ANÁLISE DE TENSÕES COMBINANDO AS TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS “PHASED ARRAY” E REFRAÇÃO DE ONDAS COM INCIDÊNCIA OBLÍQUA



Gleiton de Paula Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador:

Maurício Saldanha Motta, D. Sc.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

ANÁLISE DE TENSÕES COMBINANDO AS TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS “PHASED ARRAY” E REFRAÇÃO DE ONDAS COM INCIDÊNCIA OBLÍQUA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Gleiton de Paula Oliveira

Aprovada por:

_____

Presidente, Prof. Maurício Saldanha Motta, D.Sc. (Orientador)

_____

Prof. Luís Felipe Guimarães de Souza, D.Sc.

_____

Prof. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc. - IEN

_____

Prof. Orlando João Agostinho Gonçalves Filho, Ph.D. - CNEN

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

O48 Oliveira, Gleiton de Paula
Análise de tensões combinando as técnicas ultrassônicas “Phased Array” e refração de ondas com incidência oblíqua / Gleiton de Paula Oliveira.—2013.
xv, 98f. + apêndice e anexo : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2013.
Bibliografia : f. 97-98
Orientador : Maurício Saldanha Motta

1. Tensões residuais. 2. Refração. 3. Materiais – Testes. 4. Ultrassom. I. Motta, Maurício Saldanha (Orient.). II. Título.

CDD 531.381

Dedico este trabalho
à minha mãe,
Maria Aurineide de Paula Oliveira,
e ao meu pai,
Grijalva Pereira de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Maurício Motta, por ceder a infraestrutura e equipamento de inspeção do Laboratório de Instrumentação e Ultrassom do CEFET-RJ (LINUS), por reconhecer minha dedicação e por sua habitual disponibilidade para me orientar.

Ao Prof. Luís Felipe, por seu fundamental apoio nos procedimentos experimentais, cedendo a infraestrutura e equipamento de ensaio de tração do Laboratório de Materiais do CEFET-RJ (LAMAT) para realização dos experimentos, e atenção dispensada às consultas sobre a análise dos resultados.

Ao Prof. Paulo Kenedi, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM), sempre disponível para contribuir com seu conhecimento.

Ao Prof. Reinaldo Nascimento, por contribuir com o bloco de calibração para os ensaios de Ultrassom.

Ao Sr. Linton Ortega, autor da Tese que serviu de referência bibliográfica para o presente trabalho, por contribuir com o presente estudo.

Ao Eng. Marcos Figueredo, pela colaboração nos ensaios com a técnica “Phased Array”.

Ao Eng. Ramon Fonseca, que diversas vezes dedicou seu tempo para me ajudar com a teoria e prática da técnica “Phased Array”.

Aos amigos Jefferson Santos e Paulo Cesar pelo apoio na fabricação dos corpos-de-prova e solidariedade durante todo o curso.

RESUMO

ANÁLISE DE TENSÕES COMBINANDO AS TÉCNICAS ULTRASSÔNICAS “PHASED ARRAY” E REFRAÇÃO DE ONDAS COM INCIDÊNCIA OBLÍQUA

Gleiton de Paula Oliveira

Orientador:

Maurício Saldanha Motta

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

O principal objetivo do estudo é analisar tensões residuais utilizando a combinação de duas técnicas: “Phased Array” e Refração de Ondas com Incidência Oblíqua. Três corpos-de-prova (CP-01, CP-02 e CP-03), com furos passantes localizados em seus centros, servindo de refletores (espalhadores), foram submetidos a carregamentos uniaxiais em tração e inspecionados pela técnica “Phased Array”. Os planos de inspeção adotados foram combinados com a técnica da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua para análise de tensão na região do furo. O ensaio foi sensível à transição elástico-plástica, quando o CP-01 atingiu o ponto de escoamento, apresentando queda na intensidade da amplitude do sinal (indicando alívio de tensão na região do furo), e nos parâmetros relacionados com a localização do furo, como profundidade, ponto de saída do feixe e percurso sônico. Os resultados obtidos pela combinação das técnicas demonstram a necessidade de melhorias na resolução da metodologia proposta, de modo a reproduzir os resultados previstos pela teoria da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua.

Palavras-chave:

Ultrassom; “Phased Array”; Refração de Ondas; Análise de Tensões

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

ABSTRACT

STRESS ANALYSIS COMBINING THE ULTRASONIC TECHNIQUES PHASED ARRAY AND REFRACTION OF OBLIQUELY INCIDENT WAVES

Gleiton de Paula Oliveira

Advisor:

Maurício Saldanha Motta

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais of Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineer and Materials Tecnology.

The main purpose of the study is to analyze residual stresses using the combination of two techniques: Phased Array and Refraction of Obliquely Incident Waves. Three specimens (CP-01 , CP-02 and CP-03), with through holes located at their centers , serving as reflectors (spreaders), were submitted to tensile uniaxial loads and inspected by the Phased Array technique. The inspection plans adopted were combined with the Refraction of Obliquely Incident Waves technique for stress analysis of the hole region. The test was sensitive to elastic-plastic transition when CP-01 reached the yield point, with a decline in the intensity of the signal amplitude (indicating strain relief in the hole region), and in the parameters related to hole location, such as depth, the exit point of the beam and ultrasonic path. The results obtained by combining the techniques demonstrate the need for improvements in resolution of proposed methodology to reproduce the results predicted by theory of Refraction of Obliquely Incident Waves.

Keywords:

Ultrasound; Phased Array; Wave Refraction; Stress Analysis

Rio de Janeiro
December of 2013

Sumário

I. Introdução 1

II. Revisão Bibliográfica. 3

II.1. Definição e Classificação das Tensões Residuais 3

II.2. Classificação das Técnicas de Medição de Tensões Residuais 3

II.2.1.Técnicas Destrutivas e Semidestrutivas 4

II.2.1.1.Técnica do Furo-Cego 4

II.2.1.2.Técnica do Seccionamento 5

II.2.1.3.Técnica da Fenda 7

II.2.1.4.Técnica da Remoção de Camada 8

II.2.1.5.Técnica de Corte 9

II.2.2.Técnicas Não Destrutivas 9

II.2.2.1.Técnica de Difração de Raios-X 10

II.2.2.2.Técnica da Difração de Nêutrons 11

II.2.2.3.Técnica do Ruído Magnético de Barkhausen 12

II.2.2.4.Técnica Ultrassônica 14

II.3. Análise da Tensão Residual com a Técnica Ultrassônica 17

II.3.1.Velocidade Ultrassônica 17

II.3.2.Princípio 17

II.3.3.Limitações e Aplicações 21

II.4. Aplicações de Técnicas de Inspeção 24

II.4.1.Acustoelasticidade para Avaliação de Tensões Residuais 24

II.4.2.Onda Longitudinal Criticamente Refratada (L_{CR}) 29

II.4.3.Técnicas Combinadas para Medição de Tensões Internas 32

II.4.4.Técnicas Combinadas para Medição de Tensões Superficiais 35

II.4.5.Tensão Residual Superficial em Juntas Soldadas 37

II.4.6.Técnica Combinada EFL_{CR}: Elementos Finitos (EF) e Onda Longitudinal Criticamente Refratada (L_{CR}) 41

II.5. A Técnica “Phased Array” 45
II.5.1.Princípio 46
II.5.2.Vistas 50
II.5.3.Aplicações da Técnica “Phased Array” 55
II.5.3.1.Aeroespacial (OLYMPUS, 2007) 56
II.5.3.2.Energia (OLYMPUS, 2007) 56
II.5.3.3.Tubulação (OLYMPUS, 2007) 59
II.5.3.4.Transporte Ferroviário (OLYMPUS, 2007) 60
II.5.3.5.Aplicações Diversas (OLYMPUS, 2007) 61
II.6. Refração de Ondas com Incidência Oblíqua 62
III. Materiais e Métodos 74
III.1. Materiais 74
III.1.1.Corpos-de-Prova 74
III.1.2.Equipamento 75
III.1.3.Programa Computacional (Software) 75
III.1.4.Transdutor 75
III.1.5.Sapata 76
III.1.6.Bloco para Calibração 77
III.2. Métodos 77
III.2.1.Aplicação de Carga 77
III.2.2.Planos de inspeção 80
III.2.2.1.Parâmetros de Interesse no “Phased Array” 84
III.2.3.Cálculo da Constante Elástica 85
IV. Resultado e Análise dos Resultados 87
IV.1. Resultados do Carregamento Uniaxial em Tração 87
IV.2. Resultados da Varredura Setorial 87
IV.3. Resultados da Varredura Linear 88
IV.4. Análise dos Resultados 92

V. Conclusão 95

VI. Sugestões para trabalhos Futuros 96

Referências Bibliográficas 97

Apêndice A – Fotos da Inspeção “Phased Array” 99

Anexo A – Fórmulas, Dados Experimentais e Parâmetros do “Phased Array” 110

Lista de Figuras

Figura II.1 – Técnicas de medição de tensões residuais (ROSSINI, 2012). 4
Figura II.2 – Perfurando o orifício no centro da roseta (GOMES, 2010). 5
Figura II.3 – Técnica do seccionamento (ROSSINI, 2012). 6
Figura II.4 – Modelo de tensões residuais com as componentes de tensão de membrana e curvamento (ROSSINI, 2012). 6
Figura II.5 – Técnica da fenda: (a) para barras e chapas, (b) para madeira, (c) para tensões axiais em tubos e (d) para tensões circunferenciais em tubos (ROSSINI, 2012) e (HOWES, 2002). 7
Figura II.6 – Técnica da remoção de camada: (a) chapa plana e (b) cilindro (ROSSINI, 2012).. 8
Figura II.7 – Técnica de corte (ROSSINI, 2012). 9
Figura II.8 – As três orientações diferentes usadas para determinar deformação transversal (ε_T), deformação axial (ε_A), e deformação normal (ε_N). São mostradas também as direções de carregamento aplicado ($F_{aplicada}$) e também a direção de incidência e difração do feixe de nêutron. A direção de medição da deformação divide as direções dos feixes incidente e difratado (ROSSINI, 2012). 12
Figura II.9 – Instalação do sensor micromagnético (ROSSINI, 2012). 13
Figura II.10 – Mudanças de velocidade da onda ultrassônica longitudinal (C_L) e das ondas transversais de polarização ortogonal (C_{SX3}; C_{SX2}) dependendo da tensão σ no aço A (a), no aço B (b), e na liga de alumínio (c): ● - C_{SX3}; ○- C_{SX2}; x - C_L (ROSSINI, 2012). 14
Figura II.11 – Vista esquemática da configuração de medição ultrassônica: *pitch-catch* superficial (ROSSINI, 2012). 15
Figura II.12 – Penetração e resolução espacial de várias técnicas. As técnicas destrutivas e semidestrutivas estão coloridos de cinza (ROSSINI, 2012). 16
Figura II.13 – Mudança relativa das velocidades de onda como função da deformação elástica de uma amostra metálica (SCHNEIDER, 1990). 19
Figura II.14 – Cabo de aço de 7 fios (CARMO, 2007). 24
Figura II.15 – Curva de calibração acustoelástica nos ciclos de carga/descarga do ensaio de tração (CHAKI, 2009). 26
Figura II.16 – Comparação entre tensões aplicadas e medidas (CARMO, 2007). 27
Figura II.17 – Comparação de birrefringência acústica nos tubos com e sem costura (CARDOSO, 2007). 28
Figura II.18 – Comparação de birrefringência acústica nos tubos com e sem costura, antes e após realização dos cortes (CARDOSO, 2007). 29
Figura II.19 – Típico transdutor L_{CR} em série (esquerda) e típico sinal L_{CR} (direita) (BRAY, 2000). 29
Figura II.20 – Efeitos da textura e tensão na velocidade (PRITCHARD, 1987). 33
Figura II.21 – Esquema de solda dupla em "V" mostrando mapeamento I (PRITCHARD, 1987). 34
Figura II.22 – Combinação de velocidades para mapeamento em solda dupla em "V" (PRITCHARD, 1987). 34
Figura II.23 – Distribuição de tensões em solda dupla em “V”. (a) Vista lateral, tensão resultante através da espessura é zero. (b) Vista de topo, tensão resultante através da espessura não é zero (PRITCHARD, 1987). 35
Figura II.24 – Tensão registrada pela combinação de velocidades para dois mapeamentos através da solda (PRITCHARD, 1987). 35
Figura II.25 – Velocidade da onda SH contra direção de propagação (PRITCHARD, 1987). ... 36

Figura II.26 – Velocidade de onda Rayleigh contra direção de propagação (PRITCHARD, 1987). 37
Figura II.27 – Comparação das distribuições de tensões residuais medidos através de um tubo de aço inoxidável soldada por diferentes técnicas: (a) a distribuição de tensão no sentido longitudinal, σ_L, (b) distribuição de tensão na direção transversal, σ_T (TANALA, 1995). 38
Figura II.28 – Duas amostras utilizadas para a calibração do efeito acustoelástico (TANALA, 1995). 39
Figura II.29 – Comparação das distribuições de tensões residuais medidos através de uma chapa de liga Al-Mg soldada por diferentes técnicas: (a) a distribuição de tensão no sentido longitudinal, σ_L, (b) distribuição de tensão na direção transversal, σ_T (TANALA, 1995). 40
Figura II.30 – (a) Comparação da birrefringência com medições da onda de superfície numa chapa Al-Mg soldada; (b) Comparação da birrefringência com σ_L obtida com medições de ondas superficiais (TANALA, 1995). 41
Figura II.31 – Modelo básico EF do tubo (JAVADI, 2013). 43
Figura II.32 – Projeto das sapatas (JAVADI, 2013). 44
Figura II.33 – Exemplos de transdutores “Phased Array” (PICHARD, 2010). 46
Figura II.34 – Exemplos de transdutores adaptados para situações ou geometrias específicas: (a) transdutores flexíveis 3-D do fabricante MultiX (PICHARD, 2010); (b) diferentes tipos de transdutores do fabricante R/D Tech (OLYMPUS, 2007). 47
Figura II.35 – Tempo de atraso do tipo Parabólico, aplicado para cada elemento (histograma verde) (OLYMPUS, 2007). 48
Figura II.36 – Tempo de atraso do tipo Inclinado, típico para ondas transversais. Atraso do tipo Parabólico também pode ser utilizado para focalização do feixe (OLYMPUS, 2007). 48
Figura II.37 – Geração de feixes nos estágios inicial, intermediário, final e focalizado. Empregado a combinação dos tipos Parabólico e Inclinado para angulação e focalização (OLYMPUS, 2007). 48
Figura II.38 – Exemplo de cálculo da lei de atraso feito pelo software de simulação CIVA, integrado ao sistema M2M (PICHARD, 2010). 49
Figura II.39 – Geração de feixe ultrassônico “Phased Array” (OLYMPUS, 2007). 50
Figura II.40 – Componentes básicos do sistema “Phased Array” e sua interconectividade (OLYMPUS, 2007). 50
Figura II.41 – Representação A-scan: sinal de radiofrequência (esquerda); retificado (direita) (OLYMPUS, 2007). 50
Figura II.42 – Vistas ultrassônicas (B-scan, C-scan e D-scan). O ângulo oblíquo do transdutor é 270°. Em rosa está indicado o eixo do ultrassom; em azul, o eixo de sinal mecânico; e em verde, o eixo de varredura eletrônica para uma varredura linear (OLYMPUS, 2007). 51
Figura II.43 – Exemplos de mapeamento setorial esquemático em rotor de turbina: (a) (MOLES, 2005) e (b) (MOLES, 2003). 52
Figura II.44 – Esquema de varredura eletrônica (linear) (OLYMPUS, 2007). 53
Figura II.45 – Vistas combinadas: varreduras eletrônica e setorial combinadas (superior) e imagem digitalizada contendo a união dos dados coletados (inferior) (MOLES, 2003). 54
Figura II.46 – Princípio do TOFD (OLYMPUS, 2007). 54
Figura II.47 – Métodos utilizados para estudo da viabilidade do “Phased Array” (LAMARRE, 1997). 58
Figura II.48 – Exemplos de aplicações em tubulações: solda vertical (a) (MOLES, 2003); solda circunferencial (b); solda em tubos de pequenos diâmetros (c) (OLYMPUS, 2007). 60
Figura II.49 – Zonas mortas da técnica TOFD (acima) e esquema de imagem gerada pela técnica TOFD (abaixo) (OLYMPUS, 2007). 61

Figura II.50 – Geração de ondas oblíquas quase transversais no plano x_1-x_3. As linhas transversais indicam as direções de polarização (ORTEGA, 2001). 62
Figura II.51 – Ondas oblíquas no material: (a) sem tensão (referência) e (b) tensionado (ORTEGA, 2001). 63
Figura II.52 – Direção de propagação e polarização das ondas longitudinais, transversais, quase longitudinais e quase transversais em relação à direção da tensão uniaxial, e as constantes acustoelásticas correspondentes (ORTEGA, 2001). 66
Figura II.53 – Constantes acustoelásticas em função do ângulo de refração θ^0 para o aço de trilho (ORTEGA, 2001). 67
Figura II.54 – Variação relativa de velocidade em função do ângulo de refração para diferentes níveis de tensão (MPa); (a) onda transversal, (b) onda longitudinal (ORTEGA, 2001). 67
Figura II.55 – Velocidade em função da tensão para dez ângulos de refração: (a) transversal, (b) longitudinal (ORTEGA, 2001). 68
Figura III.1 – Desenho para CP-01, CP-02 e CP-03. Dimensões em milímetros. 74
Figura III.2 – RD/Tech Ominiscan MX2. Módulo “Phased Array” 16/128 (OLYMPUS, 2007). 75
Figura III.3 – Dimensões internas (a) e externas (b) do cabeçote (OLYMPUS, 2007). 75
Figura III.4 – Dimensões da sapata (OLYMPUS, 2007). 76
Figura III.5 – Conjunto com transdutor e sapata montado. 77
Figura III.6 – Bloco Padrão V1. 77
Figura III.7 – Diagrama de fator teórico de concentração de tensão k_t, para barra em tração simples com furo transversal (SHIGLEY, 2005). Os índices 1, 2 e 3 correspondem aos CPs 01, 02 e 03, respectivamente, d ao diâmetro do furo, e w à largura da barra. 78
Figura III.8 – Equipamento de ensaio de tração do Laboratório de Materiais do CEFET-RJ. No detalhe, valores da carga aplicada, do deslocamento da ponte do equipamento e da deformação. 79
Figura III.9 – Exemplo de fixação do conjunto transdutor/sapata e do extensômetro, para inspeção “Phased Array” do corpo-de-prova durante carregamento de tração. 80
Figura III.10 – Desenho esquemático da varredura tipo setorial de 45 a 70°. 82
Figura III.11 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 45°. 82
Figura III.12 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 50°. 83
Figura III.13 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 55°. 83
Figura III.14 – Demonstração de parâmetros utilizados na análise de dados com o *Tomoview*. 84
Figura IV.1 – Esquema adotado na varredura linear para cálculo do ângulo de refração alterado devido à presença do campo de tensões, θ^σ. 90
Figura IV.2 – Detalhes do ensaio do CP-01: (a) carga máxima; (b) deformação máxima; (c) comparação do comprimento final com os CP-02 e CP-03; e (d) valor do alongamento. 94

Lista de Tabelas

Tabela II.1 – Comparação de técnicas de medição de tensões residuais (ROSSINI, 2012). 15
Tabela II.2 – Características geométricas e mecânicas do cabo de aço testado (CHAKI, 2009). 24
Tabela II.3 – Divergência entre os resultados EF e ultrassom (inspeção da superfície externa do tubo) (JAVADI, 2013). 45
Tabela II.4 – Parâmetro Δ_σ no aço de trilho em função da tensão uniaxial σ_1e os ângulos de refração para a onda transversal (ORTEGA, 2001). 69
Tabela II.5 – Parâmetro Δ_σ no aço de trilho em função da tensão uniaxial σ_1e os ângulos de refração para a onda longitudinal (ORTEGA, 2001). 70
Tabela II.6 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço trilho em função da tensão uniaxial, σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda transversal (ORTEGA, 2001). 71
Tabela II.7 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço de trilho em função da tensão uniaxial, σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda longitudinal (ORTEGA, 2001). 72
Tabela III.1 – Valores das cargas no regime elástico para as regiões dos CPs com e sem furo. 79
Tabela III.2 – Parâmetros utilizados na análise de dados com o Tomoview. 84
Tabela IV.1 – Resultados do “Phased Array” no modo setorial 45° a 70°, para CP-01, CP-02 e CP-03. 87
Tabela IV.2 – Resultados do “Phased Array” no modo linear a 45°, para CP-01, CP-02 e CP-03. 88
Tabela IV.3 – Resultados do “Phased Array” no modo linear a 50°, para CP-01, CP-02 e CP-03. 89
Tabela IV.4 – Resultados do “Phased Array” no modo linear a 55°, para CP-01, CP-02 e CP-03. 89
Tabela IV.5 – Cálculo do ângulo de refração alterado devido à presença do campo de tensões, θ^σ, para as varreduras lineares do CP-01. 91

Lista de Abreviaturas

$\alpha_{atenuação}$	Coeficiente de atenuação [dB/mm]
ε	Desvio da partícula [m]
λ	Comprimento de onda [mm]
ν	Velocidade [km/s; mm/μs]
ω	Velocidade angular [rad/s^{-1}]

AUT	*Automated Ultrasonic Techniques*
CANDU	*Canadian Deuterium Uranium*
CP	Corpo-de-Prova
EDM	*Eletrical Discharge Machine*
EF	Elementos Finitos
EFL_{CR}	Combinação de Elementos Finitos e Onda Longitudinal Criticamente Refratada
F	Frequência [MHz = 10^6 s^{-1}]
J	Intensidade de potência acústica [W/m^2]
L_{CR}	Onda Longitudinal Criticamente Refratada
MUT	*Manual Ultrassonic Testing*
MZ	*Melted Zone*
P	Pressão do som [Pa = N/m^2]
PM	*Parent Material*
TOF	*Time of Flight*
Z	Impedância acústica [kg/m^2 s = rayl]
ZTA	Zona Termicamente Afetada

I. Introdução

As tensões residuais são as tensões presentes em um material ou componente estrutural mesmo quando livre de carregamentos externos ou variações de temperatura. Processos de fabricação como fundição, soldagem e moldagem, introduzem tensões residuais em estruturas e equipamentos. Outras causas comuns das tensões residuais são reparos ou modificação dos componentes em serviço. As tensões residuais provocam efeitos sobre as características mecânicas destes componentes. Elas influenciam consideravelmente as propriedades de componentes estruturais como resistência à fadiga, distorção, estabilidade dimensional, resistência à corrosão e ruptura frágil. Na maioria dos casos são prejudiciais e muitas vezes são determinantes para a falha por fadiga. Um aspecto particularmente perigoso das tensões residuais é que a sua presença nem sempre é notada (GOMES, 2010).

Tais efeitos geralmente trazem despesas consideráveis de reparos e restauração de peças, equipamentos e estruturas. Logo, a análise de tensões residuais é praticamente um estágio obrigatório na concepção de peças e de elementos estruturais e na estimativa de sua confiabilidade em condições de serviço reais. Também, há o efeito positivo de tensões residuais em elementos soldados, introduzindo tensões residuais compressivas nas zonas do cordão de solda (ROSSINI, 2012).

Ao longo dos anos, técnicas destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas foram desenvolvidas para medir a tensão residual em diferentes tipos de componentes, a fim de obter uma avaliação confiável. As várias técnicas específicas têm evoluído ao longo de várias décadas e suas aplicações práticas se beneficiaram com o desenvolvimento de tecnologias complementares, destacando-se os cortes de materiais, os métodos numéricos e a análise computacional. Estas últimas têm estimulado avanços não só na confiabilidade e precisão da medição, mas também na gama de aplicação. Em paralelo, há uma maior produção acadêmica disponível sobre o assunto atualmente. Embora os progressos tenham sido bem sucedidos no desenvolvimento das técnicas de medição e análise de tensões residuais, um esforço considerável ainda é necessário para desenvolver técnicas eficientes e de baixo custo, bem como tecnologias para a redistribuição de tensões residuais, de forma positiva (ROSSINI, 2012).

A presença de um campo de tensões elásticas estáticas em sólidos causa pequenas variações de velocidade de propagação da onda ultrassônica. Este é o chamado efeito acustoelástico e é nele que se baseia a utilização de ultrassom para medir tensões, sejam estas residuais ou aplicadas. Várias são as técnicas ultrassônicas propostas para determinar tensões residuais, dependendo, fundamentalmente, da aplicação requerida. Estas técnicas apresentam limitações como a dificuldade de gerar um tipo de onda em particular, a

necessidade de alta precisão na medição das velocidades, a baixa resolução espacial e a necessidade do conhecimento de parâmetros dependentes do material.

Considerada uma tecnologia que desponta na área de ultrassom, a técnica “Phased Array” tem como principal característica o transdutor com multielementos, cujos sinais são controlados, eletrônico e individualmente, possibilitando atraso de sinal na fração de alguns microssegundos. Outras características são a focalização dinâmica, o transdutor que permanece imóvel durante as inspeções, os diferentes modos de varredura (setorial e linear), além da geração de diferentes vistas da amostra em uma única imagem, contendo dados que podem ser analisados durante a inspeção realizada, ou após, com auxílio de programa computacional. Essas características possibilita inspeção em componentes com difícil acesso e de geometria complexa, alta velocidade de inspeção resultando em menor custo e aumento da produtividade.

A teoria desenvolvida para a análise de tensões com a técnica da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua baseia-se na lei de Snell, onde a mudança de velocidade e de propagação da onda ultrassônica devido à presença de tensões implica no desvio do ângulo de refração, e também na mudança do ponto de chegada do feixe ultrassônico. Enquanto ORTEGA (2001) propôs avaliar a mudança do ponto de chegada, a proposta atual analisa a variação do ângulo de refração.

Este trabalho tem como objetivo a análise de tensões por meio da combinação de duas técnicas ultrassônicas. As referidas técnicas são “Phased Array” e Refração de Ondas com Incidência Oblíqua, e são abordadas em seções específicas. Importante ressaltar que o estudo é pioneiro no emprego do “Phased Array” em análise de tensões, e, paralelamente, permite avaliar experimentalmente, pela primeira vez, a teoria da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua para análise de tensões desenvolvida por ORTEGA (2001).

II. Revisão Bibliográfica.

II.1. Definição e Classificação das Tensões Residuais

As tensões residuais podem ser definidas como as tensões que permanecem dentro de um corpo ou material após a fabricação ou processamento do material, na ausência de forças externas ou variações de temperatura. Elas podem também ser produzidas pela carga de serviço, conduzindo a uma deformação plástica não homogênea em parte da amostra. Consequentemente, tensões residuais não são causadas por cargas (forças ou momentos), portanto elas têm que ser globalmente equilibradas, ou seja (ROSSINI, 2012):

$$\int \sigma z dA = 0 \quad \textbf{(1)}$$

Onde σ é a solicitação em um ponto, dA é uma área infinitesimal qualquer e z é distância para algum ponto de referência. As tensões residuais podem ser definidas como macro e microtensões e ambas podem estar presentes no componente simultaneamente. Elas podem ser classificadas como:

- Tipo I: Macrotensões residuais que se desenvolvem em um componente numa escala maior do que o tamanho de grão do material.
- Tipo II: Microtensões residuais que variam na escala de um grão individual.
- Tipo III: Microtensões residuais que existem dentro de um grão, basicamente como resultado da presença de deslocamentos e outros defeitos cristalinos.

II.2. Classificação das Técnicas de Medição de Tensões Residuais

Ao longo dos últimos anos, diferentes técnicas para medir tensões residuais em diferentes tipos de componentes têm sido desenvolvidas. Técnicas para medição de tensões residuais do Tipo I (com exceção de técnicas como a difração, cujas amostras possuem grãos orientados para difração) podem ser classificadas como destrutiva, semidestrutiva ou não destrutiva, conforme Figura II.1. As técnicas destrutivas e semidestrutivas, também chamadas de técnicas mecânicas, são dependentes de dedução da tensão original pelo alívio de tensões provocado por remoção de material, e posterior deslocamento. Técnicas que utilizam *strain gages*[1], furo-cego e cortes são as principais técnicas destrutivas e semidestrutivas para medir

[1] Extensômetros elétricos.

tensões residuais em materiais. Técnicas não destrutivas incluem Raios-X ou difração de nêutrons, técnicas ultrassônicas e magnéticas. Estas técnicas geralmente medem alguns parâmetros que estão relacionados com a tensão. As avaliações relativas à fadiga merecem cada vez mais importância, pois muitos componentes estruturais, como pontes, estruturas de aeronaves ou plataformas *offshore*, precisam ser inspecionados periodicamente para evitar maiores danos ou até mesmo falha. Para a inspeção no campo ou em grandes construções, é fundamental que os desenvolvimentos dessas técnicas estejam comprometidos com o emprego de dispositivos pequenos, móveis e fáceis de manusear, contribuindo para um curto tempo de medição e de preparação da peça antes do teste, resultando em redução de custos. Esses aspectos são fatores de sucesso para aplicação no campo (ROSSINI, 2012).

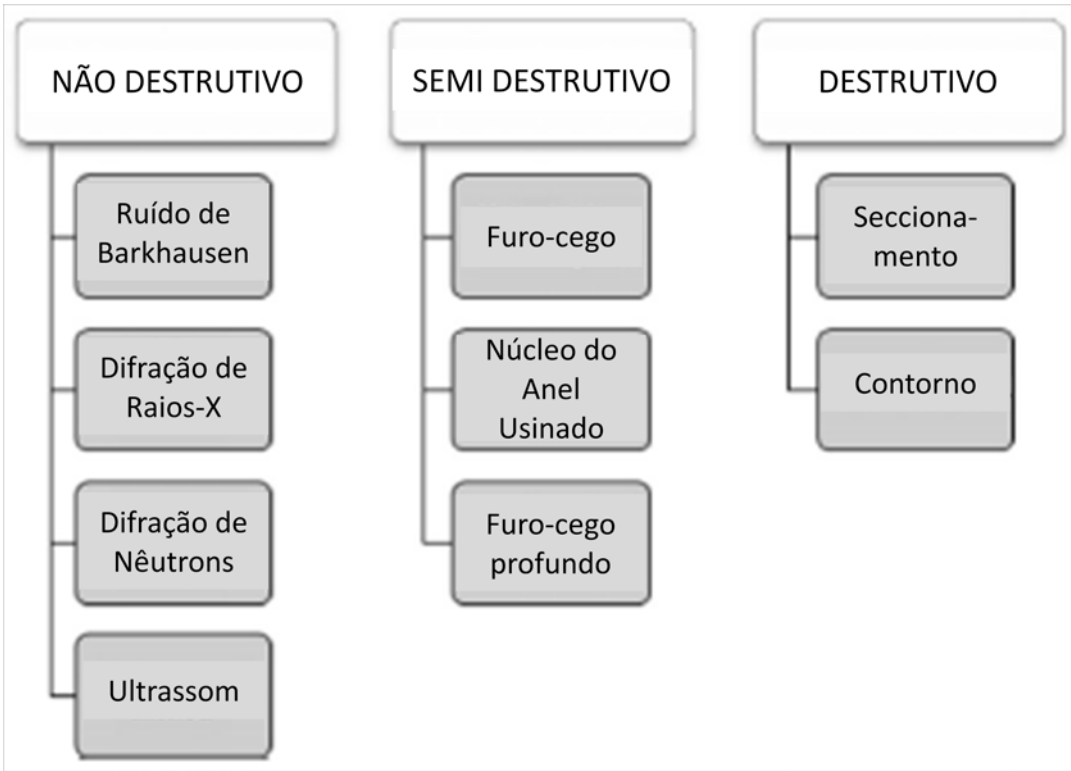


Figura II.1 – Técnicas de medição de tensões residuais (ROSSINI, 2012).

II.2.1. Técnicas Destrutivas e Semidestrutivas

II.2.1.1. Técnica do Furo-Cego

A avaliação de tensões em estruturas em serviço é realizada tradicionalmente com extensômetros. Nesta técnica um pequeno furo (ou um anel) é usinado na região a ser estudada. A superfície livre de um furo é necessariamente livre de tensões normais radiais e de tensões de cisalhamento. Usualmente, um pequeno furo de aproximadamente 1,8mm de

diâmetro é feito até uma profundidade de cerca de 2,0mm, e o alívio de tensões causado pelo furo é captado por uma roseta com três extensômetros ao redor do furo (ROSSINI, 2012). As tensões medidas nas três direções são úteis para determinar a magnitude e as direções das tensões principais máximas e mínimas**.** As tensões são relacionadas às deformações através de equações da teoria da elasticidade.

Esta técnica permite determinar o nível de tensões para análise da segurança estrutural e acompanhamento das variações de tensões e deformações ao longo do tempo em estruturas sob carregamentos cíclicos. Dentre as técnicas destrutivas a mais conhecida e empregada pela indústria em geral é provavelmente a técnica do furo-cego. Como o furo não causa um impacto significativo na integridade estrutural do componente, esta técnica pode ser considerada como semidestrutiva**.**

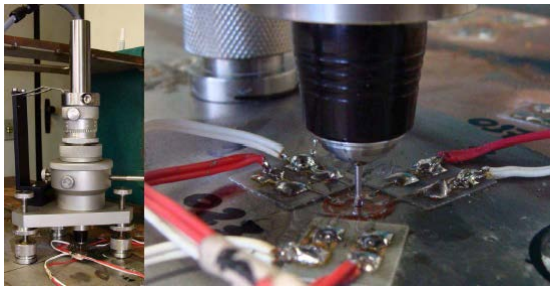


Figura II.2 – Perfurando o orifício no centro da roseta (GOMES, 2010).

II.2.1.2. Técnica do Seccionamento

Esta técnica se baseia na medição de deformação devido ao alívio de tensão residual após a remoção de material da amostra. Foi extensivamente utilizada para analisar as tensões residuais em perfis estruturais de aço carbono, alumínio e aço inox. A técnica de seccionamento consiste em efetuar um corte numa chapa a fim de aliviar as tensões residuais presentes na linha de corte. Para isso, o processo de corte utilizado não deve introduzir plasticidade ou calor, de modo que a tensão residual original possa ser medida sem a influência dos efeitos de plasticidade na superfície do plano de corte. A Figura II.3 mostra um exemplo da técnica de seccionamento, em que uma sequência de cortes foi feita para avaliar as tensões residuais em uma viga de perfil I (ROSSINI, 2012).

As tensões liberadas durante o processo de corte são geralmente medidas utilizando extensômetros elétricos ou mecânicos. Em geral, as tiras de material liberado pelo processo de corte podem apresentar tanto deformação axial como curvatura, que corresponde às tensões residuais de membrana e curvamento (através da espessura), respectivamente (ROSSINI, 2012).

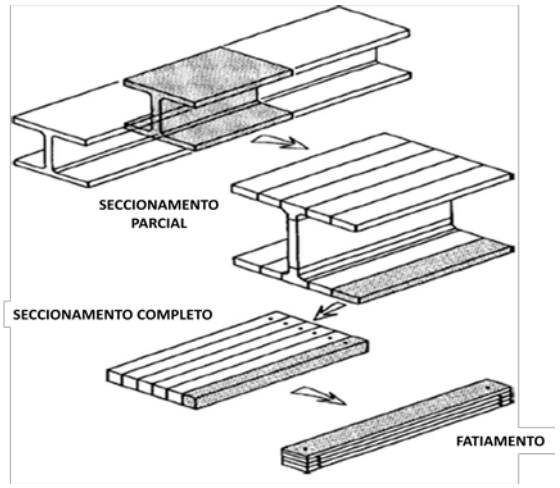


Figura II.3 – Técnica do seccionamento (ROSSINI, 2012).

Tensões residuais de membrana σ_m são geralmente dominantes em perfis fabricados ou laminados a quente enquanto tensões residuais de curvamento σ_b (flexão) são geralmente dominantes nos perfis trabalhados a frio. Estes dois componentes residuais de tensão estão representados na Figura II.4, e supõe-se que as tensões de curvamento variam linearmente através da espessura. Dessa forma, conclui-se que a tensão residual padrão combinando membrana e curvamento σ_{rc} é sempre uma relação linear (ROSSINI, 2012).

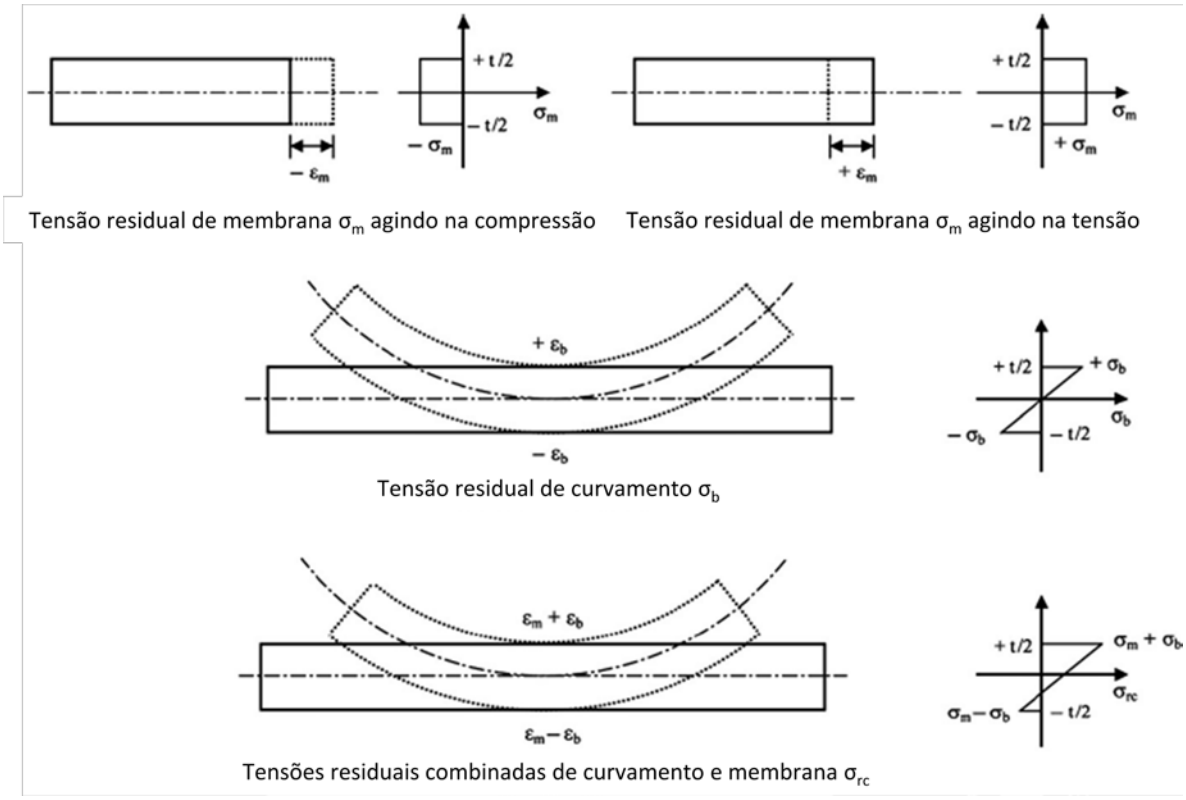


Figura II.4 – Modelo de tensões residuais com as componentes de tensão de membrana e curvamento (ROSSINI, 2012).

II.2.1.3. Técnica da Fenda

A Figura II.5(a) ilustra a técnica da fenda, onde um corte profundo é feito na amostra e a abertura (ou possivelmente o fechamento) do material adjacente indica o sinal e o tamanho aproximado das tensões residuais presentes. Esta técnica é amplamente usada como um rápido teste comparativo para controle de qualidade durante a produção do material. O teste tipo "garfo" mostrado na Figura II.5(b) é uma variação da técnica da fenda, utilizado para avaliar tensões em madeiras serradas e secas. A técnica da fenda é normalmente usada para avaliar as tensões residuais em tubos de parede fina. Pode-se medir por meio de extensômetros tanto a deflexão das bordas quanto a deformação. A determinação de tensões residuais em paredes finas do tubo por meio de técnicas de deflexão pode ser visto na Figura II.5(c) para tensão longitudinal e II.5(d) para tensão circunferencial, onde *t* é espessura, *d* é deflexão, D_0 é diâmetro inicial, D_1 é diâmetro após corte, e *x* é o deslocamento. O último arranjo é comumente usado para tubos de trocador de calor, e é especificado pela norma ASTM E1928 (ROSSINI, 2012).

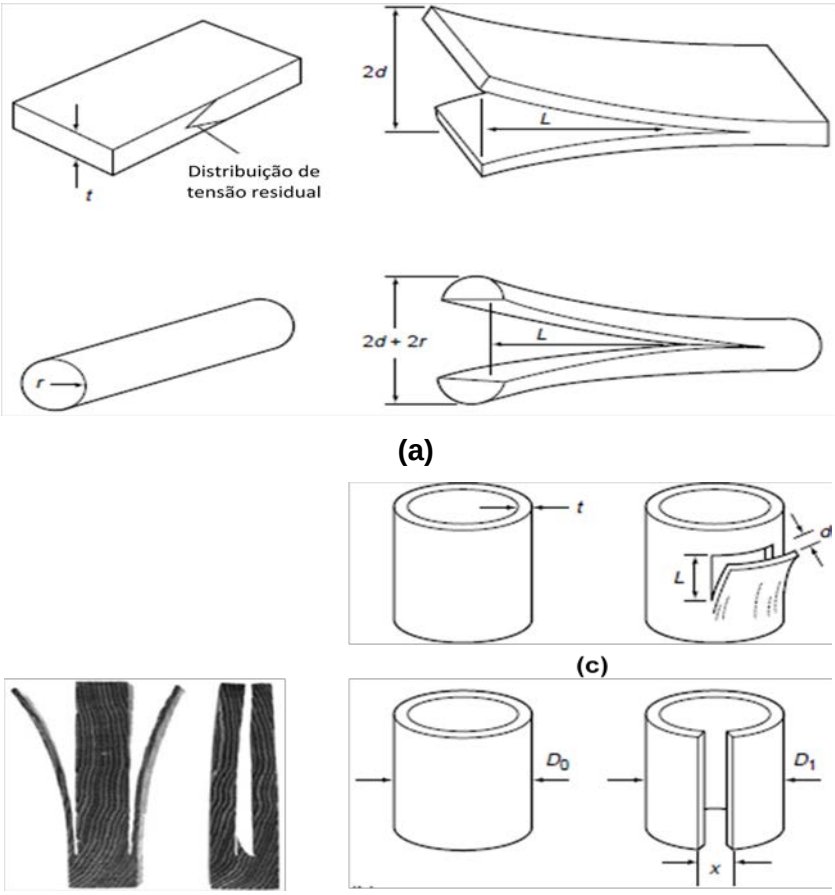


Figura II.5 – Técnica da fenda: (a) para barras e chapas, (b) para madeira, (c) para tensões axiais em tubos e (d) para tensões circunferenciais em tubos (ROSSINI, 2012) e (HOWES, 2002).

As tensões residuais são obtidas pela medição da abertura da chapa. Em chapas do caso (a) da Figura II.5, a tensão longitudinal pode ser relacionada à abertura, d , pela seguinte expressão (ROSSINI, 2012):

$$\sigma = \frac{Etd}{2L^2\left(1-\upsilon^2\right)} \quad \textbf{(2)}$$

Onde:

E e υ são, respectivamente, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson;

t é a espessura do componente; e

L é a profundidade.

II.2.1.4. Técnica da Remoção de Camada

A técnica da remoção de camada consiste em observar a deformação causada pela remoção de uma sequência de camadas do material. A técnica é adequada para chapa plana e amostras cilíndricas onde as tensões residuais variam com a profundidade a partir da superfície, mas são paralelamente uniformes à superfície. A Figura II.6 ilustra exemplos da técnica de remoção de camadas: (a) numa amostra de chapa plana, e (b) em uma amostra cilíndrica. A técnica envolve a medição de deformações em uma superfície utilizando extensômetros, à medida que camadas paralelas de material são removidas da superfície oposta. No caso de uma amostra cilíndrica oca, as medições de deformação podem ser feitas tanto na superfície externa ou interna, desde que as camadas anulares sejam removidas a partir da superfície oposta (ROSSINI, 2012).

