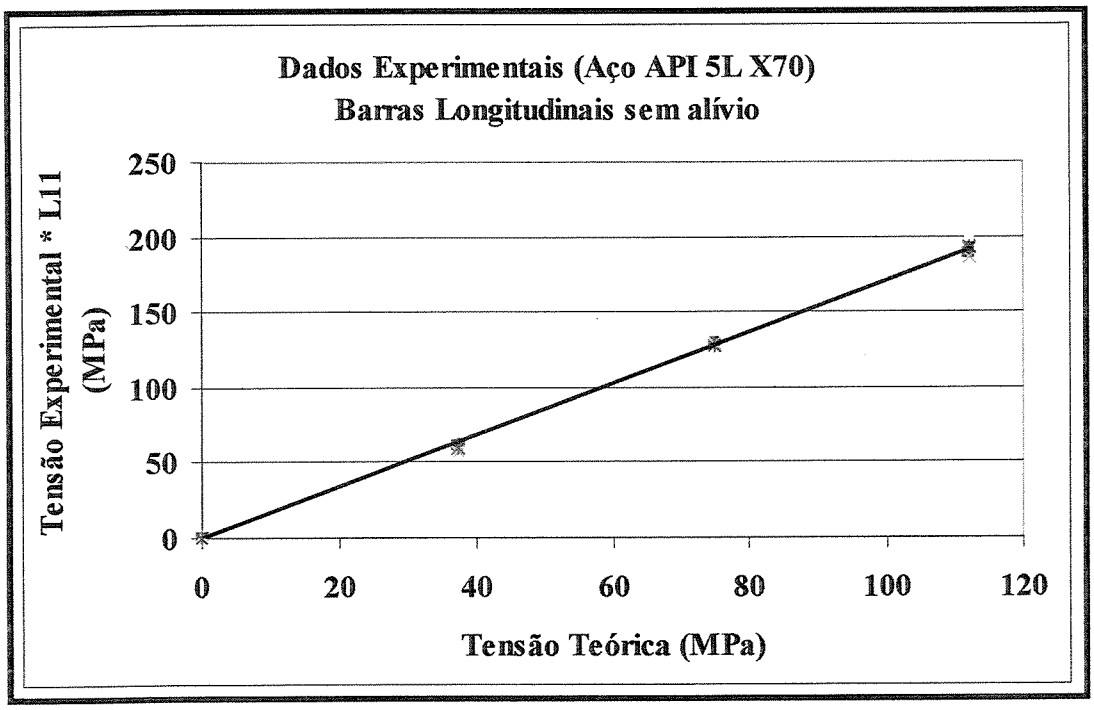


Figura 3.21 (b): Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras longitudinais sem alívio.

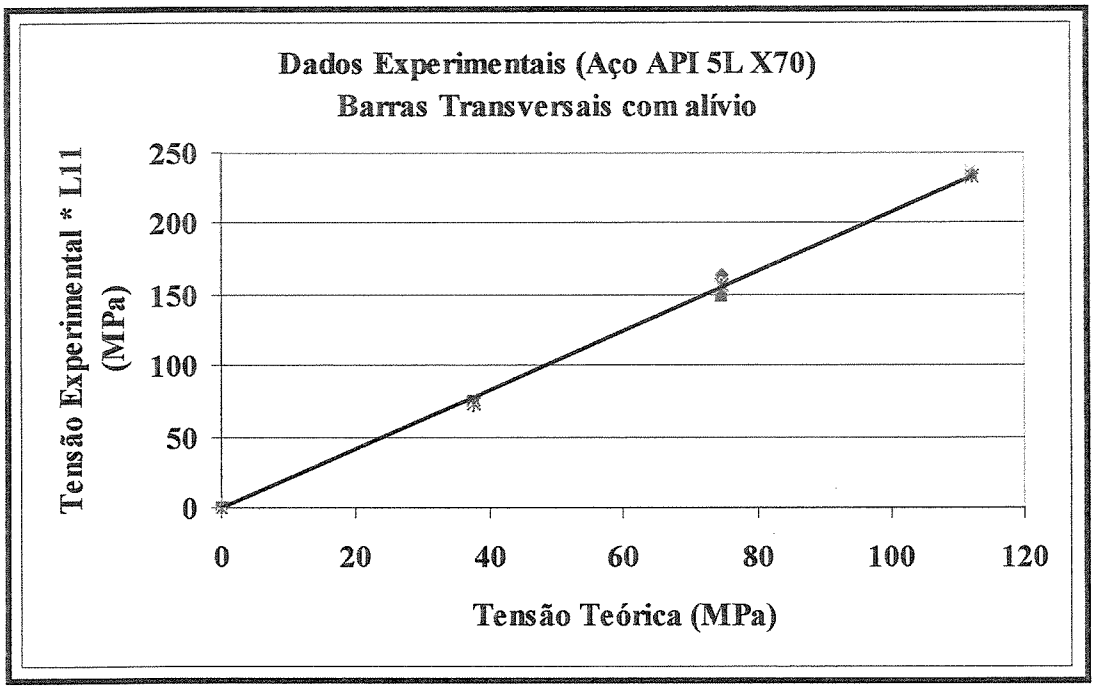


Figura 3.21 (c): Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras transversais com alívio.

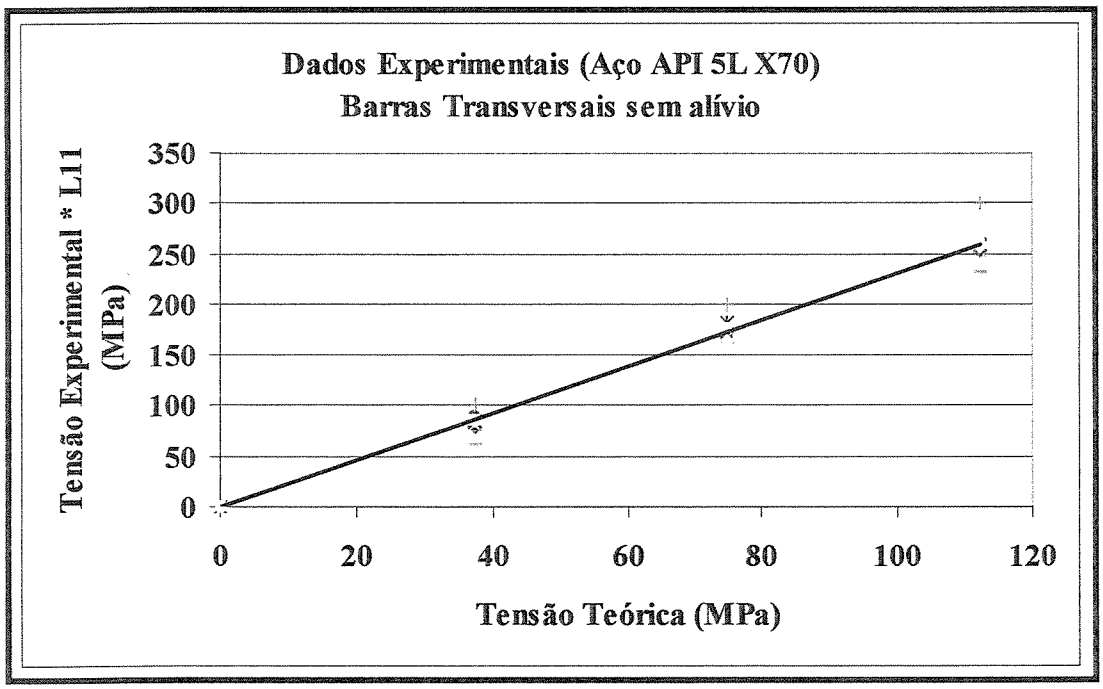


Figura 3.21 (d): Gráfico para determinação das constantes acustoelásticas para ondas longitudinais (aço API 5L X70). Barras transversais sem alívio.

Tabela 3.5: Resultados das constantes acustoelásticas para o aço API 5L X70 (Caetano, 2003).

BARRAS LONGITUDINAIS		BARRAS TRANSVERSAIS	
Constante /Alívio	**Constante /Sem alívio**	**Constante /Alívio**	**Constante /Sem alívio**
1.53	*1.71*	*2.07*	*2.28*

3.6.3 Constantes Acustoelásticas para Ondas Transversais ou Cisalhantes (C_a) para Aços API 5L X70 (Caetano, 2003).

Neste teste as mesmas barras utilizadas no procedimento anterior foram utilizadas. Dois tipos de levantamento foram executados. Determinação das constantes para barras que sofreram alívio de tensões e levantamento para barras sem alívio de tensões. Dezesseis barras foram selecionadas sendo oito na direção longitudinal e oito na direção transversal. Os procedimentos são os mesmos dos casos anteriores, apenas observando a mudança de transdutor, que neste caso é o de ondas transversais. A tabela 3.6 mostra o resultado da constante acustoelástica final.

Tabela 3.6: Resultados das constantes acustoelásticas para ondas transversais para aços API 5L X70 (Caetano, 2003).

BARRAS LONGITUDINAIS (MPa^{-1})	
Constante com alívio	**Constante sem alívio**
$-21{,}335 \times 10^{-6}$	$-19{,}4294 \times 10^{-6}$
BARRAS TRANSVERSAIS (MPa^{-1})	
Constante com alívio	**Constante sem alívio**
-9.631×10^{-6}	$-9{,}267 \times 10^{-6}$

3.6.4 Procedimento para Soldagem das Chapas e Análise Metalográfica das Amostras.

O processo utilizado para a soldagem das placas de aço para a verificação de tensões residuais, tanto para o API 5L X65 como para o API 5L X70, foi o FCAW-G ("Soldagem a arco com arame tubular"). Este processo consiste no uso de um eletrodo de configuração tubular, no caso destes experimentos o "Metal Cored Wires", como visto na seção 3.4.2, contendo fluxo em seu interior e deixando a parte metálica externa livre para o contato metálico. O gás de proteção utilizado foi o argônio com mistura de 25 % de CO_2.

A corrente e a tensão de soldagem foram regulados através da fonte INVERSAL 300 IMC. Esta fonte é conectada diretamente a uma placa de conversão A/D instalada num computador IBM PC. Através de um programa chamado Aqdados pode-se verificar se a corrente e a tensão permaneceram constantes em um valor pré determinado, durante o processo de soldagem. Um aparelho capta os valores de corrente e tensão da fonte e os manda diretamente para a placa de conversão A/D, instalada no computador.

Foram efetuados dois passes de solda sobrepostos permanecendo os parâmetros de soldagem inalterados durante os experimentos, variando-se apenas a velocidade de soldagem, como mostrado na tabela 3.7. As juntas foram produzidas em soldas de topo, com a tocha perpendicular a chapa com uma inclinação de 10°. Antes da execução da soldagem, todos os corpos de prova sofreram jateamento abrasivo para limpeza. Em seguida, as superfícies foram limpas com ar comprimido isento de água.

Tabela 3.7: Parâmetros de soldagem (Perfil de Tensões Residuais).

	Corrente (A)	**Tensão (V)**	**Velocidade de soldagem (mm/min)**	**Stick-out (mm)**	**Vazão do gás (l/min)**
1° Passe	*270*	*25*	*200*	*20*	*12*
2° Passe	*270*	*25*	*250*	*20*	*12*

Para o caso da soldagem das placas de aço API 5L X70, para verificação do fenômeno da relaxação, o mesmo procedimento de soldagem e os mesmos equipamentos foram utilizados. Neste caso, apenas um passe de solda foi efetuado em cada lado da chapa. Novos parâmetros de soldagem foram determinados e estão listados na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Parâmetros de soldagem (Relaxação das chapas).

	Corrente (A)	**Tensão (V)**	**Velocidade de soldagem (mm/min)**	**Stick-out (mm)**	**Vazão do gás (l/min)**
2° Passe	*160*	*20*	*200*	*20*	*12*

A figura 3.22 (a) mostra a tocha preparada na peça de aço API 5L X65 e a figura 3.22 (b) um detalhe aproximado. A figura 3.23 mostra o sistema de soldagem completo, que é totalmente automatizado.

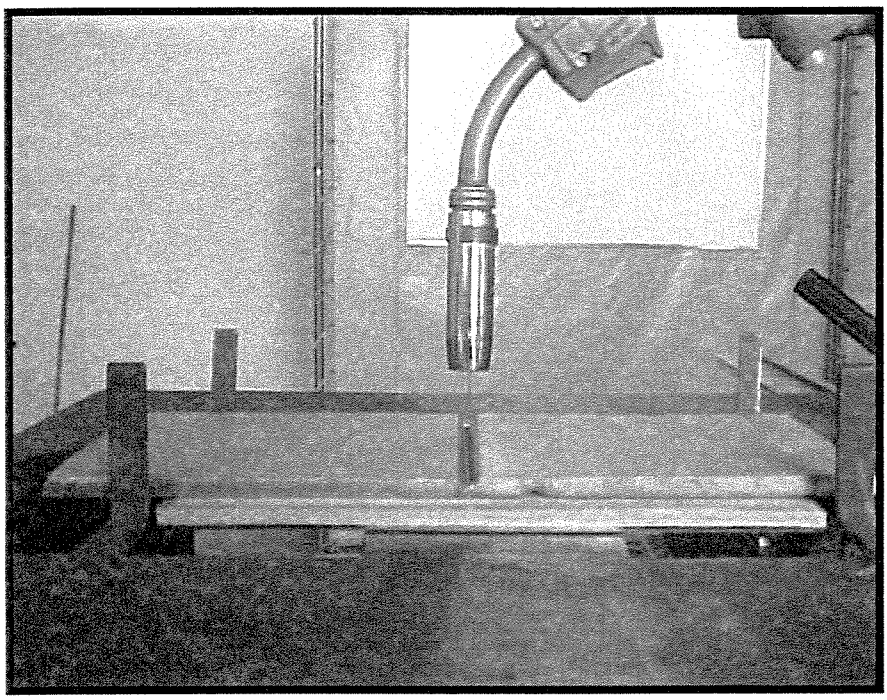


Figura 3.22 (a): Peça de aço API 5L X65 pronta para soldagem.

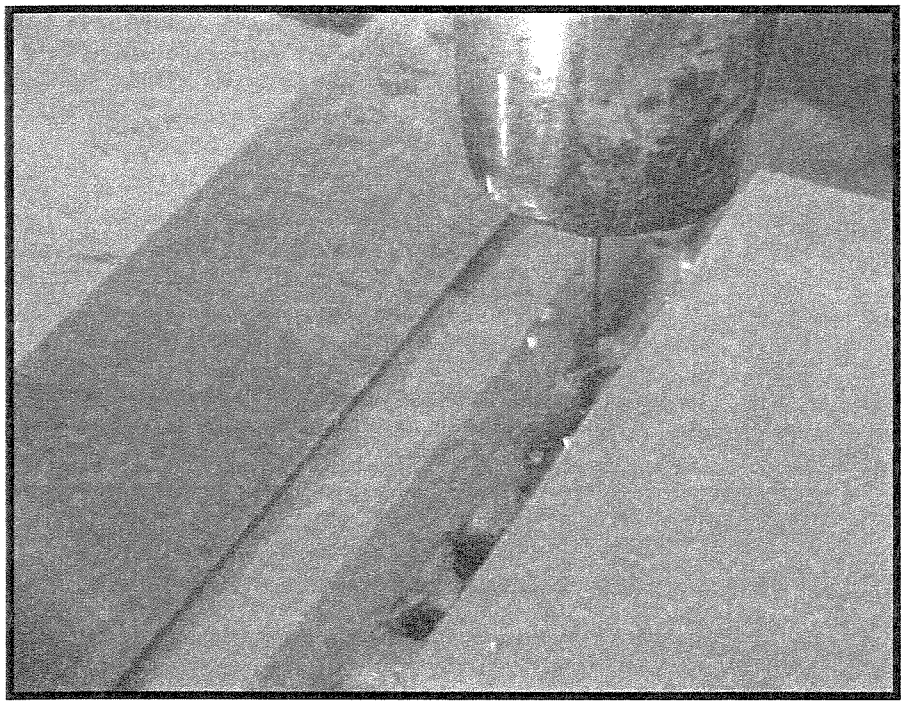


Figura 3.22 (b): Detalhe da tocha na peça a ser ensaiada.

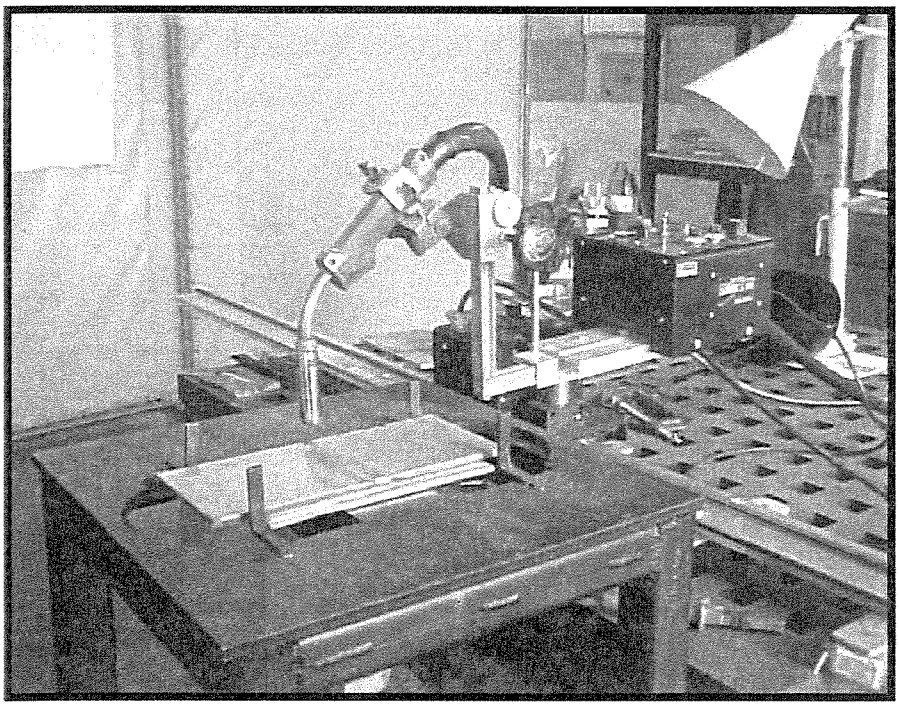


Figura 3.23: Sistema de soldagem automatizado.

Para a verificação da microestrutura da região do conjunto soldado, as amostras foram preparadas para metalografia. Foram retiradas amostras de seções transversais e longitudinais ao cordão de solda. Estas amostras tiveram a preparação metalográfica com lixamento na seqüência usual de preparação do ensaio, da granulação 100 até a granulação de 1200. O lixamento foi seguido de polimento com pastas de diamante de granulação 6 e 1 μm, respectivamente. Após o polimento, foi realizado o ataque químico às superfícies, utilizando-se o reagente Nital 2% por 12 segundos. Os exames metalográficos foram efetuados em um microscópio ótico Neophot, com ampliação de 250 vezes.

Os ensaios metalográficos foram realizados nas peças de aço API 5L X70, após a soldagem das chapas. Pedaços de amostras do cordão de solda foram retirados antes e depois do tratamento térmico. Foram analisadas também as microestruturas do metal de base antes e após a soldagem. Para o aço API 5L X65, apenas pedaços do material de base foram retirados, para verificação do sentido de laminação.

3.6.5 Determinação dos Tempos de Percurso nos Conjuntos Soldados.

a) Aço API 5L X65

Para esta análise foram utilizados cinco pares de chapas, cujas dimensões e características estão mostradas na seção 3.2. As chapas foram designadas como: TMP 6; TMP 12; TMP 4; TMP 9; TMP 19; TMP 36; TMP 41; TMP 59; TMP 43 e TMP 58. Foram soldadas duas a duas, seguindo a ordem mostrada anteriormente. Todas passaram por um tratamento térmico seguido de jateamento, para melhoria da qualidade da superfície.

Inicialmente, os tempos de percurso foram determinados para cada chapa individualmente, para servir de referência para o posterior cálculo das tensões. Após, as chapas foram soldadas e o cordão de solda foi fresado, a fim de criar uma superfície plana e lisa para a colocação do transdutor ultra-sônico. As medidas foram realizadas com o transdutor localizado paralelo ao cordão de solda movimentando-se em passos de 3 mm na região do metal fundido e da ZTA e em passos de 5 mm na região do metal de base, até que se completasse a distância de 140 mm do

cordão de solda. As amostras foram então levadas para alívio de tensões, novamente foram jateadas para limpeza da região de medição e novas medidas foram efetuadas nas mesmas posições descritas anteriormente. A figura 3.24 mostra um esquema do movimento e do posicionamento do cabeçote ultra-sônico em relação ao cordão de solda da chapa.

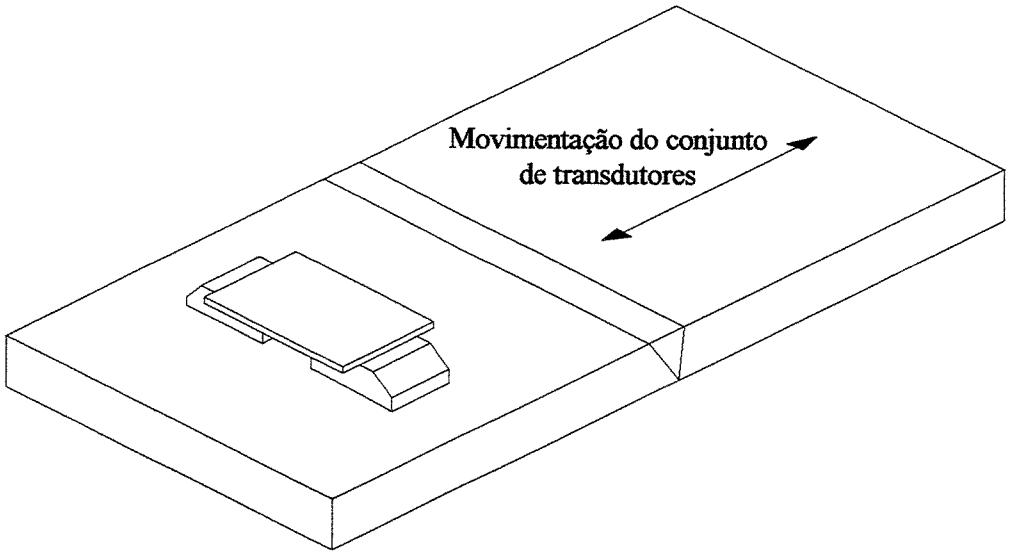


Figura 3.24: Movimentação do conjunto de transdutores em relação ao cordão de solda.

O procedimento básico para medição do tempo de percurso consiste em colocar o cabeçote ultra-sônico cinco vezes em cada posição. Para cada medição, o sensor foi retirado, a área de contato entre peça e o transdutor foi limpa, uma nova camada de gel acoplante foi aplicada e o sensor foi novamente colocado na posição de medição. A força ajustada entre o transdutor e a barra, que é feita através do sargento, foi de aproximadamente 800 N.

Para estas medições algumas configurações tiveram que ser alteradas no programa L-Stress V1.0. Através deste software, o trem de ondas completo é captado como pode ser visto em detalhe na figura 3.25, e pode ser visto também através da tela do programa "osciloscópio" (figura 3.18). O tempo de percurso é adquirido através do instante inicial do pulso, chamado de disparo, até o segundo cruzamento com o zero do primeiro trem de ondas, figura 3.26. No caso deste experimento, foi escolhido o segundo cruzamento com o zero, não significando que outro ponto de medida não possa ser utilizado. O primeiro cruzamento também seria uma opção,

bastando mudar o indicador de inclinação de "Falling" para "Rising", no controle mostrado na tela do osciloscópio (figura 3.18).

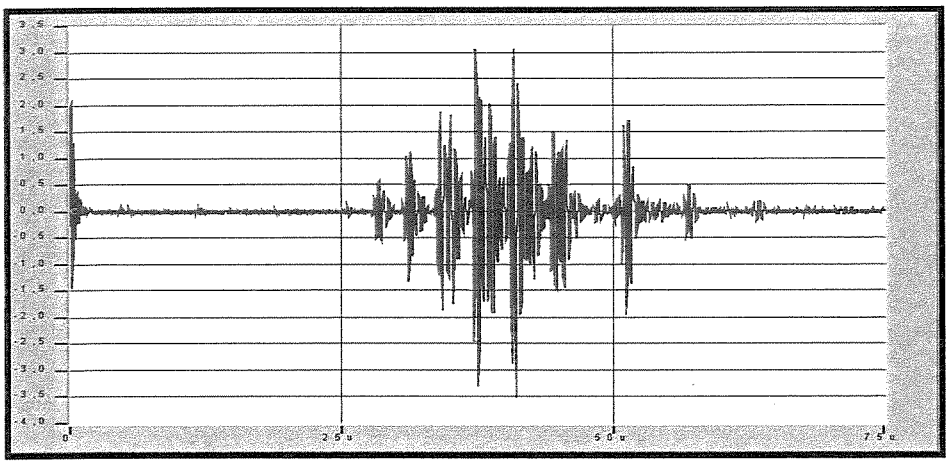


Figura 3.25: Trem de ondas captado pela placa (ondas longitudinais).

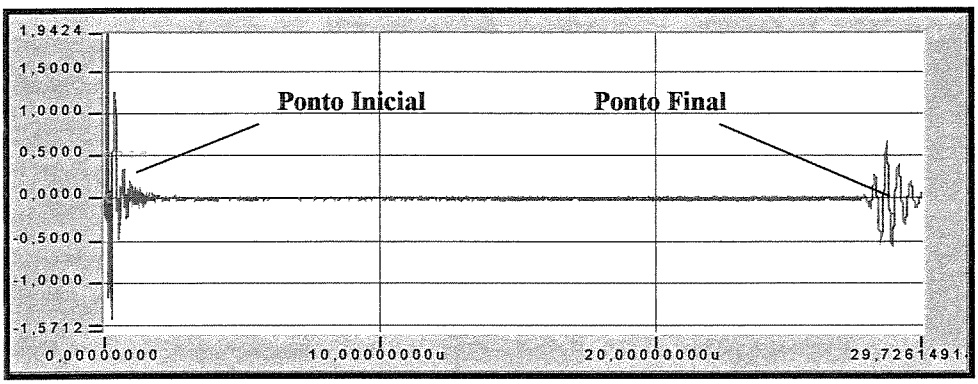


Figura 3.26: Detalhe da localização dos pontos para determinação do tempo de percurso (ondas longitudinais).

O programa desenvolvido é idêntico a um osciloscópio comercial. Deste modo, uma vez colocado em funcionamento, o trem de ondas é captado de forma contínua. O software é capaz de adquirir várias ondas em cada medição, de modo que se possa escolher o número de ondas necessárias para a leitura dos tempos de percurso. No caso deste experimento foram computadas vinte ondas e depois calculada uma média simples. Para cada onda foi feita uma interpolação de dados para a medição exata do tempo de percurso. Isto foi necessário porque a placa possui uma

freqüência máxima de amostragem de 100 MHz, o que causa uma distância entre pontos da ordem de dez nanosegundos, dificultando a medição, uma vez que os resultados são extremamente sensíveis e a mudança de tempo é da ordem de nanosegundos.

Para melhorar a precisão dos dados obtidos foi feita uma média das médias dos dados das ondas originais conforme citado. Isto tem que ser feito para anular qualquer tipo de imperfeição entre acoplante e peça e outros. Vale a pena ressaltar que esse número (20), tanto das médias das ondas originais como a média das médias, pode ser escolhido para cada caso conforme a conveniência e aplicação que se deseja fazer, e pode ser escolhido diretamente da tela de "osciloscópio" do programa L-Stress.

A figura 3.27 (a) mostra o esquema completo, montado para a determinação dos tempos de percurso nas chapas soldadas, e a figura 3.27 (b) mostra em detalhe o posicionamento do sensor sob a chapa sendo pressionado pelo sargento.

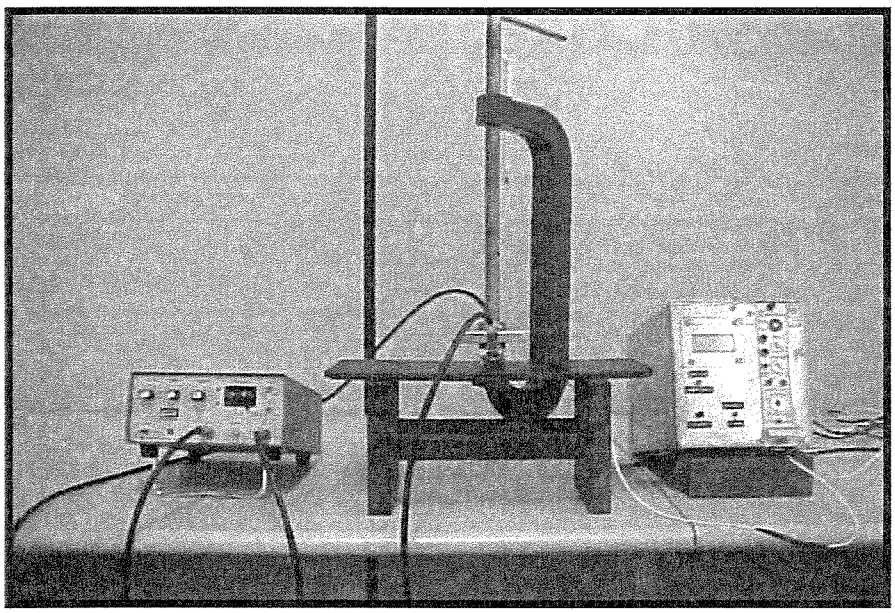


Figura 3.27 (a): Aparato para medição dos tempos de percurso em chapas soldadas (Aço API 5L 65).

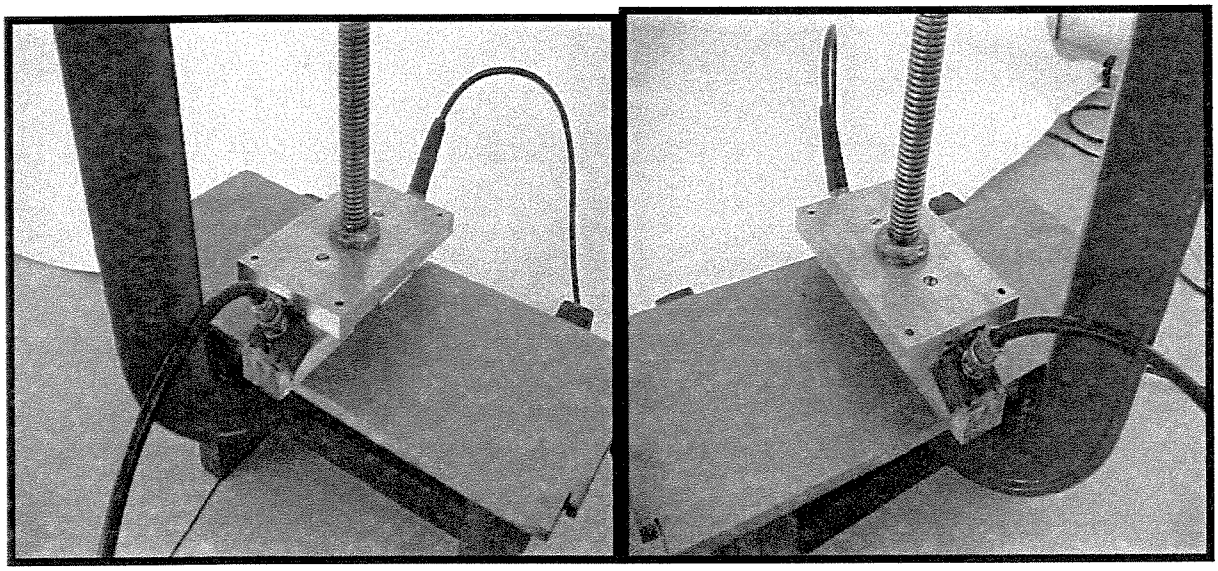


Figura 3.27 (b): Detalhe do posicionamento do sensor sobre a chapa ensaiada (Aço API 5L X65).

b) Aço API 5L X70

Para esta análise foram utilizados dez conjuntos soldados, cujas dimensões e características estão mostradas na seção 3.2. Cinco conjuntos são no sentido de laminação longitudinal e os outros cinco no sentido transversal a laminação. Os conjuntos foram designados como C11, C12, C13, C14 e C15, transversais, e C21, C22, C23, C24 e C25, longitudinais. Para a determinação dos tempos de percurso para o estado livre de tensões foi necessário que cada placa individualmente, antes da soldagem, fosse tratada termicamente, seguida de jateamento para obter uma superfície livre de imperfeições. Os tempos de referência antes da soldagem em cada chapa não foram tomados em apenas um ponto e sim em oito pontos espaçados de 20 mm. O tempo de percurso final de referência foi obtido retirando-se uma média destes valores. Aqui o cordão de solda também foi fresado para se obter uma superfície plana para a colocação do transdutor. Este foi colocado paralelo ao cordão de solda em pontos espaçados de 3 mm no metal de solda e na ZTA e de 5 mm no metal de base, até atingir uma distância de 100 mm. Deste ponto em diante foi utilizado um espaçamento de 15 mm até o final da placa, o que corresponde a uma distância de 175 mm da linha de centro do transdutor até a linha de centro do cordão soldado.

