AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM ONDAS ULTRA-SÔNICAS DE RAYLEIGH

Raffaelo Ribeiro Diniz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João da Cruz Payão Filho, Dr.-Ing.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, Dr.

Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, D.Sc.

Dr. Carlos Alfredo Lamy, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL AGOSTO DE 2004

DINIZ, RAFFAELO RIBEIRO

Avaliação de tensões residuais com ondas ultra-sônicas de Rayleigh [Rio de Janeiro] 2004 XII, 155 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2004) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE 1 . Ondas de Rayleigh 2 . Análise de Tensões I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Dedico minha Tese de Mestrado a todos aqueles que acreditaram no meu potencial, sejam eles familiares ou amigos, que mesmo cientes das dificuldades, fizeram-me avançar para a concluir o presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Payão pela oportunidade de ser seu orientado, ao Marcelo Bittencourt e ao Carlos Lamy pela paciência e compreensão e por deixarem-me fazer parte, mesmo que por um breve período de tempo, da comunidade científica brasileira, ao Daniel Martorelli e ao Marcos Santana pelo apoio operacional e computacional e acima de tudo a Deus por todos os momentos que fizeram-me amadurecer como homem e como engenheiro metalúrgico. Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS COM ONDAS ULTRA-SÔNICAS DE RAYLEIGH

Raffaelo Ribeiro Diniz

Agosto/2004

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Um dos métodos mais promissores para se medir tensão por ultra-som, baseia-se no efeito acustoelástico, que é o fenômeno da variação da velocidade da onda ultra-sônica em função da anisotropia acústica no material.

As ondas ultra-sônicas de Rayleigh, por se propagarem na superfície do material, podem ser utilizadas para medir tensões superficiais de um componente ou estrutura.

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento das ondas de Rayleigh em superfícies de chapas de aço, visando a avaliação de tensões superficiais.

Estuda-se o efeito da variação no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh, em função da temperatura e de carregamento trativo uniaxial. Este método usa processamento do sinal da onda ultra-sônica com correlação cruzada e melhora o tempo de amostragem do sinal utilizando a técnica multitaxas.

Foram analisados diferentes sistemas de aquisição de sinais, uma vez que para a avaliação de tensões é necessária uma resolução de nanossegundo na medição do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Este trabalho conclui que esta técnica é capaz de avaliar tensões residuais ou aplicadas, em chapas de aço.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

RESIDUAL STRESS EVALUATION WITH ULTRASONIC RAYLEIGH WAVES

Raffaelo Ribeiro Diniz

August/2004

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Metallurgical and Materials Engineering

One of the most promising methods of ultrasonic stress evaluation is based on the acoustoelastic effect which is the phenomenon of the ultrasonic wave velocity variation as a function of the material acoustic anisotropy.

As the ultrasonic Rayleigh waves travel on the material surface, they can be used to the surface stress evaluation of a component or structure.

The objective of this work is to study the behavior of the Rayleigh waves in steel plates surface focusing on the surface stress evaluation.

The effect of the Rayleigh waves time of flight as function of temperature and uniaxial applied stress is studied. This method uses the cross correlation signal processing of the ultrasonic wave and improves the sampling time of the signal using the multi-rate technique.

Different signal acquisition systems were evaluated once it is necessary a nanosecond resolution to the stress evaluation on the measurement of the ultrasonic wave time of flight.

This work concludes that this technique is suitable for the evaluation of residual and applied stresses in steel plates.

<u>ÍNDICE</u>

		Página
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Introdução	3
2.2	O ensaio de ultra-som	3
2.3	As ondas sonoras nos sólidos	4
2.4	Velocidade das ondas ultra-sônicas	8
2.5	Tensões residuais	10
2.6	Tensões residuais em soldagem	11
	2.6.1 Tensões residuais de contração	12
	2.6.2 Tensões residuais devido ao resfriamento superficial	13
	2.6.3 Tensões residuais devido à transformação de fase	13
	2.6.4 Superposição das diversas fontes de tensões	14
	2.6.5 Efeitos das tensões residuais em soldagem	14
	2.6.6 Métodos de alívio de tensões residuais	16
	2.6.6.1 Métodos mecânicos	17

2.6.6.2 Métodos térmicos	18
2.7 Influência da rugosidade nas ondas de Rayleigh	20
2.8 A textura em chapas metálicas	22
2.9 Determinação da direção de laminação de chapas	22
2.10 Influência da temperatura nas ondas de Rayleigh	23
2.11 O efeito acustoelástico	26
2.12 Determinação de tensões com ondas de Rayleigh	28
2.12.1 Características físicas das ondas de Rayleigh	31
2.13 Determinação da constante acustoelástica dos materiais	35
2.14 Estudo de tensões em tubos	36
2.14.1 Tensões em dutos enterrados sob serviço	37
2.14.2 Experiência em tubos com junta soldada circunferencial	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Introdução	39
3.2 O sistema ultra-sônico de aquisição de sinais	39
3.3 Equipamentos do sistema ultra-sônico	42

3.3.1 Gerador de pulsos ultra-sônicos Matec PR 5000	42
3.3.1.1 Escolha dos parâmetros do gerador de sinais	43
3.3.2 Transdutores de ondas de Rayleigh	46
3.3.2.1 Acoplamento do transdutor ultra-sônico	49
3.3.3 Osciloscópios digitais Tektronix	51
3.3.3.1 Aquisição de sinais ultra-sônicos	51
3.3.4 Computador PC	53
3.3.4.1 Processamento matemático dos sinais	54
3.3.5 Termopar digital	56
3.4 Experiências da influência da temperatura	57
3.5 Aquisição de sinais num tubo soldado (Tubo 08)	57
3.6 O ensaio de carregamento trativo uniaxial para a detecção de tensões superficiais	59
3.7 Constantes acustoelásticas experimentais	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Introdução	63
4.2 Comparação entre a aquisição com Sample e Average	63

4.2.1 Experiência 1	64
4.2.2 Experiência 2	71
4.2.3 Experiência 3	74
4.2.4 Experiências 4 e 5	76
4.3 Determinação da direção de laminação de chapas	77
4.3.1 Experiências 1 e 2	78
4.3.2 Experiência 3	80
4.3.3 Experiência 4	81
4.3.4 Experiências 5 e 6	83
4.4 Estudo da influência da temperatura	84
4.4.1 Aquisição de sinais no mesmo ponto por várias horas	84
4.4.2 Aquisição de sinais com grandes variações de temperatura	86
4.4.2.1 Experiência 1	87
4.4.2.2 Experiência 2	89
4.4.2.3 Experiência 3	91
4.4.2.4 Experiência 4	94

4.4.2.5 Experiência 5	95
4.4.2.6 Experiência 6	98
4.5 Detecção de tensões residuais em tubos	104
4.5.1 Aquisição de sinais num tubo sem costura (Tubo 00)	104
4.5.1.1 Comparação entre os tempos de percurso das	
regiões do tubo sem costura (Tubo 00) usando	
o processamento com interpolação L 16	108
4.5.2 Aquisição de sinais num tubo soldado (Tubo 08)	109
4.5.2.1 Comparação entre as regiões e as tiras do tubo soldado 08 com o sistema TDS 3054 B	109
4.5.2.2 Comparação entre as regiões e as tiras do tubo soldado 08 com o sistema TDS 2221 A	116
4.6 Determinação das constantes acustoelásticas experimentais	122
4.6.1 Tração uniaxial na tira 12 h do Tubo 03 com o sistema de aquisição TDS 360	123
4.6.2 Tração uniaxial na tira 12 h + do Tubo 08 com o sistema de aquisição TDS 3054 B	127

4.6.3 Tração uniaxial na tira 3 h do Tubo 08 com o sistema de aquisição TDS 3054 B	131
4.6.4 Tração uniaxial na tira 6 h do Tubo 08 com o sistema de aquisição TDS 3054 B	135
4.6.5 Tração uniaxial na tira 9 h do Tubo 08 com o sistema de aquisição TDS 2221 A	139
4.6.6 Valores obtidos das constantes acustoelásticas experimentais	143
4.6.6.1 Cálculo da constante acustoelástica teórica da tira 12 h + do Tubo 08	146
CONCLUSÕES	148
PREVISÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	150

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 151

5.

6.

1 - INTRODUÇÃO

Tensões superficiais são consideradas das mais críticas para uma estrutura ou componente. Elas podem gerar trincas superficiais que são consideradas das mais comprometedoras pelos critérios de tolerância de defeitos da Mecânica da Fratura.

Existem vários métodos para se avaliar tensões superficiais, mas todos apresentam limitações.

A técnica ultra-sônica é uma das mais promissoras. Neste trabalho, é estudada a possibilidade de se avaliar tensões superficiais através do tempo de propagação das ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh na superfície de chapas de aço.

Tensões residuais são geradas pelos processos de conformação e soldagem durante a fabricação de estruturas ou componentes de aço. São acrescidos a estas, os efeitos das tensões de serviço, as quais geram estados compressivos ou trativos, por exemplo, em tubos de aço sem costura (sem junta soldada) e com costura (soldado).

Ao poder avaliar tensões por ultra-som, vislumbra-se a possibilidade de um inspetor, além de dimensionar um defeito interno (trinca), poder medir a tensão de serviço que está atuando no componente, com o uso de um único equipamento, que adquira o sinal ultra-sônico, processe-o matematicamente e forneça a tensão. Assim pode ser decidido se o serviço deve ser interrompido ou não.

Foram analisados diferentes sistemas de aquisição de sinais ultra-sônicos. Para medir o tempo de propagação da onda ultra-sônica, foram usadas a correlação cruzada e a interpolação de sinais, obtidas por processamento matemático realizado por um *software*. Com essas análises, foi testada a capacidade dos sistemas ultra-sônicos em detectar tensões superficiais usando somente a correlação cruzada e juntamente com a técnica multitaxas (interpolação de sinais).

O esforço maior foi concentrado na obtenção de resultados com alta precisão e com resolução de nanossegundos, pois medidas otimizadas do tempo de percurso da onda ultrasônica, tornarão as normas técnicas de funcionamento dos equipamentos, no futuro, cada vez menos conservadoras, devido à elevada precisão de suas medidas.

Este trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo (capítulo 2), apresenta uma revisão bibliográfica sobre ondas ultra-sônicas e suas velocidades, tensões

residuais em soldagem, a influência de fatores que afetam o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh tais como a rugosidade, a textura cristalográfica e a temperatura e, finalmente, a técnica ultra-sônica de medição de tensões residuais e externas com ondas de Rayleigh.

O segundo capítulo (capítulo 3) de materiais e métodos, apresenta os procedimentos para a montagem e utilização do sistema ultra-sônico de aquisição de sinais, a utilização dos *hardwares* e *softwares* de apoio ao processo, as experiências do estudo da influência da temperatura no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh e faz uma descrição do ensaio de tração uniaxial utilizado para a detecção de tensões superficiais e obtenção das constantes acustoelásticas experimentais.

O terceiro capítulo (capítulo 4) aborda os resultados experimentais e a discussão dos mesmos. São mencionados os problemas encontrados durante a execução dos ensaios, a determinação dos parâmetros ideais de trabalho, o estudo da influência da temperatura no tempo de percurso da onda ultra-sônica e de detecção de tensões residuais em tubos além dos ensaios de tração uniaxial em tiras de tubos, para a detecção de tensões superficiais aplicadas. São mostrados os resultados das experiências realizadas com o intuito de ratificar ou retificar hipóteses ou conceitos.

No quarto capítulo (capítulo 5), são apresentadas as conclusões finais do presente trabalho e no quinto capítulo (capítulo 6), são dadas sugestões para trabalhos futuros no sentido de aperfeiçoar a análise de tensões com ondas superficiais de Rayleigh.

No último capítulo (capítulo 7), são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como base para a realização do presente trabalho.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – <u>INTRODUÇÃO</u>

O uso do ultra-som não está restrito somente a utilização amplamente difundida na indústria de: detecção, localização, dimensionamento e caracterização de defeitos nos materiais [1].

Dentre as novas técnicas não convencionais de seu uso, destaca-se a avaliação de tensão de materiais por ultra-som, que é considerada estratégica e de suma importância num futuro próximo, para empresas que necessitam avaliar a integridade de estruturas e componentes metálicos. É uma ferramenta para a avaliação da integridade estrutural, o que poderá reduzir os riscos causados por falhas ou rompimentos de estruturas.

A tensão nos materiais pode ser avaliada pelo estudo da variação da medida da velocidade, ou tempo de percurso, das ondas ultra-sônicas ao percorrerem o material.

Por ser uma método não-destrutivo e fácil de ser transportado, possui grande potencial para vir a ser um meio eficaz de monitorar o estado de tensões provocado por movimentações geológicas em dutos que ficam enterrados no solo e assim prevenir vazamentos, estabelecendo-se um limite de segurança para os mesmos, pois tais vazamentos trazem enormes prejuízos ambientais e financeiros [2].

Este capítulo procura dar um embasamento teórico para que se possa compreender melhor acerca da análise de tensões superficiais nos materiais.

2.2 - O ENSAIO DE ULTRA-SOM

O ensaio de ultra-som convencional é caracterizado por ser um método nãodestrutivo que tem por objetivo a detecção de defeitos ou descontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não-ferrosos.

Este exame visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade [3].

As ondas ultra-sônicas são vibrações mecânicas que se propagam na freqüência acima de 20 kHz, situando-se acima da faixa de freqüência audível ao homem.

Podem ser produzidas pela excitação de um cristal piezoelétrico, o qual, ao receber uma descarga elétrica, sofre uma deformação mecânica, produzindo uma onda que irá se propagar pela amostra a ser analisada [3,4].

2.3 - AS ONDAS SONORAS NOS SÓLIDOS

A propagação de ondas sonoras em um sólido é muito mais complexa do que em fluidos, pois um sólido tenta manter não apenas seu volume, mas também sua forma. Isto resulta num aumento da variedade de tipos de onda possíveis de se propagarem num corpo sólido [5].

Num sólido, não somente ondas longitudinais podem propagar-se como nos fluidos, mas diversos tipos de ondas como ondas transversais, ondas superficiais, etc.

Esta complexidade aumenta ainda mais se sólidos anisotrópicos forem considerados, onde as constantes elásticas, bem como suas outras propriedades físicas, dependem de direção ou orientação [5].

Com objetivo de simplificação, a discussão será restrita a sólidos homogêneos e isotrópicos. Neste caso, um sistema de três equações diferenciais parciais simultâneas sobre a propagação de ondas nos sólidos, pode ser derivado.

Segundo *Kuttruff* [5], para um sólido isotrópico e homogêneo, em coordenadas cartesianas, estas equações são:

$$\begin{cases} \mu \Delta \xi + [\mu + \lambda] \frac{\partial \theta}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \\ \mu \Delta \eta + [\mu + \lambda] \frac{\partial \theta}{\partial y} = \rho_0 \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \\ \mu \Delta \zeta + [\mu + \lambda] \frac{\partial \theta}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \end{cases}$$
(Equação 1)

- ξ , $\eta \in \zeta$ são as componentes do vetor deslocamento s;
- θ é a abreviação da expressão

$$\theta = \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z}$$
(Equação 2)

- Δ denota o operador de Laplace;
- ρ₀ é a densidade do meio de propagação da onda;
- $\mu \in \lambda$ são duas constantes elásticas chamadas de constantes de Lamé.

A dependência entre as três expressões da equação 1 é removida se for assumida a direção de propagação da onda ultra-sônica na direção do eixo x. Então, todas as derivadas parciais nas direções y e z serão iguais a zero. Logo, as expressões resultantes para as três componentes de deslocamento serão [5]:

$$\begin{cases} (2 \mu + \lambda) \frac{\partial^{-2} \xi}{\partial x^{2}} = \rho_{0} \frac{\partial^{-2} \xi}{\partial t^{2}} \\ \mu \frac{\partial^{-2} \eta}{\partial x^{2}} = \rho_{0} \frac{\partial^{-2} \eta}{\partial t^{2}} \\ \mu \frac{\partial^{-2} \zeta}{\partial x^{2}} = \rho_{0} \frac{\partial^{-2} \zeta}{\partial t^{2}} \end{cases}$$
(Equação 3)
$$\mu \frac{\partial^{-2} \zeta}{\partial x^{2}} = \rho_{0} \frac{\partial^{-2} \zeta}{\partial t^{2}}$$

A primeira das expressões da equação 3 acima, descreve uma onda longitudinal, na qual a direção da componente de deslocamento ξ é a mesma da onda sonora.

As duas expressões restantes da equação 3, descrevem ondas transversais.

Neste tipo de ondas (transversais), a direção de deslocamento da partícula é perpendicular à direção de propagação do som.

As equações das velocidades das ondas longitudinal e transversal são respectivamente [5]:

$$c_{L} = 2\sqrt{\frac{2 \mu + \lambda}{\rho_{0}}}$$
(Equação 4)
$$c_{T} = 2\sqrt{\frac{\mu}{\rho_{0}}}$$
(Equação 5)

- C_L e C_T são as velocidades das ondas longitudinal e transversal;
- $\mu e \lambda$ são as constantes de Lamé;
- ρ₀ é a densidade do meio de propagação da onda;

Numa onda longitudinal, elementos de volume que eram inicialmente cubos são esticados ou comprimidos na direção de sua propagação. Em contraste, o volume dos elementos permanece constante com ondas transversais, onde apenas sua forma é alterada. Por causa desse tipo de deformação, este tipo de onda é freqüentemente referido como "onda cisalhante".

Vale frisar que a velocidade da onda transversal é sempre menor que da onda longitudinal ao percorrer o mesmo material [6].

As constantes de Lamé introduzidas nas equações 4 e 5 acima, podem ser expressas pelas constantes elásticas dos materiais utilizadas em Engenharia:

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{E}{1+\nu}$$
(Equação 6)

$$\lambda = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$
(Equação 7)

- μ e λ são as constantes de Lamé;
- E é o módulo Young de elasticidade
- v denota o coeficiente de Poisson.

A velocidade das ondas longitudinais e transversais depende das constantes de Lamé e da densidade do meio no qual elas se propagam (equações 4 e 5).

Como as constantes de Lamé são função do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade (equações 6 e 7), a razão das velocidades das ondas longitudinais e transversais ($\mathbf{c}_L / \mathbf{c}_T$) dependerá somente do coeficiente de Poisson, a qual possui um valor mínimo de 1,41, ou seja, da raiz quadrada de 2 (dois), sendo descrita como [5]:

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$
(Equação 8)

Segundo Kuttruff [5], a velocidade das ondas de Rayleigh (c_s) não pode ser calculada com uma expressão fechada. Esta velocidade tem que ser determinada numericamente.

O resultado obtido por Kuttruff [5], é mostrado na figura 1, que relaciona a velocidade de ondas ultra-sônicas com o coeficiente de Poisson (v) através de uma razão entre as velocidades das ondas de Rayleigh (c_s) e de ondas transversais (c_T) [5].



FIGURA 1 – Relação entre a razão c_S/c_T e o coeficiente de Poisson [5]

2.4 - VELOCIDADE DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS

A velocidade de propagação de um pulso longitudinal (onde as partículas vibram na direção de propagação) em um fluido, depende apenas do módulo de elasticidade e da densidade do meio (ρ). Por analogia, pode ser mostrado que a velocidade de propagação da onda longitudinal em um sólido, será função das constantes elásticas do meio, que pela deformação elástica do material e de suas variações entre comprimento e largura assume a seguinte forma [6]:

$$c_{L} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-\mu)}}$$
(Equação 9)

onde c_L é a velocidade da onda longitudinal, E é o módulo de *Young*, μ é o coeficiente de Poisson e ρ é a densidade do meio [6].

As velocidades para ondas transversais ou cisalhantes (c_c) e superficiais de *Rayleigh* (c_s) também podem ser demonstradas utilizando-se modelos semelhantes, e suas respectivas fórmulas são [6]:

$$C_{c} = \sqrt{\frac{\mathrm{E}}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(Equação 10)

onde, G é o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento

$$C_{s} = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}}$$
(Equação 11)

Em função dos valores dos coeficientes de Poisson dos materiais, pode-se admitir que as relações entre as velocidades da onda cisalhante (c_C) e longitudinal (c_L), e da onda superficial de Rayleigh (c_S) e cisalhante sejam [6,7]:

$C_c = 0.50 C_L$	(Equação 12)

$$c_s = 0.92 c_c \tag{Equação 13}$$

2.5 - <u>TENSÕES RESIDUAIS</u>

Equipamentos e materiais estruturais empregados na indústria em geral, podem muitas vezes alcançar condições de solicitação críticas. Estas condições estão ligadas às tensões internas destes materiais, adquiridas durante seu processo de fabricação e montagem.