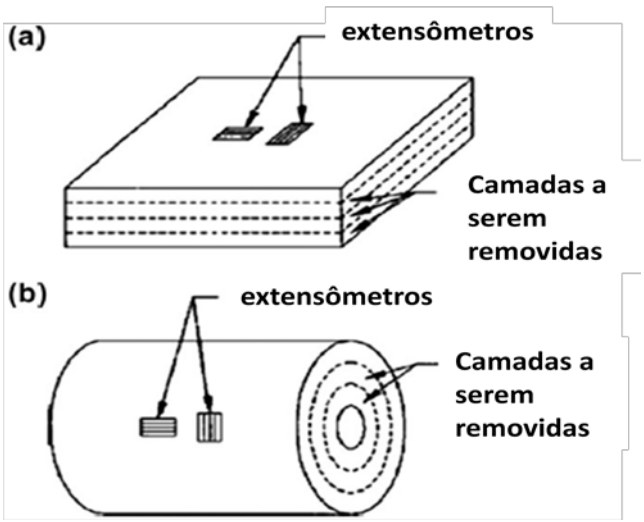


Figura II.6 – Técnica da remoção de camada: (a) chapa plana e (b) cilindro (ROSSINI, 2012).

II.2.1.5. Técnica de Corte

A técnica de corte, muito semelhante à técnica do furo-cego, utiliza uma longa fenda em vez de um orifício (Figura II.7). Extensômetros são fixados nas superfícies anteriores ou posteriores, ou em ambos, e as deformações são medidas com aumento gradual da profundidade da fenda. A fenda pode ser introduzida por uma serra fina, fresa ou fio. Assim, as tensões residuais perpendiculares ao corte podem ser determinadas pelas medições de deformações, utilizando elementos finitos, do mesmo modo que para os cálculos do furo-cego. Em geral, a técnica de corte tem a vantagem sobre o furo-cego, pois permite avaliar o perfil de tensão ao longo de toda profundidade da amostra, o extensômetro superficial fornece os dados de tensões próximas à superfície, e o extensômetro posterior fornece dados das tensões mais profundas. No entanto, a técnica de corte fornece apenas tensões residuais normais à superfície de corte, enquanto que a técnica furo-cego fornece todas as tensões nos três planos. Cortes adicionais podem ser feitos para encontrar outros componentes de tensão, procedimento semelhante à técnica de seccionamento. A técnica de corte também pode ser aplicada para estimar o fator de intensidade de tensão causada por tensões residuais, muito útil para estudos de fadiga e fratura (ROSSINI, 2012).

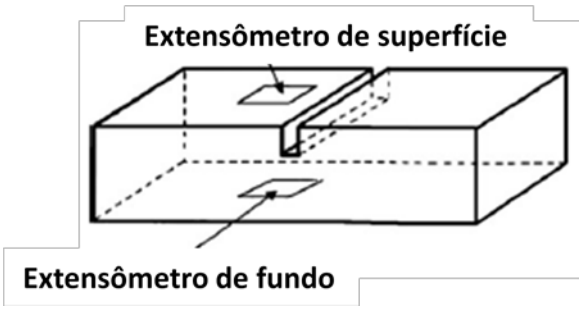


Figura II.7 – Técnica de corte (ROSSINI, 2012).

II.2.2. Técnicas Não Destrutivas

As técnicas de difração baseiam-se em determinar a deformação elástica que irá causar alterações no espaçamento interplanar, d, a partir de seu valor livre de tensão, d_0. Em seguida, a deformação pode ser calculada usando a Lei de Bragg e é necessário ter uma medida precisa do espaçamento interplanar livre de tensão. As técnicas de difração mais comuns são raios-x e nêutrons (ROSSINI, 2012).

II.2.2.1. Técnica de Difração de Raios-X

As técnicas de difração de raios-X exploram o fato de que, quando um metal está sob tensão, aplicada ou tensão residual, as tensões elásticas resultantes fazem com que os planos atômicos na estrutura cristalina metálica mudem seus espaçamentos. A difração de raios-X pode medir diretamente este espaçamento atômico interplanar, e a partir desta quantidade, a tensão total no metal pode então ser obtida. A técnica com raios X mede tensões residuais na superfície de materiais (ROSSINI, 2012).

Uma vez que os metais são compostos de átomos dispostos em uma matriz tridimensional regular para formar um cristal, a maioria dos componentes metálicos de interesse consiste de diversos cristais pequenos (grãos), aleatoriamente orientados em relação ao seu arranjo cristalino e fundidos juntos para fazer um volume sólido. Quando um determinado metal policristalino é submetido à tensão, deformações elásticas são produzidas no retículo cristalino de células unitárias. Em outras palavras, uma tensão aplicada externamente, ou tensão residual dentro do material, quando abaixo do limite de escoamento do material, é absorvida pelas deformações interatômicas dos cristais, conhecidas como constantes elásticas do material, assumindo que a tensão é proporcional à deformação, uma suposição razoável para a maioria dos metais e ligas de interesse. Portanto, a técnica de difração de raios-X para medição de tensões residuais é aplicável em materiais cristalinos de grãos finos, produzindo difração em todas as direções na superfície da amostra. No material que pode ser metálico ou cerâmico, o fornecimento de um pico de difração de intensidade adequada e livre de interferência de picos da vizinhança pode ser produzido, com as radiações disponíveis, na região de alta radiação de fundo. Alguns problemas surgem quando a difração é usada para determinar as tensões residuais em grandes soldas devido ao espaço disponível ser limitado na maioria dos difratômetros de raios-X, e requerem muitas vezes que as amostras sejam seccionadas para medição. A geometria deve ser tal que os raios-X podem tanto atingir a área de medição e ainda ser difratado ao detector sem atingir obstáculos. Difratômetros portáteis que podem ser utilizados em campo para medições de estruturas como dutos, soldas e pontes estão agora disponíveis. A velocidade de medição depende de uma série de fatores, incluindo o tipo do material a ser examinado, a fonte de raios-X, e o grau de precisão requerido. O volume de medições é uma combinação entre a necessidade de resolução espacial dentro de um campo de deformação esperado e o tempo disponível para coleta de dados. A correta seleção da fonte de raios-X e dos parâmetros para teste, além do desenvolvimento de novas tecnologias do detector, reduz o tempo de medição (ROSSINI, 2012).

II.2.2.2. Técnica da Difração de Nêutrons

A técnica de difração de nêutron é muito semelhante à técnica de raios-X, já que se baseia nas deformações elásticas dentro de um material policristalino que causem alterações nos planos de espaçamento dos reticulados quando comparado à condição livre de tensão. A aplicação de difração de nêutrons para a resolução de problemas relevantes de engenharia tornou-se generalizada nas últimas duas décadas. A vantagem das técnicas de difração de nêutrons em comparação com a técnica de raios-X é a sua maior profundidade de penetração. Na verdade, a técnica de difração de raios-X tem limites na medição de tensões residuais, através da espessura de uma estrutura soldada. Agora, um nêutron é capaz de penetrar alguns centímetros no interior de um material, podendo ser aplicada amplamente para avaliar tensão residual interna de materiais. Ele permite a medição de tensões residuais em profundidades próximas de 0,2 milímetros da superfície até 100 mm em alumínio ou 25 mm em aço. Isto é especialmente útil em ligas de elevado número atômico médio, porque a penetração dos raios-X cai rapidamente neste regime. Com alta resolução espacial, a técnica de difração de nêutrons pode fornecer mapas tridimensionais completos das tensões residuais no material. No esquema da Figura II.8, em cada ponto de medição, a tensão foi medida em três direções ortogonais: ao longo do eixo da amostra (deformação axial ε_A), transversais a ela (deformação transversal ε_T) e através da parede (deformação normal ε_N). Isto foi conseguido através da montagem de cada uma das amostras em três orientações diferentes. No entanto, comparado à difração de raios-X, o custo relativo da aplicação da técnica de difração de nêutrons é muito superior, principalmente por causa do custo do equipamento, tornando inviável seu uso no controle de qualidade em processo de rotina de aplicações de engenharia (ROSSINI, 2012).

Recentemente, nêutrons têm sido usados para estudar introdução de tensão devido ao processo de soldagem. O contínuo desenvolvimento dos instrumentos da técnica trará ainda mais avanços num futuro próximo (ROSSINI, 2012).

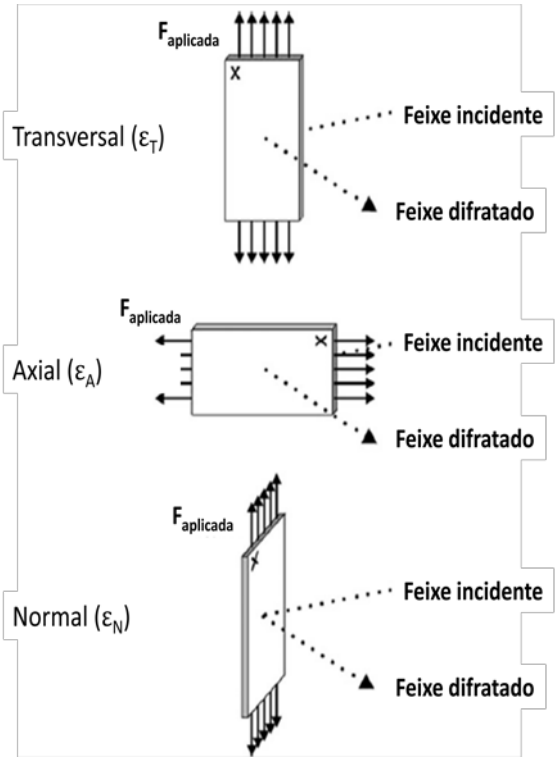


Figura II.8 – As três orientações diferentes usadas para determinar deformação transversal (ε_T), deformação axial (ε_A), e deformação normal (ε_N). São mostradas também as direções de carregamento aplicado ($F_{aplicada}$) e também a direção de incidência e difração do feixe de nêutron. A direção de medição da deformação divide as direções dos feixes incidente e difratado (ROSSINI, 2012).

II.2.2.3. Técnica do Ruído Magnético de Barkhausen

A técnica do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é de particular interesse devido ao seu potencial como uma ferramenta industrial não destrutiva para medir a tensão residual superficial e outros parâmetros microestruturais. A técnica RMB é aplicável em materiais ferromagnéticos, compostos por pequenas regiões magnéticas chamadas de domínios magnéticos. Cada domínio é espontaneamente magnetizado ao longo dos eixos de direção de magnetização cristalográfica. Entretanto, os vetores de magnetização dentro dos domínios são orientados de tal maneira que a magnetização total do material é zero, exceto em ímãs naturais. Os domínios são separados uns dos outros por paredes de domínio também chamadas paredes Bloch. Existem dois tipos de paredes Bloch em um material ferromagnético: 90° e 180°. Paredes Bloch de 180° têm maior mobilidade do que paredes de 90°, contribuindo mais para RMB. Se um campo magnético externo de corrente contínua é aplicado a uma substância ferromagnética, a magnetização da amostra muda devido aos movimentos da parede de domínio. Domínios com alinhamentos paralelo ou quase paralelo ao vetor de campo aplicado expandem e outros são aniquilados durante a magnetização. Quando todos os vetores de magnetização dentro dos domínios alinham-se na direção do campo aplicado pelo movimento das paredes de domínio ocorre a saturação. Contornos de grão, deslocamentos

intersticiais, segunda fase de materiais (carbetos no ferro) e impurezas no material ferromagnético agem como um obstáculo para o movimento das paredes de domínio. A aplicação de altos valores de força de magnetização faz com que a parede de domínio exceda a força de resistência de regiões fixas, ocorrendo um aumento da magnetização em pequenos saltos. Este aumento pode ser determinado pela colocação de uma bobina indutiva próxima à amostra que está sendo magnetizada. Por conta da magnetização, ocorre mudança do pulso elétrico induzido na bobina. Quando todos os pulsos elétricos produzidos por todos os movimentos de domínio são somados juntos, é gerado um sinal do tipo ruído chamado Ruído de Barkhausen. A Figura II.9 mostra esquematicamente o desenho de um sensor micromagnético. Um transdutor em forma de U é excitado por uma bobina ligada a uma unidade de fornecimento de energia bipolar. Pela orientação dos polos, a direção do campo magnético alternado resultante é definida, e então o componente de tensão correspondente pode ser medido. O Ruído Barkhausen é detectado por uma pequena bobina ao passo que a intensidade do campo tangencial é medida por uma sonda Hall. Ambos os sinais são amplificados, filtrados e avaliados no sistema de teste micromagnético (ROSSINI, 2012).

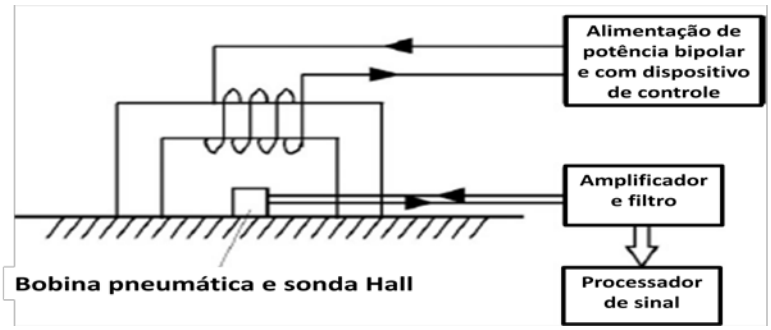


Figura II.9 – Instalação do sensor micromagnético (ROSSINI, 2012).

A técnica RMB é limitado pela saturação do sinal de energia na tensão ou compressão. Quando valores mínimo ou máximo de energia surgirem, a tensão pode não mais alterar o nível de energia RMB. Isso limita a correlação entre tensão e energia RMB para valores de tensão de máxima tração e máxima compressão. No entanto, a técnica RMB tem a vantagem de ser rápido, ser adequado para geometria circular, como anéis, e sem necessidade de contato direto (ROSSINI, 2012). Alguns pesquisadores desenvolveram a técnica RMB para avaliar a tensão residual superficial em rolamentos aeronáuticos, particularmente nas zonas de contato entre as esferas ou cilindros e suas pistas de rolamentos, com o objetivo de levar esta técnica do laboratório para a indústria.

A profundidade de medição depende, principalmente, da permeabilidade do material e é tipicamente de até 0,2 mm para componentes de superfície endurecida. Como essa profundidade é 100 vezes mais do que a de difração de raios-X, a técnica do ruído Barkhausen

também é capaz de quantificar a tensão subsuperficial sem necessidade de remover a camada superficial.

II.2.2.4. Técnica Ultrassônica

Uma das técnicas mais promissoras no desenvolvimento de técnicas não destrutivas para a medição de tensões residuais é a aplicação do ultrassom. A técnica ultrassônica, não está limitada pelo tipo de material em estudo e pode ser utilizado para medições de tensões residuais em amostras de grande espessura. Essas técnicas são baseadas no efeito acustoelástico, no qual a velocidade de propagação de ondas elásticas em sólidos varia com a tensão. A vantagem mais importante do desenvolvimento da técnica e do equipamento é a possibilidade de determinar as tensões residuais e aplicadas em amostras e em componentes de estruturas reais. As relações entre as variações das velocidades de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais com polarização ortogonal sob a ação de cargas de tração e compressão em aço e ligas de alumínio estão apresentados na Figura II.10. Como pode ser visto, a intensidade e a natureza destas alterações podem ser diferentes, dependendo das propriedades do material. Diferentes configurações de equipamentos de ultrassom podem ser usadas para medições de tensões residuais (ROSSINI, 2012). Em geral, as ondas são emitidas por um transdutor transmissor, propagam através de uma região do material, e são detectadas por um transdutor receptor, como mostrado na Figura II.11.

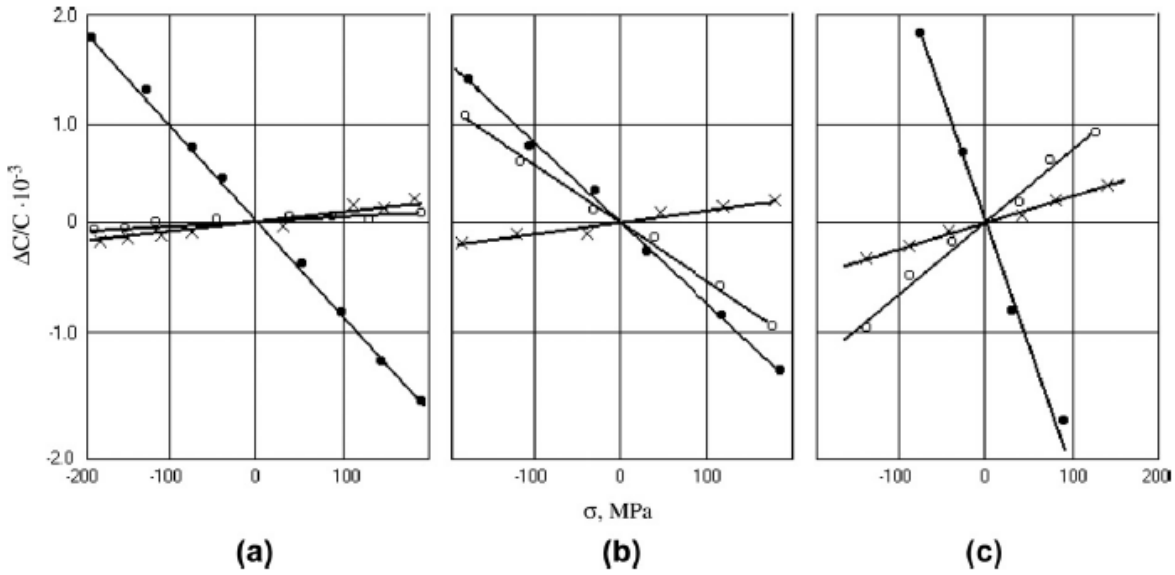


Figura II.10 – Mudanças de velocidade da onda ultrassônica longitudinal (C_L) e das ondas transversais de polarização ortogonal (C_{SX3}; C_{SX2}) dependendo da tensão σ no aço A (a), no aço B (b), e na liga de alumínio (c): ● - C_{SX3}; ○- C_{SX2}; x - C_L (ROSSINI, 2012).

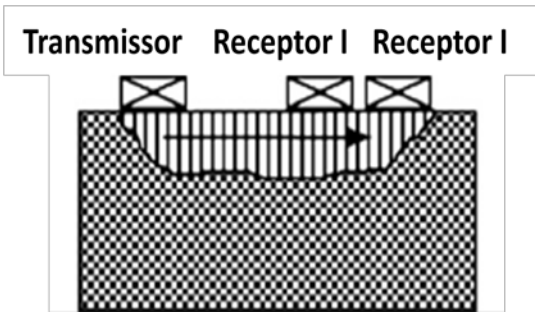


Figura II.11 – Vista esquemática da configuração de medição ultrassônica: *pitch-catch* superficial (ROSSINI, 2012).

A técnica na qual o mesmo transdutor é utilizado para a emissão e recepção de ondas ultrassônicas é frequentemente chamada pulso-eco. A configuração pulso-eco é eficaz para a análise de tensão residual no interior do material. Neste caso, a média das tensões residuais é medida através da espessura. Na configuração mostrada na Figura II.11, a tensão residual na camada próximo à superfície é determinada. A profundidade desta camada está relacionada com o comprimento da onda ultrassônica, muitas vezes superior a alguns milímetros, e, portanto, é muito maior do que a obtida pela técnica de raios-X. Outras vantagens da técnica de ultrassom são: a instrumentação é conveniente de usar, rápido de configurar, portátil, de baixo custo e livre dos perigos da radiação. Esta técnica é adequada para procedimentos de inspeção de rotina em grandes componentes como discos de turbina a vapor (ROSSINI, 2012).

Atualmente, a principal dificuldade encontrada por técnicas ultrassônicas é que as variações de velocidade ultrassônica produzidas pela presença de tensões são extremamente pequenas. Medições do tempo de percurso são normalmente realizadas para determinar a diferença de velocidade. A precisão de tais medições depende da duração do pulso do transdutor. O pulso não pode ser reduzido indefinidamente, devido à atenuação do ultrassom em metais. Uma solução para este caso pode ser a aplicação de pulsos ultrassônicos de alta frequência, apesar de transdutores piezelétricos tradicionais serem ineficientes para excitação em frequência muito elevada (ROSSINI, 2012).

Na Tabela II.1 estão resumidas algumas vantagens e desvantagens de algumas técnicas, enquanto que a Figura II.12 mostra a penetração e a resolução espacial.

Tabela II.1 – Comparação de técnicas de medição de tensões residuais (ROSSINI, 2012).

Técnica	Vantagem	Desvantagem
Difração Raios-X	Geralmente disponível Larga faixa de materiais Sistemas portáteis Macro e micro tensões residuais	Sistemas baseados em laboratório Pequenos componentes Apenas medições básicas
Furo-Cego	Rápido Fácil uso Geralmente disponível Portátil Larga faixa de materiais	Interpretação dos dados Semidestrutivo Sensibilidade à deformação e resolução limitadas

Difração Nêutrons	Macro e micro tensões residuais Ótima penetração e resolução Mapas 3D	Mão de obra especializada Sistemas baseados em laboratório
Ruído Barkhausen	Muito rápido Alta sensibilidade aos efeitos microestrutura especialmente em soldas Portátil	Apenas materiais ferromagnéticos Necessidade de separar os sinais da microestrutura e da tensão
Ultrassom	Geralmente disponível Muito rápido Baixo custo Portátil	Resolução limitada Maioria das medições sobre todo o volume
Corte	Larga faixa de materiais Economia e rapidez Portátil	Destrutivo Interpretação de dados Resolução de deformação limitada
Contorno	Mapas com alta resolução da tensão normal à superfície cortada Portátil Larga faixa de materiais Componentes mais largos	Destrutivo Interpretação de dados Impossível fazer cortes sucessivos próximos
Furo-cego profundo	Medições de tensões mais profundas Componentes de seção grossa Larga faixa de materiais	Interpretação de dados Semidestrutivo Sensibilidade à deformação e resolução limitadas
Síncrotron	Melhoria da penetração e resolução raios-X Perfil da profundidade Rápido Macro e micro tensões residuais	Mão de obra especializada Sistemas baseados em laboratório

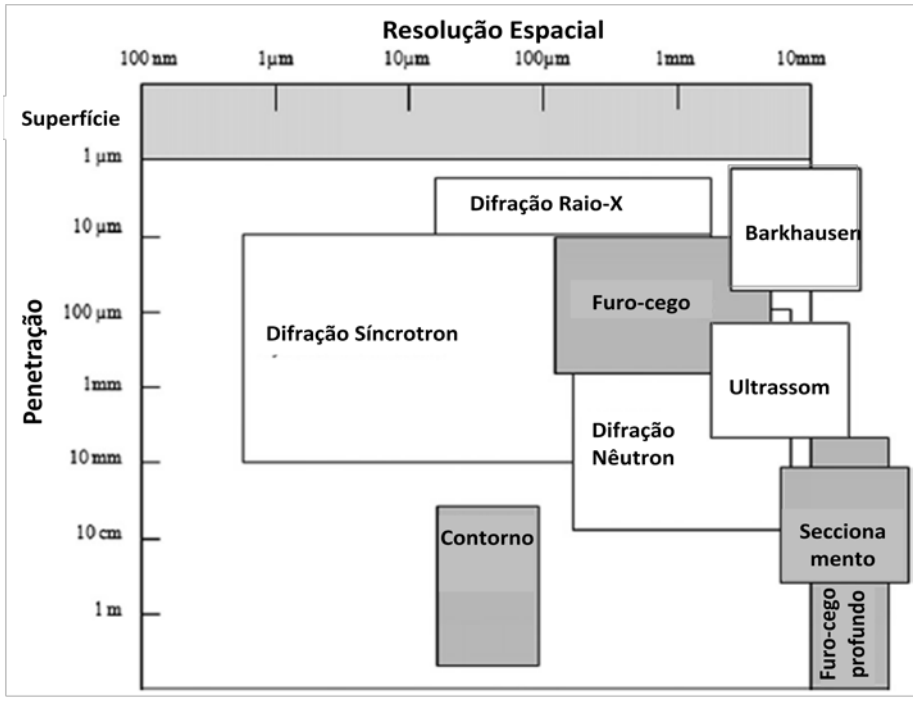


Figura II.12 – Penetração e resolução espacial de várias técnicas. As técnicas destrutivas e semidestrutivas estão coloridos de cinza (ROSSINI, 2012).

Por fim, as seguintes observações devem ser consideradas ao escolher as técnicas de medição de tensões residuais (ROSSINI, 2012):

1. Técnica de difração de raios-X pode ser usado em materiais dúcteis e obter tanto macro como micro tensões residuais, mas é uma técnica baseada em laboratório e só pode ser utilizada em componentes pequenos.
2. Técnicas furo-cego e furo profundo são fáceis e rápidas, podem ser utilizadas para uma vasta gama de materiais, mas elas são técnicas semidestrutiva e possuem limitação na sensibilidade à deformação e na resolução.
3. Difração de nêutrons tem uma resolução ideal, mas precisa de instalações caras e especializadas.
4. Ruído de Barkhausen e Ultrassônica, são ambas as técnicas rápidas, fáceis e de baixo custo, mas têm baixa resolução.
5. Técnica de Seccionamento é rápida e pode ser utilizada para uma grande variedade de materiais, mas é uma técnica destrutiva e tem uma resolução de deformação limitada.

II.3. Análise da Tensão Residual com a Técnica Ultrassônica

II.3.1. Velocidade Ultrassônica

O princípio fundamental da medição de tensão por técnicas ultrassônicas é o fenômeno da variação aproximadamente linear da velocidade da onda ultrassônica com a tensão aplicada. A tensão é avaliada por meio da introdução de uma onda sonora com frequência de vários mega Hertz numa amostra metálica e é medido o tempo de percurso ou algum outro parâmetro relacionado com a velocidade. Logo, é importante identificar a causa da variação da velocidade, se causada pela deformação elástica devida à presença de tensão, ou pela textura da amostra, por exemplo. No entanto, nem tecnologia nem conhecimento fundamental para isso estão normalmente disponíveis. O grande interesse em técnicas de ultrassom para medição de tensões residuais decorre de seu potencial para medições não destrutivas e volumétricas (HOWES, 2002).

II.3.2. Princípio

Alguns fenômenos relacionados com a velocidade da onda ultrassônica, como a mudança de direção, tem sido usados em várias técnicas para medir tensão. Todos utilizam o

comportamento do metal a partir da linearidade da lei de Hooke, $\sigma = E\varepsilon$, onde σ é a tensão, ε é a deformação, e E é o módulo de elasticidade. Esta tem sido considerada como uma propriedade não harmônica do sólido e pode ser representado pela série de potências: $\sigma = E\varepsilon + C\varepsilon^2 + D\varepsilon^3 + \cdots$, onde C é a constante elástica de terceira ordem, D é a constante elástica de quarta ordem, e assim por diante. Na maioria das pesquisas feitas para a medição de tensão, as expressões cujos termos passam da constante de terceira ordem, C, são descartados. Dentre os efeitos das propriedades não harmônicas mais utilizados para medir tensão estão (HOWES, 2002):

- A velocidade depende do módulo de elasticidade;
- Dispersão de amplitudes de frequência em ondas de superfície;
- Birrefringência de ondas transversais polarizadas ortogonalmente;
- Geração harmônica em ondas de superfície.

Uma forma muito simplificada da lei de tensão-deformação tem sido escrita como: $\sigma = E\varepsilon + C\varepsilon^2$ e reescrita como $\sigma = \varepsilon(E + C\varepsilon)$. O termo entre parênteses é aproximadamente relacionado com a velocidade do som como $\rho V^2 \cong E + C\varepsilon$, onde ρ é a densidade do meio e V é a velocidade do som. Isto pode ser aproximadamente reescrito em termos da velocidade em função da deformação como:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}\left[1 + \frac{C}{2E}\varepsilon\right]} \quad \textbf{(3)}$$

Resolvendo para deformação,

$$\varepsilon = 2\left(V\sqrt{E}\rho - 2E\right)/C \quad \textbf{(4)}$$

A simples dependência da velocidade ultrassônica do módulo de elasticidade e da densidade pode ser demonstrada ao reescrever a equação $\pi V^2 = E + C\varepsilon$ em termos de V, diferenciando e dividindo por V para produzir uma expressão para $\Delta V/V$. O resultado mostrará prontamente que uma mudança fracionária no módulo de elasticidade ou densidade afetaria a velocidade. A densidade do metal, para o qual o coeficiente de Poisson é próximo de 0,3, obviamente muda se uma tensão de compressão ou de tração for aplicada sobre a amostra, e então a velocidade do som também muda (HOWES, 2002).

As técnicas de medição de tensão por ultrassom são baseadas na relação da velocidade de onda em várias direções com a tensão. A Figura II.13 mostra os elementos de uma barra sob tração em que a onda se propaga em três direções perpendiculares. O primeiro

índice nas velocidades de ondas representa a direção de propagação da onda e o segundo representa a direção do movimento das partículas (direção de polarização). Por exemplo, a velocidade V_{11} representa a propagação da onda e a polarização das partículas em direção paralela à direção de aplicação da tensão (onda longitudinal), enquanto V_{31} representa a onda propagando-se paralelo com a direção de aplicação da tensão e as partículas polarizadas num plano perpendicular (onda transversal) à direção de aplicação da tensão. As velocidades de onda com diferentes direções de propagação e polarização de partículas, V_{13}, V_{32} e V_{33} também são mostradas. A sensibilidade com a deformação elástica é mais significativa nas ondas com velocidade V_{11}, seguidas pelas ondas com velocidade V_{31}. As demais direções de ondas e partículas não apresentam sensibilidade significativa com a deformação elástica (SCHNEIDER, 1990).

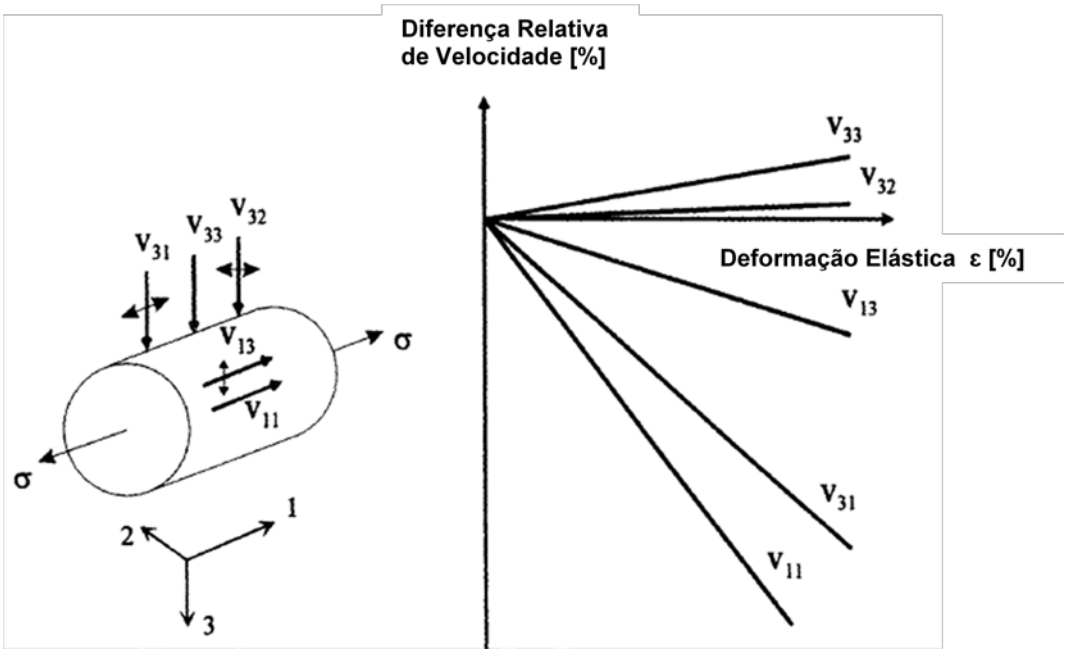


Figura II.13 – Mudança relativa das velocidades de onda como função da deformação elástica de uma amostra metálica (SCHNEIDER, 1990).

A velocidade de ondas planas propagando paralela à tensão pode ser relacionada com a deformação (α) com as seguintes expressões (BRAY, 2000):

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \quad \textbf{(5)}$$

$$\rho_0 V_{12}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \quad \textbf{(6)}$$

$$\rho_0 V_{13}^2 = \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \quad \textbf{(7)}$$

Onde:

α_1, α_2, α_3 = Componentes das deformações principais;

ρ_0 = densidade inicial;

λ, μ = constantes elásticas de segunda ordem (constantes de Lamé);

$\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \cdot$;

l, m, n = constantes elásticas de terceira ordem (constantes de Murnaghan);

V_{11}, V_{12}, V_{13} = velocidades das ondas na direção 1, com polarização nas direções 1, 2 e 3, respectivamente;

Para um estado uniaxial de tensão, $\alpha_1 = \varepsilon$, $\alpha_2 = \alpha_3 = -\nu\varepsilon$, onde ε é a tensão na direção 1 e ν é o coeficiente de Poisson. Usando esses valores, a equação (5) torna-se:

$$\rho_0 V_{11}^2 = \lambda + 2\mu + \left[4(\lambda + 2\mu) + 2(\mu + 2m) + \upsilon\mu\left(1 + \frac{2l}{\lambda}\right)\right]\varepsilon \quad \textbf{(8)}$$

A sensibilidade relativa à variação da velocidade com a deformação pode ser calculada pela equação (9). Nesta equação, L_{11} é a constante acustoelástica das ondas L_{CR}.

$$\frac{dV_{11}/V_{11}}{d\varepsilon} = 2 + \frac{(\mu + 2m) + \upsilon\mu\left(1 + 2l/\lambda\right)}{\lambda + 2\mu} = L_{11} \quad \textbf{(9)}$$

Os valores para constantes acustoelásticas em outras direções podem ser obtidos da mesma maneira (valores experimentais de diferentes materiais são apresentados nas Tabelas 2 e 3 do Anexo A). A variação na velocidade V_{11}, controlada pelo coeficiente L_{11}, é muito maior do que as outras, o que indica que estas ondas são as melhores opções a serem utilizadas na avaliação de tensão (BRAY, 2000). Há de se esclarecer que o estudo proposto utiliza ondas longitudinais e transversais, uma vez que ambas as técnicas “Phased Array” e Refração de Ondas com Incidência Oblíqua permitem.

A tensão pode ser calculada pela aplicação unidimensional das relações tensão-deformação em sólidos elásticos. A equação 10 pode ser rearranjada para dar a variação de tensão, em termos de tempo de percurso (dt/t_0), como mostrado na equação 10, onde t_0 representa o tempo de percurso da onda no material livre de tensão a ser investigado.

$$d\sigma = \frac{E\left(dV_{11}/V_{11}\right)}{L_{11}} = \frac{E}{L_{11}t_0}dt \quad \textbf{(10)}$$

Onde:

$d\sigma$ = variação de tensão (MPa)

E = módulo de elasticidade (MPa)

A mesma equação pode ser usada para as outras direções das ondas, desde que o valor do coeficiente acustoelástico L seja alterado.

Utiliza-se o termo da birrefringência ao se empregar ondas transversais e denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional da velocidade ou tempo de percurso da onda ultrassônica, em relação a duas direções perpendiculares, conforme Equação 11 (CARMO, 2007):

$$B = \frac{V_t - V_l}{\frac{V_l + V_t}{2}} = \frac{t_l - t_t}{\frac{t_l + t_t}{2}} \quad \textbf{(11)}$$

Onde V_l e V_t são as velocidades das ondas ultrassônicas polarizadas nas direções longitudinal e transversal do material, respectivamente. Como a onda percorre o mesmo espaço no material, nessas duas direções, pode-se trabalhar diretamente com tempos de percurso das ondas ($t_l \; e \; t_t$).

II.3.3. Limitações e Aplicações

A tecnologia ultrassônica oferece uma série de tipos de ondas com os quais se inspecionam os metais; estas incluem ondas longitudinal, transversal, e ondas de superfície, como as ondas de Rayleigh, L_{CR}, etc. Cada modo oferece parâmetros únicos para obter informações. Como tem sido discutido, o efeito primário da deformação causada pela tensão na propagação ultrassônica em metais está na velocidade. Isto pode ser detectado pela medição da velocidade de onda. No entanto, há outras características dos metais que afetam a velocidade ultrassônica no mesmo grau que a tensão: textura cristalográfica, metais com mais de uma fase, precipitados, densidade de deslocamento, etc (HOWES, 2002).

CRECRAFT[2], citado por HOWES (2002, p.114), discutiu os efeitos da velocidade, manifestada com a introdução da birrefringência na textura, e a alteração acentuada observada com frequência ultrassônica. Ele também relatou birrefringência devido a amostras de aço-níquel trabalhadas a frio, mas não tentou separar os efeitos do trabalho a frio em termos de textura, densidade de deslocamento, e assim por diante. No início dos anos 50, BRADFIELD e

[2] D.I. CRECRAFT, Ultrasonic Measurement of Stresses, *Ultrasonics,* 1968, p 117–121.

PURSEY[3], PURSEY e COX[4], citados por HOWES (2002, p.114), mostraram a influência de pequenos graus de textura sobre a elasticidade medida por ultrassom em barras policristalinas. Eles mostraram como as verdadeiras constantes elásticas isotrópicas podem ser determinadas usando medições de ambas as velocidades de ondas longitudinal e transversal ao longo de várias direções. Eles apresentaram gráficos estereográficos que ilustram o relacionamento entre o comportamento elástico de cristais cúbicos e resultados de determinações de textura por raios-x.

MCGONAGLE e YUN[5], citados por HOWES (2002, p.114), escreveram os efeitos do trabalho a frio num artigo comparando os resultados dos raios-X com medições de velocidade com onda Rayleigh. BOLAND et al.[6], citados por HOWES (2002, p.114), também reconheceram que outras propriedades dos materiais podem afetar a velocidade ultrassônica e recomendaram que as técnicas a serem desenvolvidas fossem capaz de distinguir, dentre as causas da mudança de velocidade, aquela provocada pela tensão.

JAMES e BUCK[7], citados por HOWES (2002, p.114), observaram que uma vez que as constantes elásticas de terceira ordem não estão prontamente disponíveis na literatura para a maioria dos materiais estruturais, a medição da tensão com ultrassom deve ser calibrada em relação ao material específico a ser investigado. Eles mencionam que a orientação cristalográfica preferencial (textura) durante a deformação ou fadiga é capaz de modificar severamente as constantes elásticas das quais depende a velocidade do som.

PAPADAKIS[8], citado por HOWES (2002, p.114), observou marcantes mudanças de velocidade em ondas ultrassônicas em várias microestruturas metálicas, e MORO et al.[9], citados por HOWES (2002, p.114), mediu o efeito das mudanças microestruturais causadas pela têmpera sobre a velocidade ultrassônica em aço de baixa liga. TITTMAN e THOMPSON[10], citados por HOWES (2002, p.114), avaliaram com ondas Rayleigh a dureza próxima à superfície de aço endurecido; porque a dureza neste caso foi devido ao efeito combinado da composição, microtensão, e macrotensão na mudança de velocidade.

---

[3] G. BRADFIELD and H. PURSEY, Philos. Mag.,Vol 44, 1953, p 295.

[4] H. PURSEY and H.L. COX, Philos. Mag., Vol 45, 1954, p 295.

[5] W.J. MCGONAGLE and S.S. YUN, Measurement of Surface-Residual Stress by Nondestructive Methods, Proc. Fifth Int. Conf. Nondestructive Testing (Montreal, Canada), May 21–25 1967, p 159–164.

[6] A.J. BOLAND et al., “Development of Ultrasonic Tonography for Residual Stress Mapping,” EPRI RP 504–2, Final Report, Electric Power Research Institute, 1980.

[7] M.R. JAMES and O. BUCK, Quantitative Nondestructive Measurement of Residual Stresses, Crit. Rev. Solid State Mater. Sci., Aug 1980, p 61–105.

[8] E.P. PAPADAKIS, Ultrasonic Attenuation and Velocity in Three Transformation Products of Steel, J. Appl. Phys., Vol 35 (No. 5), 1964, p 1474–1482.

[9] A. MORO, C. FARINA, and F. ROSSI, Measurement of Ultrasonic Wave Velocity of Steel for Various Structures and Degrees of Cold-Working, NDT Int., Aug 1980, p 169–175.

[10] B.R. TITTMAN and R.B. THOMPSON, Measurement of Physical Property Gradients with Elastic Surface Wave Dispersion, Proc. Ninth Symp. on NDE, Southwest Research Institute, 1980, p 20–28.

A sensibilidade à temperatura por medições de tensões com ultrassom também tem sido citado como uma importante fonte de erro. SALAMA et al.[11,12], citados por HOWES (2002, p.114), propuseram que esta dependência seja usada como uma forma de medir tensão, mas também observou o efeito marcante de deslocamentos e não adotou uma metodologia para separar a tensão do efeito do deslocamento.

Grande parte dos trabalhos citados acima está preocupada com as tentativas de medir os efeitos de uma variedade de propriedades dos materiais nas alterações da velocidade ultrassônica. No entanto, aparentemente não há estudo detalhado que demonstre a capacidade de separar quantitativamente os efeitos da tensão na propagação de ondas ultrassônicas, de outras variáveis encontradas nas estruturas dos metais. Além disso, a maioria dos estudos citados observou mudanças nas velocidades de ondas não superficiais. Medidas de velocidade dessas ondas devem ser feitas através da espessura do componente, e, como a maioria dos metalúrgicos reconhece, a obtenção de propriedades uniformes através de espessuras superiores a alguns milímetros, especialmente em aço, é difícil. As pequenas variações de propriedade a que a velocidade do ultrassom é sensível e a inerente falta de homogeneidade na engenharia dos materiais apresentam sérios problemas adicionais para medições de tensão através da espessura (HOWES, 2002).

Apesar das variações microestruturais na fabricação de produtos de aço, a aplicação de técnicas de ultrassom para medição de tensão residual foi sucesso em casos específicos, como medição de tensões no aro de rodas ferroviárias (HOWES, 2002). Aqui, mudanças ou variações da tensão residual na direção do aro é uma preocupação, enquanto que na direção radial ou axial, muitas vezes podem ser assumidas constante ou desprezadas. As ferrovias europeias têm monitorado a velocidade ultrassônica ao longo dos aros durante o uso das rodas e verificaram alterações nas mudanças das tensões residuais. SCHRAMM[13], citado por HOWES (2002, p.114), mencionou em artigo uma série de abordagens para a aplicação de ultrassom na medição de tensões residuais em rodas ferroviárias e estes exemplos podem encontrar aplicação na medição de tensão residual axial em outras formas simétricas. Medições de tensões residuais por ultrassom também foram aplicadas em trilhos (EGLE e BRAY[14], BRAY e LEON-SALAMANCA[15], apud HOWES, 2002, p.114).

Em projetos cada vez mais eficientes, fatores de segurança mais baixos e especificações de materiais mais rigorosas são exigidos, e o conhecimento do estado de

---

[11] K. SALAMA and C.K. LING, The Effect of Stress on The Temperature Dependence of Ultrasound Velocity, *J. Appl. Phys.,* Vol 51 (No. 3), March 1980, p 1505–1509.

[12] K. SALAMA and G.A. ALERS, Third-Order Elastic Constants of Copper at Low Temperature, Phys. Rev., Vol 161 (No. 3), Sept 1967, p 673–680.

[13] R.E. SCHRAMM, J. SZELAZEK, and A. VAN CLARK, JR., Ultrasonic Measurement of Residual Stress in the Rims of Inductively Heated Railroad Wheels, Mater. Eval.,Aug 1996, p 929–933.

[14] D.M. EGLE and D.E. BRAY, Ultrasonic Measurement of Longitudinal Rail Stresses, Mater. Eval., Vol 378 (No. 4), March 1979, p 41–46.