O mesmo procedimento adotado para as chapas de aço API 5L X65 e a mesma configuração do programa de aquisição de dados foram utilizados neste caso.

Para a determinação das tensões residuais longitudinais para o aço API 5L X70, empregou-se também ondas transversais ou cisalhantes. O espaçamento do transdutor no metal de solda e na ZTA foi de 3 mm e no metal de base de 20 mm até a distância de 100 mm, outros três pontos até a distância de 175 mm também foram escolhidos.

Algumas modificações foram necessárias no programa de aquisição de dados. Diferentemente das ondas longitudinais, para ondas cisalhantes aqui o tempo de percurso é determinado através de dois trens de ondas consecutivos. O segundo cruzamento com o zero para cada trem de onda foi utilizado para a determinação do tempo de percurso que foi utilizado nos cálculos. A figura 3.28 mostra o trem de ondas completo, e a figura 3.29 os pontos escolhidos para a determinação do tempo de percurso. Os mesmos procedimentos e a mesma configuração do programa foi utilizado aqui.

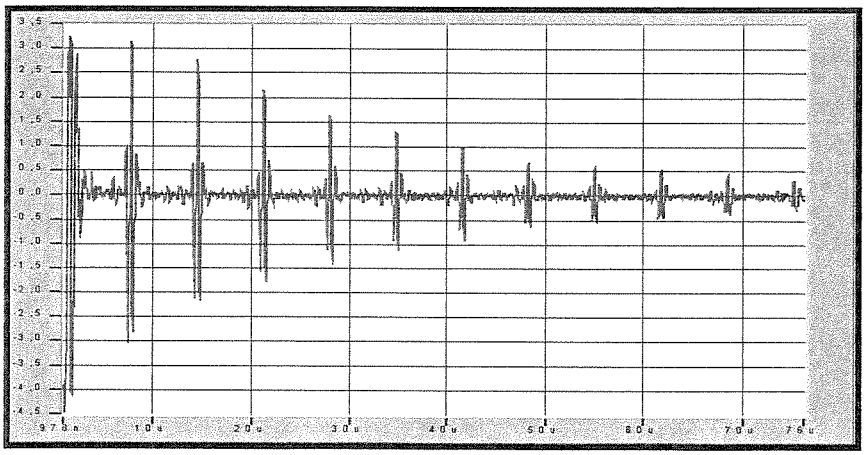


Figura 3.28: Trem de ondas captado pela placa (Ondas Transversais ou Cisalhantes).

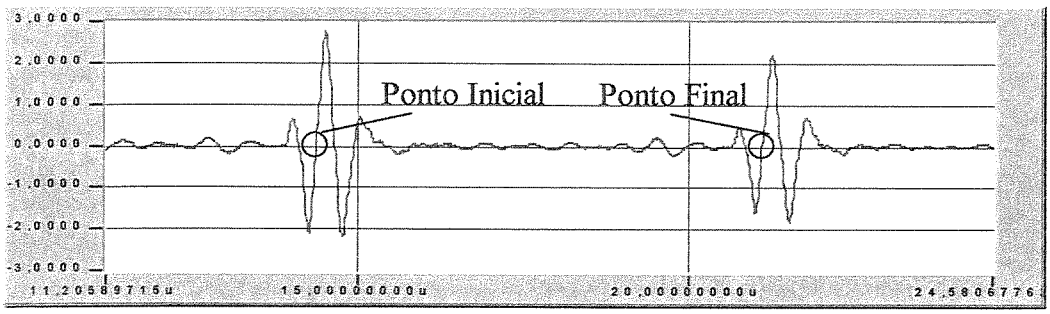


Figura 3.29: Detalhe da localização dos pontos para determinação do tempo de percurso para ondas transversais ou cisalhantes.

A figura 3.30 mostra em detalhe o posicionamento do sensor sob a chapa sendo pressionado pelo sargento.

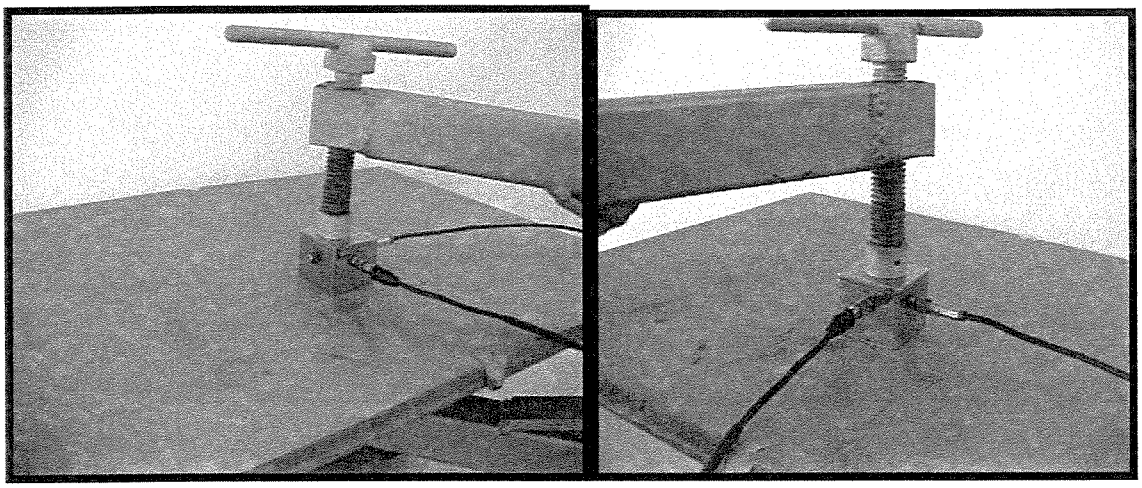


Figura 3.30: Detalhe do posicionamento do sensor sobre a chapa ensaiada (Aço API 5L X70).

3.6.6 Procedimento para Determinação de Tensões nas Chapas com Juntas Soldadas.

O procedimento básico para determinação de tensões consiste primeiramente em determinar o tempo de percurso em cada ponto de medição. Foram determinados os tempos de percurso antes da soldagem, (tempo de referência), e após a soldagem, (placas já soldadas). Estes tempos de percurso devem ser inseridos na fórmula 2.21, capítulo 2 seção 2.3.1, para ondas longitudinais, e na fórmula 2.24 do mesmo capítulo e seção 2.3.3, para ondas transversais ou cisalhantes. Analisando estas fórmulas, existe a necessidade do prévio conhecimento das constantes acustoelásticas para a determinação correta da tensão residual. Como visto em seções anteriores, estas constantes foram determinadas (Caetano, 2003) e serão utilizadas nestas análises. Vale lembrar que, como cada sentido de laminação das placas é conhecido, tomou-se o cuidado de utilizar a constante correta para cada direção, ou seja, aquela dos corpos de prova com alívio de tensões em cada direção.

3.6.7 Verificação do Fenômeno de Relaxação nas Chapas (Aço API 5L X70).

Para a verificação da relaxação de placas soldadas foram utilizadas dezesseis chapas com as dimensões e características mostradas na seção 3.2. Estas chapas foram extraídas de uma chapa de aço API 5L X70, doada pela empresa Confab. Oito dessas chapas foram cortadas no sentido longitudinal, ou seja, maior comprimento paralelo ao sentido de laminação, e outras oito no sentido transversal, ou seja, maior comprimento perpendicular ao sentido de laminação.

As chapas longitudinais são designadas como: CR21, CR22, CR23, CR24, CR25, CR26, CR27 e CR28 e as chapas transversais como: CR11; CR12; CR13; CR14, CR15, CR16, CR17 e CR18. Todas as chapas, antes de serem soldadas, foram levadas a um forno para tratamento térmico de alívio de tensões, para eliminar qualquer tipo de tensão que possa ter sido introduzida durante o processo de usinagem. Após este tratamento, as peças voltaram para o laboratório para a medição dos tempos de percurso para o estado livre de tensões. As chapas foram lixadas no local de medição. A temperatura do laboratório foi controlada em cerca de 24° C.

O transdutor ultra-sônico foi colocado no centro das chapas, paralelo a linha média do menor comprimento das chapas e entre os dois rasgos em forma de "T". Após a medição dos tempos de percurso para o estado livre de tensões, as chapas foram levadas para o laboratório de soldagem do Departamento de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp para a soldagem dos rasgos verticais das chapas.

Para uma verificação correta da relaxação das chapas, é importante que seja anotada a hora entre solda e corte destas chapas. A tabela 3.9 mostra a designação de cada chapa com suas respectivas horas de soldagem e corte. O corte é necessário para que seja efetuada a retirada do esforço interno.

Tabela 3.9: Horários de soldagem e corte das chapas.

	Hora de soldagem		Hora de corte	
Chapa	***Dia***	***Hora***	***Dia***	***Hora***
CR 11	*13/01/2003*	*11:14*	*14/01/2003*	*9:48*
CR 12	*13/01/2003*	*11:38*	*13/01/2003*	*16:21*
CR 13	*13/01/2003*	*14:40*	*15/01/2003*	*10:51*
CR 14	*13/01/2003*	*15:16*	*14/01/2003*	*16:28*
CR 15	*13/01/2003*	*15:44*	*15/01/2003*	*15:53*
CR 16	*10/01/2003*	*13:07*	*28/01/2003*	*12:30*
CR 17	*10/01/2003*	*16:40*	*17/01/2003*	*11:25*
CR 18	*13/01/2003*	*12:12*	*16/01/2003*	*16:40*
CR 21	*13/01/2003*	*11:03*	*14/11/2003*	*10:44*
CR 22	*13/01/2003*	*11:26*	*13/01/2003*	*15:51*
CR 23	*13/01/2003*	*15:06*	*15/01/2003*	*10:18*
CR 24	*13/01/2003*	*15:35*	*14/01/2003*	*15:35*
CR 25	*13/01/2003*	*15:55*	*15/01/2003*	*14:46*
CR 26	*10/01/2003*	*16:55*	*28/01/2003*	*13:20*
CR 27	*10/01/2003*	*16:27*	*17/01/2003*	*10:51*
CR 28	*13/01/2003*	*11:59*	*16/01/2003*	*15:55*

Após a soldagem das chapas, estas foram novamente levadas ao laboratório. Foi necessário lixar a área de inspeção e aguardar que as chapas chegassem a temperatura de 24 °C. Segundo a tabela 3.9, cada chapa, após as medições necessárias, foi levada ao Laboratório de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola para o corte dos rasgos verticais soldados através de uma serra de fita.

Após cada corte as chapas voltaram para o laboratório. Mais uma vez foram lixadas, esperado o tempo necessário para que estas atingissem a temperatura de 24 °C, e medido os tempos de percurso.

Para cada chapa foram feitas quatro medições entre soldagem e corte e outras quatro medições após o corte das mesmas. As configurações do programa de aquisição de dados foram as mesmas utilizadas em seções anteriores e os transdutores, como em procedimentos anteriores, foram aplicados cinco vezes em cada medição para cada chapa.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão mostrados os resultados do levantamento do perfil de tensões residuais para aços API 5L X70 e aços API 5L X65. Estes levantamentos foram feitos com geração de ondas longitudinais e ondas transversais ou cisalhantes. Para o caso de ondas longitudinais, o perfil de tensões residuais foi verificado para condições dos corpos de prova antes e depois do tratamento, enquanto que para ondas transversais o levantamento foi feito apenas antes do tratamento térmico. Também foi verificado o fenômeno de relaxação de tensões em chapas de aço API 5L X70. Ensaios metalográficos foram realizados nas chapas de aço API 5L X70 para a verificação da influência da microestrutura nas velocidades ultra-sônicas.

4.1 Determinação do Perfil de Tensões Residuais para Aços API 5L X65.

Como visto no capítulo anterior, as placas de aço API 5L X65 foram medidas individualmente, logo após o alívio de tensões, para a determinação do tempo de percurso para o estado livre de tensões. A tabela 4.1 mostra os tempos de percurso para os cinco conjuntos soldados com suas respectivas médias e seus respectivos desvios padrões. Os tempos de percurso para o estado livre de tensões foram medidos em apenas um ponto da chapa. A direção perpendicular mostrada na tabela diz respeito ao tempo de percurso quando o transdutor ultra-sônico foi posicionado perpendicular ao chanfro, e a direção paralela diz respeito ao tempo de percurso quando o transdutor ultra-sônico foi posicionado paralelo ao chanfro, que é valido para este trabalho.

Tabela 4.1: Tempos de percurso para estado sem tensões para aços API 5L X65 (nanosegundos).

Chapa	TMP 6		TMP12		TMP 4		TMP 9		TMP 43	
Pontos	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.
1	28246	28368	28250	28389	28290	28372	28267	28360	28297	28426
2	28240	28372	28252	28381	28295	28374	28268	28358	28286	28421
3	28244	28371	28248	28387	28292	28375	28270	28358	28294	28420
4	28240	28369	28252	28380	28290	28370	28271	28364	28288	28419
5	28242	28372	28249	28381	28291	28371	28267	28363	28288	28419
Média	*28242*	*28371*	*28250*	*28384*	*28292*	*28373*	*28269*	*28361*	*28291*	*28421*
Desvio	*2,3*	*1,6*	*2*	*3,9*	*1,8*	*2*	*1,5*	*2,8*	*4,7*	*2,8*
Chapa	**TMP 19**		**TMP 36**		**TMP 41**		**TMP 59**		**TMP 58**	
Pontos	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.	Par.	Perp.
1	28286	28459	28324	28410	28285	28398	28277	28368	28255	28386
2	28291	28454	28314	28399	28275	28389	28293	28373	28257	28387
3	28290	28455	28324	28403	28282	28392	28284	28375	28256	28385
4	28289	28453	28322	28403	28282	28396	28284	28370	28258	28386
5	28291	28452	28322	28403	28282	28396	28284	28370	28254	28383
Média	*28289*	*28455*	*28321*	*28404*	*28281*	*28394*	*28284*	*28271*	*28256*	*28386*
Desvio	*2*	*2,6*	*4,3*	*3,9*	*3,6*	*3,4*	*5,6*	*2,5*	*1,6*	*1,4*

Para a determinação da tensão foi utilizada a constante acustoelástica apresentada no capítulo anterior, para o aço API 5L X70. Tomou-se o cuidado em utilizar a constante correta para este caso. Uma vez que, como determinado no capítulo anterior, o sentido de laminação é perpendicular ao posicionamento do transdutor e as chapas foram aliviadas para a retirada de tensões, a constante acustoelástica utilizada foi a de valor: L_{11}=2,07, tabela 3.5.

Todas as medições dos tempos de percurso foram executadas em temperatura controlada. Tomou-se cuidado para que não ocorressem variações para evitar alguma mudança significativa. A temperatura no ato das medições variou entre 23° C e 25° C. Como tempo de percurso na determinação das tensões, na zona termicamente afetada e na zona do cordão de solda, adotou-se um valor médio dos tempos de percurso das duas chapas.

As medições dos tempos de percurso após a soldagem mostraram um aumento em relação aos tempos levantados para o estado livre de tensões. Com esses dois tempos de percurso, com o

módulo de elasticidade do material, com a constante acustoelástica levantada para o aço API 5L X70 e com o tempo estimado para que a onda percorra o material, as tensões ponto a ponto foram calculadas. As figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram a distribuição de tensões residuais calculadas após da soldagem.

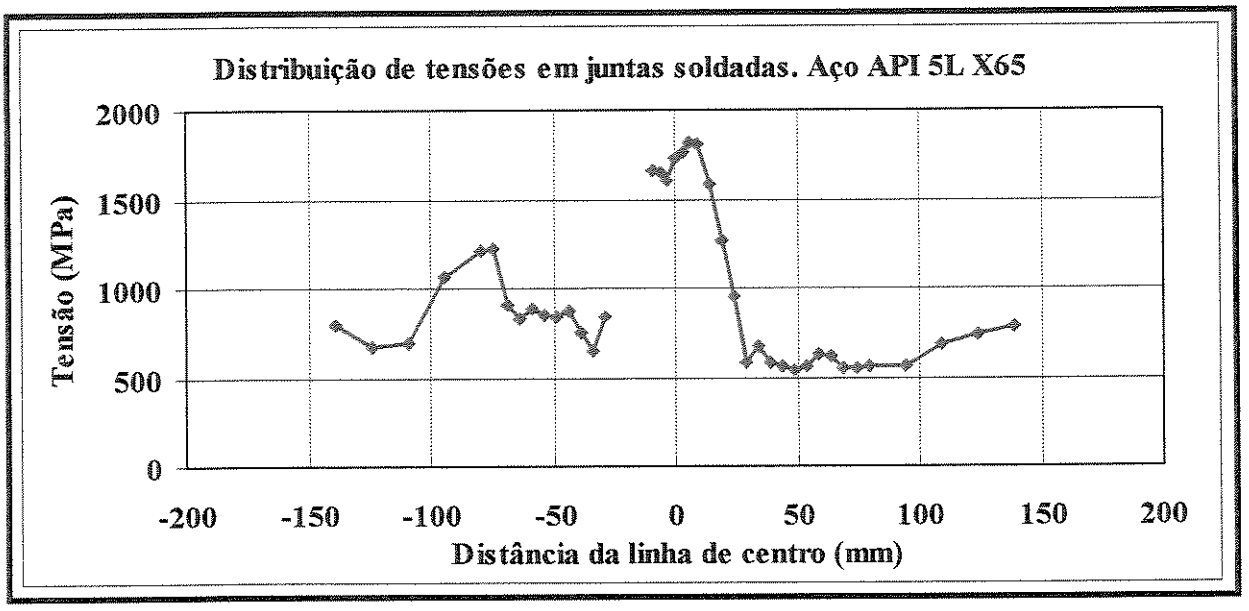


Figura 4.1: Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 6 – 12.

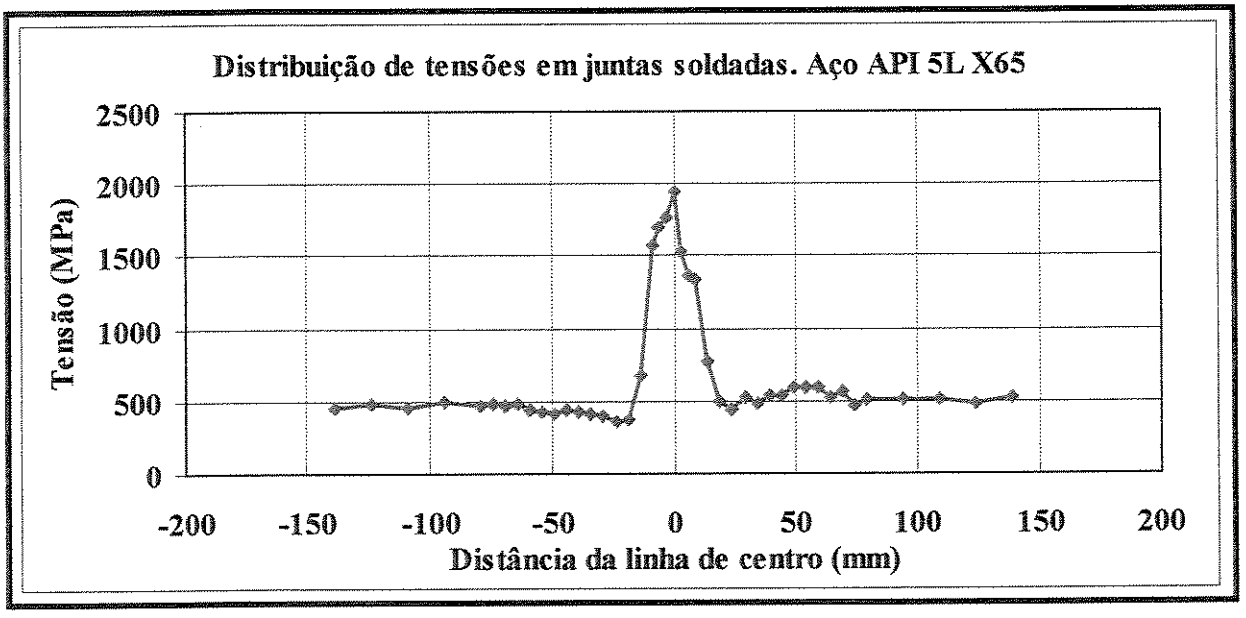


Figura 4.2: Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 4 – 9.

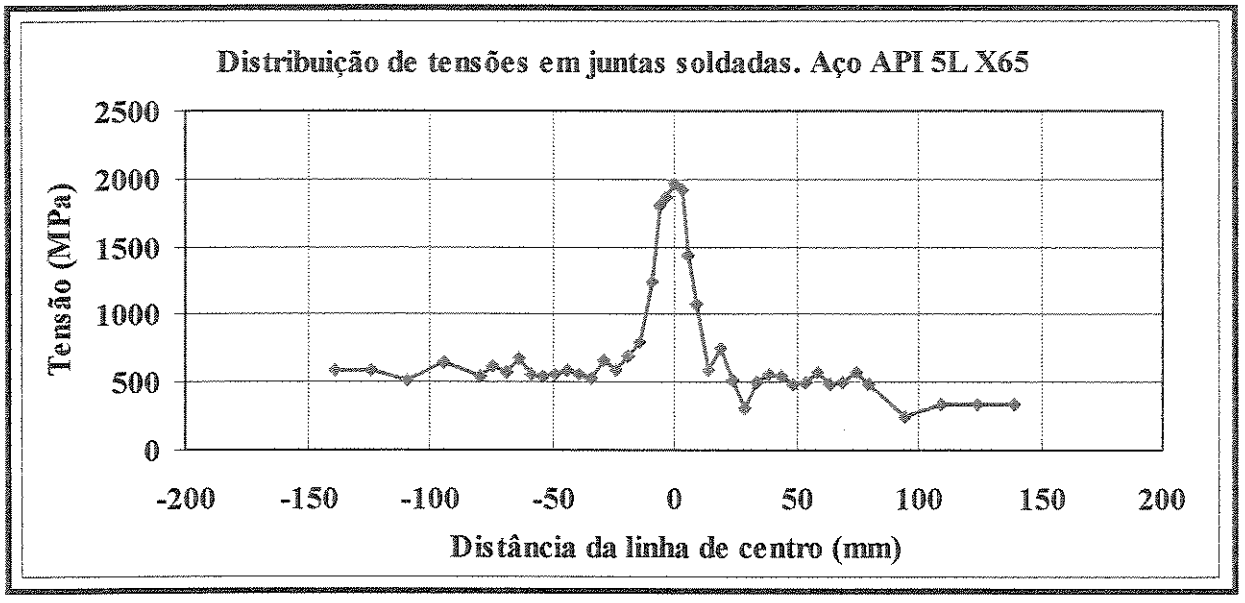


Figura 4.3: Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 19 – 36 .

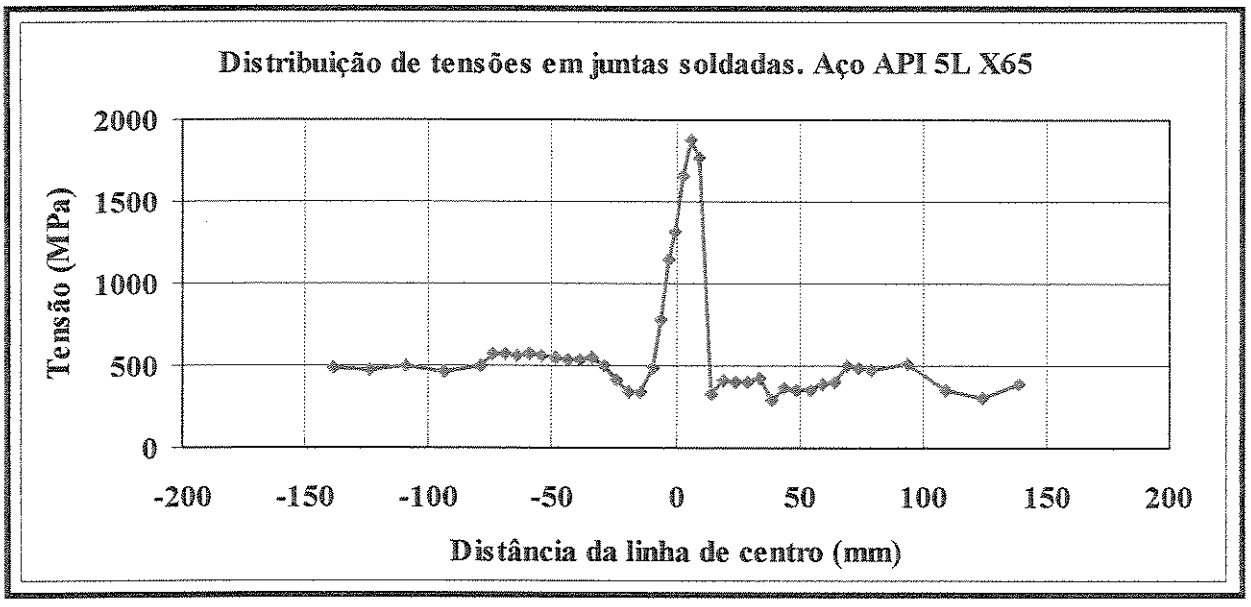


Figura 4.4: Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 43 – 58 .

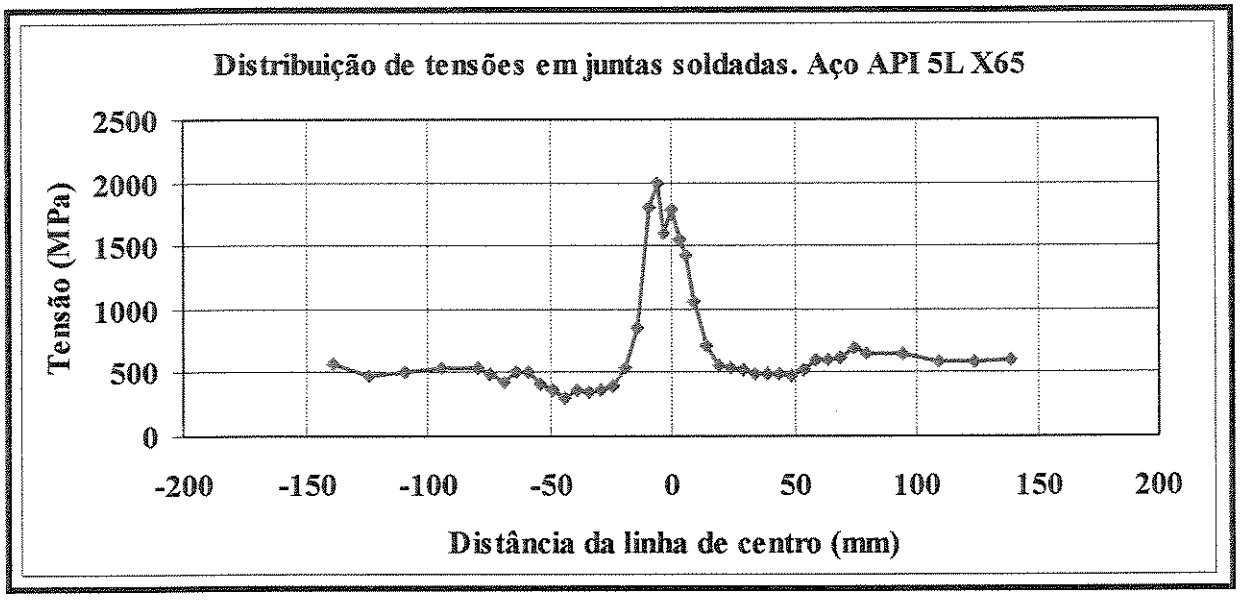


Figura 4.5: Distribuição de tensão para o conjunto de chapas TMP 41 – 59.

Numa primeira análise sobre os resultados, pode-se perceber que todas as tensões, inclusive o ponto da periferia das chapas, tiveram um valor de tensão maior do que zero. Como visto no capítulo 2, as tensões em um sistema são auto-equilibradas (equação 2.1). Analisando os gráficos podemos notar que isso não ocorrerá.

Após as medições dos tempos de percurso dos conjuntos soldados, estes foram levados para alívio de tensões. O mesmo procedimento usado anteriormente para o cálculo das tensões e determinação do perfil foi utilizado aqui, apenas observando a mudança do tempo de percurso. As figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram os perfis de tensão residual antes e após o alívio de tensões.

As linhas em azul correspondem às tensões após alívio e linha vermelha as tensões antes do alívio. O eixo horizontal é a distância ao centro da solda.

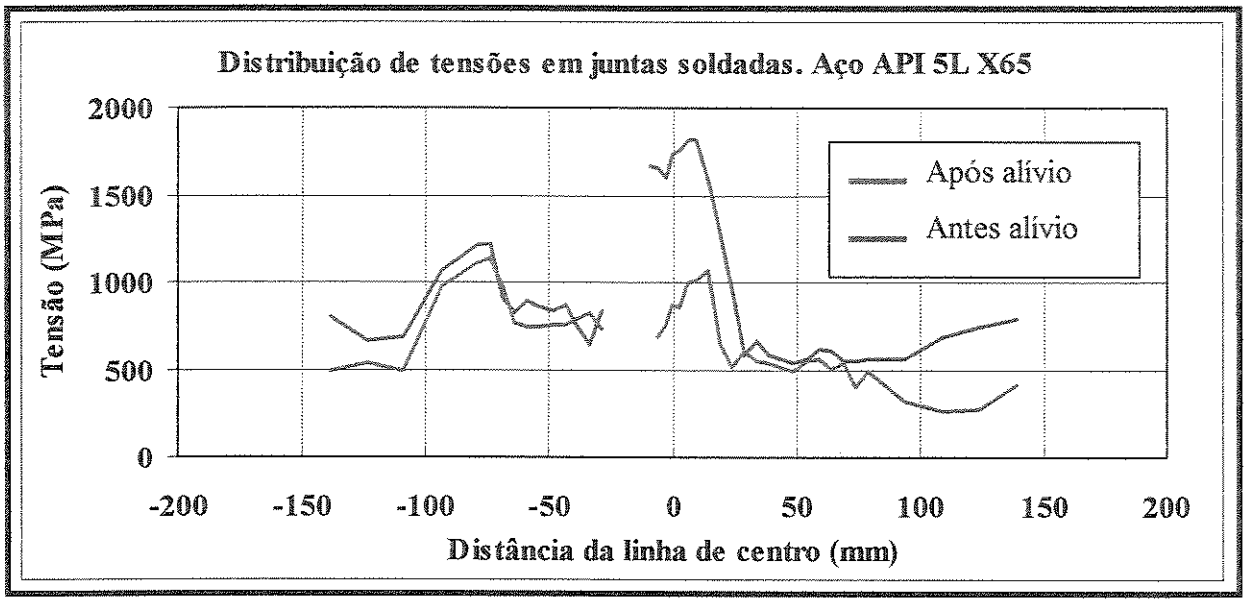


Figura 4.6: Distribuição de tensões medidas na solda antes e após alívio de tensões.