Tensões residuais ou internas existem em praticamente todas as estruturas rígidas, metálicas ou não, e podem ser definidas como "aquelas existentes em um corpo que não está submetido a qualquer esforço externo" [8].

Elas se originam a partir da resposta elástica do material à uma distribuição heterogênea de deformações plásticas tais como expansão térmica, transformação de fase, precipitação, deformação plástica, etc.

Como corpos sujeitos apenas à tensões internas estão em equilíbrio, todo o sistema de tensões residuais tem suas resultantes de força e momento, iguais a zero.

O processo de fabricação é um dos principais causadores de tensões residuais em estruturas.

Quando um material é submetido a processos tais como usinagem, conformação, laminação, tratamento térmico ou soldagem, quase sempre surgem nele tensões residuais, quando esses processos não são seguidos por um conveniente alívio de tensões [9].

No processo de enrolamento e desenrolamento de dutos submarinos, por exemplo, há deformação plástica do material e induzem-se deformações residuais. Além disso, há tensões residuais causadas pelas soldagens circunferenciais e longitudinais que usam solda de penetração total [10].

A soldagem é um dos processos de fabricação mais usados. Durante este processo, são geradas tensões devido à contração e expansão desiguais no cordão de solda, na zona afetada pelo calor (ZAC) e no metal de base [8,11].

Essas tensões internas podem alcançar magnitudes tão altas quanto o limite de escoamento do material, e quando combinadas com tensões de serviço causadas por esforços externos, podem exceder o limite de resistência do material, causando o colapso da estrutura [8].

2.6 - <u>TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM</u>

A soldagem é um processo caracterizado por um aquecimento altamente localizado provocando, consequentemente, tensões residuais e deformações.

O conhecimento das tensões residuais e das deformações é de fundamental importância no projeto, na fabricação e na análise da integridade de uma estrutura soldada, merecendo portanto, toda a consideração e atenção de um especialista em soldagem [8].

O estado de tensões residuais ao longo de uma junta após a soldagem, é bastante complexo; mas as tensões residuais de tração existentes nas adjacências da solda são aquelas que conhecidamente podem causar falhas prematuras [8].

O material só consegue se deformar em tensões superiores às do escoamento e as tensões trativas, inferiores ao limite de escoamento, permanecem ao final da soldagem. São as chamadas tensões residuais, trativas nesta pequena região, cuja magnitude é do próprio limite de escoamento do material na temperatura ambiente, sendo portanto, tensões elevadíssimas [8].

Para que surja uma trinca, é necessário que haja uma tensão trativa e as tensões residuais sempre favorecem o trincamento. Caso o material apresente susceptibilidade à formação de trincas de natureza metalúrgica (trincas a quente, trincas a frio, trincas de reaquecimento), é sempre importante reduzir o nível de tensões residuais ainda na soldagem [8].

O nível de tensões residuais na soldagem pode ser reduzido através de préaquecimento, que reduz a velocidade de resfriamento e facilita a acomodação das tensões.

Se as tensões residuais não forem aliviadas após a soldagem, dependendo do tipo de material e do estado de tensões presente no componente, podem ocorrer dois tipos de comportamento quando as tensões aplicadas em serviço se somam às tensões residuais de soldagem [8]:

 O material pode escoar (deformar), aliviando as tensões, e com isso, a tensão final (residual + aplicada) não consegue aumentar sua magnitude até chegar aos níveis do limite de resistência do material; O material pode não escoar e a tensão final atinge o limite de resistência do mesmo, causando a ruptura do componente em serviço. Na realidade, a formação da trinca é o alívio das tensões que ultrapassaram a tensão limite de resistência do material.

As tensões residuais em soldagem são tensões internas, em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a execução da operação de soldagem. As tensões residuais são geradas por escoamentos parciais localizados que ocorrem durante o ciclo térmico de soldagem. Diversas são as fontes de tensões residuais em soldagem [11]:

- Contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem
- Resfriamento superficial mais intenso
- Transformações de fase

2.6.1 - TENSÕES RESIDUAIS DE CONTRAÇÃO

A contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal fonte de tensão residual. O nível de tensões depende do grau de restrição da estrutura. Na maioria dos casos, a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda. Nessa direção, as tensões são muito próximas do limite de escoamento.

Não dispondo de rigidez suficiente, as peças se deformam tendendo a aliviar as tensões residuais.

As tensões residuais e deformações de contração aparecem por várias condições:

- Movimento da fonte de calor
- Variação do grau de restrição à medida que a solda é depositada
- Soldagem em vários passes

O pré-aquecimento a temperaturas inferiores a 150°C praticamente não reduz o nível de tensões residuais. Soldagens realizadas com baixa energia ajudam a diminuir as deformações.

As deformações podem ser evitadas com a utilização de dispositivos de montagem, mas quanto maior o grau de restrição, mais elevadas serão as tensões residuais de soldagem.

Se as tensões de contração atuam em duas ou três direções, dependendo da forma e das dimensões da peça, as possibilidades de plastificação diminuem e as tensões residuais de contração podem atingir valores superiores ao limite de escoamento.

2.6.2 - <u>TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO RESFRIAMENTO</u> <u>SUPERFICIAL</u>

O resfriamento de uma junta soldada não é homogêneo ao longo de sua espessura.

Sua superfície será resfriada com maior intensidade do que o seu interior, mesmo considerando-se um resfriamento realizado somente pelo ar ambiente. Desta forma, além do gradiente de temperatura ao longo da largura e do comprimento do conjunto soldado, será também estabelecido um gradiente de temperatura ao longo da espessura da solda, que poderá ocasionar deformação plástica localizada e, consequentemente, tensões residuais.

Ocorrerá um nível elevado de tensões residuais deste tipo, quando a junta soldada apresentar elevado gradiente de temperatura ao longo da espessura, por exemplo no caso de chapas espessas e baixo limite de escoamento do material nesta faixa de temperatura.

Considerando-se, apenas para efeito de raciocínio, o resfriamento superficial mais rápido como única fonte de tensão residual atuante, obter-se-á uma distribuição de tensões residuais de compressão na superfície em equilíbrio com tensões residuais de tração na região interna ao cordão.

2.6.3 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO À TRANSFORMAÇÃO DE FASE

A transformação de fase da austenita para ferrita, bainita ou martensita ocorre com aumento de volume. Desta forma, numa junta soldada, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofre transformação de fase tenderá a se expandir, o que será consequentemente impedido, pelo menos na direção longitudinal da solda, pelo restante do material mais frio e que não se transformou.

Explica-se então, a geração de tensões residuais de compressão na região transformada e de tração na região não transformada.

Este efeito será mais acentuado, quando a região transformada for de área reduzida e quando a transformação de fase ocorrer em temperatura relativamente baixa, isto é, quando na temperatura de transformação de fase, o material já tiver um valor elevado de limite de escoamento.

2.6.4 - <u>SUPERPOSIÇÃO DAS DIVERSAS FONTES DE TENSÕES</u> <u>RESIDUAIS</u>

As três fontes de tensões residuais em soldagem descritas anteriormente, não são independentes.

Consequentemente, a distribuição das tensões residuais, decorrentes destes efeitos atuando simultaneamente, será de grande complexidade. Foi comprovado experimentalmente que é válida a superposição linear de cada efeito, na determinação do estado de tensões residuais resultante [11]. Sua aplicação torna mais fácil o estudo deste complexo estado de tensões [11].

2.6.5 - EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM

Além das deformações citadas anteriormente, as tensões residuais influenciam o comportamento das soldas de diversas maneiras [11]:

- Aumentam o risco de ruptura frágil
- Alteram a estabilidade dimensional
- Diminuem a resistência à corrosão, notadamente à corrosão sob tensão
- Modificam a resistência à fadiga
- Afetam a detectabilidade de descontinuidades no exame por ultra-som

Afetam o risco de fissuração

Três condições são necessárias para o início de uma ruptura frágil:

- Nível de tensões suficientemente elevado
- Presença de um entalhe (estado triaxial de tensões)
- Temperatura inferior à temperatura de transição

Estas condições devem existir simultaneamente para que a fratura se inicie. O risco será praticamente inexistente se uma destas condições não for satisfeita, por exemplo, se a temperatura for elevada ou se não existirem entalhes ou tensões.

A usinagem de uma peça soldada e não aliviada termicamente, removerá material tensionado, promovendo uma redistribuição de tensões e, consequentemente, poderá causar deformação. O tratamento térmico de alívio de tensões é prática altamente aconselhável quando se necessita de uma perfeita estabilidade dimensional após a soldagem.

Em presença de determinados meios corrosivos, os materiais metálicos estão sujeitos a apresentar trincas nas regiões submetidas a tensões estáticas de tração. As tensões residuais de soldagem são particularmente perigosas em virtude de sua intensidade.

Em refinarias de petróleo e petroquímicas, é comum a aplicação de tratamento térmico de alívio de tensões para prevenir a corrosão sob tensão.

O determinante da resistência à fadiga de uma estrutura soldada é normalmente, a sua geometria.

Os defeitos de solda e as variações de forma apresentam, geralmente, influência muito maior do que as tensões residuais e as propriedades dos materiais. O efeito das tensões residuais no comportamento à fadiga de uma junta soldada, normalmente é relacionado com a razão das tensões cíclicas externamente aplicadas.

As tensões residuais de soldagem têm grande influência e podem ser prejudiciais na vida à fadiga da estrutura se a faixa de tensões externamente aplicadas atingir o campo de compressão, pois se forem campos de tração, as tensões residuais terão normalmente pequena influência na vida à fadiga.

É importante frisar que, na realidade, o que comandará a resistência à fadiga será o ciclo de tensões efetivamente atuante na junta soldada.

As superfícies de pequenos defeitos de soldagem, localizadas em regiões com tensões residuais de compressão, são mantidas em contato antes da realização do tratamento térmico.

O alívio de tensões e a deformação plástica que acompanham o próprio tratamento térmico, promoverão a abertura destes pequenos defeitos e, consequentemente, um aumento da intensidade dos sinais refletidos durante o ensaio por ultra-som. Isto poderá causar a não aceitação de uma junta soldada que anteriormente à execução do tratamento térmico de alívio de tensões, era perfeitamente aceita pelos padrões considerados.

As tensões residuais e as deformações resultantes do aquecimento localizado são os fatores presentes em praticamente todos os mecanismos de fissuração em soldagem:

- Fissuração a quente
- Fissuração a frio
- Fissuração no reaquecimento

2.6.6 - MÉTODOS DE ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais e deformações em soldagem se originam de complexas interações mecânicas e/ou térmicas [11].

O alívio de tensões pós-soldagem nem sempre é necessário, pois existem condições onde as tensões residuais podem ser aliviadas em serviço [8].

Geralmente, materiais de pequena espessura e que apresentam baixo limite de escoamento (aços ferríticos, aços inox austeníticos, ligas não-ferrosas), acumulam menor nível de tensões e, quando esta tensão residual é somada à tensão de serviço, ocorre o alívio de tensões através de deformações plásticas localizadas (escoamento), não exigindo nenhum tipo de tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem.

No caso do alívio de tensões ser necessário, podemos reduzir tensões e deformações provenientes de soldagem por meio de métodos mecânicos ou térmicos. Estes métodos são mostrados na tabela seguinte (Tabela 1).

MÉTODO	TRATAMENTO
MECÂNICO	SOBRECARGA
MECANICO	POR VIBRAÇÃO
	NO INTERIOR DE FORNOS
TÉRMICO	LOCALIZADO

TABELA 1 – Métodos de alívio de tensões residuais [11]

2.6.6.1 - MÉTODOS MECÂNICOS

Existem basicamente dois tipos de métodos mecânicos para aliviar as tensões residuais de uma estrutura soldada:

 <u>Sobrecarga</u> - Consiste num aumento gradativo de carga, por exemplo, pressurização de vasos e tubulações até um certo valor máximo requerido e, posteriormente, decréscimo também gradativo desta mesma carga, onde o alívio de tensões será conseguido pela transformação de deformações elásticas em plásticas.

Outro exemplo é o martelamento de soldas, que não deixa de ser uma sobrecarga localizada.

<u>Vibração</u> - Reduz as tensões residuais de forma análoga à sobrecarga, onde o aspecto mais importante deste tipo de tratamento é a sua natureza cíclica, que utiliza vibradores com faixas de freqüências de até 100 Hz, para produzirem vibrações de ressonância na estrutura soldada, sendo conectados na estrutura a

ser tratada. Sua freqüência de vibração é aumentada gradativamente até atingir uma das freqüências naturais da estrutura, quando ocorrerá ressonância, sendo mantida durante um certo número de ciclos. Em seguida, a freqüência é aumentada até atingir outra ressonância e assim, sucessivamente, até o limite superior da faixa de freqüência do vibrador.

O tratamento é a seguir repetido, com a mesma velocidade de operação, sem interrupções durante as ressonâncias. A estrutura deverá estar apoiada em blocos de borracha, permitindo completa liberdade de deformação.

2.6.6.2 - MÉTODOS TÉRMICOS

O alívio térmico é conhecido como tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), cujas temperaturas dependem do tipo de material soldado [12].

A etapa principal deste alívio de tensões é o aquecimento, e as variáveis taxa de aquecimento e temperatura de patamar são realmente determinantes. Porém, quando se alivia componentes de grande espessura, deve-se garantir que haja a uniformidade de temperatura em toda a seção do componente e o tempo de permanência nesta temperatura, geralmente é função da espessura (geralmente 1 hora por polegada de espessura, e mínimo de 2 horas), devendo ser controlado. Geralmente usa-se termopares para esse controle [8].

Os métodos térmicos além de aliviarem as tensões residuais de soldagem, podem também realizar uma série de efeitos metalúrgicos benéficos na estrutura tratada.

Deve-se aquecer uniformemente a peça, de modo que o limite de escoamento do material fique reduzido a valores inferiores aos das tensões residuais. Nesta condição, as tensões residuais provocam deformações plásticas locais e diminuem de intensidade.

Somente os tratamentos feitos em temperaturas superiores a 500°C, para os aços carbono, são realmente eficazes [11].

Os aços resistentes à fluência requerem temperatura, ou tempo de tratamento, mais elevados que dos aços carbono; quanto maior a quantidade de elementos de liga, maiores serão as temperaturas de alívio.

Na soldagem em vários passes, a sucessividade dos passes não reduz a intensidade das tensões residuais.

O tratamento térmico no interior de fornos é o procedimento preferível e deverá ser usado sempre que possível. A medição e o controle da distribuição de temperaturas no componente tratado, deverão ser realizados por meio de termopares ligados à estrutura.

Por motivos econômicos, construtivos ou técnicos, quando não é conveniente o tratamento térmico no interior de fornos, utiliza-se o tratamento térmico localizado que poderá ser realizado por diversos métodos:

- Aquecimento por resistência elétrica
- Aquecimento por radiação eletromagnética
- Aquecimento por indução
- Aquecimento exotérmico

O tratamento térmico localizado, produzirá deformações plásticas na estrutura tratada.

O gradiente térmico, durante o aquecimento localizado, deverá ser cuidadosamente controlado para evitar a introdução, na estrutura que está sendo tratada e após o resfriamento da mesma, de um novo estado de tensões mais perigoso do que o existente anteriormente.

Como o aquecimento durante o TTAT (tratamento térmico de alívio de tensões) é generalizado e as taxas de aquecimento e resfriamento são controladas, não existe a geração de tensões no resfriamento, garantindo menor nível de tensões ao final do TTAT.

Porém, pode haver trincamento durante o TTAT se o material apresentar susceptibilidade à formação de trincas de reaquecimento ou se a taxa de aquecimento for muito alta, não permitindo que haja deformação plástica.

Outro fator importante, é o empenamento que pode ocorrer porque as tensões residuais são relaxadas por deformação, e se o componente não for muito bem apoiado, a deformação pode ocorrer de forma não controlada, até mesmo chegando a inviabilizar o uso do componente.

2.7 – <u>INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NAS ONDAS DE RAYLEIGH</u>

As superficies, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades. E essas irregularidades compreendem dois grupos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos [1].

- Erros macrogeométricos São erros de forma, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil, etc. Dentre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retilineidade, planicidade, circularidade, etc.
- Erros microgeométricos São erros conhecidos como rugosidade.

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias, que caracterizam uma superfície [1].

Todo material apresenta uma rugosidade superficial que pode ser diminuída através de uma usinagem superficial. Porém, em certos casos, não há a possibilidade de melhorarse o acabamento superficial da peça, como por exemplo, no caso de peças jateadas com microesferas de aço, pois o acabamento (usinagem) poderia diminuir a tensão compressiva gerada pelo jateamento [1].

Quando defeitos de qualquer espécie (trincas, arranhões, irregularidades, etc.) estão presentes na superfície na qual uma onda de Rayleigh está se propagando, a onda é atenuada da mesma maneira que as ondas longitudinais e transversais, quando estas propagam-se no material [1,13,14,15,16].

A rugosidade superficial pode ser considerada como uma seqüência de defeitos superficiais. O grau de sensibilidade de uma onda de Rayleigh é dependente do tamanho dos defeitos [1].

No caso de uma rugosidade muito pequena, a onda de Rayleigh tenderá a ignorar a seqüência de vales e picos de pequena amplitude e percorrerá a distância determinada em menor tempo. Porém, conforme a superfície de uma amostra torna-se mais rugosa, a amplitude dos vales e picos torna-se mais aguda e tem o mesmo efeito de defeitos de maior tamanho, no qual a onda torna-se sensível [1].

Neste caso, a onda ultra-sônica superficial de Rayleigh, "percebe" estas saliências e reentrâncias e passa a percorrer estes vales e picos, consequentemente aumentando a distância percorrida e o tempo de percurso (velocidade da onda ultra-sônica diminui).

Esta atenuação ocorre, devido ao fato da onda ultra-sônica percorrer o material e deparar-se com uma mudança brusca de direção por efeito da geometria do material, que forma "obstáculos" ao percurso da onda, como por exemplo, o efeito de um canto vivo, um defeito ou um rebaixamento [1,13,14,15,16].

Dependendo do tamanho deste "obstáculo", do adoçamento do canto vivo e do comprimento de onda da onda ultra-sônica, esta pode ignorar o "obstáculo" ou contorná-lo [1].

Sucessivas mudanças de direção, pelo fato da onda contornar o "obstáculo", resultam numa considerável atenuação. Por isso, o cristal receptor do transdutor recebe a onda e a transforma em um sinal extremamente baixo e de pouca definição [1].

Segundo Araújo [1], a influência da rugosidade superficial sobre o tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh depende fundamentalmente do comprimento de onda desta onda ultra-sônica.

Este comprimento de onda pode ser alterado, através da variação da freqüência. Ela deve ser ajustada, de forma a obter-se um comprimento de onda que torne a onda insensível à rugosidade do material.

Para maiores freqüências, o comprimento de onda é menor. A onda de Rayleigh percorre mais superficialmente o material, aumentando a sensibilidade da mesma à rugosidade. Para frequência menores, a onda atua mais profundamente, sendo portanto, menos sensível à rugosidade.

2.8 – <u>A TEXTURA EM CHAPAS METÁLICAS</u>

Um sólido policristalino consiste de grãos com orientações cristalográficas distribuídas aleatoriamente, de modo que apresenta, em sua distribuição global, propriedades elásticas isotrópicas.

Em geral, durante os processos de fabricação, ao serem mecanicamente trabalhados, ocorre a presença da orientação cristalina preferencial nestes sólidos, a textura, o que a exemplo das tensões, torna-os acusticamente anisotrópicos [17].

A textura influencia na velocidade da onda ultra-sônica na mesma ordem de grandeza que as tensões [18]. Logo são necessários esforços na tentativa de separar os efeitos da textura dos efeitos da tensão [6,19,20].