[15] D.E. BRAY and T. LEON-SALAMANCA, Zero-Force Travel-Time Parameters of Ultrasonic Head-Waves in Railroad Rail, Mater. Eval., Vol 43 (No. 7), June 1985, p 854–858.

tensão em materiais e estruturas é cada vez mais importante. As técnicas de ultrassom têm a capacidade única de estabelecer macrotensões ao longo de um comprimento de percurso finito, bem como perto da superfície. Os princípios de medição de tensões por ultrassom e aplicações específicas de ondas de superfície estão disponíveis na literatura. Especificamente são discutidas aplicações que incluem aços laminados e chapas soldadas de alumínio, vasos de pressão, rotores, discos e palhetas de turbinas, e rodas e trilhos ferroviários (BRAY, 2000).

II.4. Aplicações de Técnicas de Inspeção

II.4.1. Acustoelasticidade para Avaliação de Tensões Residuais

No primeiro estudo de caso, para análise de tensões de estruturas civis em serviço, um modelo com cabo de aço de sete fios fixado a um bloco foi construído para validar a técnica proposta de avaliação dos níveis de tensão utilizando efeito acustoelástico (CHAKI, 2009).

O teste de calibração acustoelástico foi conduzido em uma máquina de ensaio de tração, aplicando tensões conhecidas em um cabo de aço de referência.

O cabo de aço testado e mostrado na Figura II.14 é composto de sete fios de aço de elevada resistência mecânica, sendo seis fios helicoidais torcidos em torno de um fio central.



Figura II.14 – Cabo de aço de 7 fios (CARMO, 2007).

As características geométricas e mecânicas dos fios são apresentados na Tabela II.2.

Tabela II.2 – Características geométricas e mecânicas do cabo de aço testado (CHAKI, 2009).

Características Geométricas		Características Mecânicas	
Diâmetro do fio do núcleo $Ø_C$ (mm)	5,4	Módulo de Young E (GPa)	213
Diâmetro do fio helicoidal $Ø_h$ (mm)	5,22	Coeficiente de Poisson ν	0,3
Diâmetro cabo de aço Ø (mm)	15,7	Limite de Resistência (MPa)	1984
Passo do fio helicoidal P (mm)	240	Limite de escoamento (MPa)	1860
Ângulo do fio helicoidal β (°)	8,7	Peso linear (kg/m)	1,18

Os testes foram realizados em amostra de cabo de aço com 492 mm de comprimento numa máquina de ensaio de tração com capacidade de 1000 KN, e seis extensômetros do tipo quarto de ponte[16]. As tensões aplicadas foram limitadas em 70% do limite de escoamento (~1300 MPa), em incrementos de 20 kN (132 MPa) numa taxa de 2 kN/s (13 MPa/s).

A análise ultrassônica foi realizada sobre o fio do núcleo do cabo de aço montado, considerando que a distribuição de tensões nos sete fios é homogênea, condição validada pelas equações:

$$N_C = \frac{A_C N}{A_C + 6A_h \cos^3(\beta)} \quad \textbf{(12)}$$

$$N_h = \frac{A_h \cos^2(\beta) N}{A_C + 6A_h \cos^3(\beta)} \quad \textbf{(13)}$$

Em que $N = N_C + 6N_h \cos(\beta)$ é a força de tração axial aplicada ao cabo de aço, β é o ângulo dos fios helicoidais, N_C e N_h são as forças de tração no fio do núcleo e nos fios helicoidais, respectivamente, A_C e A_h são as áreas de seção transversal do fio do núcleo e dos fios helicoidais, respectivamente. Após cálculo utilizando β = 8,7 °, encontra-se N_C = 1,09N_h, portanto será considerado apenas carga axial distribuída uniformemente nas sete áreas transversais.

A Figura II.15 mostra a curva de calibração, que passado o efeito de alongamento, corresponde à mudança de velocidade da onda em função de tensões aplicadas durante um ciclo carga / descarga.

[16] A variação da resistência elétrica do extensômetro pode ser medida se o mesmo fizer parte de um circuito elétrico. A maneira mais comum de utilização dos extensômetros em um circuito elétrico é através de uma ponte de Wheatstone. Uma ou mais resistências da ponte poderão ser substituídas pelo extensômetro. Se apenas uma resistência for substituída tem-se a ligação em um quarto de ponte. Se duas resistências da ponte forem substituídas por dois extensômetros tem-se a ligação em meia ponte. As ligações ainda podem ser de três quartos de ponte e ponte inteira. Neste último caso, todas as resistências da ponte são substituídas por extensômetros.

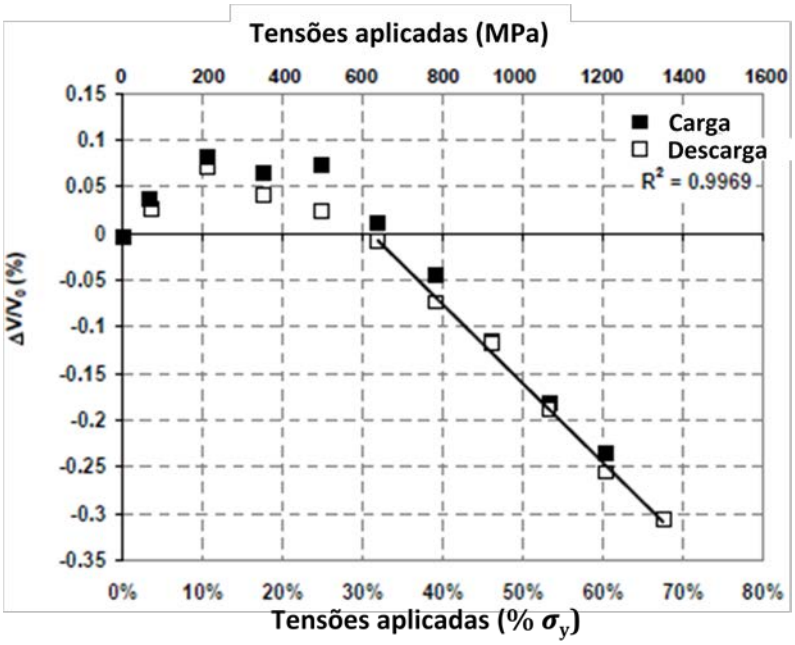


Figura II.15 – Curva de calibração acustoelástica nos ciclos de carga/descarga do ensaio de tração (CHAKI, 2009).

Os resultados experimentais apontam duas situações: uma relação positiva não linear entre velocidade e tensão aplicada até 32% do Limite de Escoamento (LE), e uma variação linear negativa a partir deste nível de tensão. O primeiro não corresponde ao fenômeno representado pela equação teórica $\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V(\sigma) - V_0}{V_0} = k\sigma$, e provavelmente deve-se às forças de contato que ocorrem entre os fios individuais. Curiosamente, estas discrepâncias são pequenas em tensões maiores (σ ≥ 32% LE), onde os cabos pré-tensionados são exigidos em estruturas de engenharia civil, cujo intervalo de tensões de serviço recomendado é de 45-75% LE. Acima de 32% LE, a tendência de mudança de velocidade é linear, sugerindo que a curva linear pode ser ajustada utilizando a regressão dos mínimos quadrados (linha de tendência). A equação linear correspondente é:

$$\frac{\Delta V}{V_0}(\%) = -4{,}78 \times 10^{-4}\,\sigma + 2{,}95 \times 10^{-1}, R^2 = 9{,}969 \times 10^{-1} \quad \textbf{(14)}$$

O coeficiente de acustoelasticidade calibrado é k = -4,78 × 10^{-6} MPa^{-1} com desvio padrão de 0,13 × 10^{-6} MPa^{-1}.

A fim de testar a confiabilidade do processo de medição, um modelo em pequena escala de cabos pré-tensionados fixados em bloco foi construído. Os cabos foram carregados nos níveis de tensão 20, 40, 60 e 72% LE.

As medições de tensão por ultrassom nos quatro fios foram realizadas utilizando a equação:

$$\sigma = \frac{1}{k}\left(\frac{l - tV_0}{tV_0 - l_0}\right) \quad \textbf{(15)}$$

A fim de demonstrar que o procedimento de medição desenvolvido é confiável, comparou-se as medições de tensão com ultrassom e com sistema de acionamento hidráulico da máquina de ensaio de tração. Exceto para a carga a 20% LE, os resultados foram bastante semelhantes (ver Figura II.16).

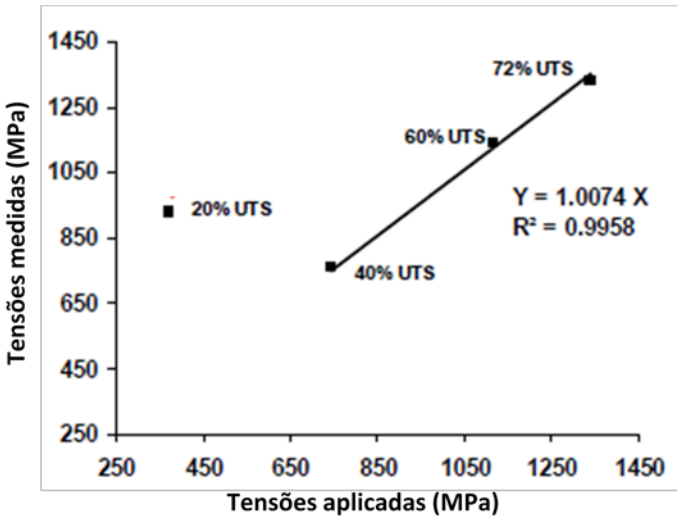


Figura II.16 – Comparação entre tensões aplicadas e medidas (CARMO, 2007).

CARDOSO (2007) utilizou dois tubos de aço API 5L X46 com 500 mm de comprimento, sendo um sem costura (espessura de 10 mm e diâmetro interno de 254 mm), e um com costura (espessura de 11,5 mm e diâmetro interno de 457,2 mm).

Para a realização dos ensaios foi utilizado transdutor com frequência de 2,25MHz e um equipamento portátil, que gera o sinal ultrassônico e recebe esse sinal digitalizado. Essa placa é gerenciada por um programa computacional, fornecendo uma medida de tempo rápida e de alta precisão. O equipamento portátil trabalhou na configuração pulso-eco, e os ensaios nos tubos consistiram na medição do tempo de percurso de vinte sinais em três pontos dos tubos, dos quais dez na direção axial e dez na circunferencial, de modo a se obter dez valores de birrefringência acústica em cada ponto.

No tubo com costura foi feita a marcação de cinco regiões (12+h, 3h, 6h, 9h e 12-h), e no tubo sem costura foi feita a marcação de quatro regiões (12h, 3h, 6h e 9h), de modo a serem distribuídas simetricamente pelo tubo.

Com o objetivo de mostrar que o tubo sem costura apresentava comportamento acustoelástico bem diferente do tubo com costura, ambos foram cortados para uma análise qualitativa e comparativa do estado de tensões residuais. A abertura do tubo ao final do corte

está relacionada a tensões residuais trativas, enquanto o fechamento do tubo após o corte é associado a tensões residuais compressivas.

Para avaliar a resposta acustoelástica, tiras foram removidas dos tubos e submetidas a um carregamento uniaxial trativo até o limite elástico do material. A cada carregamento, 3 pares de medida de tempo eram feitos. Esse procedimento foi realizado até que o escoamento do material fosse atingido. O transdutor foi acoplado no ponto central das tiras, com sua direção de polarização alinhada à direção de carregamento, e depois ortogonal à direção de aplicação da carga.

A Figura II.17 compara a birrefringência acústica nos tubos com e sem costura. Foram utilizados os valores médios de birrefringência em cada uma das regiões dos tubos. Esse tipo de variação indica que o material apresenta anisotropia acústica, não podendo ser definida através de um único valor, dificultando a separação da birrefringência referente à presença de tensões residuais em tubos com costura. Portanto devem ser considerados a textura cristalográfica relacionada à direção de laminação; o perfil heterogêneo de tensões residuais devido à soldagem; e regiões com diferentes deformações plásticas provocadas pelo processo de fabricação.

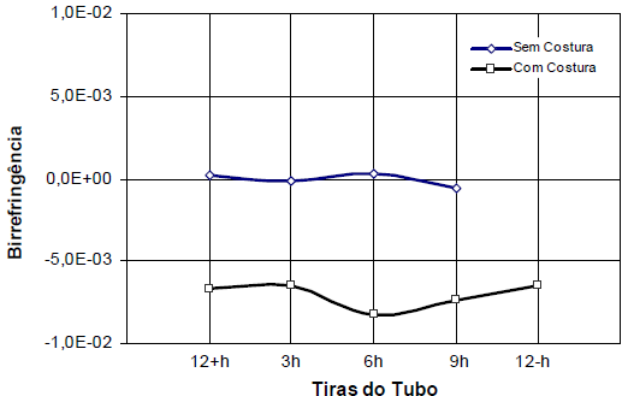


Figura II.17 – Comparação de birrefringência acústica nos tubos com e sem costura (CARDOSO, 2007).

Após os cortes dos tubos, as mesmas regiões foram medidas, agora sob a forma de tiras. A seguir o comportamento da birrefringência acústica antes e depois dos cortes realizados. Nota-se o mesmo comportamento nas tiras. Os valores aumentaram em módulo, exceto nas tiras 9h e 12-h do tubo com costura. Os cortes das tiras realizados após o alívio de tensões podem ter contribuído para essa mudança.

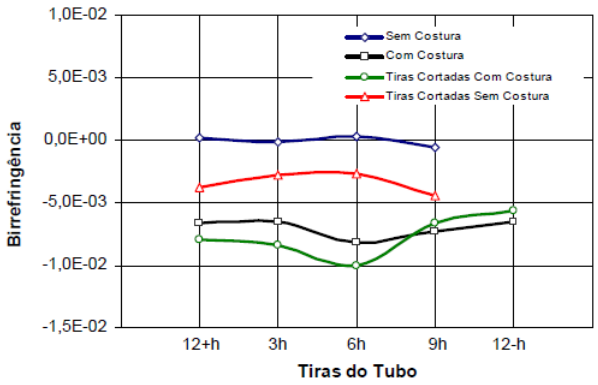


Figura II.18 – Comparação de birrefringência acústica nos tubos com e sem costura, antes e após realização dos cortes (CARDOSO, 2007).

A partir dos resultados de birrefringência acústica, comprovou-se o comportamento anisotrópico do tubo com costura e o comportamento isotrópico do tubo sem costura, permitindo que a técnica ultrassônica para medição de tensões pode ser integralmente utilizada em tubos sem costura.

II.4.2. Onda Longitudinal Criticamente Refratada (L_{CR})

Para o trabalho de medição de tensões com ondas L_{CR} (BRAY, 2000), dois transdutores são dispostos de forma sequencial, como na Figura II.19, um transmissor e o outro receptor. Em alguns casos, são utilizados dois receptores. A distância entre os transdutores (d) é mantida constante por uma barra rígida, assegurando que qualquer mudança no tempo de percurso da onda ultrassônica entre os transdutores é devido às variações de tensão ou às propriedades do material, e não ao espaçamento dos transdutores.

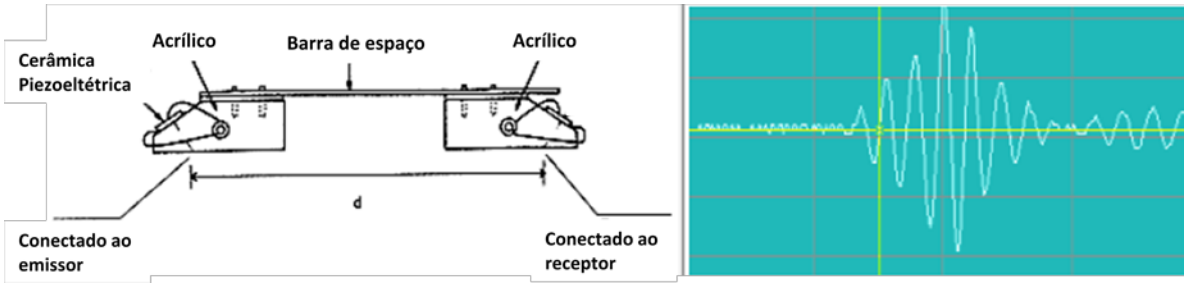


Figura II.19 – Típico transdutor L_{CR} em série (esquerda) e típico sinal L_{CR} (direita) (BRAY, 2000).

Os efeitos da tensão, textura e temperatura na velocidade da onda, contribuem para as alterações dos dados coletados. A relação causada por estes parâmetros podem ser expressas como:

$$t = t^{*} + \Delta t_{RS} + \Delta t_{T} + \Delta t_{F} + \Delta t_{TX} \quad \textbf{(16)}$$

Onde t é o tempo de percurso da onda ultrassônica medido, t * o tempo de percurso da onda ultrassônica para um componente isotrópico, homogêneo e livre de tensão a uma temperatura normal, Δt_{RS} o tempo de percurso da onda ultrassônica com tensão residual, Δt_T o tempo de percurso da onda ultrassônica com a diferença de temperatura entre o momento da medição e a temperatura normal, Δt_F o tempo de percurso da onda ultrassônica com uma força aplicada (ativa), e Δt_{TX} o tempo de percurso da onda ultrassônica com efeito da textura do material. Para medição de tensões residuais, Δt_F pode ser considerado zero.

A relação do tempo de percurso da onda L_{CR} medida muda, e a tensão uniaxial correspondente é dada por:

$$\Delta\sigma = \frac{E}{Lt^*}\left(t - t^* - \Delta t_T\right) \qquad \textbf{(17)}$$

Onde $\Delta\sigma$ é a variação de tensão, E é o módulo de Young, e L é a constante acustoelástica de ondas longitudinais propagando na direção do campo de aplicação da força. Assumindo valores constantes de t^* e Δt_{TX}, os valores de tempo de percurso da onda ultrassônica t obtidos em diferentes locais no rotor vão indicar mudanças de tensão.

O campo de tensões em chapas laminadas e soldadas é passível de medição por ultrassom. Considere duas chapas de aço laminada (espessura de 19 mm) soldadas de topo, sendo que uma delas sofreu tratamento térmico de alívio de tensões. Comparando os tempos de percurso da onda ultrassônica entre pontos distantes da solda (sem tensão), e pontos no cordão de solda, foi possível constatar tensões de tração de 570 MPa na solda da chapa antes de sofrer alívio de tensões. Em outro teste, a técnica foi capaz de diferenciar em duas chapas grossas de aço, que uma junta soldada de 12 mm tinha passado por alivio de tensões (BRAY, 2000). Numa outra aplicação, BRAY, KIM e FERNANDES[17], citados por BRAY (2000, p.7), investigaram três chapas de alumínio, uma laminada, uma com alívio de tensões e outra temperada. A técnica L_{CR} distinguiu claramente as chapas de aço laminado e a com alívio de tensão. Além disso, os resultados mostraram alguns padrões de tensão incomuns na chapa temperada, que foram posteriormente confirmados.

Vasos de pressão soldados foram analisados por BRAY (2000). Um recipiente de aço com 305 mm de diâmetro foi pressurizado com água, e pressões no intervalo de 0 a 69,9 MPa foram observadas tanto com a técnica L_{CR} como com extensômetros.

Cinco pares de chapas de aço API 5L X65 foram soldadas lado a lado e designadas por 6-12, 4-9, 19-36, 41-59 e 43-58. As amostras passaram por tratamento térmico para alívio de tensões (TTAT) após serem usinadas (ANDRINO, 2003). Antes da soldagem, as superfícies

[17] BRAY, DON E., KIM, S-J., and FERNANDES, M., "Ultrasonic Evaluation of Residual Stresses in Rolled Aluminum Plates," *Proceedings Ninth International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials,* Robert E. Green, Ed., Sydney Australia, June 28-July 2, American Institute of Physics, Melville, NY, 1999, pp. 443-448.

das amostras foram jateadas e limpas, e então foram efetuados dois passes de solda de topo sobrepostos, com os parâmetros de soldagem inalterados durante o processo, com exceção da velocidade de soldagem.

Foram utilizados dois transdutores, um excitador-receptor de pulsos e uma placa de aquisição de dados. Um computador foi utilizado para aquisição de sinais da chapa, e mais um programa de medição de tensões com ondas longitudinais.

As medidas foram realizadas com o transdutor localizado paralelo ao cordão, movimentando-se na região do metal fundido e da ZTA, e na região do metal de base, até a distância de 140 mm do cordão de solda. Depois do TTAT, novas medidas foram efetuadas nas mesmas posições definidas anteriormente.

Uma vez que o sentido de laminação é perpendicular ao posicionamento do transdutor, a constante acustoelástica utilizada deve ser para ondas transversais.

O resultado do conjunto 19-36 mostra, para os valores após alívio de tensão, uma redução das tensões na região soldada. Esse é um resultado característico que ilustra todo o procedimento utilizado. O valor da tensão para o mesmo conjunto tem um pico em cerca de 650 MPa, coerente com o limite de escoamento esperado para esse aço.

ANDRINO (2003) mostrou que antes e após TTAT, o comportamento de todos os conjuntos é similar em termos de tensão, apesar de grande dispersão nos resultados após TTAT. Na tentativa de retirar os efeitos de dispersão presentes foi feita a média para cada ponto, o que permitiu o traçado da curva média antes e após TTAT.

O resultado mostra consistência do TTAT (diferença de aproximadamente 700 MPa no cordão de solda), o que pode indicar que a dispersão encontrada está relacionada à técnica, já que os valores médios são representativos. O formato da curva é o esperado para o resultado, mas ainda persistem tensões da ordem de 80 MPa em regiões longe da solda, e com os resultados obtidos não é possível inferir qual a razão. Entretanto, foi possível aplicar acustoelasticidade para a avaliação de tensões residuais em conjuntos soldados, atingindo o objetivo do estudo.

Dados coletados em um disco de turbina a vapor mostraram tensões desiguais nos lados de entrada e de saída. Estes resultados foram confirmados por difração de raios-x. Finalmente, a técnica tem sido utilizada para caracterizar os efeitos do *shock peening*[18] em palhetas de turbinas de titânio para motores de aeronaves. A qualidade do ajuste que segura os anéis de retenção do gerador depende da tensão residual do aro no anel, pois quando em operação, tensões introduzidas pela força centrífuga tenderão a anular a força de retenção.

[18] Processo de jateamento de minúsculas esferas metálicas, conhecidas como "shots", utilizadas para induzir uma camada de tensão compressiva na superfície do metal, prevenindo a fadiga e aumentando a resistência à corrosão.
Uma espécie de "shock peening", o “laser peening” utiliza raios laser para gerar uma onda contínua de choque que efetua um tratamento profundo a partir da superfície das peças. Devido ao profundo efeito residual da compressão imposta pelo processo de "laser peening", as peças ficam mais resistentes à fadiga, aumentando sua vida útil.

Pode-se destacar como limitações, a necessidade de um preciso controle local do transdutor, e também na espessura do acoplante, pois a ausência de aplicação de pressão na sua interface pode resultar numa fonte de erro na leitura das variações de tempo de percurso da onda ultrassônica.

II.4.3. Técnicas Combinadas para Medição de Tensões Internas

O desenvolvimento de uma técnica que supera os efeitos da textura do material na mudança de velocidade foi abordado por PRITCHARD (1987). Foram utilizadas combinações de diferentes técnicas de ultrassom para a medição tanto de tensões interna como de superfície.

A técnica de medição de tempo de percurso da onda ultrassônica utiliza transdutores EMATs (eletromagnético) e PZTs (piezelétricos), com frequências entre 0,5 e 10 MHz. Os dados são digitalizados e registrados por um sistema de microprocessador e o atraso entre pulsos é medido em intervalos de 1 ns, usando série Fourier. Esta técnica de medição é extremamente flexível, pois pode fornecer medições de pulsos alterados pela dispersão e atenuação.

As medições de tensões internas combinam as velocidades de três ondas ultrassônicas propagando através da espessura do material, duas ondas transversais polarizadas ortogonalmente, e uma onda longitudinal. Na ausência de textura ou tensão as velocidades das ondas transversais são idênticas, com a velocidade da onda compressiva aproximadamente o dobro deste valor.

Em materiais texturizados o alinhamento dos cristais não é aleatório, como ocorre no alinhamento preferencial dos eixos dos cristais. Essa alteração da textura pode dar origem a alterações na velocidade da onda, além daquelas devido à tensão. Alguns materiais de engenharia como chapas de aço laminadas, dispõem de simetria ortorrômbica permitindo que a textura possa ser definida em termos de apenas três parâmetros de orientação, W_{400}, W_{420} e W_{440} (PRITCHARD, 1987). Desta forma, pode-se descrever o tipo de textura por meio da relação entre estes parâmetros. As velocidades das três ondas se propagando na amostra são dadas por:

$$\rho V_L^2 = c_{11} - 2c\left[1/5 - \left(16\sqrt{2}\pi^2/35\right)W_{400}\right] \quad \textbf{(18)}$$

$$\rho V_C^2 = c_{44} + c\left[1/5 - \left(16\sqrt{2}\pi^2/35\right)\left(W_{400} - \sqrt{5/2}W_{420}\right)\right] \quad \textbf{(19)}$$

$$\rho V_\perp^2 = c_{44} + c\left[1/5 - \left(16\sqrt{2}\pi^2/35\right)\left(W_{400} + \sqrt{5/2}W_{420}\right)\right] \quad \textbf{(20)}$$

Onde V_C é a onda transversal polarizada paralelamente à direção de laminação, $V_\perp$ é a onda transversal polarizada perpendicularmente à direção de laminação, V_L é a onda longitudinal, ρ é a densidade da amostra e $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$ (onde c_{11}, c_{12} e c_{44} são as constantes elásticas do cristal cúbico).

Pode ser observado que a soma dos quadrados das três velocidades é independente da textura, e isto pode ser usado para eliminar a espessura da amostra, se apenas os tempos de percurso das ondas ultrassônicas estão disponíveis. Portanto, se as três velocidades são combinadas, variações em W_{400} causará movimento no eixo y, enquanto variações em W_{420} causarão no eixo x (Figura II.20).

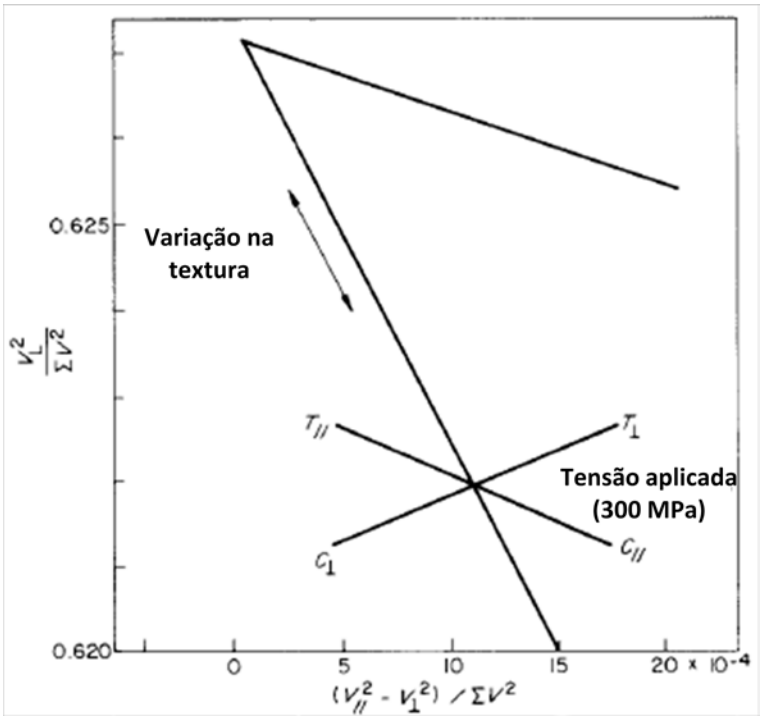


Figura II.20 – Efeitos da textura e tensão na velocidade (PRITCHARD, 1987).

Um estudo de ALLEN[19], citado por PRITCHARD (1987, p. 58), mostrou que em amostras de aço laminado, parecia existir uma relação linear entre W_{400} e W_{420}, e variações na quantidade de textura causam movimento linear. Na verdade duas retas e, portanto, dois tipos principais de textura, foram definidos deste modo, sendo atribuídos a diferentes procedimentos de laminação. Os valores dos coeficientes de textura foram verificados com difração de nêutrons em amostras que apresentaram estas duas texturas. Nos dois casos, a presença de tensão foi identificada como um deslocamento a partir da linha livre de tensão ao longo das direções mostradas na Figura II.20.

[19] ALLEN, D.R. and SAYERS, C.M. “The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique” *Ultrasonics* 22 (1984) pp 179-187.

Esta abordagem foi a primeira tentativa bem sucedida para separar a textura da tensão, assim os valores da tensão são medidos através da espessura da amostra e, portanto, fornecem mais e diferentes informações do que outras técnicas, como furo-cego e difração de raios-X que fornecem apenas informação de tensão próxima à superfície (PRITCHARD, 1987).

Como exemplo, consideramos uma solda dupla em “V”, com o cordão na mesma direção de laminação das chapas (Figura II.21).

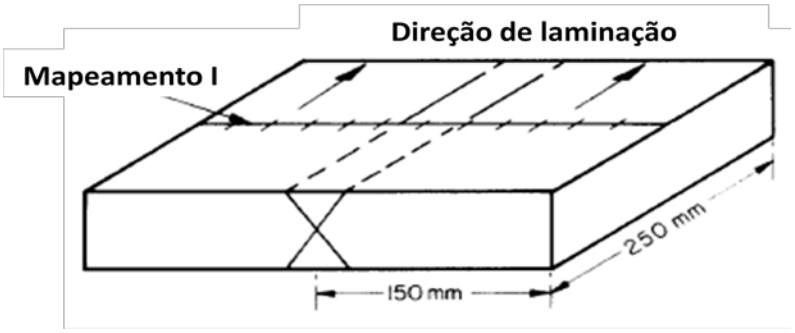


Figura II.21 – Esquema de solda dupla em "V" mostrando mapeamento I (PRITCHARD, 1987).

As medições do tempo de percurso da onda ultrassônica foram feitas nas posições apresentadas na Figura II.21, e o gráfico resultante da combinação de velocidades mostrado na Figura II.22. Como os pontos de medição atravessam o cordão de solda, há movimento considerável na posição dos pontos de dados em relação à linha livre de tensão. Este movimento é geralmente paralelo com o previsto para a aplicação de esforço paralelo à direção de laminação, indicando a presença de tensões predominantemente paralelas ao cordão de solda. A Figura II.23 mostra uma possível distribuição de tensões dentro e através da amostra, já que a principal direção de tensão é paralela à direção de laminação e por que a tensão resultante através da espessura da solda é zero.

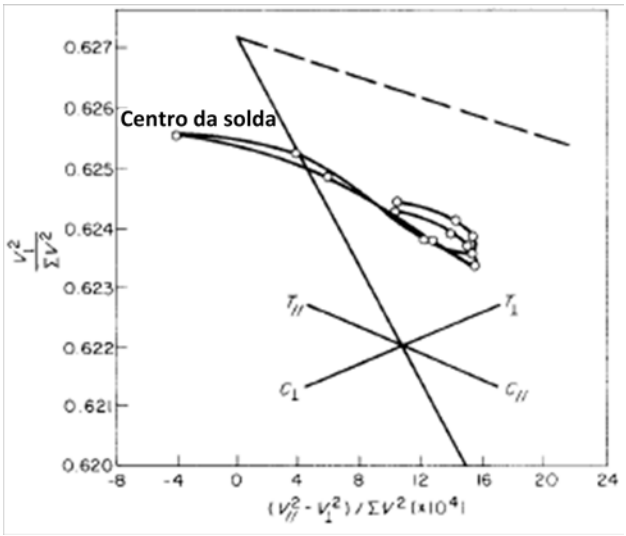


Figura II.22 – Combinação de velocidades para mapeamento em solda dupla em "V" (PRITCHARD, 1987).

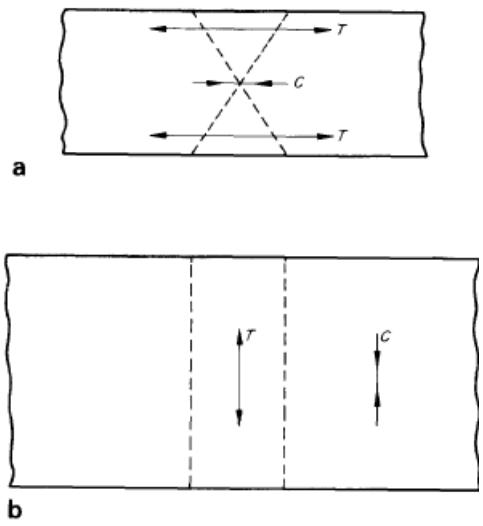


Figura II.23 – Distribuição de tensões em solda dupla em "V". (a) Vista lateral, tensão resultante através da espessura é zero. (b) Vista de topo, tensão resultante através da espessura não é zero (PRITCHARD, 1987).

A Figura II.24 mostra os níveis de tensão computados a partir de dados da combinação de velocidade em dois mapeamentos da solda. Estas medições foram feitas utilizando a distribuição de tensões calculadas a partir da difração de nêutrons e de técnicas destrutivas de alívio de deformação.

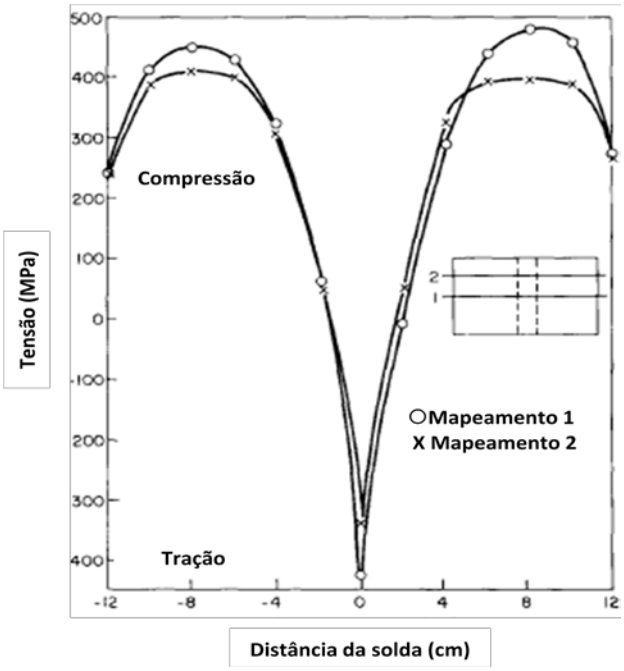


Figura II.24 – Tensão registrada pela combinação de velocidades para dois mapeamentos através da solda (PRITCHARD, 1987).

II.4.4. Técnicas Combinadas para Medição de Tensões Superficiais

A utilização de ondas de superfície para medir tensões superficiais e textura também está em andamento, com a aplicação de três tipos de onda: ondas transversais de polarização

horizontal (ondas SH), ondas de compressão (ondas P), ondas de superfície Rayleigh e ondas longitudinais subsuperficiais (SSL). Sabe-se que tensão e textura afetam a velocidade dessas ondas de maneiras diferentes, às vezes predominando o efeito da textura. A separação dos efeitos é mais simples com ondas SH (PRITCHARD, 1987).

Ondas SH quando propagadas num material livre de tensão, com simetria ortorrômbica, as velocidades se mantém constantes, se as direções de propagação e polarização forem intercambiáveis. Na Figura II.25 pode ser verificado que a velocidade é medida em função do ângulo de direção de laminação. Em ângulos intermédios a velocidade é afetada pela textura, sendo que o grau de mudança vai depender do tipo e quantidade de textura presente, mas a 90° a velocidade volta ao seu valor original a 0°. A presença de tensão remove a simetria, e a diferença de velocidades é uma medida da tensão atuando em paralelo (0°) e perpendicular (90°) à direção de laminação.

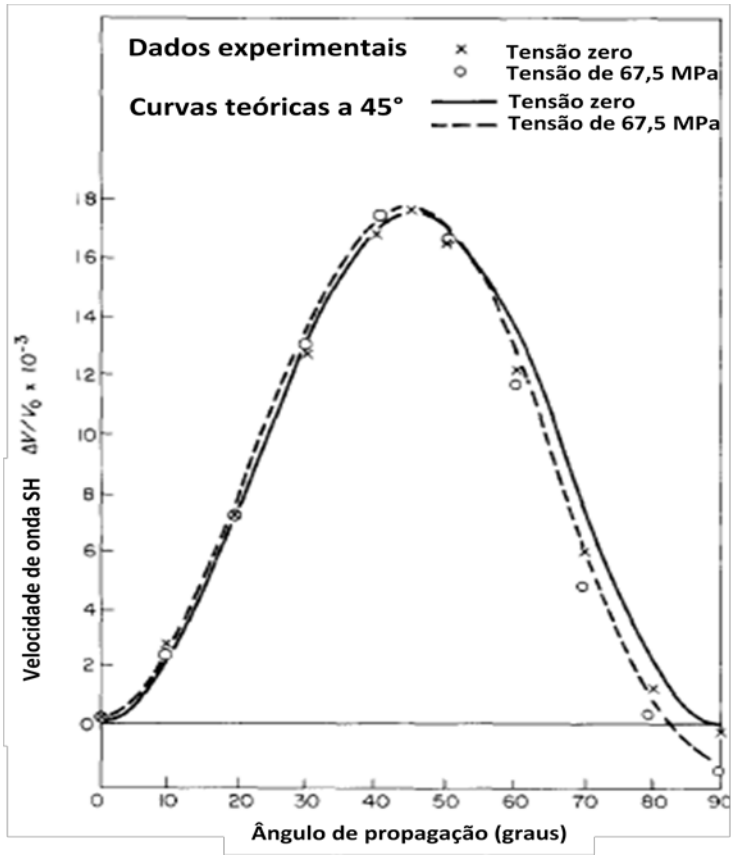


Figura II.25 – Velocidade da onda SH contra direção de propagação (PRITCHARD, 1987).

Embora as ondas P e Rayleigh não possuam simetria de propagação em materiais texturizados, demonstrado pelas ondas transversais, a combinação dos resultados de ambos os tipos de onda pode ser suficiente para permitir caracterização da textura e então extrair informação sobre as tensões. A penetração limitada de ondas de superfície em amostras com grande espessura tem potencial para caracterizar textura e tensão próximos à superfície. A penetração de ondas Rayleigh em função da frequência é bem compreendida, relacionando

profundidade de penetração com comprimento de onda. A Figura II.26 mostra a variação da velocidade em função do ângulo de propagação (em relação à direção de laminação) para uma amostra de alumínio para uma faixa de frequências. A anisotropia torna-se maior para frequências menores, implicando em aumento da textura com a profundidade. Estes resultados foram novamente verificados por difração de nêutrons (PRITCHARD, 1987).

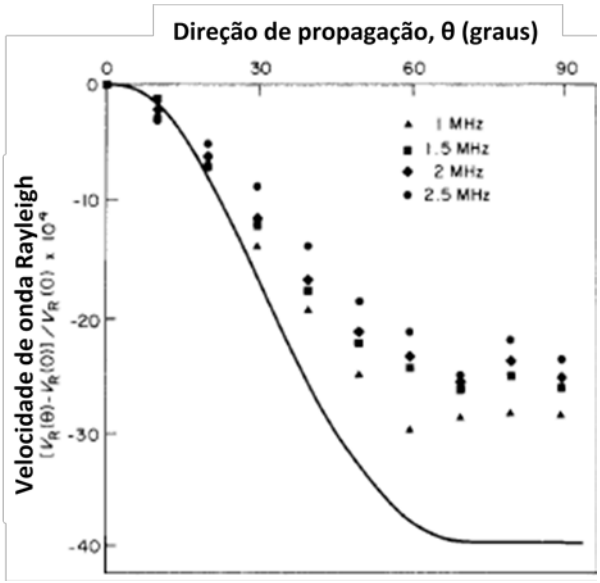


Figura II.26 – Velocidade de onda Rayleigh contra direção de propagação (PRITCHARD, 1987).

A penetração de ondas SH é também dependente do comprimento de onda. A relação é mais complexa do que para as ondas Rayleigh, mas esta abordagem permitiria determinar com sucesso os perfis de tensão a partir da variação na dispersão de frequências da onda SH com ângulo de propagação (PRITCHARD, 1987).

O efeito de textura é um fator de complicação na medição de tensões, mas a classificação correta da textura por ultrassom tem potencial no campo do controle de qualidade, identificação e categorização das características do material.

II.4.5. Tensão Residual Superficial em Juntas Soldadas

Ondas longitudinais subsuperficiais (SSL) e ondas de Rayleigh foram utilizadas para analisar a distribuição de tensão residual nas superfícies de uma tubulação de aço inoxidável 316L soldada e de uma chapa de liga de alumínio (liga 5086) (TANALA, 1995).

As constantes acustoelásticas têm uma vantagem prática já que são adimensionais, mas elas apenas indicam mudança relativa na velocidade da onda em uma direção principal de deformação ε_1 num estado triaxial de deformação.

A velocidade de propagação de ondas longitudinais paralelas à tensão diminui para tensões de tração, o que corresponde a uma diminuição aparente no módulo de Young. Ondas

longitudinais são insensíveis à direção perpendicular de propagação, além do comportamento característico de fraca sensibilidade à microestrutura. No caso de ondas transversais, uma mudança de velocidade só aparece quando a direção de propagação é perpendicular à tensão. O comportamento de ondas transversais é mais complexo, e elas são mais sensíveis aos estados da estrutura do material, especialmente em orientações preferenciais dos cristais.

Analisando os efeitos acustoelásticos no caso do aço inoxidável 316L, mostra que ondas Rayleigh e SSL só são sensíveis a um componente de uma tensão biaxial. Em relação às medições de tensão perto da superfície ao longo do eixo dos tubos soldados, σ_L e σ_T correspondem respectivamente aos componentes de tensão paralelo e perpendicular ao eixo. Supondo que apenas transdutores curvados trabalham ao longo da circunferência dos tubos (paralelo à solda), ondas Rayleigh permitem medir σ_L, enquanto as ondas SSL medem σ_T.

A Figura II.27 compara valores obtidos para tensão por meio de técnicas de ultrassom e difração de raios-X, e mostra valores próximos. Medições não puderam ser executadas na zona termicamente afetada (ZTA) por causa da geometria da junta e mudanças estruturais que afetam as velocidades das ondas (TANALA, 1995).

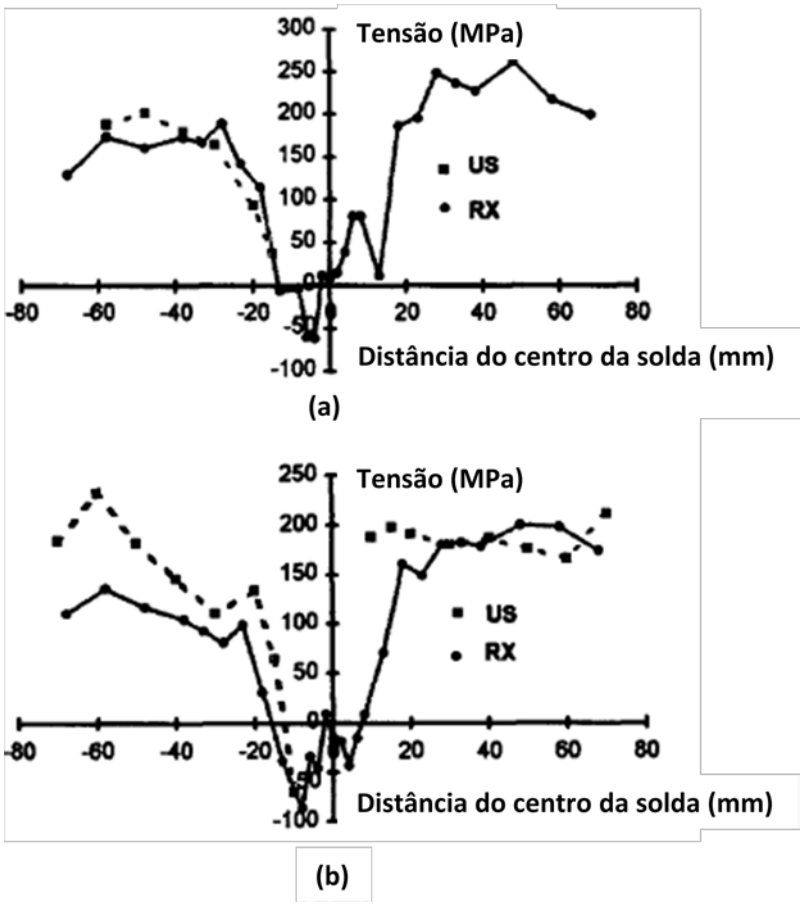


Figura II.27 – Comparação das distribuições de tensões residuais medidos através de um tubo de aço inoxidável soldada por diferentes técnicas: (a) a distribuição de tensão no sentido longitudinal, σ_L, (b) distribuição de tensão na direção transversal, σ_T (TANALA, 1995).