(TMP 6-12)

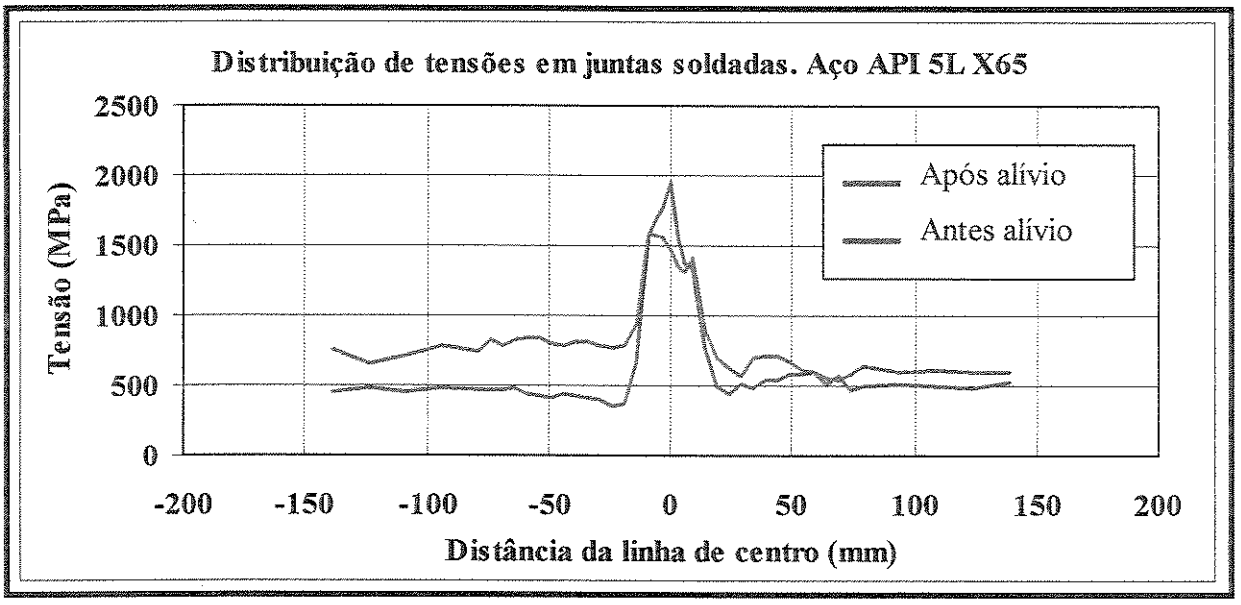


Figura 4.7: Distribuição de tensões medidas na solda antes e após alívio de tensões.

(TMP 4-9)

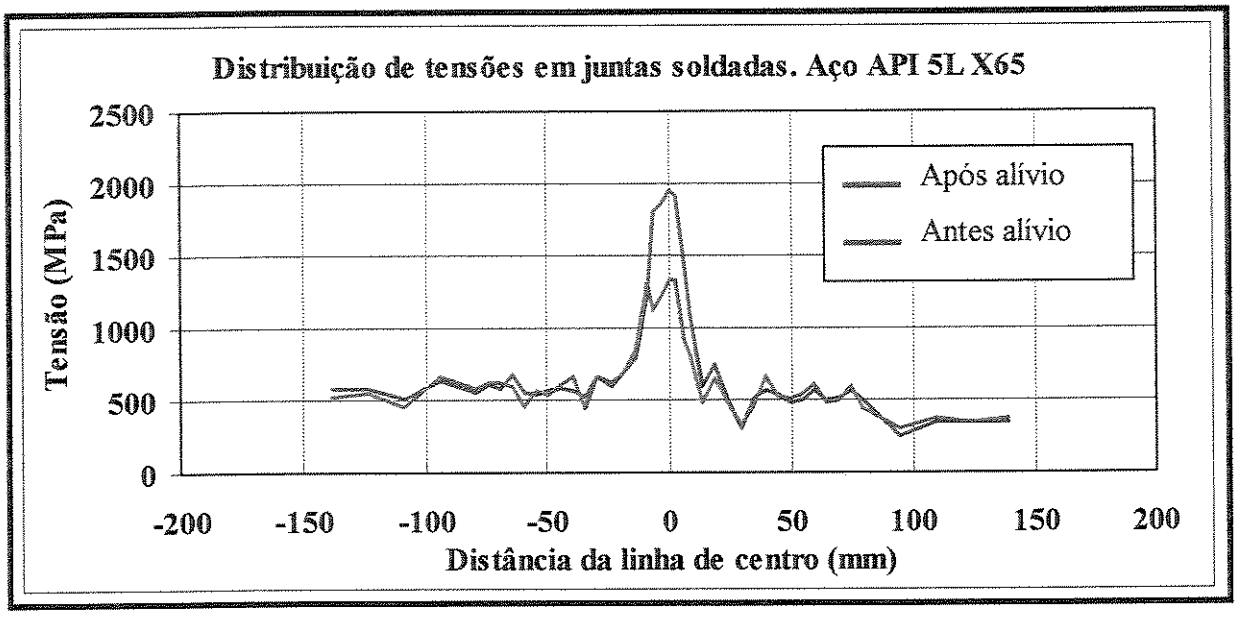


Figura 4.8: Distribuição de tensões medidas na solda antes e após alívio de tensões.

(TMP 19-36)

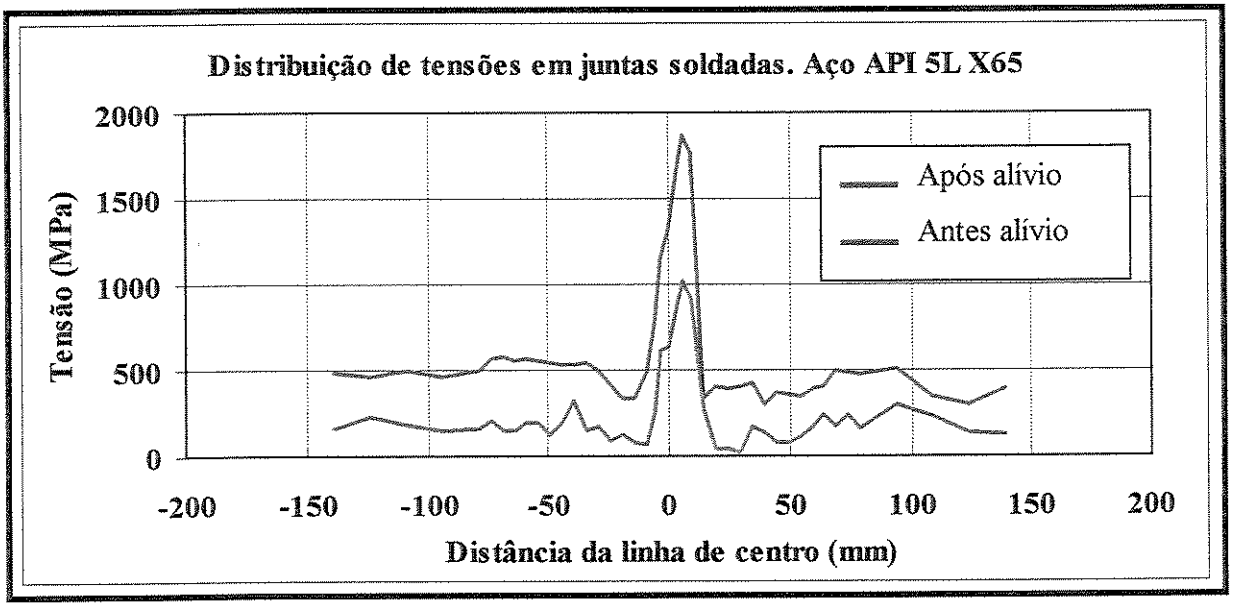


Figura 4.9: Distribuição de tensões medidas na solda antes e após alívio de tensões.

(TMP 43-58)

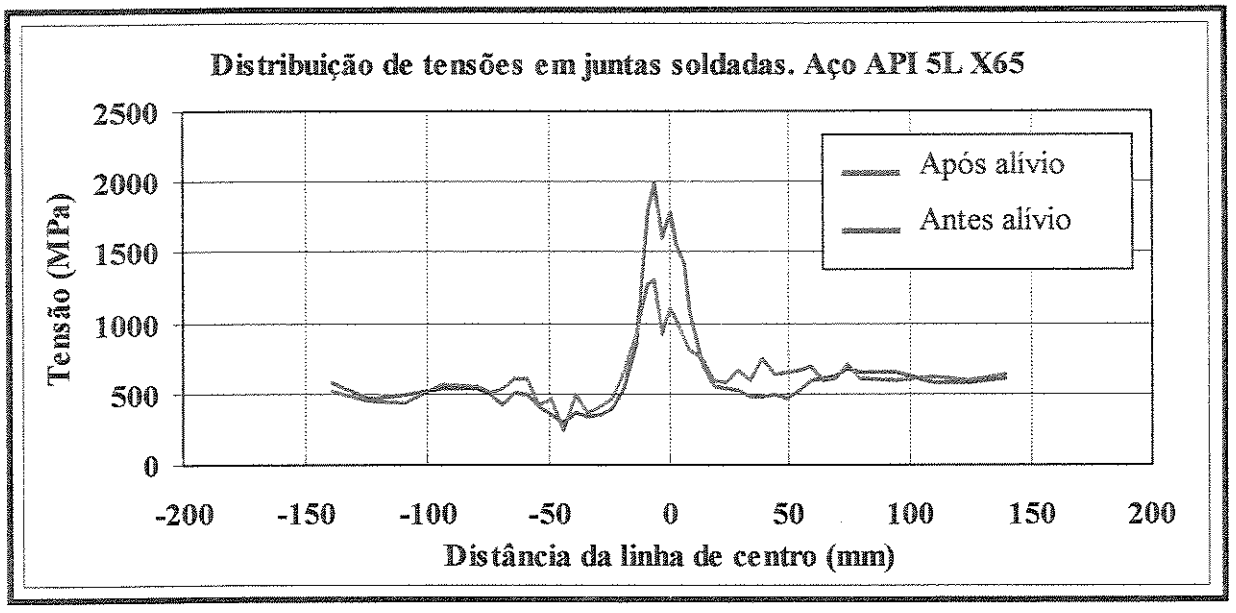


Figura 4.10: Distribuição de tensões medidas na solda antes e após alívio de tensões. (TMP 41-59)

Analisando as figuras observa-se uma diminuição das tensões na região do cordão de solda, mostrando que o alívio de tensões foi bem sucedido. Os gráficos das figuras 4.11 e 4.12 mostram todos os conjuntos soldados antes e após alívio de tensões, respectivamente. Nestes gráficos também são mostradas as respectivas médias gerais.

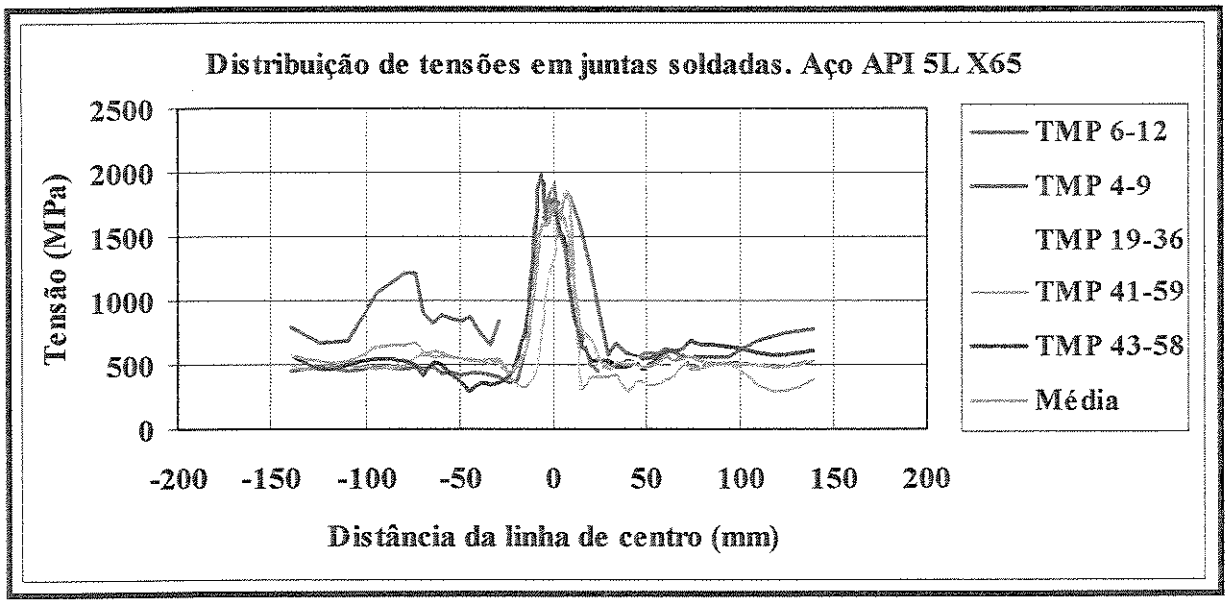


Figura 4.11: Perfis para conjuntos antes do alívio.

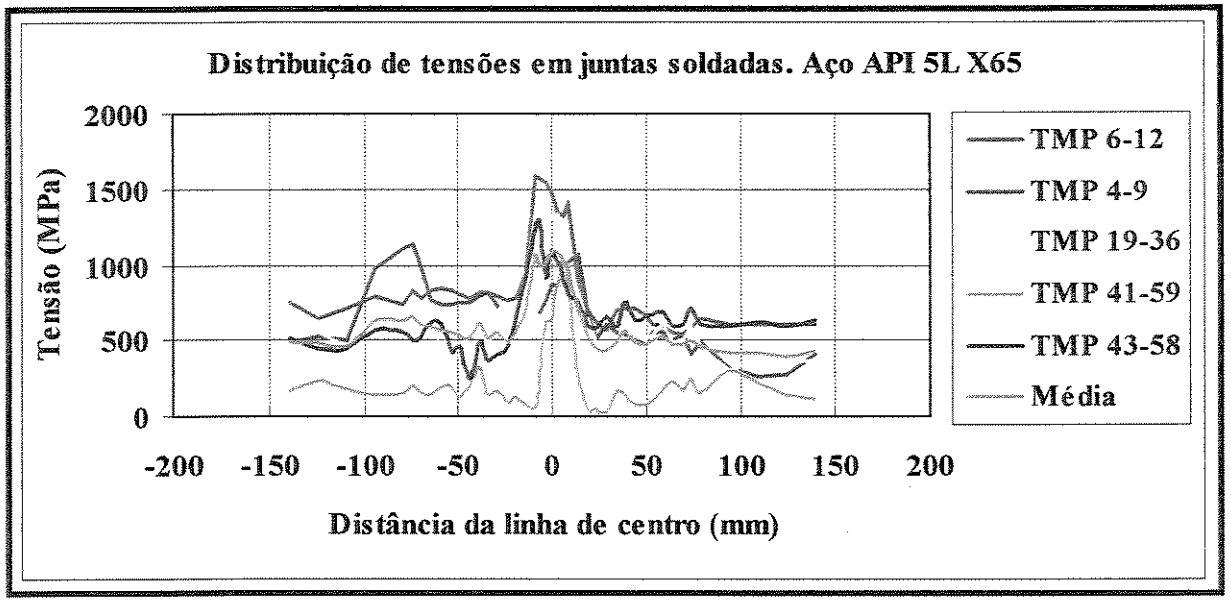


Figura 4.12: Perfis para conjuntos após alívio.

A figura 4.13 mostra a média das tensões dos conjuntos soldados antes e após alívio e a figura 4.14 mostra o perfil da diferença ponto a ponto entre estas mesmas tensões. Essa diferença indica o valor que foi aliviado. Supondo que toda a tensão e somente essa tenha sido retirada com o processo de alívio, a diferença é a tensão existente.

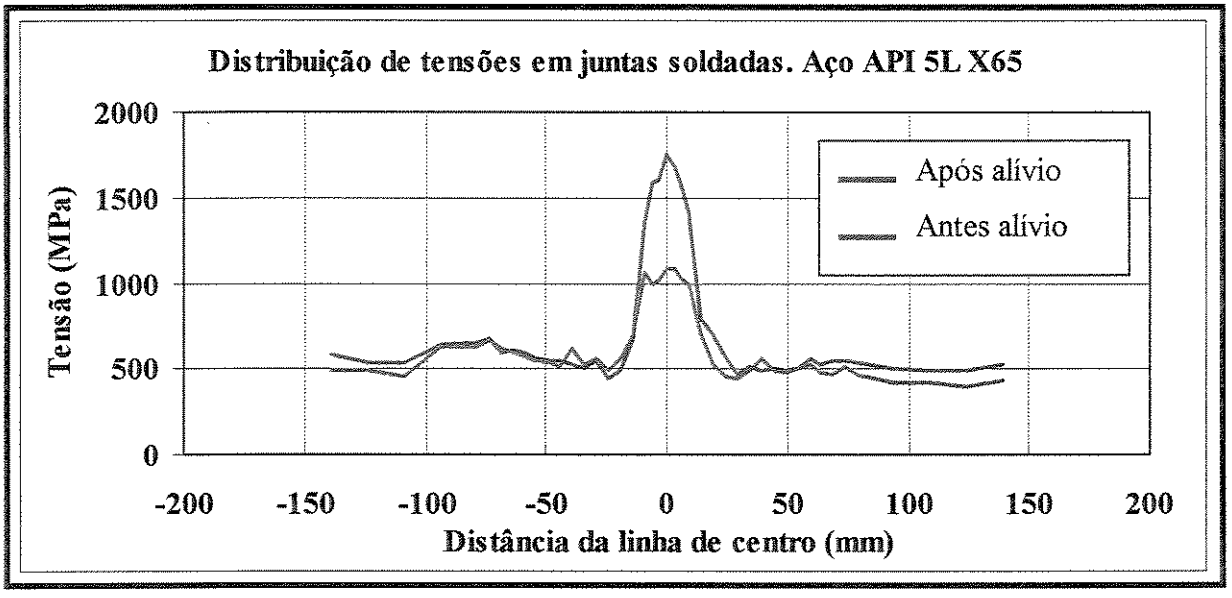


Figura 4.13: Distribuição das médias das tensões medidas dos conjuntos soldados antes e após alívio de tensões.

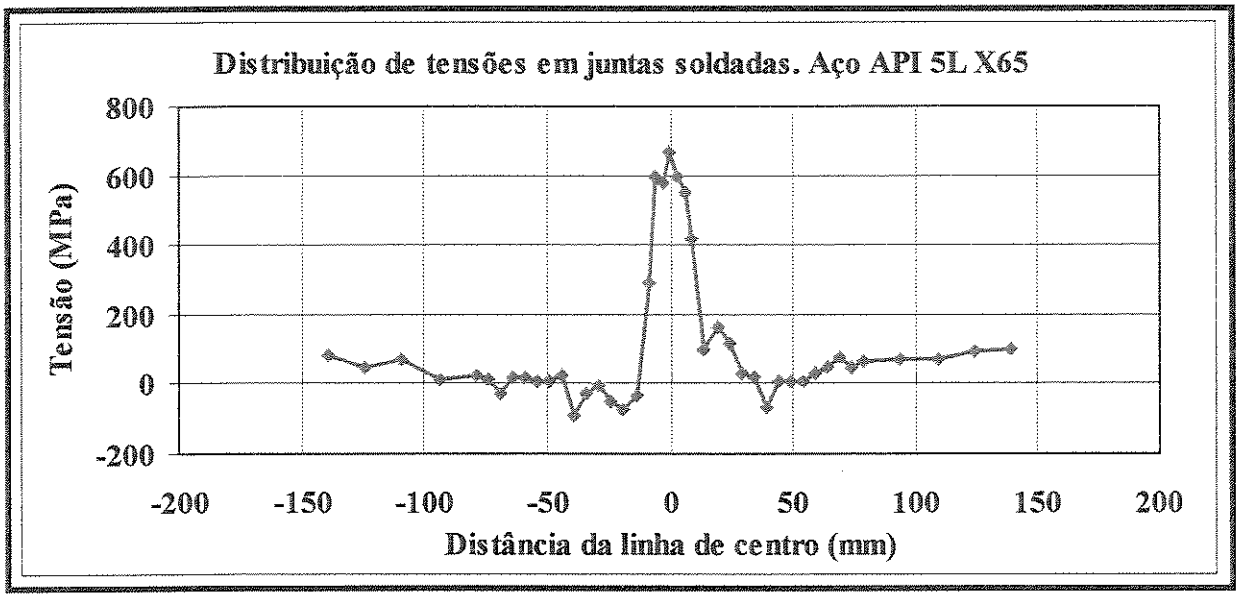


Figura 4.14: Distribuição da diferença das médias das tensões medidas dos conjuntos soldados antes e após alívio de tensões.

4.2 Determinação do Perfil de Tensões Residuais para Aços API 5L X70.

Primeiramente os tempos de percurso para o estado livre de tensões foram levantados para cada chapa individualmente. O transdutor foi colocado em oito pontos igualmente espaçados e a média desses valores foi utilizada. A tabela 4.2 mostra estes valores com suas respectivas médias.

Tabela 4.2: Tempos percurso para estado livre de tensões para aços API 5L X70 (nanosegundos).

Chapas	C11		C12		C13		C14		C15	
Posição	Esq.	Dir.	Esq.	Dir	Esq.	Dir	Esq.	Dir	Esq.	Dir.
1	*28450*	*28431*	*28410*	*28473*	*28487*	*28475*	*28409*	*28486*	*28409*	*28433*
2	*28446*	*28430*	*28423*	*28469*	*28496*	*28472*	*28395*	*28497*	*28423*	*28435*
3	*28444*	*28428*	*28428*	*28455*	*28488*	*28488*	*28405*	*28495*	*28416*	*28429*
4	*28448*	*28427*	*28425*	*28457*	*28494*	*28484*	*28407*	*28497*	*28422*	*28431*
5	*28451*	*28428*	*28427*	*28460*	*28495*	*28492*	*28392*	*28497*	*28428*	*28436*
6	*28451*	*28440*	*28426*	*28464*	*28491*	*28484*	*28394*	*28494*	*28427*	*28434*
7	*28451*	*28430*	*28412*	*28476*	*28496*	*28483*	*28402*	*28494*	*28430*	*2836*
8	*28454*	*28427*	*28411*	*28483*	*28494*	*28484*	*28403*	*28495*	*28429*	*28439*
Média	28449	28430	28420	28467	28493	28482	28401	28494	28423	28434
Desvio	1.19	0.70	0.77	0.77	0.82	0.57	1	0.92	0.85	0.8
Chapas	C21		C22		C23		C24		C25	
Posição	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
1	*28568*	*28567*	*28632*	*28571*	*28573*	*28573*	*28579*	*28577*	*28621*	*28628*
2	*28572*	*28562*	*28641*	*28569*	*28579*	*28576*	*28577*	*28579*	*28622*	*28635*
3	*28560*	*28569*	*28643*	*28573*	*28568*	*28567*	*28576*	*28584*	*28628*	*28652*
4	*28564*	*28563*	*28641*	*28572*	*28569*	*28575*	*28574*	*28576*	*28629*	*28642*
5	*28571*	*28562*	*28642*	*28578*	*28571*	*28572*	*28575*	*28577*	*28622*	*28644*
6	*28571*	*28568*	*28644*	*28575*	*28569*	*28574*	*28575*	*28581*	*28630*	*28643*
7	*28570*	*28567*	*28642*	*28573*	*28574*	*28572*	*28574*	*28585*	*28634*	*28631*
8	*28569*	*28567*	*28653*	*28569*	*28573*	*28583*	*28581*	*28588*	*28631*	*28635*
Média	28567	28566	28642	28572	28572	28574	28576	28581	28627	28639
Desvio	0.66	0.69	0.92	0.32	0.42	0.63	0.57	0.71	0.82	0.71

- ***Levantamento do perfil de tensões residuais através da geração de ondas longitudinais.***

Para este caso, as tensões foram levantadas ponto a ponto, utilizando a constante acustoelástica levantada para o material de base, inclusive nas regiões do metal fundido e da ZTA. Os tempos de percurso para o estado livre de tensões em regiões distantes do cordão de solda foram retirados da tabela 4.2, e para as regiões da ZTA e do metal fundido foi feita uma média dos tempos das duas chapas originais. O tempo de percurso que a onda percorre dentro do material deve ser determinado para cada um dos conjuntos soldados e para a sua determinação será utilizada a média para cada conjunto de placas para a mesma direção de laminação (tabela 4.2).

Com o valor do tempo médio, é possível calcular a velocidade da onda ultra-sônica para cada uma das duas direções de laminação. A distância percorrida no metal, entre as duas sapatas de acrílico, é 112 mm. A distância percorrida em cada uma das sapatas de acrílico é 13 mm. A velocidade das ondas ultra-sônicas longitudinais em acrílico comercial é de 2,8 10^6 mm/s. Assim, o tempo total t_t de percurso das ondas ultra-sônicas pode ser calculado pela expressão:

$$t_t = t_{sapatas} + t_{metal} = \frac{2 \times d_{acrilico}}{v_{acrilico}} + \frac{d_{aço}}{v_{aço}} \qquad (4.1)$$

Substituindo os valores na equação 4.1 determina-se os tempos de percurso para cada sentido de laminação e suas respectivas velocidades. A tabela 4.3 mostra estes resultados.

Tabela 4.3: Velocidade e tempo de percurso no metal para o estado livre de tensões.

	Velocidade (m/s)	**Tempo (ns)**
Longitudinal	*5843,45*	*19166,8*
Transversal	*5806,86*	*19287,5*

Foram levantados perfis de tensões para conjuntos longitudinais e conjuntos transversais. As figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 mostram os perfis de tensões para os conjuntos transversais, e as figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 para os conjuntos longitudinais.

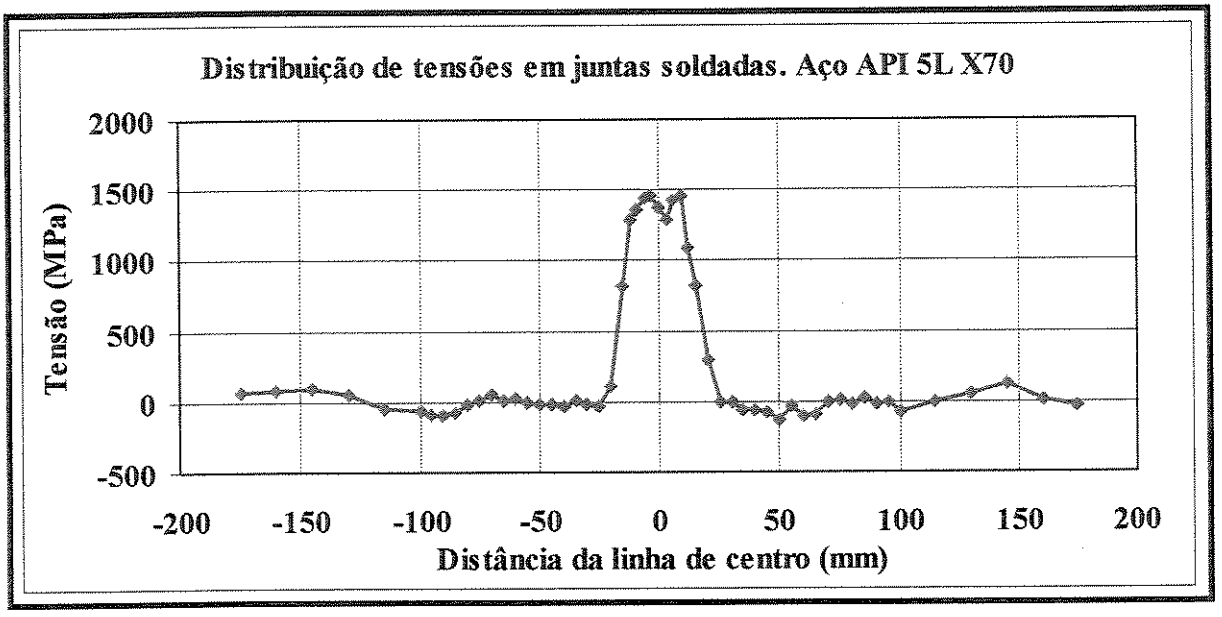


Figura 4.15: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C11.

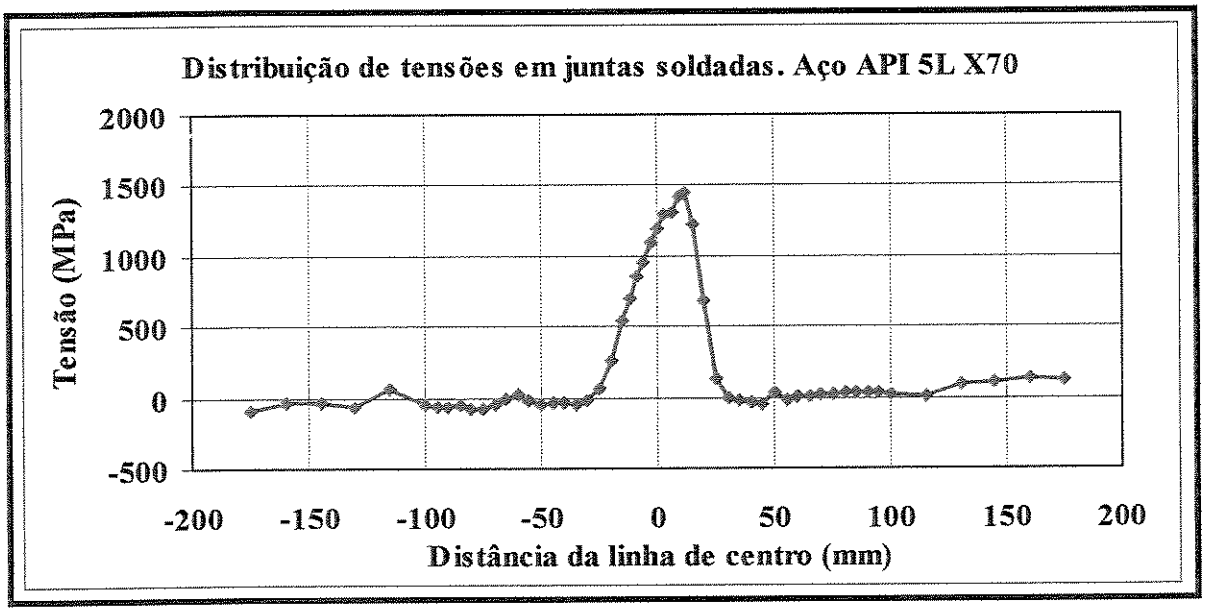


Figura 4.16: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C12.

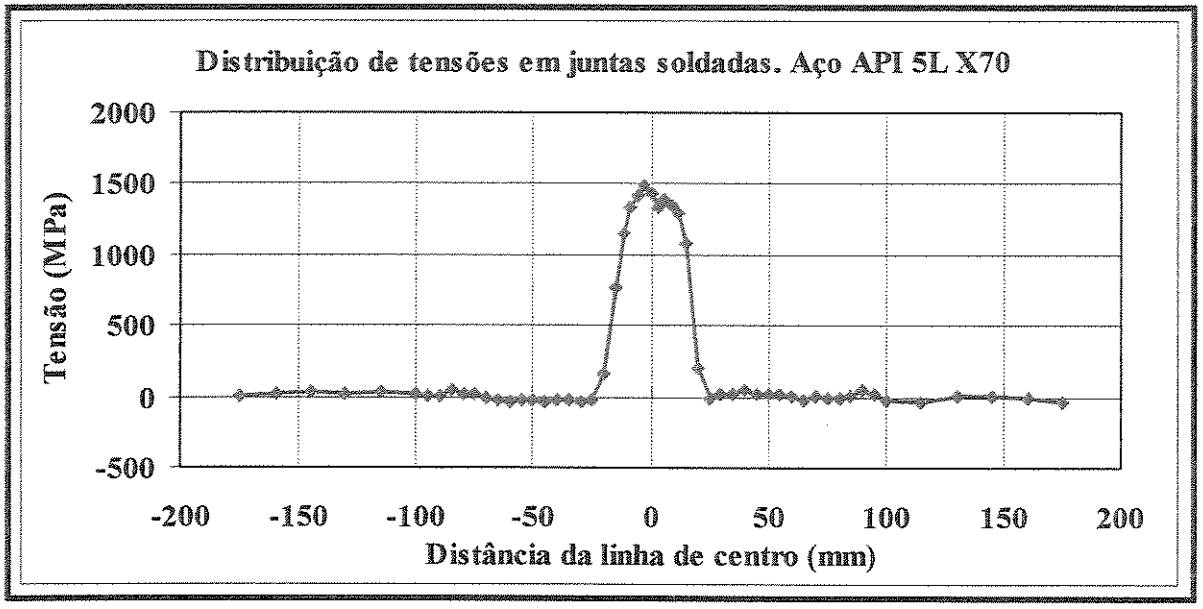


Figura 4.17: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C13.