O ideal seria usar corpos de prova de referência, como por exemplo, medir as tensões residuais causadas pelo processo de laminação num material onde pode ser garantido que ele tem a mesma microestrutura. Na extremidade da chapa, a tensão é próxima de zero, assim, a velocidade da onda ultra-sônica nesta região estaria mais afetada pela textura. Esta medida de velocidade seria então uma referência.

Medindo uma chapa laminada com tensão, e a partir da referência, comparando-se as medidas de velocidade da onda, consegue-se medir a tensão com excelente precisão.

Vale frisar que as ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh são bastante sensíveis à textura. Isto pode ser verificado girando os transdutores e percebendo que a mudança da direção de propagação deste tipo de onda ultra-sônica, afeta o tempo de percurso da mesma.

2.9 – <u>DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO DE CHAPAS</u>

A textura dos metais torna-os acusticamente anisotrópicos, interferindo na velocidade da onda ultra-sônica e consequentemente na avaliação de tensão por ultra-som [21].

Bittencourt [6] mostra, que através de um sistema ultra-sônico para medida de tempo de percurso das ondas ultra-sônicas, é possível identificar de uma maneira rápida e não-destrutiva, a direção de laminação de chapas metálicas.

A laminação é o processo mais utilizado na conformação mecânica dos metais. Com a deformação plástica induzida no processo, os grãos do metal adquirem uma orientação preferencial, a textura, paralela à direção de laminação.

Como metais laminados apresentam algumas propriedades mecânicas que variam em função da sua direção de laminação, a sua determinação é fundamental para evitar-se problemas no acabamento de chapas.

No aço, o tempo de percurso da onda ultra-sônica é menor quando a direção de polarização é paralela à direção de laminação (DP // DL) [6]. Então, girando-se o transdutor ultra-sônico acoplado à chapa de aço de 90^{0} , o tempo de percurso da onda ultra-sônica será maior pois a direção de polarização estará perpendicularmente à direção de laminação, [6].

Desta forma, é possível verificar a direção de laminação de chapas de aço.

Este método de determinação da direção de laminação por ultra-som, é simples, rápido e eficiente, não sendo necessário realizar uma caracterização metalográfica do material.

2.10 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS ONDAS DE RAYLEIGH

Pesquisas mostram que para uma maior temperatura, teremos um tempo maior de percurso da onda ultra-sônica [22,23].

A velocidade da onda ultra-sônica será menor ao atravessar o material, ou seja, a onda atravessa o material mais lentamente, pois a densidade do material é menor, sendo necessário um tempo maior para a onda atravessá-lo.

Segundo Pio [24], a temperatura altera o tempo de percurso da onda ultra-sônica, pois foi verificado que uma variação de $1,1^{\circ}$ C na temperatura da água, implica em variações no tempo de trânsito da <u>onda ultra-sônica longitudinal</u> da ordem de 57 ns.

Na propagação da <u>onda longitudinal</u> em materiais metálicos, essa influência é menor, mas é relevante, devendo ser considerada [24].

Bray [25], mostra que a propagação da <u>onda ultra-sônica cisalhante no aço</u> tem seu tempo alterado segundo a seguinte equação:

$$C_{\rm C} = C_{\rm C}^{0} - 0,38 \,({\rm T} - 25^{\rm O} \,{\rm C})$$
 (Equação 14)

onde, C_C é a velocidade da onda cisalhante afetada pela temperatura, C_C^0 é a velocidade da onda na temperatura de referência (25° C), o valor 0,38 é a constante de variação da velocidade e T é a temperatura de trabalho.

Isto significa que para uma mudança de 1º C na temperatura de uma chapa de aço de 4 mm de espessura, ocorre uma variação de 0,2 ns (nanossegundos) no tempo de percurso da <u>onda ultra-sônica cisalhante</u>.

Substituindo-se a equação 13, que relaciona a velocidade da onda superficial de Rayleigh com a velocidade da onda cisalhante, na equação acima (equação 14), chega-se à fórmula da alteração da velocidade da onda ultra-sônica de Rayleigh com a temperatura:

$$C_{s}/0,92 = C_{s}^{0}/0,92 - 0,38 (T - 25^{\circ} C)$$

 $C_{s} = C_{s}^{0} - 0,35 (T - 25^{\circ} C)$ (Equação 15)

De acordo com a equação 15, foi observado que a relação entre a velocidade da onda de Rayleigh e a variação de temperatura é linear.

Segundo Duquennoy [22], o efeito da temperatura ambiente não influencia nos resultados das velocidades das ondas superficiais de Rayleigh. Se forem adquiridos vários sinais num material cuja temperatura seja a mesma da temperatura ambiente e esta temperatura for mantida constante, as velocidades das ondas ultra-sônicas desses sinais serão teoricamente as mesmas.

Porém, foi constatado que quanto maior a temperatura ambiente, maior era o tempo de percurso da onda ultra-sônica [22].

Pantermuehl [23] também estudou a influência de variações de temperatura no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh.

Medidas de sinais foram feitas sob diferentes temperaturas num pino de aço 1018, que era aquecido progressivamente em um forno, com estabilização da temperatura em toda a amostra.

Pantermuehl [23] comprovou experimentalmente, que quanto maior a temperatura, maior o tempo de percurso da onda ultra-sônica, através da aquisição de sinais ultra-sônicos em diferentes temperaturas.
Graficamente, isto resultou num comportamento linear da curva tempo de percurso da onda ultra-sônica versus temperatura, cujos resultados experimentais são mostrados na Tabela 2 [23].

Através dos resultados experimentais [23], foi observado que o tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh aumenta com a temperatura.

PONTOS	TEMPERATURA (⁰ F)	TEMPO DE PERCURSO (ns)
1	71	0
2	83	34
3	94	76
4	110	152
5	132	230

TABELA 2 – Variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica com o aumento de temperatura do pino de aço 1018 [23]

Além disso, Pantermuehl [23] enfatizou que, se as medidas de temperatura ou tempo de percurso não tiverem acurácia, erros irão ocorrer no cálculo das tensões no material. A aquisição de sinais deve ser feita de uma maneira altamente rigorosa, de forma que não haja erros de medida.

Segundo Delsanto [26], leves variações de temperatura ou interferências eletromagnéticas externas afetam a velocidade das ondas de Rayleigh.

Foi achada uma relação linear entre a variação de temperatura e a velocidade dessas ondas, mostrando que as ondas de Rayleigh podem ser usadas para determinar as constantes elásticas de materiais e as tensões presentes neles [26].

Esse comportamento linear requer que diferentes efeitos sejam considerados separada e independentemente [26].

Segundo Ditri [27], há fenômenos físicos que atuam em materiais, mudando a velocidade das ondas ultra-sônicas que os percorrem, onde os mais relevantes são a textura inicial e variações de temperatura.

2.11 - <u>O EFEITO ACUSTOELÁSTICO</u>

Foi observado, que a velocidade de ondas ultra-sônicas ao passar no interior de um sólido elástico tensionado, não era constante como num sólido isotrópico [4]. Notou-se também, que esta variação da velocidade da onda ultra-sônica dependia do estado de tensão do material, da direção de propagação da onda ultra-sônica em relação aos planos cristalinos e da direção da movimentação das partículas do meio pela passagem da onda [28,29].

Este fenômeno, da variação da velocidade da onda ultra-sônica ao passar através de um material elástico sob tensão é o efeito acustoelástico [30,31].

Quando uma onda ultra-sônica se propaga numa determinada direção em um meio elástico, a sua velocidade depende, fundamentalmente, das constantes elásticas de segunda ordem do meio e, portanto, da sua simetria estrutural.

A presença de um estado de tensões elásticas produz pequenas mudanças nesta velocidade de propagação (fenômeno conhecido como efeito acustoelástico), sendo que a velocidade de propagação da onda ultra-sônica passa a depender também das constantes elásticas de terceira ordem.

A teoria linear elástica é adequada para descrever o comportamento elástico dos materiais, usando a lei de *Hooke*. Nesta abordagem, a energia de deformação elástica é desenvolvida para deformação de segunda ordem, introduzindo as constantes de segunda ordem de *Lamé* ($\mu e \lambda$), no caso de meios isotrópicos.

Entretanto, a descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão no material à velocidade de onda ultra-sônica, somente é possível considerando a teoria não-linear da elasticidade.

Murnaghan desenvolveu a conceituação para a energia de deformação elástica para as deformações de terceira ordem e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem (l, m e n, então chamadas constantes de Murnaghan) [32].

Tendo por base a teoria de Murnaghan, Hughes e Kelly [33] desenvolveram as relações básicas entre a velocidade da onda ultra-sônica e a deformação (tensão) no sólido, por onde essa onda se propaga.

A determinação das tensões em materiais possui duas complicações.

Primeiro, porque as medidas de velocidade da onda ultra-sônica no estado sem tensão têm que ser conhecidas com exatidão apropriada, e isso é difícil, uma vez que, variações microestruturais do material, têm influência sobre a velocidade da onda da mesma ordem de grandeza da tensão.

Segundo, porque as medidas requerem o conhecimento do caminho percorrido pela onda, assim como medidas do tempo de percurso, com resolução ao menos uma ordem de grandeza maior que o efeito da tensão observado, o que na prática muitas vezes não é possível.

As equações desenvolvidas por *Hughes* e *Kelly*, podem ser combinadas de maneira a facilitar sua utilização na prática. Elas podem ser representadas em termos da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma [12]:

Onda longitudinal,

$$\frac{V_{ii} - V_l^0}{V_l^0} = k_1 \sigma_i + k_2 (\sigma_j + \sigma_k)$$
(Equação 16)

Onda cisalhante,

$$\frac{V_{ij} - V_t^0}{V_t^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k$$
 (Equação 17)

onde $V_1^0 e V_t^0$ são as velocidades das ondas longitudinal e transversal respectivamente no material sem tensão, V_{ij} é a velocidade de uma onda ultra-sônica propagando na direção *i* e polarizada na direção *j*, σ_i é a tensão principal na respectiva direção e as constantes k_1 a k_5 são chamadas de constantes acustoelásticas normalizadas.

Cada constante acustoelástica corresponde a uma situação da propagação da onda e da direção de polarização das partículas, e são obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas ultra-sônicas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo

variações muito pequenas, a partir das equações acima, cada equação gerando uma constante [34].

2.12 – <u>DETERMINAÇÃO DE TENSÕES COM ONDAS DE RAYLEIGH</u>

A deformação plástica não uniforme de materiais devido a processos como conformação ou soldagem podem geralmente gerar tensões residuais. Se não forem detectadas, estas tensões residuais podem levar à falhas.

A técnica de determinação de tensões residuais com ondas de Rayleigh, detecta a presença de tensões residuais e mapeia o gradiente de tensões residuais na chapa.

Estas ondas requerem um contorno para a sua existência, sendo ondas livres em que a movimentação das partículas ocorre em apenas uma camada fina, de espessura equivalente a um comprimento de onda, da superfície de um sólido semi-infinito e sua energia decai com a profundidade.

Sua profundidade de penetração pode ser controlada pelo ajuste da freqüência da onda. Usando esses atributos, é possível determinar a magnitude e a profundidade das tensões residuais no material que está sendo testado.

Considerando a característica do meio (material isotrópico, etc.) e sua estrutura cristalográfica (cúbica, etc.), a velocidade da onda ultra-sônica pode ser determinada a partir da matriz de tensões derivada por Murnaghan e das equações de movimento [12]. Se o material é homogêneo e isotrópico, então a matriz de tensões pode ser simplificada por simetria [12].

A matriz de tensões resultante possui duas variáveis independentes que determinam o comportamento elástico do material. Estas constantes são chamadas de constantes de Lamé e a velocidade ultra-sônica no material é dependente somente dessas duas constantes.

$$\rho_0 V_1^2 = \lambda + 2\mu \ e \ \rho_0 V_t^2 = \mu$$
 (Equações 18 e 19)

As relações entre tensões e velocidades ultra-sônicas para diferentes modos de propagação em meios elásticos isotrópicos, foram derivados por Hughes e Kelly, que

criaram estas relações para compressão uniaxial ao longo do eixo dos x com propagação das ondas perpendicularmente ao eixo dos x.

Estas relações envolvem velocidades de ondas longitudinais e transversais, as constantes elásticas de Lamé, coeficientes elásticos de terceira ordem, a densidade inicial do material, a tensão compressiva uniaxial ao longo do eixo dos x e são cuidadosamente descritas por Bittencourt [6] e Lindgren [32].

A partir dessas equações, uma relação geral entre a velocidade medida da onda ultra-sônica e tensões aplicadas pôde ser estabelecida:

$$v(T) = v(0) (1 + CT^{1/2})$$
 (Equação 20)

- v (0) é a velocidade da onda na ausência de tensões
- v (T) é a velocidade da onda sob tensão estática
- C é a constante acustoelástica do material

Contudo, medições da velocidade da onda ultra-sônica como função da tensão realizadas por Lindgren [32], mostraram uma relação linear entre tensão e velocidade. Foi mostrado que esta relação também se adequa muito bem a ondas superficiais [32].

A aparente discrepância entre o comportamento quadrático e a relação linear observada por Lindgren [32], reside na maneira com a qual essas medidas foram executadas.

A relação quadrática, quando plotada, aparece como uma curva parabólica. Contudo, para pequenas mudanças na velocidade inferiores a 1%, a porção da parábola é tão pequena que se aproxima de uma dependência linear.

Esta a razão pela qual a relação acima é comumente dada como uma equação linear da forma:

$$v(T) = v(0)(1+CT)$$
 (Equação 21)

Deve ser notado que essa relação é verdadeira para variações de velocidade e tensões aplicadas que foram usadas para investigar o comportamento acustoelástico [32].

A fórmula acima (equação 21), mostra de uma forma simplificada, como se obtém a constante acustoelástica do material [32]. O valor experimental dessa constante é obtido através da curva velocidade da onda ultra-sônica versus tensões e corresponde à inclinação (coeficiente angular) da reta do gráfico.

Uma vez que a tensão aplicada atinge o limite de escoamento da amostra, deformação plástica irá ocorrer, o que levará a uma relaxação de tensões e a mudanças nas constantes elásticas do material, o que consequentemente resultará em mudanças na velocidade das ondas ultra-sônicas.

Segundo Lindgren [32], em geral, a velocidade ultra-sônica decresce assim que a deformação plástica ocorre.

Foi mostrado que a magnitude da velocidade ultra-sônica pode ser prevista por mudanças nas constantes elásticas de segunda e terceira ordem do material que está sendo investigado [32].

Em materiais homogêneos e isotrópicos, o efeito de um campo de tensões residuais gera anisotropia acústica [32].

O método ultra-sônico mais comum é baseado na técnica de birrefringência acústica, onde ondas cisalhantes horizontais polarizadas ortogonalmente propagam-se através do material. Desde que haja uma relação linear entre as velocidades ultra-sônicas e as tensões, a diferença normalizada na velocidade de fase da onda pode ser relacionada aos componentes do plano de tensões [32].

Contudo, os materiais mais comuns exibem algum grau de textura granular como resultado de deformação plástica durante o processo de fabricação, isto é, durante a extrusão ou laminação, por exemplo. Ou seja, ao serem mecanicamente trabalhados, ocorre a presença de orientação cristalina preferencial, tornando-os acusticamente anisotrópicos.

A textura dos materiais aparece como um problema para a medida de tensão por ultra-som, pois pode causar mudanças na velocidade ultra-sônica com suficiente magnitude de modo a mascarar quaisquer mudanças relacionadas ao campo de tensões. Isto limita a eficiência da técnica de birrefringência acústica. Torna-se necessário, portanto, separar os efeitos da textura dos efeitos da tensão [32].

30

2.12.1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS ONDAS DE RAYLEIGH

As ondas ultra-sônicas de Rayleigh possuem algumas características únicas, que as tornam ideais para determinação da magnitude de tensões residuais e do perfil de tensões nos materiais [32].

São um exemplo de ondas que possuem uma combinação de movimentos transversais e longitudinais pois possuem uma componente longitudinal e uma componente transversal verticalmente polarizada que se combinam, fazendo com que as partículas em um sólido, pela qual as ondas passam, realizem movimentos elípticos [26,34].

A componente longitudinal é orientada ao longo do eixo horizontal da superfície da onda, enquanto a componente transversal ou cisalhante é orientada ao longo do eixo vertical [37].

Segundo Viktorov [37], o eixo maior da elipse é perpendicular a superfície do sólido. O eixo menor é paralelo à direção de propagação da onda. Ao passo que a profundidade aumenta, os eixos deste movimento elíptico diminuem [35,36].

Para propagação da onda no sentido positivo do eixo x, as partículas da superficie realizam uma movimentação no sentido horário (*clockwise*), enquanto as partículas em uma profundidade de mais de um quinto do comprimento de onda (maior do que 0,2 λ_R), realizam movimentos no sentido anti-horário [37].

Os semi-eixos maiores são perpendiculares ao contorno do semi-espaço e os semieixos menores são paralelos à direção de propagação da onda. A excentricidade das elipses depende da distância à superfície e do coeficiente de Poisson do meio elástico.

O decaimento rápido da amplitude das ondas de Rayleigh relativo à profundidade de penetração é exponencial, e ocorre pelo fato de que a principal porção de energia das ondas longitudinais e transversais que a compõem, ser irradiada ao longo da profundidade do material [38,39]. Além disso, defeitos também causam atenuação do sinal [13,14,15,16].

Ou seja, há atenuação da energia acústica (absorção e espalhamento da energia acústica), inerente às características típicas das ondas longitudinais e transversais, pois como já foi mencionado, as ondas de Rayleigh são uma combinação destas ondas [32,37].

O processo de acabamento superficial de um metal, interfere na atenuação das ondas de Rayleigh pois diferentes processos induzem a diferentes acabamentos superficiais, levando a diversas estruturas e camadas superficiais e consequentemente a diversos comportamentos da onda.

O método usado com ondas de Rayleigh para detectar tensões, pode eliminar o efeito da orientação dos grãos (textura), devido à laminação na amostra [32].

Enquanto mudanças na direção de propagação da onda de Rayleigh no que diz respeito à direção de laminação, alteram a velocidade da onda [39], a rotação dos transdutores não é necessária para determinar-se o estado de tensões na amostra.

Isto ocorre pois a componente transversal ou cisalhante da onda de Rayleigh é perpendicular à direção de textura, ao invés de ser paralela à direção de textura no caso do método da birrefringência acústica. A componente transversal da onda de Rayleigh examina o material e se houver alguma tensão residual presente, a velocidade da onda de Rayleigh irá mudar porque a componente cisalhante ou transversal é sensível a presença de campos de tensões sem haver a necessidade de mudança da orientação dos transdutores geradores desse tipo de onda [32].

Isto elimina a necessidade de mudança da direção de polarização para detectar campos de tensões como requerido no método da birrefringência. Somente mudanças na velocidade das ondas de Rayleigh como função da sua profundidade sub-superficial devem ser monitoradas [32].

As ondas de Rayleigh possuem várias vantagens adicionais em relação às ondas cisalhantes na determinação da quantidade de tensões presentes numa amostra. Elas não são dispersivas, significando que a velocidade da onda de Rayleigh é independente da freqüência de geração e torna-se aplicável a todos os tipos de materiais [32,33].

Uma outra característica importante é a capacidade de ser utilizada em superfícies curvas e de geometria complexa, pelo fato de se propagar apenas pela superfície do material [32].

A profundidade de penetração da onda superficial de Rayleigh na amostra é dada pela freqüência na qual a onda é gerada.

Para uma velocidade constante para diferentes freqüências, a profundidade de penetração da onda de Rayleigh é dada pela seguinte equação, para um mesmo material [32]:

$$\mathbf{d} = \mathbf{V}_{\mathbf{R}} / \mathbf{f}_{\mathbf{R}}$$
(Equação 22)

onde:

- *d* é a profundidade de penetração da onda de Rayleigh na amostra;
- V_R é a velocidade da onda de Rayleigh;
- f_R é a freqüência de geração da onda.

Segundo Araújo [1], a velocidade da onda de Rayleigh no aço é de aproximadamente 3.000 m/s, valor arredondado a partir de dados da velocidade de ondas transversais nos aços que é de 3200 m/s, segundo Andreucci [3].