Outra técnica ultrassônica para medição de tensões residuais foi aplicada com medições de constantes acustoelásticas em chapa de liga de alumínio (liga 5086) soldada, nas amostras S_{II} e $S_{\perp}$ (Figura II.28).

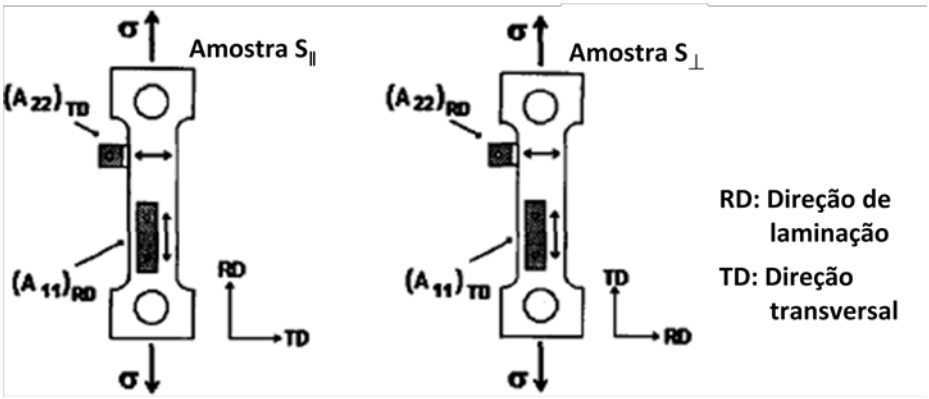


Figura II.28 – Duas amostras utilizadas para a calibração do efeito acustoelástico (TANALA, 1995).

No caso de ligas de alumínio, ambas as ondas longitudinais e Rayleigh são sensíveis às tensões paralela e perpendicular à direção de propagação, portanto duas medições são necessárias para determinar cada componente da tensão.

Em relação às medições de tensões residuais próximo da superfície da chapa de alumínio soldada, σ_L e σ_T correspondem respectivamente às componentes de tensões paralelo e perpendicular à solda. Além disso, a direção de laminação é paralelo à solda. Supondo-se que as medições são feita apenas com ondas SSL e Rayleigh propagando paralelo à solda, é possível determinar σ_L e σ_T.

A Figura II.29 mostra a distribuição de dois componentes da tensão residual superficial em função da distância da solda. Os resultados do ultrassom podem ser comparados aos da difração de raios-X. Para a componente longitudinal da tensão σ_L, a coincidência das duas técnicas é boa, o que não é o caso do componente transversal σ_T. Para σ_T, podemos assumir uma distribuição não homogênea na espessura da chapa.

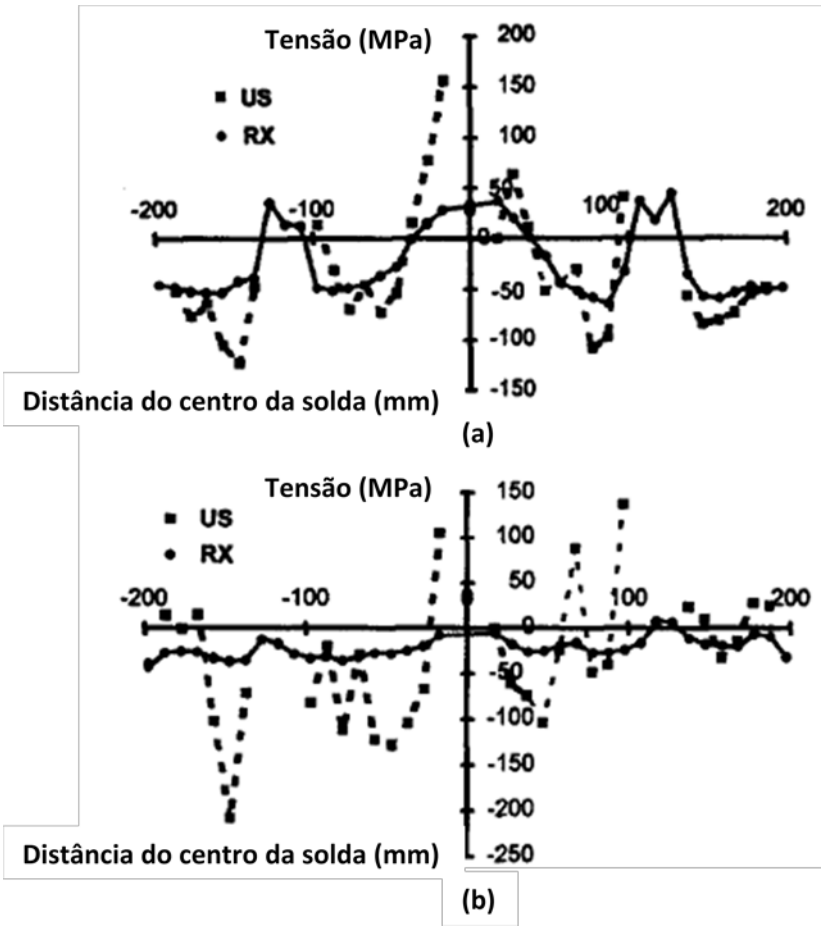


Figura II.29 – Comparação das distribuições de tensões residuais medidos através de uma chapa de liga Al-Mg soldada por diferentes técnicas: (a) a distribuição de tensão no sentido longitudinal, σ_L, (b) distribuição de tensão na direção transversal, σ_T (TANALA, 1995).

A técnica da birrefringência também foi praticada no presente caso (TANALA, 1995), e normalmente mede uma média ao longo da espessura da diferença entre tensões principais. Se compararmos $\sigma_L - \sigma_T$ obtidos a partir de medições de superfície com os resultados da birrefringência na Figura II.30(a), a coincidência é ruim. Na Figura II.30(b) os valores da birrefringência são comparados com σ_L a partir de medições de superfície, e a correspondência é excelente. Isto pode ser explicado se a média de σ_T for zero na espessura.

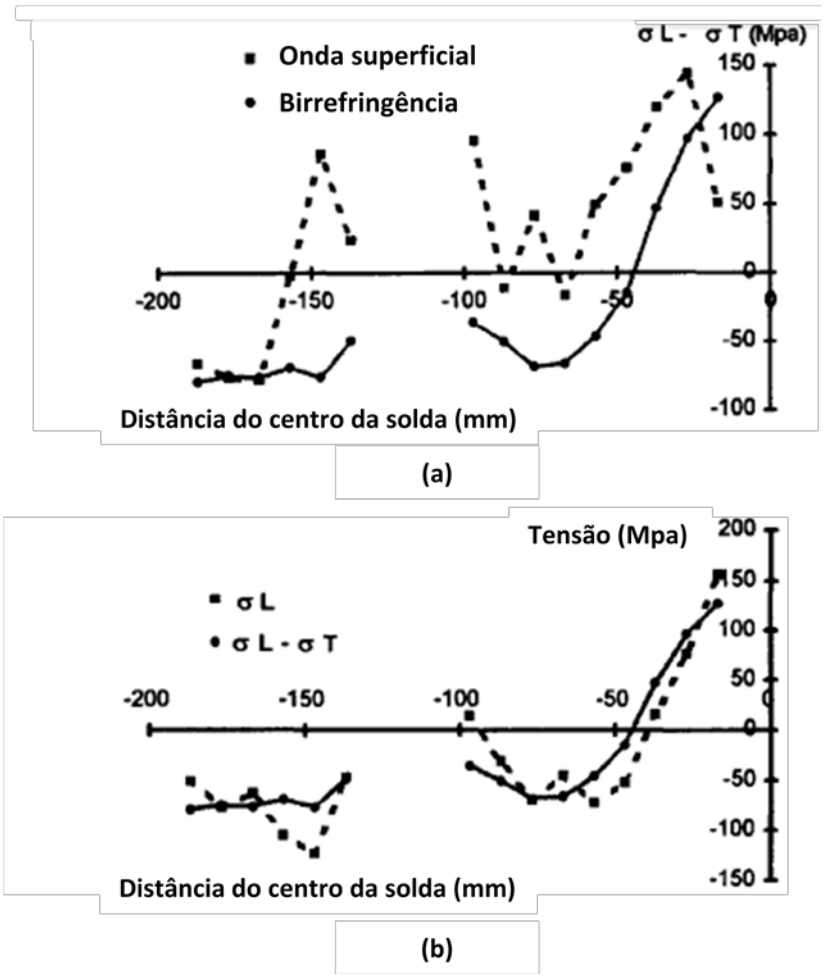


Figura II.30 – (a) Comparação da birrefringência com medições da onda de superfície numa chapa Al-Mg soldada; (b) Comparação da birrefringência com σ_L obtida com medições de ondas superficiais (TANALA, 1995).

II.4.6. Técnica Combinada EFL_{CR}: Elementos Finitos (EF) e Onda Longitudinal Criticamente Refratada (L_{CR}).

JAVADI (2013), empregando uma das técnicas já citadas em exemplos anteriores, investiga a técnica ultrassônica para medição de tensão axial e circunferencial através da espessura em um tubo de aço inoxidável austenítico. Ondas L_{CR} são utilizadas para medir tensões residuais de soldagem, enquanto as superfícies externas e internas do tubo são inspecionadas com diferentes faixas de frequência. A constante acustoelástica é medida em chapa com a mesma espessura e material do tubo inspecionado, para preservação do tubo. As tensões residuais calculadas por simulação EF são comparadas com as obtidas a partir da medição de ultrassom, obtendo bons resultados. Ou seja, tensões residuais através da espessura do tubo de aço inoxidável podem ser avaliadas com a combinação de EF e L_{CR} (conhecido como técnica EFL_{CR}).

Em comparação com casos anteriores, o atual traz o assunto da modelagem por EF, com a teoria desta técnica, os preparativos para o procedimento experimental, e os resultados obtidos utilizando a combinação EFL_{CR}.

A simulação de soldagem utilizando a técnica dos elementos finitos (EF) tem sido muito utilizada para análise de tensões residuais e deformações provenientes da solda. Com a evolução dos computadores, é possível empregar a modelagem 3D do processo de soldagem, com bons resultados quando comparados com dados experimentais.

Uma análise numérica das tensões residuais de soldagem necessita levar em conta as propriedades mecânicas das soldas, ou seja, o acoplamento durante a transferência de calor, a evolução microestrutural, e a análise da tensão térmica. Os fenômenos envolvidos no fornecimento de calor como interações do material e dinâmica dos fluidos na poça de solda não são descritos. Do ponto de vista termomecânico, a fornecimento de calor pode ser considerado como uma distribuição de energia volumétrica, e o efeito do fluxo do fluido que leva a homogeneização da temperatura na área fundida, podem ser considerados aumentando a condutividade térmica sobre a temperatura de fusão (JAVADI, 2013). Transferências de calor em sólidos são descritos pela equação de calor a seguir:

$$\rho \frac{dH}{dt} - div\left(k\nabla T\right) - Q = 0 \tag{21}$$

$$k\nabla T \cdot n = q\left(T,t\right) \quad em \quad \partial\Omega_q \tag{22}$$

$$T = T_p\left(t\right) \quad em \quad \partial\Omega_t \tag{23}$$

Onde $\rho, k, H, Q\ e\ T$ são densidade, condutividade térmica, entalpia, fonte interna de calor e temperatura, respectivamente. Ainda, n é o vetor normal para o exterior do domínio $\partial\Omega$ e q é a densidade do fluxo de calor que depende da temperatura e do tempo para trocas de calor por convecção na superfície e T_p é a temperatura estabelecida (JAVADI, 2013).

Na modelação numérica de materiais algumas simplificações e aproximações são necessárias devido à dificuldade de dados numéricos dos materiais em altas temperaturas. As propriedades do aço inoxidável 304L nessas condições foram retiradas da literatura.

O problema é formulado como uma análise de tensões térmicas sucessivas. Realiza-se análise térmica não linear para calcular a evolução da temperatura no domínio. Os resultados da análise térmica são aplicados como carga do corpo térmico numa análise mecânica não linear determinando tensão residual e distorção. O modelo de elementos finitos para análise térmica e estrutural é o mesmo. A técnica de solução interativa Newton-Raphson como solucionador de matriz direta é empregada para obter a solução. Durante análise térmica, a temperatura e as propriedades do material dependentes da temperatura alteram rapidamente.

Porém, com a técnica de Newton-Raphson e usando propriedades dos materiais modificados esperam-se resultados mais precisos.

Uma investigação por malha é feita para encontrar a malha mais adequada de acordo com o tamanho da malha e precisão dos resultados EF. O tamanho básico da malha é mostrado na Figura II.31. Selecionar o tamanho da malha mais eficaz conduz a resultados precisos e menor consumo de tempo em cálculos. Somente um lado dos tubos soldados é modelado com simetria.

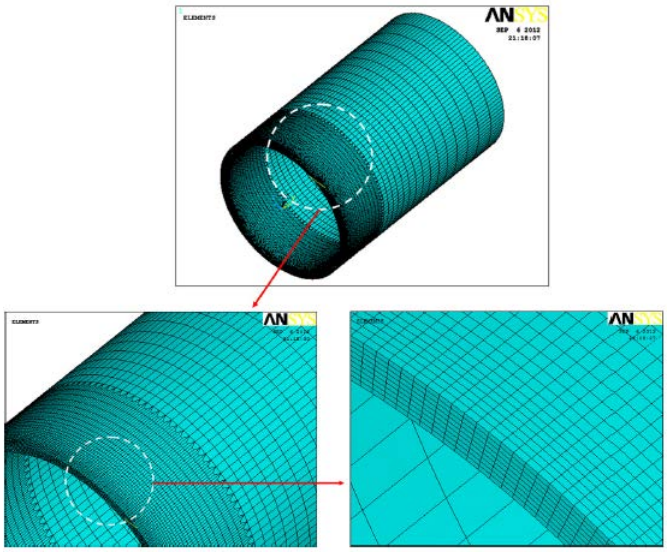


Figura II.31 – Modelo básico EF do tubo (JAVADI, 2013).

Após simulação EF, dois tubos de aço inoxidável (304L) com 500 mm de comprimento são soldados, com diâmetro externo e espessura iguais a 320 mm e 10 mm, respectivamente. Duas chapas de 600 x 250 x 10 mm são também soldadas.

Para medição do tempo de percurso da onda ultrassônica, foram empregados caixa ultrassônica, computador e unidade de medida do tempo de percurso da onda ultrassônica. Para fixação dos três transdutores para medição do TOF[20], sapatas de acrílico foram cortadas a laser, totalizando as cinco sapatas mostradas na Figura II.32, utilizadas nas superfícies interna e externa dos tubos e nas chapas. No arranjo utilizado, um transdutor é transmissor e dois são receptores, de modo a eliminar os efeitos da temperatura ambiente no curso do tempo.

[20] *Time of Flight*: tempo de percurso da onda ultrassônica.

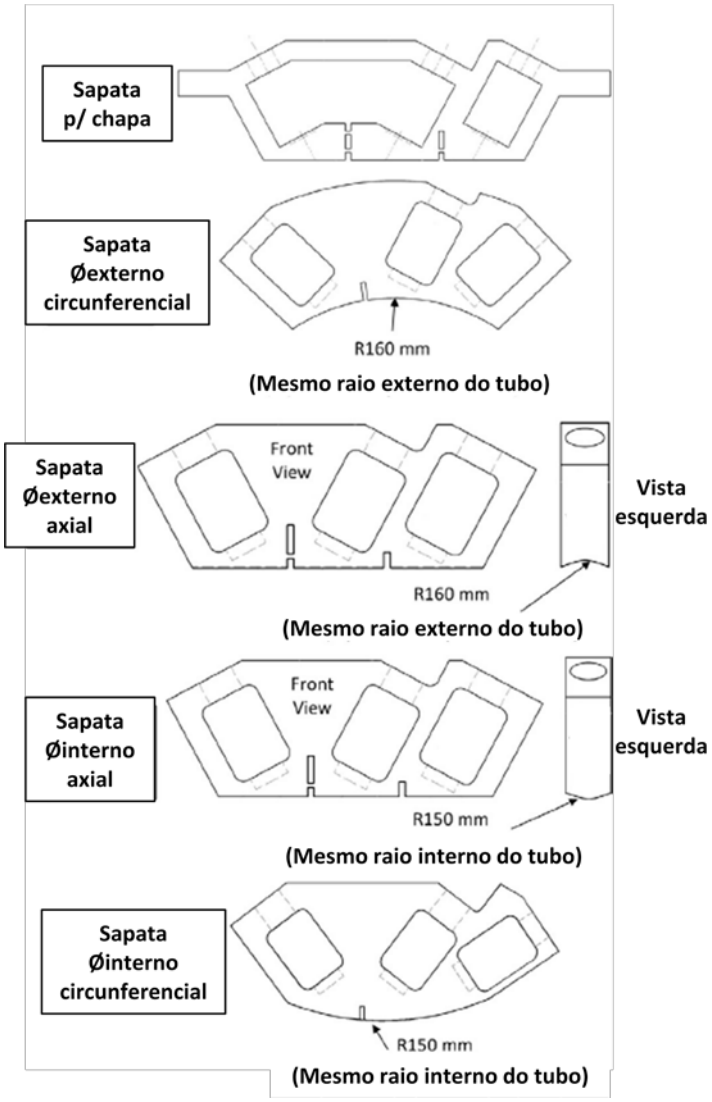


Figura II.32 – Projeto das sapatas (JAVADI, 2013).

O principal objetivo é a avaliação ultrassônica de tensões residuais circunferenciais e axiais através da espessura do tubo, e comparar com as tensões residuais obtidas pela análise EF.

Dos resultados obtidos, é possível afirmar que a tensão residual circunferencial nas superfícies interna e externa do tubo é de tração na linha central da solda, enquanto a tensão axial é diferente através da espessura do tubo. As diferenças entre tensões residuais circunferenciais e axiais encontradas nas técnicas EF e L_{CR} são aceitáveis, e essas diferenças aumentam com o aumento da frequência dos transdutores.

Tabela II.3 – Divergência entre os resultados EF e ultrassom (inspeção da superfície externa do tubo) (JAVADI, 2013).

			Frequência do transdutor			
			5 MHz	4 MHz	2 MHz	1 MHz
Máxima divergência entre os resultados EF e ultrassom	Tensão residual circunferencial (MPa)	MZ[21]	38,73	28,48	23,01	19,63
		ZTA[22]	39,47	30,01	24,10	17,60
		PM[23]	19,96	13,93	12,00	9,50
	Tensão residual axial (MPa)	MZ	39,87	28,70	23,34	17,67
		ZTA	36,72	29,34	24,18	11,79
		PM	19,77	14,72	11,60	9,53

O estudo mostra que a técnica com L_{CR} mede a tensão média para uma determinada profundidade de penetração dos transdutores, e, portanto, para uma medição de tensão em uma profundidade exata, a técnica com ultrassom não é recomendável. Devido à limitação de alguns milímetros de profundidade de penetração dos transdutores, é recomendável medir ambos os lados de materiais de grande espessura.

Os resultados mostram ainda que pequenas diferenças na medição da constante acustoelástica conduzem a grandes erros na avaliação de tensões do MZ e da ZTA. Importante destacar que as medições das tensões residuais axiais e circunferenciais realizadas pelas técnicas L_{CR} e EF, são consideradas aceitáveis quando comparadas, porém as diferenças aumentam com utilização de transdutores de alta frequência. Por fim, a técnica EFL_{CR} é capaz de avaliar tensões residuais de soldagem através da espessura do tubo de aço inoxidável.

II.5. A Técnica “Phased Array”

A tecnologia ultrassônica “Phased Array” migrou da área médica para a industrial no início dos anos 1980 e atingiu o reconhecimento no início dos anos 2000.

No início dos anos 1990, a técnica “Phased Array” foi incorporada como uma nova técnica de avaliação não destrutiva em manuais e outras literaturas sobre ultrassom. Nesse período a maioria das aplicações da técnica dava-se em vasos de pressão nuclear, forjamento de grandes eixos e componentes de turbina de baixa pressão (OLYMPUS, 2007).

[21] *Melted Zone*: região soldada.
[22] Zona Termicamente Afetada.
[23] *Parent material*: metal de base.

O avanço no desenvolvimento de materiais piezelétricos permitiu a fabricação de transdutores de geometrias complexas. Além disso, a microusinagem, microeletrônica, processamento de dados e programas computacionais, revolucionaram a técnica.

A aplicação do “Phased Array” em ensaios não destrutivos foi disseminada devido às características que atendem crescentes problemas de inspeção, como:

1. Necessidade de detectar trincas localizadas em diferentes profundidades e com diferentes orientações usando o mesmo transdutor numa posição fixa;
2. Aumentar a confiança das varreduras;
3. Melhorar a relação sinal/ruído e a capacidade de dimensionamento em soldas de metais dissimilares e em soldas de aço inoxidável fundidos por centrifugação;
4. Necessidade de inspecionar componentes de difícil acesso;
5. Diminuição do tempo de instalação e inspeção (produtividade);
6. Detectar e dimensionar pequenas trincas por corrosão em componentes de turbina com geometrias complexas;
7. Necessidade de diminuição de exposição de pessoas à radiação;
8. Aumentar a confiabilidade na detecção, dimensão, localização e orientação de defeitos críticos, independente de suas orientações;
9. Fornecer um relatório quantitativo e de fácil interpretação.

II.5.1. Princípio

A técnica “Phased Array” tem o mesmo princípio que outras aplicações que já utilizam a física de ondas, como radar, sonar e outros. De um ponto de vista prático, a técnica é meramente um método de gerar e receber ultrassom, uma vez que no material, o ultrassom é independente do método de geração, seja piezelétrico, eletromagnético, laser ou “Phased Array” (OLYMPUS, 2007).

O transdutor “Phased Array” é feito de diversos elementos de acordo com um arranjo espacial que é geralmente escolhido em função da aplicação final. Alguns exemplos são apresentados na Figura II.33: transdutor linear, em malha (matriz), e setorial.

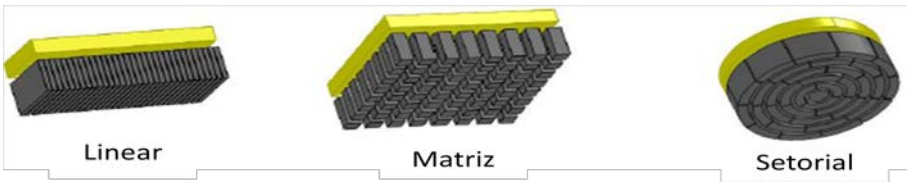


Figura II.33 – Exemplos de transdutores “Phased Array” (PICHARD, 2010).

Transdutores “Phased Array” do tipo imersão podem compensar uma geometria irregular. No entanto, em muitas aplicações, transdutores de contato são mais adequados, apesar da qualidade do contato entre transdutor e peça continuar a ser uma das principais limitações de técnicas de contato. Por isso são projetados transdutores adaptados a cada situação ou geometria (Figura II.34). Isso demonstra uma grande vantagem na compensação em tempo real de problemas geométricos.



Figura II.34 – Exemplos de transdutores adaptados para situações ou geometrias específicas: (a) transdutores flexíveis 3-D do fabricante MultiX (PICHARD, 2010); (b) diferentes tipos de transdutores do fabricante R/D Tech (OLYMPUS, 2007).

Cada elemento é ligado a um dispositivo eletrônico que controla o transdutor e que envia sinal elétrico para cada elemento. O sinal pode ser idêntico para todos os elementos e atrasado uma fração de alguns microssegundos. A aplicação destes atrasos individuais para todos os elementos é chamada de Lei de Atraso, e pode produzir determinados efeitos desejados, tais como direcionar ou focalizar o feixe. Esses efeitos são precisamente controlados por meio de software, tanto na emissão quanto na recepção do pulso de cada elemento do transdutor.

Dessa forma, é possível realizar inspeções com diferentes ângulos e comprimentos focais, utilizando o mesmo transdutor. O feixe focalizado é criado utilizando alguns dos muitos elementos contidos no transdutor, e é transmitido para os outros elementos para permitir uma varredura de alta velocidade do componente sem nenhum movimento do transdutor ao longo daquele eixo (PICHARD, 2010).

Se todos os elementos forem ativados ao mesmo tempo pelo dispositivo eletrônico, o transdutor se comportaria como transdutor convencional, com as mesmas propriedades de

feixe ultrassônico. Se a Lei de Atraso for aplicada, o feixe pode ser desviado do seu ângulo nominal ou focalizado, tal como indicado nas Figuras II.35 a 37.

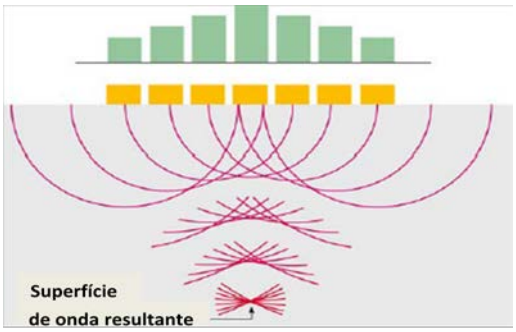


Figura II.35 – Tempo de atraso do tipo Parabólico, aplicado para cada elemento (histograma verde) (OLYMPUS, 2007).

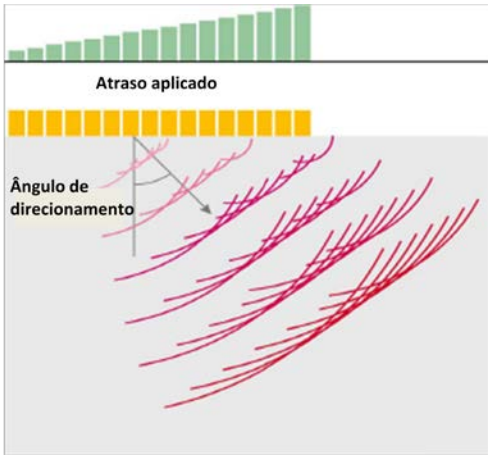


Figura II.36 – Tempo de atraso do tipo Inclinado, típico para ondas transversais. Atraso do tipo Parabólico também pode ser utilizado para focalização do feixe (OLYMPUS, 2007).

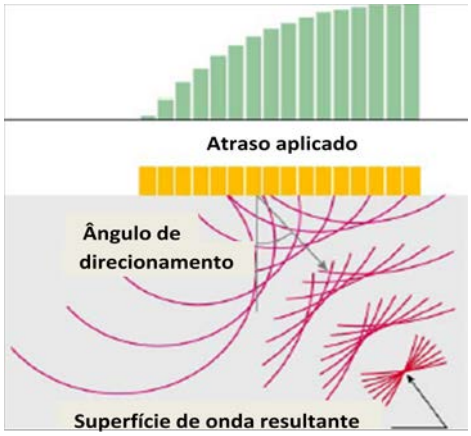


Figura II.37 – Geração de feixes nos estágios inicial, intermediário, final e focalizado. Empregado a combinação dos tipos Parabólico e Inclinado para angulação e focalização (OLYMPUS, 2007).

O tempo de atraso corresponde à diferença de tempo de propagação de cada elemento para o ponto de focagem, e é de fácil cálculo quando o transdutor e o ponto focal encontram-se no mesmo meio. Na maioria das configurações END por ultrassom, o transdutor está acoplado

a um meio que cerca o componente a ser focalizado. Se a superfície do componente é plana ou cilíndrica, os atrasos ainda não são muito difíceis de serem computados. Mas quando a geometria da superfície é complexa, é preciso uma ferramenta de simulação para calcular os atrasos. À medida que as estruturas complexas são analisadas, os atrasos precisam ser melhorados, a fim de compensar exageros, devido às variações geométricas ou propriedades do material, e isso é feito com modelos adequados baseados em algoritmos (OLYMPUS, 2007).

A Figura II.38 apresenta um exemplo de programa computacional que simula os atrasos para focalização de perfis irregulares complexos, bem como em materiais heterogêneos. Pode ser visto o efeito de uma geometria irregular, onde simulações de feixes ultrassônicos são apresentadas para um transdutor de imersão. A ocorrência dos atrasos está representada em azul. Na primeira linha da figura, o atraso não é calculado sobre a interface plana aplicada ao perfil irregular e material heterogêneo. Na segunda linha, aplicando a lei de atraso, os feixes são adaptados ao perfil irregular e material heterogêneo (PICHARD, 2010). As características do feixe são preservadas graças à lei de atraso, e conhecendo a geometria, bem como as características do material, permite que a inspeção seja realizada.

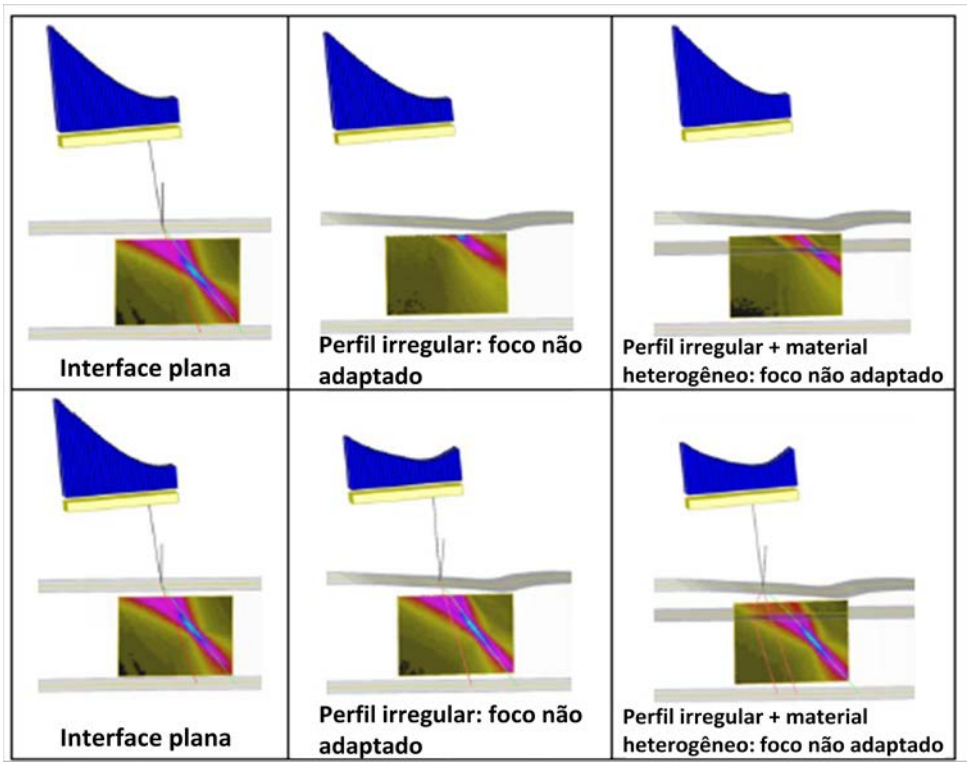


Figura II.38 – Exemplo de cálculo da lei de atraso feito pelo software de simulação CIVA, integrado ao sistema M2M (PICHARD, 2010).

A Figura II.39 mostra esquematicamente a geração de feixe ultrassônico “Phased Array”, e a Figura II.40 os principais componentes presentes em um sistema de inspeção “Phased Array”.

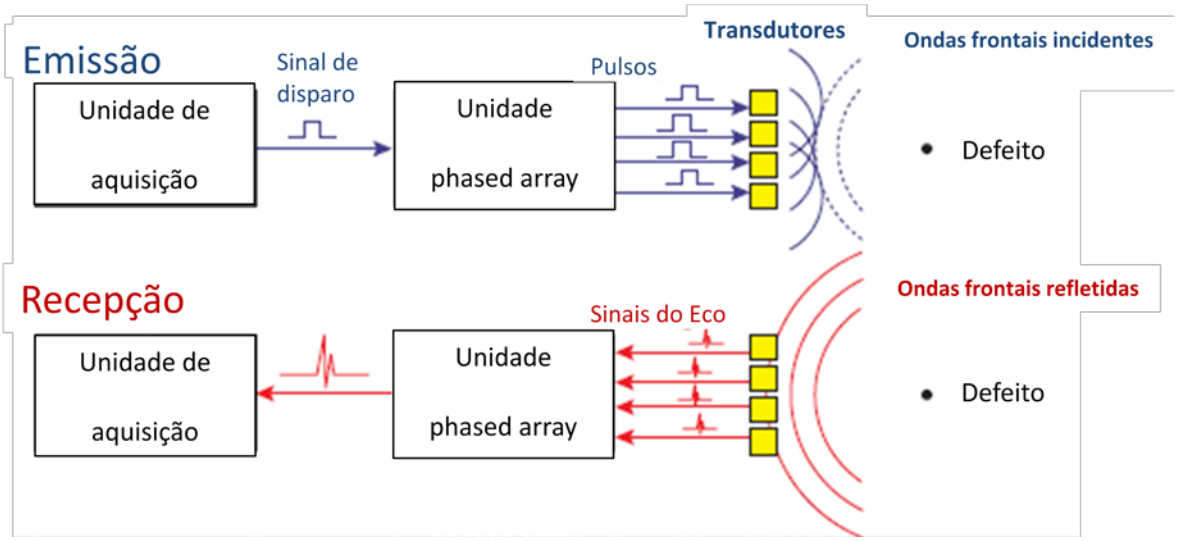


Figura II.39 – Geração de feixe ultrassônico "Phased Array" (OLYMPUS, 2007).

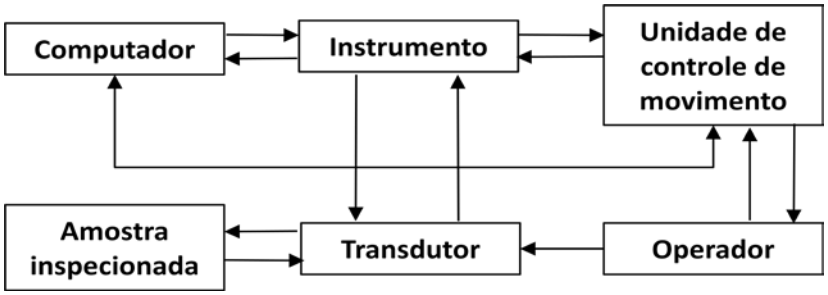


Figura II.40 – Componentes básicos do sistema "Phased Array" e sua interconectividade (OLYMPUS, 2007).

II.5.2. Vistas

Algumas das vistas ultrassônicas básicas do "Phased Array" são A-scan, B-scan, C-scan, D-scan e S-scan. São todas importantes vistas 2-D, com exceção da A-scan, que se trata de uma vista formada pela amplitude do pulso ultrassônico (eixo vertical) contra o tempo / caminho ultrassônico (eixo horizontal), ou forma da onda.

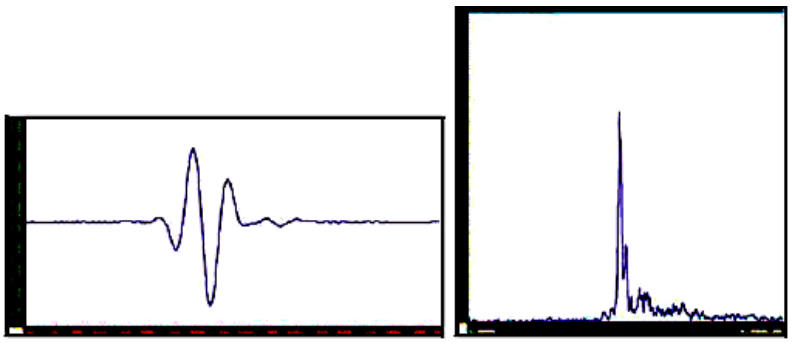


Figura II.41 – Representação A-scan: sinal de radiofrequência (esquerda); retificado (direita) (OLYMPUS, 2007).

Os dados de A-scan obtidos na varredura com o sistema “Phased Array” podem ser processados para mostrar imagens das vistas superior, lateral e frontal do volume do material inspecionado. As vistas mais importantes, similares às projeções 2-D de um desenho técnico, estão apresentadas na Figura II.42. A projeção dessas vistas é um plano ou um acumulado de planos provenientes do C-scan (topo), B-scan (lateral) e D-scan (final).

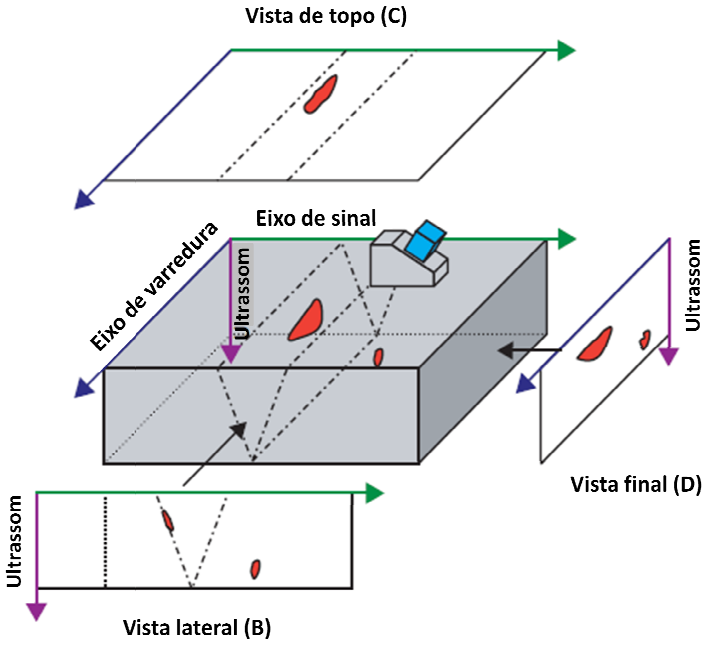


Figura II.42 – Vistas ultrassônicas (B-scan, C-scan e D-scan). O ângulo oblíquo do transdutor é 270°. Em rosa está indicado o eixo do ultrassom; em azul, o eixo de sinal mecânico; e em verde, o eixo de varredura eletrônica para uma varredura linear (OLYMPUS, 2007).

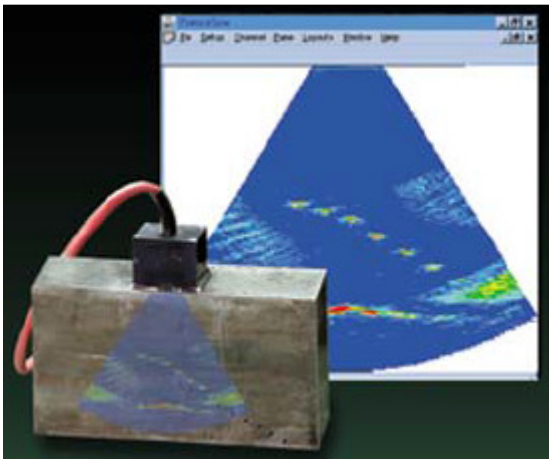
Na Figura II.42, a vista B-scan é composta no eixo horizontal pelo sinal e no eixo vertical pelo tempo / caminho ultrassônico, apresentando dados ultrassônicos salvos. A vista C-scan mostra o topo ou uma vista plana da amostra. Um eixo representa a varredura e o outro o sinal. No “Phased Array”, a vista C-scan tem a aquisição de dados de um dos eixos feito eletronicamente, enquanto o outro é feito mecanicamente. As vistas D-scan e B-scan são similares. D-scan é perpendicular à vista B-scan, e podem alternar de posição. É composta pela posição de varredura (eixo horizontal) e pelo tempo / caminho ultrassônico (eixo vertical). Se o ângulo oblíquo do transdutor for 0° (ou 180°), a vista lateral (B-scan) se tornará a vista final (D-scan), e vice-versa. B-scan é definido pela profundidade e eixos de movimento do transdutor. O D-scan é definido pela profundidade e eixo de varredura eletrônica.

As gerações e recebimentos eletrônicos dos sinais oferecem oportunidades para uma variedade de padrões de digitalização. Os sistemas “Phased Array” podem produzir varreduras setoriais (S-Scans), característica única desta tecnologia, sem nenhum movimento físico do transdutor (PICHARD, 2010).

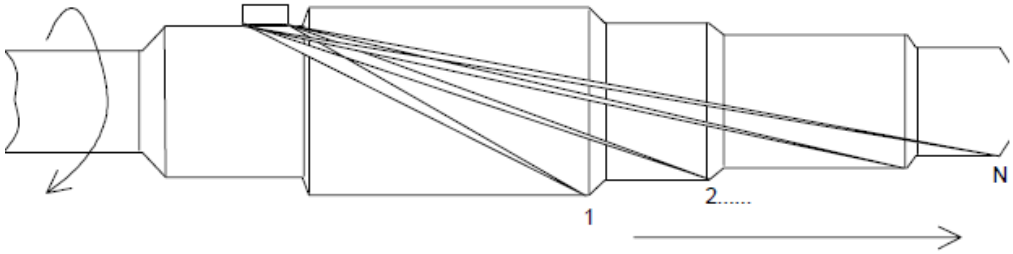
A apresentação dos dados na forma de imagens permite ao técnico END observar vários dados em uma única imagem. As imagens permitem posterior análise e

dimensionamento e, com auxílio de ferramentas computacionais (software), manipular, mesclar e filtrar os dados para aprimorar a avaliação.

No mapeamento setorial (S-scan), o feixe é desviado por uma faixa de ângulos, verificação simples para um programa computacional. A cada passo, um sinal é coletado e eles são reunidos de forma a obter uma imagem do componente. A Figura II.43 apresenta exemplos esquemáticos de mapeamento setorial em rotor de turbina. Dependendo principalmente da frequência das ondas e do espaçamento entre elementos, os ângulos de varredura podem variar entre 20° e 80°, aproximadamente (MOLES, 2005).



(a)



(b)

Figura II.43 – Exemplos de mapeamento setorial esquemático em rotor de turbina: (a) (MOLES, 2005) e (b) (MOLES, 2003).

A vista S-Scan representa uma visão 2-D de imagens em tempo real da vista lateral, geradas a partir de um local de inspeção, usando a mesma distância focal e elementos de outras varreduras. O eixo horizontal corresponde à distância projetada (largura da amostra) a partir do ponto de saída e o eixo vertical corresponde à profundidade. É amplamente utilizada quando o acesso na superfície de um componente é limitado, por exemplo, durante uma inspeção de solda (OLYMPUS, 2007).

A varredura eletrônica permite uma rápida cobertura do componente com um ponto focal estreito. Se a distribuição for plana e linear, o padrão de verificação é um B-scan simples. Se for curvo, o padrão de verificação será curvado. Varreduras lineares são fáceis de

programar. O “Phased Array” pode ser facilmente programado para inspecionar solda através de ondas transversais a 45° e 60° (concorrendo com as inspeções manuais convencionais) (MOLES, 2005).

A varredura eletrônica é muito utilizada na indústria para análise de grande superfície com uma rápida taxa de inspeção, a fim de aumentar a produtividade. Um grupo de elementos é ativado em um transdutor de grande porte (por exemplo, um grupo de 16 de um total de 128 elementos). Os 16 elementos são ativados eletronicamente ao longo do transdutor. Este deslocamento eletrônico pode ser extremamente rápido em comparação com um movimento mecânico. Para ilustrar este aspecto, um exemplo da velocidade de exploração é calculada com um transdutor de 128 elementos e 2 MHz. Os elementos são tipicamente de 1 mm x 15 mm. Para tirar a prova, é mapeada uma chapa de aço de 30 mm. Os 16 elementos ativos movem-se com passo de 8 elementos. A frequência de repetição do pulso do sistema leva em conta que a propagação ultrassônica deveria ser 22 kHz. Entre dois tiros, existe uma distância de 8 mm que proporciona uma velocidade de varredura eletrônica de 180 m/s, que é muito mais rápido do que um preciso movimento mecânico. Logo, é possível mapear grandes superfícies com mais rapidez e precisão comparado com técnicas convencionais (PICHARD, 2010).