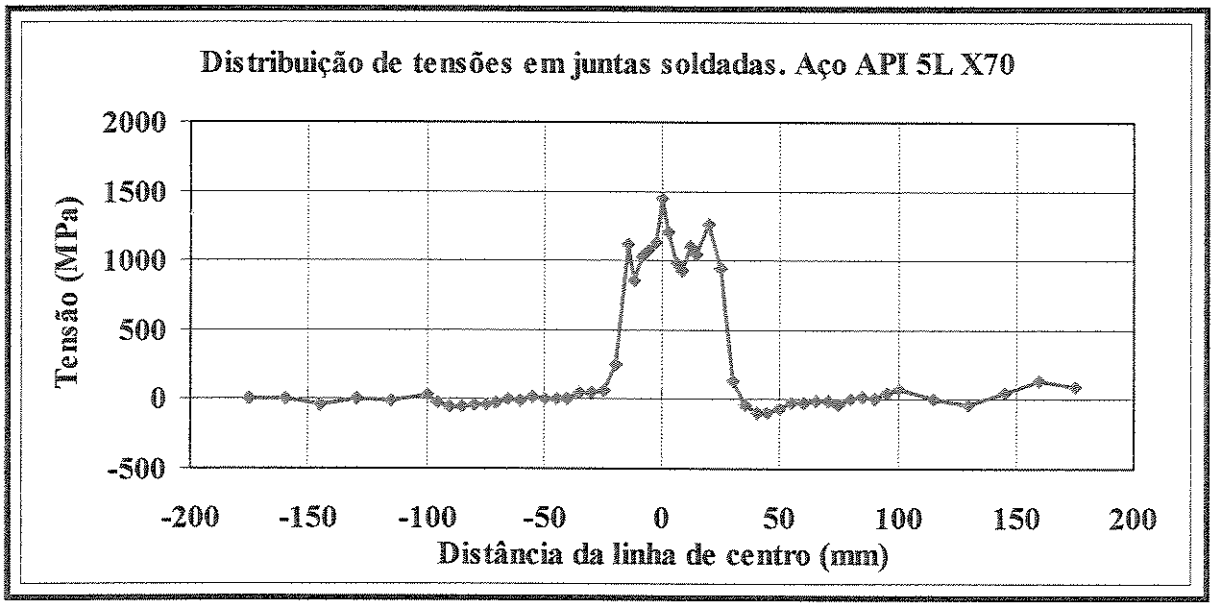


Figura 4.18: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C14.

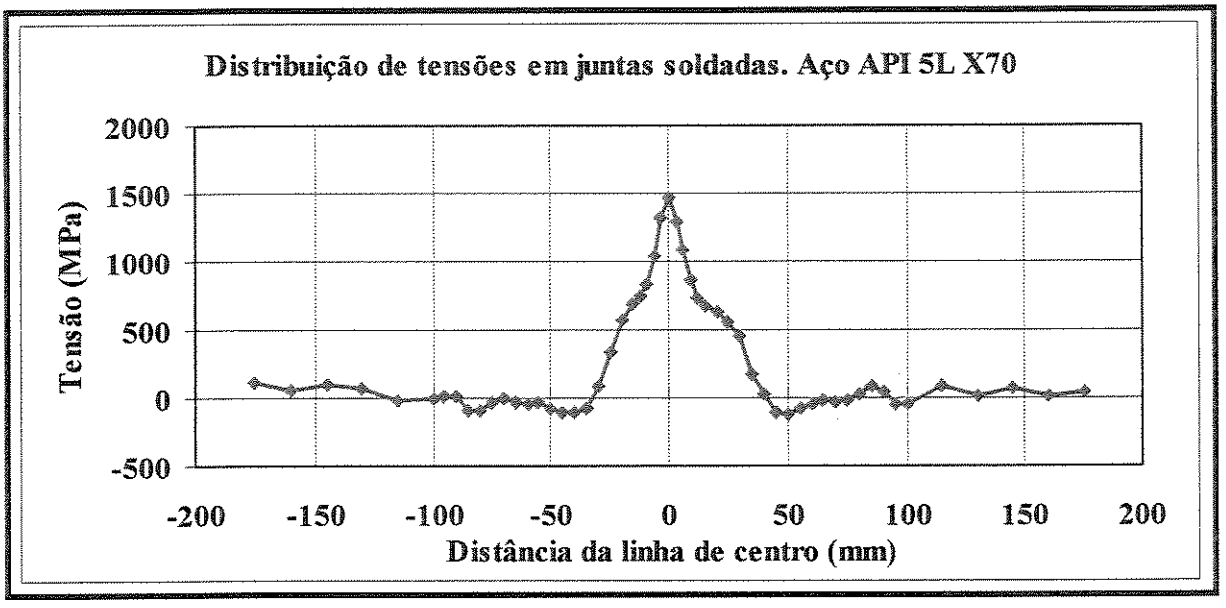


Figura 4.19: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C15.

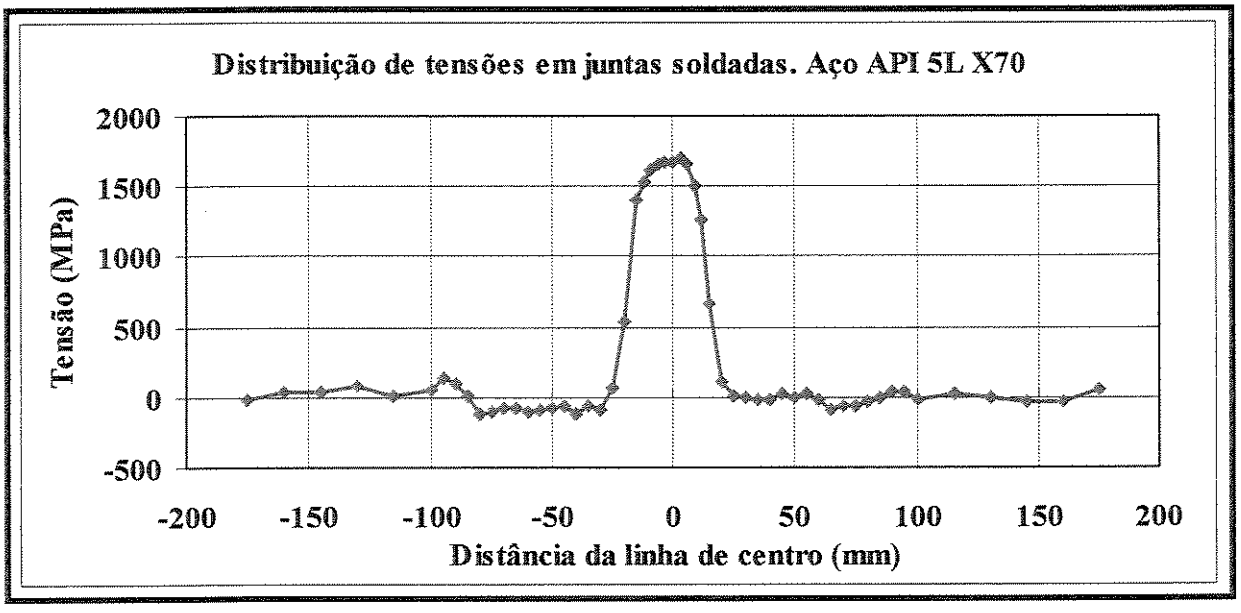


Figura 4.20: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C21.

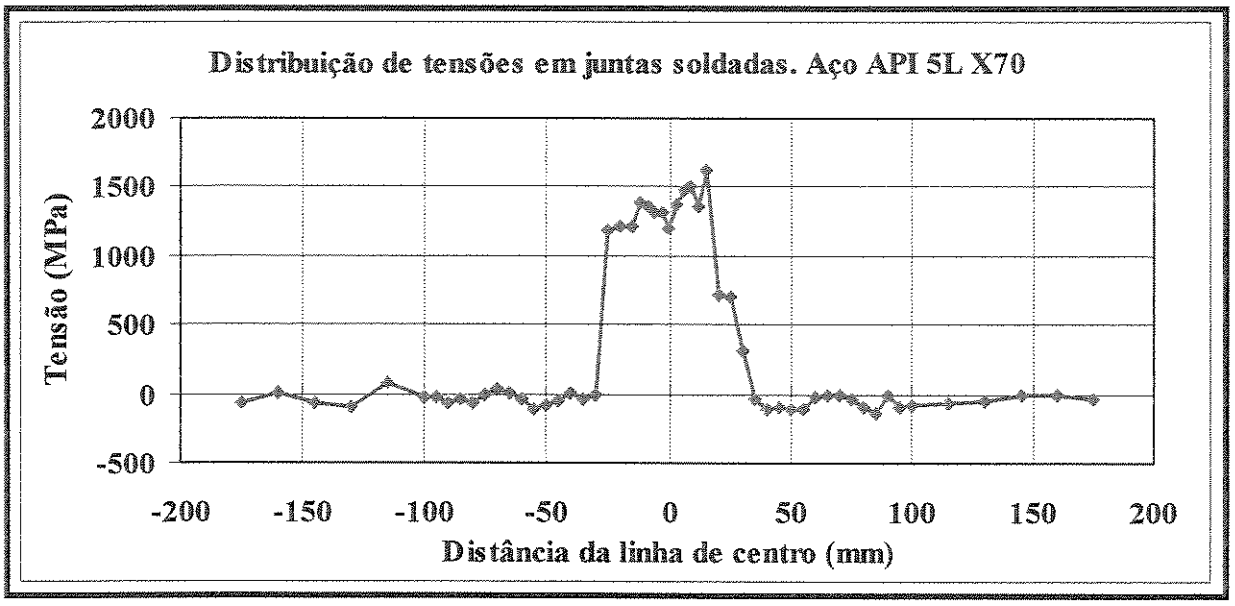


Figura 4.21: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C22.

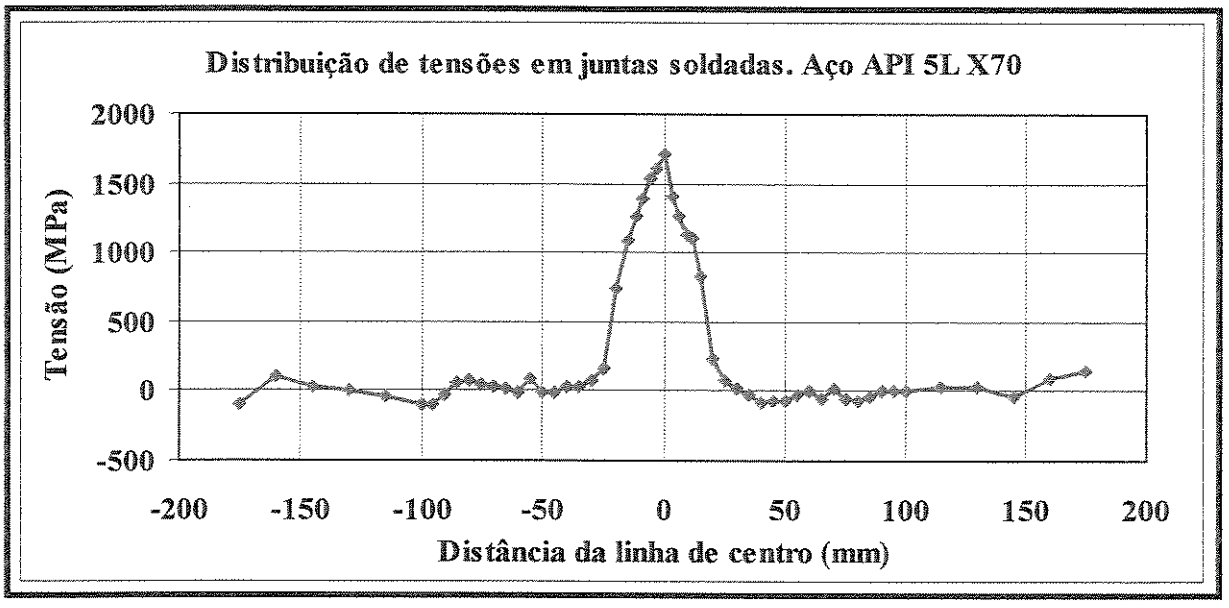


Figura 4.22: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C23.

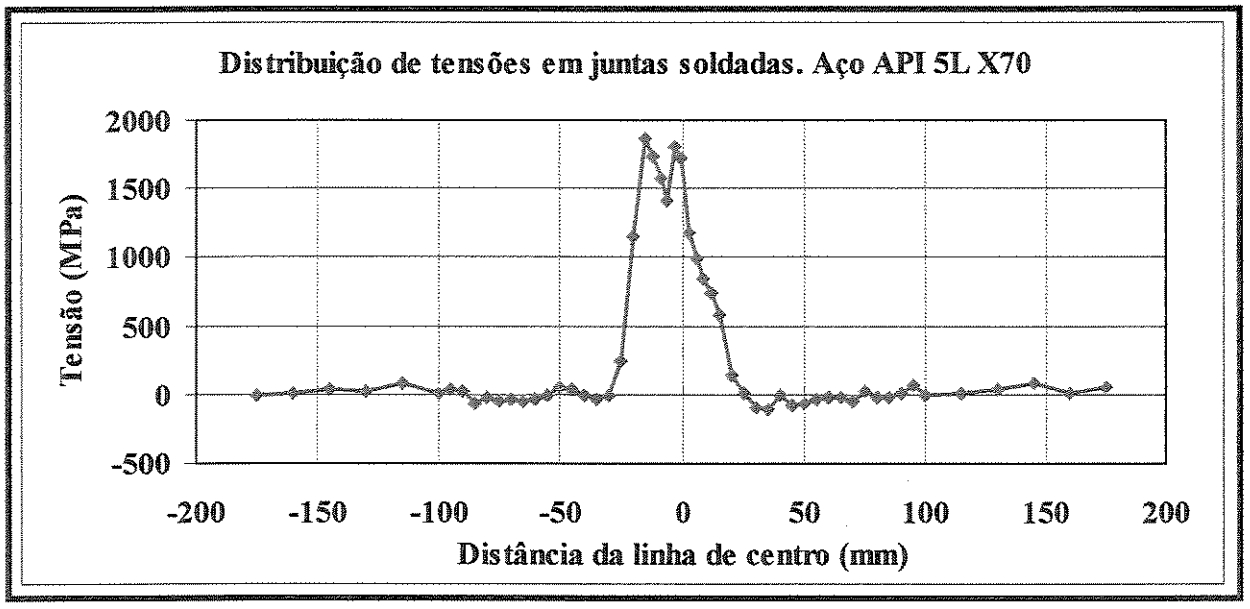


Figura 4.23: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C24.

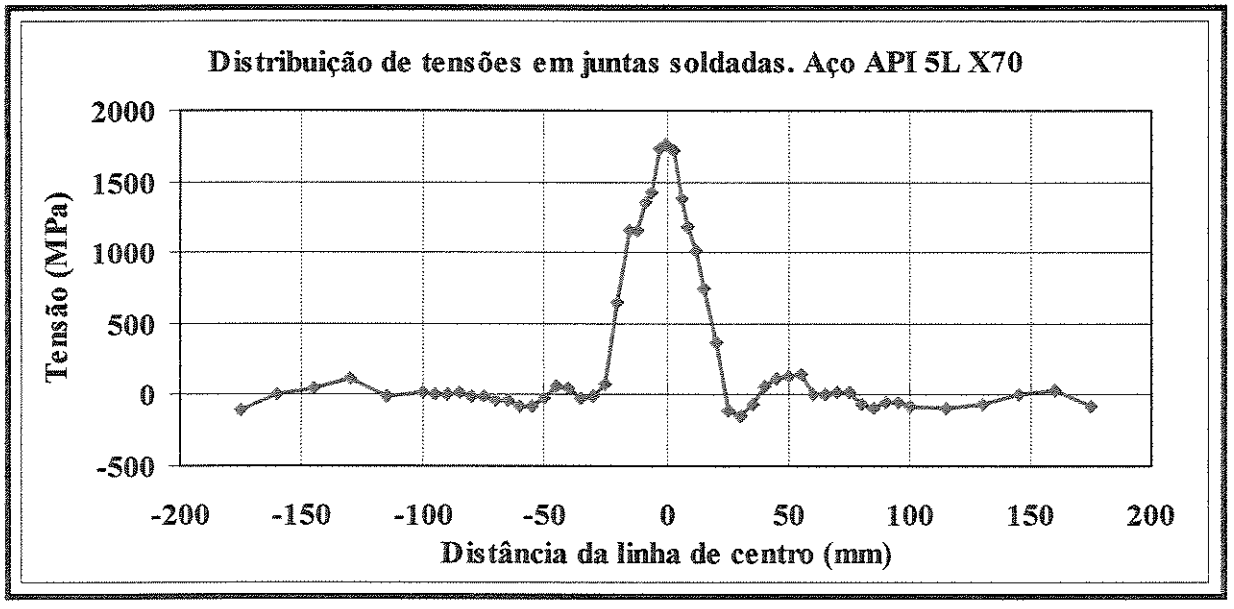


Figura 4.24: Perfil de tensão residual para o conjunto soldado C25.

Analisando as figuras, observa-se que na região do cordão de solda e em regiões próximas a ele houve um aumento do tempo de percurso em relação ao tempo para o estado livre de tensões, o que levou a valores mais altos de tensões para estas regiões.

As chapas foram aliviadas e novamente os tempos de percurso foram medidos. As figuras 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 mostram as tensões antes e após o alivio de tensões para as chapas transversais e as figuras 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34 para as chapas longitudinais. O perfil com a linha vermelha corresponde à tensão antes do alivio e o perfil com a linha azul corresponde a tensão após o alivio.

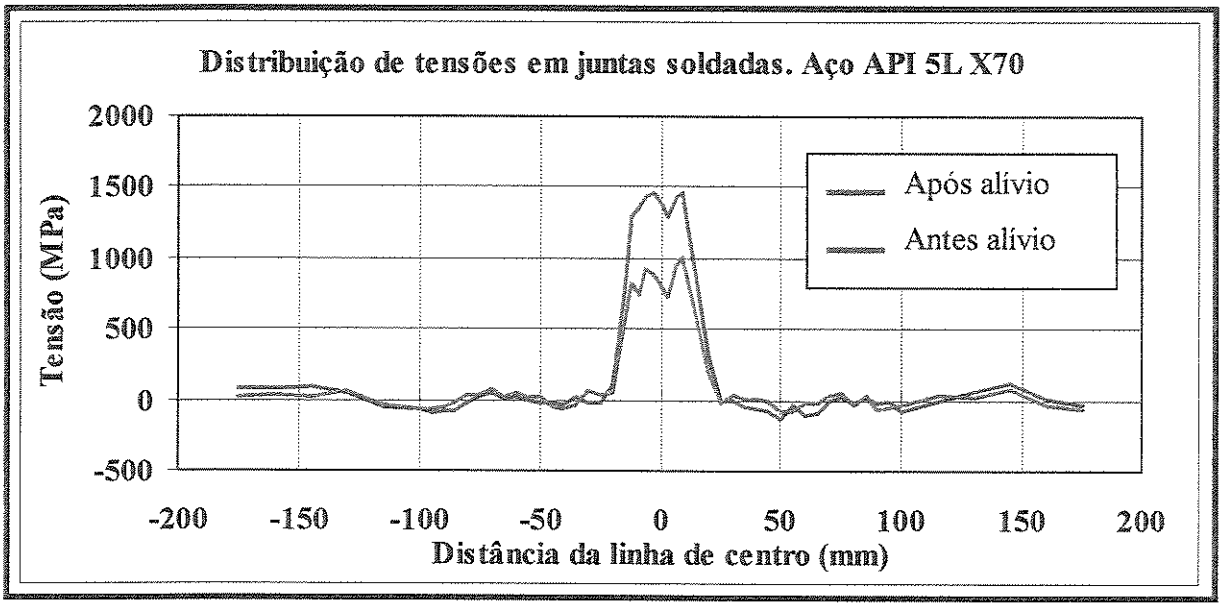


Figura 4.25: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C11.

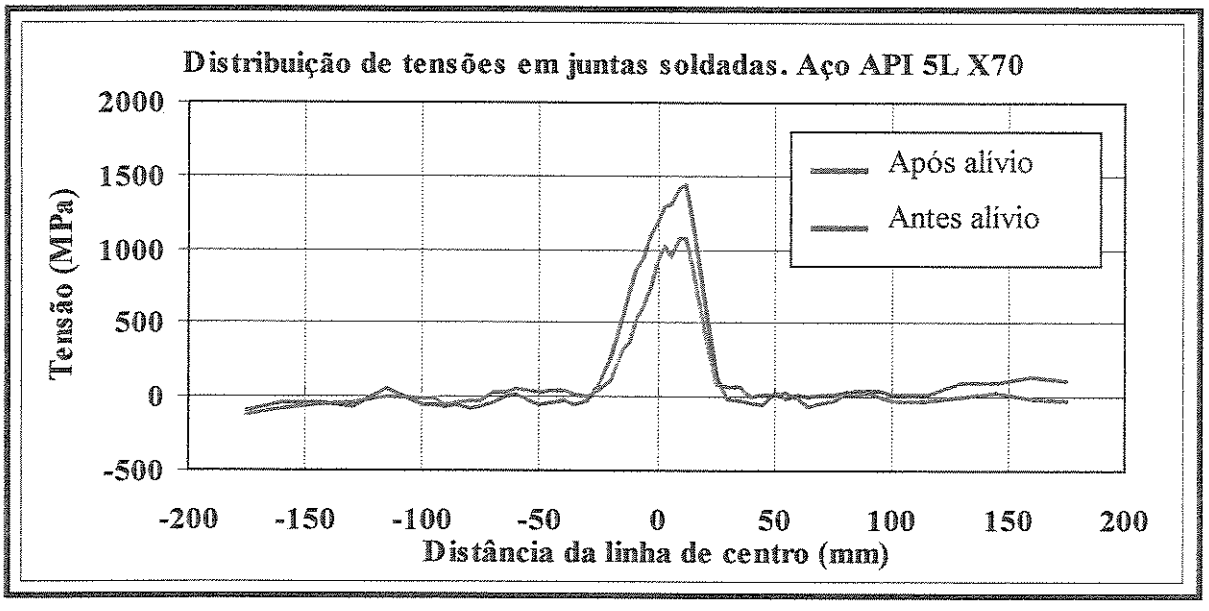


Figura 4.26: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C12.

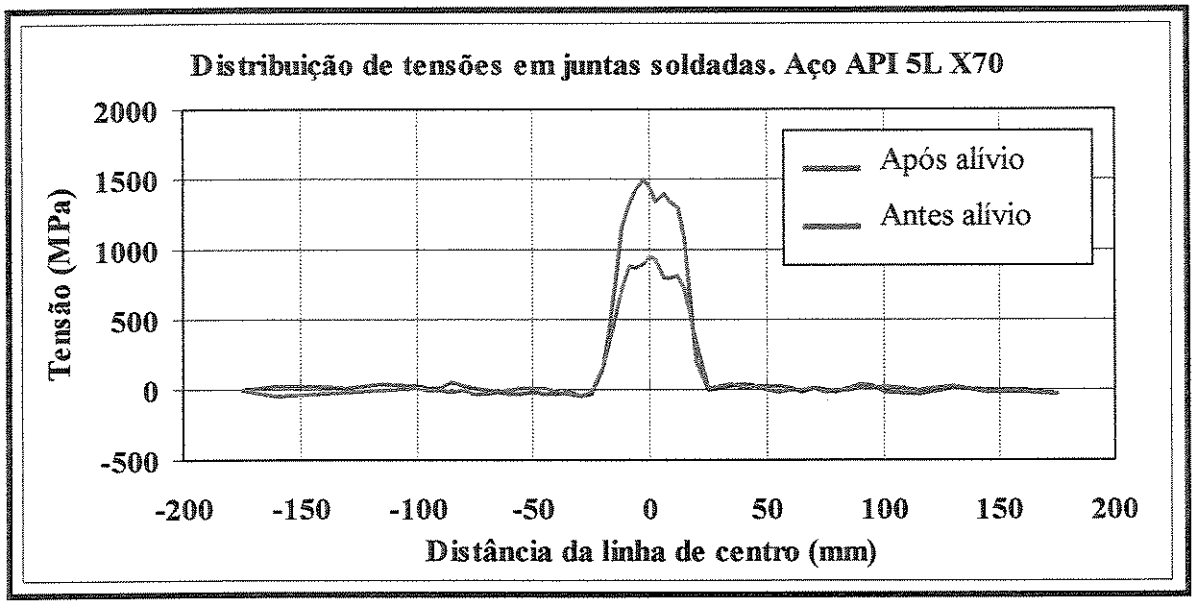


Figura 4.27: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C13.

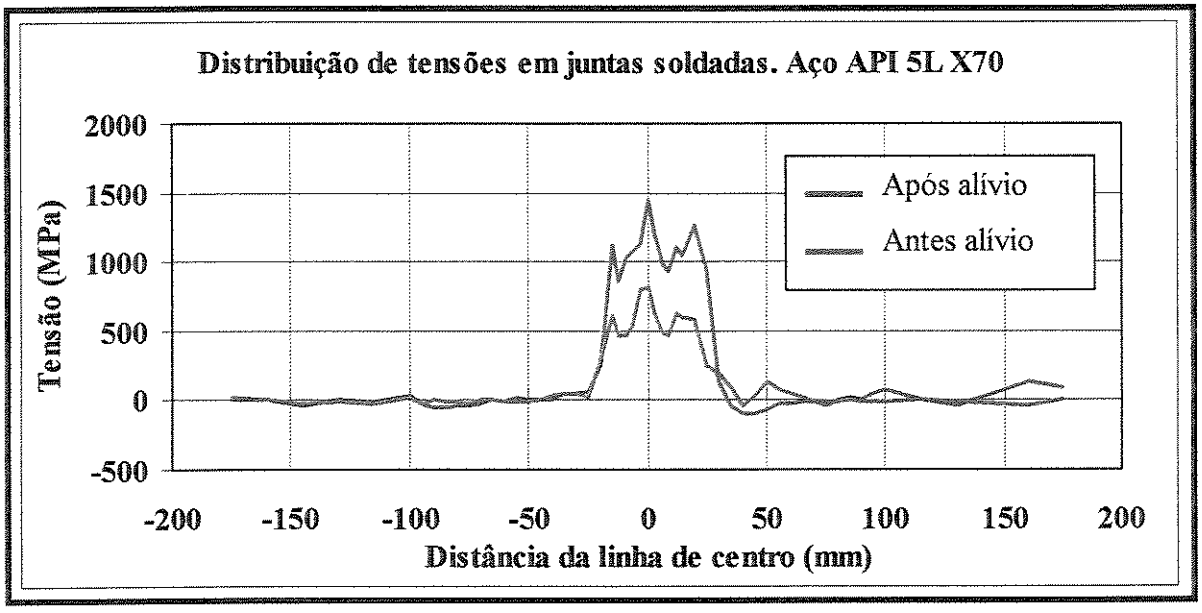


Figura 4.28: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C14.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

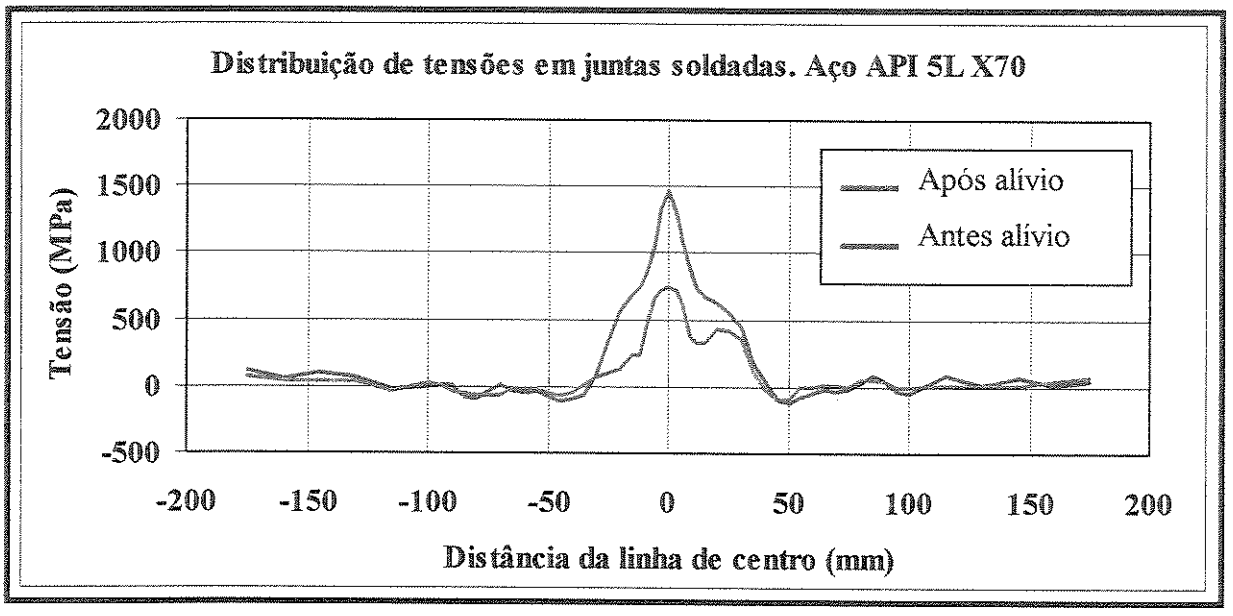


Figura 4.29: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C15.

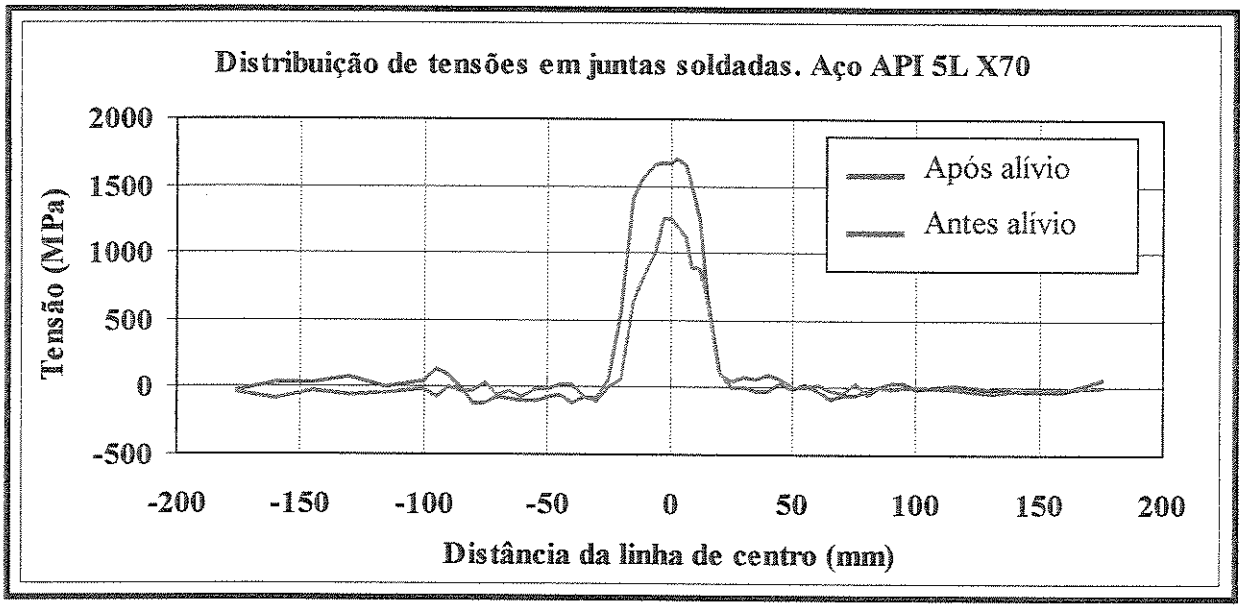


Figura 4.30: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C21.

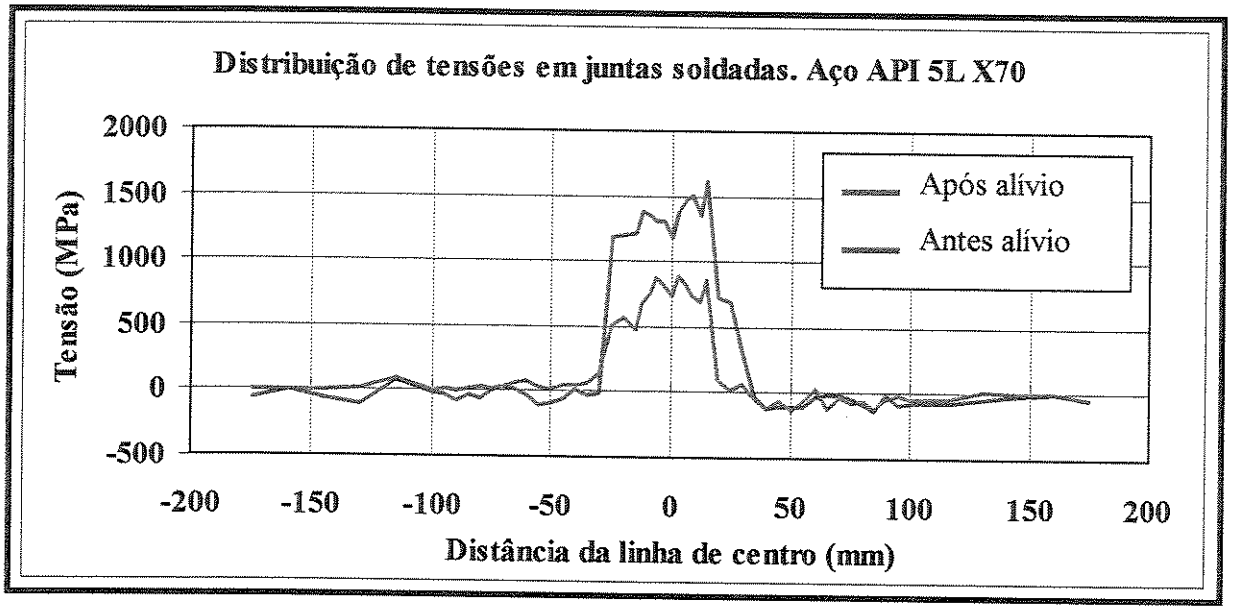


Figura 4.31: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C22.