Segundo Lamy [7], a velocidade da onda de Rayleigh é 92 % da velocidade da onda cisalhante. É interessante observar, que a velocidade da onda cisalhante ou transversal é em torno de 50% menor do que a velocidade da onda longitudinal.

Em freqüências muito altas, a profundidade de penetração é muito pequena e apenas fenômenos próximos a superfície da amostra são detectados pela onda.

Em freqüências muito baixas, a profundidade de penetração aumenta e regiões mais profundas do material são examinadas pelas ondas de Rayleigh.

Pelo monitoramento da variação da velocidade desta onda superficial, é possível determinar a tensão na amostra em função da profundidade. Sendo não-dispersivas, mudanças na velocidade da onda são atribuídas ao estado de tensões na amostra [32].

Segundo Lindgren [32], a aplicação de tensões compressivas no material diminuem a velocidade da onda de Rayleigh, enquanto tensões trativas resultam num aumento da velocidade das ondas de Rayleigh. [32]. Chaib [40] e Duqennoy [18], ao contrário de Lindgren [32], constataram que a aplicação de tensões compressivas ocasionou um aumento da velocidade ultra-sônica (diminuição do tempo de percurso da onda) comparando com um meio livre de tensões.

A quantidade de tensão presente pode ser usualmente determinada seguindo uma cuidadosa calibração das velocidades das ondas superficiais.

A velocidade da onda de Rayleigh deve ser medida cuidadosamente em uma amostra livre de tensões e em uma amostra com diferentes níveis de tensão superficial, devendo estas medidas ser utilizadas como valores de referência [32].

Uma vez que estes valores são conhecidos, o cálculo do estado de tensões na amostra pode ser determinado pelo valor da velocidade da onda de Rayleigh na amostra [32].

Vale frisar que a localização do transdutor é importantíssima, pois se for colocado em regiões mais sensíveis à tensão, a variação das velocidades será bem mais acentuada [32].

Para experiências com diferentes transdutores de diversas freqüências, foi constatado que transdutores de alta freqüência penetram mais superficialmente na amostra enquanto transdutores de freqüência menor penetram mais profundamente na amostra [32].

Um fator muito importante que foi observado [32], é um grande decréscimo da velocidade da onda de Rayleigh quando há deformação plástica no material.

Isto se deve à geração de defeitos pontuais e lineares na microestrutura do material assim que o mesmo sofre deformação plástica [32].

Desde que a deformação plástica tende a aliviar tensões, espera-se que a velocidade da onda ultra-sônica tenda a "caminhar" para o estado sem tensão (livre de tensões), sendo evidente no caso da aplicação de altas cargas onde a velocidade da onda caiu vertiginosamente pois excedeu-se bastante o limite de escoamento.

Segundo Lindgren [32], a penetração máxima eficiente das ondas superficiais em seu estudo foi de um comprimento de onda, sendo a sensibilidade máxima na superfície do material, decrescendo a zero com a profundidade, devido à perda de energia.

Para estabelecer-se a relação da velocidade da onda de Rayleigh com as tensões aplicadas, foram usados diferentes transdutores com diferentes freqüências [32]. Foi

constatado, que quanto maiores as cargas trativas aplicadas, maiores as velocidades da onda ultra-sônica para todos os transdutores e consequentemente menores os tempos de percurso dos sinais aquisitados [32].

Mesmo assim, os resultados foram afetados pelas tensões residuais compressivas presentes no material resultando em interceptação dos resultados de transdutores diferentes.

Lindgren [32] concluiu que ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh podem ser usadas para detectar tensões residuais.

Mudanças na velocidade da onda são dependentes do estado de tensões no material testado. Foi demonstrado por Lindgren [32], que a velocidade da onda de Rayleigh é sensível tanto a tensões trativas como compressivas.

Pode-se determinar o estado de tensões residuais na amostra como função da penetração da onda e além disso, foi identificada com sucesso uma camada de tensão residual compressiva em uma amostra, através da queda das velocidades da onda ultra-sônica de Rayleigh [32].

2.13 - <u>DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA DOS</u> <u>MATERIAIS</u>

A constante acustoelástica depende do tipo de material, da sua estrutura, do tipo de onda ultra-sônica empregada e da direção de polarização. Segundo Carvajal [9], as constantes acustoelásticas podem ser obtidas num ensaio de tração [42], ou compressão uniaxial, propagando ondas paralela e perpendicularmente à direção da carga, de maneira a registrar as mudanças relativas de velocidade para as várias direções de polarização e propagação em função da deformação ou da tensão. Considerando-se, de uma forma simplificada, que a relação entre as tensões aplicadas e os tempos de percurso da onda ultra-sônica seja uma relação linear, a constante acustoelástica será a inclinação (coeficiente angular) da reta correspondente.

Sendo $\sigma_i e \sigma_j$ as tensões principais no plano ij e sendo θ o ângulo entre a direção de propagação da onda e a tensão σ_i , a influência do estado de tensões ou deformações sobre a velocidade das ondas de Rayleigh é dada numa aproximação de primeira ordem em termos

do módulo de Poisson e das constantes elásticas de terceira ordem do material. Para o caso isotrópico, o resultado possui a seguinte forma:

$$(V_{R} - V_{R0} / V_{R0}) = (K_{1} + K_{2} / 2) \cdot (\sigma_{i} + \sigma_{j}) + (K_{1} - K_{2} / 2) \cdot (\sigma_{i} - \sigma_{j}) \cos 2\theta$$

(Equação 23)

onde V_{R0} é a velocidade da onda de Rayleigh no sólido sem tensão, V_R é a velocidade da onda de Rayleigh sob tensão, K_1 e K_2 são as constantes acustoelásticas para ondas que se propagam paralela e perpendicularmente à tensão uniaxial, respectivamente.

Embora essas constantes acustoelásticas possam ser calculadas a partir de constantes elásticas de terceira ordem, os seus valores são relativamente pequenos, o que torna-se recomendável obtê-las experimentalmente.

Vale frisar que a relação geral entre uma constante elástica e as velocidades também é válida em meios anisotrópicos.

Egle [43], Bray [25] e Hsu [44] calcularam a constante acustoelástica em aços ferríticos usados na indústria ferroviária e ligas de alumínio, onde esses valores foram calculados para cada onda se propagando em cada direção.

No caso do alumínio, com as ondas cisalhantes incidindo normalmente ao material e com a polarização nas duas direções ortogonais, e o corpo de prova sob tensão compressiva. Hsu [44] em seu estudo, mostrou que a variação da velocidade da onda ultra-sônica altera o valor da constante acustoelástica do material.

2.14 – <u>ESTUDO DE TENSÕES EM TUBOS</u>

O custo das estruturas tubulares é significativamente influenciado pelo custo de fabricação das mesmas. Os tubos de aço são classificados em função de seu processo de fabricação.

Os tubos sem costura são produzidos por processo de laminação a quente, a partir de um bloco maciço de seção redonda de aço, o qual é laminado e perfurado por mandril, obtendo-se dessa maneira, suas dimensões finais. São resfriados em leito de resfriamento, até a temperatura ambiente e, por possuírem uniforme distribuição de massa em torno de seu centro, mantém sua temperatura praticamente constante ao longo de todo o seu comprimento e em qualquer ponto de sua seção transversal. Por esse motivo, possuem baixo nível de tensões residuais, o que os distingue dos tubos de aço com costura (com junta soldada), produzidos a partir de chapas de aço calandradas e costuradas (soldadas) no encontro das mesmas.

Nos tubos com costura (com junta soldada), a região afetada termicamente pelo processo de soldagem possui níveis de tensões residuais diferentes das demais regiões da seção transversal do tubo, também tensionadas, devido ao processo de calandragem e expansão. Tal uniformidade encontrada nos tubos sem costura conduz a uma melhor performance do aço em seu emprego estrutural.

2.14.1 - TENSÕES EM DUTOS ENTERRADOS SOB SERVIÇO

Riscos de danos ou até mesmo de colapso prematuro de dutos enterrados ocasionados pela interação com solos geologicamente instáveis são fenômenos bem conhecidos [2].

A interação solo-duto é de reconhecida complexidade. Desta forma, para garantir-se a integridade estrutural de um duto, a medição/monitoração das tensões trativas ou compressivas transmitidas pelo solo sobre o duto é requisito imprescindível.

Embora existam diversas técnicas de medições de tensões, tais como a técnica do furo, a neutrongrafia e a difração de raios-X, suas limitações e/ou imprecisões tem despertado o interesse crescente da comunidade científica no desenvolvimento de outros métodos mais eficazes, e que forneçam informações técnicas capazes de subsidiar uma tomada de decisão operacional.

2.14.2 - <u>EXPERIÊNCIA EM TUBOS COM JUNTA SOLDADA</u> <u>CIRCUNFERENCIAL</u>

Tanala [45] analisou tubos metálicos com solda circunferencial usando diferentes tipos de onda e depois comparou os resultados.

O valor da constante acustoelástica obtido experimentalmente através de carregamentos foi muito baixo, e mostra que ondas longitudinais são insensíveis a tensões perpendiculares a sua direção de propagação, sendo também pouco sensíveis à microestrutura.

No caso de ondas cisalhantes, mudanças na velocidade ocorreram apenas quando a direção de propagação era perpendicular à tensão, sendo estas ondas, mais sensíveis à microestrutura (textura).

Outro fato importante constatado por Tanala [45], é que ondas de Rayleigh são somente sensíveis a uma componente da tensão biaxial ou seja, elas percebem a tensão que atua na direção de propagação da onda.

Os resultados experimentais obtidos por Tanala [45] foram considerados excelentes e deveram-se à boa preparação do material antes da soldagem, ou seja, foi feita uma boa usinagem do material e um tratamento térmico eficiente.

Entretanto, a dificuldade maior para a realização do estudo realizado por Tanala [45], é a necessidade de se ter uma amostra sem deformação com a mesma estrutura das partes a serem medidas, para se obter valores de referência e compará-los com medidas em estruturas sob tensão.

São importantes a estrutura e o efeito da textura do material analisado, e todo cuidado é necessário no acoplamento do transdutor no material [45].

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - <u>INTRODUÇÃO</u>

Analisando-se a variação do tempo de percurso das ondas ultra-sônicas superficiais em materiais metálicos, foi estudada a viabilidade de se avaliar tensões presentes na superfície de chapas de aço. Com isso, pode-se medir a tensão de serviço que está atuando no componente e avaliar a integridade estrutural de estruturas e componentes metálicos, bem como prever o risco deles se romperem e provocarem um acidente.

Este capítulo aborda a metodologia empregada para a realização de experiências para alcançarmos tal objetivo, e está dividido nos seguintes tópicos:

- Montagem do sistema ultra-sônico
- Descrição dos equipamentos do sistema ultra-sônico
- Aquisição e processamento matemático de sinais ultra-sônicos
- Experiência para estudar o efeito da variação de temperatura no tempo de percurso das ondas ultra-sônicas superficiais (se há aumento ou diminuição do tempo de percurso)
- Descrição do ensaio de tração para a detecção de tensões superficiais

3.2 – <u>O SISTEMA ULTRA-SÔNICO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS</u>

Foi montado um sistema de aquisição de sinais capaz de gerar, receber, capturar e medir o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas de Rayleigh. Estes sinais foram processados matematicamente por um *software*, o qual fornece o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas com confiabilidade e exatidão [1,6].

O sistema ultra-sônico utilizado é mostrado na figura 2, sendo constituído pelos seguintes equipamentos:

- (1) Gerador / Amplificador / Receptor de pulsos Ultra-sônicos Matec PR 5000
- (2) Transdutor de ondas de Rayleigh (Ondas ultra-sônicas superficiais)
- (3) Peça ou corpo-de-prova de aço

(4) Osciloscópio Tektronix (TDS 360, TDS 2221A, TDS 3032 B, TDS 3054 B)

(5) Computador PC



FIGURA 2 - Fluxograma do sistema ultra-sônico PR 5000

É mostrada na figura 3 de uma forma clara e sucinta, a montagem do sistema ultrasônico PR 5000 com seus respectivos cabos, para a aquisição de sinais ultra-sônicos.



FIGURA 3 - Montagem dos cabos do sistema ultra-sônico

No sistema ultra-sônico utilizado, o gerador de sinais MATEC PR 5000 envia um pulso ao cristal emissor do transdutor de ondas superficiais.

Saindo do cristal emissor do transdutor, a onda de Rayleigh percorre a região do corpo de prova localizado entre os cristais piezoelétricos, sendo este sinal recebido pelo cristal receptor do transdutor. O sinal retorna ao gerador PR 5000 onde é amplificado e enviado ao osciloscópio para a visualização e digitalização do sinal ultra-sônico.

São observados na tela do osciloscópio, o pulso de excitação do cristal piezoelétrico e seu eco seguinte.

No osciloscópio, o sinal é exportado e transformado em um arquivo de formato compatível com o *software* de processamento matemático utilizado no computador (extensão .csv).

O computador, através de um *software*, realiza o processamento matemático do sinal fornecendo-nos o tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Antes do sinal ser aquisitado, o sistema era ligado no mínimo 15 minutos antes da sua utilização, a qual só era feita após a estabilização da temperatura ambiente, verificada com o termômetro do laboratório ou com o termopar digital.

A figura 4 é uma foto do sistema ultra-sônico, com o osciloscópio TDS 360, montado e ligado, com o termopar digital para a determinação da temperatura, porém, sem a chapa de aço a ser analisada.



FIGURA 4 - Foto do sistema ultra-sônico com o osciloscópio TDS 360

3.3 - EQUIPAMENTOS DO SISTEMA ULTRA-SÔNICO

Os equipamentos utilizados no sistema de aquisição de sinais ultra-sônicos com ondas de Rayleigh são descritos abaixo.

3.3.1 - GERADOR DE PULSOS ULTRA-SÔNICOS MATEC PR 5000

Sistema que gera, amplifica e recebe as ondas ultra-sônicas, possuindo o controle dos parâmetros do pulso ultra-sônico, como taxa de repetição, comprimento do pulso, freqüência do transdutor, amplitude, etc. O gerador contém circuitos eletrônicos especiais, que permitem transmitir ao cristal piezoelétrico, através de um cabo coaxial, uma série de pulsos elétricos controlados, transformados pelo mesmo, em ondas ultra-sônicas.

3.3.1.1 - ESCOLHA DOS PARÂMETROS DO GERADOR DE SINAIS

Os parâmetros do gerador de sinais visualizados na tela do gerador de sinais, os quais podem ser armazenados em memória, são os seguintes [46,47]:

PRF (*Pulse Repetition Frequence*) – Taxa de repetição do pulso
WIDTH (*Pulse Width*) – Largura do pulso ou tempo de vibração do cristal
FREQ (*Pulse Frequency*) – Freqüência do transdutor utilizado
AMP (*Pulse Amplitude*) – Amplitude do pulso
TR – Controle de como o pulso é trigado

Ex: TR + 1 (Internal, positive triggering mode) – Trigger interno positivo
GAIN (Gain of the signal) – Controle do ganho
LPF (Frequency of the low pass filter) – Filtro "passa baixo"
HPF (Frequency of the high pass filter) – Filtro "passa alto"
RECT (Rectification) – Retificação
PE or TT (Pulse-echo or Through transmission) – Pulso-eco ou transparência

Inicialmente foi utilizado o transdutor de 10 MHz. A freqüência do transdutor no gerador (10,40 MHz) foi configurada para uma atuação mais superficial, segundo dados fornecidos pelo fabricante do mesmo (MATEC). Neste caso, os valores escolhidos como parâmetros de trabalho são mostrados na Tabela 3:

PRF	106,3 Hz	
WIDTH	0,08us	
FREQ	10,40 MHz	
AMP	55 % Tr + I	
GAIN	40,0 dB	
LPF	None	
HPF	None	
RECT	RF TT	

TABELA 3 – Parâmetros do gerador ultra-sônico para o transdutor de 10 MHz

Devido à alta rugosidade da tira de um tubo soldado, a qual ocasiona uma grande atenuação acústica [1], o transdutor de 10 MHz não conseguiu aquisitar sinais, havendo a troca do mesmo por outro de freqüência menor (4 MHz).

A freqüência desse transdutor no gerador (3,71 MHz), foi configurada para uma atuação mais profunda da onda ultra-sônica, segundo dados fornecidos pelo fabricante MATEC. Os novos parâmetros do gerador configurados para uma profundidade maior de atuação, são mostrados na Tabela 4:

PRF	106,3 Hz	
WIDTH	0,08us	
FREQ	3,71 MHz	
AMP	55 % Tr + I	
GAIN	40,0 dB	
LPF	None	
HPF	None	
RECT	RF TT	

TABELA 4 – Parâmetros do gerador ultra-sônico para o transdutor de 4 MHz

Posteriormente, com a utilização de outros osciloscópios (TDS 3032 B e TDS 3054 B), os sinais apresentavam muito ruído, logo, foram modificados parâmetros do gerador, de forma a diminuí-lo.

Estes novos parâmetros são apresentados na Tabela 5:

TABELA 5 – Parâmetros modificados do gerador ultra-sônico para o transdutor de 4 MHz

PRF	106,3 Hz	
WIDTH	0,08us	
FREQ	3,71 MHz	
AMP	55 % Tr + I	
GAIN	70,0 dB	
LPF	None	
HPF	5,00 MHz	
RECT	RF TT	

3.3.2 - TRANSDUTORES DE ONDAS DE RAYLEIGH

As ondas ultra-sônicas são geradas por transdutores ultra-sônicos, também chamados simplesmente de transdutores ou cabeçotes [3].

Um desenho esquemático dos transdutores ultra-sônicos de ondas superficiais de Rayleigh utilizados é mostrado na figura 5:



FIGURA 5 – Esquema de um transdutor superficial acoplado à uma peça

De um modo geral, um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia em outro. Os transdutores ultra-sônicos convertem energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Esses transdutores contém cristais piezoelétricos em seu interior, os quais apresentam um fenômeno chamado de efeito piezoelétrico. Este efeito consiste na variação das dimensões físicas de certos materiais sujeitos a campos elétricos. Pulsos elétricos controlados são levados aos transdutores através de cabos coaxiais. Os transdutores transformam esses pulsos elétricos em ondas ultra-sônicas [3,4].

O contrário também ocorre, ou seja, a aplicação de pressões, por exemplo, pressões acústicas que causam variações nas dimensões de materiais piezoelétricos provocando o aparecimento de campos elétricos neles [3,4].

Ao se colocar um material piezoelétrico num campo elétrico, as cargas elétricas da rede cristalina atuam no mesmo, produzindo tensões mecânicas que geram as ondas ultrasônicas.

O cristal para ser usado como transdutor, deve ser cortado de forma que um campo elétrico alternado, quando nele aplicado, produza variações em sua espessura.

Dessa variação resulta um movimento nas faces do cristal, originando as ondas sonoras. Cada transdutor possui uma freqüência de ressonância natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será a sua freqüência de vibração [4].

O transdutor utilizado tem sua freqüência fixa, ou seja, ele é adquirido para ser utilizado em uma determinada freqüência. Este transdutor terá sempre a mesma freqüência, mesmo que seja utilizado em materiais diferentes [3].

Os transdutores são acessórios frágeis e devem ser manuseados com cuidado, devendo-se evitar quedas, pancadas e até mesmo batidas mais secas na superfície da peça em ensaio.

Quando utilizados de maneira correta e cuidadosa, funcionam durante muitos anos sem apresentar problemas sérios, sendo considerados dispositivos caros [3].

Pesquisas têm sido feitas na busca de transdutores de novos materiais (piezoelétricos fabricados com materiais poliméricos) e cada vez mais eficientes visando a diminuir a atenuação acústica [48].

Nas experiências do presente trabalho, foram utilizados dois transdutores de ondas de Rayleigh: um de 4 MHz de freqüência (tamanho menor) e outro de 10 MHz (tamanho maior). Eles são mostrados na figura 6.



FIGURA 6 – Foto dos transdutores de ondas superficiais de Rayleigh utilizados

A Tabela 6 mostra as características dos transdutores de ondas superficiais utilizados, fornecidas pelo fabricante MATEC.