Esta velocidade é usada no sistema de inspeção de tubulações na indústria do aço, quando toda a tubulação deve ser inspecionada. Estas técnicas permitem significativas melhoras na inspeção dos tubos, evitando o uso de transdutores rotativos.

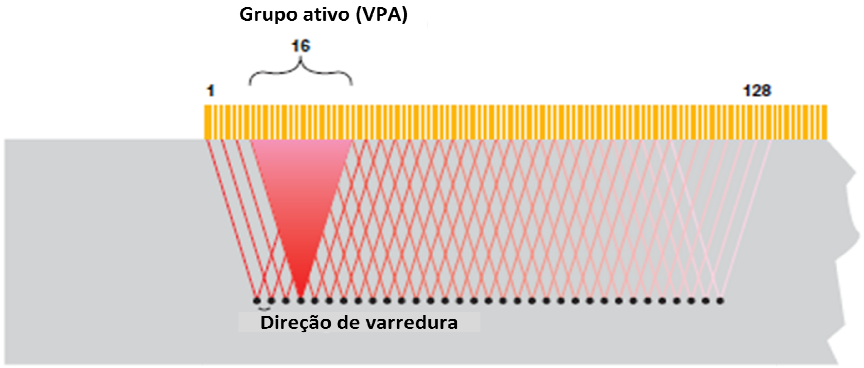


Figura II.44 – Esquema de varredura eletrônica (linear) (OLYMPUS, 2007).

Combinando varredura eletrônica e varredura setorial com focalização precisa conduz a uma combinação prática de imagens. Ângulos ideais podem ser selecionados para soldas e outros componentes, enquanto o mapeamento permite uma inspeção rápida e funcional. Esta teoria aproxima-se do caso de inspeções de solda, onde ângulos específicos são muitas vezes necessários para determinadas geometrias de solda. Nestas aplicações, ângulos específicos do feixe são programados para faces específicas da solda em locais específicos. Este é o princípio da zona discriminada (Figura II.45).

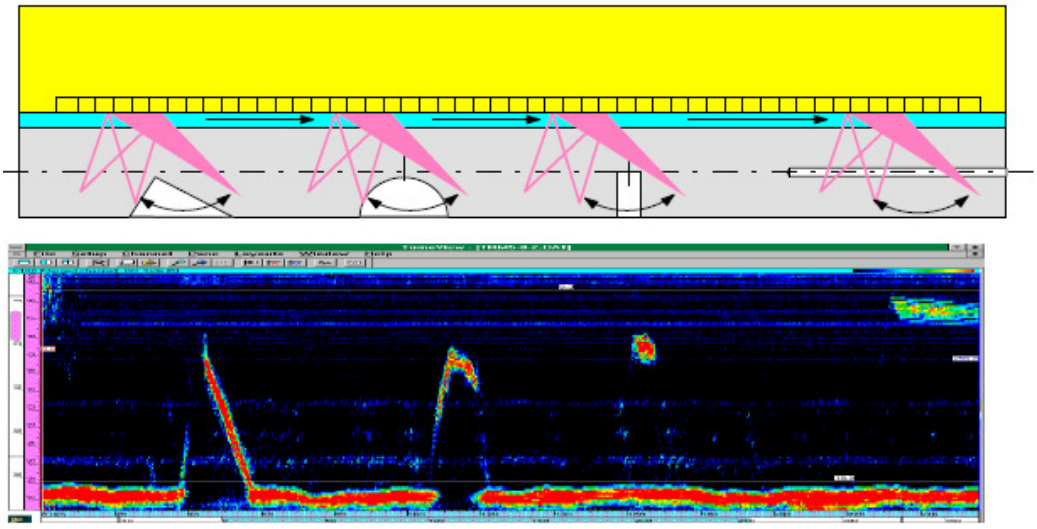


Figura II.45 – Vistas combinadas: varreduras eletrônica e setorial combinadas (superior) e imagem digitalizada contendo a união dos dados coletados (inferior) (MOLES, 2003).

Outra vista que pode ser formada pelos transdutores “Phased Array”, é proveniente da técnica TOFD[24]. Neste procedimento são utilizados dois transdutores no modo *pitch-and-catch* (Figura II.46). Na técnica TOFD sinais difratados das extremidades dos defeitos são detectados e salvos para dimensionamento. São utilizadas quatro tipos de ondas: lateral, reflexão de fundo, refletida e difratada (ondas longitudinais).

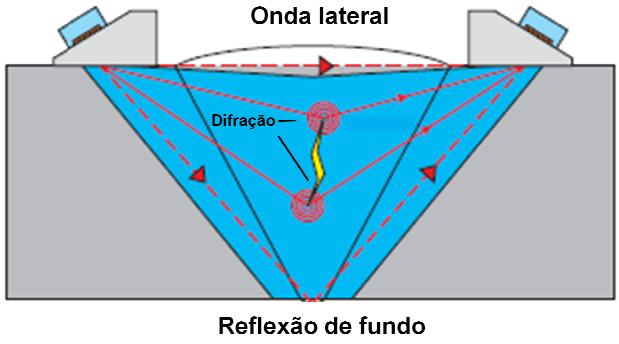


Figura II.46 – Princípio do TOFD (OLYMPUS, 2007).

A relação sinal/ruído é amplamente melhorada com técnicas de focalização e “Phased Array” é um bom exemplo disto. A habilidade de detecção e dimensionamento é limitado somente pela largura do feixe, que teoricamente pode ser menor que 1 mm, dependendo da frequência aplicada. Esta habilidade de focalização estreita do feixe numa determinada escala permite uma ótima resolução espacial dos sinais dos defeitos em comparação aos sistemas de imagens que utilizam transdutores de ultrassom convencionais. Apesar do procedimento de calibração ser complexo e demorado, uma vez realizado, permite atingir velocidades de

[24] Técnica automatizada que utiliza o princípio da difração para detectar e dimensionar altura, comprimento e profundidade de descontinuidades no material em estudo.

varredura acima de 100 milímetros por segundo. Dados de referência ultrassônica estão disponíveis nas Tabelas 2 e 3 do Anexo A.

Na próxima seção serão abordados alguns exemplos da aplicação da técnica “Phased Array” e suas vantagens, que combina a conversão eletrônica dos dados, mapeamento setorial e focalização dinâmica, além das citadas a seguir (OLYMPUS, 2007):

a) *Velocidade* – inspeções com varredura linear possuem tipicamente velocidade de maior magnitude que o mapeamento feito com transdutor convencional, contribuindo para um tempo de inspeção menor e para redução nos custos operacionais.
b) *Flexibilidade* – utilizando arquivos eletrônicos, um simples transdutor pode inspecionar diferentes componentes e padrões de inspeção.
c) *Inspeções complexas* – componentes com geometria complexa podem ter suas inspeções programadas com relativa facilidade, como também pode ser programada a realização de inspeções especiais, como inspeção em série, com vários ângulos, diferentes modos e discriminação de região a ser inspecionada.
d) *Tamanho do transdutor* – transdutores que assumem diferentes configurações e podem ser operados à distância permitem a substituição de vários transdutores convencionais por um único transdutor “Phased Array”, simplificando algumas inspeções.
e) *Confiabilidade do processo* – a pouca movimentação do conjunto durante inspeção (o transdutor não se movimenta), que conduz a menor exposição aos erros de operação, assim como a substituição parcial da mecânica pela eletrônica, diminuindo o desgaste dos componentes, contribuem de forma significativa para o aumento da confiabilidade do sistema.
f) *Foco do feixe* – a técnica possui este recurso sem a necessidade do emprego de vários transdutores.

II.5.3. Aplicações da Técnica “Phased Array”

É apresentado a seguir um resumo com diversos exemplos, em diferentes setores da indústria, de problemas e limitações identificados durante inspeções por ensaios não destrutivos. O emprego da técnica de inspeção por ultrassom “Phased Array” foi a solução nesses casos (OLYMPUS, 2007).

II.5.3.1. Aeroespacial (OLYMPUS, 2007)

Aplicação	Problemas e Limitações
Inspeção de Soldas por Fricção	• Falta de penetração; • Presença de mordedura, bolhas superficiais e porosidade; • Defeitos no pé do cordão.
Inspeção de Furos de Fixação	• Detectar trincas de 0,75mm na superfície de contato; • Grande variedade de espessuras e diâmetros dos furos; • Tempo de varredura inferior a 1 minuto por prendedor; • Segurar transdutor manualmente.
Inspeção de Trem de Pouso Utilizando “Phased Array” Manual	• Inspecionar componente possuindo diferentes dimensões; • Realizar inspeção em um único passe; • Aumentar a velocidade de inspeção e a confiabilidade.
Mapeamento de Corrosão em Fuselagem de Aeronave	• Inspecionar elementos protuberantes e superfícies curvas; • Desenvolver uma técnica de inspeção rápida e confiável.

II.5.3.2. Energia (OLYMPUS, 2007)

Aplicação	Problemas e Limitações
Inspeção de Soldas Dissimilares de Proteções de Caldeiras de Reatores Nucleares	• Grandes variações de atenuação e velocidade em material austenítico; • Distorção do feixe; • Microestrutura com elevado ruído; • Acesso limitado ao transdutor em função da geometria e configuração da solda; • Qualificação e respaldo do procedimento por entidade reguladora.
Inspeção de Alta Velocidade em Soldas Tubulares de Aço	• Detectar e dimensionar defeitos na parte interna da solda e na zona termicamente afetada (ZTA);

Inoxidável e Aço Carbono	• Reduzir tempo de instalação; • Reduzir tempo de mapeamento; • Reproduzir os dados adquiridos; • Operar em campo exposto a alta radiação.
Solda de Bocal do Vaso de Pressão do Reator Nuclear	• Inspeção confiável do raio interno do bocal e da solda; • Utilizar feixe ultrassônico para mapear 360° da circunferência, com geometria e espessura variadas; • Detectar e dimensionar defeitos planares com extensão vertical de 3 mm e comprimento maior que 20 mm; • Relatório, visualização e exibição de dados com fácil interpretação.
Trincas no Tubo de Alimentação do Reator CANDU®[25]	• Detectar e dimensionar trincas por fadiga no tubo de alimentação; • Acesso muito limitado; • Altura das trincas inferior a 1 mm; • Área de alta radiação.
Trincas de Corrosão Sob Tensão em Componentes da Turbina de Baixa Pressão	• Detectar pequenas trincas (altura entre 1 e 3 mm) de corrosão sob tensão em grandes percursos ultrassônicos (150 a 400 mm) nos diferentes estágios do rotor soldado; • Acesso limitado ao transdutor. • Complexa geometria e acesso limitado: um furo é utilizado como acesso ao componente. • Ajustar equipamento para variadas curvaturas e tamanhos de palhetas.

Um estudo de viabilidade da técnica para inspeção de palheta de turbina é mostrado por LAMARRE (1997). A estação nuclear de Darlington (DNGS) possui quatro unidades de reatores nucleares (CANDU) para a produção de energia elétrica. É recomendada uma parada de manutenção após 50.000 horas de operação, para inspeção das raízes e bases de palhetas dos primeiros estágios dos rotores. Esta operação pode levar a uma interrupção de 8 a 10 dias. A DNGS opera quatro unidades CANDU de 960 MW, com três rotores de baixa pressão (LP) por unidade e 126 palhetas no primeiro estágio (L_0) por rotor. Durante a parada de

[25] *Canadian Deuterium Uranium*. Trata-se de um reator nuclear para a produção de energia elétrica.

manutenção, dois rotores LP são abertos para END. Devido à complexidade da geometria da palheta, foi proposta a realização de um estudo de viabilidade utilizando “Phased Array”, onde os primeiros 75 milímetros das bordas de ataque e de fuga das palhetas foram inspecionados, utilizando os três métodos apresentados na Figura II.47.

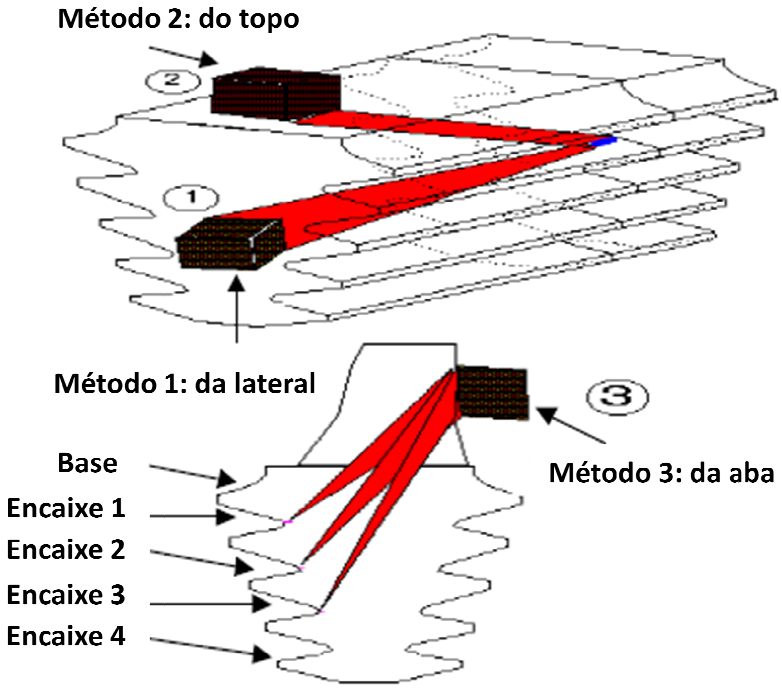


Figura II.47 – Métodos utilizados para estudo da viabilidade do “Phased Array” (LAMARRE, 1997).

Uma variedade de blocos de referência, de formas simples e complexas, foi fabricada, e entalhes foram usinados por descarga elétrica (EDM) nas bases e encaixes, para caracterização, e avaliações da detecção e dimensionamento do transdutor.

LAMARRE (1997) utilizou a engenharia reversa, pois a partir de um modelo retirado da palheta, foi desenvolvida imagem 3-D, e 2-D para posições específicas. Foram desenvolvidos ainda programas para aperfeiçoar o projeto de sapata e detecção de ângulos e confirmar valores de sinais de alvos específicos. Além do projeto e fabricação de dois protótipos de transdutores lineares.

Os dados foram analisados, e vistas (lateral, superior, vistas frontais e A-scans) associadas com as posições do transdutor foram exibidas e medidas.

A primeira parte do estudo de viabilidade para inspecionar os primeiros 75 mm da borda de ataque / fuga da palheta, usando transdutores lineares “Phased Array” provou ser um sucesso. Entalhes EDM da ordem de 3 x 1 mm puderam ser detectados e dimensionados com precisão inferior a 1 mm e com boa relação sinal-ruído. Os resultados de alta precisão deveram-se à simulação, precisão do sistema utilizado, projeto do transdutor e recursos de imagens empregados.

Diante do exposto, a 2ª parte do estudo de viabilidade pretende detectar e dimensionar em uma maior profundidade (75 a 200 mm) da borda de ataque / fuga.

II.5.3.3. Tubulação (OLYMPUS, 2007)

Aplicação	Problemas e Limitações
Padronização da Zona Discriminada em Dutos Tubulares	• Rapidez e confiabilidade na inspeção de fendas estreitas em soldas tubulares com zona discriminada por ultrassom; • Confiabilidade em detectar defeitos de pequenas porcentagens da espessura de parede; • Detectar defeitos que possuem orientação característica, especialmente próximos de falta de fusão vertical; • Dimensões da ordem de ± 1 mm; • Aprovar ou reprovar solda próximo do tempo real.
Soldas Circunferenciais entre Tubos Sem Costura na área offshore	• Espessura da parede pode variar até 12%; • Grandes variações de espessura prejudicarão seriamente aproximação de sistemas automatizados de ultrassom da zona discriminada; • Varredura convencional é muito lenta.
Sistemas de *Risers* e de Ancoragem	• Exigida inspeção de altíssima confiabilidade; • Paredes dos tubos são grossas, até 50 mm; • Ângulos ideias para inspeção variam de acordo com a localização na solda; • Probabilidade de detecção exigida é muito alta; • As incertezas das dimensões são muito elevadas; • Necessária alta velocidade de inspeção; • Necessário documentar toda a inspeção.
Tubulação de Pequeno Diâmetro	• Inspeção com um único ângulo não é suficiente para uma inspeção de solda com qualidade; • Restrições geométricas estão quase sempre presentes; • Um sistema de aceitação passa não passa é exigido; • Necessidade de sistema portátil e bom custo-benefício; • Necessidade de inspeção de alta velocidade.

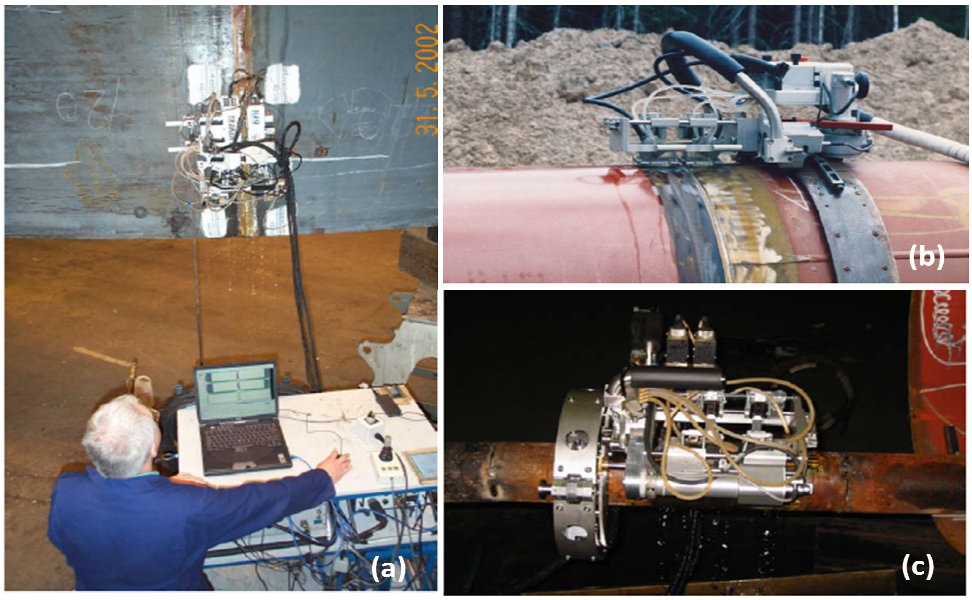


Figura II.48 – Exemplos de aplicações em tubulações: solda vertical (a) (MOLES, 2003); solda circunferencial (b); solda em tubos de pequenos diâmetros (c) (OLYMPUS, 2007).

II.5.3.4. Transporte Ferroviário (OLYMPUS, 2007)

Aplicação	Problemas e Limitações
Eixo (Com ou Sem Roda)	• Inspeção in loco com as rodas no eixo.
Trilho	• Detectar pequenas trincas orientadas em diferentes planos e localizações no corpo do trilho. • Desempenhar varredura em tempo real com velocidade de inspeção de 50 km/h; • Emissão de relatório e análise simples.
Roda	• Inspeção em regiões específicas da roda; • Necessária detecção próxima à superfície; • Inspeção de alta velocidade; • Preferência por solução de baixo custo; • Rodas novas ou corroídas; • Interface amigável com software.

II.5.3.5. Aplicações Diversas (OLYMPUS, 2007)

A aplicação da técnica “Phased Array” em Vasos de Pressão está prevista, de forma indireta, em certificações como o código ASME Seção V, muito utilizado em inspeção manual por ultrassom (MUT), e que também aborda a inspeção automatizada por ultrassom (AUT), caso do “Phased Array” (MOLES, 2003).

Inspeções do tipo AUT são permitidas em muitas inspeções de solda em vasos de pressão, oferecendo vantagens significativas sobre a radiografia: não há problemas de segurança, as inspeções são feitas logo após a soldagem, há melhor Probabilidade de Detecção, além da capacidade de dimensionar defeitos verticais para análise crítica de engenharia.

Esta técnica está sendo muito utilizada nas indústrias de geração de energia e petroquímica. Na primeira utiliza-se mapeamento TOFD alternado e na segunda TOFD linear. O TOFD alternado tem a vantagem de coletar mais dados e ser mais preciso, enquanto o linear é mais rápido. Uma desvantagem é a dificuldade de detectar defeitos próximos à superfície devido às zonas mortas. A imagem resultante é função das cristas superiores e inferiores dos sinais de defeitos, e são geradas em escala de cor cinza (ver Figura II.49) (OLYMPUS, 2007).

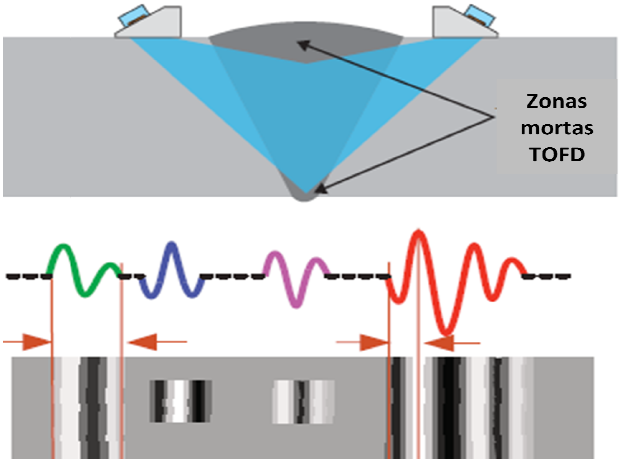


Figura II.49 – Zonas mortas da técnica TOFD (acima) e esquema de imagem gerada pela técnica TOFD (abaixo) (OLYMPUS, 2007).

“Phased Array” oferece excelente potencial para inspeções de solda em vasos de pressão: tanto TOFD como mapeamentos alternados previstos no ASME V podem ser realizados; a velocidade de inspeção são significativamente mais elevados que técnicas convencionais mecanizadas; não há subjetividade do operador; e as inspeções podem ser adaptadas. Os principais problemas são os custos iniciais dos equipamentos e disponibilidade de operadores treinados (OLYMPUS, 2007).

Existem outras inspeções por “Phased Array” possíveis de serem realizadas no campo. Porém, diante dos exemplos citados, é possível concluir que se trata de uma tecnologia amadurecida, e que soluções para diversos problemas já estão disponíveis.

II.6. Refração de Ondas com Incidência Oblíqua

Esta proposta teórica desenvolveu uma técnica ultrassônica de medição de tensões capaz de contornar algumas limitações existentes na área, como dificuldade em gerar determinado tipo de onda em particular, precisão em medir velocidade, tempo e distância, e conhecer parâmetros dependentes do material. Para ondas de incidência obliqua, e de acordo com a lei de Snell, a mudança da velocidade de propagação da onda ultrassônica devido à presença de um campo de tensões, em relação ao estado livre de tensões, resulta em um desvio do ângulo de refração, causando uma mudança do ponto de chegada do feixe ultrassônico (ORTEGA, 2001).

Considere o esquema apresentado na Figura II.50, onde a geração de ondas oblíquas no meio homogêneo B ocorre a partir de um meio A, cuja velocidade da onda longitudinal é C_A. Sejam os ângulos de incidência, α_1 e α_2 no plano $x_1 - x_3$, tais que no meio B se propaguem, correspondentemente, duas ondas nas direções $(sen\theta_1, 0, cos\theta_1)$ e $(sen\theta_2, 0, cos\theta_2)$, com velocidades de fase $C_B(\theta_1)$ e $C_B(\theta_2)$, respectivamente, sendo θ o ângulo entre a direção de propagação e a normal à superfície. Ambas as ondas são polarizadas no plano x_1-x_3 e podem ser quase transversais (Figura II.51) ou quase longitudinais. Para um material isotrópico, $C_B(\theta_1) = C_B(\theta_2) = C_B$. Caso o material seja anisotrópico, supõe-se que o plano x_1-x_3 seja um plano de simetria (LAMARRE, 1997).

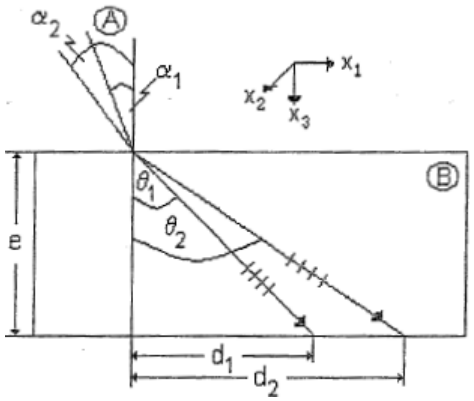


Figura II.50 – Geração de ondas oblíquas quase transversais no plano x_1-x_3. As linhas transversais indicam as direções de polarização (ORTEGA, 2001).

Da Figura II.50 é possível desenvolver as seguintes relações geométricas:

$$tg\theta_1 = \frac{d_1}{e} \therefore d_1 = e \cdot tg\theta_1 \qquad \textbf{(24)}$$

$$tg\theta_2 = \frac{d_2}{e} \therefore d_2 = e \cdot tg\theta_2 \quad \textbf{(25)}$$

É criado o parâmetro Δ que independe da espessura:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{etg\theta_2}{etg\theta_1} \therefore \Delta = \frac{d_2}{d_1} = \frac{tg\theta_2}{tg\theta_1} \quad \textbf{(26)}$$

Os valores de θ_1 e θ_2 são definidos a partir da lei de Snell:

$$\frac{sen\alpha_i}{sen\theta_i} = \frac{c_A}{c_B(\theta_i)} \quad \textbf{(27)}$$

$$\theta_i = arcsen\left[\left(\frac{sen\alpha_i}{c_A}\right)c_B(\theta_i)\right] \quad \textbf{(28)}$$

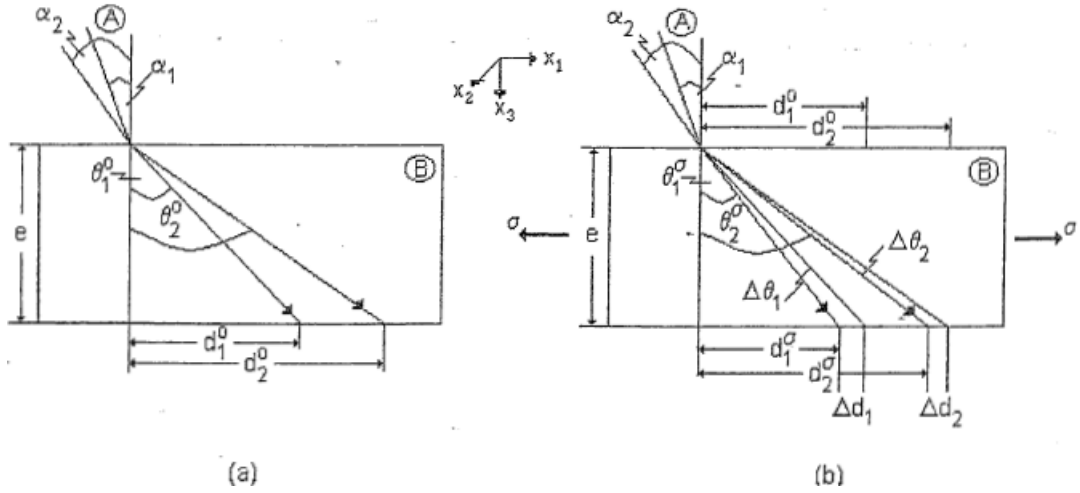


Figura II.51 – Ondas oblíquas no material: (a) sem tensão (referência) e (b) tensionado (ORTEGA, 2001).

No caso de um material de referência, ou seja, livre de tensões como na Figura II.51(a), para as velocidades das ondas $c_B^0(\theta_1^0)$ e $c_B^0(\theta_2^0)$ temos a partir de (27) e (28):

$$\frac{sen\alpha_1}{c_A} = \frac{sen\theta_1^0}{c_B^0(\theta_1^0)} \quad \textbf{(29)}$$

$$\theta_1^0 = arcsen\left[\left(\frac{sen\alpha_1}{c_A}\right)c_B^0(\theta_1^0)\right] \quad \textbf{(30)}$$

$$\frac{sen\alpha_2}{c_A} = \frac{sen\theta_2^0}{c_B^0(\theta_2^0)} \quad \textbf{(31)}$$

$$\theta_2^0 = arcsen\left[\left(\frac{sen\,\alpha_2}{c_A}\right)c_B^0\left(\theta_2^0\right)\right] \tag{32}$$

De (24) e (25),

$$d_1^0 = e \cdot tg\,\theta_1^0 \qquad e \qquad d_2^0 = e \cdot tg\,\theta_2^0 \tag{33}$$

Finalmente,

$$\Delta_0 = \frac{d_2^0}{d_1^0} = \frac{tg\,\theta_2^0}{tg\,\theta_1^0} \tag{34}$$

Onde Δ_0 é um parâmetro de referência do material estudado.

Em caso de submeter o material estudado a um campo de tensões elásticas de forma que os eixos principais coincidam com os eixos do sistema de referência. As velocidades das ondas são alteradas devido à presença das tensões, e, portanto, os ângulos de refração são também alterados. Logo:

$$\Delta_\sigma = \frac{tg\,\theta_2^\sigma}{tg\,\theta_1^\sigma} = \frac{d_2^\sigma}{d_1^\sigma} \tag{35}$$

$$= \frac{d_2^0 + \Delta d_2}{d_1^0 + \Delta d_1} = \frac{tg\left(\theta_2^0 + \Delta\theta_2\right)}{tg\left(\theta_1^0 + \Delta\theta_1\right)} \neq \frac{d_2^0}{d_1^0} \tag{36}$$

Na Figura II.51(b), o índice σ indica a presença de tensão, e conclui-se:

$$\Delta_\sigma \neq \Delta_0 \tag{37}$$

A técnica foi avaliada, analisando o parâmetro Δ_0 em função do ângulo de refração, modo de propagação, e variações de velocidade de propagação no meio de referência. O parâmetro Δ_σ foi avaliado em função do efeito da tensão sobre a velocidade da onda e sobre o ângulo de refração. Foram comparadas ondas transversais e longitudinais em diversos pares de ângulos (θ_1, θ_2), e analisado o efeito de mudanças nas constantes elásticas (ORTEGA, 2001).

O material considerado em estudo foi aço de trilho, densidade igual a 7700 kg/m^3 e as constantes de segunda e terceira ordem em GPa são (SCHNEIDER, 1990):

λ = 116; μ = 80; l = -248; m = -623; n = -714

Das relações $\rho c_T^2 = \mu$ e $\rho c_L^2 = \lambda + 2\mu$, as velocidades de propagação das ondas transversal, c_T, e longitudinal, c_L, são:

c_T = 3223,3 m/s $\qquad$ c_L = 5987 m/s

As constantes acustoelásticas são obtidas de relações entre velocidades e tensões, para ondas se propagando na direção i de um dos componentes de tensão principal (ORTEGA, 2011):

$$\frac{c_{ii} - c_L}{c_L} = K_{11}\sigma_i + K_{22}\left(\sigma_j + \sigma_k\right) \tag{38}$$

$$\frac{c_{ij} - c_T}{c_T} = K_{12}\sigma_i + K_{21}\sigma_j + K_{23}\sigma_k \tag{39}$$

$$\frac{c_{ik} - c_T}{c_T} = K_{12}\sigma_i + K_{23}\sigma_j + K_{21}\sigma_k \tag{40}$$

E,

$$K_{11} = \frac{A}{C} \qquad K_{22} = \frac{B}{C} \qquad K_{12} = \frac{D}{K} \qquad K_{21} = \frac{E}{K} \qquad K_{23} = \frac{F}{K} \tag{41}$$

Onde A, B, C, D, E, F e K são combinações das constantes elásticas do material:

$$\begin{aligned}
A &= 2(\lambda+\mu)(4m+5\lambda+10\mu+2l) - 2\lambda(2l+\lambda) \\
B &= 2(2l+\lambda)(\lambda+\mu) - \lambda(2l+\lambda) - \lambda(4m+5\lambda+10\mu+2l) \\
C &= 4\mu(\lambda+2\mu)(3\lambda+2\mu) \\
D &= 2(\lambda+\mu)(m+\lambda+4\mu) - \lambda\left(2\lambda+2m+2\mu-\frac{1}{2}n\right) \\
E &= 2(\lambda+\mu)(m+\lambda+2\mu) - \lambda\left(2\lambda+2m+4\mu-\frac{1}{2}n\right) \\
F &= 2(\lambda+\mu)\left(m+\lambda-\frac{1}{2}n\right) - \lambda(2\lambda+2m+6\mu) \\
K &= 4\mu^2(3\lambda+2\mu)
\end{aligned} \tag{42}$$

Logo, as constantes acustoelásticas valem, em GPa:

K_{11} = -0,01208[26] K_{12} = -0,0012 K_{21} = -0,00745 K_{22} = 0,00182 K_{23} = 0,000242

Para o cálculo da variação das constantes acustoelásticas com o ângulo de refração, devem ser usadas as equações das ondas quase transversal e quase longitudinal, respectivamente a seguir (ORTEGA, 2001):

$$\frac{(K_{x_1})^2}{(K_{12})^2}+\frac{(K_{x_2})^2}{(K_{21})^2}=1 \qquad \frac{(K_{x_1})^2}{(K_{11})^2}+\frac{(K_{x_2})^2}{(K_{22})^2}=1 \qquad \textbf{(43)}$$

Onde θ é medido a partir de x_3, então temos $K_{x_3}=K^{\theta}\cos\theta$ e $K_{x_1}=K^{\theta}sen\theta$ (ver Figura II.52).

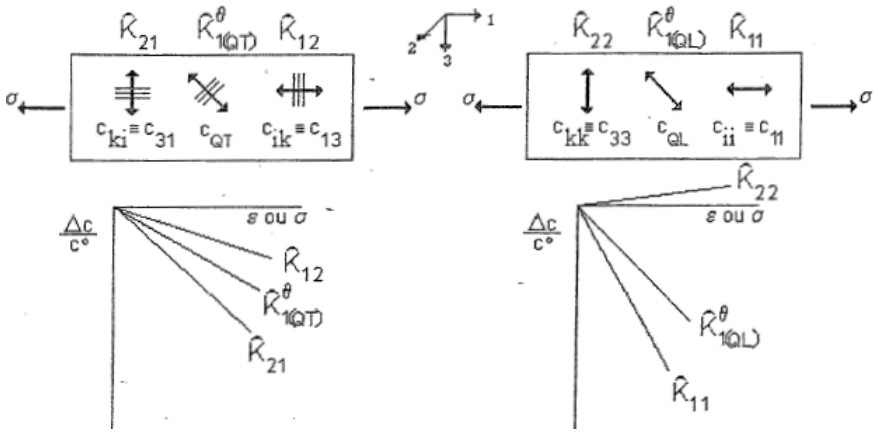


Figura II.52 – Direção de propagação e polarização das ondas longitudinais, transversais, quase longitudinais e quase transversais em relação à direção da tensão uniaxial, e as constantes acustoelásticas correspondentes (ORTEGA, 2001).

Substituindo as relações anteriores em (43) e lembrando que $cos2\theta = cos^2\theta - sen^2\theta$, temos para onda quase transversal:

$$\frac{(K_{x_3})^2}{(K_{21})^2}+\frac{(K_{x_1})^2}{(K_{12})^2}=1$$

De onde:

$$K^{\theta}_{1(QT)}=1/2\left[K_{12}+K_{21}+(K_{21}-K_{12})\cos 2\theta^0\right] \qquad \textbf{(44)}$$

[26] A referência bibliográfica [19] informa o valor -0,01782 para K_{11}. Porém, de posse dos dados para cálculo de K_{11}, obteve-se o valor -0,01208. Devido à diferença, o autor da referência foi consultado, que por sua vez, refez o cálculo e também encontrou o valor de -0,01208, concluindo que o valor inicial estava incorreto. Desta forma, demais cálculos que envolvam K_{11}, possuem alterações em relação à referência utilizada.

Analogamente, para onda quase longitudinal:

$$\frac{(K_{x_3})^2}{(K_{22})^2}+\frac{(K_{x_1})^2}{(K_{11})^2}=1$$

$$K^{\theta}_{1(QL)}=1/2\left[K_{11}+K_{22}+(K_{22}-K_{11})\cos 2\theta^0\right] \quad \textbf{(45)}$$

A variação das constantes com o ângulo de refração é apresentada na Figura II.53.

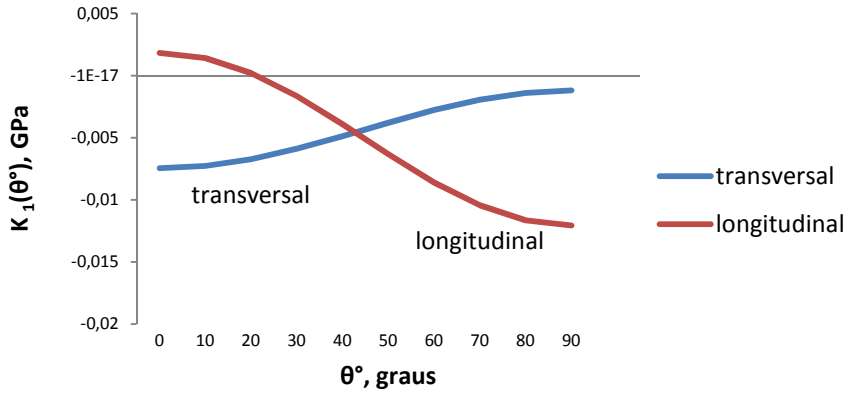
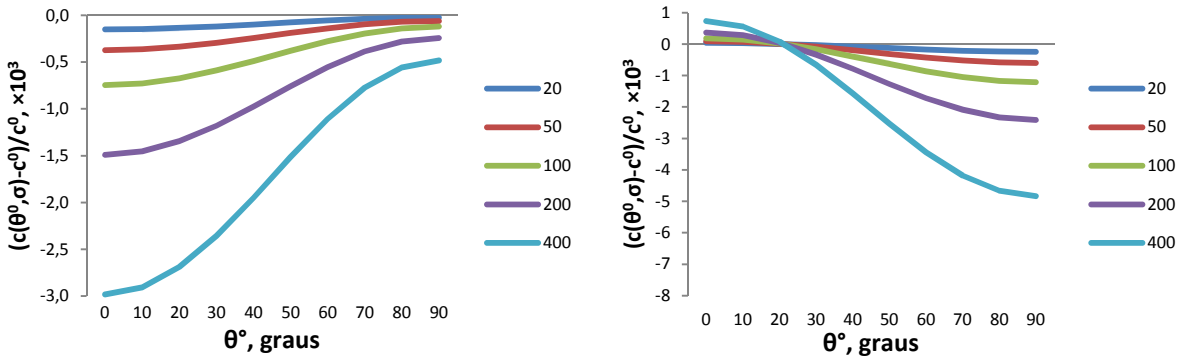


Figura II.53 – Constantes acustoelásticas em função do ângulo de refração θ^0 para o aço de trilho (ORTEGA, 2001).

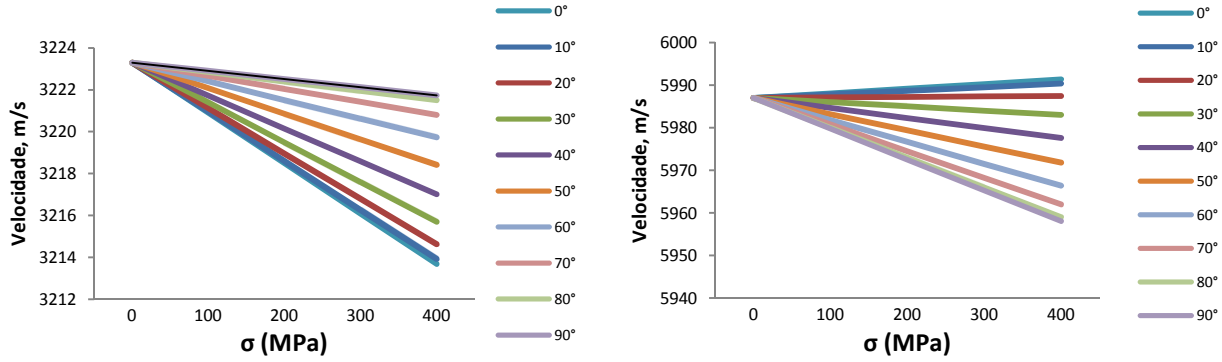
Pode ser notado na Figura II.54, que o efeito da tensão uniaxial na velocidade de propagação é maior quanto maior essa tensão, e a partir da interseção das curvas na Figura II.53, a alteração é maior nas ondas longitudinais. Outra observação é que o efeito ocorre com maior intensidade nos ângulos intermediários.



(a) **(b)**

Figura II.54 – Variação relativa de velocidade em função do ângulo de refração para diferentes níveis de tensão (MPa); (a) onda transversal, (b) onda longitudinal (ORTEGA, 2001).

Por outro lado, analisando individualmente os ângulos, a variação da velocidade com a tensão é linear (Figura II.55). Outros aspectos são: leve aumento da velocidade da onda longitudinal até 20° seguido de diminuição; e que com o aumento do ângulo, enquanto a variação da velocidade da onda transversal diminui, na onda longitudinal, a variação aumenta.



(a) **(b)**

Figura II.55 – Velocidade em função da tensão para dez ângulos de refração: (a) transversal, (b) longitudinal (ORTEGA, 2001).

O valor do parâmetro Δ depende do par de ângulos considerado, de forma que para analisar seu comportamento diante da tensão, devem ser considerados alguns pares de ângulos. Nas Tabelas II.8 e 9, para ondas transversal e longitudinal, respectivamente, é mostrado o valor de Δ_0 e a comparação com Δ_σ de 400 MPa. Para todo par de ângulos de refração, a diferença $\Delta_{400} - \Delta_0$ aumenta com o aumento da tensão. O valor do parâmetro Δ_σ foi calculado a partir do desenvolvimento das equações (30) e (32), e após substituições de relações trigonométricas temos:

$$tg\,\theta_1^\sigma = \frac{\left(1 + K_1^{\theta_1}\sigma_1\right) sen\,\theta_1^0}{\left\{1 - \left[\left(1 + K_1^{\theta_1}\sigma_1\right) sen\,\theta_1^0\right]^2\right\}^{1/2}} \qquad \textbf{(46)}$$

$$tg\,\theta_2^\sigma = \frac{\left(1 + K_1^{\theta_2}\sigma_1\right) sen\,\theta_2^0}{\left\{1 - \left[\left(1 + K_1^{\theta_2}\sigma_1\right) sen\,\theta_2^0\right]^2\right\}^{1/2}} \qquad \textbf{(47)}$$

Consideremos agora a metodologia do experimento a ser apresentada no Capítulo III. Para aplicação da técnica Refração de Ondas com Incidência Oblíqua no cálculo da tensão, será utilizada a forma das Equações (46) e (47). Será mostrado que, dependendo do tipo de inspeção a ser realizado pela técnica "Phased Array", o ângulo de refração no estado de repouso (θ^0) pode ser definido antes do ensaio e, o ângulo de refração na presença de um campo de tensões (θ^σ), será calculado.

Finalmente, substituindo na Equação (35), chega à forma apresentada a seguir (ORTEGA, 2001):

$$\Delta_\sigma = \frac{tg\,\theta_2^\sigma}{tg\,\theta_1^\sigma} = \frac{\left(1+K_1^{\theta_2}\sigma_1\right)sen\,\theta_2^0\left\{1-\left[\left(1+K_1^{\theta_1}\sigma_1\right)sen\,\theta_1^0\right]^2\right\}^{1/2}}{\left(1+K_1^{\theta_1}\sigma_1\right)sen\,\theta_1^0\left\{1-\left[\left(1+K_1^{\theta_2}\sigma_1\right)sen\,\theta_2^0\right]^2\right\}^{1/2}} \quad \textbf{(48)}$$

No caso do parâmetro Δ_0, deve ser considerado $\sigma_1 = 0$.

Tabela II.4 – Parâmetro Δ_σ no aço de trilho em função da tensão uniaxial σ_1e os ângulos de refração para a onda transversal (ORTEGA, 2001).