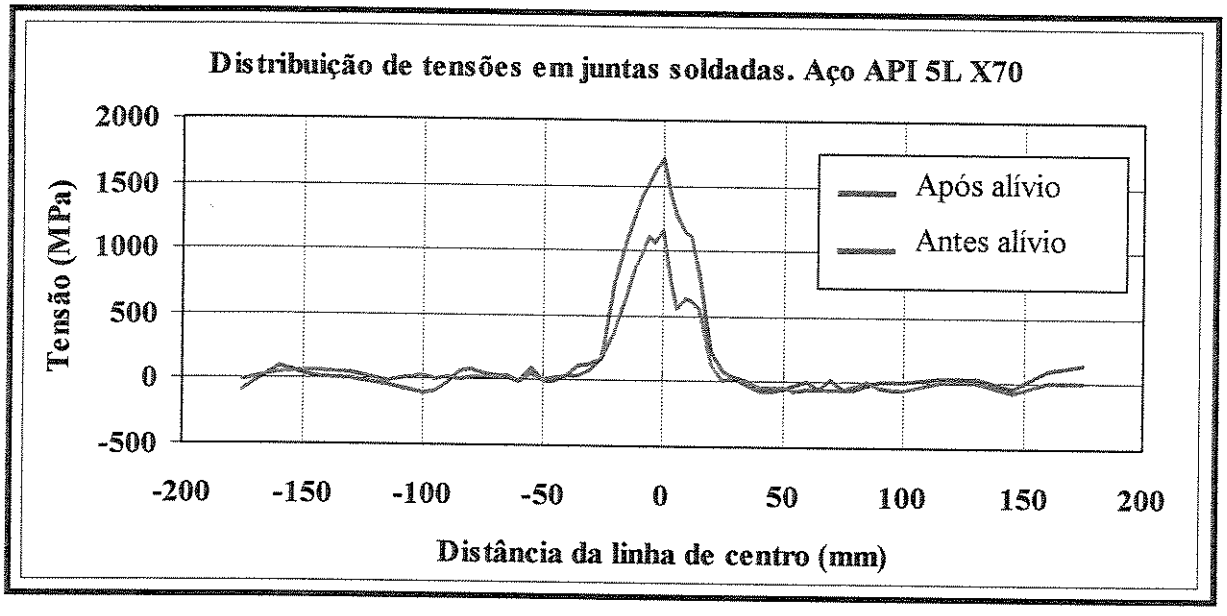


Figura 4.32: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C23.

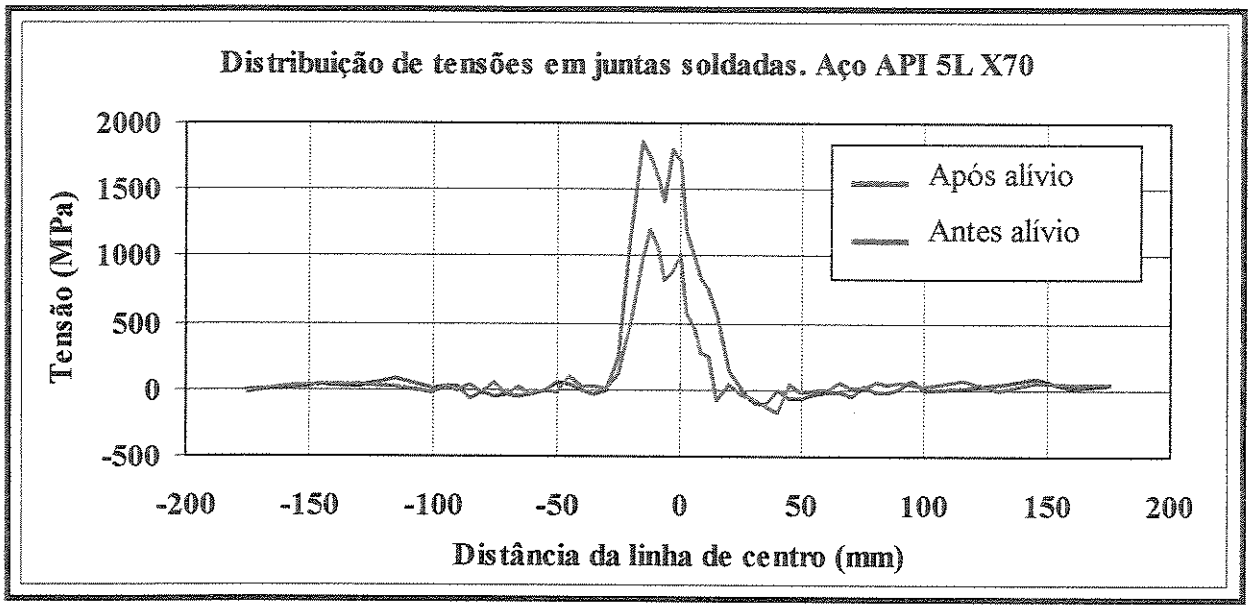


Figura 4.33: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C24.

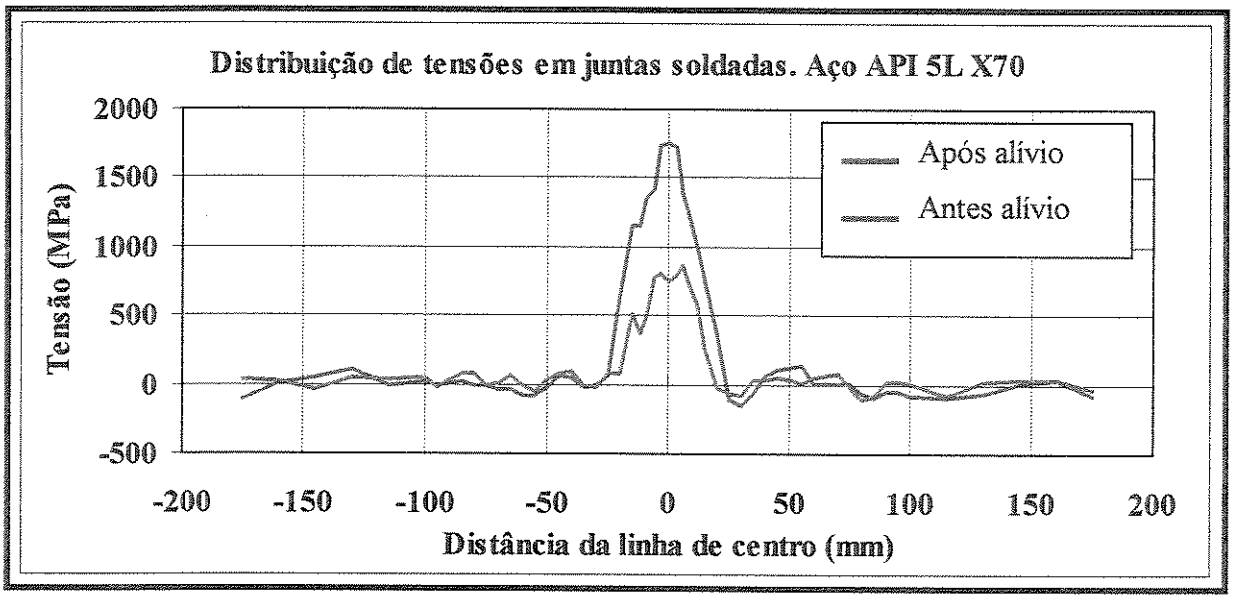


Figura 4.34: Perfil de tensão residual antes e após alivio para o conjunto soldado C25.

Observa-se das figuras uma diminuição das tensões nas regiões do metal fundido e da ZTA, mostrando que o tratamento térmico aliviou as tensões nessas regiões. Observa-se também, valores de tensões residuais maiores que os valores do limite de escoamento do material, o que a primeira vista é irreal.

As figuras 4.35 e 4.36 mostram todos os perfis de tensão residual, antes e após o alívio de tensões, para os conjuntos transversais. As figuras 4.37 e 4.38 mostram os mesmos perfis para os conjuntos longitudinais. As figuras 4.39 e 4.40 mostram as médias dos conjuntos soldados, antes e após o alívio de tensões para os conjuntos transversais e longitudinais.

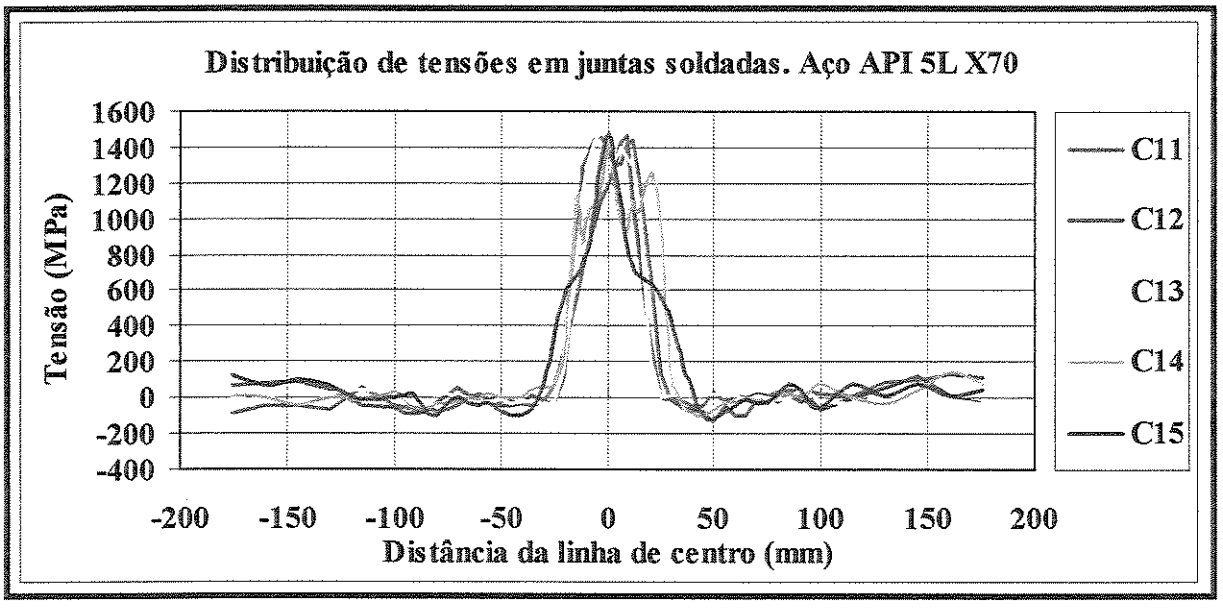


Figura 4.35: Perfis dos conjuntos soldados transversais antes do alívio de tensões.

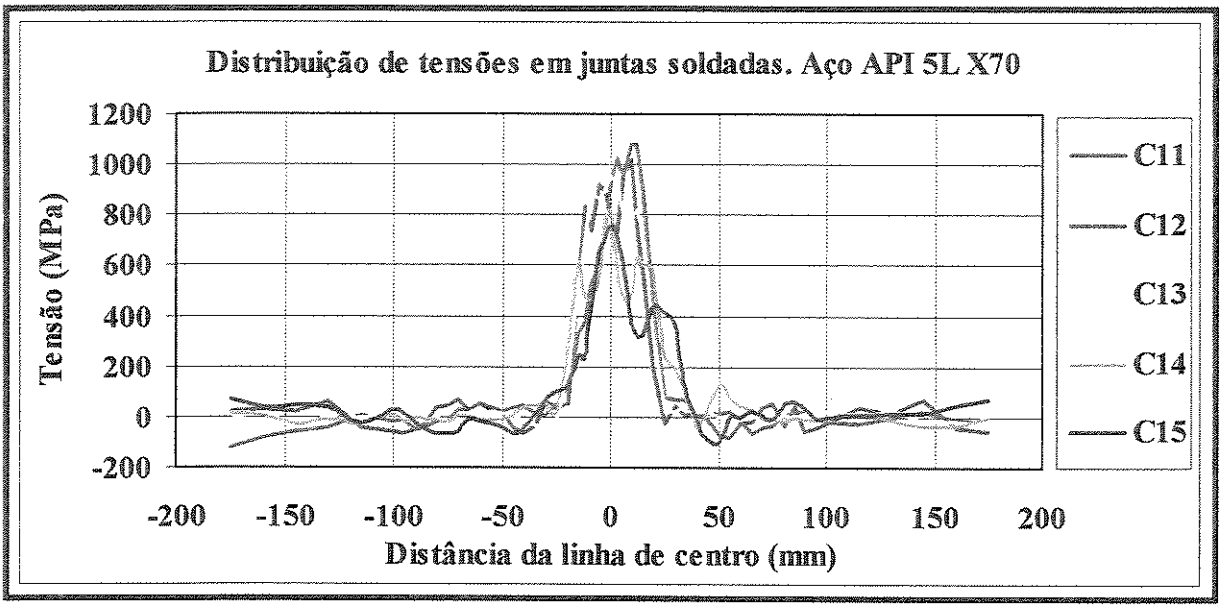


Figura 4.36: Perfis dos conjuntos soldados transversais após alívio de tensões.

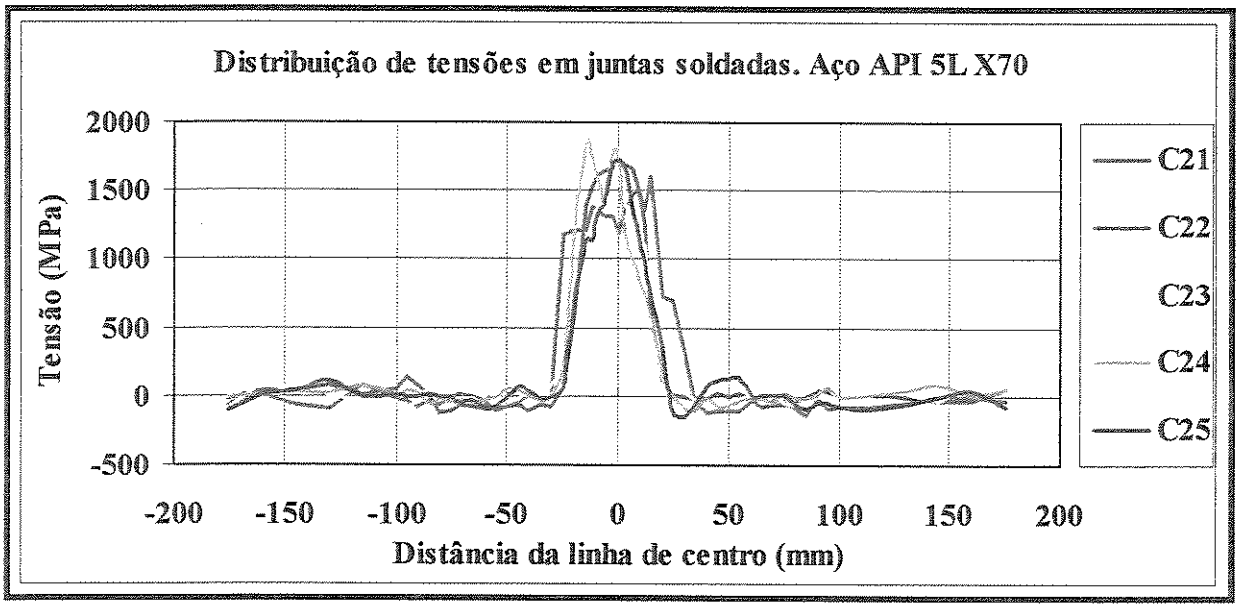


Figura 4.37: Perfis dos conjuntos soldados longitudinais antes do alívio de tensões.

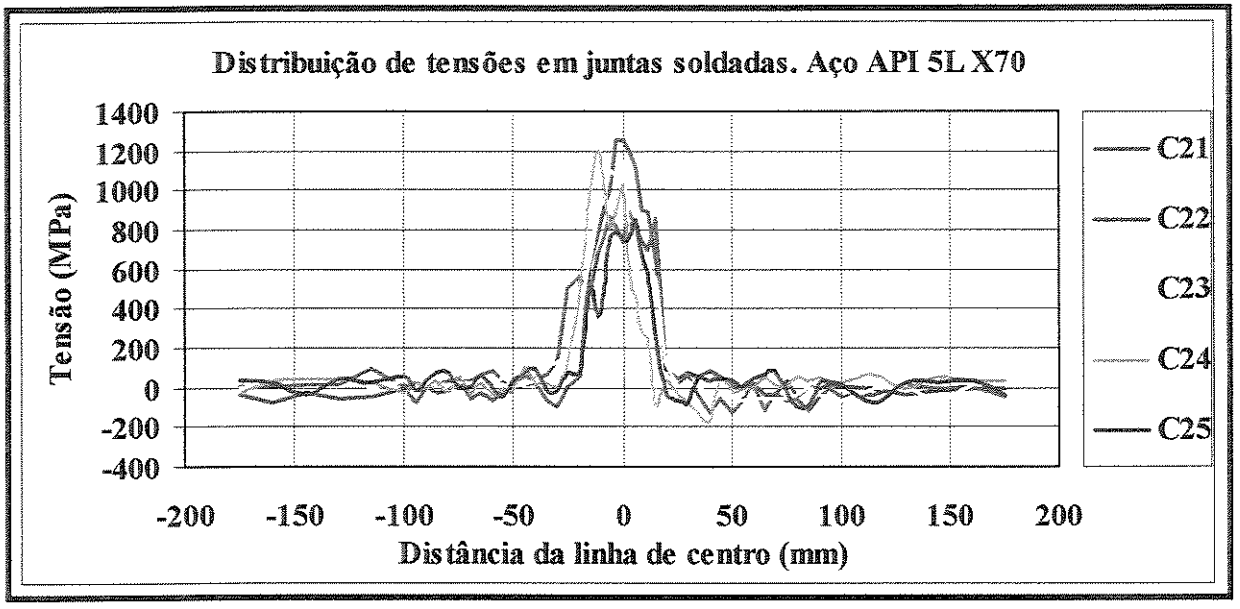


Figura 4.38: Perfis dos conjuntos soldados longitudinais após alívio de tensões.

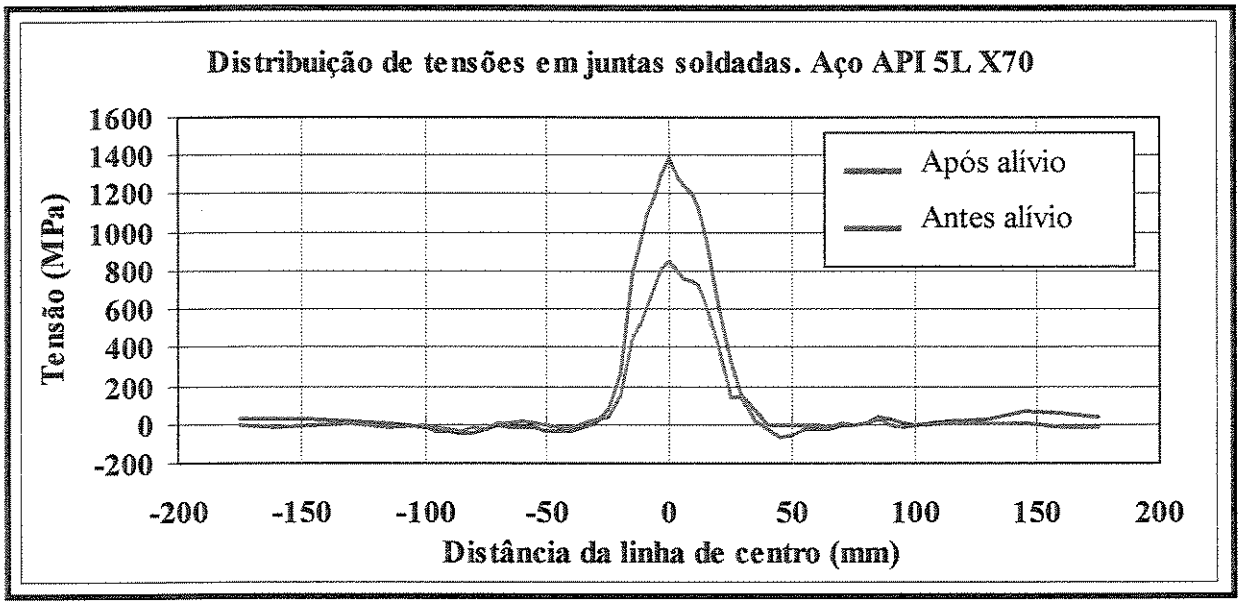


Figura 4.39: Perfil da média dos conjuntos soldados transversais antes e após alívio de tensões.

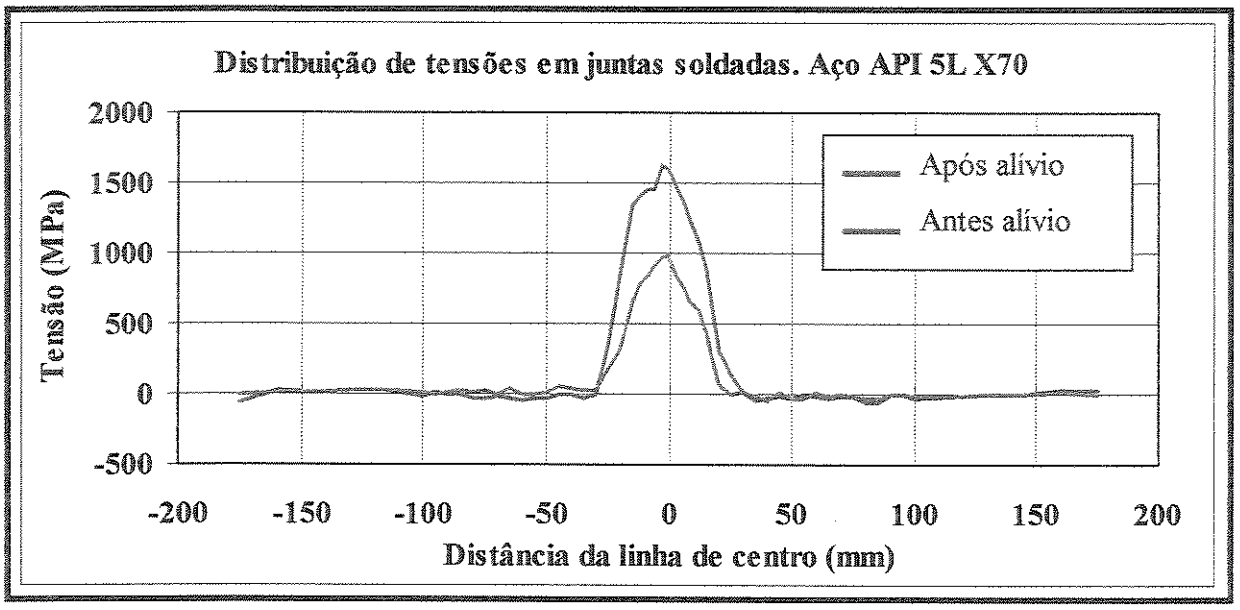


Figura 4.40: Perfil da média dos conjuntos soldados longitudinais antes e após alívio de tensões.

As figuras 4.41 e 4.42, mostram os perfis das diferenças de tensão ponto a ponto antes e após o alívio de tensões, respectivamente para as chapas transversais e longitudinais.

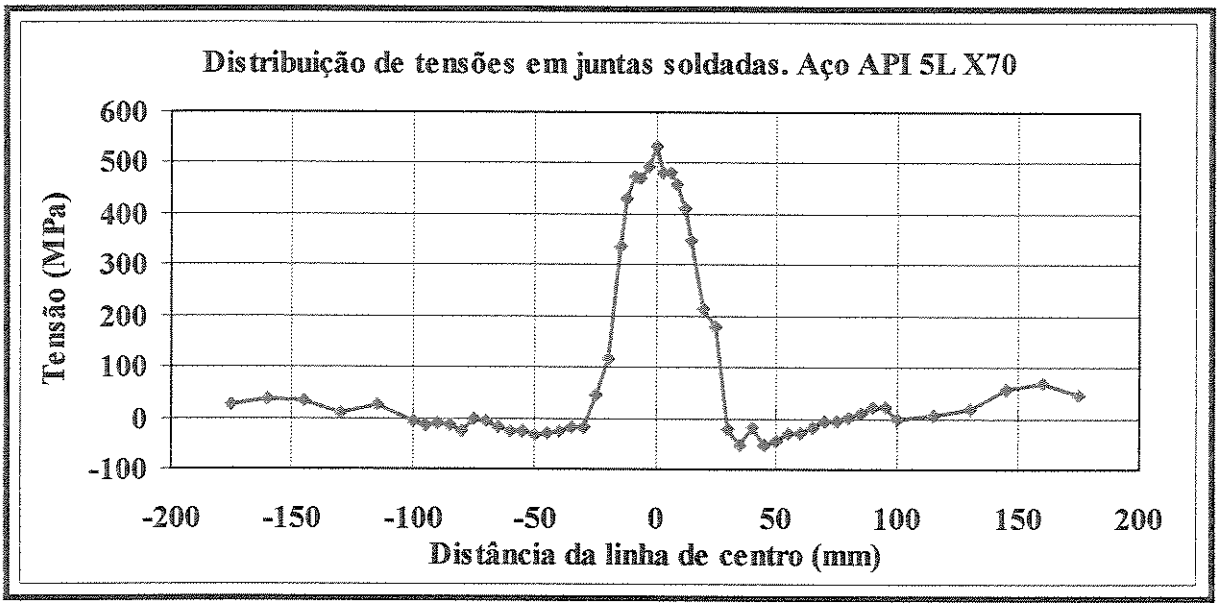


Figura 4.41: Perfil da diferença das tensões antes e após alívio para conjuntos soldados transversais.

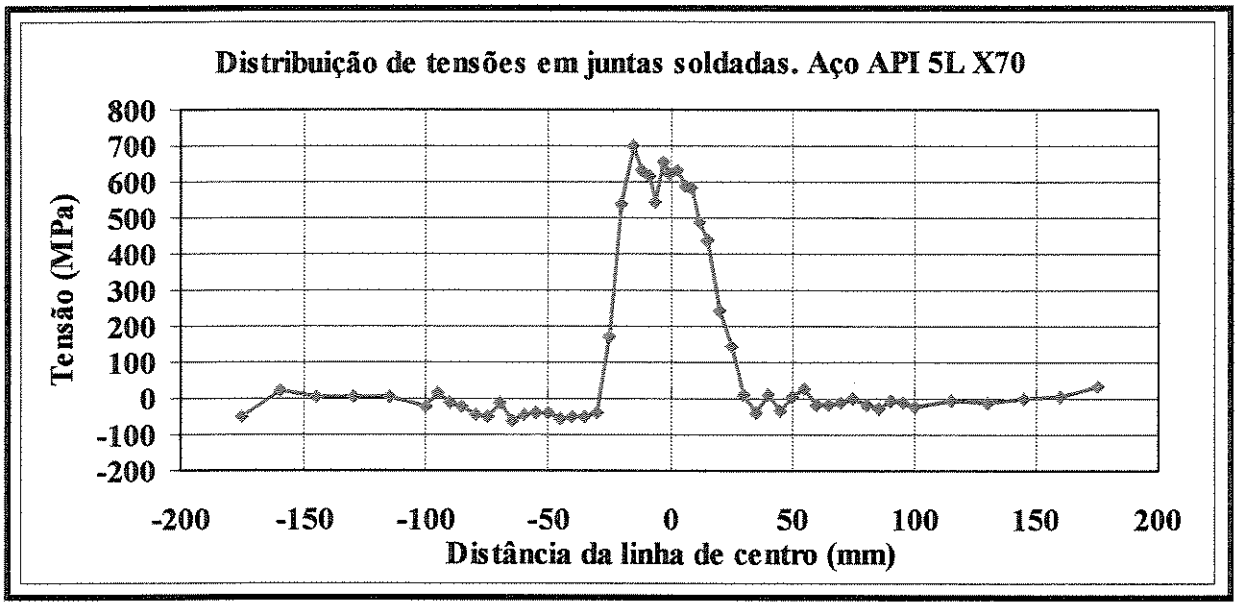


Figura 4.42: Perfil da diferença das tensões antes e após alívio para conjuntos soldados longitudinais.

Observa-se nas figuras um formato da curva esperado, mas ainda há problemas quanto ao nível de tensões. Em regiões distantes da solda é esperado que as tensões se aproximem do valor nulo. Isto não é o que é mostrado na figura 4.41. Tensões na ordem de 60 MPa, persistem em regiões longe da solda.

Assim, a figura 4.43 mostra o resultado obtido para as tensões retirando-se de todos os valores a média dos valores para os seis pontos mais afastados da solda, três de cada um dos lados. Esse valor médio é de cerca de 50 MPa. Os resultados apresentados nessa figura são absolutamente consistentes com o esperado, embora ainda requeiram explicação mais aprofundada.

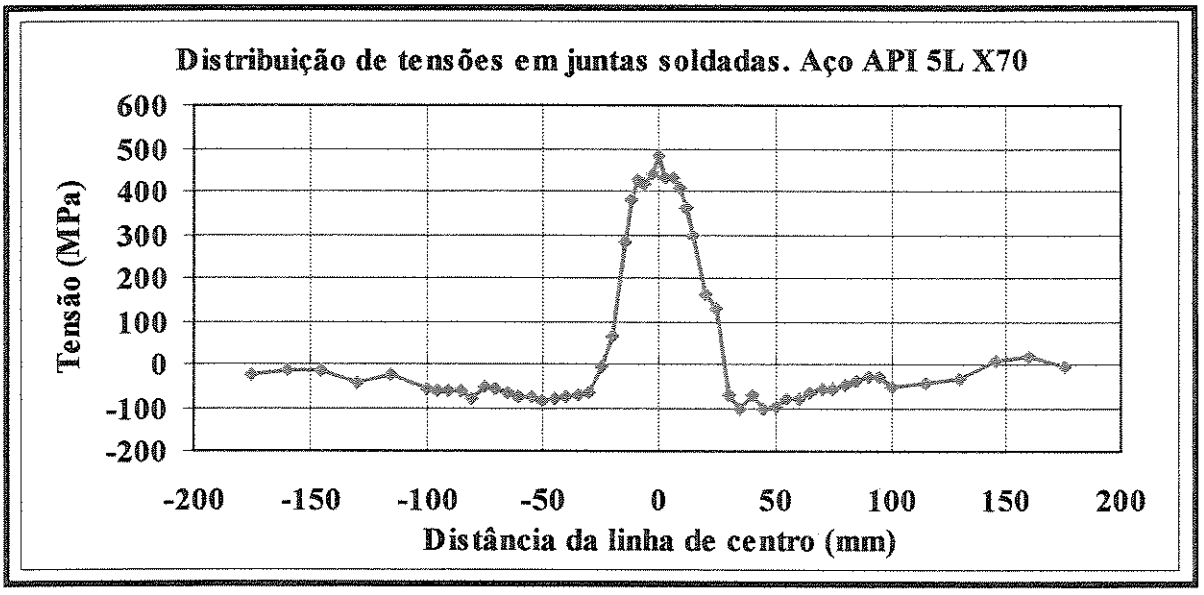


Figura 4.43: Valores corrigidos de tensões médias medidas antes e após alívio de tensões para conjuntos soldados transversais.

As figuras 4.44 e 4.45 mostram uma comparação entre os perfis das diferenças de tensão ponto a ponto antes e após o alívio de tensões (vermelho), em relação ao perfil levantado através da fórmula empírica 2.7 (verde).