TRANSDUTORES DE ONDAS SUPERFICIAIS DE RAYLEIGH					
DENOMINAÇÃO	10 MHz	4 MHz			
SÉRIE DE	01976 E 0071	00829 E 9930			
FABRICAÇÃO					
FAIXA DE	10,352 a 10,400 MHz	3,711 a 4,883 MHz			
FREQÜÊNCIA					

TABELA 6 – Características dos transdutores fornecidas pela MATEC

É importante frisar a importância da orientação do transdutor na hora da aquisição de sinais nas chapas de aço, pois a velocidade da onda de Rayleigh é sensível à direção de laminação [6].

Segundo Bittencourt [6], se a direção de propagação da onda de Rayleigh for paralela à direção de laminação, o tempo de percurso da onda será menor. Se for perpendicular à direção de laminação, então o tempo de percurso será maior [6].

A orientação adotada durante as experiências garante que o cristal emissor estava situado sempre à direita da palavra MATEC (marca do fabricante), impressa no próprio transdutor, localizado nas proximidades da letra C e o cristal receptor como aquele à esquerda da palavra MATEC, estando localizado próximo da letra M.

Este posicionamento foi mantido durante todo o trabalho com a marca do transdutor sempre à vista.

3.3.2.1 - ACOPLAMENTO DO TRANSDUTOR ULTRA-SÔNICO

Ao ser acoplado um transdutor ultra-sônico diretamente sobre a peça a ser inspecionada, passa a existir uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça.

Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor sejam propagadas para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica).

A impedância acústica é definida como o produto da densidade do meio pela velocidade de propagação neste meio. A diferença entre impedâncias acústicas de dois meios influenciará na quantidade de energia acústica que se reflete e que é transmitida para os meios. A impedância acústica do ar é muito baixa comparada com a do plexiglas e do aço. Por esta razão, é necessário usar um meio que estabeleça uma redução desta diferença entre a energia ultra-sônica transmitida e refletida, que é o acoplante.

O objetivo do acoplante é permitir que a onda ultra-sônica, criada no cristal emissor piezoelétrico, seja transferida para o material de estudo e deste material para o cristal receptor com o mínimo de atenuação possível. Como a onda viaja com menor velocidade no acoplante, o tempo de percurso da onda pode ser aumentado, caso este filme de acoplante, no caso vaselina líquida, seja maior que o necessário. Foi verificado experimentalmente [1], que vaselina líquida, no caso de ondas de Rayleigh, provoca menos atenuação do sinal do que a vaselina em pasta.

A superfície da peça não deve apresentar quaisquer tipos de irregularidades, tais como: rugosidade acentuada, riscos comprometedores, tinta ou revestimento, sujeira ou ferrugem e fluidos de proteção, pois estas irregularidades não só atenuam o sinal, como alteram o percurso da onda ultra-sônica, interferindo na medida do tempo de percurso da mesma.

A atenuação sônica é o resultado da soma dos efeitos de dispersão, espalhamento, difração, reflexão e absorção sofridos pela onda sônica ao percorrer um material, significando uma redução da energia que chega ao transdutor receptor [3].

O transdutor foi fixado no corpo-de-prova por meio de uma garra. O objetivo era fixar o transdutor à peça para se obter uma grande fidelidade dos sinais, obtidos em um mesmo ponto, evitando assim, efeitos que pudessem influenciar no tempo de percurso da onda.

Com o transdutor fixado, todos os sinais eram obtidos de uma só vez, isto é, eram aquisitados, exportados e processados para posteriormente mudarmos a posição de aquisição ou o próprio material de análise.

O tempo de vibração do transdutor ultra-sônico, denominado comprimento de pulso, deve ser pequeno, de forma que o cristal vibre abaixo de sua freqüência natural e não se aqueça [1].

Conforme o comprimento de pulso é aumentado, o cristal passa a vibrar em um tempo maior. Isto leva ao seu aquecimento, fazendo com que a onda ultra-sônica varie de velocidade, devido à mudança de temperatura [1].

Com o aumento da temperatura, os átomos que formam o cristal piezoelétrico e o material ao seu redor ficam mais afastados uns dos outros. Este aumento do afastamento resulta numa redução da densidade do meio de propagação. Logo será necessário um tempo maior para que a vibração seja transmitida através dos átomos. Como as ondas sonoras propagam-se por meio da interação entre átomos e moléculas, estando estas mais afastadas, a velocidade de propagação da onda cai [1].

Esta variação no tempo de propagação da onda é muito pequena e como a variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica é da ordem de nanossegundos, estas variações

de temperatura devido ao aquecimento do cristal do transdutor, podem influenciar consideravelmente nos resultados.

3.3.3 - OSCILOSCÓPIOS DIGITAIS TEKTRONIX

O osciloscópio é o equipamento responsável pela visualização e digitalização do sinal ultra-sônico fazendo uma interface com o gerador de sinais e o computador.

Cada osciloscópio possui seu número de pontos digitalizados e seu respectivo tempo de amostragem. O tempo de amostragem é o tempo entre dois pontos consecutivos do sinal ultra-sônico digitalizado.

Os diferentes sistemas de aquisição de sinais eram constituídos por osciloscópios do fabricante TEKTRONIX. Foram utilizados ordenadamente os osciloscópios TDS 360, o TDS 3032 B, o TDS 2221 A e finalmente o TDS 3054 B, dotado de 4 (quatro) canais digitais.

Nos experimentos realizados com ondas superficiais de Rayleigh, foi observado para processamentos matemáticos de sinais ultra-sônicos somente com correlação cruzada (processamento L0), que o osciloscópio Tektronix TDS 360 digitaliza o sinal com 1.000 pontos possuindo um tempo de amostragem de 20 ns. O osciloscópio Tektronix 2221A digitaliza o sinal com 4.097 pontos e possui um tempo de amostragem de 5 ns. No caso dos osciloscópios TDS 3032B e o TDS 3054B (mais modernos), o sinal é digitalizado com 10.001 pontos e ambos possuem um tempo de amostragem de 2ns.

3.3.3.1 - AQUISIÇÃO DE SINAIS ULTRA-SÔNICOS

Todos os sinais ultra-sônicos aquisitados foram obtidos com a seguinte configuração:

 Cada quadrante do osciloscópio possuía um pulso, ou seja, no primeiro quadrante estava o pulso de excitação e no segundo quadrante estava o pulso seguinte. Os sinais foram aquisitados com a menor base de tempo possível, de forma que o sinal era visualizado na tela do osciloscópio com os dois pulsos.

Visando diminuir o ruído existente, cada sinal ultra-sônico aquisitado era, na verdade, uma média dos sinais obtidos para cada pulso emitido [49].

Esta média, denominada *Average*, é um recurso próprio dos osciloscópios, sendo mostrada imediatamente na tela do osciloscópio. Esta média foi utilizada nos osciloscópios TDS 360, TDS 3032 B e TDS 3054 B.

Entretanto, com o osciloscópio TDS 2221 A, não foram aquisitados sinais com esta média (Average) pois esta forma de aquisição gerou erros de processamento. Devido à este problema, somente sinais na forma Sample (sem a média dos sinais) foram aquisitados.

Para este trabalho, a média padrão adotada foi de 256 pulsos (AVERAGE 256), embora haja osciloscópios dotados com uma média de 512 pulsos (TDS 3032 B e TDS 3054 B). A maior média que o osciloscópio TDS 360 possui é de 256 pulsos.

Na aquisição de sinais com o osciloscópio TDS 2221 foi utilizado um *software*, o programa "*Wavestar versão 1.1.2*" (versão antiga), enquanto que para os osciloscópios TDS 3032 B e TDS 3054 B foi utilizada uma versão mais moderna, o programa "*Wavestar versão 2.6*".

Na aquisição de sinais com o osciloscópio TDS 360, não foi necessário o uso de um *software* de aquisição, pois os sinais eram salvos em disquete de 1.44 Mb, num *drive* do próprio osciloscópio.

A figura 7 mostra a visualização de um sinal ultra-sônico na tela do osciloscópio, composto pelo pulso de excitação e pelo segundo pulso.



FIGURA 7 – Visualização do sinal ultra-sônico na tela do osciloscópio [4]

Ao receber este sinal aquisitado, o computador realiza o processamento matemático do sinal e fornece o tempo de percurso da onda ultra-sônica, ou seja, o tempo de defasagem entre os dois pulsos visualizados na tela do osciloscópio.

3.3.4 - COMPUTADOR PC

Computador dotado com *softwares* de aquisição (*Wavestar*) e processamento matemático de sinais ultra-sônicos ("Atraso", versões 6 e 7 e "Chronos"), baseados em correlação cruzada e interpolação de sinais (técnica multitaxas), que calculam o tempo de percurso da onda ultra-sônica no material, ou seja, o tempo de defasagem entre dois pulsos.

3.3.4.1 - PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DOS SINAIS

Os tempos de percurso das ondas ultra-sônicas de Rayleigh são da ordem de nanossegundos (10^{-9} segundos). Portanto, são fundamentais medidas mais exatas, de forma a avaliar diferenças de tempo extremamente pequenas.

Para ser obtida a precisão desejada, a solução adotada foi a do refino e processamento matemático do sinal através de um programa de computador (*software*).

Foram utilizados algoritmos matemáticos de correlação cruzada [6,50,51] e interpolação de sinais (técnica multitaxas), ambos próprios do *software*, a fim de permitir que as medidas do tempo de percurso da onda, alcançassem uma alta resolução.

O algoritmo de correlação cruzada elimina a necessidade da localização de um ponto de referência entre dois ecos consecutivos, o que é fonte de erros, seja por dificuldades de localização da referência ou pela falta de precisão na sua localização, devido à existência de ruídos no sinal.

A função correlação cruzada é uma medida da existência de alguma correlação entre duas funções, e o conceito é especialmente usado para funções periódicas ou para certos tipos de funções aleatórias.

Quando a correlação cruzada é aplicada, cada ponto de um eco é multiplicado e somado a todos os outros pontos do eco seguinte, resultando em uma outra função cujo máximo indica o valor do atraso entre os dois ecos.

Na correlação cruzada, o que ocorre, é uma comparação ponto a ponto dos dois ecos.

Desta forma, as medidas de tempo podem ser tomadas com uma precisão muito grande, ao contrário do que ocorre quando são feitas visualmente diretamente da tela do osciloscópio.

No caso da interpolação de sinais, são inseridos pontos entre dois pontos consecutivos do sinal original através de sistemas eletrônicos de filtragem [52].

A técnica utilizada para diminuir o tempo de amostragem dos osciloscópios foi a técnica das multitaxas. Esta conversão é realizada exclusivamente por processamento discreto. Consiste em inserir (L - 1) amostras nulas entre cada par de amostras da seqüência original, cujo tempo se quer modificar.

Para efeito de comparação dos resultados, foram usadas interpolações L4 e L16, na qual são inseridos 3 (três) e 15 (quinze) pontos, respectivamente, entre 2 (dois) pontos da sequência original.

Este processo é executado pelo expansor, sistema linear periodicamente variante no tempo. A seqüência de saída do expansor é filtrada e o novo sistema é chamado interpolador. O filtro é projetado de forma a dar um valor coerente às amostras nulas inseridas pelo expansor, sem alterar as amostras originais da seqüência de entrada.

Com o uso da correlação cruzada e da diminuição do tempo de amostragem através da interpolação de sinais, as medidas de tempo tornam-se mais precisas, diminuindo com isso as chances dos resultados ficarem imprecisos.

A figura 8 mostra um exemplo da interface gráfica do programa "Atraso versão 7", visualizada no Windows, quando o mesmo é acionado para processar sinais somente com correlação cruzada, ou seja, sem interpolação de sinais.

Foram processados vários arquivos em seqüência (no exemplo da figura 8, 200 sinais).

É necessário fornecer ao programa, os índices do primeiro e do último sinal que serão processados (1 e 200) e o número dos ecos a serem processados (2), no caso, o pulso de excitação e o pulso seguinte.



FIGURA 8 – Tela do programa "Atraso versão 7" visualizada no computador

3.3.5 - TERMOPAR DIGITAL

Foi incorporado ao sistema de aquisição de sinais, em substituição ao termômetro de laboratório de mercúrio, um termopar digital ECB (Equipamentos Científicos do Brasil) Tipo K MD 350 V (0 a 1350° C) com 1° C de precisão, com o qual foi realizado o estudo da influência da temperatura na variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh.

Para os ensaios de tração uniaxial nas tiras do tubo de aço soldado 08, foi utilizado um termopar digital (termômetro digital) fabricado pela Gulton do Brasil Ltda., modelo Gulterm 200 do tipo PT 100, com faixa de temperatura entre –199,9° C até 199,9° C, sendo um termômetro de imersão, com certificado de calibração IFM TG 0524/03, cuja menor divisão é 0,1° C. A ponta do termopar era encostada na chapa de aço e a temperatura era mostrada no visor digital.

Com isso, as experiências ganharam um maior grau de confiabilidade devido ao maior controle da temperatura da peça analisada.

3.4 – <u>EXPERIÊNCIAS DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA</u>

A influência da temperatura no tempo de percurso das ondas ultra-sônicas de Rayleigh foi estudada através de dois tipos de experiências.

No primeiro tipo, aquisições foram realizadas durante um longo período de tempo (várias horas) para verificar se o uso prolongado do transdutor provocava aquecimento no mesmo. Vale frisar que nessas experiências, o tempo de vibração do cristal do transdutor foi mantido pequeno de forma a não aquecer o cristal piezoelétrico do transdutor.

No segundo tipo, foi estudada a influência de variações significativas de temperatura no tempo de percurso da onda ultra-sônica, onde foi verificado se a relação entre a temperatura e o tempo de percurso era realmente linear. O material estudado (chapa de aço 1020), foi exposto ao sol por várias horas. Foi forçado um resfriamento do material com ar-condicionado, e à medida que a chapa ia resfriando, sinais eram aquisitados.

Para estas experiências, foi utilizada uma chapa de aço 1020 aliviada termicamente em forno, com 123 mm de comprimento, 79 mm de largura e 25 mm de espessura.

Durante tais experiências, o termopar estava sempre em contato com a chapa. Para cada temperatura de resfriamento, aquisições de sinais eram feitas.

3.5 - AQUISIÇÃO DE SINAIS NUM TUBO SOLDADO (TUBO 08)

O tubo de aço com costura (Tubo 08), foi soldado por resistência elétrica, e a aquisição de sinais ocorreu em regiões selecionadas do perímetro do tubo. São regiões próximas e afastadas do cordão de solda.

O objetivo da aquisição de sinais nestas regiões é tentar detectar a presença de tensões residuais de conformação e de soldagem.

Após a aquisição dos tempos de percurso nas regiões traçados no tubo, tiras foram cuidadosamente extraídas do tubo para não introduzir qualquer tensão. Em seguida, medidas de tempo foram novamente tomadas nos mesmos pontos.

Para ser avaliado o efeito de tensões aplicadas no tempo de percurso das ondas de Rayleigh, essas mesmas tiras foram submetidas a carregamentos trativos uniaxiais até valores próximos do limite de escoamento; onde o transdutor foi acoplado na direção longitudinal da tira (paralelo à direção de laminação), correspondendo ao eixo longitudinal do tubo.

A figura 9 mostra um esquema da divisão do tubo soldado em regiões prédeterminadas para a aquisição de sinais. São cinco regiões sendo duas próximas ao cordão de solda (regiões das tiras 12h + e 12h -) e três afastadas do cordão (regiões das tiras 3h, 6 h e 9h), sendo que a região 6 h é a região oposta ao cordão de solda.



Figura 9 – Regiões de aquisição no tubo soldado 08

3.6 – <u>O ENSAIO DE CARREGAMENTO TRATIVO UNIAXIAL PARA A</u> <u>DETECÇÃO DE TENSÕES SUPERFICIAIS</u>

A determinação das propriedades mecânicas de um material é realizada por meio de vários ensaios, podendo ser destrutivos, onde há a ruptura ou inutilização do material, ou não-destrutivos, utilizados para a determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como para detectar falhas internas do mesmo [42].

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo de fácil execução e obtenção de resultados. É considerado um dos mais importantes ensaios para a determinação das propriedades mecânicas dos materiais [42].

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço, e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo [42]. A figura 10 mostra um ensaio de tração uniaxial realizado numa tira de um tubo de aço, com um transdutor de ondas de Rayleigh fixado à mesma para a aquisição de sinais.



FIGURA 10 - Carregamento trativo numa tira de um tubo na direção longitudinal

Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este corpo de prova é fixado numa máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes por intermédio de um aparelho especial (o mais comum é o extensômetro) [42].

Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado geralmente até a sua ruptura [42].

Neste ensaio, as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, e essa uniformidade da deformação permite ainda, obter medidas precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada [42].

A uniformidade de deformações termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno de estricção ou diminuição da seção do corpo de prova, nos casos de metais com certa ductilidade [42].

A precisão de um ensaio de tração depende, evidentemente, da precisão dos aparelhos de medida de que se dispõe.

O corpo de prova deve estar bem centrado e alinhado na máquina para que a carga seja efetivamente aplicada na direção do seu eixo longitudinal; a colocação dos extensômetros também deve ser bem feita, para ser evitado o escorregamento ou a falta de axialidade do aparelho [42].

Tensão é definida genericamente como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. Deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer [42].

Nos testes de carregamento trativo uniaxial deste trabalho a unidade de carga utilizada foi quilograma-força e foram utilizadas cinco tiras de dois tubos diferentes (Tubos 03 e 08), sendo uma tira do tubo com junta soldada 03, situada nas proximidades do cordão de solda (Tira 12h do Tubo 03), cujos sinais foram aquisitados com o osciloscópio TDS 360 no modo Average 256 e quatro tiras do tubo com junta soldada 08, sendo uma tira situada nas proximidades do cordão de solda (Tira 12h do Cordão de solda (tira 12h +), e as outras três afastadas do cordão de solda (Tiras 3h, 6h e 9h).
Na aquisição de sinais das tiras do tubo soldado 08 foram utilizados dois sistemas de aquisição diferentes. Nos ensaios de tração das tiras 12h (+), 3h e 6 h foi utilizado o osciloscópio TDS 3054 B, enquanto que no ensaio da tira 9h, foi utilizado o osciloscópio TDS 2221A.

Cargas foram aplicadas nas tiras dos tubos (Tubos 03 e 08), até valores próximos do limite de escoamento teórico, ou seja, valor a partir do qual o material deixa o regime elástico e passa a deformar-se plasticamente sem retornar à sua posição original.

Para cada carga aplicada, sinais eram aquisitados e salvos, para posteriormente ser determinado o tempo de percurso da onda ultra-sônica superficial através do processamento matemático dos sinais.

Nos ensaios realizados com os sistemas TDS 360 e TDS 2221A, uma média de 3 (três) sinais era aquisitada, enquanto que para o sistema TDS 3054 B, essa média era de 5 (cinco) sinais. Os osciloscópios TDS 360 e TDS 2221A, possuem um sistema de aquisição e salvamento mais lento. Consequentemente, a quantidade de sinais aquisitados por carga, é menor.

3.7 – <u>CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS EXPERIMENTAIS</u>

As constantes acustoelásticas foram obtidas num ensaio de tração uniaxial com propagação da onda de Rayleigh paralelamente à direção da carga [9].

Sendo $\sigma_i e \sigma_j$ as tensões principais no plano ij e sendo θ o ângulo entre a direção de propagação da onda e a tensão σ_i :

$$(V_{R} - V_{R0} / V_{R0}) = (K_{1} + K_{2} / 2) \cdot (\sigma_{i} + \sigma_{j}) + (K_{1} - K_{2} / 2) \cdot (\sigma_{i} - \sigma_{j}) \cos 2\theta$$
(Equação 23)

No caso da tensão trativa uniaxial, σ_i é a tensão principal no plano ij e o ângulo entre a direção de propagação da onda e σ_i é igual a zero.

Sendo considerado $\theta = 0$ (ângulo entre a direção de propagação e σ_i), $\sigma_j = 0$ e $K_2 = 0$, então a relação entre a velocidade da onda ultra-sônica de Rayleigh e a tensão aplicada é transformada em:

$$(V_{R} - V_{R0} / V_{R0}) = (K_{1} / 2) \cdot (\sigma_{i}) + (K_{1} / 2) \cdot (\sigma_{i}) \cdot 1$$
 (Equação 24)

$$(\Delta V / V_{R0}) = K_1 \cdot \sigma_i$$
 (Equação 25)

É observado que a equação obtida recai numa relação linear. Logo, a constante acustoelástica do material pode ser obtida de uma forma simplificada, ou seja, é o coeficiente angular da curva tempo de percurso ou velocidade da onda ultra-sônica versus tensão.