θ_2^0	θ_1^0	$\theta_2^0 - \theta_1^0$	σ_1(MPa) 0	20	100	400	$[\Delta_{400} - \Delta_0]/\Delta_0$
(graus)		(graus)	Δ_0	Δ_σ	Δ_σ	Δ_σ	(%)
10	5	5	2,015427	2,015425	2,015421	2,015404	-0,0011
20	5	15	4,160199	4,160186	4,160137	4,159954	-0,0059
30	5	25	6,599144	6,599092	6,598886	6,598130	-0,0154
40	5	35	9,590953	9,590792	9,590152	9,587792	-0,0330
50	5	45	13,621806	13,621343	13,619498	13,612674	-0,0670
60	5	55	19,797431	19,796006	19,790323	19,769259	-0,1423
70	5	65	31,403811	31,398114	31,375401	31,291266	-0,3584
80	5	75	64,823048	64,772946	64,573983	63,847855	-1,5044
20	10	10	2,064178	2,064173	2,064153	2,064079	-0,0048
30	10	20	3,274316	3,274292	3,274198	3,273849	-0,0143
40	10	30	4,758770	4,758693	4,758387	4,757255	-0,0319
50	10	40	6,758770	6,758545	6,757644	6,754314	-0,0659
60	10	50	9,822948	9,822247	9,819449	9,809078	-0,1412
70	10	60	15,581719	15,578901	15,567666	15,526048	-0,3573
80	10	70	32,163437	32,138596	32,039948	31,679922	-1,5033
30	20	10	1,586257	1,586249	1,586219	1,586106	-0,0095
40	20	20	2,305407	2,305376	2,305249	2,304783	-0,0271
50	20	30	3,274316	3,274215	3,273810	3,272313	-0,0612
60	20	40	4,758770	4,758442	4,757133	4,752278	-0,1364
70	20	50	7,548632	7,547285	7,541916	7,522021	-0,3525
80	20	60	15,581719	15,569722	15,522082	15,348210	-1,4986
40	30	10	1,453363	1,453350	1,453299	1,453108	-0,0176
50	30	20	2,064178	2,064124	2,063909	2,063111	-0,0517
60	30	30	3,000000	2,999808	2,999040	2,996191	-0,1270
70	30	40	4,758770	4,757944	4,754651	4,742445	-0,3431
80	30	50	9,822948	9,815433	9,785588	9,676660	-1,4893
50	40	10	1,420277	1,420252	1,420155	1,419792	-0,0341
60	40	20	2,064178	2,064064	2,063609	2,061920	-0,1094
70	40	30	3,274316	3,273777	3,271627	3,263657	-0,3255
80	40	40	6,758770	6,753660	6,733364	6,659287	-1,4719
60	50	10	1,453363	1,453308	1,453088	1,452269	-0,0753
70	50	20	2,305407	2,305067	2,303712	2,298686	-0,2915
80	50	30	4,758770	4,755254	4,741289	4,690324	-1,4383
70	60	10	1,586257	1,586083	1,585391	1,582824	-0,2164
80	60	20	3,274316	3,272021	3,262907	3,229653	-1,3640

Tabela II.5 – Parâmetro Δ_σ no aço de trilho em função da tensão uniaxial σ_1e os ângulos de refração para a onda longitudinal (ORTEGA, 2001).

θ_2^0	θ_1^0	$\theta_2^0 - \theta_1^0$	σ_1(MPa) 0	20	100	400	$[\Delta_{400} - \Delta_0]/\Delta_0$
(graus)		(graus)	Δ_0	Δ_σ	Δ_σ	Δ_σ	(%)
10	5	5	2,015427	2,015415	2,015370	2,015198	-0,0113
20	5	15	4,160199	4,160073	4,159571	4,157691	-0,0603
30	5	25	6,599144	6,598624	6,596547	6,588764	-0,1573
40	5	35	9,590953	9,589339	9,582885	9,558731	-0,3360
50	5	45	13,621806	13,617157	13,598585	13,529306	-0,6791
60	5	55	19,797431	19,783125	19,726119	19,515424	-1,4245
70	5	65	31,403811	31,346711	31,120967	30,310348	-3,4819
80	5	75	64,823048	64,324866	62,437384	56,561252	-12,7452
20	10	10	2,064178	2,064127	2,063925	2,063167	-0,0490
30	10	20	3,274316	3,274077	3,273120	3,269536	-0,1460
40	10	30	4,758770	4,757997	4,754902	4,743320	-0,3247
50	10	40	6,758770	6,756502	6,747440	6,713635	-0,6678
60	10	50	9,822948	9,815905	9,787842	9,684120	-1,4133
70	10	60	15,581719	15,553475	15,441817	15,040875	-3,4710
80	10	70	32,163437	31,916434	30,980613	28,067336	-12,7353
30	20	10	1,586257	1,586180	1,585872	1,584717	-0,0971
40	20	20	2,305407	2,305089	2,303816	2,299048	-0,2758
50	20	30	3,274316	3,273297	3,269227	3,254044	-0,6191
60	20	40	4,758770	4,755475	4,742344	4,693814	-1,3650
70	20	50	7,548632	7,535134	7,481773	7,290189	-3,4237
80	20	60	15,581719	15,462436	15,010533	13,604007	-12,6925
40	30	10	1,453363	1,453233	1,452712	1,450762	-0,1790
50	30	20	2,064178	2,063636	2,061470	2,053391	-0,5226
60	30	30	3,000000	2,998068	2,990370	2,961925	-1,2692
70	30	40	4,758770	4,750492	4,717766	4,600308	-3,3299
80	30	50	9,822948	9,748224	9,465161	8,584501	-12,6077
50	40	10	1,420277	1,420031	1,419049	1,415387	-0,3443
60	40	20	2,064178	2,063033	2,058474	2,041633	-1,0922
70	40	30	3,274316	3,268913	3,247557	3,170959	-3,1566
80	40	40	6,758770	6,707956	6,515510	5,917234	-12,4510
60	50	10	1,453363	1,452809	1,450601	1,000000	-0,7505
70	50	20	2,305407	2,302001	2,288545	1,553148	-2,8221
80	50	30	4,758770	4,723810	4,591462	2,898285	-12,1486
70	60	10	1,586257	1,584518	1,577653	1,553148	-2,0872
80	60	20	3,274316	3,251502	3,165214	2,898285	-11,4843

Os dados das Tabelas II.4 e 5 mostram valores do parâmetro Δ_σ, e não permitem visualizar quais valores são mensuráveis. Por isso, as Tabelas II.6 e 7 mostram valores da distância d entre os pontos de chegada dos feixes ultrassônicos. Quando a onda se propaga num meio sem tensão, a distância para o ponto de chegada da onda é resultado da multiplicação da espessura pela tangente do ângulo de refração ($tg\theta^0$). Em meio tensionado, a tangente do ângulo ($tg\theta^\sigma$) é a mesma utilizada na Equação (48). Dentre os valores de d apresentados a seguir, foram marcados em cor cinza, os valores iguais ou superiores a 0,001 mm, assumindo como limite de leitura de um micrômetro comercial. Para ondas transversais,

quanto maior a espessura, menor o ângulo que poderá ser utilizado, e que a sensibilidade da onda transversal é superior até cerca de 30°. Apesar da maior sensibilidade da onda transversal em pequenos ângulos, deve ser lembrado que sua potência com esses ângulos é muito pequena, podendo dificultar ou impedir sua utilização. Ou seja, para onda transversal e espessura de 10 mm, uma resolução de 20 MPa seria medido com ângulo mínimo de 40°.

Tabela II.6 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço trilho em função da tensão uniaxial, σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda transversal (ORTEGA, 2001).

Espessura	θ_2^0	σ_1 (MPa)					
		0	20	50	100	200	400
(mm)	(graus)	d (mm)	$d(\sigma) - d(0)$				
10	5	0,874887	-0,00013	-0,00033	-0,00065	-0,00131	-0,00261
	10	1,763270	-0,00026	-0,00066	-0,00132	-0,00264	-0,00528
	20	3,639702	-0,00055	-0,00139	-0,00277	-0,00554	-0,01108
	30	5,773503	-0,00091	-0,00227	-0,00453	-0,00906	-0,01812
	40	8,390996	-0,00139	-0,00348	-0,00696	-0,01392	-0,02780
	50	11,917536	-0,00218	-0,00546	-0,01091	-0,02180	-0,04354
	60	17,320508	-0,00383	-0,00958	-0,01914	-0,03823	-0,07628
	70	27,474774	-0,00908	-0,02270	-0,04534	-0,09048	-0,18018
	80	56,712818	-0,05229	-0,13047	-0,26006	-0,51669	-1,01992
20	5	1,749773	-0,00026	-0,00065	-0,00131	-0,00261	-0,00522
	10	3,526540	-0,00053	-0,00132	-0,00264	-0,00528	-0,01057
	20	7,279405	-0,00111	-0,00277	-0,00554	-0,01108	-0,02216
	30	11,547005	-0,00181	-0,00453	-0,00907	-0,01813	-0,03624
	40	16,781993	-0,00279	-0,00696	-0,01392	-0,02783	-0,05561
	50	23,835072	-0,00437	-0,01092	-0,02182	-0,04361	-0,08708
	60	34,641016	-0,00766	-0,01915	-0,03828	-0,07646	-0,15255
	70	54,949548	-0,01817	-0,04539	-0,09068	-0,18097	-0,36037
	80	113,425636	-0,10458	-0,26093	-0,52013	-1,03338	-2,03985
30	5	4,374433	-0,00065	-0,00163	-0,00326	-0,00653	-0,01306
	10	8,816349	-0,00132	-0,00330	-0,00660	-0,01321	-0,02641
	20	18,198512	-0,00277	-0,00693	-0,01385	-0,02770	-0,05539
	30	28,867513	-0,00453	-0,01134	-0,02267	-0,04532	-0,09059
	40	41,954982	-0,00696	-0,01741	-0,03481	-0,06958	-0,13902
	50	59,587680	-0,01092	-0,02729	-0,05456	-0,10902	-0,21770
	60	86,602540	-0,01916	-0,04788	-0,09570	-0,19116	-0,38138
	70	137,373871	-0,04542	-0,11348	-0,22670	-0,45242	-0,90091
	80	283,564091	-0,26146	-0,65233	-1,30032	-2,58345	-5,09962
40	5	8,748866	-0,00131	-0,00326	-0,00653	-0,01306	-0,02612
	10	17,632698	-0,00264	-0,00660	-0,01321	-0,02642	-0,05283
	20	36,397023	-0,00554	-0,01385	-0,02771	-0,05540	-0,11078
	30	57,735027	-0,00907	-0,02267	-0,04534	-0,09065	-0,18118
	40	83,909963	-0,01393	-0,03482	-0,06962	-0,13916	-0,27804
	50	119,175359	-0,02184	-0,05458	-0,10911	-0,21805	-0,43540
	60	173,205081	-0,03832	-0,09576	-0,19140	-0,38232	-0,76276
	70	274,747742	-0,09084	-0,22695	-0,45341	-0,90484	-1,80183
	80	567,128182	-0,52292	-1,30467	-2,60064	-5,16690	-10,19924

Tabela II.7 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço de trilho em função da tensão uniaxial, σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda longitudinal (ORTEGA, 2001).

Espessura	θ_2^0	σ_1 (MPa)					
		0	20	50	100	200	400
(mm)	(graus)	d (mm)	$d(\sigma) - d(0)$				
10	5	0,874887	0,000030	0,000076	0,000151	0,000302	0,000604
	10	1,763270	0,000051	0,000127	0,000255	0,000509	0,001019
	20	3,639702	0,000016	0,000040	0,000080	0,000159	0,000319
	30	5,773503	-0,000255	-0,000637	-0,001275	-0,002549	-0,005098
	40	8,390996	-0,001122	-0,002806	-0,005610	-0,011215	-0,022412
	50	11,91754	-0,003656	-0,009136	-0,018261	-0,036472	-0,072748
	60	17,32051	-0,011919	-0,029762	-0,059409	-0,118363	-0,234927
	70	27,47477	-0,049008	-0,122089	-0,242753	-0,479917	-0,938334
	80	56,71282	-0,433909	-1,067038	-2,077750	-3,948898	-7,193945
20	5	1,749773	0,000060	0,000151	0,000302	0,000604	0,001209
	10	3,526540	0,000102	0,000255	0,000509	0,001019	0,002037
	20	7,279405	0,000032	0,000080	0,000159	0,000319	0,000638
	30	11,54701	-0,000510	-0,001275	-0,002550	-0,005099	-0,010196
	40	16,78199	-0,002245	-0,005611	-0,011220	-0,022431	-0,044825
	50	23,83507	-0,007312	-0,018273	-0,036521	-0,072944	-0,145497
	60	34,64102	-0,023837	-0,059524	-0,118819	-0,236726	-0,469855
	70	54,94955	-0,098017	-0,244178	-0,485506	-0,959834	-1,876667
	80	113,4256	-0,867818	-2,134077	-4,155499	-7,897796	-14,387889
30	5	4,374433	0,000151	0,000378	0,000756	0,001511	0,003022
	10	8,816349	0,000255	0,000637	0,001273	0,002546	0,005093
	20	18,19851	0,000080	0,000199	0,000398	0,000797	0,001594
	30	28,86751	-0,001275	-0,003187	-0,006374	-0,012747	-0,025490
	40	41,95498	-0,005612	-0,014028	-0,028050	-0,056077	-0,112061
	50	59,58768	-0,018280	-0,045682	-0,091303	-0,182360	-0,363742
	60	86,60254	-0,059593	-0,148810	-0,297047	-0,591815	-1,174637
	70	137,3739	-0,245042	-0,610445	-1,213764	-2,399584	-4,691668
	80	283,5641	-2,169544	-5,335192	-10,388748	-19,744490	-35,969723
40	5	8,748866	0,000302	0,000756	0,001511	0,003022	0,006045
	10	17,63270	0,000509	0,001273	0,002546	0,005093	0,010186
	20	36,39702	0,000159	0,000398	0,000797	0,001594	0,003188
	30	57,73503	-0,002550	-0,006374	-0,012748	-0,025495	-0,050981
	40	83,90996	-0,011224	-0,028056	-0,056100	-0,112154	-0,224123
	50	119,1754	-0,036561	-0,091364	-0,182605	-0,364719	-0,727483
	60	173,2051	-0,119186	-0,297620	-0,594093	-1,183629	-2,349274
	70	274,7477	-0,490085	-1,220890	-2,427528	-4,799168	-9,383335
	80	567,1282	-4,339088	-10,670383	-20,777496	-39,488979	-71,939447

Por definição, a tensão é determinada pelo parâmetro Δ quando comparado a Δ_0. Uma vez que Δ_0 depende da variação de velocidade no meio de refração, logo outras mudanças no material em estudo podem conduzir a resultados errados. Isso demonstra a importância do material de referência ser representativo do material em estudo, principalmente com o grau e direção de deformação plástica, que efetivamente influenciam as constantes de segunda ordem ($\boldsymbol{\lambda}$ e μ).

A principal vantagem da técnica é permitir a medição de valores de tensão sem necessitar medir a espessura nem velocidade da onda, mas apenas as distâncias entre os pontos de incidência e saída, com precisão micrométrica. A maior dificuldade para aplicação prática da técnica apresentada está na localização precisa dos pontos de incidência e de saída dos feixes ultrassônicos, relacionado com o posicionamento do transdutor.

III. Materiais e Métodos

III.1.Materiais

III.1.1. Corpos-de-Prova

Foram avaliados três CPs, fabricados a partir de uma vara de 2m de comprimento de uma barra laminada em aço carbono AISI 1020, com seção quadrada de 25,4mm de aresta, 457,2mm de comprimento e, centralizado na largura e comprimento, um furo passante que servirá como espalhador (refletor) conforme a seguir:

- CP-01: Furo com diâmetro de 1,6mm;
- CP-02: Furo com diâmetro de 2,2mm;
- CP-03: Furo com diâmetro de 3,2mm.

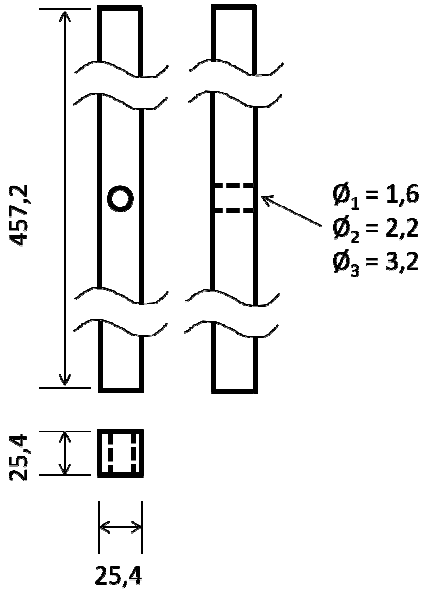


Figura III.1 – Desenho para CP-01, CP-02 e CP-03. Dimensões em milímetros.

A geometria dos CPs foi definida em função da área necessária para fixação do conjunto transdutor/sapata, e o furo serve de referência para analisar uma mesma região antes do carregamento (livre de tensão) e após carregamento (presença de um campo de tensões).

III.1.2. Equipamento

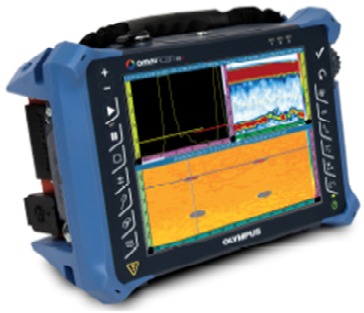


Figura III.2 – RD/Tech Ominiscan MX2. Módulo "Phased Array" 16/128 (OLYMPUS, 2007).

III.1.3. Programa Computacional (Software)

O software de análise de dados utilizado para processamento e análise dos dados coletados pelo sistema "Phased Array" foi o TomoView 2.9, do fabricante Olympus NDT Inc.

III.1.4. Transdutor

Tipo: 5L64-A12
Fabricante: Olympus NDT
Frequência: 5MHz
Tipo de arranjo dos elementos: Linear 1D
Número de elementos: 64

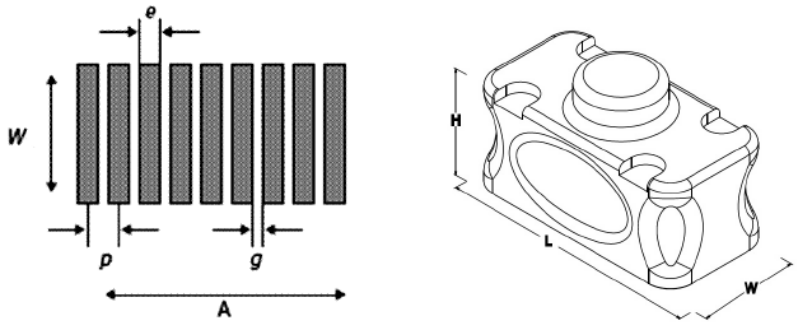


Figura III.3 – Dimensões internas (a) e externas (b) do cabeçote (OLYMPUS, 2007).

Da parte interna:

A – abertura ativa no plano de direcionamento: 38,4mm;
W – abertura passiva, não possui nenhuma capacidade de direcionamento: 23,0mm;
p – distância entre os centros de dois elementos adjacentes "*pitch*": 0,6mm;
g – distância entre dois elementos adjacentes "*gap*". Um valor praticado é $e < \lambda/2$, onde λ é o comprimento de onda;
e – altura do elemento.

Da parte externa:

L – comprimento externo: 45,0mm;
H – altura externa: 20,0mm;
W – largura externa: 23,0mm.

III.1.5. Sapata

Tipo: SA12-N55S IHC
Ângulo Natural no Aço Carbono: 55° (onda transversal)
Faixa de angulação: 30° a 70°
Velocidade sônica: 2.330m/s

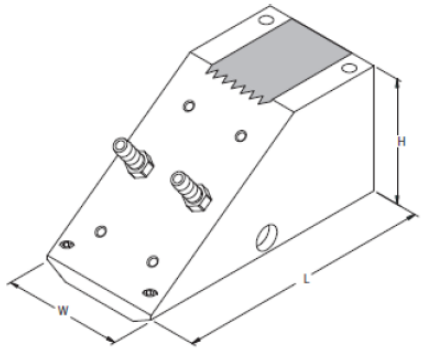


Figura III.4 – Dimensões da sapata (OLYMPUS, 2007).

Onde:

L – comprimento: 73,0mm;
H – altura: 23,0mm;
W – largura: 45,0mm.



Figura III.5 – Conjunto com transdutor e sapata montado.

Em inspeções com ultrassom, é necessário o emprego de um meio condutor (acoplante) das ondas ultrassônicas de modo a eliminar qualquer interferência que possa existir entre as superfícies do transdutor e da peça a ser inspecionada. Neste trabalho, foi utilizado metil celulose como acoplante.

III.1.6. Bloco para Calibração

Foi utilizado o Bloco Padrão V1, cujo raio de 100mm serviu para as calibrações de velocidade, sensibilidade e compensação dos diferentes percursos sônicos – *wedge delay*. A sensibilidade foi calibrada em 80% da altura da tela, para o furo de cada CP.

Material do Bloco Padrão: Aço carbono. É necessário ser do mesmo material dos CPs.



Figura III.6 – Bloco Padrão V1.

III.2. Métodos

III.2.1. Aplicação de Carga

Para a aplicação de carga sobre os corpos-de-prova foi utilizada uma máquina de ensaios de tração universal da marca INSTRON, modelo 5966, com capacidade de carga de

250kN[27]. Para o material dos corpos-de-prova, adotou-se módulo de elasticidade, E, e tensão de escoamento, σ_y, iguais a 207 GPa e 210 MPa, respectivamente[28] (CALLISTER, 2008).

Considerou-se o efeito da concentração de tensões na região do furo (SHIGLEY, 2005):

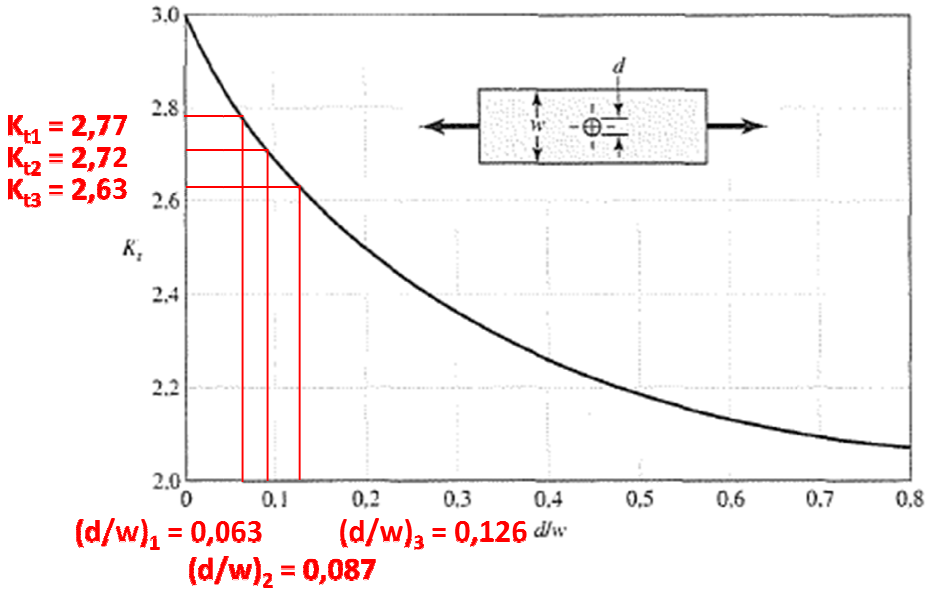


Figura III.7 – Diagrama de fator teórico de concentração de tensão k_t, para barra em tração simples com furo transversal (SHIGLEY, 2005). Os índices 1, 2 e 3 correspondem aos CPs 01, 02 e 03, respectivamente, d ao diâmetro do furo, e w à largura da barra.

$$k_t = \frac{\sigma_y}{\sigma_t} \tag{49}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \tag{50}$$

Onde:

k_t – concentração de tensão;

σ_t – tensão corrigida por k_t;

F – carga aplicada;

A – área da seção transversal em tração.

[27] O limite de carregamento do equipamento de ensaio de tração, para as garras montadas, é de 200kN.

[28] Por razões de disponibilidade de tempo para realização de toda parte experimental deste estudo, foram utilizados valores teóricos da citada referência bibliográfica. Porém, para aprimorar os resultados do experimento, deve-se realizar um ensaio de tração no material de origem, e obter valores práticos para módulo de elasticidade e tensão de escoamento.

Substituindo (49) em (50), temos:

$$F = \frac{\sigma_y}{k_t} \cdot A \qquad \textbf{(51)}$$

Da Equação (51) são obtidos os valores das cargas em kN para o limite de escoamento das regiões dos CPs com e sem furo, apresentados na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Valores das cargas no regime elástico para as regiões dos CPs com e sem furo.

CP	Região sem furo		Região com furo				
	σ_y (MPa)	F (kN)	k_t	σ_t (MPa)	A [29](mm^2)	F (kN)	Ø (mm)
01	210	135,48	2,78	75,5	604,52	45,83	1,6
02			2,71	77,5	589,28	45,50	2,2
03			2,63	79,8	563,88	45,02	3,2

Diante dos valores encontrados para as cargas, a partir do repouso (sem carga) foram adotadas os seguintes valores de carregamentos para os ensaios de tração, em kN: 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 185, 190 e 200. Desta forma, o comportamento dos CPs foram analisados nos regimes elástico – de 0 a 40 kN para região com furo e de o a 125 kN para região sem furo – e plástico.

A Figura III.8 ilustra a infraestrutura utilizada para realização dos ensaios. Foram utilizadas as dependências do LAMAT - Laboratório de Materiais do CEFET-RJ, com emprego da máquina de ensaios de tração, juntamente com equipamento de ultrassom, este pertencente ao LINUS - Laboratório de Instrumentação e Ultrassom do CEFET-RJ.



Figura III.8 – Equipamento de ensaio de tração do Laboratório de Materiais do CEFET-RJ. No detalhe, valores da carga aplicada, do deslocamento da ponte do equipamento e da deformação.

[29] A área da seção transversal em tração é $(W-d)\cdot t$, onde t é a espessura, neste caso igual a 25,4mm.

A Figura III.9 mostra detalhes de fixação do conjunto transdutor/sapata e do extensômetro no corpo-de-prova durante as inspeções. O objetivo é buscar o melhor posicionamento para inspeção da região do furo. Por este motivo, o centro do extensômetro está alinhado com o eixo longitudinal do furo, e é definido uma distância entre o conjunto transdutor/sapata e o furo, chamado de distância projetada ou “stand-off”. Tal informação faz parte da calibração do equipamento antes de iniciar as inspeções. Como o conjunto transdutor/sapata permanece imóvel durante as inspeções, qualquer variação percebida nos valores dos parâmetros ultrassônicos deve-se à aplicação dos carregamentos (presença de tensões).



Figura III.9 – Exemplo de fixação do conjunto transdutor/sapata e do extensômetro, para inspeção “Phased Array” do corpo-de-prova durante carregamento de tração.

III.2.2. Planos de inspeção

O equipamento utilizado para inspeção “Phased Array” permite a realização de dezenas de planos de inspeção de forma simultânea, cujos tipos são: varredura setorial, varredura linear e TOFD, sendo que neste último os transdutores utilizados não são do tipo multielementos, e, portanto, este plano de inspeção não foi considerado nos ensaios experimentais. Vale destacar que na inspeção “Phased Array”, para um dado transdutor, há sapatas específicas a serem utilizadas, ou seja, não é qualquer modelo de sapata que atende o transdutor escolhido.

A varredura setorial consiste num feixe de ondas ultrassônicas emitidas do mesmo ponto, percorrendo uma faixa de ângulos de refração pré-determinada. Para o modelo de sapata adotado, cuja faixa de ângulo de refração é de 30° a 70°, foi definido o intervalo de 45° a 70°, atendendo as especificações da sapata e garantindo que a região do furo a ser inspecionada encontrava-se nesse intervalo.

No início do ensaio, com o corpo-de-prova no estado de repouso (livre de tensões), o ângulo da onda ultrassônica com maior sinal de amplitude será considerado o ângulo de refração θ^0. Quando o ângulo de refração variar em função do carregamento uniaxial em

tração, será considerado o ângulo de refração θ^{σ}. Neste plano de inspeção, os ângulos citados são fornecidos diretamente pela técnica, dispensando cálculos.

Na varredura linear, um feixe de ondas ultrassônicas é emitido por um grupo de elementos ativos do transdutor (VPA). Por exemplo, um transdutor composto de 64 elementos, ativa o grupo dos primeiros 8 elementos: VPA1 → L1 ao L8. Na sequência temos o VPA2 → L2 ao L9, o VPA3 → L3 ao L10, e sucessivamente até o VPA57 → L57 ao L64. Nesse plano de inspeção, são definidos os ângulos de refração θ^{0}, constantes ao longo de toda a varredura. Portanto, para novos valores de θ^{0}, são necessários novas varreduras lineares. Foram adotadas três varreduras lineares, com θ^{0} igual a 45°, 50° e 55°, atendendo as especificações da sapata (30° a 70°). Quando o VPA variar em função do carregamento uniaxial em tração, serão realizados cálculos para obtenção do valor do ângulo de refração θ^{σ}.

Diante do exposto, no presente estudo foram selecionados quatro planos de inspeção, sendo uma varredura setorial e três varreduras lineares. Foram utilizadas ondas transversais na varredura setorial e ondas longitudinais nas varreduras lineares. Com isso pretende-se obter dados suficientes para a devida análise de tensões na região do furo, permitindo comparações com os tipos de varredura e tipos de onda utilizados.

O ensaio é realizado de forma estática, no qual o corpo-de-prova é submetido a uma sequência de carregamentos previamente definidos (ver Seção III.2.1). O primeiro "carregamento" é o próprio estado de repouso (estado de referência). O segundo tem início no repouso e termina com carga de 10 kN, o terceiro de 10 kN a 20 kN, e sucessivamente para as cargas pré-definidas até o limite do equipamento para ensaio de tração de 200 kN, ou o limite de escoamento do material, como ocorreu com o CP-01 (ver Seção IV.1).

O equipamento "Phased Array" registra, simultaneamente, os dados do ensaio de cada carregamento para os quatro planos de inspeção, resultando num total de 40 "gravações", dos quais o CP-01 gerou 12, e os CP-02 e CP-03 geraram 14 cada:

- CP-01 – 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 165 e 170 (ver Seção IV.1);
- CP-02 – 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 185, 190 e 200;
- CP-03 – 0, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175 e 185, 190 e 200.

Esses dados podem ser armazenados em um cartão de memória, permitindo que qualquer computador com o programa computacional Tomoview instalado, possa analisar os dados dos ensaios. A seguir, resumo dos planos de inspeção adotados:

1) Tipo de varredura: Setorial com sapata angular
   Número de elementos: 16
   Resolução: 1°
   Faixa de ângulos de refração: 45° a 70° (L1 ao L26)
   Distância focal: 12,0mm
   Distância projetada ("*stand-off*"): 32,0mm
   Tipo de onda: transversal
   Velocidade da onda: 3.240,0m/s

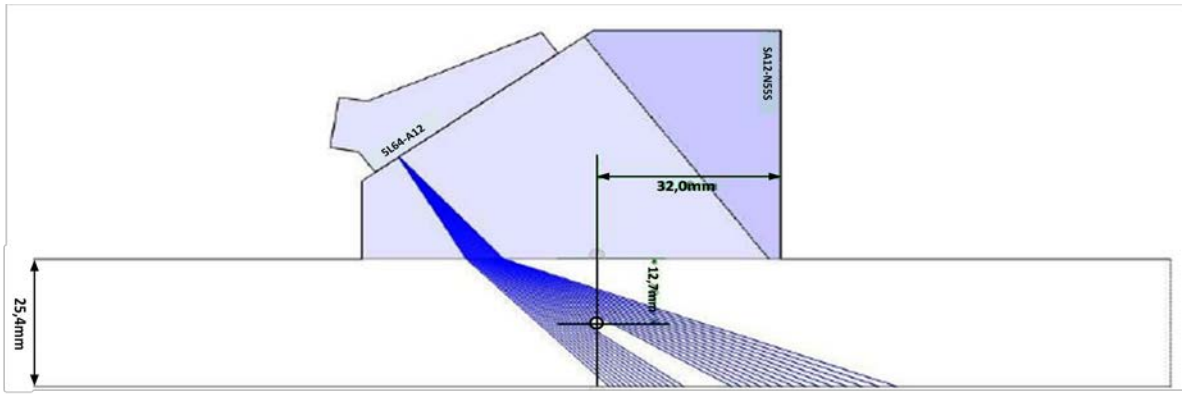


Figura III.10 – Desenho esquemático da varredura tipo setorial de 45 a 70°.[30]

2) Tipo de varredura: Linear com sapata angular
   Número de elementos: 16
   Resolução: 1°
   Ângulo de refração, θ^0: 45°
   Distância focal: 12,0mm
   Distância projetada ("*stand-off*"): 32,0mm
   Tipo de onda: longitudinal
   Velocidade da onda: 5.920,0m/s

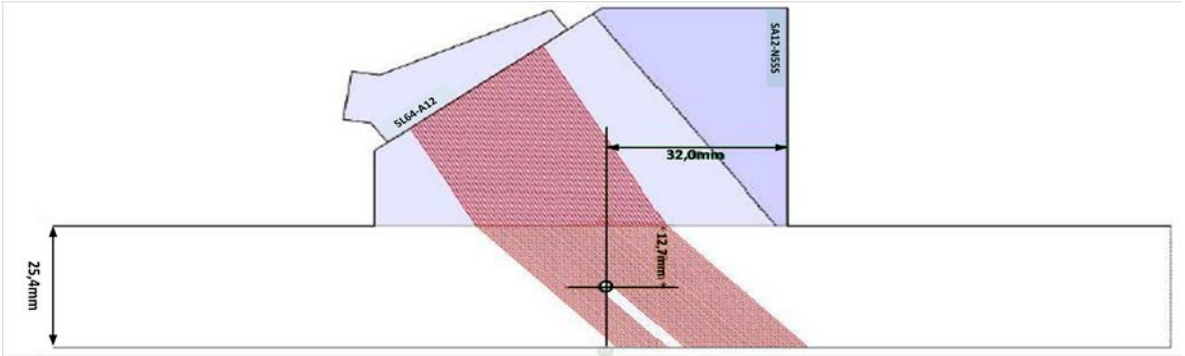


Figura III.11 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 45°.

[30] As Figuras III.10 a III.13 foram obtidas de um software de simulação chamado ESBeamTool.

3) Tipo de varredura: Linear com sapata angular
   Número de elementos: 16
   Resolução: 1°
   Ângulo de refração, θ^0: 50°
   Distância focal: 12,0mm
   Distância projetada ("*stand-off*"): 32,0mm
   Tipo de onda: longitudinal
   Velocidade da onda: 5.920,0m/s

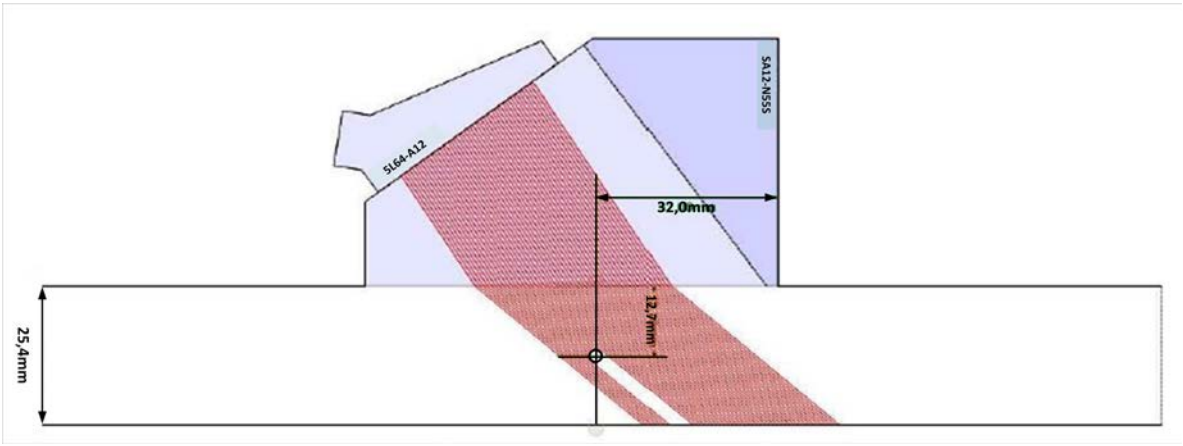


Figura III.12 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 50°.

4) Tipo de varredura: Linear com sapata angular
   Número de elementos: 16
   Resolução: 1°
   Ângulo de refração, θ^0: 55°
   Distância focal: 12,0mm
   Distância projetada ("*stand-off*"): 32,0mm
   Tipo de onda: longitudinal
   Velocidade da onda: 5.920,0m/s

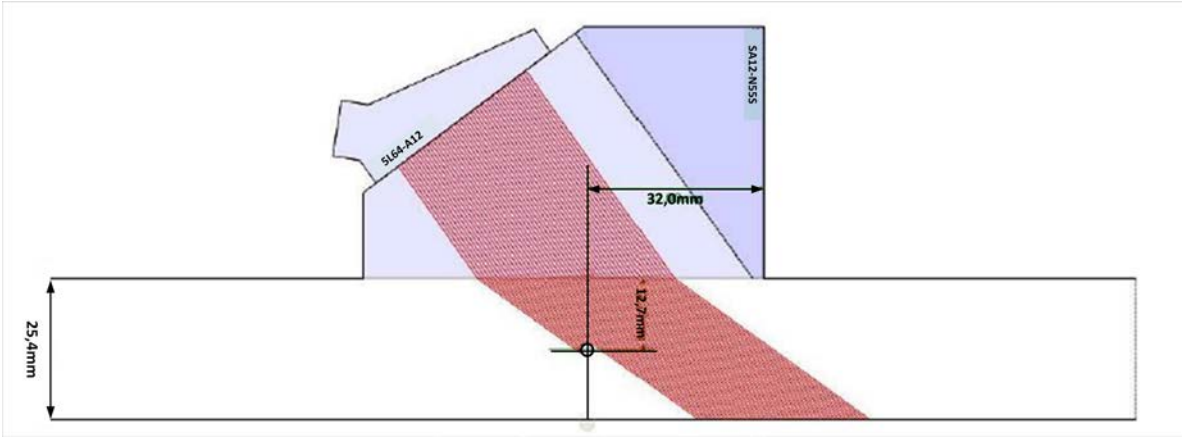


Figura III.13 – Desenho esquemático da varredura tipo linear a 55°.

III.2.2.1. Parâmetros de Interesse no “Phased Array”

A Figura III.14 apresenta um exemplo da tela do software Tomoview, cujos pontos de interesse estão destacados em diferentes cores, e reunidos na Tabela III.2.



Figura III.14 – Demonstração de parâmetros utilizados na análise de dados com o *Tomoview*.

Tabela III.2 – Parâmetros utilizados na análise de dados com o Tomoview.

Cor	Parâmetro	Significado
Laranja	Amplitude	Utilizada como referência de localização do furo.
Verde	Profundidade	Distância vertical entre emissão do feixe e furo.
Amarela	Ponto de saída do feixe	Distância horizontal entre emissão do feixe e furo.
Vermelha	Percurso sônico	Trajeto de maior amplitude entre emissão do feixe e furo.
Preta	Lei focal[31]	Ângulo (varredura setorial) ou VPA (varredura linear).

A Figura III.14 mostra imagem contendo as vistas A-Scan, B-Scan e S-Scan. A vista A-Scan representa, no eixo vertical, a amplitude do pulso ultrassônico recebido e, no eixo horizontal, percurso sônico. A vista B-Scan representa, no eixo vertical, a profundidade e, no eixo horizontal, a distância de varredura. E na vista S-Scan, o eixo vertical representa a profundidade e índice no eixo horizontal.

[31] A Lei Focal pode corresponder ao ângulo formado pela profundidade e percurso sônico na varredura setorial, ou ao VPA (*Virtual Probe* Aperture), que é feixe de ondas formado por um grupo de elementos ativos (ver Figura 61) na varredura linear.

Como mencionado na Seção III.2.2.6, os dados dos ensaios são registrados e salvos a cada novo intervalo de carregamento. Posteriormente, esses dados são analisados em computador com a utilização do programa TomoView.

A Amplitude, visualizada na vista A-Scan, é o primeiro parâmetro a ser observado. Adota-se como referência, a maior amplitude do sinal da onda ultrassônica ao término de cada carregamento e, uma vez identificada, posteriormente são observados os demais parâmetros de localização do furo. Dessa forma é possível analisar os possíveis efeitos da presença de um campo de tensões em uma mesma região, comparando os valores dos parâmetros ultrassônicos nos estados inicial (estado final do carregamento anterior) e final do carregamento (estado inicial do carregamento posterior).

A Profundidade corresponde à distância vertical entre a emissão do feixe e o furo, e pode ser visualizada na vista S-Scan e lida na tabela da vista A-Scan.

O Ponto de Saída do Feixe corresponde à distância horizontal entre a emissão do feixe e o furo, e pode ser visualizada na vista S-Scan. Este parâmetro, ao contrário dos demais, não é fornecido automaticamente pelo equipamento. Para obtenção deste valor, é necessário que o operador utilize o recurso computacional TomoView.

O Percurso Sônico é o trajeto da onda ultrassônica de maior amplitude, compreendido entre a emissão e o furo. Pode ser visualizado na vista S-Scan e lido na tabela da vista A-Scan.

A Lei Focal pode representar o valor do ângulo de refração para varredura setorial, ou o valor do VPA para varredura linear. Em varreduras setoriais, a informação encontra-se no topo da vista B-Scan, e nas varreduras lineares, encontra-se no topo da vista S-Scan, sob o nome “Beam: L:”.

III.2.3. Cálculo da Constante Elástica

Calcula-se a tensão a partir das Equações (46) e (47):

$$tg\theta^{\sigma} = \frac{\left(1 + K^{\theta}\sigma\right) sen\theta^{0}}{\left\{1 - \left[\left(1 + K^{\theta}\sigma\right) sen\theta^{0}\right]^{2}\right\}^{1/2}} \qquad \textbf{(52)}$$

Onde:

θ^{0} - ângulo de refração livre de tensão;

θ^{σ} - ângulo de refração na presença de tensão;

K^{θ} - constante acustoelástica da onda transversal ou longitudinal.

Para o cálculo da constante acustoelástica presente na Equação (52), substituímos nas Equações (41) e (42) os valores típicos de constantes elásticas para aço (ALLEN, 1984):

$\lambda = 11{,}28 \times 10^{10}$ Pa, $\mu = 8{,}34 \times 10^{10}$ Pa, $l = -42{,}96 \times 10^{10}$ Pa

$m = -66{,}44 \times 10^{10}$ Pa, $n = -64{,}35 \times 10^{10}$ Pa

A análise dos resultados apresentada no Capítulo IV mostrará que o ângulo de refração no estado de repouso, θ^0, é fornecido diretamente na varredura setorial e previamente definido na varredura linear. Já o ângulo de refração na presença de tensão, θ^σ, também é fornecido diretamente na varredura setorial, porém ele é fornecido indiretamente na varredura linear, por meio de cálculo.

IV. Resultado e Análise dos Resultados

IV.1. Resultados do Carregamento Uniaxial em Tração

Durante os carregamentos dos corpos-de-prova, foi observado que apenas o CP-01 atingiu o patamar de escoamento do material. Foi alcançado o valor máximo de carga aplicada de 169,8kN (~170kN), daí as leituras para os carregamentos de 165 e 170kN para o CP-01 (ver Figura IV.2).

Como já informado na Seção III.1.1, os três corpos-de-prova foram fabricados a partir do mesmo material. Uma possível explicação pode ser a heterogeneidade do material da barra decorrente do processo de laminação sem o devido controle de qualidade, ocorrendo elevada variação de temperatura. Dessa forma, uma parte da barra estaria recozida (CP-01) enquanto outra parte estaria encruada (CP-02 e CP-03).

Serão apresentados os resultados dos ensaios dos CP-01, CP-02 e CP-03, e analisados aqueles relativos ao regime plástico do CP-01. Note que os valores dos parâmetros da inspeção ultrassônica permanecem constantes ao longo dos ensaios para os CP-02 e CP-03.

IV.2. Resultados da Varredura Setorial

Os resultados das inspeções “Phased Array”, no modo setorial, estão resumidos na Tabela IV.1. As Figuras 1 a 7 do Apêndice A mostram os resultados para alguns desses valores de carregamento.