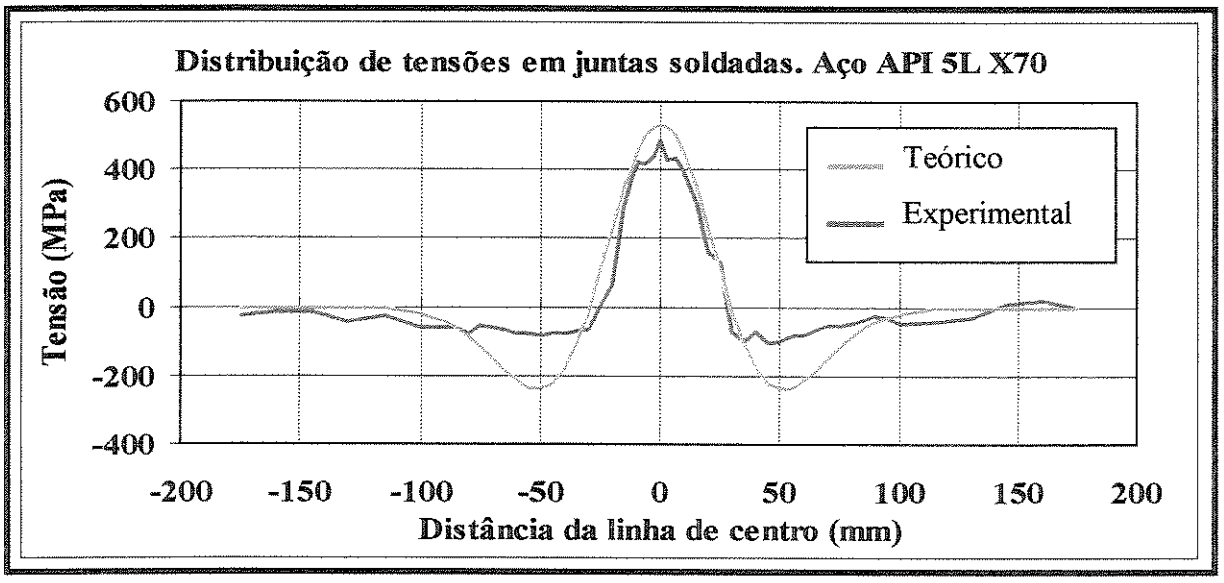


Figura 4.44: Comparação entre o perfil das diferenças de tensão antes e após o alívio de tensões para conjuntos transversais em relação ao perfil levantado pela fórmula empírica da distribuição de tensões residuais (Masubuchi,1980).

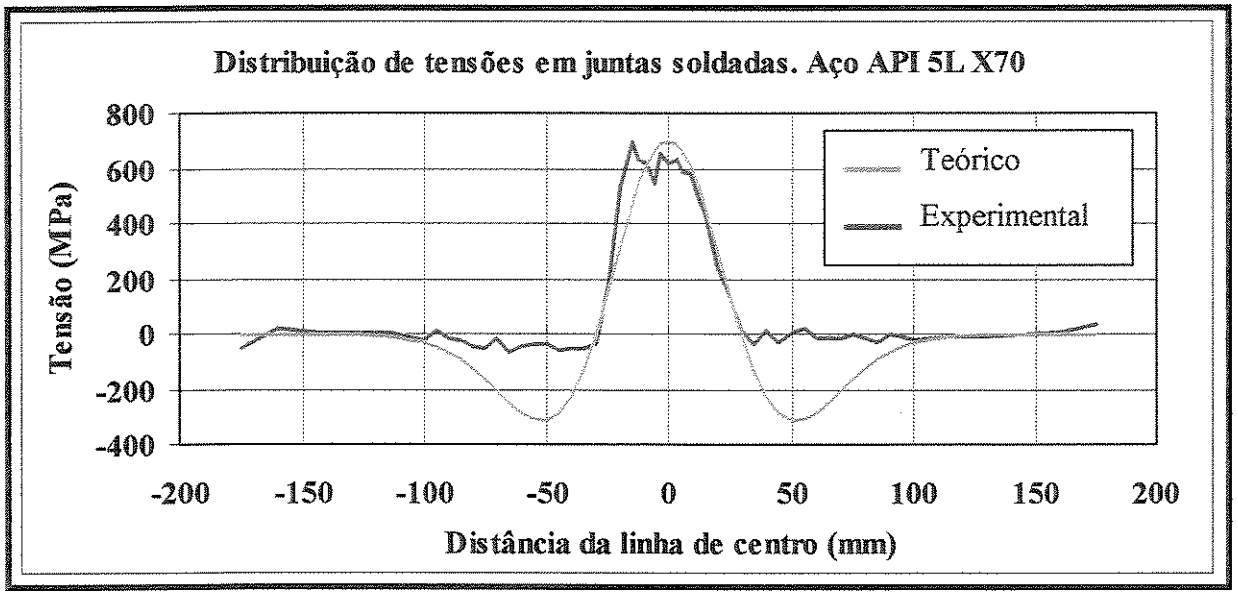


Figura 4.45: Comparação entre o perfil das diferenças de tensão antes e após o alívio de tensões para conjuntos longitudinais em relação ao perfil levantado pela fórmula empírica da distribuição de tensões residuais (Masubuchi,1980).

A figura 4.44 mostra a diferença em relação ao perfil de tensão corrigido, como visto anteriormente. A figura 4.45 mostra a comparação sem essa correção. Em ambas as figuras, pode-se perceber que o comportamento se mantém. Há apenas alguma diferença quanto a identificação da compressão nas extremidades. Estudos adicionais, verificando a questão da sensibilidade na região de compressão, devem ser feitos.

- ***Levantamento do perfil de tensões residuais com ondas transversais.***

Também para este caso foram levantados os perfis de tensões residuais através de ondas transversais ou cisalhantes. Foram utilizados os conjuntos C13 e C15 para o sentido transversal e os conjuntos C21 e C23 para o sentido longitudinal. Foi utilizado como tempo de percurso de referência para o estado livre de tensões os tempos das extremidades das chapas. As constantes acustoelásticas foram as determinadas no capitulo 3, tabela 3.6, e os mesmos procedimentos utilizados para ondas longitudinais foram utilizados aqui. Tomou-se o cuidado de utilizar as constantes corretas para cada caso. As figuras 4.46, 4.47, 4.48 e 4.49 mostram uma comparação entre os perfis de tensão longitudinal levantados com ondas longitudinais, em relação aos perfis levantados com ondas transversais. O perfil com a linha azul corresponde à tensão com geração de ondas longitudinais e com a linha vermelha corresponde à tensão com geração de ondas transversais.

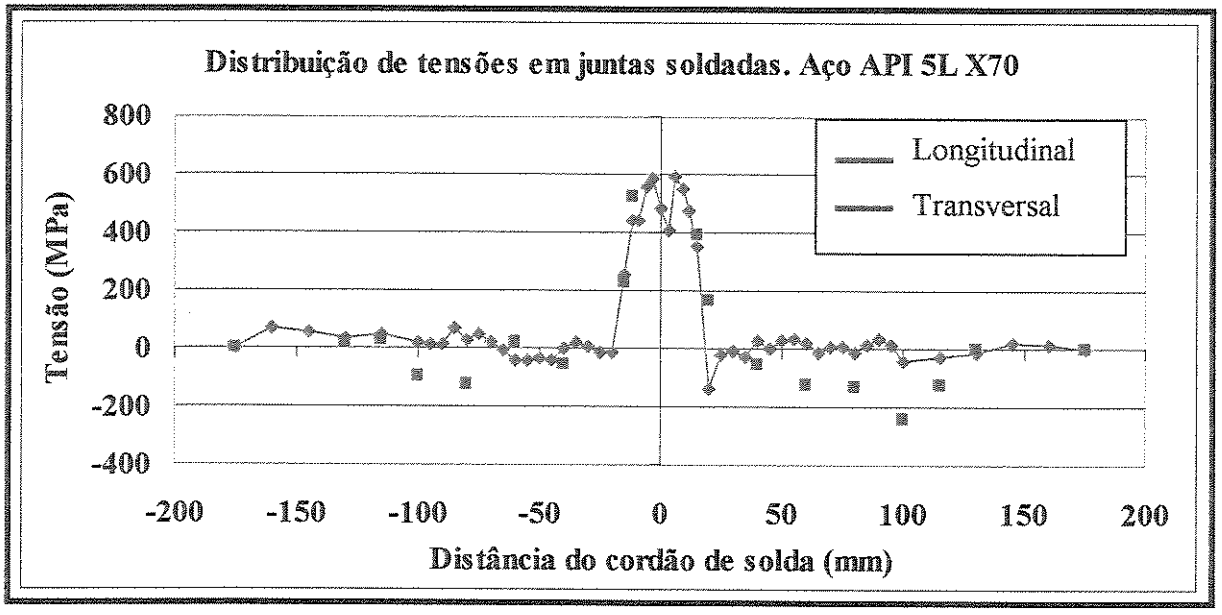


Figura 4.46: Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C13.

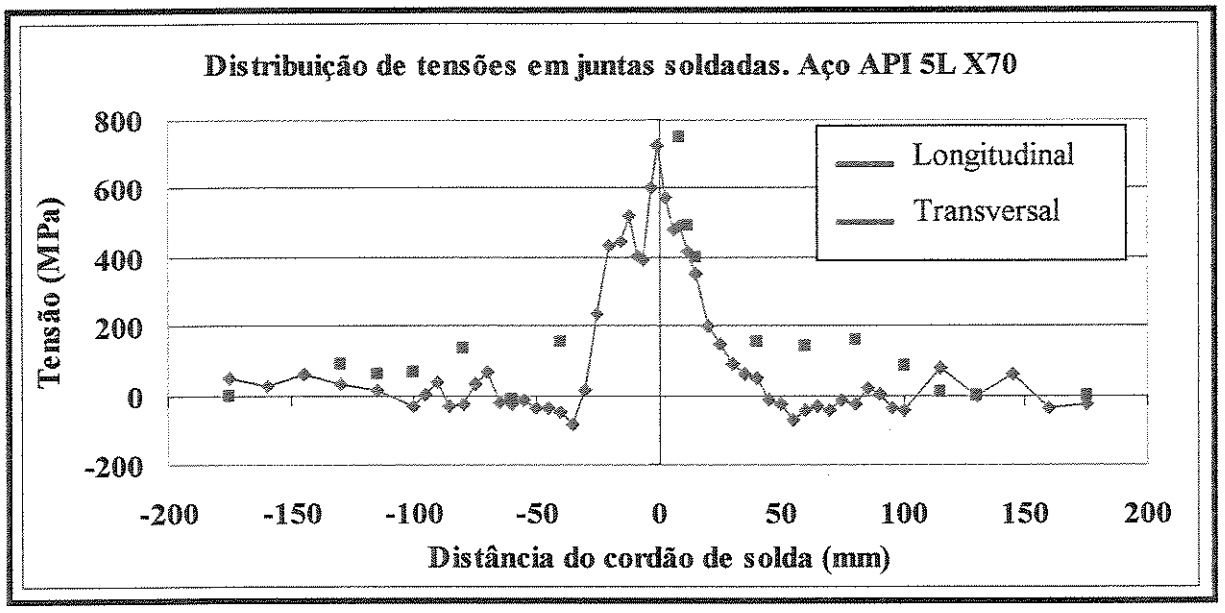


Figura 4.47: Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C15.

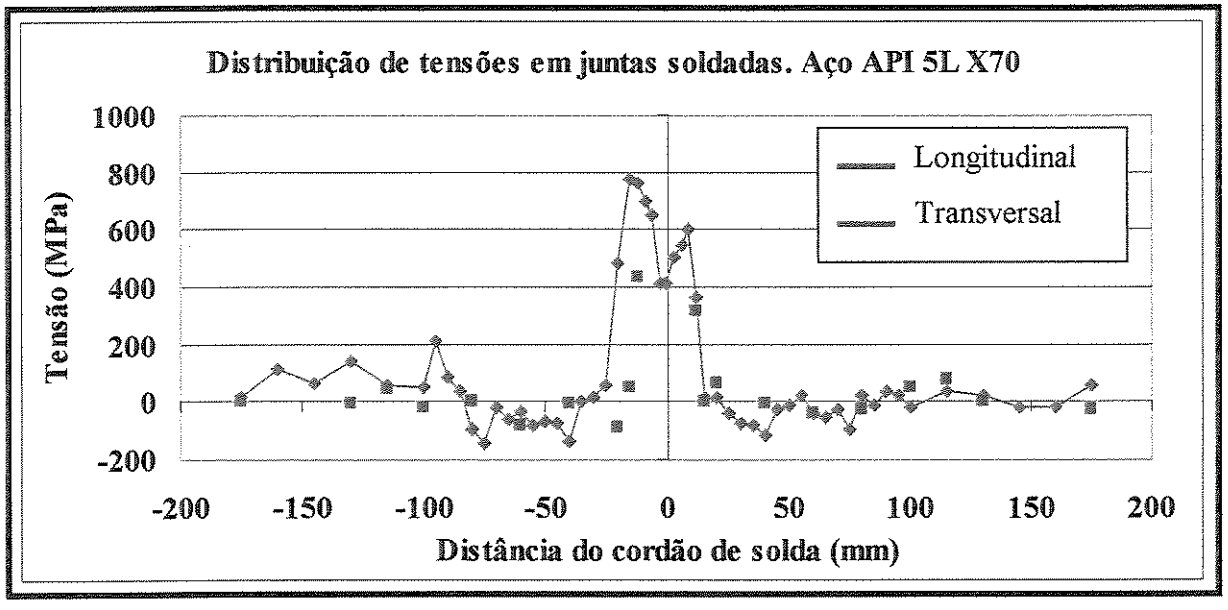


Figura 4.48: Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C21.

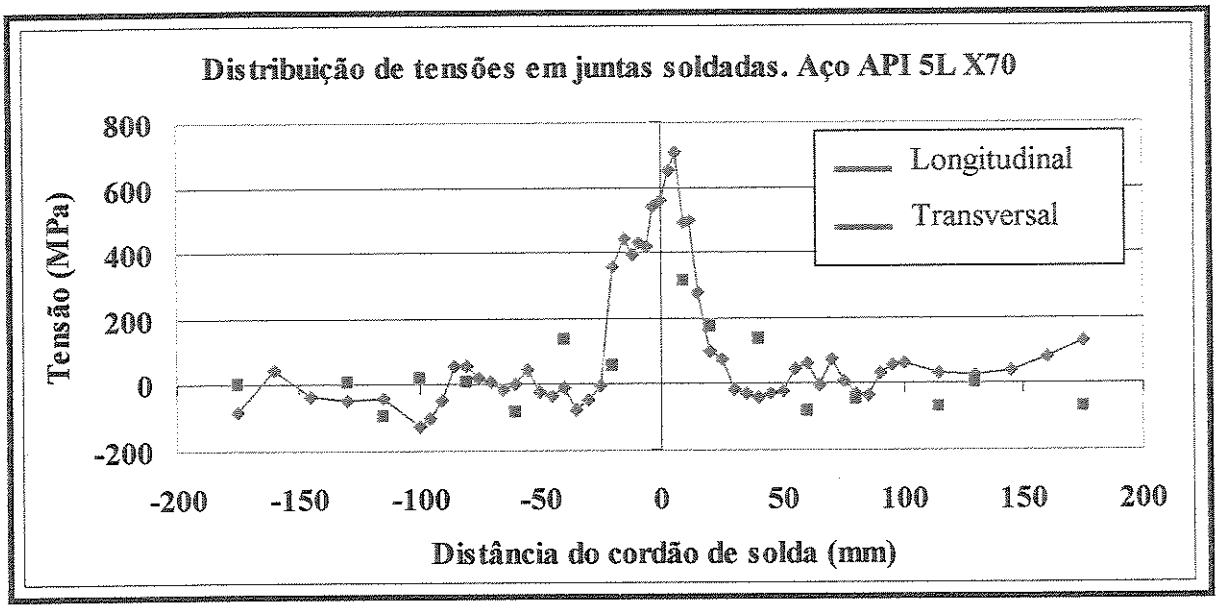


Figura 4.49: Comparação do perfil de tensão medido através da birefringência com o perfil de tensão medido através de ondas longitudinais criticamente refratadas para o conjunto soldado C23.

Em algumas figuras, nas regiões do metal fundido, os resultados não são mostrados, pois são inconsistentes. Nota-se das figuras uma relação razoável entre os perfis extraídos pelos dois métodos. Uma explicação para a relação não tão boa entre perfis seria que a média do valor da tensão transversal na espessura do material é diferente de zero.

4.3 Ensaios metalográficos antes e após alivio de tensões para aços API 5L X70.

A fim de verificar a influência das microestruturas nos tempos de percurso para o aço API 5L X70, antes e após o alívio de tensões, foram realizados ensaios metalográficos nas regiões do cordão de solda e no material de base. As figuras 4.50 e 4.51 mostram exemplos de exames metalográficos para o conjunto soldado longitudinal antes e depois do alívio de tensões na região do cordão de solda.

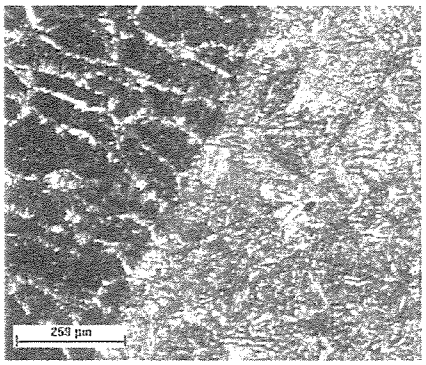


Figura 4.50: Micrografia do metal fundido e da ZTA antes do alivio de tensões para o conjunto soldado C25.

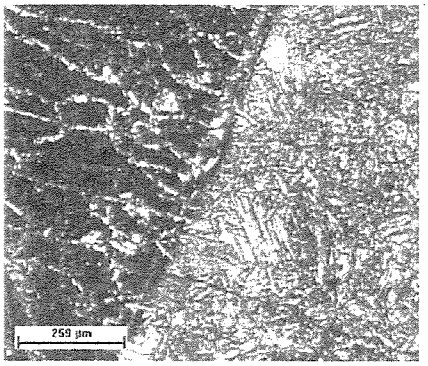


Figura 4.51: Micrografia do metal fundido e da ZTA após alivio de tensões para o conjunto soldado C25.

Analisando as figuras, observa-se que as estruturas não se modificaram, permanecendo estáveis antes e após o tratamento térmico, significando que apenas o perfil de tensão residual foi modificado pelo tratamento térmico e não por nenhuma influência da microestrutura nas velocidades ultra-sônicas. O apêndice B mostra as micrografias para outras regiões do conjunto soldado.

4.4 Determinação da relaxação para aços API 5L X70.

Para a determinação da relaxação em chapas de aço API 5L X70, foram utilizadas ondas longitudinais. Foram utilizadas chapas nos dois sentidos de laminação. Os tempos de percurso para a determinação das tensões foram medidos nos dois lados da chapa e depois foi tirada uma média destes valores.

Os gráficos das figuras 4.52 e 4.53 mostram a relação entre a tensão determinada e o tempo decorrido entre solda e corte para chapas no sentido longitudinal e no sentido transversal com geração de ondas longitudinais, respectivamente.

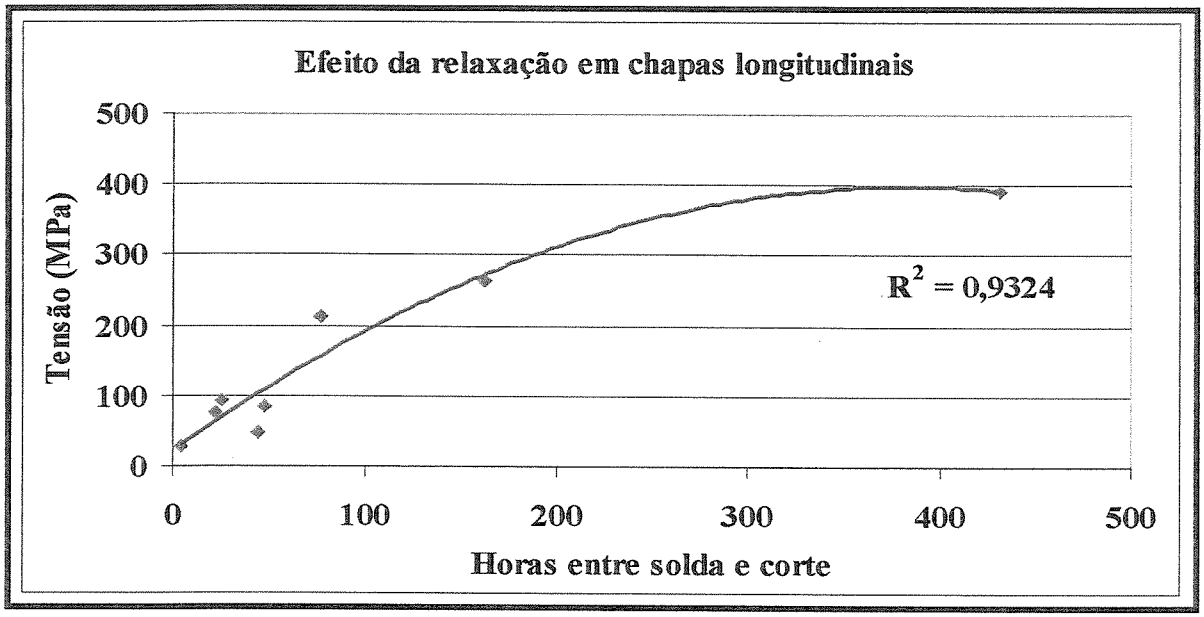


Figura 4.52: Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas longitudinais.

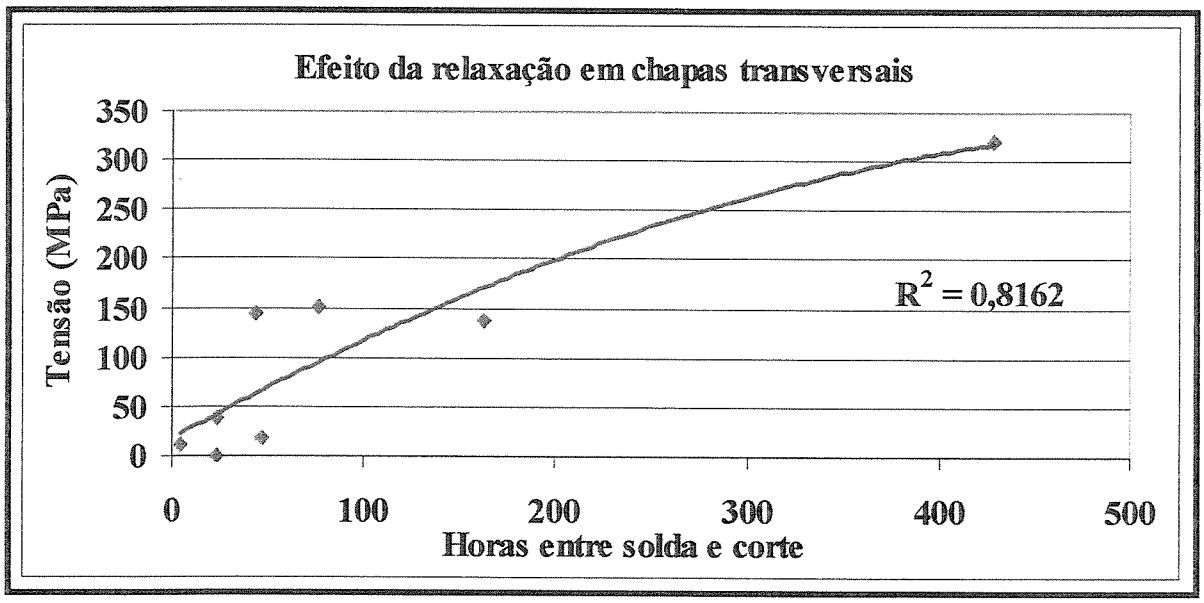


Figura 4.53: Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas transversais.

Como a tensão original na região era de compressão e não nula, está havendo uma diferença de "offset". Os gráficos anteriores mostram que a diferença aumenta, ou seja, que as tensões são menos compressivas. Uma melhor forma de visualizar a magnitude da relaxação é colocar o valor assintótico como referência. As figuras 4.54 e 4.55 mostram o efeito claramente.

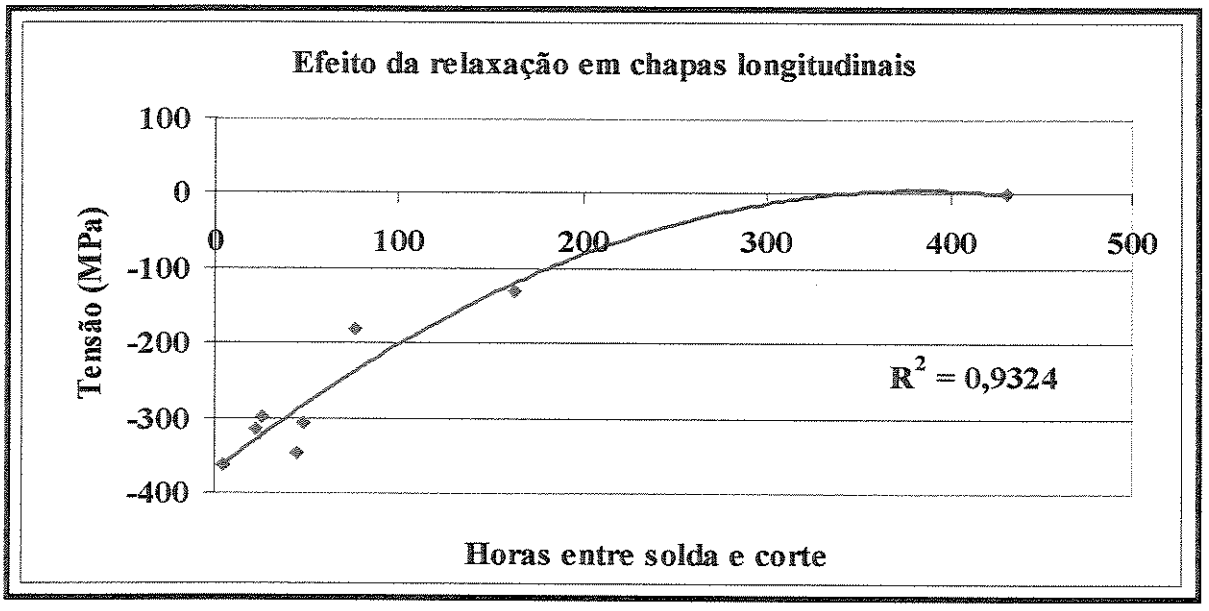


Figura 4.54: Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas longitudinais (referência).

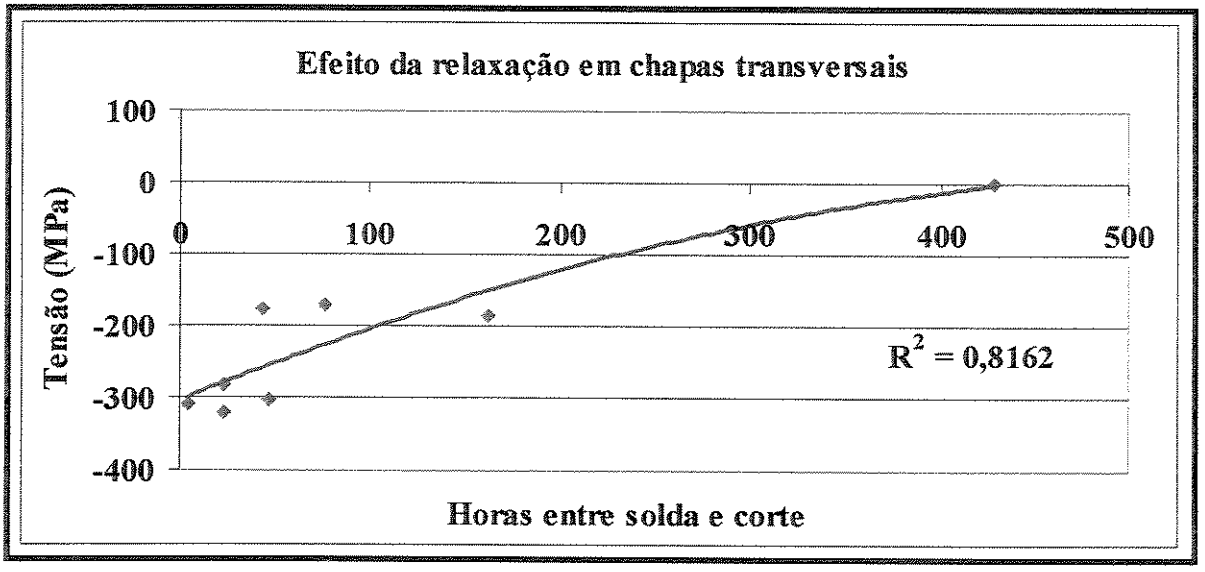


Figura 4.55: Relação entre tensão medida e tempo decorrido entre solda e corte para chapas transversais (referência).

4.5 Discussões.

Os resultados obtidos neste trabalho apresentado mostraram:

- Com relação ao levantamento do perfil de tensões residuais para aços API 5L X65, verificou-se uma similaridade entre picos na região do cordão de solda. Os resultados foram coerentes, já que as tensões na região da solda são de tração e maiores em relação a regiões vizinhas e distantes do cordão de solda. As magnitudes das tensões nas regiões do cordão de solda medidas antes do alívio foram maiores que o valor do limite de escoamento do material. Este fato não é coerente com a literatura e pode ser explicado pela presença de outros fatores de que influenciam a velocidade das ondas ultra-sônicas, além das tensões, agravado pelo uso de um valor certamente incorreto da constante acustoelástica.

- A solução para o problema de separação dos efeitos da tensão e dos demais, para este trabalho, foi realizar um alívio de tensões nos conjuntos soldados. Com a hipótese de que toda a tensão foi retirada pelo alívio, o que também pode não ser absolutamente verdadeiro, a diferença de tensão entre os valores originais e os medidos após o alívio seria a magnitude pré-existente. Essa é a hipótese básica que justifica o procedimento adotado.

- Após o alívio de tensões para aços API 5L X65, notou-se uma diminuição sensível das tensões, principalmente na região do cordão de solda. Verifica-se, através das figuras, que as curvas após o alívio de tensões mostraram um comportamento similar ao da curva original, antes do alívio de tensões. Fica claro que algum outro efeito pode estar ocorrendo, além da tensão que o processo de soldagem causou, já que os patamares originais ainda persistem, embora em outro nível de magnitude. Problemas como colocação do transdutor, efeito de não uniformidade no material da região da solda e não uniformidade da superfície da solda podem estar entre os principais causadores desse efeito.

- O perfil da diferença das médias das tensões residuais para aços API 5L X65 antes e após o alívio de tensões mostrou um formato da curva esperado, mas ainda mostrou problemas quanto ao nível de tensões. Levando-se em conta o erro de instrumental, que não foi feita uma correção

do valor da constante acustoelástica devido a microestrutura, e que o valor utilizado desta constante para o metal de base foi o determinado para o aço API 5L X70, os resultados mostram-se satisfatórios.

- Para o levantamento do perfil de tensões residuais para o aço API 5L X70, foram utilizados dois processos de medida: com o transdutor ultra-sônico posicionado paralelo ao sentido de laminação e com o transdutor ultra-sônico posicionado perpendicular ao sentido de laminação. Às primeiras deu-se o nome de chapas longitudinais e para as demais, transversais. Os picos de tensão para cada conjunto de chapas atingiram valores próximos. Os valores para as chapas longitudinais, de um modo geral, foram maiores que os valores para as chapas transversais. A razão provável é que o sentido de laminação favoreceu a relaxação de tensões de modo diferente.

- Os gráficos mostram que as tensões no cordão de solda atingem valores superiores ao do limite de escoamento do material para os perfis de tensões para chapas longitudinais de API 5L X70. O mesmo ocorre também para chapas de aço API 5L X65. Alguns procedimentos de correção foram aplicados, baseados na literatura, mas nenhum foi capaz de isolar totalmente os efeitos adicionais presentes. Com base nisso, não foi possível realizar essa filtragem. Acredita-se que os valores das tensões na região realmente possam ser superiores até mesmo ao limite de escoamento, identificando uma região com grande influência plástica. Para todos os tipos de correção utilizados neste trabalho as tensões médias diminuíram em relação ao perfil de tensão residual sem correção. Em especial, a correção utilizada para a constante acustoelástica devido à microestrutura foi a utilizada por Walaszek, em sua publicação no ano de 2000.

- Além da influência da microestrutura nos valores da constante acustoelástica na região do cordão de solda, que pode ou não ser significativa, observou-se também influência em relação ao tempo de percurso nesta mesma região. Fica claro que o tempo de percurso para o estado livre de tensões não é o mesmo para o metal de base, uma vez que ocorre nesta região uma fusão de materiais diferentes. O aço é analisado juntamente com o metal de adição, resultando assim em uma terceira estrutura. Uma tentativa de corrigir este tempo de percurso foi feita. Utilizou-se o valor do tempo de percurso da extremidade das chapas após estas terem sofrido alívio de tensões.