4 - <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda as experiências realizadas com o intuito de estudar tensões superficiais (residuais e externas) em chapas de aço. Dentre as experiências apresentadas neste capítulo são destacadas:

- Conhecimento do sistema de aquisição e processamento de sinais com ondas de Rayleigh.
- Determinação dos parâmetros ideais de aquisição do gerador ultra-sônico e do osciloscópio.
- Determinação da direção de laminação de chapas de aço.
- Estudo da influência da temperatura na medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh.
- Comparações entre tempos de percurso de regiões de um tubo sem costura (Tubo 00) para estudo de tensões residuais.
- Comparação entre tempos de percurso de um tubo com costura (Tubo 08) e suas respectivas tiras, com sistemas ultra-sônicos diferentes para tentar detectar a presença de tensões residuais em suas superfícies.
- Trações uniaxiais em tiras de tubos soldados (Tubos 03 e 08) com sistemas ultra-sônicos diferentes, para estudar a influência de tensões externas nos tempos de percurso de ondas de Rayleigh e calcular a constante acustoelástica do material.

4.2 - <u>COMPARAÇÃO ENTRE SAMPLE E AVERAGE 256</u>

O objetivo destas experiências é selecionar a forma ideal de se trabalhar com o sistema ultra-sônico, afim de definir os melhores parâmetros para a aquisição de sinais.

Foram comparadas aquisições de sinais realizadas com Sample (sem a média dos pulsos) com aquisições feitas com Average (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256), onde as médias dos pulsos são mostradas em tempo real na tela do osciloscópio.

Vale frisar que os desvios-padrão das médias dos tempos de percurso das ondas ultra-sônicas destas experiências não foram calculados, visto que a forma de aquisição ideal poderá ser observada através de gráficos de medidas versus tempos de percurso.

4.2.1 - EXPERIÊNCIA 1

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço soldada

A experiência 1 se refere a aquisições de sinais ultra-sônicos realizadas num mesmo ponto, na <u>direção longitudinal</u> (direção de laminação) de uma chapa de aço soldada.

O objetivo desta experiência é comparar sinais adquiridos no formato Sample e no formato Average (média dos pulsos), e descobrir qual a forma de aquisição de sinais ideal.

São mostrados na Tabela 7, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	10 MHZ		
TEMPERATURA	24,5 [°] C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	50 mV	1 µs	

TABELA 7 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 8 a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
41 a 50	SAMPLE LONG	19,910	19,845	19,844
51 a 60	AV 2 LONG	19,918	19,802	19,836
61 a 70	AV 4 LONG	19,894	19,848	19,847
71 a 80	AV 8 LONG	19,926	19,731	19,731
81 a 90	AV 16 LONG	19,900	11,612	11,614
91 a 100	AV 32 LONG	19,916	11,613	11,614
101 a 110	AV 64 LONG	11,604	11,614	11,614
111 a 120	AV 128 LONG	11,610	11,614	11,615
121 a 130	AV 256 LONG	11,620	11,618	11,619

TABELA 8 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

OBSERVAÇÕES

- SAMPLE Aquisição no formato Sample
- AV Aquisição no formato Average
- LONG Aquisição na direção longitudinal

Nas figuras 11 a 19 são mostrados gráficos de medidas versus tempos de percurso de sinais ultra-sônicos aquisitados com o formato Sample e com diferentes Average, para comparação dos tempos de percurso e descobrir qual a forma de aquisição ideal para o presente trabalho.



Figura 11 – Sinais aquisitados com Sample na direção longitudinal







Figura 13 – Sinais aquisitados com Average 4 na direção longitudinal







Figura 15 – Sinais aquisitados com Average 16 na direção longitudinal







Figura 17 – Sinais aquisitados com Average 64 na direção longitudinal







Figura 19 - Sinais aquisitados com Average 256 na direção longitudinal

Foram adquiridos sinais com o equipamento TDS 360 no formato Sample (sem a média dos pulsos) e com Average (com a média dos pulsos) na direção longitudinal e foram constatadas diferenças nos tempos de percurso dos sinais, principalmente a partir da aquisição com Average 64 (Tabela 8).

À medida que a média dos pulsos vai aumentando de 2 até 256, é constatado visualmente, que a dispersão dos tempos de percurso diminui, sendo menor com Average 256. Isto pode ser observado claramente nas figuras 11 a 19.

É aferido através dos gráficos (figuras 11 a 19), que a forma de aquisição com Average 256 pode ser considerada a ideal, pois com a média de 256 pulsos, o sinal apresenta menos ruído, pois os tempos de percurso convergem para um único valor de tempo de percurso, em torno de 11,620 µs.

4.2.2 - EXPERIÊNCIA 2

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço soldada com aquisição na direção perpendicular á direção de laminação (direção longitudinal)

A experiência 2 se refere a aquisições de sinais ultra-sônicos realizadas na <u>direção</u> <u>perpendicular</u> de uma chapa de aço soldada (mesma da experiência 1), com o mesmo equipamento da experiência anterior (TDS 360).

O objetivo desta experiência é descobrir qual a melhor forma de aquisição de sinais quando os mesmos são aquisitados na direção perpendicular à direção de laminação da chapa.

São mostrados na Tabela 9, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	10 MHZ		
TEMPERATURA	27 ⁰ C		
	VOLTAGEMTEMPO DE		
PARÂMETROS DO	VARREDURA		
OSCILOSCÓPIO	50 mV	1 µs	

TABELA 9 – Características da aquisição

A Tabela 10 mostra a quantidade de sinais ultra-sônicos aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
131 a 140	SAMPLE PERP	19,920	19,733	19,718
141 a 150	AV 2 PERP	19,900	19,843	19,831
151 a 160	AV 4 PERP	19,910	19,851	19,850
161 a 170	AV 8 PERP	19,916	19,782	19,782
171 a 180	AV 16 PERP	19,887	19,775	19,776
181 a 190	AV 32 PERP	19,917	19,855	19,851
191 a 200	AV 64 PERP	11,680	11,682	11,682
201 a 210	AV 128 PERP	11,673	11,674	11,675
211 a 220	AV 256 PERP	11,660	11,666	11,667

TABELA 10 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

OBSERVAÇÕES

- PERP Aquisição na direção perpendicular
- AV Aquisição no formato Average

Nas figuras 20 e 21 abaixo, são mostrados gráficos de medidas versus tempos de percurso de sinais ultra-sônicos, de ondas superficiais de Rayleigh, aquisitados com Sample e com Average 256 na direção perpendicular à direção de laminação (longitudinal) de uma chapa de aço soldada.



Figura 20 – Sinais aquisitados com Sample na direção perpendicular





O mesmo comportamento da experiência anterior (experiência 1) foi observado, ou seja, quando são aquisitados sinais na direção perpendicular à direção de laminação (longitudinal) da chapa, foi constatado que a forma de aquisição com Average 256 (média de 256 pulsos) pode ser considerada a ideal, pois apresenta menos ruído e consequentemente menor dispersão entre os valores dos tempos de percurso da onda ultra-sônica superficial de Rayleigh.

Comparando-se as figuras 20 e 21, fica constatado que na aquisição com Sample (figura 20), os tempos de percurso da onda ultra-sônica estão bem diferenciados, devido à presença de ruído nos sinais, enquanto que na aquisição com Average 256 (figura 21), os tempos são mais próximos, pois convergem para um único valor de tempo.

4.2.3 - <u>EXPERIÊNCIA 3</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPOS DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

A experiência 3 se refere a aquisições de sinais ultra-sônicos realizadas na <u>direção</u> <u>longitudinal</u> de uma chapa de aço 1020 aliviada termicamente. O objetivo desta experiência é descobrir qual a melhor forma de aquisição de sinais (Sample ou Average) quando é usada uma chapa de aço de material diferente das experiências 1 e 2.

São mostrados na Tabela 11, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TABELA 11 – Características da aquisição

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	22 ^o C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	200 mV	1 µs	

São mostrados na Tabela 12 a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
41 a 50	SAMPLE	19,774	15,265	15,266
51 a 60	AV 256	19,780	15,265	15,265
81 a 90	SAMPLE	15,210	15,210	15,210
91 a 99	AV 256	15,210	15,210	15,210
1 a 5	SAMPLE	15,160	15,168	15,167
6 a 10	AV 256	15,160	15,161	15,163

TABELA 12 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

OBSERVAÇÃO

• AV – Aquisição no formato Average

Pelas experiências realizadas com o sistema TDS 360 (experiências 1, 2 e 3), foi constatado que à medida que são utilizadas maiores médias de pulsos, ou seja, quando é feita uma média de uma quantidade maior de pulsos ultra-sônicos (maior Average) por sinal, a dispersão do valor dos tempos de percurso dos sinais, ou seja, a diferença entre o maior valor de tempo de percurso e o menor valor tempo de percurso da onda ultra-sônica, é diminuída.

Esta dispersão é menor com a aquisição na forma Average 256, sendo obtidos resultados mais confiáveis de medição. Portanto, esta forma de aquisição pode ser considerada a ideal.

4.2.4 - EXPERIÊNCIAS 4 E 5

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 3032 B

CORPO DE PROVA - Tira de um tubo sem costura

As experiências 4 e 5 se referem a aquisições de sinais ultra-sônicos realizadas na **direção longitudinal** (direção de laminação) de uma tira de um tubo de aço sem costura, com um osciloscópio de características técnicas, como por exemplo, o tempo de amostragem, melhores do que o osciloscópio utilizado anteriormente (TDS 360).

O objetivo desta experiência é descobrir qual a forma de aquisição de sinais ideal (Sample ou Average 256), quando é usada uma chapa de aço de um material diferente das experiências anteriores, e se há diferenças significativas no tempo de percurso da onda ultra-sônica quando se usa um osciloscópio com um tempo de amostragem menor.

São mostrados na Tabela 13, a frequência do transdutor, as temperaturas de aquisição para Sample e Average 256 e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	23 ^o C (SAMPLE)		
	21 ^o C (AVERAGE 256)		
	VOLTAGEM TEMPO DE		
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	5 V	2 µs	

TABELA 13 – Características das aquisições das duas experiências

São mostrados nas Tabelas 14 e 15, a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0). Não foram calculados os tempos de percurso com interpolação de sinais (L4 e L16) pois o osciloscópio TDS 3032 B possui um tempo de amostragem de 2 ns quando se usa somente a correlação cruzada.

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)
11 a 20	SAMPLE LONG	11,421
21 a 30	SAMPLE LONG	11,420
31 a 40	SAMPLE LONG	11,403
41 a 50	SAMPLE LONG	11,395

TABELA 14 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 4)

OBSERVAÇÃO

• LONG – Aquisição na direção longitudinal

TABELA 15 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 5)

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)
1 a 10	AV 256 LONG	11,238
11 a 20	AV 256 LONG	11,240
21 a 30	AV 256 LONG	11,237

Com o sistema TDS 3032 B, foi verificada uma menor dispersão dos valores de tempo de percurso (diferença entre o maior e o menor valor de tempo de percurso), quando foram aquisitados sinais somente com correlação cruzada (L0).

A aquisição de sinais com Average 256 pode ser considerada a ideal, quando este equipamento (TDS 3032 B) é usado, pois diminui o ruído do sinal.

4.3 - DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO DE CHAPAS

Foi verificado que no aço, o tempo de percurso de ondas ultra-sônicas cisalhantes é menor quando a direção de polarização é paralela à direção de laminação (DP // DL) [7].

O objetivo destas experiências é determinar se para ondas superficiais de Rayleigh, o comportamento permanece o mesmo.

Para isso, foram aquisitados sinais na direção longitudinal (direção de laminação da chapa) e com o transdutor ultra-sônico acoplado à chapa de aço a 90^{0} (perpendicular à

direção anterior). Os tempos de percurso foram comparados para saber se o tempo de percurso menor coincidia com a polarização da onda paralela à direção de laminação.

4.3.1 - EXPERIÊNCIAS 1 E 2

Na primeira experiência (experiência 1), foram comparadas aquisições de sinais realizadas com os formatos Sample e Average 64. Foram aquisitados sinais em duas direções (longitudinal e perpendicular) somente com correlação cruzada (processamento L0).

Na segunda experiência (experiência 2), foram comparadas aquisições realizadas nas duas direções (longitudinal e perpendicular), porém foi utilizada somente o formato de aquisição com Average 256. Entretanto, foi utilizada a interpolação de sinais (processamentos L4 e L16).

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço soldada

São mostrados na Tabela 16, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	10 MHZ		
TEMPERATURA	24 ^o C		
	VOLTAGEMTEMPO DE		
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	50 mV	1 µs	

TABELA 16 - Características da aquisição

São mostrados nas Tabelas 17 e 18, a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh das experiências 1 e 2.

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)
1 a 10	SAMPLE LONG	19,903
11 a 19	AV 64 LONG	11,540
21 a 30	SAMPLE PERP	19,949
31 a 40	AV 64 PERP	11,603

TABELA 17 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 1)

TABELA 18 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 2)

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	AV 256 LONG	11,384	11,388	11,388
11 a 20	AV 256 PERP	11,400	11,395	11,395

Pelos resultados experimentais acima, fica constatado que há uma menor dispersão dos valores das médias dos tempos de percurso dos sinais aquisitados com Average 64 do que com Sample.

Além disso, os tempos de percurso da onda ultra-sônica tanto para aquisições com Sample como para Average 64 na direção perpendicular à direção de laminação, foram maiores.

Isso mostra que o comportamento das ondas superficiais de Rayleigh é semelhante àquele com ondas cisalhantes, ou seja, o tempo de percurso de ondas ultra-sônicas é menor quando a direção de polarização é paralela à direção de laminação (DP // DL).

4.3.2 - EXPERIÊNCIA 3

Foram comparados tempos de percurso de sinais aquisitados nas direções longitudinal (direção de laminação) e perpendicular, das superfícies interna e externa de uma tira de um tubo soldado com ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh.

Os sinais aquisitados com o transdutor de 10 MHz de freqüência na superfície interna da tira apresentaram alta atenuação acústica devido à alta rugosidade da mesma.

Foi necessária uma quantidade maior de acoplante (vaselina líquida) para o sinal ser visualizado, fator que prejudica a medição do tempo de percurso. Isto levou a troca do transdutor de 10 MHz pelo transdutor de 4 MHz para aquisitar sinais mais profundamente, longe da camada de irregularidades que atenuam o sinal ultra-sônico.

São mostrados na Tabela 19, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	27 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	200 mV	1 µs	

TABELA 19 - Características da aquisição

São mostrados na Tabela 20, a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
21 a 30	AV 256 LONG INT	15,396	15,394	15,394
71 a 80	AV 256 LONG INT	15,832	15,841	15,849
51 a 60	AV 256 PERP INT	16,580	16,579	16,579
31 a 40	AV 256 LONG EXT	15,204	15,210	15,210
61 a 70	AV 256 LONG EXT	15,240	15,244	15,244
41 a 50	AV 256 PERP EXT	15,208	15,211	15,210

TABELA 20 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

A superfície interna da tira apresentou tempos de percurso mais elevados do que na superfície externa da mesma.

Uma das hipóteses é que a pressão interna dos fluidos do tubo em serviço tenha criado tensões residuais na parte interna do mesmo.

Na superfície interna da tira, a diferença de tempos entre as duas direções de aquisição (longitudinal e perpendicular) é mais significativa do que na superfície externa.

Na análise dos tempos de percurso da superfície externa, tal fato não ocorre, o que torna impossível confirmar a hipótese de determinação da direção de laminação.

4.3.3 - EXPERIÊNCIA 4

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA – Tubo de aço sem solda revestido com FBE (camada de resina epóxi amarela)

São mostrados na Tabela 21, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

$\mathbf{I} \mathbf{A} \mathbf{K} \mathbf{K} \mathbf{I} \mathbf{A} \mathbf{I} \mathbf{I} = \mathbf{I}$ gradtaristicas da gamisi	
TIDEEN 21 Caracteristicas da aquisi	fao

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	22 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	10 mV	0,2 µs	

São mostrados na Tabela 22, a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

TABELA 22 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
ÍMPARES	LONGITUDINAL	15,310	15,317	15,317
(3, 5, 7, 9, 11)				
PARES	PERPENDICULAR	19,880	19,853	19,851
(4, 6, 8, 10, 12)				

Foram observadas mudanças do tempo de percurso da onda ultra-sônica com a mudança de direção de propagação, onde é confirmada a hipótese da aquisição na direção de laminação coincidir com os menores tempos de percurso da onda de Rayleigh.

4.3.4 - EXPERIÊNCIAS 5 E 6

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 3054 B

CORPO DE PROVA - Tira de um tubo soldado

São mostrados na Tabela 23, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	23 [°] C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	5 V	2 µs	

TABELA 23 - Características da aquisição

São mostrados nas Tabelas 24 e 25, a quantidade de sinais aquisitados, sua forma de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

TABELA 24 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 5)

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	AV256 LONG	11,183	11,183	11,183
11 a 20	AV256 PERP	11,503	11,503	11,503
21 a 30	SAMPLE PERP	11,489	11,489	11,490
31 a 40	SAMPLE LONG	11,356	11,356	11,356

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 A 10	AV256 LONG	11,340	11,340	11,340
11 A 20	AV256 PERP	11,375	11,375	11,375

TABELA 25 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso (experiência 6)

Para o sistema TDS 3054 B foi comprovado que quando a direção de propagação é paralela à direção de laminação, o tempo de percurso é menor, tanto para aquisições com o formato Sample como nas aquisições com o formato Average 256.

Também fica claro, que o efeito da interpolação, tanto L4 como L16, não interfere consideravelmente nos resultados das medidas dos tempos de percurso, visto que suas médias tem valores próximos, seu tempo de amostragem diminui de 2ns (nanossegundos) para 1 ns, sendo bem menor do que o tempo de amostragem do osciloscópio TDS 360.

4.4 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

4.4.1 - AQUISIÇÃO DE SINAIS NO MESMO PONTO POR VÁRIAS HORAS

O objetivo desta primeira experiência com a temperatura, onde são aquisitados sinais ultra-sônicos num mesmo ponto por várias horas seguidas, é mostrar que ao ser utilizado um tempo de vibração pequeno do transdutor, também conhecido como comprimento de pulso, não haverá mudanças significativas no tempo de percurso da onda de Rayleigh, ou seja, não haverá aquecimento do cristal piezoelétrico, de forma a influenciar os resultados das medidas de tempo.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 26, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TABELA 26 –	Características	da	aquisição
-------------	-----------------	----	-----------

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	23 [°] C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	200 mV	1 μs	

São mostrados na Tabela 27, a quantidade de sinais aquisitados, o período de aquisição durante o dia e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultrasônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

TABELA 27 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurs	0
---	---

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
81 A 85	MANHÃ	15,680	15,675	15,675
86 A 90	COMEÇO DA	15,675	15,668	15,667
	TARDE			
91 A 95	FINAL DA	15,660	15,671	15,672
	TARDE			

Os desvios-padrão dos tempos de percurso dos sinais aquisitados são mostrados na Tabela 28.

TABELA 28 – Sinais aquisitados e seus desvios-padrão

SINAIS	AQUISIÇÃO	Desvio-padrão	Desvio-padrão	Desvio-padrão
		L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
81 A 85	MANHÃ	0	0	0
86 A 90	COMEÇO DA	2,38419E-07	0,00273861	0,000559
	TARDE			
91 A 95	FINAL DA	0,008944272	0,00223607	0,001046
	TARDE			

Através dos resultados experimentais, foi constatado que a hipótese de não haver aquecimento significativo do cristal piezoelétrico procede, visto que não houve variação significativa do tempo de percurso da onda de Rayleigh.

4.4.2 - <u>AQUISIÇÃO DE SINAIS COM GRANDES VARIAÇÕES DE</u> <u>TEMPERATURA</u>

Pesquisas mostram que para uma maior temperatura, teremos um tempo maior de percurso da onda ultra-sônica [22,23].