Tabela IV.1 – Resultados do “Phased Array” no modo setorial 45° a 70°, para CP-01, CP-02 e CP-03.

Corpo de Prova	Carga (kN)	Amplitude (%)	Profundidade (mm)	Percurso Sônico (mm)	Ponto de Saída do Feixe (mm)	Lei Focal
01	Até 40	79,1	13,0	23,3	19,6	12 (56°)
	50 – 125	79,6	13,0	23,3	19,6	12 (56°)
	150	83,4	13,0	23,3	19,6	12 (56°)
	165	12,8	12,8	23,5	19,4	13 (57°)
	170	48,6	12,9	23,7	19,5	13 (57°)
02	0 – 200	84,6	12,0	22,6	19,3	14 (58°)
03	0 – 200	99,4	12,5	23,3	20,1	14 (58°)

Voltando ao esquema da Figura II.51, uma onda emitida se propaga em um meio sem tensão sob um ângulo de refração, θ^0, formado com o eixo vertical, atingindo um ponto de distância d^0 do eixo vertical. Após aplicação de tensão, a onda emitida do mesmo ponto, se propaga no meio tensionado sob novo ângulo de refração, θ^σ, formado com o mesmo eixo vertical, atingindo novo ponto, d^σ, maior que d^0.

Da Figura III.10, observamos que a varredura setorial comporta-se da mesma forma. Um feixe de ondas de maior amplitude no intervalo de 45 a 70° será a referência para ângulos de refração, antes e após a presença de campo de tensões. O modo setorial fornece diretamente os valores dos ângulos de refração a serem utilizados: θ^0 = 56° e θ^σ = 57°. Veremos na próxima seção que na varredura linear a física do ultrassom ocorre de forma diferente.

Das Equações (46) e (49) para ondas quase transversais, temos:

$$K^{\theta} = -0{,}00302799$$

$$\sigma = 3{,}84\text{MPa}$$

IV.3. Resultados da Varredura Linear

Os resultados das inspeções “Phased Array”, no modo linear com ângulos de varredura de 45°, 50° e 55° estão resumidos nas Tabelas IV.2, 3 e 4. As Figuras 8 a 22 do Apêndice A mostram os resultados para alguns desses valores de carregamento.

Tabela IV.2 – Resultados do “Phased Array” no modo linear a 45°, para CP-01, CP-02 e CP-03.

Corpo de Prova	Carga (kN)	Amplitude (%)	Profundidade (mm)	Percurso Sônico (mm)	Ponto de Saída do Feixe (mm)	Lei Focal
01	Até 40	86,3	12,8	18,1	13,5	27
	50 – 125	86,3	12,8	18,1	13,5	27
	150	86,3	12,8	18,1	13,5	27
	165	24,1*	12,9	18,3	12,8	28
	170	84,3*	13,0	18,3	12,9	28
02	0 – 200	80,4	12,0	17,6	13,1	27
03	0 – 200	100,0	12,2	17,3	13,2	29

*Foi necessária a adição de 12dB de ganho para realizar essa leitura.

Tabela IV.3 – Resultados do "Phased Array" no modo linear a 50°, para CP-01, CP-02 e CP-03.

Corpo de Prova	Carga (kN)	Amplitude (%)	Profundidade (mm)	Percurso Sônico (mm)	Ponto de Saída do Feixe (mm)	Lei Focal
01	Até 40	91,8	13,0	20,2	16,3	21
	50 – 125	91,8	13,0	20,2	16,3	21
	150	91,8	13,0	20,2	16,3	21
	165	32,8*	12,7	19,8	14,9	23
	170	33,3	12,9	20,1	15,1	23
02	0 – 200	86,3	12,1	18,8	14,9	23
03	0 – 200	93,3	12,4	19,4	16,2	23

*Foi necessária a adição de 12dB de ganho para realizar essa leitura.

Tabela IV.4 – Resultados do "Phased Array" no modo linear a 55°, para CP-01, CP-02 e CP-03.

Corpo de Prova	Carga (kN)	Amplitude (%)	Profundidade (mm)	Percurso Sônico (mm)	Ponto de Saída do Feixe (mm)	Lei Focal
01	Até 40	89,4	12,6	22,0	18,7	16
	50 – 125	89,4	12,6	22,0	18,7	16
	150	89,4	12,6	22,0	18,7	16
	165	98,4*	15,9	27,7	24,5	06
	170	49,0	13,3	23,2	19,3	15
02	0 – 200	82,0	12,0	21,0	17,9	17
03	0 – 200	79,6	12,2	21,2	18,3	18

*Foi necessária a adição de 12dB de ganho para realizar essa leitura.

Na varredura linear, o feixe é formado por ondas paralelas entre si (Percurso Sônico A), num ângulo de refração livre de tensões, θ^0, pré-determinado pelo operador. Neste trabalho foram adotados os ângulos de 45°, 50° e 55° – o equipamento utilizado permite realizar inspeções simultâneas. Para contornar essa diferença, recorreu-se a relações trigonométricas para obter o ângulo de refração na presença de um campo de tensões, θ^σ, conforme ilustra o desenho esquemático da Figura IV.1.

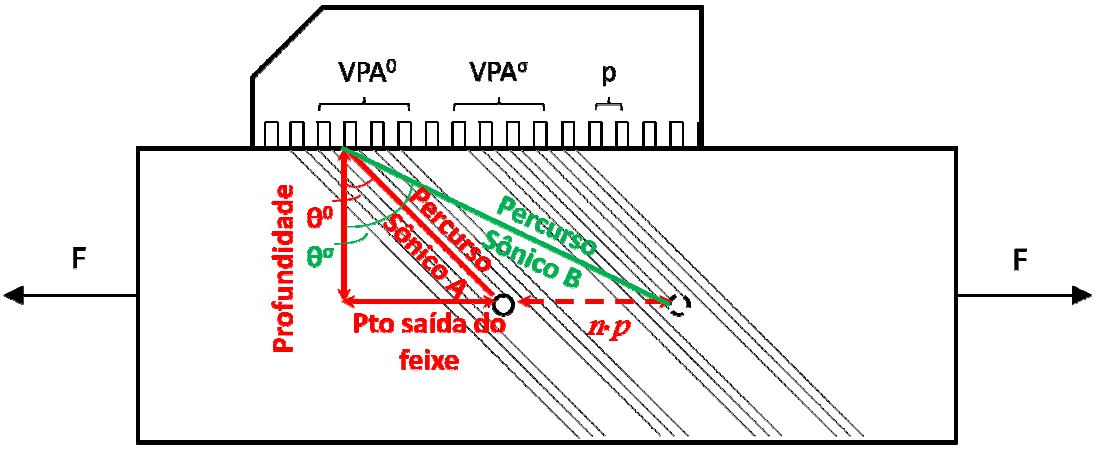


Figura IV.1 – Esquema adotado na varredura linear para cálculo do ângulo de refração alterado devido à presença do campo de tensões, θ^{σ}.

Onde:

VPA^0 – número do VPA no estado de repouso (livre de tensões);
VPA$^{\sigma}$ – número do VPA alterado (na presença do campo de tensões);
p – distância entre os centros de dois elementos adjacentes do transdutor;
n – diferença entre VPA$^{\sigma}$ e VPA^0.

A Figura IV.1 representa o trecho do corpo-de-prova contendo o furo. Num primeiro momento, imagina-se um estado livre de tensão, onde podemos observar os parâmetros Profundidade, Ponto de Saída do Feixe, Percurso Sônico A, VPA^0 e θ^0, todos conhecidos e fornecidos pela técnica "Phased Array". Para adaptar ao modo setorial, e consequentemente à técnica da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua, é preciso considerar um mesmo ponto de emissão para analisar os possíveis efeitos da presença de tensão em uma região de interesse, daí é preciso descobrir o valor do Percurso Sônico B.

Considera-se agora a aplicação de carga uniaxial em tensão, F, provocando o deslocamento do furo. Se considerarmos o triângulo reto formado pelos catetos – Ponto de Saída do Feixe $+n \cdot p$ e Profundidade – calcula-se o Percurso Sônico B (hipotenusa) aplicando o Teorema de Pitágoras. Para tanto, é preciso conhecer a distância $n \cdot p$, sendo n a diferença de VPA (antes e após aplicação da carga), também informada pela técnica "Phased Array", e p a distância entre centros de dois elementos adjacentes para o modelo de transdutor utilizado, com valor de 0,6 mm.

O ângulo de refração, θ^{σ}, formado entre o Percurso Sônico B e a Profundidade, é calculado com a Equação (53):

$$\cos\theta^{\sigma} = \text{(Profundidade) / (Percurso Sônico B)} \qquad \textbf{(53)}$$

Das Tabelas IV.2 a IV.4 podem ser observadas alterações de sinais de indicação de posição do furo no CP-01 durante escoamento. A partir das Equações (51), (45) e (52), reproduzidas a seguir, obtemos os valores de K^{θ} e σ da Tabela IV.5.

$$F = \frac{\sigma_y}{k_t} \cdot A$$

$$K^{\theta}_{1(QL)} = 1/2\left[K_{11} + K_{22} + (K_{22} - K_{11})\cos 2\theta^0\right]$$

$$tg\,\theta^{\sigma} = \frac{(1 + K^{\theta}\sigma)sen\,\theta^0}{\left\{1 - \left[(1 + K^{\theta}\sigma)sen\,\theta^0\right]^2\right\}^{1/2}}$$

Tabela IV.5 – Cálculo do ângulo de refração alterado devido à presença do campo de tensões, θ^{σ} , para as varreduras lineares do CP-01.

Tipo de Varredura	Profundidade (mm)	Percurso Sônico B (mm)	Lei Focal	n	θ^0	θ^{σ}	K^{θ}	σ (MPa)
Linear 45°	12,8	18,1	27	0	45°	N/A	-0,00671	N/A
	12,9	18,6	28	1	N/A	46°	N/A	2,58
	13,0	18,7	28	1				
Linear 50°	13,0	20,2	21	0	50°	N/A	-0,00799	N/A
	12,7	20,5	23	2	N/A	52°	N/A	3,59
	12,9	20,8	23	2				
Linear 55°	12,6	22	16	0	55°	N/A	-0,00923	N/A
	15,9	34,4	6	10	N/A	62°	N/A	8,44
	13,3	23,9	15	1		56°		1,31

N/A – não se aplica.

Os campos em branco correspondem a carregamentos antes do escoamento e em cinza a carregamentos durante escoamento.

IV.4. Análise dos Resultados

A técnica proposta através da combinação do “Phased Array” e Refração de Ondas com Incidência Oblíqua, foi capaz de perceber o fenômeno do escoamento, pois apresentou alterações dos parâmetros de inspeção quando comparados com o estado de repouso. Dentre estes parâmetros, estão os relacionados com a localização do furo (espalhador), como Profundidade, Percurso Sônico e Ponto de Saída do Feixe. Apesar das características próprias de funcionamento das varreduras setorial e linear, observamos que ambas as varreduras comportaram-se de forma semelhante quando o CP-01 atingiu o patamar de escoamento do material, após aplicação da carga de 150kN.

Outro parâmetro que teve alteração foi a Amplitude, que indica a intensidade de sinal em relação ao furo. Se considerar a técnica de ultrassom convencional, tal alteração pode ser atribuída também ao fato de o furo ter se deslocado. Considerando agora a técnica “Phased Array”, cujo transdutor é composto por multielementos, em que cada elemento tem sua excitação controlada por computador, um autoajuste eletrônico dos parâmetros de localização do furo permitiria a manutenção da intensidade do sinal da amplitude durante o escoamento. Porém, os resultados das varreduras setorial e linear apresentam uma drástica queda da Amplitude com o início do escoamento, como pode ser verificado nas Tabelas IV.1 à IV.4, demonstrando que a técnica “Phased Array” percebeu um alívio de tensão na região do furo decorrente da deformação plástica, de modo que interferiu na intensidade da amplitude do sinal. Uma consequência da queda na amplitude do sinal está na necessidade de adição de ganho de 12dB para melhorar a visualização dos dados das varreduras lineares no software Tomoview, e permitir a análise desses dados.

Comparando os resultados obtidos na zona plástica do CP-01 do presente experimento, com os resultados teóricos obtidos na zona elástica do material abordado no estudo da análise de tensões através da refração de ondas com incidência oblíqua (ORTEGA, 2001), é possível notar diferença de resolução das variações dimensionais. Foram selecionados nas Tabelas II.6 e II.7 (trechos reproduzidos a seguir), valores aproximados para espessura, para ângulos de refração no estado de repouso e para tensão aplicada.

Entende-se por espessura, a profundidade a ser percorrida pela onda. Foi selecionado o valor de 10,0mm para espessura por ser o mais próximo de 12,7mm (profundidade do centro do furo do CP-01). O valor de tensão mais próximo selecionado foi de 200MPa, pois a carga máxima aplicada no CP-01 foi de 169,8kN (~170kN) resultando em uma tensão aplicada de aproximadamente 260MPa. Por último, o intervalo de ângulos de refração selecionado para varredura setorial (ondas transversais) foi 50° a 60°, sabendo que o ângulo de refração obtido no experimento foi 56°. E para varreduras lineares (ondas longitudinais), o intervalo selecionado foi 40° a 60°, devido aos ângulos de refração adotados serem 45°, 50° e 55°.

Tabela II.6 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço de trilho em função da tensão uniaxial, σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda transversal (ORTEGA, 2001).

Espessura	θ_2^0	σ_1 (MPa)					
		0	20	50	100	200	400
(mm)	(graus)	d (mm)	$d(\sigma) - d(0)$				
10	5	0,874887	-0,00013	-0,00033	-0,00065	-0,00131	-0,00261
	10	1,763270	-0,00026	-0,00066	-0,00132	-0,00264	-0,00528
	20	3,639702	-0,00055	-0,00139	-0,00277	-0,00554	-0,01108
	30	5,773503	-0,00091	-0,00227	-0,00453	-0,00906	-0,01812
	40	8,390996	-0,00139	-0,00348	-0,00696	-0,01392	-0,02780
	50	11,917536	-0,00218	-0,00546	-0,01091	-0,02180	-0,04354
	60	17,320508	-0,00383	-0,00958	-0,01914	-0,03823	-0,07628
	70	27,474774	-0,00908	-0,02270	-0,04534	-0,09048	-0,18018
	80	56,712818	-0,05229	-0,13047	-0,26006	-0,51669	-1,01992

Tabela II.7 – Variação da distância d entre pontos de chegada dos feixes, no aço de trilho em função da tensão uniaxial σ_1, da espessura e dos ângulos de refração para a onda longitudinal (ORTEGA, 2001).

Espessura	θ_2^0	σ_1 (MPa)					
		0	20	50	100	200	400
(mm)	(graus)	d (mm)	$d(\sigma) - d(0)$				
10	5	0,874887	0,000030	0,000076	0,000151	0,000302	0,000604
	10	1,763270	0,000051	0,000127	0,000255	0,000509	0,001019
	20	3,639702	0,000016	0,000040	0,000080	0,000159	0,000319
	30	5,773503	-0,000255	-0,000637	-0,001275	-0,002549	-0,005098
	40	8,390996	-0,001122	-0,002806	-0,005610	-0,011215	-0,022412
	50	11,91754	-0,003656	-0,009136	-0,018261	-0,036472	-0,072748
	60	17,32051	-0,011919	-0,029762	-0,059409	-0,118363	-0,234927
	70	27,47477	-0,049008	-0,122089	-0,242753	-0,479917	-0,938334
	80	56,71282	-0,433909	-1,067038	-2,077750	-3,948898	-7,193945

ORTEGA (2001) apresenta valores que mostram variações dimensionais da ordem de 0,01mm, permitindo análise na zona elástica. Por outro lado, o presente experimento mostra em todas as tabelas do Capítulo IV, que para a resolução de inspeção de 1° do equipamento "Phased Array", as variações dimensionais são da ordem de 0,1mm. Isto é coerente com o fato de a técnica "Phased Array" ter percebido variações dos parâmetros ultrassônicos apenas no escoamento do CP-01, a partir de 150kN, acima dos limites elásticos da Tabela III.1. Assim, diante dos dados fornecidos, a técnica "Phased Array" não foi capaz de determinar valores de tensão na zona de deformação elástica do material.

No tocante ao deslocamento decorrente do escoamento, a Figura IV.2 mostra o valor máximo de deformação, ε, de 0,12574. Para o extensômetro utilizado, de 25,0mm de base,

temos deslocamento (δ) de 3,14mm. A mesma figura mostra o alongamento final do CP-01 em comparação aos outros corpos-de-prova, no valor de 4,0mm. A diferença entre os valores de alongamento descritos é bastante razoável, levando em conta que a fixação do extensômetro foi feita na região do furo, cuja área transversal é menor, está sujeita a um maior alongamento. E o fato de se tratar de uma geometria particular para o corpo-de-prova submetido a tração, impossibilita uma análise mais criteriosa em relação ao alongamento.

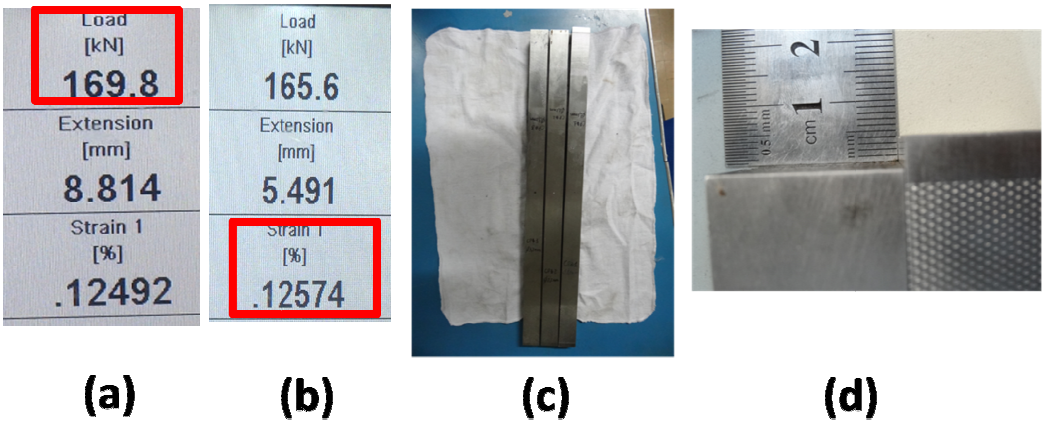


Figura IV.2 – Detalhes do ensaio do CP-01: (a) carga máxima; (b) deformação máxima; (c) comparação do comprimento final com os CP-02 e CP-03; e (d) valor do alongamento.

Ainda, a geometria dos CPs influenciou diretamente nos valores de tensão calculados. Isto porque o corpo-de-prova padrão para ensaio de tração possui redução de seção transversal em relação às extremidades, de modo que a deformação fica confinada à região central mais estreita. Por exemplo, é necessário duas vezes mais carga para produzir um mesmo alongamento se a área da seção transversal do CP for dobrada. A geometria particular do CP adotado possui seção quadrada com 25,4mm (1") de aresta contra 0,505" de diâmetro do CP padrão.

V. Conclusão

Os resultados da inspeção Phased Array mostraram a capacidade da técnica em perceber o efeito do escoamento no CP-01, com drástica queda nos valores de amplitude, em todas as varreduras, indicando sensibilidade ao alívio de tensão na região do furo.

A sensibilidade também foi demonstrada ao apresentar variações em outros parâmetros relacionados com o deslocamento da localização do furo, como profundidade, ponto de saída do feixe e percurso sônico.

A varredura setorial mostrou-se mais sensível, confiável e rápida em relação à varredura linear, pois dispensa o aumento de ganho para análise dos dados e fornece o ângulo de incidência sob tensão de forma direta e imediata,.

A aplicação da teoria da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua, através da técnica Phased Array não foi possível perceber variações na zona elástica do material, pois a primeira indica variações dimensionais de 0,01mm, enquanto que a aplicação desta teoria através da técnica de “Phased Array” indica 0,10mm. Entretanto, a técnica mostrou-se eficaz na determinação da transição elasto-plástica.

VI. Sugestões para trabalhos Futuros

1. Neste trabalho foi adotado resolução de 1° para as inspeções. Pode ser avaliada a realização de novos experimentos com uma resolução de 0,5°, dependendo do equipamento “Phased Array”.
2. O emprego de um conjunto transdutor/sapata que permita ângulos de varredura maiores que 70° para varredura setorial, e que 55° para varredura linear. Essa sugestão, assim como a anterior, visa permitir a leitura de valores dimensionais da ordem de centésimo de milímetro.
3. Pode ser analisada a utilização de CP com geometria padrão. Para tanto deve ser verificado a disponibilidade de transdutor/sapata adaptável à nova geometria.

Referências Bibliográficas

ALLEN, D. R., SAYERS, C. M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. n. July, p. 179-188, 1984.

ANDRINO, M. H. et al. Aplicação da acustoelasticidade para avaliação de tensões em soldas em aço API 5L X65. *PANNDT*, 2003.

BRAY, D. E. Current directions of Ultrasonic Stress Measurement Techniques. *15th WCNDT*, 2000.

CALLISTER, JR., WILLIAM D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Sétima Edição, p.642 e 646, 2008.

CARDOSO, B. R. Avaliação da Acustoelasticidade em Tubos de Aço API 5L X 46 com e sem Costura Visando o Estudo do Estado de Tensões. [s.l: s.n.], 2007.

CARMO, D. C. DO, et al. Identificação por Ultra-som das Regiões de Tensões Trativas e Compressivas numa Barra Fletida. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, v. 4, n. 1, p. 13-17, 2007.

CHAKI, S.; BOURSE, G. Non-destructive evaluation of the stress levels in prestressed steel strands using acoustoelastic effect, 2009.

FIGUEREDO, M. A. DA S. Dimensionamento de Altura de Descontinuidades com Ultra-som "Phased Array", 2009.

GOMES, P. D. T. V et al. Residual Stress Measurements by the Blind-hole Drilling Method in a Dissimilar Welded Sheet Metal- Carbon Steel ASTM A 36 and AISI 304 Stainless Steeel , wiht AISI 316 L Filler Metal. *www.ndt.net*, p. 1–9, 2010.

HOWES, M.; INOUE, T.; PARK, M. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. [s.l: s.n.], 2002.

JAVADI, Y. et al. Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness. *Materials & Design*, v. 49, p. 591–601, ago. 2013.

LAMARRE, A. et al. Feasibility Study of Ultrasonic Inspection Using "Phased Array" of Turbine Blade Root – Part 1. p. 1–15, [s.d.], 1997.

MOLES, M.; DUBÉ, N.; JACQUES, F. Pressure Vessel Inspections Using Ultrasonic "Phased Array"s By. n. Asme 2001, 2003.

MOLES, M.; MOREIRA, F. F.; LABBÉ, S. Special "Phased Array" Applications for Pipeline Girth Weld Inspections. n. 1, [s.d.], 2005.

OLYMPUS. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. [s.l: s.n.]. p. 376, 2007.

ORTEGA, L. P. C. Análise de Tensões por Ultra-som Através da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua, 2001.

ORTEGA, L. P. C., et. al. *Introdução à Avaliação de Tensões por Ultrassom*, 2011.

PICHARD, P.; BOUHELIER, M. "Phased Array" applications to NDE of industrial structures. *CONAEND&IEV*, p. 1–8, 2010.

PRITCHARD, S. The use of ultrasonics for residual stress analysis. *NDT & E International*, v. 20, n. 1, p. 57–60, fev. 1987.

ROSSINI, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., & Olabi, a G. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*, v. 35, p. 572–588, mar. 2012.

SCHNEIDER, E. Structural *and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*. p. 522–563, 1990.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., & BUDYNAS, R. G. (n.d.). *Projeto de Engenharia Mecânica.* 7th ed., p.919, 2005.

TANALA, E., BOURSE, G., FREMIOT, M., & De BELLEVAL, J. F. Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods. *NDT & E International*, v. 28, n. 2, p. 83–88, 1995.

Apêndice A – Fotos da Inspeção “Phased Array”

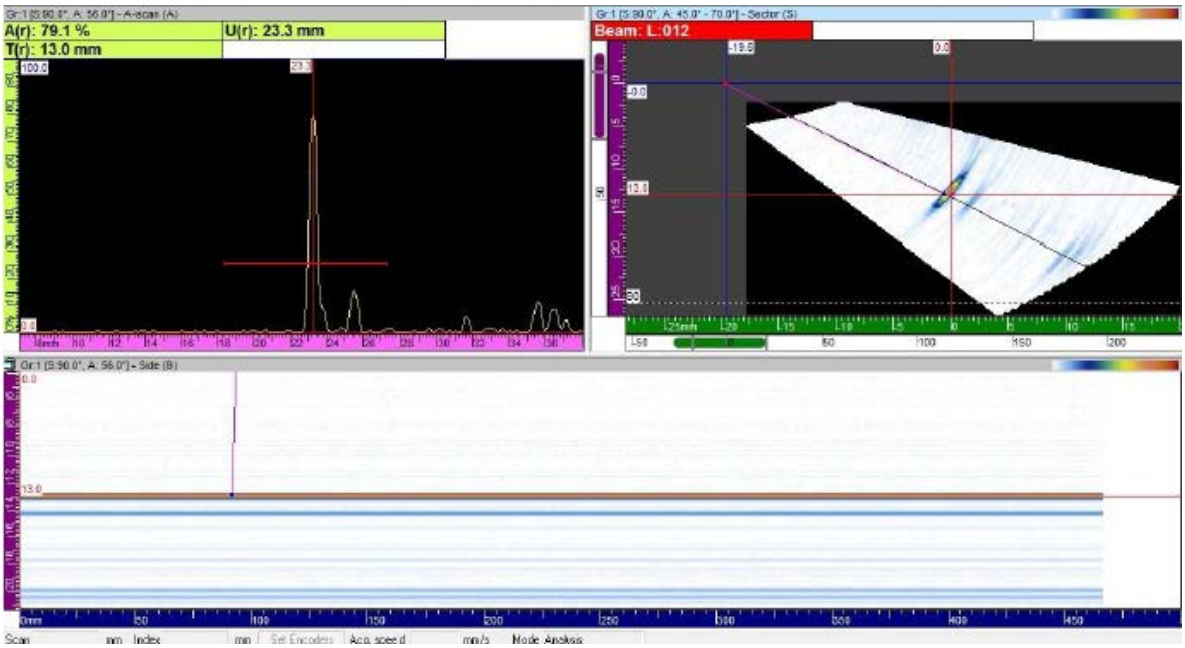


Figura 1 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-01: repouso até 40kN.

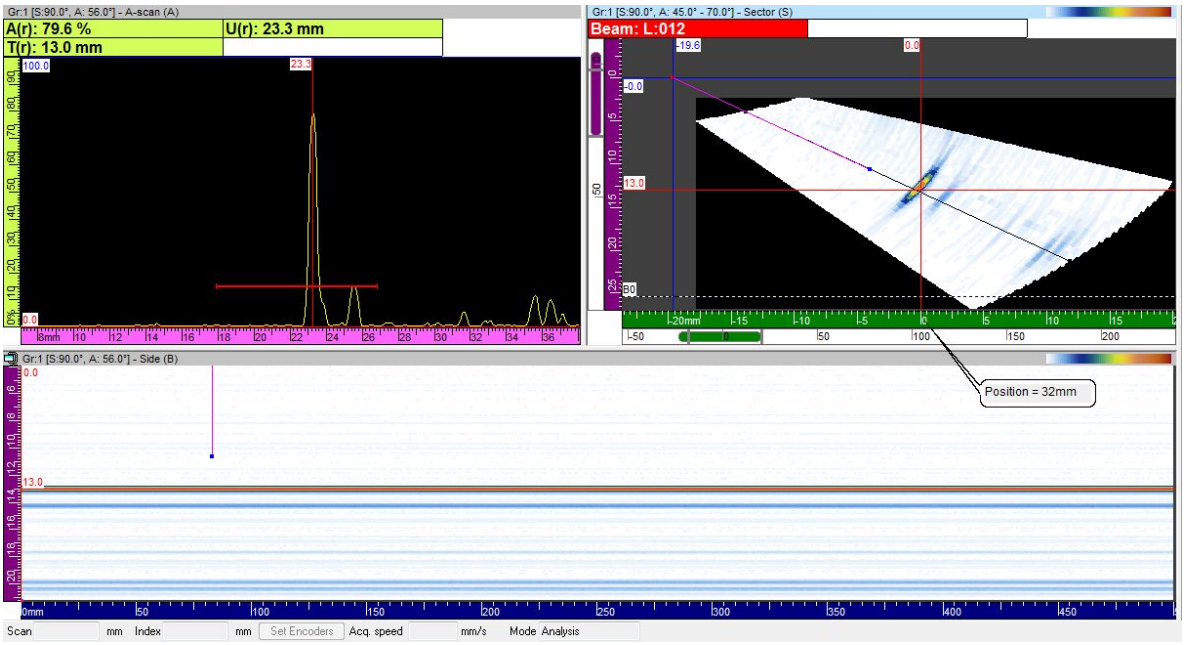


Figura 2 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-01: 50 à 125kN.

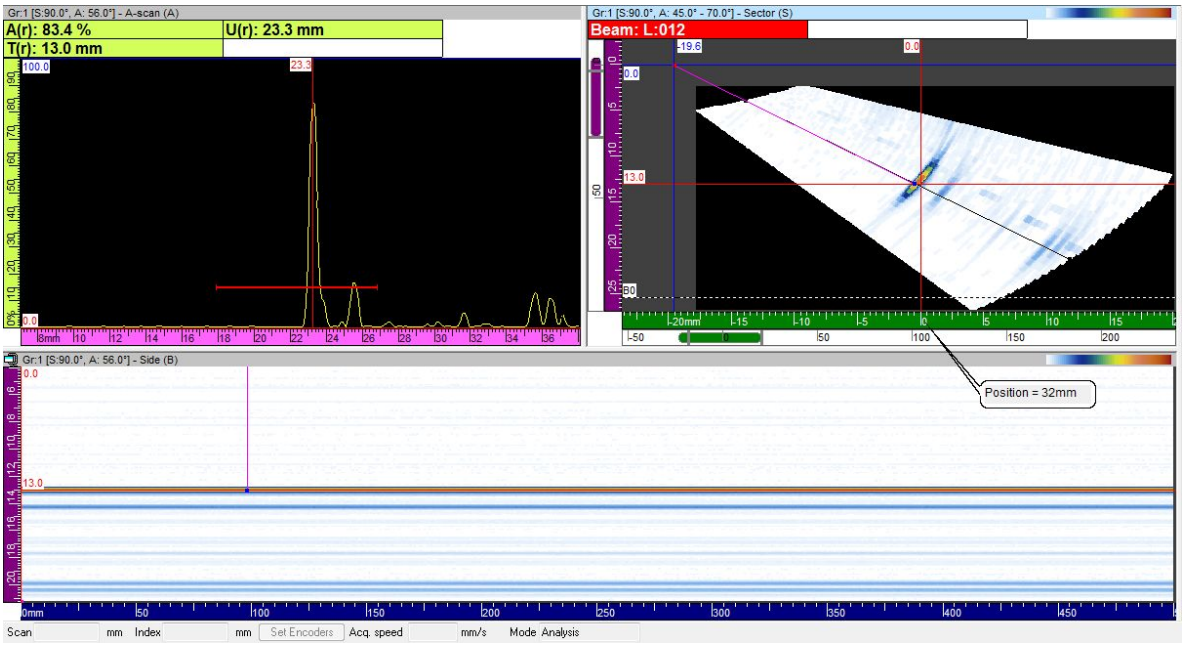


Figura 3 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-01: 150kN.

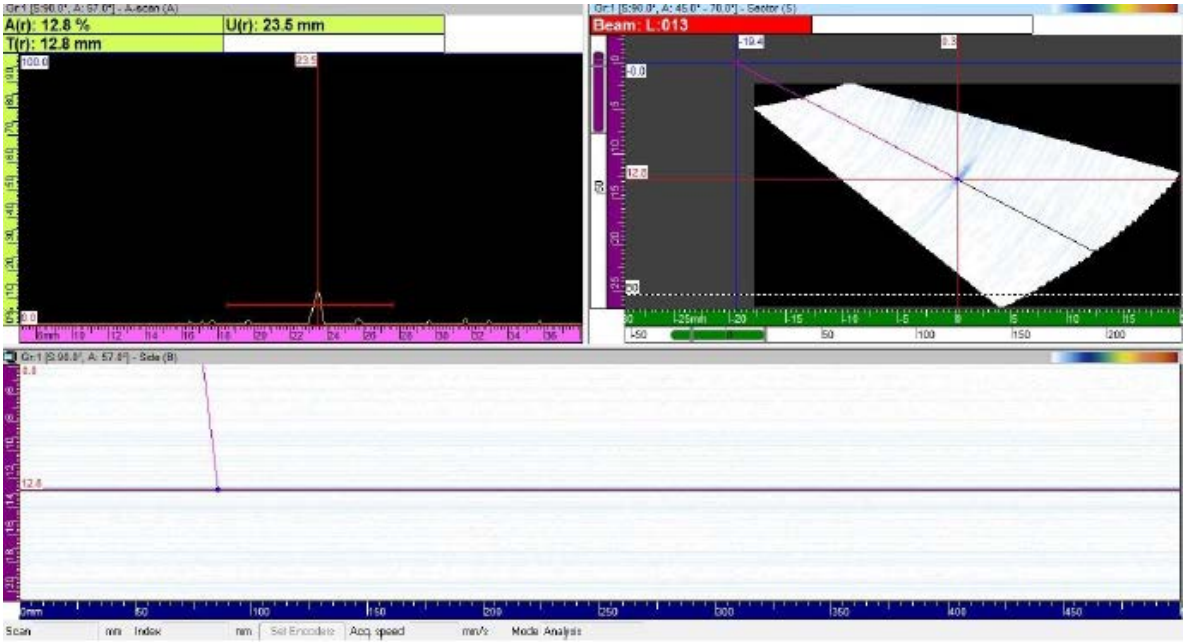


Figura 4 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-01: 165kN.

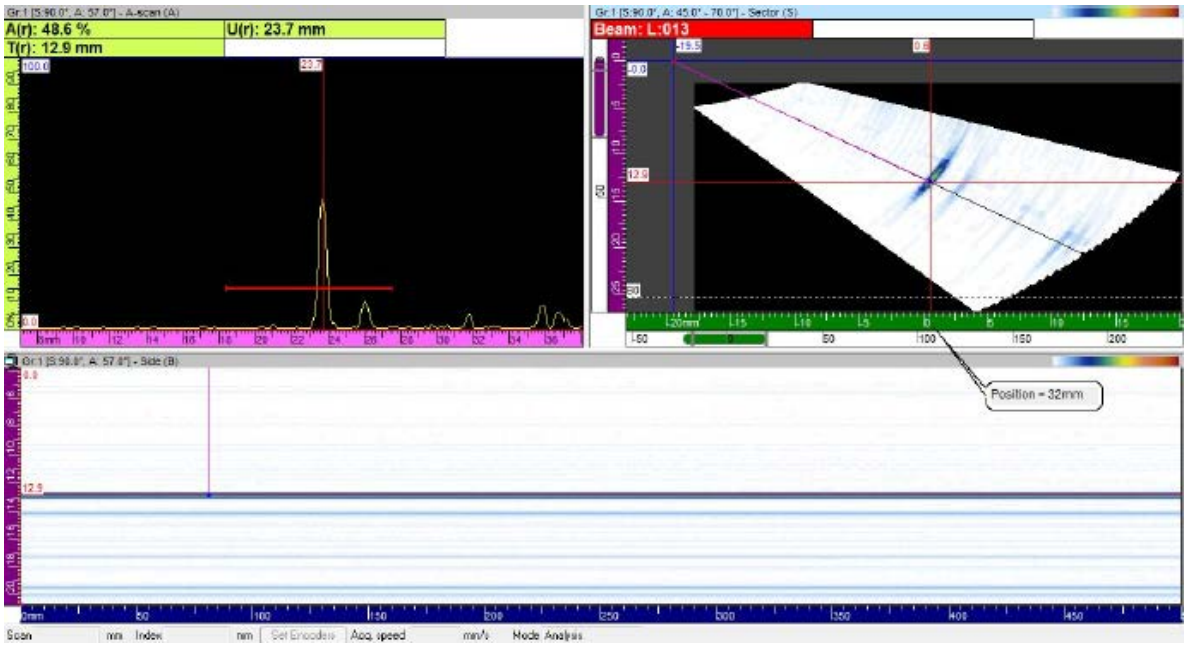


Figura 5 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-01: 170kN.

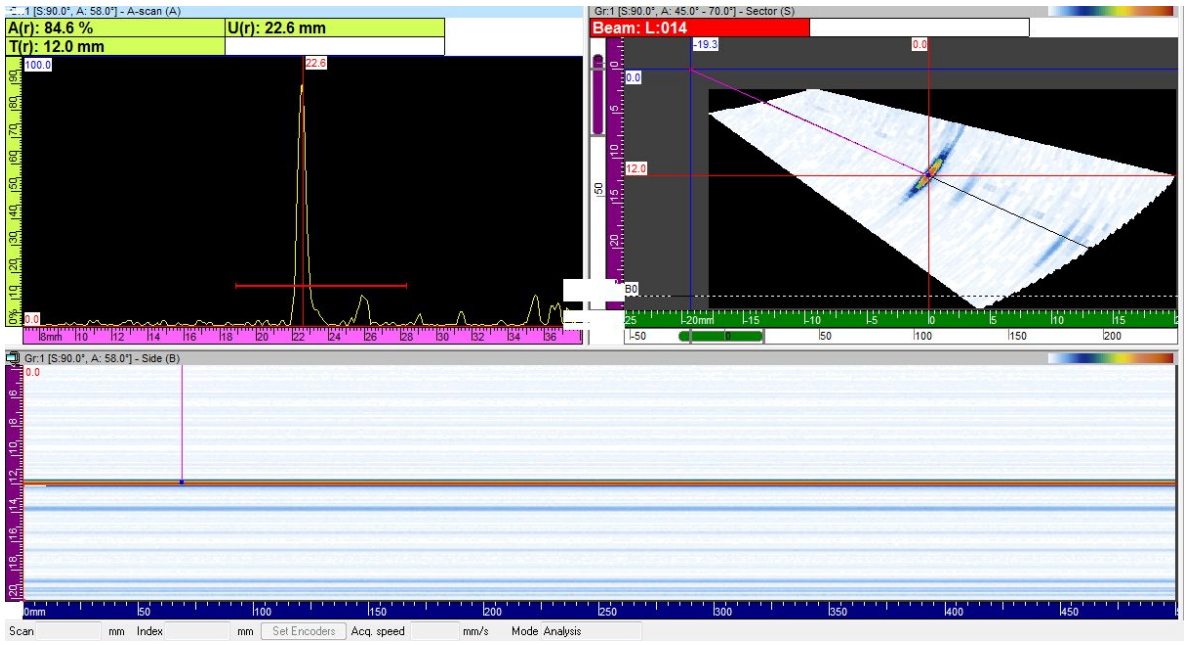


Figura 6 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-02: repouso até 200kN.

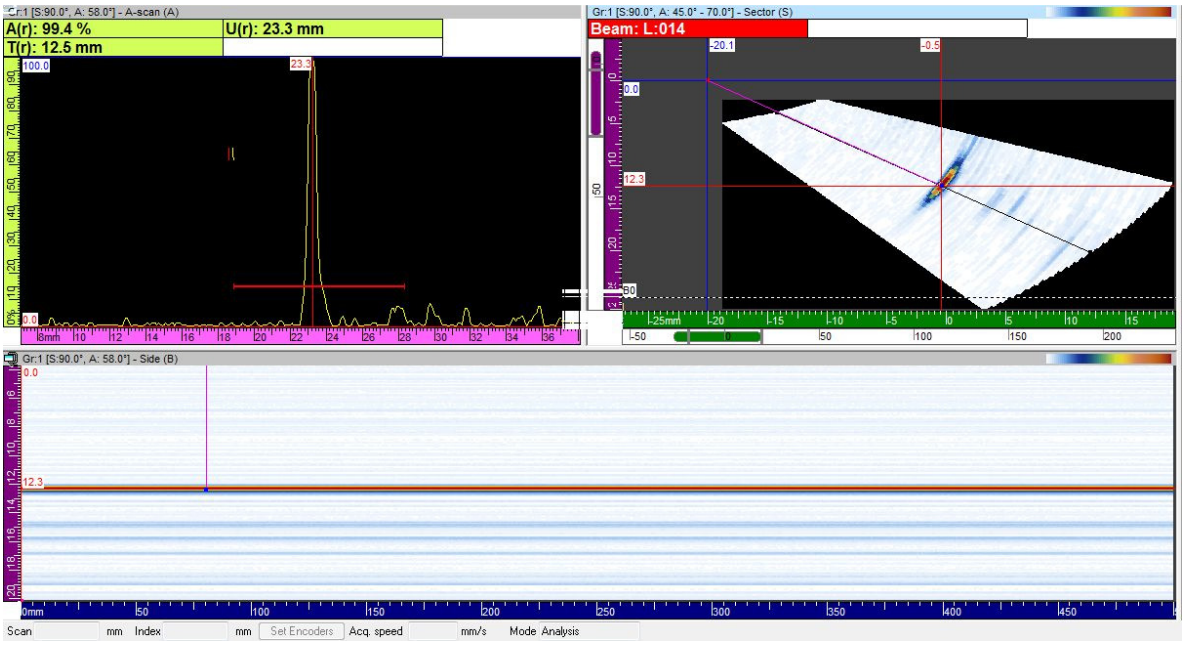


Figura 7 – Varredura setorial 45° a 70° no CP-03: repouso até 200kN.

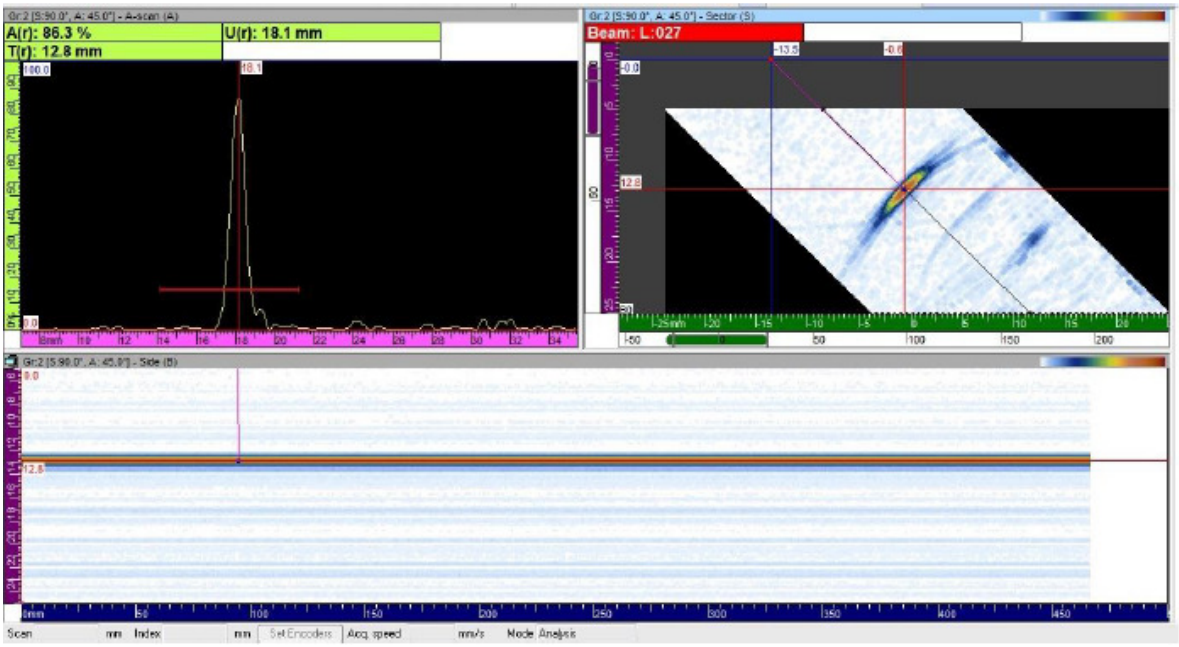


Figura 8 – Varredura linear a 45° no CP-01: repouso até 150kN.