Comparando os valores das médias das tensões com esta correção com os valores obtidos das médias sem correção, observou-se uma diminuição da magnitude para todas as chapas. Esta correção utilizou um valor de referência, mesmo considerando que seria mais adequado analisar separadamente esta região com corpos de prova preparados especialmente para este fim, extraídos da região da solda. Este é um dos trabalhos futuros decorrentes dessa pesquisa.

- Para os aços API 5L X70, observou-se também a diminuição da magnitude das tensões residuais no cordão de solda com o alívio de tensões. Em regiões afastadas, as magnitudes permaneceram praticamente inalteradas. Como no aço API 5L X65, também se observa uma similaridade de curvas antes e após o alívio de tensões. As mesmas discussões feitas para o aço API 5L X65 podem ser aplicadas aqui.

- O perfil de tensões residuais para as chapas de aço API 5L X70 também foram medidos com ondas transversais. Isso foi feito apenas para verificar a efetividade do método mais utilizado na medição de tensões, que utiliza o princípio da birefringência acústica, e os resultados não fazem parte do escopo desse trabalho. Nesse caso, observou-se uma correlação razoável entre perfis quando comparados com os levantados com ondas longitudinais. Para justificar a baixa correlação, deve-se destacar que os valores foram comparados com os medidos antes do alívio de tensões, o que faz com que o nível seja um pouco diferente. Além disso, ondas transversais permitem medir um valor médio das tensões na espessura do material, enquanto ondas longitudinais medem as tensões superficiais neste mesmo material. Como o material analisado não é homogênio nem isotrópico e sua espessura corresponde a 12,7 mm, as tensões em cada camada do material são diferentes ao longo da relação à espessura. Um alternativa de medição que poderia comprovar o exposto seria utilizar diferentes sensores com diferentes freqüências para ondas L_{cr}. Isso permitiria a varredura das tensões ao longo de diferentes camadas. Provavelmente, uma melhor concordância com os valores levantados pela birefringência seriam alcançados. Um segundo aspecto é que ondas longitudinais medem a tensão residual longitudinal (σ_l) e as ondas transversais medem a diferença de tensão nas duas direções (σ_l - σ_l). Como a tensão transversal é diferente de zero, há influência no resultado.

- Um resultado adicional diz respeito a tentativa de ajustar os valores obtidos a uma curva teórica sugerida em literatura. O ajuste mostra-se razoável, mas existem diferenças sensíveis, principalmente na região onde deveria haver compressão. Acredita-se que isto esteja ocorrendo devido ao ajuste da referência.

- Foram feitas análises metalográficas na região do cordão de solda e no material de base antes e após o alivio de tensões. Verificou-se que as microestruturas não variaram. Assim, ficou claro que os tempos de percurso determinados após o alivio de tensões diminuíram devido ao tratamento térmico e não devido a qualquer tipo de mudança microestrutural.

- O resultado da avaliação da relaxação de tensões em placas para o aço API 5L X70 foi extremamente interessante. Uma diferença de tensão de 392 MPa para as chapas longitudinais e de 321 MPa para as chapas transversais foi encontrado após um tempo de aproximadamente 430 horas. Surpreendentemente, não houve variação significativa entre as tensões antes do corte da solda e nas horas que se seguiram. No entanto, ao longo das horas e dias que se seguiram, as tensões variaram significativamente, tendendo a um valor assintótico. Considerando que a tensão inicial na região sob análise era de compressão, o que ocorreu foi uma nítida relaxação dessa compressão, mostrando que o fenômeno realmente existe.

Capítulo 5

Conclusões

Os perfis de tensão longitudinal, levantados tanto para o aço API 5L X65 como para o aço API 5L X70, mostraram concordância com o perfil de tensões esperado. Verificou-se uma região de tração no cordão de solda e, em regiões mais afastadas, estas tensões foram diminuindo. Os resultados após o alívio de tensões mostraram-se condizentes com o encontrado em literatura, indicando que o método pode ser utilizado na medição das tensões. Uma única ressalva deve ser feita quanto aos valores obtidos para as tensões de compressão nas vizinhanças do cordão de solda. A magnitude dessas tensões ficou abaixo da esperada, talvez indicando o desnível ("offset") causado pela referência utilizada para o estado livre de tensões.

Uma metodologia consagrada em literatura foi utilizada para verificar o fenômeno de relaxação. A medição mostrou que, após 430 horas, o nível de tensão variou em 392 MPa para as chapas longitudinais e de 321 MPa para as chapas transversais. O resultado é extremamente animador, pois permite verificar que estruturas soldadas sofrem algum tipo de relaxação na temperatura ambiente, mesmo após o corte das soldas. Isso permitiria otimizar projetos estruturais, já que o fator tempo após soldagem também entraria no conjunto de fatores de influência no projeto.

Esse trabalho atingiu os objetivos propostos, permitindo a verificação da efetividade do método ultra-sônico para a obtenção dos perfis de tensão residual para materiais usados na confecção de gasodutos e para medir a relaxação de tensão residual em chapas soldadas.

As seguintes observações adicionais podem ser retiradas dos resultados obtidos neste trabalho:

- Existe a necessidade de uma amostra de referência livre de tensões, com a mesma estrutura do material de interesse para a posterior determinação das tensões.

- Os níveis de tensão residual atingem valores próximos ou superiores ao limite de escoamento do material (Aço API 5L X65 = 550 MPa, Aço API 5L X70 = 600 MPa) na região da solda, o que pode facilitar danos para a estrutura.

- O método ultra-sônico foi capaz de medir a diferença de tensões antes e após o alívio de tensões. Deste modo ele pode ser aplicado para a otimização da qualidade do processo de soldagem e, talvez, do processo de laminação.

- Existe influência do sentido de laminação na determinação dos perfis de tensão residual em juntas soldadas. Os resultados foram próximos para cada conjunto de chapa, mas não iguais, sendo que as chapas transversais apresentaram maior magnitude de tensões que as longitudinais.

- Importantes modificações nos projetos de juntas soldadas podem ser feitas, uma vez provado que tensões residuais podem diminuir de magnitude durante o tempo. Seria adequado validar os resultados com outros, obtidos com corpos de prova de outras formas.

- O programa L-Stress V1.0, utilizado para a execução desse trabalho, mostrou-se uma ferramenta extremamente útil e eficaz. Foi desenvolvido pelo autor desta dissertação e registrado como propriedade da Unicamp, e esta sendo modificado para incluir novas funções tais como a automatização do processo de aplicação de força e a criação de um banco de dados para constantes acustoelásticas.

Referências Bibliográficas

ALLEN, D. R. et al. The Use of Ultrasonics to Measure Residual Stress. In: **Research Techniques in Nondestructive Testing.** London: Academic Press, 1982. Cap. 4, v. 6, p. 151-209.

ANDERSON, W. L.; XIANG, P.; JENSEN, C. E. Subsurface Stress Detection Using Ultrasonics and Time-Varying Temperature. In: 16th SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE EVALUATION, 1987, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: Apr. 1987. p. 70-73.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som - Aspectos Básicos.** 3ª ed. São Paulo: Abende, 2002. 78 p.

ANDRINO, M. H. et al. Aplicação da Acustoelasticidade para Avaliação de Tensões em Soldas em Aço API 5L X 65. In: III CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (III PANNDT), 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2003.

ANDRINO, M. H. et al. Avaliação das Tensões em Chapas de Alumínio 7050 Utilizando o Efeito Acustoelástico. In: 6ª CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS - COTEQ, 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: 2002. 10p.

ANDRINO, M. H et al. 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.

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, p. 524-530, 1980.

BENTAHAR, M. Second and Third Order Elastic Constants Determination of an Isotropic Metal. **15th WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em: <http:// www.ndt.net / article / wcndt00 / papers / idn584 / idn584.htm>. Acesso em 10 de setembro de 2002.

BITTENCOURT, M. S. Q. et al. Research and Development in the Application Ultrasonic Testing Techniques in Brazil. **Materials Evaluation**. v.58, n.4, p. 537 - 541, Apr. 2000.

BOUDA, B. A.; BENCHAALA, A.; ALEM, K. Ultrasonic Characterization of Materials Hardness. **Ultrasonics,** v. 38, p. 224-227, 2000.

BRAY, D. E. Aplication 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. p. 157-161.

BRAY, D. E. Current Directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques. **15th WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em : <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn647/idn647.htm>. Acesso em 10 de setembro de 2002.

BRAY, D. E.; JUNGHANS, P. Application of the L_{CR} Ultrasonic Technique for Evaluation of Post-Weld Heat Treatment in Steel Plates. **NDT & E International,** v. 28, n. 4, p. 235-242, 1995.

BRAY, D. E.; LEON-SALAMANCA, T. Zero-Force Travel-Time Parameters of Ultrasonic Head-Waves in Railroad Rail. **Materials Evaluation,** v. 43, n. 7, p. 854 – 858, June, 1985.

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

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

CHANCE, B. H. **Ultrasonic Measurement of Residual Stress Relaxation in Welded Steel Plates Using Critically Refracted Longitudinal Waves.** 2000. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Texas A&M University. Texas.

CHARTELLIER, J.; TOURATIER, M. A New Method for Determining Acoustoelastic Constants and Plane Stresses in Textured Thin Plates. **Journal of the Acoustical Society of America,** v. 83, n.1, p. 109-117, Jan. 1988.

CLARK, A. V. et al. Ultrasonic Determination of Absolute Stresses in Aluminium and Steel Alloys. **Proceedings of the International Conference,** deutsche gesellschaft fur metallkunde Oct. 1986. pp. 207-214.

DEPUTAT, J.; SZELAZEK, J.; ADAMASKI, M. Experiences in Ultrasonic Measurements of Stresses in Rails. **Internacional Conference Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation**, Londres: Academic Publishers, 1992, p. 109-118.

DRAI, R.; SELLIDJ, F.; KHELIL, M.; BENCHAALA, A. Elaboration of Some Signal Processing Algorithms in Ultrasonic Techniques Application to Materials NDT. **Ultrasonics,** v. 38, p. 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, p. 741-744, Sep. 1976.

EGLE, D. M.; BRAY, D. E. Application of the Acoustoelastic Effect to Rail Stress Measurement. **Materials Evaluation,** v. 37, n. 4, p.41- 46, 1979.

GORI M. et al. Ultrasonic Assessment of Residual Stresses in the Rim of Railway Solid Wheels. **7th ECNDT - European Conference on Non-destructive Testing**, Copenhagen, v. 3, n. 7, 1998. Disponível em: < http:// www.ndt.net / article / ecndt98 / rail / 305 / 305.htm >. Acesso em 25 de julho de 2002.

HALKJAER, S.; SORENSEN, M. P.; KRISTENSEN, W. D. The propagation of Ultrasound in an Austenitic Weld. **Ultrasonics,** v. 38, p. 256-261, 2000.

HUGHES, D. S. ; KELLY, J. L. Second - Order Elastic Deformation of Solids. **Physical Review**, v. 92, n. 4, p. 1145 - 1149, Dec 1953.

JUNGHANS, P. G.; BRAY, D. E. Beam Characteristics of High Angle Longitudinal Wave Probes. In: NDE: APPLICATIONS, ADVANCED METHODS, CODES AND STANDARDS. PVP-V. 216, NDE V. 9. **Proceedings ASME Pressure Vessel and Piping Conference**, San Diego, CA: June 1991, p. 39 - 44.

KANDIL, F. A. et al. **A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Thecnique Selection.** Teddington, Middlesex, UK: Feb. 2001. 42 p. Disponível em: < http:// www.npl.co.uk / npl / cmmt / residualstress / pdf_files / review.pdf >. Acesso em: 15 de fevereiro de 2002.

KIPA, J. M.; BRAY, D. E. ; SANTOS, A. A. Surface Stress Measurement Using Longitudinal Critically Refracted (L_{cr}) Waves. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1999, Águas de Lindóia - SP. **Anais...** Águas de Lindóia: Out. 1999. 10p.

LAMY, C. A. et al. Avaliação por Ultra-Som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões. In: VI CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS E XXI CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2002, Salvador. **Anais...** Salvador, 2002. v. 1. p. 1 - 10.

LANDA, M.; PLESEK, J. Ultrasonic Techniques for Non-destructive Evaluation of Internal Stresses. **15th WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em: < http://www.ndt.net / article / wcndt00 / papers / idn440 / idn440.htm >. Acesso em: 15 de fevereiro de 2002.

LEON-SALAMANCA, T. **Ultrasonic Measurement of Residual Stress in Steels Using Critically Refracted Longitudinal Waves (L_{cr})**. 1988. 97 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Texas A&M University. Texas (EUA).

LEON-SALAMANCA, T. et al. Field Applications of an Ultrasonic Method For Stress Measurement in Structure. In: BOOGAARD, J. ; VAN DIJK, G. Nondestructive Testing. 1989, Amsterdam. **Proceeding 12th World Conference.** Amsterdam: 1989. p. 1484- 1489.

LOVE, A. E. H. A. **Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity.** New York: Dover Publication, 1944.

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.

LUBARDA, C. A. New Estimates of the Third-Order Elastic Constants for Isotropic Aggregates of Cubic Crystals. **Journal of the Mechanics and Physics of Solid,** v. 45, n. 4, p. 471- 490, 1997.

MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortions and their Consequences.** 1ª ed. London: Pergamom Press, 1980. 640 p.

MATAREZI, J. C. **Qualificação no Ensaio por Ultra-Som.** São José dos Campos: 2001. 43p.

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico.** Minas Gerais: Dez. 2001. 25p. Disponível em: < http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf >. Acesso em: 15 de março de 2002.

MOFFAT, W. H. **An Investigation of Residual Stress in Welded Joints.** 1951. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Texas A&M University. Texas (EUA).

MURNAGHAN, T. D. **Finite Deformation of an Elastic Solid.** New York: John Wiley and Sons, 1951.

NDTnet. **The Online Journal of Nondestructive Testing.** Nondestructive Testing Encyclopedia. Disponível em: < http://www.ndt.net>. Acesso em 10 de janeiro de 2002.

OKADA, K. Acoustoelastic Determination of Stress in Slightly Orthotropic Materials. **Experimental Mechanics**, p. 461 - 466, Dec. 1981.

OKIMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** São Paulo: LTC, cap.5., 1982.

OLABI, A. G.; HASHMI, M. S. J. Stress Relief Procedures for Low Carbon Steel (1020) Welded Components. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 56, p. 552 - 562, 1996.

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

PAULA LEITE, P. G. **Ensaios Não Destrutivos**. São Paulo: ed. Édile, 1986.

SANCAR, B. N. Study of Cold Worked Austenitic Stainless Steel Using L_{cr} Waves. **15th WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em: < http://www.ndt.net / article / wcndt00 / papers / idn688 / idn688.htm >. Acesso em 20 de janeiro de 2002.

SANTOS, A. A.; BRAY, D. E. Ultrasonic Stress Measurement Using PC Based and Commercial Flaw Detectors. **Review of Scientific Instruments**, v. 71, n. 9, p. 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, Seatle, WA. **Proceedings...** Seattle: Ed. L. I. Ezekoye, Julho 2000, v. 409, p. 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, Seatle. **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.

SCHNEIDER E. Nondestructive Characterization of State and Properties of Aluminium Structures, **NDTnet**, v. 2, n. 6, 1997. Disponível em: < http://ndt.net/article/eschn/eschn.htm >. Acesso em: 15 de março de 2002.

SCHNEIDER, E. Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels, . 7th **ECNDT - European Conference on Non-destructive Testing**, Copenhagen, v. 3, n. 6, 1998. Disponível em: < http://www.ndt.net/article/ecndt98/rail/306/306.htm >. Acesso em 25 de julho de 2002.

SCHNEIDER, E. Ultrasonic Techniques. In: HAUK, V. **Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods.** Elsevier: 1997, p.522-563.

SOUSA, S. A. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos teóricos e práticos.** São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 5ª ed., 1982.

SRINIVASAN, M. N. et al. Ultrasonic Technique for Residual Stress Measurement in Ductile Iron Continuous Cast Round Bars. **Journal of Testing and Evaluation.** v. 20, n. 5, p. 331 - 335. Sep. 1992

TANALA, E. et al. Determination of Near Surface Residual Stresses on Welded Joints Using Ultrasonic Methods. **NDT & E Internacional**. v. 28, n. 2, p. 83 - 88, 1995.

WALASZEK, H.; ABDALLA, Y.; LIEURADE, H. P. Potentialities of Ultrasonics for Evaluating Residual Stresses: Influence of microstructure. **15th WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em: < http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn785/idn785.htm >. Acesso em : 25 de março de 2002.

Apêndice A

Descrição funcional do software L-Stress V1.0.

O presente software, intitulado L-Stress V1.0, foi desenvolvido para calcular tensões em chapas através da aplicação de ondas longitudinais, por meio da técnica acustoelástica. As tensões são calculadas em função da variação do tempo de percurso de ondas ultra-sônicas. Este software foi devidamente registrado junto ao INPI, sob o Número 42566.

O software, que pode ser carregado através do código L-Stress.exe, foi desenvolvido a partir do programa comercial LabVIEW V.6.i da National Instruments. Para a sua confecção foram utilizadas as bibliotecas já disponíveis nessa plataforma, que são chamadas de VI, "Virtual Instruments". Para a sua utilização é necessário um sistema de aquisição de sinais, que consiste de uma placa de osciloscópio da National Instruments, de um sistema de excitação de pulsos, e de transdutores ultrasônicos.

Existem 3 tipos de placas de osciloscópio que podem ser utilizadas diretamente, que são:

- NI 5911
- NI 5102
- NI 5112

Todas as placas possuem trigger interno e externo e taxa de aquisição de 100 MHz. A primeira placa possui um canal, a segunda e a terceira possuem dois canais. Apesar do software ter sido desenvolvido para a utilização de um canal, as demais placas podem ser utilizadas.

A.1 Descrição das telas principais.

O software é composto por 5 telas principais que são:

- Apresentação
- Dados iniciais
- Osciloscópio
- Resultados
- Relatório

A navegação entre telas pode ser feita a qualquer momento e sua localização pode ser vista na figura A1, detalhe 1.

A.1.1 APRESENTAÇÃO.

Esta tela mostra uma apresentação com dados relativos a universidade onde foi elaborado o programa, além do título do programa e dois botões, cujas funções serão descritas a seguir.

- Créditos: Mostra dados referentes aos criadores do programa, nome, versão, e local onde foi desenvolvido. Pode ser visto no detalhe 2 da figura A1.

- Ajuda: Mostra detalhes de como manipular o programa, com tópicos de ajuda que visam facilitar a sua utilização por parte do usuário. Pode ser visto no detalhe 3 da figura A1.

Figura A1: Tela de apresentação do programa L-Stress V1.0.

A.1.2 DADOS INICIAIS.

Esta é a tela onde deve-se entrar com os dados principais do programa (figura A2). No detalhe 4, são mostrados os botões para a entrada dos dados referentes ao excitador de pulsos. No detalhe 5 é mostrada a barra a ser testada e no detalhe 6 seus respectivos dados.

Os desenhos dos transdutores e do tracionador que serão usados para a determinação das tensões são mostrados no detalhe 7. Podem ser vistos com maior clareza nas figuras A3 e A4.

O detalhe 8 mostra dados referentes ao arranjo dos transdutores ultra-sônicos. Deve-se entrar com uma estimativa da velocidade da onda ultra-sônica no acrílico e no material e suas respectivas distâncias percorridas. No desenho dos transdutores estão indicadas as cotas correspondentes a cada dado.

No detalhe 9, o usuário deve escolher o número de pressões e o número de medições que se deseja efetuar no experimento para o calculo das tensões. Também deve-se escolher a máxima carga a ser aplicada no material, sempre obedecendo às limitações do material a ser testado.

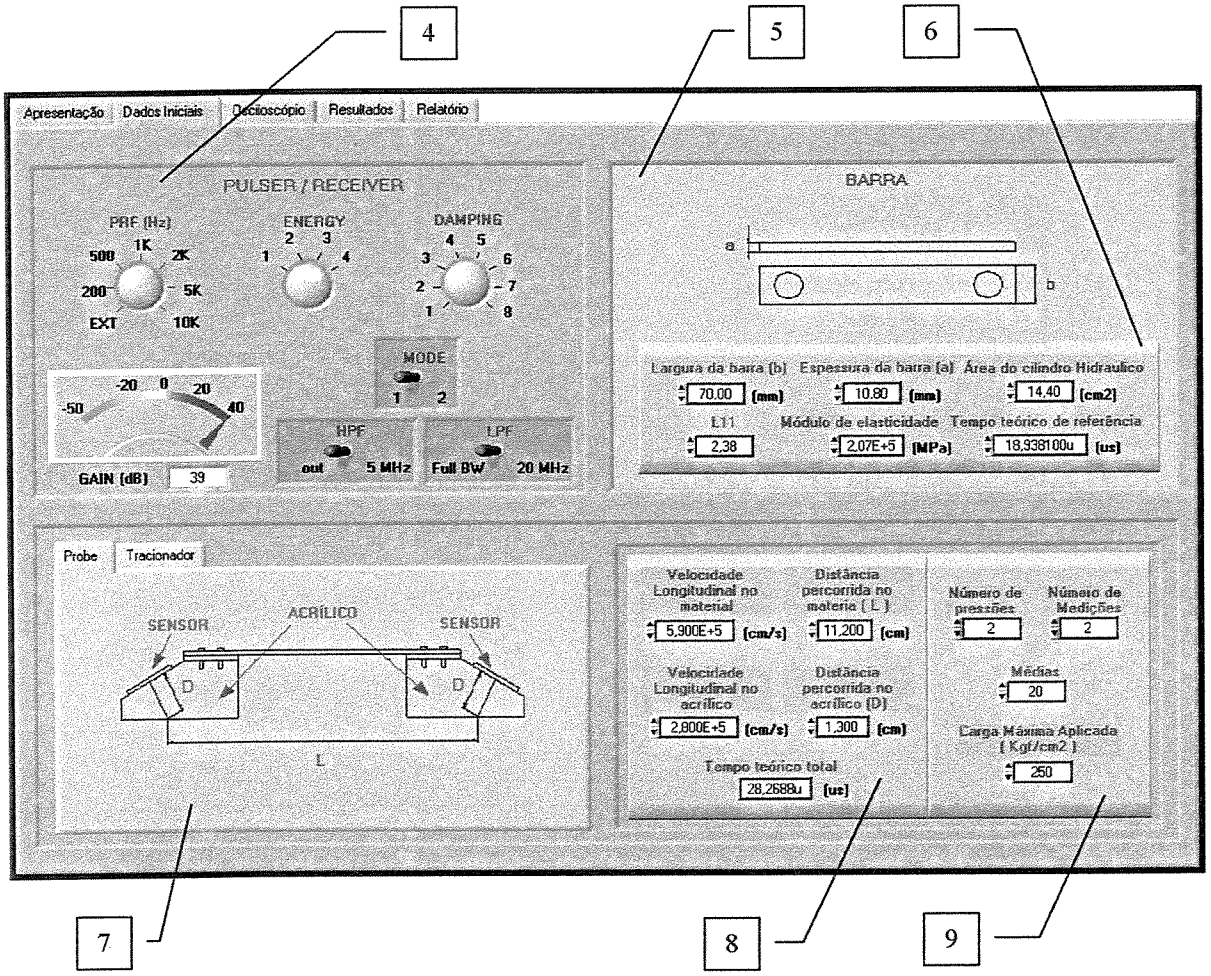


Figura A2: Tela de dados iniciais do programa L-Stress V1.0.

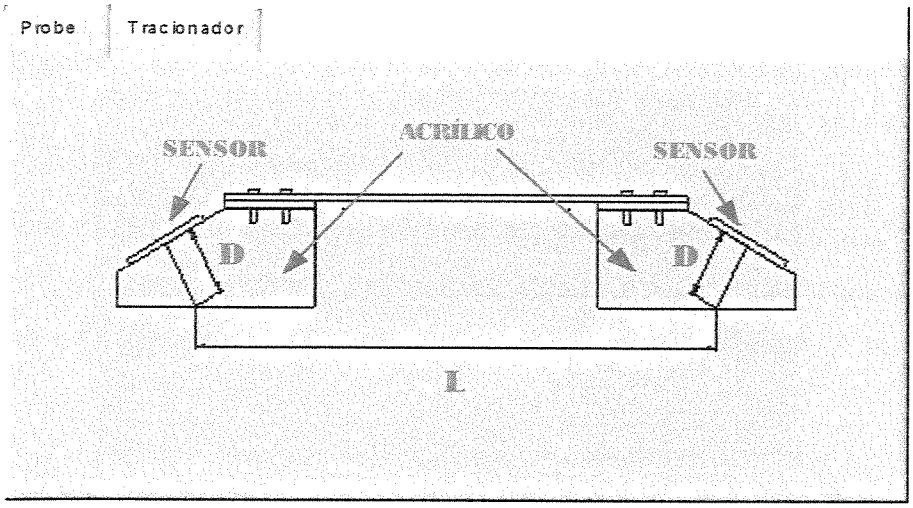


Figura A3: Detalhe das dimensões do transdutor ultra-sônico.

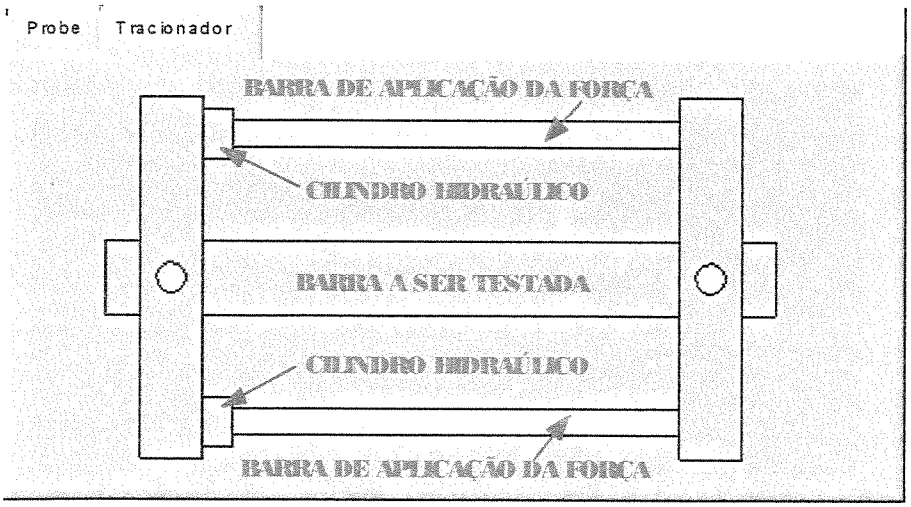


Figura A4: Detalhe do tracionador para medição dos tempos de percurso.

A.1.3 OSCILOSCÓPIO.

Esta é a tela que representa as funções básicas de um osciloscópio. Observa-se no detalhe 10 da figura A5, o sinal gerado pelo canal 1 e no canto superior esquerdo da tela, o mostrador da escala das divisões dos eixos x e y.

Nos detalhes 11 e 12 estão as funções básicas para o ajuste do sinal na tela do osciloscópio No detalhe 12 estão localizadas as funções básicas de trigger, podendo ser escolhido entre trigger interno ou externo, freqüência de amostragem e número de pontos contidos no sinal em análise.

No detalhe 13 pode ser visto o indicador de progresso das medições e da aplicação das pressões, como também um mostrador que indica a pressão que deve ser aplicada naquele momento. O botão "NOVA AQUISIÇÃO" sempre será solicitado quando um conjunto de médias do sinal em análise for necessário. Percebe-se que, quando os sinais estão sendo adquiridos, o botão fica cinza e desabilitado. Terminada a aquisição e estando pronto para a próxima, o botão volta a ficar habilitado e o usuário pode começar a próxima aquisição.

Sempre que uma nova pressão for requisitada, um aviso aparecerá na tela, alertando o usuário para a sua mudança para a continuidade das medições.

O detalhe 14 mostra a média da aquisição dos sinais, que foi pré-estabelecida na tela da figura A2, detalhe 9. Aqui está sendo mostrado o detalhe aumentado da primeira onda captada. Um fato importante a ser destacado é o cuidado que o usuário deve ter em determinar o nível de amplitude (figura A5, detalhe 12). Este deve ser informado ao programa para que se possa captar o valor adequado do tempo de percurso (figura A5, detalhe 13).

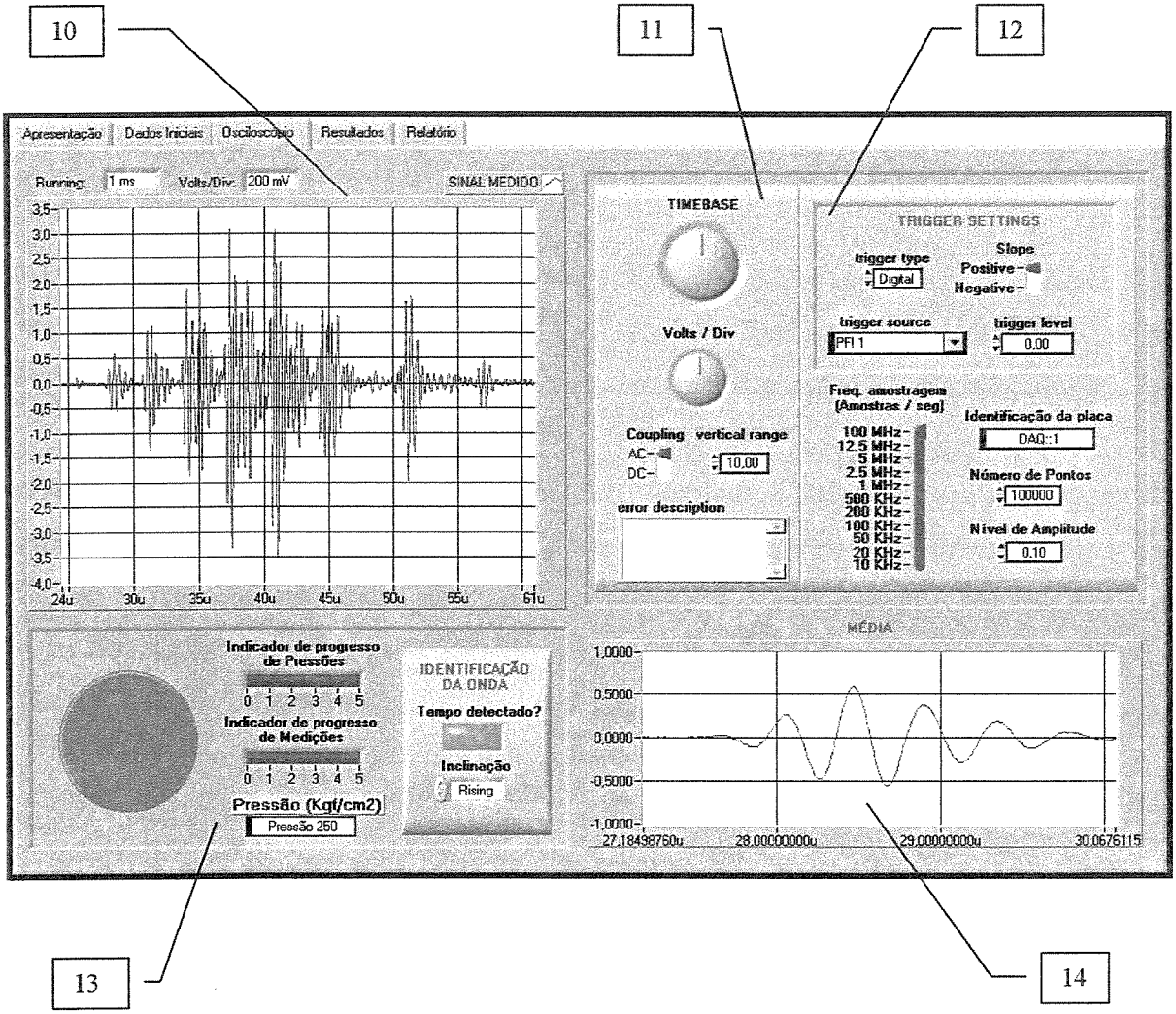


Figura A5: Tela do osciloscópio do programa L-Stress V1.0.

A.1.4 RESULTADOS

Nessa tela são mostrados os resultados finais obtidos através da aquisição dos dados feitos pelo osciloscópio.

No detalhe 15 da figura A6, são mostradas as pressões que foram aplicadas no tracionador (figura A4), as medições feitas, suas respectivas médias e também as tensões teóricas que serão

utilizadas para a confecção dos gráficos. As tensões teóricas são calculadas através dos dados contidos no detalhe 6 da figura A2.