A velocidade da onda ultra-sônica será menor ao atravessar o material, ou seja, a onda atravessa o material mais lentamente, pois a densidade do material é menor, sendo necessário um tempo maior para a onda ultra-sônica atravessá-lo.

A fórmula da alteração da velocidade da onda ultra-sônica de Rayleigh com a temperatura é:

$$C_{\rm S} = C_{\rm S}^{0} - 0.35 \,(T - 25^{\rm O} \,{\rm C})$$
 (Equação 15)

De acordo com a equação 15, foi observado que a relação entre a velocidade da onda de Rayleigh e a variação de temperatura é linear.

Pantermuehl [23], estudou o efeito de mudanças de temperatura no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh e comprovou experimentalmente, através da aquisição de sinais ultra-sônicos em diferentes temperaturas, que quanto maior a temperatura, maior o tempo de percurso da onda ultra-sônica. Além disso, plotando seus resultados experimentais observou um comportamento linear da curva tempo de percurso da onda ultra-sônica versus temperatura.

Delsanto [26] também achou uma relação linear entre a variação de temperatura e a velocidade dessas ondas, mostrando que as ondas de Rayleigh podem ser usadas para determinar as constantes elásticas de materiais e as tensões presentes neles [26].

O objetivo destas experiências de aquisição de sinais ultra-sônicos com grandes variações de temperatura, é quantificar a variação do tempo de percurso da onda ultra-

sônica ocasionada pela variação de temperatura e constatar se a relação entre ambos é realmente linear.

As experiências seguintes foram realizadas numa chapa de aço 1020 aliviada termicamente, a qual foi exposta ao sol por várias horas.

Sinais eram aquisitados à medida que a chapa ia resfriando com o auxílio de arcondicionado, a variação de temperatura era controlada com o termopar digital. Para cada grau variado, uma média de 2 (dois) sinais era aquisitada.

4.4.2.1 - <u>EXPERIÊNCIA 1</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA – Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 29, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TABELA 29 - Características da aquisição

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	35 A 17 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs	

São mostrados na Tabela 30, a quantidade de sinais aquisitados, a temperatura de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica para cada temperatura com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
1 a 9	35	15,320	15,323	15,323
10 a 11	34	15,300	15,308	15,308
12 a 20	33	15,280	15,290	15,290
21 a 27	32	15,260	15,271	15,270
28 a 29	31	15,260	15,260	15,259
30 a 33	30	15,260	15,252	15,253
34 a 36	29	15,240	15,245	15,244
37 a 39	28	15,240	15,232	15,232
40 a 44	27	15,220	15,219	15,219
45 a 48	26	15,200	15,208	15,207
49 a 52	25	15,200	15,198	15,198
53 a 55	24	15,180	15,188	15,190
56 a 58	23	15,180	15,180	15,179
59 a 62	22	15,160	15,169	15,168
63	21	15,160	15,160	15,159
64 a 67	20	15,160	15,158	15,156
68 a 76	19	15,140	15,146	15,146
77 a 78	18	15,120	15,125	15,126
79 a 82	17	15,120	15,120	15,120

TABELA 30 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na tabela 31, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TEMPERATURA (^o C)	MEDIDAS	DESVIO-PADRÃO (µs)
35	9	0,00666667
34	2	0,01414214
33	9	0,01054093
32	7	0,01069045
31	2	0
30	4	0,01
29	3	0
28	3	0,01154701
27	5	0
26	4	0
25	4	0
24	3	0,01154701
23	3	0
22	4	0
21	1	0
20	4	0
19	9	0,00666667
18	2	0
17	4	0

TABELA 31 – Aquisições para cada temperatura

4.4.2.2 - <u>EXPERIÊNCIA 2</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 32, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ	
TEMPERATURA	26 A 18 ⁰ C	
	VOLTAGEM	TEMPO DE
PARÂMETROS DO		VARREDURA
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs

TABELA 32 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 33, a quantidade de sinais aquisitados, a temperatura de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

TABELA 33 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
83 a 85	26	15,200	15,210	15,209
86 a 88	25	15,200	15,210	15,209
89 a 91	24	15,200	15,203	15,204
92 a 94	23	15,180	15,192	15,191
95 a 97	22	15,180	15,182	15,182
98 a 100	21	15,180	15,170	15,172
101 a 103	20	15,160	15,165	15,165
104	19	15,140	15,145	15,146
105 a 111	18	15,140	15,140	15,140

São mostrados na Tabela 34, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TEMPERATURA (^O C)	MEDIDAS	DESVIO-PADRÃO (µs)
26	3	2,38419E-07
25	3	2,38419E-07
24	3	2,38419E-07
23	3	0,011547005
22	3	0
21	3	0,011547005
20	3	0,011547005
19	1	0
18	7	0

TABELA 34 – Quantidade de aquisições para cada temperatura

4.4.2.3 - <u>EXPERIÊNCIA 3</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 35, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TABELA 35 – Ca	racterísticas d	la aquisiçâ	ăО
----------------	-----------------	-------------	----

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	41 A 16 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs	

São mostrados na Tabela 36, os sinais aquisitados, a temperatura de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
112 a 113	41	15,340	15,340	15,340
114 a 116	40	15,340	15,340	15,340
117	39	15,340	15,340	15,339
118	38	15,340	15,335	15,336
119 a 120	37	15,320	15,330	15,330
121 a 123	36	15,320	15,320	15,320
124 a 126	35	15,300	15,308	15,310
127 a 128	34	15,300	15,303	15,303
129 a 130	33	15,280	15,290	15,290
131 a 132	32	15,280	15,280	15,280
133 a 134	31	15,260	15,268	15,268
135 a 136	30	15,260	15,259	15,256
137 a 138	29	15,240	15,238	15,243
139 a 140	28	15,240	15,230	15,232
141 a 142	27	15,220	15,223	15,224
142 a 143	26	15,220	15,215	15,216
144 a 145	25	15,200	15,208	15,208
146 a 147	24	15,200	15,195	15,197
149 a 150	23	15,180	15,180	15,181
151 a 152	22	15,180	15,178	15,179
153 a 154	21	15,160	15,170	15,171
155 a 156	20	15,160	15,160	15,160
157 a 158	19	15,140	15,150	15,148

TABELA 36 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

159 a 160	18	15,140	15,135	15,136
161 a 164	17	15,120	15,121	15,121
165 a 174	16	15,100	15,108	15,107

São mostrados na Tabela 37, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TEMPERATURA (⁰ C) MEDIDAS DESVIO-PADRÃO (µs) 2,38419E-07 0,014142136 0,014142136 0,014142136

TABELA 37 – Quantidade de aquisições para cada temperatura

0,014142136

20	2	0,014142136
19	2	0
18	2	0
17	4	0
16	10	3,17891E-07

4.4.2.4 - <u>EXPERIÊNCIA 4</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 38, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	34 A 29 ^o C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs	

TABELA 38 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 39, a quantidade de sinais aquisitados, sua temperatura de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
12 a 13	34	15,300	15,305	15,308
14 a 15	33	15,300	15,305	15,305
16 a 17	32	15,300	15,293	15,293
18 a 19	31	15,280	15,283	15,283
20	30	15,260	15,270	15,269
21	29	15,260	15,265	15,264

TABELA 39 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 40, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TABELA 40 – Quantidade de aquisições para cada temperatura

TEMPERATURA (⁰ C)	MEDIDAS	DESVIO-PADRÃO (µs)
34	2	0
33	2	0
32	2	0
31	2	0
30	1	0
29	1	0

4.4.2.5 - <u>EXPERIÊNCIA 5</u>

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na Tabela 41, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	33 A 16 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs	

TABELA 41 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 42, a quantidade de sinais aquisitados, sua temperatura de aquisição e as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
22	33	15,280	15,270	15,273
23	32	15,280	15,270	15,273
24	31	15,280	15,270	15,270
25	30	15,260	15,260	15,261
26	29	15,260	15,255	15,256
27	28	15,240	15,245	15,248
28	27	15,240	15,230	15,230
29	26	15,220	15,220	15,219
30	25	15,220	15,210	15,211
31	24	15,200	15,200	15,203
32	23	15,200	15,195	15,194
33 a 34	22	15,180	15,190	15,186
35	21	15,180	15,180	15,179
36 a 37	20	15,160	15,160	15,160

TABELA 42 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso
38	19	15,140	15,150	15,149
39	18	15,140	15,145	15,145
40 a 43	17	15,140	15,135	15,135
44 a 50	16	15,120	15,110	15,110

São mostrados na Tabela 43, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TEMPERATURA (⁰ C)	MEDIDAS	DESVIO-PADRÃO (µs)
33	1	0
32	1	0
31	1	0
30	1	0
29	1	0
28	1	0
27	1	0
26	1	0
25	1	0
24	1	0
23	1	0
22	2	0,01414214
21	1	0
20	2	0,01414214
19	1	0
18	1	0
17	4	0,01
16	7	1,0690E-02

 TABELA 43 – Quantidade de aquisições para cada temperatura

4.4.2.6 - EXPERIÊNCIA 6

SISTEMA DE AQUISIÇÃO - TDS 360

CORPO DE PROVA - Chapa de aço 1020 aliviada termicamente

São mostrados na tabela 44, a frequência do transdutor, a faixa de temperatura de aquisição e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	39 A 16 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	1 V	1 µs	

TABELA 44 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 45, a quantidade de sinais aquisitados, sua temperatura de aquisição e os resultados das médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

TABELA 45 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

SINAIS	TEMPERATURA	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
	(° C)			
51 a 52	39	15,360	15,355	15,355
53	38	15,340	15,345	15,345
54	37	15,340	15,340	15,338
55	36	15,320	15,330	15,330
56	35	15,320	15,320	15,319
57	34	15,320	15,310	15,311
58	33	15,300	15,300	15,301

59	32	15,300	15,295	15,294
60	31	15,280	15,280	15,280
61	30	15,260	15,265	15,268
62	29	15,260	15,255	15,256
63	28	15,240	15,245	15,244
64	27	15,240	15,235	15,234
65	26	15,220	15,225	15,224
66	25	15,220	15,210	15,210
67	24	15,200	15,195	15,198
68	23	15,180	15,165	15,164
69	22	15,160	15,160	15,160
70	21	15,160	15,160	15,160
71	20	15,140	15,150	15,149
72	19	15,140	15,140	15,139
73	18	15,140	15,135	15,134
74 a 76	17	15,140	15,130	15,129
77 a 81	16	15,120	15,123	15,123

São mostrados na Tabela 46, a temperatura de aquisição, a quantidade de sinais aquisitados e seus respectivos desvios-padrão.

TEMPERATURA (⁰ C)	MEDIDAS	DESVIO-PADRÃO (µs)
39	2	0
38	1	0
37	1	0
36	1	0
35	1	0
34	1	0
33	1	0

TABELA 46 – Quantidade de aquisições para cada temperatura

32	1	0
31	1	0
30	1	0
29	1	0
28	1	0
27	1	0
26	1	0
25	1	0
24	1	0
23	1	0
22	1	0
21	1	0
20	1	0
19	1	0
18	1	0
17	3	0,011547005
16	5	2,38419E-07

São mostrados na Tabela 47, a variação média do tempo de percurso da onda ultrasônica de Rayleigh para cada grau centígrado (° C) em cada experiência realizada.

EXPERIÊNCIAS	FAIXA DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (⁰ C)	VARIAÇÃO DE TEMPO DE PERCURSO PARA VARIAÇÃO DE 1 ⁰ C (ns)
1	35 a 17	11,11
2	26 a 18	7,5
3	41 a 16	9,6
4	34 a 29	8,0

TABELA 47 – Variação de tempo de percurso para cada variação de 1º C

5	33 a 16	9,41
6	39 a 16	10,43
MÉDIA	-	9,34

Foi constatada uma variação média no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh de 9,34 ns (nanossegundos) para cada grau centígrado que variou.

Os valores da inclinação da curva tempo de percurso versus temperatura para cada experiência de variação de temperatura realizada, foram calculados e são mostrados na tabela seguinte (Tabela 48).

FAIXA DE VARIAÇÃO	CORPO DE	COEFICIENTE ANGULAR
DE TEMPERATURA (° C)	PROVA	PARA L 16 (° C/ μs)
35 a 17	Aço 1020	92,56
26 a 18	Aço 1020	104,3
41 a 16	Aço 1020	99,11
34 a 29	Aço 1020	104,41
33 a 16	Aço 1020	96,81
39 a 16	Aço 1020	93,70

TABELA 48 – Coeficiente angular da curva temperatura versus tempo

Nos gráficos abaixo (figuras 22, 23 e 24), são mostradas as curvas sobrepostas de temperatura versus tempo de todas as experiências realizadas para os processamentos L0 (correlação cruzada), L 4 e L 16 (interpolação de sinais com a técnica multitaxas). Observando-se os gráficos de temperatura versus tempos de percurso (figuras 22, 23 e 24), foi constatado que a relação entre a temperatura e o tempo de percurso das ondas ultra-sônicas superficiais de Rayleigh é praticamente linear.



Figura 22 - Gráfico L 0 de todas as aquisições de variação de temperatura



Figura 13 – Gráfico L 4 de todas as aquisições de variação de temperatura



Figura 24 - Gráfico L16 de todas as aquisições de variação de temperatura

As experiências de variação de temperatura mostraram que a relação entre a temperatura e o tempo de percurso da onda de Rayleigh é praticamente linear, fato também observado por Pantermuehl em suas experiências [23].

As variações de tempo de percurso detectadas pelo osciloscópio TDS 360 com correlação cruzada (processamento L0) são da ordem de 20 ns (nanossegundos), caindo para 5ns quando se usa a interpolação L4 e 1 ns quando é usada a interpolação L16.

A variação da temperatura numa chapa de aço 1020 de 25 mm de espessura, provoca uma alteração média total no tempo de percurso da onda ultra-sônica de 9,34 ns para cada grau centígrado (Celsius).

4.5 – <u>DETECÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM TUBOS</u>

A integridade estrutural de um duto está intimamente relacionada com o nível de tensões a que o mesmo está submetido e às características mecânicas do próprio material do duto.

Nesta análise de dutos, primeiramente foi estudada a influência do processo de fabricação nas características acustoelásticas do material do tubo e depois, foi avaliada a qualidade da resposta acustoelástica do material do tubo quando sujeito a carregamento externo (tração uniaxial).

No primeiro caso, de um tubo sem costura (Tubo 00), foram traçadas quatro regiões equidistantes, denominadas tiras 1, 2, 3 e 4 ao longo do perímetro do tubo e foram analisados os tempos de percurso dessas regiões para tentar se detectar a presença de tensões residuais.

No segundo caso, de um tubo com costura (Tubo 08), o tubo foi dividido em cinco regiões pré-determinadas para a aquisição de sinais, sendo duas próximas ao cordão de solda (regiões das tiras 12h + e 12h -) e três afastadas do cordão (regiões das tiras 3h, 6 h e 9h), sendo que a região 6 h é a região oposta ao cordão de solda.

Foram analisados os tempos de percurso dessas regiões do tubo e de suas respectivas tiras, que foram extraídas para tentar se detectar a presença de tensões residuais e o alívio de tensões devido ao corte das tiras.

4.5.1 - AQUISIÇÃO DE SINAIS NUM TUBO SEM COSTURA (TUBO 00)

O Tubo 00 é um tubo de aço API X 5L 65 sem costura (sem junta soldada), cujo revestimento à base de resina epóxi, foi retirado por jateamento. Este tubo foi produzido por processo de laminação a quente, a partir de um bloco maciço de seção redonda de aço, o qual foi laminado e perfurado por mandril, sendo obtidas dessa maneira, suas dimensões finais. Teoricamente os tubos sem costura possuem baixo nível de tensões residuais.

O objetivo das aquisições de sinais no tubo sem costura (Tubo 00), é comparar os tempos de percurso de regiões equidistantes do tubo e tentar detectar a presença de tensões

residuais devido ao processo de fabricação do mesmo. Para isso, o tubo foi dividido em 4 (quatro) regiões denominadas tiras 1, 2, 3 e 4.

O sistema ultra-sônico de aquisição de sinais utilizado foi o TDS 360.

A seguir, são mostrados todos os resultados de medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica superficial de Rayleigh que foram aquisitados na superfície externa dessas tiras.

Na Tabela 49, são mostradas, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	23 ⁰ C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	200 mV	2 µs	

TABELA 49 - Características da aquisição

São mostrados nas Tabelas 50 a 57, a quantidade de sinais aquisitados, seus pontos de aquisição, as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica em cada ponto, com correlação cruzada (processamento L0) e com interpolação de sinais (processamentos L4 e L16) e os respectivos desvios-padrão dos tempos de percurso.

TUBO 00 – <u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 1</u>

TABELA 50 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	P1	15,813	15,815	15,816
11 a 20	P2	15,666	15,668	15,668
21 a 30	P3	15,733	15,739	15,740
31 a 40	P4	15,292	15,285	15,286
41 a 50	P5	15,740	15,744	15,746

SINAIS	DESVIO-PADRÃO DESVIO-PADRÃO		DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	1,7006	1,2371E-01	1,2351E-01
11 a 20	2,0216	5,8926E-03	6,0107E-03
21 a 30	1,3499E-02	1,0951E-01	1,0990E-01
31 a 40	1,1448E-01	8,3166E-03	8,8034E-03
41 a 50	1,7154E-01	1,5714E-01	1,5733E-01

TABELA 51 - Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região da tira 1

TUBO 00 – <u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 2</u>

TABELA 52 – Sinais aquisi	itados e médias	dos tempos o	de percurso
---------------------------	-----------------	--------------	-------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
51 a 60	P1	15,714	15,714	15,715
61 a 70	P2	15,704	15,711	15,711
71 a 80	P3	15,736	15,740	15,740
81 a 90	P4	15,740	15,741	15,741
91 a 100	P5	15,731	15,732	15,734

TABELA 53 - Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região da tira 2

SINAIS	DESVIO-PADRÃO DESVIO-PADRÃO		DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
51 a 60	2,2302	1,1851E-01	1,1895E-01
61 a 70	1,3167E-01	1,2946	1,1861E-01
71 a 80	2,1983	2,1393	1,7601
81 a 90	2,1280E-01	1,2836	1,2847
91 a 100	2,0880E-01	1,7801	1,9186E-01

TUBO 00 – <u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 3</u>

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
101 a 110	P1	15,283	15,289	15,289
111 a 120	P2	15,687	15,276	15,276
121 a 130	P3	15,696	15,699	15,699
131 a 140	P4	15,698	15,704	15,705
141 a 150	P5	15,697	15,697	15,697

TABELA 54 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

TABELA 55 - Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região da tira 3

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
101 a 110	1,8800	4,7434E-03	5,3098E-03
111 a 120	2,2347	1,3292E-02	1,3494E-02
121 a 130	8,4327E-03	5,6765E-03	5,7449E-03
131 a 140	1,1331E-01	1,8211E-01	1,8299E-01
141 a 150	1,9867E-01	2,0627E-01	2,0620E-01

TUBO 00 – <u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 4</u>

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
151 a 160	P1	19,782	15,251	15,251
161 a 170	P2	15,294	15,295	15,295
171 a 180	P3	15,709	15,713	15,713
181 a 190	P4	15,298	15,405	15,405
191 a 200	P5	15,283	15,286	15,287

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
151 a 160	1,4174	1,2302E-01	1,2278E-01
161 a 170	1,9614E-01	2,3294	2,3300
171 a 180	1,3127	1,2116E-01	1,2099E-01
181 a 190	1,7825E-01	1,8631	1,8632
191 a 200	2,1791E-01	2,0262E-01	2,0273E-01

TABELA 57 - Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região da tira 4

A comparação entre os tempos de percurso da onda ultra-sônica das regiões do tubo sem solda (Tubo 00) é mostrada no item 4.5.1.1.

4.5.1.1 - <u>COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE PERCURSO DAS REGIÕES</u> <u>DO TUBO SEM COSTURA (TUBO 00) USANDO O PROCESSAMENTO</u> <u>COM INTERPOLAÇÃO L 16</u>

Na Tabela 58 são mostradas as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica nos pontos das regiões pré-determinadas do tubo 00 com o processamento L16.