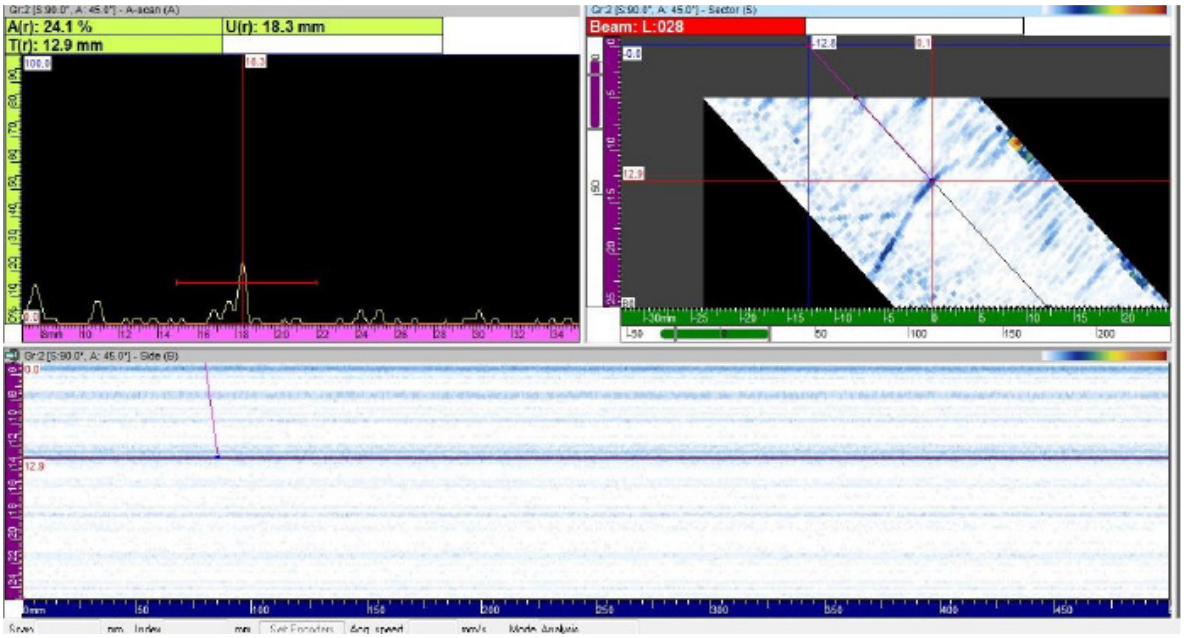


Figura 9 – Varredura linear a 45° no CP-01: 165kN.

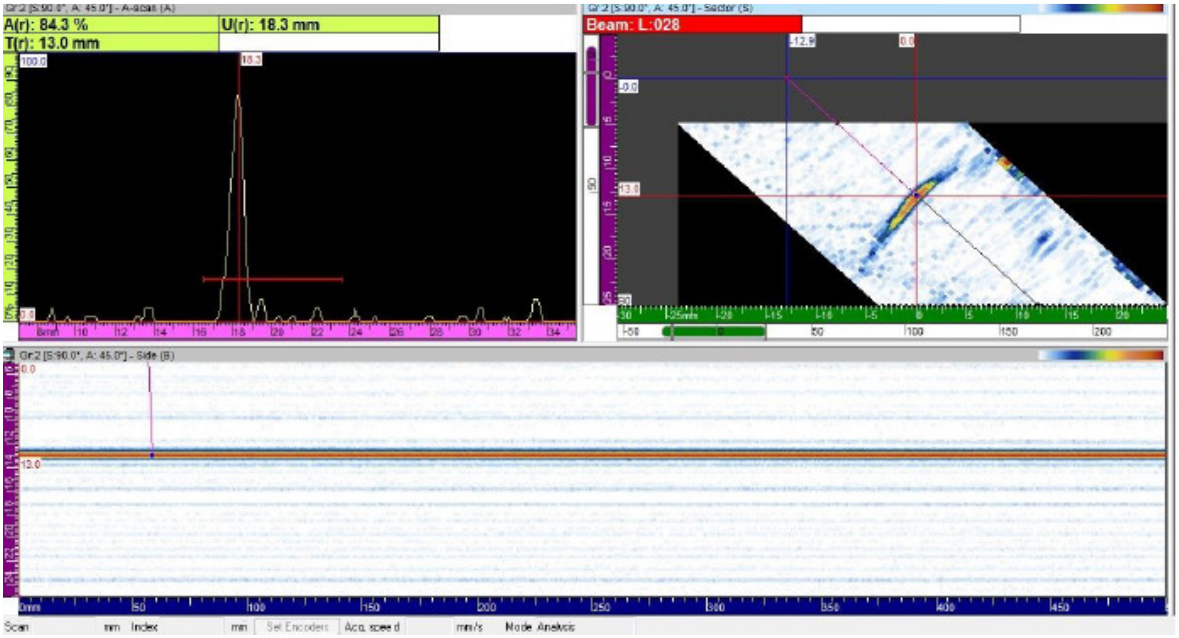


Figura 10 – Varredura linear a 45° no CP-01: 170kN.

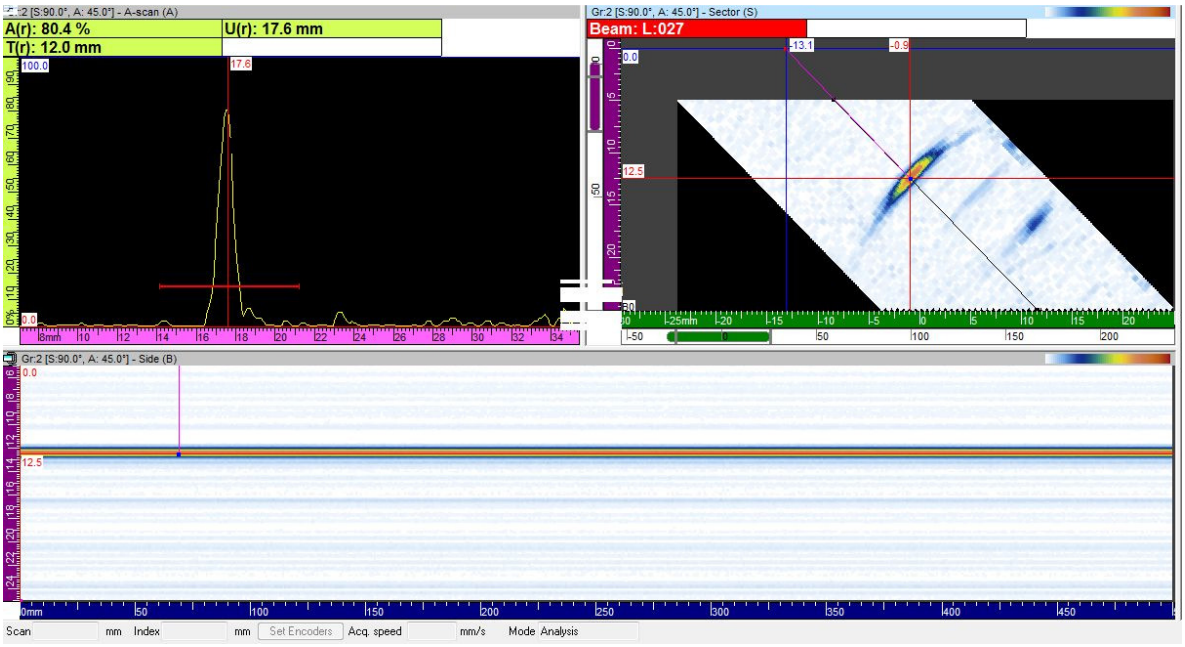


Figura 11 – Varredura linear a 45° no CP-02: repouso até 200kN.

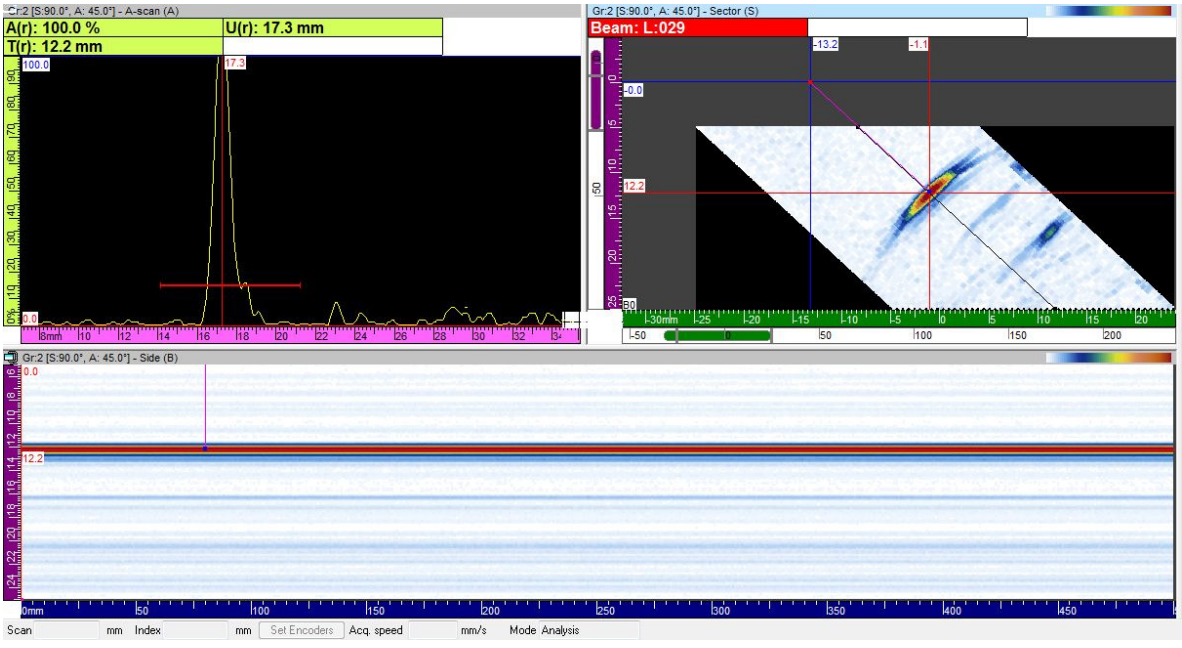


Figura 12 – Varredura linear a 45° no CP-03: repouso até 200kN.

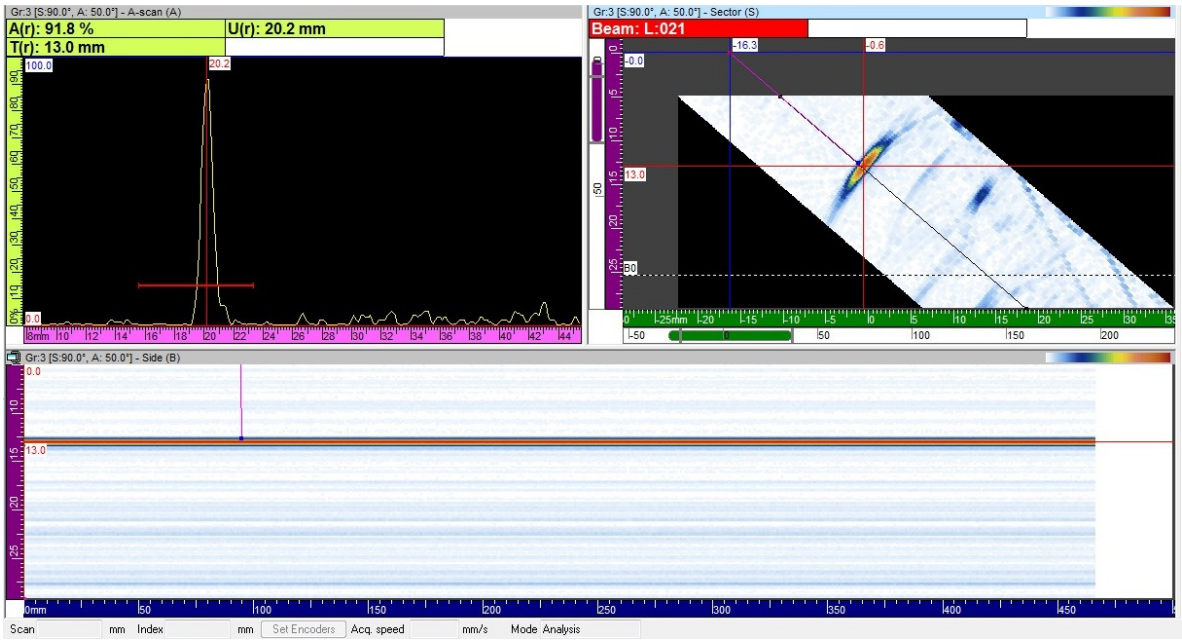


Figura 13 – Varredura linear a 50° no CP-01: repouso até 150kN.

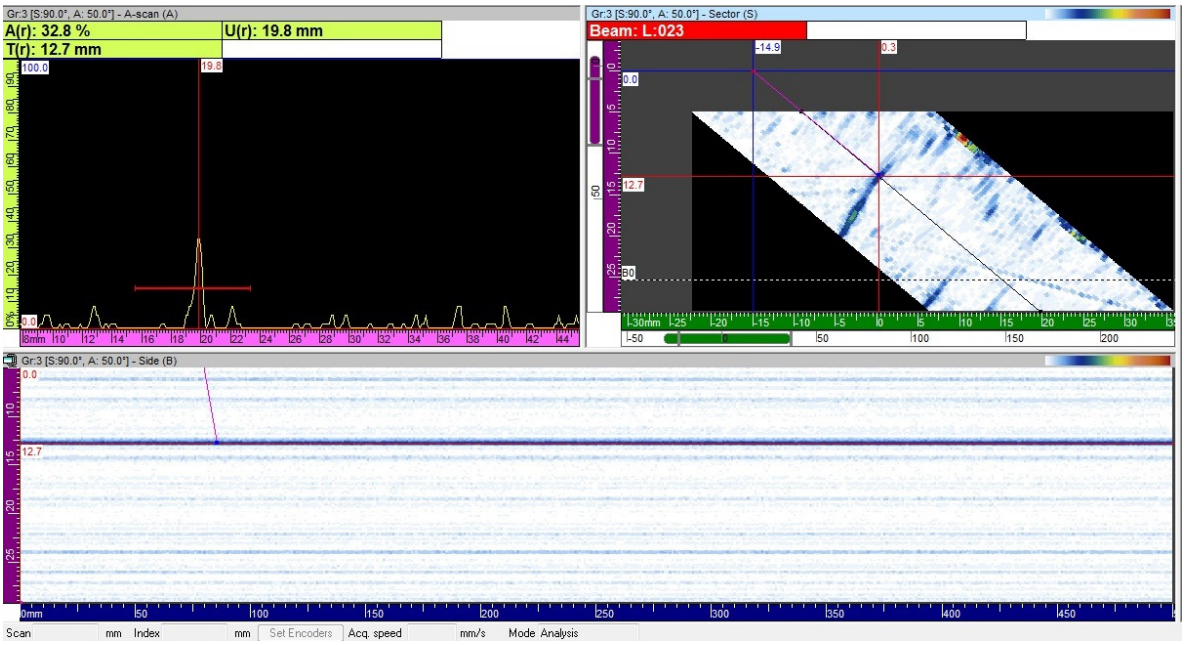


Figura 14 – Varredura linear a 50° no CP-01: 165kN.

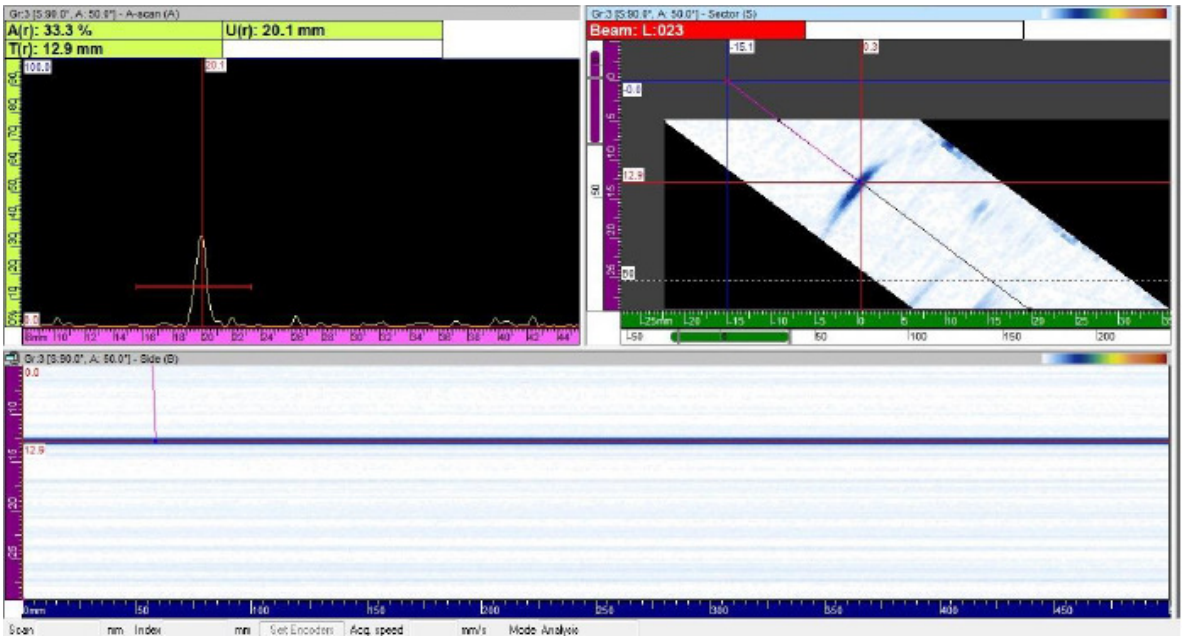


Figura 15 – Varredura linear a 50° no CP-01: 170kN.

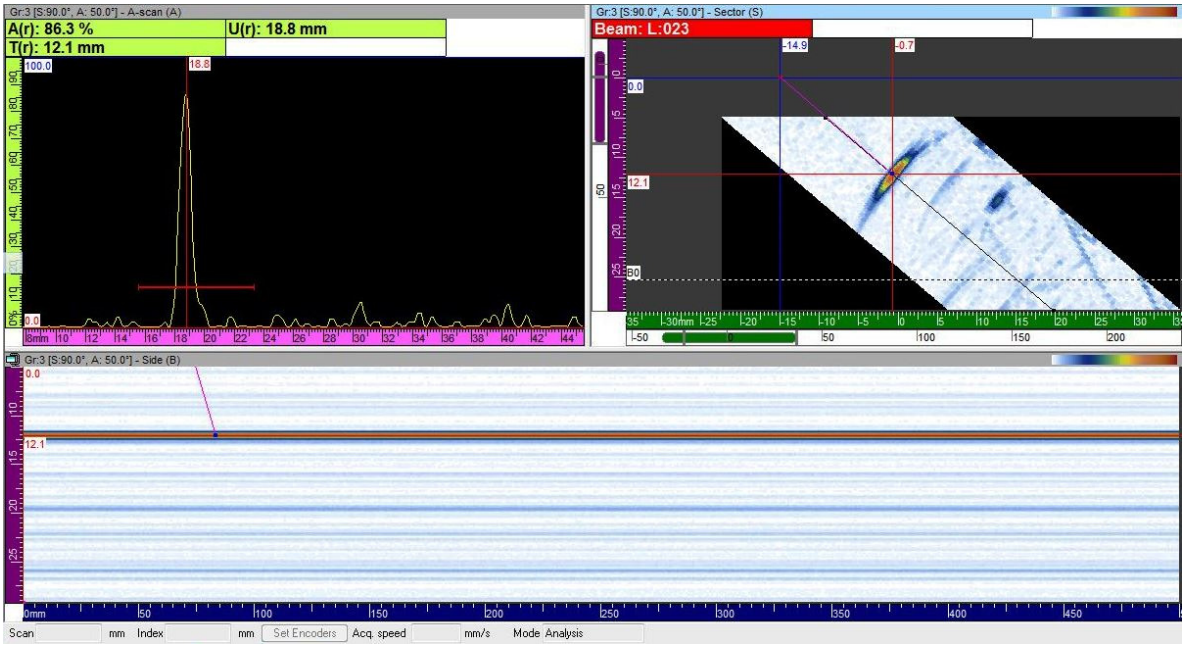


Figura 16 – Varredura linear a 50° no CP-02: repouso até 200kN.

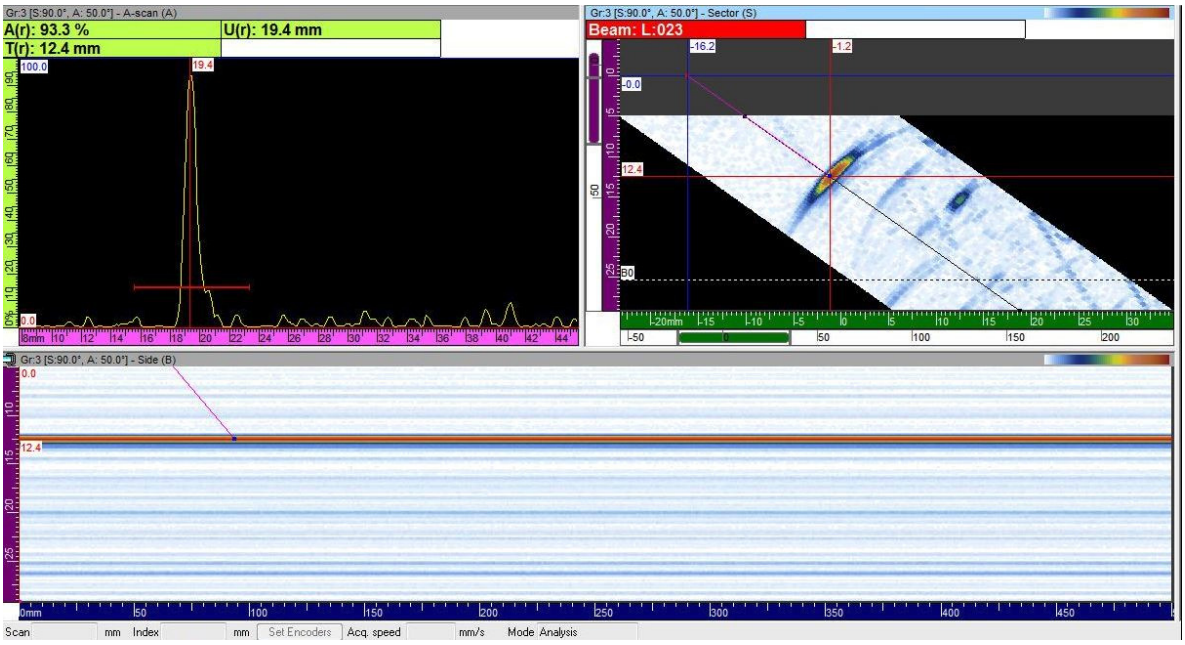


Figura 17 – Varredura linear a 50° no CP-03: repouso até 200kN.

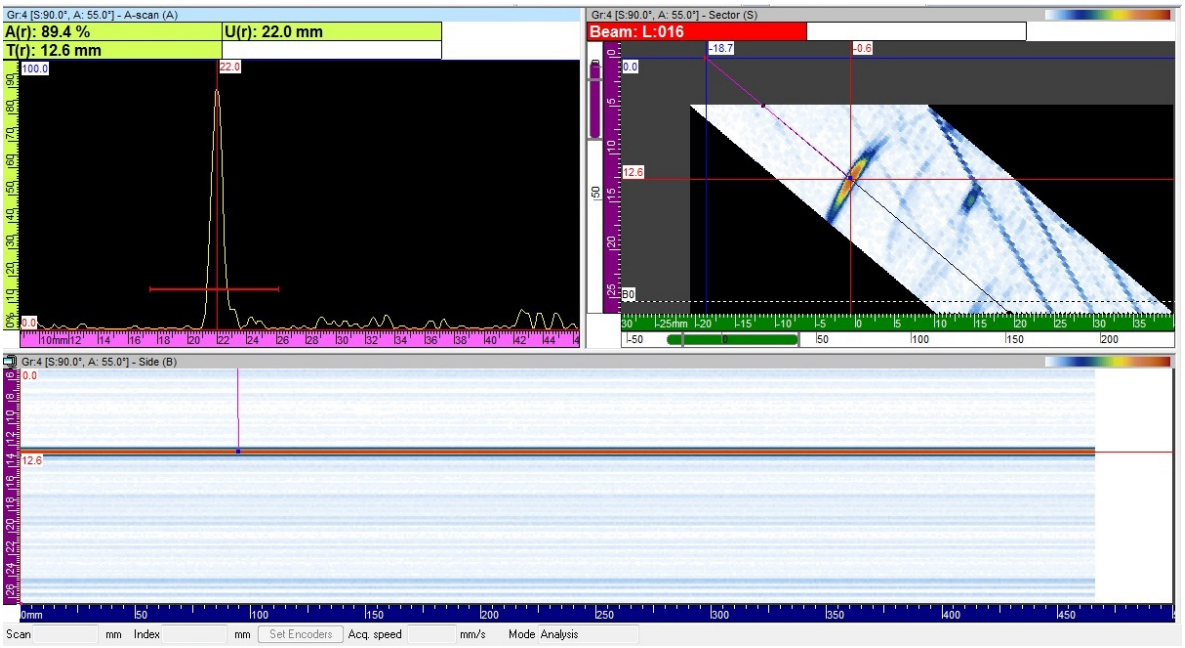


Figura 18 – Varredura linear a 55° no CP-01: repouso até 150kN.

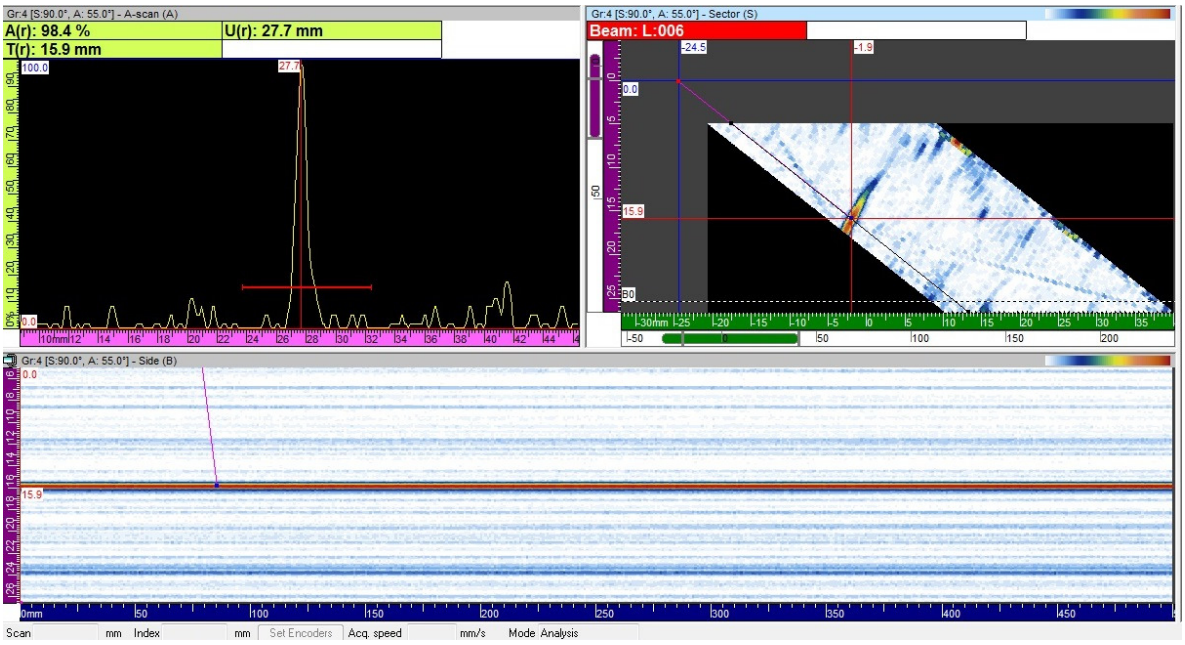


Figura 19 – Varredura linear a 55° no CP-01: 165kN.

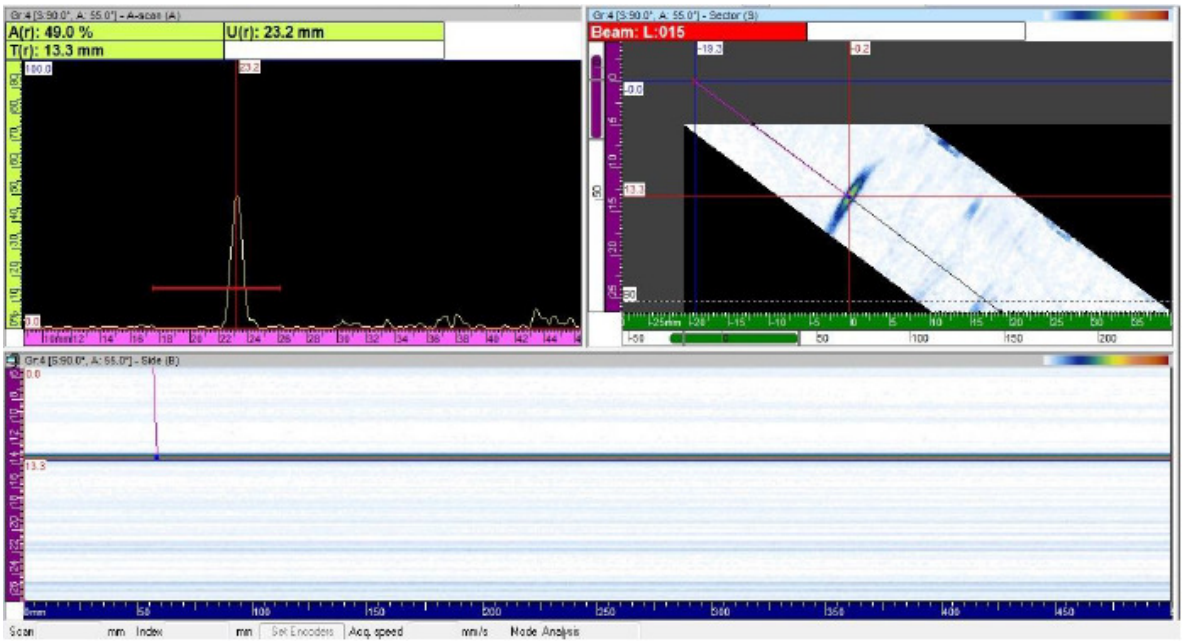


Figura 20 – Varredura linear a 55° no CP-01: 170kN.

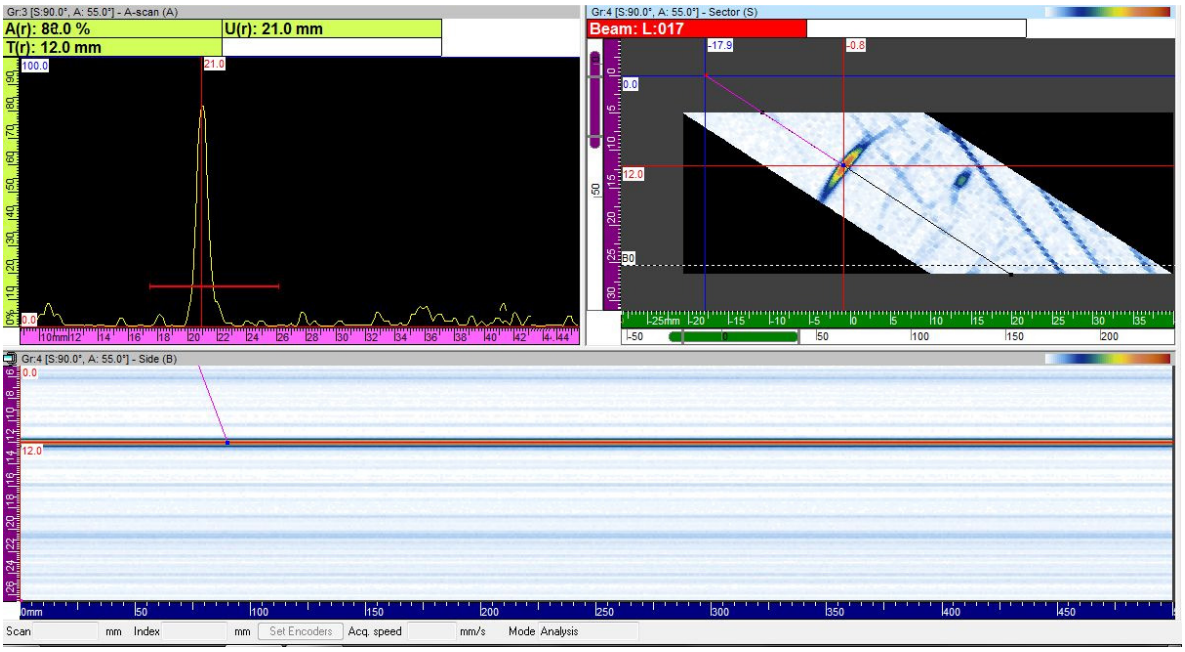


Figura 21 – Varredura linear a 55° no CP-02: repouso até 200kN.

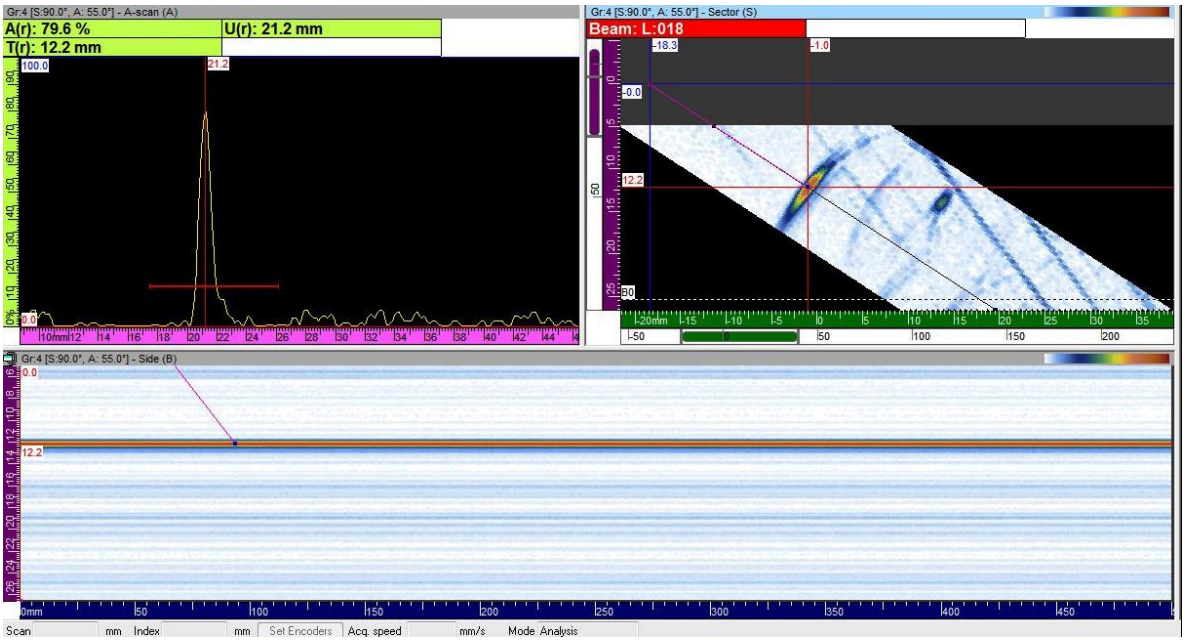


Figura 22 – Varredura linear a 55° no CP-03: repouso até 200kN.

Anexo A – Fórmulas, Dados Experimentais e Parâmetros do "Phased Array"

1) Fórmulas Ultrassônicas.

Tabela 1 - Fórmulas ultrassônicas.

Velocidade de Onda Longitudinal	**Velocidade de Onda Transversal**	**Comprimento de Onda**
$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$	$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$ ou $V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$\lambda = \frac{V}{f}$
Onde:	Onde:	Onde:
V_L = Velocidade de Onda Longitudinal	V_S = Velocidade de Onda Transversal	λ = Comprimento de Onda
E = Módulo de Elasticidade	E = Módulo de Elasticidade	V = Velocidade
ρ = Densidade	ρ = Densidade	f = Frequência
μ = Coeficiente de Poisson	μ = Coeficiente de Poisson	
	G = Módulo de Cisalhamento	
Refração (Lei de Snell)	**Impedância Acústica**	**Coeficiente de Reflexão**
$\frac{sen\theta_I}{sen\theta_R} = \frac{V_1}{V_2}$	$Z = \rho \, x \, V$	$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$
Onde:	Onde:	Onde:
θ_I = Ângulo de Incidência da Onda	Z = Impedância Acústica	R = Coeficiente de Reflexão
θ_R = Ângulo de Refração da Onda	ρ = Densidade	Z_1 = Impedância Acústica do Meio 1
V_1 = Velocidade de Incidência da Onda	V = Velocidade	Z_2 = Impedância Acústica do Meio 2
V_2 = Velocidade de Refração da Onda		

Campo Próximo	**Propagação do Feixe Metade do Ângulo**	**Decibel (dB) Ganho ou Perda**
$N = \frac{D^2}{4\lambda}$ ou $N = \frac{D^2 F}{4V}$ Onde: N = Campo próximo D = Diâmetro do Transdutor λ = Comprimento de Onda V = Velocidade	$sen\theta = 1{,}2\frac{\lambda}{D}$ ou $sen\theta = 1{,}2\frac{V}{DF}$ Onde: λ = Comprimento de Onda D = Diâmetro do Transdutor V = Velocidade f = Frequência	$\Delta I(dB) = 20log\frac{P_2}{P_1}$ Onde: dB = Decibel P_1 = Amplitude de Pressão 1 P_2 = Amplitude de Pressão 2

2) Dados Ultrassônicos Experimentais.

Tabela 2 – Velocidades e impedâncias acústicas para materiais frequentemente usados e testados a 20°C.

Material	Massa específica	Velocidade (Longitudinal)	Velocidade (Transversal)	Impedância Acústica
	Kg/m^3	m/s	m/s	10^6 kg/m^2s
Acoplante líquido / material da sapata				
Água (20°C)	1000	1480	-	1,48
Água pesada	1104	1400	-	1,55
Glicerina (Hamikleer®)	1260	1920	-	2,42
Óleo de motor	870	1740	-	1,51
Resina acrílica	1180	2730	1430	3,22
Lucite®	1180	2680	1260	3,16
Plexiglas®	1270	2730	-	3,51
Poliestireno (Rexolite®)	1056	2340	-	2,47

Tabela 3 – Velocidades e impedâncias acústicas para materiais frequentemente usados e testados a 20°C.

Material	Massa específica	Velocidade (Longitudinal)	Velocidade (Transversal)	Impedância Acústica
	Kg/m^3	m/s	m/s	10^6 kg/m^2s
Material do componente				
Alumínio	2700	6320	3130	17,06
Bronze	8560	4280	2030	36,64
Cobre	8930	4660	2260	41,61
Ouro	19320	3240	1200	62,60
Inconel®	8500	5820	3020	49,47
Ferro fundido – lento	6950	3500	2200	25
Ferro fundido – rápido	7350	5600	3200	40
Monel®	8830	5350	2720	47,24
Aço 1020	7710	5890	3240	45,41
Aço, austenítico	7910	5740	3090	45,40
Titânio	4500	6070	3110	27,32
Tungstênio	19250	5180	2870	99,72
Zircaloy™	6500	4686	2360	30,46

Tabela 4 – Comprimentos de onda para os acoplantes, sapatas, e materiais mais usados na inspeção ultrassônica industrial a 20°C.

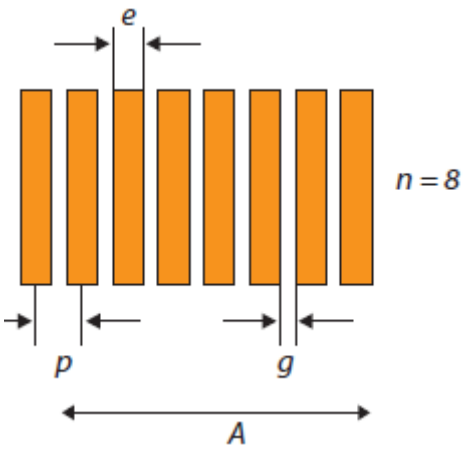
Frequência (MHz)	Comprimento de onda	
	Ondas longitudinais	Ondas transversais
Água		
1	1,5	-
2	0,75	-
4	0,4	-
5	0,3	-
10	0,15	-
Glicerina (Hamikleer®)		
1	1,9	-
2	0,95	-
4	0,48	-
5	0,38	-
10	0,19	-
Plexiglas®		
1	2,7	-
2	1,35	-
4	0,75	-
5	0,54	-
10	0,27	-

Tabela 5 – Comprimentos de onda para os acoplantes, sapatas, e materiais mais usados na inspeção ultrassônica industrial a 20°C.

Frequência (MHz)	Comprimento de onda	
	Ondas longitudinais	Ondas transversais
Rexolite®		
1	2,3	-
2	1,15	-
4	0,58	-
5	0,46	-
10	0,23	-
Aço		
1	5,9	3,2
2	3	1,6
4	1,5	0,8
5	1,2	0,6
10	0,6	0,3
Alumínio		
1	6,1	3
2	3	1,5
4	1,5	0,8
5	1,2	0,6
10	0,6	0,30

3) Características do Transdutor.

Abertura Ativa do Transdutor



$$A = n \cdot e + g \cdot (n - 1)$$

Onde:

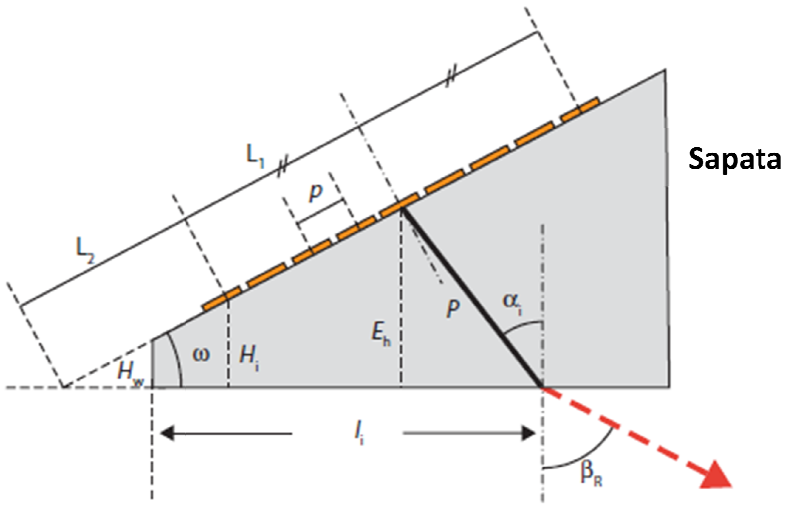
A comprimento total ativo do transdutor;

g espaço entre dois elementos adjacentes. Um valor praticado é $e < \lambda/2$;

n número de elementos;

$\boldsymbol{\lambda}$ comprimento de onda.

Transdutor na Sapata



$$\alpha_i = sen^{-1}\left(\frac{W_{sapata} sen\beta_R}{v_{peça}}\right)$$

$$E_h = (L_1 + L_2) \cdot sen\omega = [H_1 + p/2 \cdot (n-1)] \cdot sen\omega$$

$$P_{sapata} = \frac{E_h}{cos\alpha_i}$$

$$D_{sapata} = \frac{2 \cdot P}{v_W}$$

$$I_i = (L_1 + L_2) \cdot cos\omega - H_W \cdot tan\omega + P \cdot sen\alpha_i$$

Onde:

ω	ângulo da sapata
H_i	altura no meio do primeiro elemento
H_W	altura traseira da sapata
P	caminho ultrassônico na sapata
α_i	ângulo de incidência do feixe ultrassônico na sapata
β_R	ângulo de refração na peça
E_h	altura do meio do transdutor
p	passo do elemento
L_1	distância do meio do primeiro elemento ao ponto emissor
L_2	distância do ponto emissor à linha horizontal (superfície de contato da sapata)
I_i	comprimento do ponto de chegada
v_R	velocidade ultrassônica na peça
v_W	velocidade ultrassônica na sapata