No detalhe 16 vemos os gráficos obtidos e suas respectivas tensões experimentais. Existem aqui 3 páginas: a primeira mostra um gráfico contendo a relação entre as pressões aplicadas e as tensões experimentais e teóricas. Para este caso a constante acustoelástica (L_{11}) do material é suposta conhecida e deve ser inserida na página dos dados iniciais (figura A2, detalhe 6).

Na segunda página, o gráfico mostra a relação entre a tensão teórica e a tensão experimental. Com esse gráfico podemos calcular a constante acustoelástica do material em estudo.

A terceira página também mostra uma relação entre as pressões aplicadas e as respectivas tensões teóricas e experimentais. Nesse caso, as tensões experimentais são calculadas através da constante acustoelástica que foi calculada e que está sendo mostrada na página 2.

Este software foi desenvolvido tanto para a determinação das tensões em chapas como também para a determinação da constante acustoelástica do material.

Fica a critério do usuário a escolha entre uma opção ou outra. Se a opção for a determinação da constante acustoelástica , deve-se colocar o valor zero para L_{11} na página de dados iniciais. Desse modo, na página 1 do gráfico aparecerá a tensão teórica em relação às pressões aplicadas. No resultado das tensões aparecerá "INF", indicando que o usuário optou pela determinação da constante L_{11}. Caso a constante seja conhecida, deve-se colocar o valor da constante L_{11} para o material em estudo. Desse modo os resultados obtidos nas páginas 2 e 3 servirão como uma indicação da precisão do experimento realizado, mostrando um eventual erro no procedimento efetuado. Servirão também para medida de tensões.

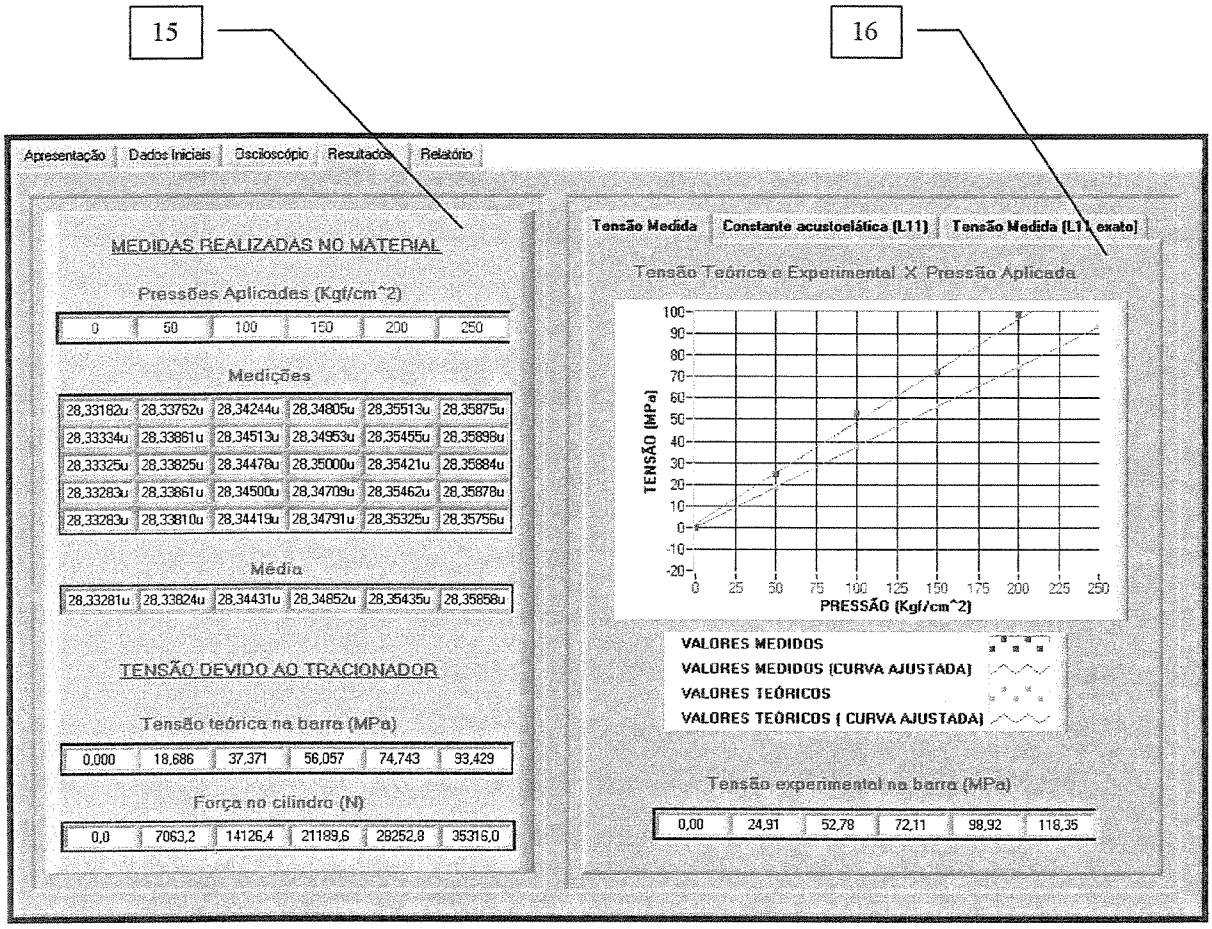


Figura A6: Tela de resultados do programa L-Stress V1.0

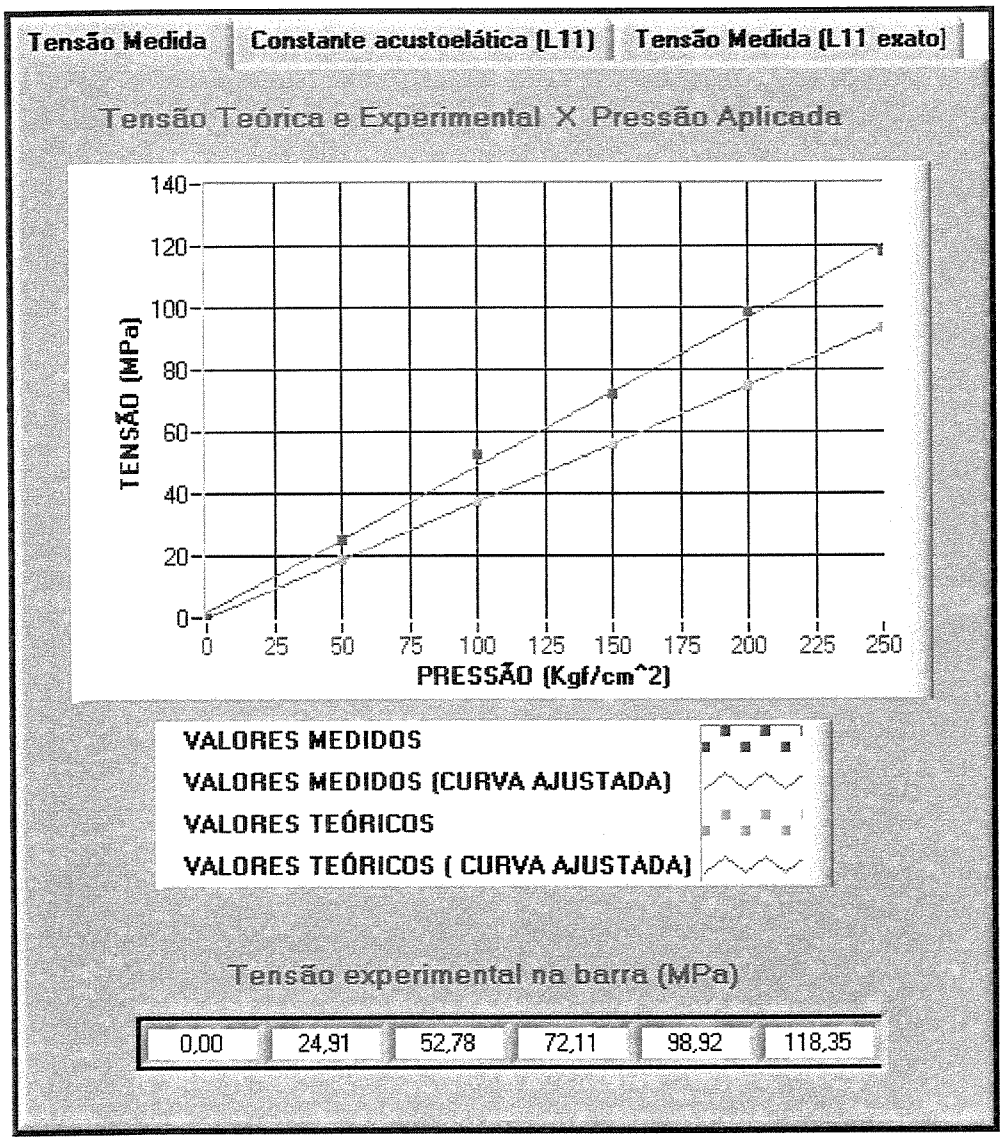


Figura A7: Tela de resultados para constante acustoelástica conhecida.

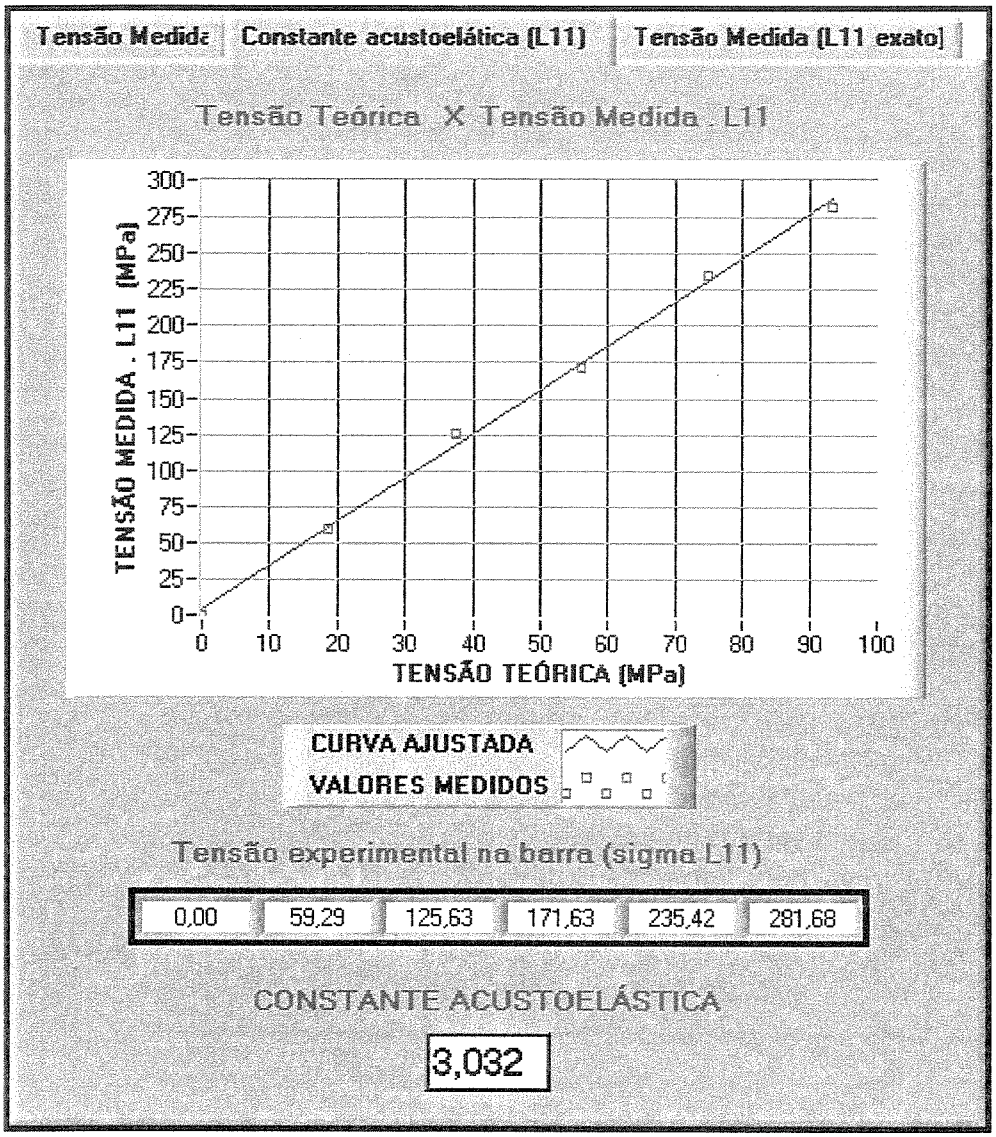


Figura A8: Tela de resultados com constante acustoelástica determinada.

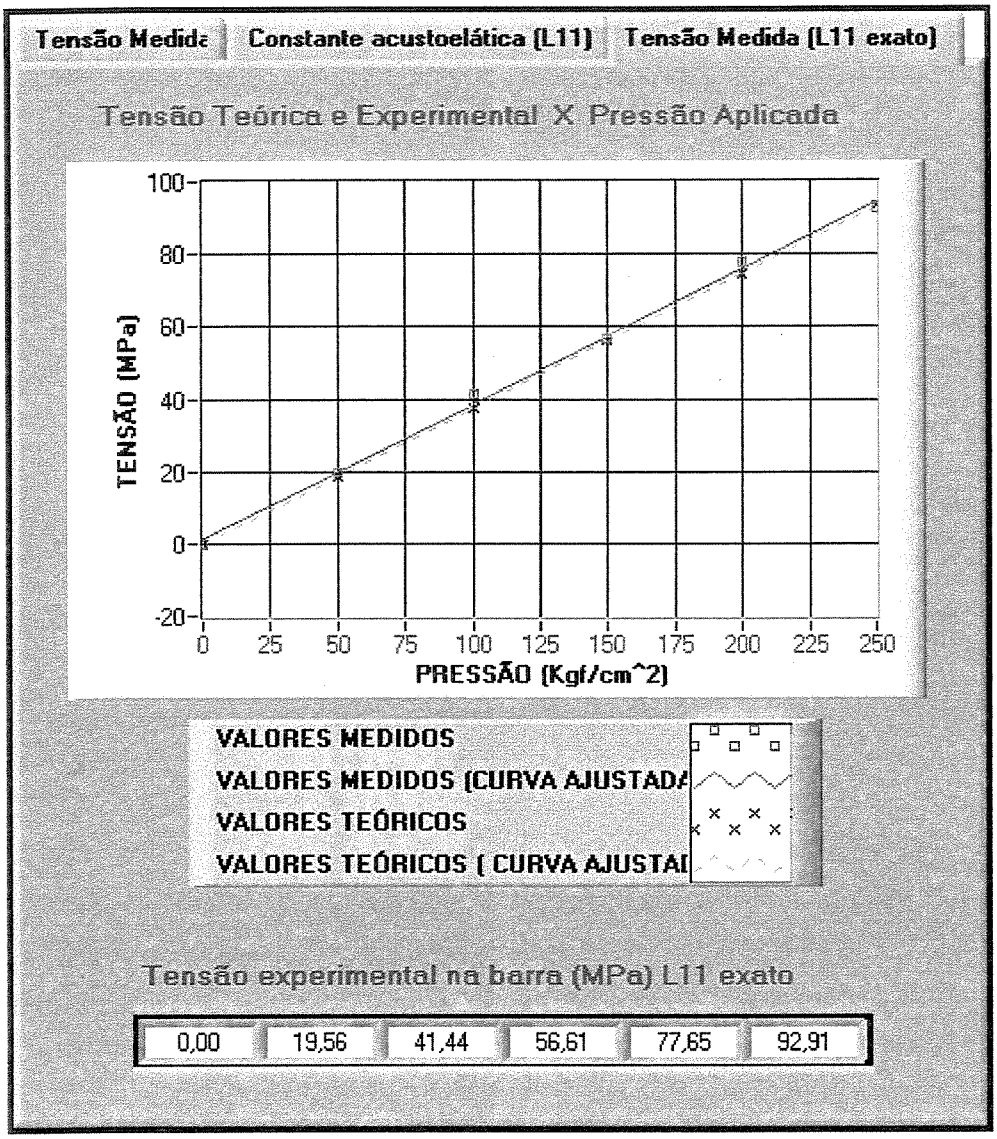


Figura A9: Tela de resultados com tensões determinadas.

A.1.5 RELATÓRIO.

Nesta tela o usuário deverá colocar o nome da pessoa responsável pelo experimento e a data de sua realização. Os dados que serão impressos no relatório estão indicados na figura A10. Além dessas informações, os dados referentes ao excitador de pulsos (figura A2, detalhe 4) também serão impressos. Um modelo do relatório é mostrado no final.

Ao final das aquisições, será aberta uma caixa de diálogo onde o usuário terá a opção de imprimir o relatório ou gravá-lo em disco. Após isso, outra caixa de diálogo se abrirá, na qual poderá ser feita a escolha entre uma nova aquisição de dados ou a finalização do programa.

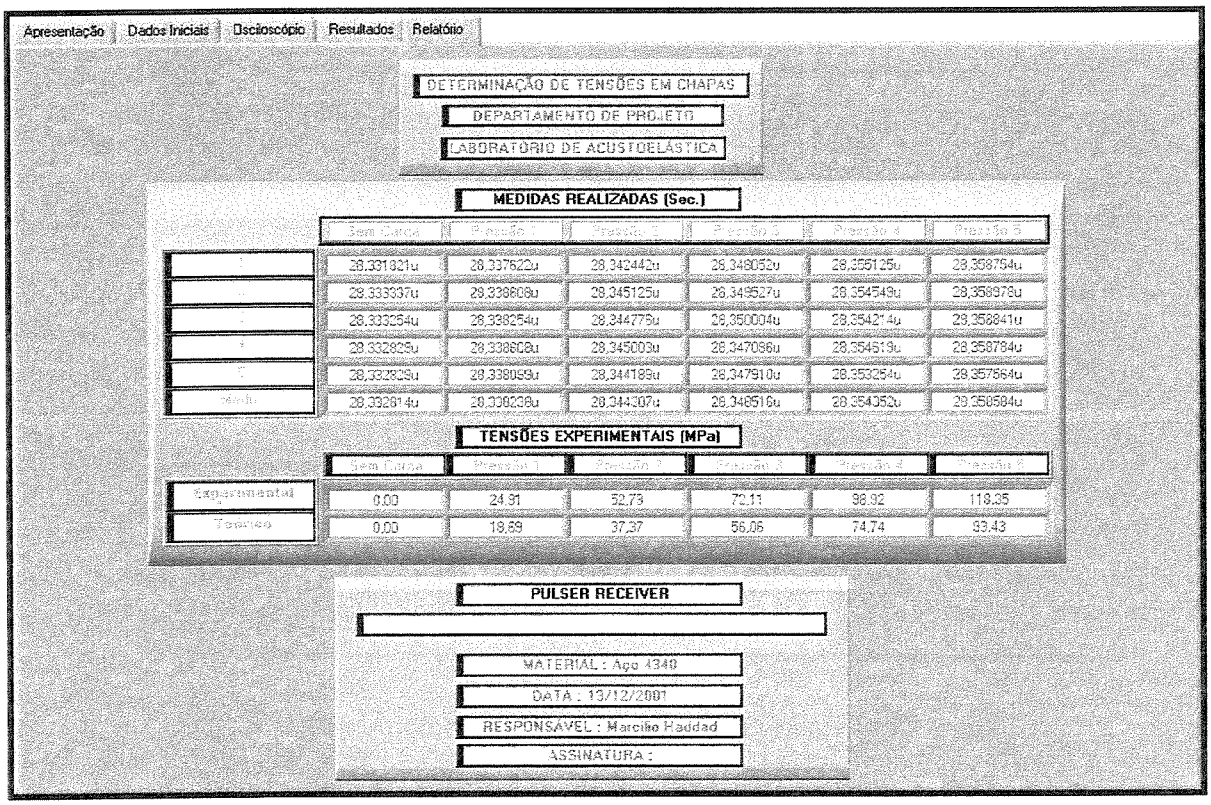


Figura A10: Tela de geração do relatório do programa L-Stress V1.0

A.2 Lista de Vis utilizadas na confecção do programa.

⇒ Beep.vi – Alerta sonoro.

⇒ Append Control Image to Report.vi – Anexa um figura ao relatório.

⇒ Mean.vi – Calcula a média de um conjunto de pontos.

⇒ Get Waveform Time Array.vi - Retorna os valores do tempo da onda.

⇒ Image in Header or Footer - Anexa uma figura no relatório ou no cabeçalho ou no rodapé.

⇒ Linear Fit.vi – Calcula o valor da intersecção, inclinação e o melhor ajuste da reta.

⇒ Append Numeric Table to Report.vi – Anexa uma tabela ao relatório.

⇒ Print Report.vi – Imprime o relatório.

⇒ Set Report Margins.vi – Configuração das margens de impressão.

⇒ Basic Level Trigger Detection.vi – Detecção do Trigger.

⇒ Polynomial interpolation.vi – Cálculo de interpolação.

⇒ Dispose Report – Finaliza o relatório.

⇒ Search Waveform.vi – Retorna o tempo da onda em x para uma determinada amplitude em y.

⇒ New Report.vi – Cria um novo relatório.

⇒ niScope Close .vi – Finaliza a aquisição dos sinais.

⇒ niScope Error Handler.vi – Retorna um erro caso ocorra algum problema na aquisição do sinal.

⇒ niScope Initialize.vi – Inicia a aquisição dos sinais.

⇒ niScope Sample rate.vi – Retorna a freqüência de amostragem do sinal analisado.

⇒ Append Report Text.vi – Anexa um texto ao relatório.

⇒ Save Report to File.vi – Grava o relatório em disco.

⇒ Waveform Sale and Offset.vi – Cria uma escala para a onda.

⇒ Set Report Header Text.vi – Anexa um texto no cabeçalho do relatório.

⇒ Set Report Font.vi – Configura as propriedades das fontes contidas no relatório.

⇒ niScope APP Sample Rate Acquire.vi – Configura a placa de osciloscópio para aquisição de sinais.

⇒ Normalize Waveform.vi – Determina a escala necessária para a centralização da onda no eixo x.

Apêndice B

Investigação metalográfica das placas de Aço API 5L X70, antes e após alívio de tensões.

As figuras a seguir mostram os exames metalográficos antes e após o alívio de tensões para regiões do metal de base, ZTA e metal fundido para os conjuntos soldados C11 e C25.

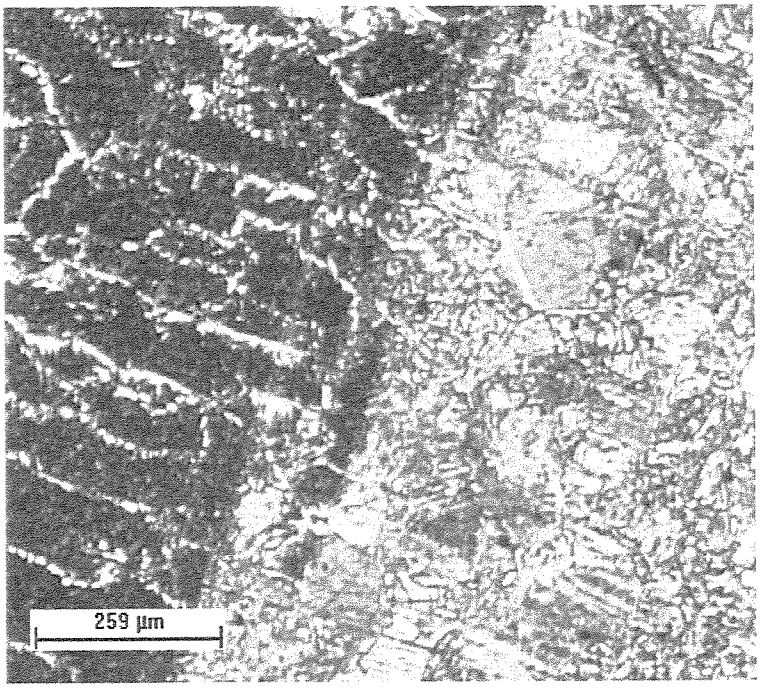


Figura B1: Micrografia do metal fundido e da ZTA antes do alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 200 X)

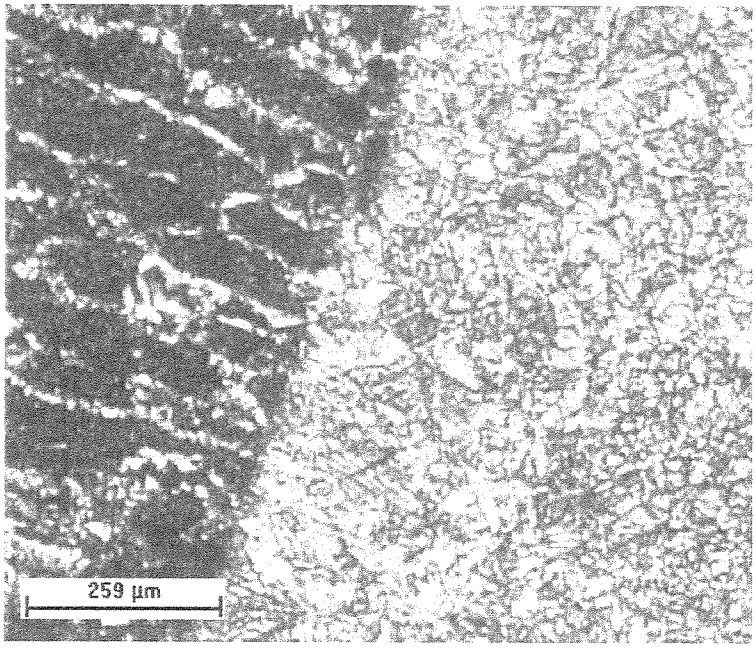


Figura B2: Micrografia do metal fundido e da ZTA após alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 200 X)

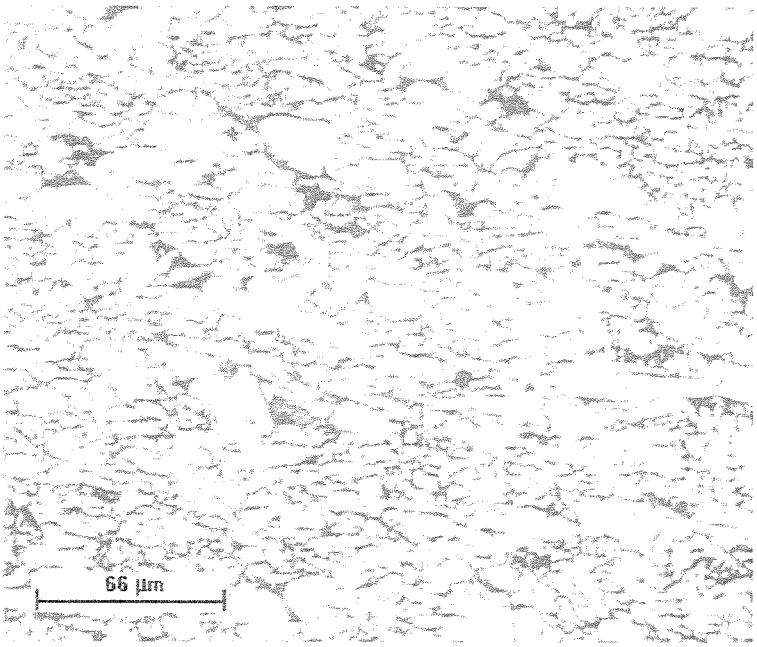


Figura B3: Micrografia do metal de base antes do alívio de tensões para chapa longitudinal C25. (Aumento 50 X)

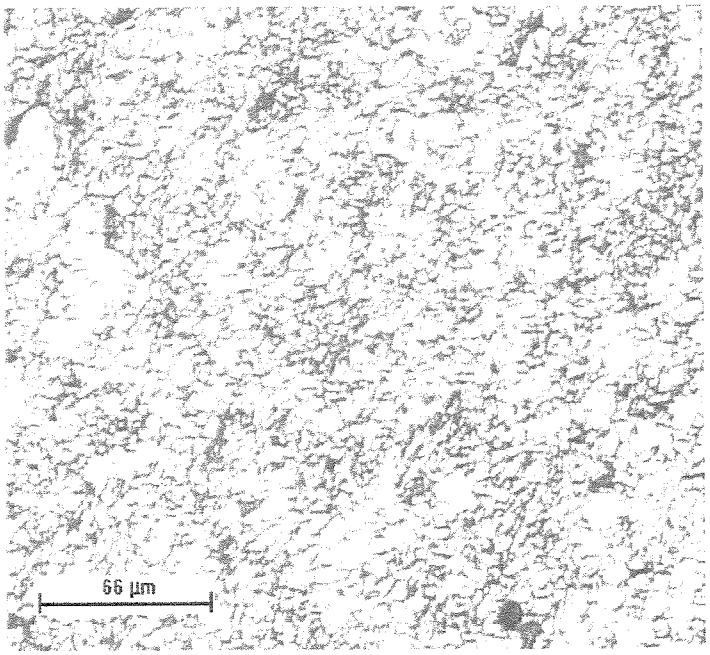


Figura B4: Micrografia do metal de base após alívio de tensões para chapa longitudinal C25.

(Aumento 50 X)

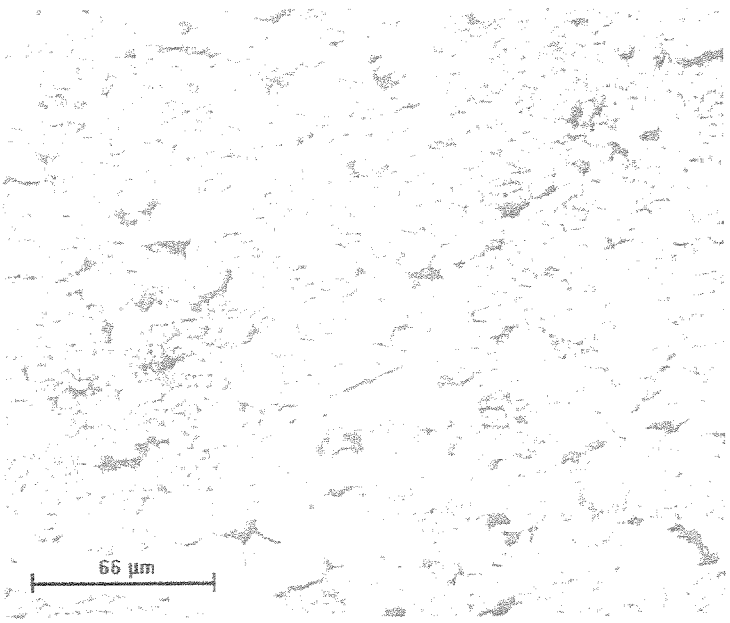


Figura B5: Micrografia do metal de base antes do alívio de tensões para chapa transversal C11.

(Aumento 50 X)

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

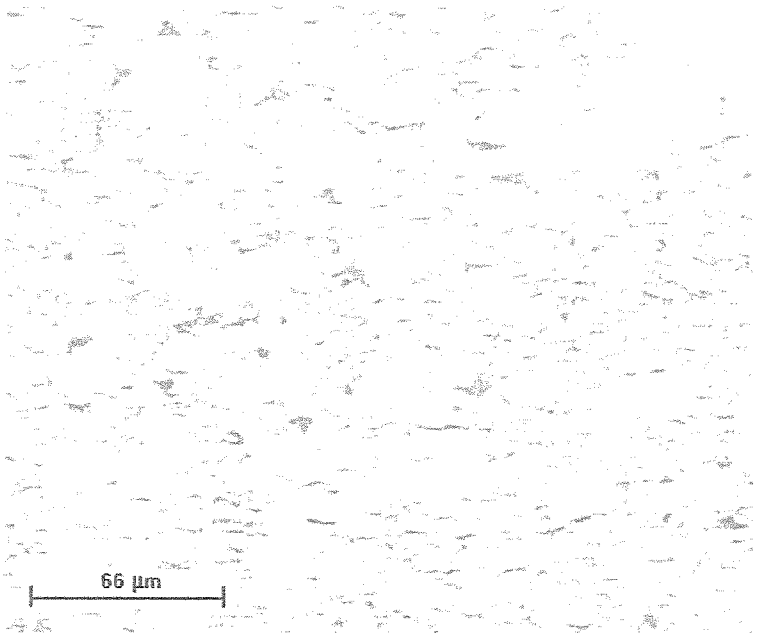


Figura B6: Micrografia do metal de base após alívio de tensões para chapa transversal C11. (Aumento 50 X)