PONTOS	REGIÃO DA TIRA 1 (μs)	REGIÃO DA TIRA 2 (μs)	REGIÃO DA TIRA 3 (μs)	REGIÃO DA TIRA 4 (μs)
1	15,816	15,715	15,289	15,251
2	15,668	15,711	15,276	15,295
3	15,740	15,740	15,699	15,713
4	15,286	15,741	15,705	15,405
5	15,746	15,734	15,697	15,287
MÉDIAS	15,651	15,728	15,533	15,390

TABELA 58 – Médias dos tempos de percurso nos pontos das regiões do Tubo 00

Os tubos sem costura possuem teoricamente baixo nível de tensões residuais.

Foi suposto que os tempos de percurso seriam parecidos em todas as regiões do tubo. Entretanto, foi observado que cada região do tubo analisado (Tubo 00), comporta-se como um material com características distintas entre si.

A região da tira 2 foi a única região que apresentou uma distribuição homogênea dos tempos de percurso em todos os seus pontos, possuindo também a maior média dos tempos. As demais regiões não apresentaram esse comportamento uniforme.

A região da tira 4 apresentou os menores tempos de percurso, possuindo a menor média dos tempos de percurso.

Esta heterogeneidade entre os tempos das regiões do tubo deve-se ao fato do tubo já ter sido usado anteriormente para o transporte de fluidos.

Acredita-se portanto, que as próprias tensões de serviço tenham gerado tensões residuais no tubo acarretando essa disparidade nos tempos de percurso.

4.5.2 - AQUISIÇÃO DE SINAIS NUM TUBO SOLDADO (TUBO 08)

Sinais ultra-sônicos foram aquisitados nas cinco regiões pré-determinadas do tubo com costura (Tubo 08).

Foram utilizados dois sistemas ultra-sônicos de aquisição desses sinais, sendo utilizados os sistemas TDS 3054 B e TDS 2221 A. Após a aquisição dos sinais ultrasônicos nas regiões do tubo, foram extraídas tiras do mesmo e novamente aquisitados sinais nos mesmos pontos.

Posteriormente, os tempos de percurso dos sinais adquiridos no tubo e em suas respectivas tiras foram comparados.

4.5.2.1 - <u>COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES E AS TIRAS DO TUBO SOLDADO 08</u> <u>COM O SISTEMA TDS 3054 B</u>

Foram aquisitados sinais nas regiões pré-determinadas do tubo 08 (próximas e afastadas do cordão de solda) em 3 pontos de cada região (pontos 1, 2 e 4) e dessas mesmas regiões foram extraídas tiras, nas quais foram aquisitados sinais nesses mesmos pontos.

O objetivo dessas aquisições é comparar os tempos de percurso das regiões do tubo e de suas tiras e avaliar se foram aliviadas tensões com o corte do tubo em tiras.

São mostrados na Tabela 59, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais no tubo e nas tiras e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ			
	22 ⁰ C (TUBO)			
TEMPERATURA	23 ^o C (TIRAS)			
	VOLTAGEM TEMPO DE			
PARÂMETROS DO		VARREDURA		
OSCILOSCÓPIO	5 V 2 μs			

TABELA 59 – Características da aquisição

São mostrados nas Tabelas 60 a 79, a quantidade de sinais aquisitados, seus pontos de aquisição, as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16) e seus respectivos desvios-padrão dos tempos de percurso.

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 12H (+) – TDS 3054 B

P4

51 a 60

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (μs)	L16 (µs)
31 a 40	P1	11,214	11,214	11,214
41 a 50	P2	11,346	11,347	11,347

11,352

11,352

11,352

TABELA 60 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na região 12 h +

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	7,1635E-02	7,1369E-02	7,1381E-02
41 a 50	7,0262E-02	7,0501E-02	7,0593E-02
51 a 60	3,7476E-03	3,2494E-03	3,3049E-03

TABELA 61 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 12 h +

<u>TIRA 12H (+) DO TUBO 08 – TDS 3054 B</u>

TABELA 62 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 12 h +

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	P1	11,441	11,442	11,442
41 a 50	P2	11,453	11,453	11,453
51 a 60	P4	11,381	11,381	11,381

TABELA 63 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 12 h +

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	2,3190E-03	2,1448E-03	2,1667E-03
41 a 50	2,8674E-03	2,6854E-03	2,7174E-03
51 a 60	9,6609E-04	7,4722E-04	6,2062E-04

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 3H – TDS 3054 B

TABELA 64 – Sinais aquisitados e médias dos te	empos de percurso na re	gião 3 h
--	-------------------------	----------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	P1	11,339	11,340	11,340
71 a 80	P2	11,386	11,386	11,386
81 a 90	P4	11,346	11,346	11,346

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	4,0056E-03	3,8112E-03	3,8094E-03
71 a 80	4,6390E-02	4,6324E-02	4,6345E-02
81 a 90	1,1353E-03	1,1891E-03	1,1003E-03

TABELA 65 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 3 h

<u>TIRA 3H DO TUBO 08 – TDS 3054 B</u>

TABELA 66 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 3 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	P1	11,408	11,409	11,409
71 a 80	P2	11,317	11,317	11,317
81 a 90	P4	10,999	10,999	10,999

TABELA 67 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 3 h

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	1,5137E-01	1,5137E-01	1,5141E-01
71 a 80	1,5131E-01	1,5160E-01	1,5163E-01
81 a 90	1,3499E-03	1,2428E-03	1,1969E-03

<u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À DA TIRA 6H – TDS 3054 B</u>

TABELA 68 –	Sinais aquisitado	os e médias do	os tempos de	percurso na	região (5 h
	1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	r		

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	P1	11,363	11,362	11,362
101 a 110	P2	10,773	10,773	10,773
111 a 120	P4	10,736	10,736	10,736

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	3,6576E-03	3,7506E-03	3,7803E-03
101 a 110	2,9968E-01	2,9984E-01	2,9985E-01
111 a 120	2,7306E-01	2,7322E-01	2,7316E-01

TABELA 69 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 6 h

<u>TIRA 6H DO TUBO 08 – TDS 3054 B</u>

TABELA 70 – Sinais aquisitados e médias dos temp	os de percurso na tira 6 h
--	----------------------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	P1	10,924	10,924	10,924
101 a 110	P2	11,425	11,425	11,425
111 a 120	P4	11,440	11,440	11,440

TABELA 71 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 6 h

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO DESVIO PADRÃO	
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	1,6330E-03	1,1168E-03	1,1543E-03
101 a 110	1,0541E-03	4,3780E-04	4,6500E-04
111 a 120	0	2,3570E-04	1,9586E-04

<u>REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 9H – TDS 3054 B</u>

TABELA 72 – Sinais aquisitados e médias do	os tempos de percurso	na região 9 h
--	-----------------------	---------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	P1	11,314	11,314	11,314
131 a 140	P2	11,356	11,356	11,356
141 a 150	P4	11,195	11,196	11,195

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	4,8488E-03	4,5595E-03	4,5143E-03
131 a 140	1,8379E-03	1,8265E-03	1,8951E-03
141 a 150	4,3279E-02	3,6803E-03	3,7296E-03

TABELA 73 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 9 h

<u>TIRA 9H DO TUBO 08 – TDS 3054 B</u>

TABELA 74 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso	na tira 9 h
--	-------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	P1	11,567	11,568	11,568
131 a 140	P2	10,830	10,830	10,830
141 a 150	P4	11,480	11,480	11,480

TABELA 75 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 9 h

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	1,0328E-03	1,0274E-03	9,7454E-04
131 a 140	1,5448E-01	1,5462E-01	1,5458E-01
141 a 150	8,4327E-04	1,5599E-03	1,5098E-03

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 12H (-) - TDS 3054 B

TABELA 76 – Sinais aquisitados e médias dos temp	pos de percurso na região 12 h –
--	----------------------------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	P1	11,170	11,171	11,171
11 a 20	P2	11,332	11,332	11,332
21 a 30	P4	11,197	11,197	11,197

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	8,7879E-02	8,7789E-02	8,7803E-02
11 a 20	1,1353E-03	1,3904E-03	1,3665E-03
21 a 30	1,0328E-03	4,9721E-04	4,6380E-04

TABELA 77 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 12 h -

<u>TIRA 12H (-) DO TUBO 08 – TDS 3054 B</u>

TABELA 78 – Sinais a	quisitados	e médias do	os tempos de j	percurso na	tira 12 h -
----------------------	------------	-------------	----------------	-------------	-------------

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	P1	11,478	11,478	11,478
11 a 20	P2	11,457	11,457	11,457
21 a 30	P4	11,397	11,397	11,397

TABELA 79 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 12 h –

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	3,1789E-07	3,1623E-04	2,5638E-04
11 a 20	1,0328E-03	5,1640E-04	5,1828E-04
21 a 30	6,6134E-02	6,6270E-02	6,6176E-02

Com o sistema TDS 3054 B, foram comparados os tempos de percurso de regiões próximas (regiões das tiras 12 h + e 12 h -) e afastadas (regiões das tiras 3h, 6 h e 9h) do cordão de solda do tubo e de suas respectivas tiras.

Foi pressuposto que ao cortar-se o tubo em tiras, as tensões residuais seriam aliviadas ou relaxadas, ou seja, os tempos de percurso da onda cairiam [36]. Tal fato não foi observado, pois na maioria dos pontos, os tempos de percurso aumentaram ao invés de diminuir.

4.5.2.2 - <u>COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES E AS TIRAS DO TUBO SOLDADO 08</u> <u>COM O SISTEMA TDS 2221 A</u>

O mesmo tubo soldado (Tubo 08) foi analisado com o sistema de aquisição TDS 2221 A. Sinais ultra-sônicos foram aquisitados nas cinco regiões pré-determinadas do tubo e nas tiras nos mesmos pontos.

Posteriormente, os tempos de percurso dos sinais adquiridos no tubo e em suas respectivas tiras foram comparados.

São mostrados na Tabela 80, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição no tubo e nas tiras e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TABELA 80 – Características da aquisição

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	22 ⁰ C (TUBO)		
	21 [°] C (TIRAS)		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	5 V	2 µs	

São mostrados nas Tabelas 81 a 100, a quantidade de sinais aquisitados, seus pontos de aquisição, as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16) e seus respectivos desvios-padrão dos tempos de percurso.

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 12H (+) - TDS 2221 A

TABELA 81 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	P1	11,368	11,368	11,368
41 a 50	P2	11,563	11,509	11,509
51 a 60	P4	11,346	11,345	11,345

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	6,6089E-02	6,6990E-02	6,6846E-02
41 a 50	1,8003	1,8321	1,8323
51 a 60	5,1928E-02	5,1249E-02	5,1320E-02

TABELA 82 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 12 h +

<u>TIRA 12H (+) DO TUBO 08 - TDS 2221 A</u>

TABELA 83 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 12 h +

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	P1	10,946	10,946	10,946
41 a 50	P2	10,964	10,965	10,965
51 a 60	P4	11,382	11,382	11,382

TABELA 84 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 12 h +

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
31 a 40	2,7454E-01	2,7405E-01	2,7384E-01
41 a 50	1,5359E-01	1,5313E-01	1,5333E-01
51 a 60	5,7545E-02	5,6884E-02	5,6884E-02

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 3H - TDS 2221 A

TABELA 85 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na região 3 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	P1	11,466	11,466	11,466
71 a 80	P2	11,463	11,463	11,463
81 a 90	P4	11,367	11,367	11,367

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	1,6892E-01	1,6943E-01	1,6931E-01
71 a 80	2,0365E-01	2,0413E-01	2,0400E-01
81 a 90	2,3241E-01	2,1469E-01	2,1466E-01

TABELA 86 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 3 h

TIRA 3H DO TUBO 08 - TDS 2221 A

TABELA 87 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 3 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	P1	11,342	11,343	11,343
71 a 80	P2	11,337	11,337	11,337
81 a 90	P4	11,357	11,356	11,356

TADELA 00 – Desvios-paurao dos sinais aquisitados na tira 5 l	TABELA 88	- Desvios-	padrão dos	sinais ad	quisitados na	a tira 3 h
---	-----------	------------	------------	-----------	---------------	------------

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
61 a 70	2,5820E-03	1,7480E-03	1,6635E-03
71 a 80	2,5820E-03	1,2076E-03	1,3533E-03
81 a 90	3,3747E-03	2,7131E-03	2,8549E-03

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 6H - TDS 2221 A

TABELA 89 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na região 6 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	P1	11,540	11,539	11,539
101 a 110	P2	11,223	11,222	11,222
111 a 120	P4	11,330	11,331	11,331

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	9,5582E-02	9,6003E-02	9,5901E-02
101 a 110	1,3139E-01	1,3149E-01	1,3161E-01
111 a 120	7,4087E-02	7,3608E-02	7,3580E-02

TABELA 90 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 6 h

<u>TIRA 6H DO TUBO 08 - TDS 2221 A</u>

TABELA 91 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 6 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	P1	11,357	11,356	11,356
101 a 110	P2	11,389	11,388	11,388
111 a 120	P4	11,320	11,320	11,320

TABELA 92 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 6 h

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
91 a 100	2,4152E-03	1,9588E-03	1,8411E-03
101 a 110	4,2390E-02	4,2484E-02	4,2271E-02
111 a 120	2,3570E-03	2,5719E-03	2,5261E-03

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 9H - TDS 2221 A

TABELA 93 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na região 9 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	P1	11,304	11,305	11,305
131 a 140	P2	11,349	11,349	11,349
141 a 150	P4	11,316	11,316	11,316

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	3,9374E-02	4,2410E-03	4,1015E-03
131 a 140	7,7882E-02	7,7200E-02	7,7102E-02
141 a 150	3,9441E-03	4,0483E-03	4,2491E-03

TABELA 94 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 9 h

<u>TIRA 9H DO TUBO 08 - TDS 2221 A</u>

TABELA 95 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 9 h

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	P1	11,315	11,316	11,316
131 a 140	P2	11,177	11,177	11,177
141 a 150	P4	11,431	11,431	11,431

IABELA 96 – Desvios-padrao dos sinais aquisitados na tira 9

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
121 a 130	0	1,5811E-03	1,4527E-03
131 a 140	2,4152E-03	2,5173E-03	2,5365E-03
141 a 150	3,3504E-02	3,2977E-02	3,2889E-02

REGIÃO DO TUBO CORRESPONDENTE À TIRA 12H (-) - TDS 2221 A

TABELA 97 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na região 12 h -

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	P1	11,333	11,333	11,333
11 a 20	P2	11,201	11,201	11,201
21 a 30	P4	11,322	11,322	11,322

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	5,3748E-03	5,3098E-03	5,3954E-03
11 a 20	1,0298E-01	1,0265E-01	1,0264E-01
21 a 30	4,2847E-02	4,2928E-02	4,2811E-02

TABELA 98 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na região 12 h -

<u>TIRA 12H (-) DO TUBO 08 - TDS 2221 A</u>

TABELA 99 - Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso na tira 12 h -

SINAIS	AQUISIÇÃO	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	P1	11,341	11,341	11,341
11 a 20	P2	11,352	11,351	11,351
21 a 30	P4	11,304	11,304	11,304

TABELA 100 – Desvios-padrão dos sinais aquisitados na tira 12 h -

SINAIS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
1 a 10	1,5811E-03	1,3242E-03	1,1963E-03
11 a 20	4,1164E-03	3,8392E-03	3,6318E-03
21 a 30	4,2609E-02	5,7425E-02	4,3106E-02

Com o sistema TDS 2221 A, também foram comparados os tempos de percurso de regiões próximas e afastadas do cordão de solda das regiões do tubo e de suas respectivas tiras.

Foi constatado para este sistema (TDS 2221 A) que os tempos de percurso diminuíram, na maioria dos pontos, com o corte do tubo em tiras, havendo portanto, a relaxação das tensões com o corte do tubo em tiras.

4.6 - <u>DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS</u> <u>EXPERIMENTAIS</u>

As constantes acustoelásticas experimentais foram obtidas através de ensaios de tração uniaxial nas tiras dos tubos soldados 03 e 08.

O transdutor foi colocado na direção longitudinal das tira de aço dos tubos. Neste caso, a direção de polarização da onda ultra-sônica estava paralela à direção de aplicação da tensão trativa.

Para cada carga aplicada, foram aquisitados sinais ultra-sônicos até valores próximos do limite de escoamento teórico do material. Com o fim do regime elástico e o início do escoamento do material, o ensaio de tração era cessado.

Segundo Lindgren [32], medições da velocidade ultra-sônica como função da tensão mostraram uma relação linear entre tensão e velocidade [32]. Esta relação também se adequa muito bem a ondas superficiais e pode ser dada como uma equação linear da forma:

v(T) = v(0)(1+CT) (Equação 21)

A equação 21 mostra de uma forma simplificada como se obtém a constante acustoelástica do material [32]. O valor experimental dessa constante é obtido a partir do coeficiente angular da curva tempo de percurso versus tensão (carga por unidade de área).

Foi observado por Lindgrenl [32], que num material com tensões compressivas superficiais, as velocidades da onda ultra-sônica de Rayleigh diminuem. Consequentemente os tempos de percurso da onda aumentam com a presença deste tipo de tensões [32].

Como foram aplicadas tensões trativas externas no material houve uma combinação dessas tensões trativas com as compressivas residuais já existentes no material [32].

Logo o campo de tensões observado pelos transdutores de alta freqüência, era uma mistura dos dois tipos de tensões (trativas externas e compressivas residuais), sendo portanto menor do que o campo de tensões observado pelos transdutores de baixa freqüência [32].

Os objetivos destas experiências de tração uniaxial nas tiras de tubos soldados são ratificar ou contestar as conclusões de Lindgren [32] acerca da influência de tensões

externas no tempo de percurso de ondas ultra-sônicas de Rayleigh e calcular as constantes acustoelásticas dos materiais que constituem os tubos 03 e 08.

4.6.1 - TRAÇÃO UNIAXIAL NA TIRA 12 h DO TUBO 03 COM O SISTEMA DE AQUISIÇÃO TDS 360

Neste ensaio, foi tracionada a tira 12 h, região situada próxima ao cordão de solda, de um tubo de aço soldado API X 5L 65, denominado Tubo 03.

São mostrados na Tabela 101, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	25 [°] C		
	VOLTAGEM	TEMPO DE	
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	2 V	1 μs	

TABELA 101 - Características da aquisição

São mostrados na Tabela 102, as cargas aplicadas na tira 12 h do Tubo 03, a forma de aquisição de sinais, a quantidade de medidas adquiridas em cada carga e as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (processamento L0) e com interpolação de sinais (processamentos L4 e L16).

CARGAS (kgf)	AQUISIÇÃO	MEDIDAS	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	AV 256 LONG	3	11,267	11,272	11,273
2000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,213
4000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,213
6000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,213
8000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,214
10000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,215
12000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,215
14000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,216
16000	AV 256 LONG	3	11,220	11,217	11,218
18000	AV 256 LONG	3	11,220	11,215	11,217

TABELA 102 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 103, os desvios-padrão do tempo de percurso da onda ultra-sônica para cada carga aplicada para os processamentos com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
(Kg)	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	0,080829	0,080829	0,079749
2000	0	1,69E-07	0,000722
4000	0	1,69E-07	0
6000	0	1,69E-07	0,000722
8000	0	1,69E-07	0
10000	0	1,69E-07	1,69E-07
12000	0	1,69E-07	1,69E-07
14000	0	1,69E-07	1,69E-07
16000	0	0,002887	1,69E-07
18000	0	1,69E-07	0,000722

TABELA 103 – Desvios-padrão dos tempos de percurso para cada carga aplicada

A figuras 25 mostra o gráfico tempos de percurso versus cargas para o ensaio de tração uniaxial realizado na tira 12 h do Tubo 03 com o sistema TDS 360.

A figura 26 mostra o gráfico tempos versus tensões (carga por unidade de área), com a equação parabólica que rege a curva.



Figura 25 – Gráfico de tempos versus cargas da tira 12 h do Tubo 03





O sistema TDS 360 não consegue detectar tensões superficiais quando é usada somente a correlação cruzada (processamento matemático L0).

Com o uso da interpolação L4, o tempo de amostragem do osciloscópio passou de 20 ns para 10 ns. Ainda assim, não se consegue detectar tensões superficiais. Porém, com a interpolação L16, onde o tempo de amostragem do osciloscópio diminuiu para 1 ns, tensões trativas uniaxiais foram detectadas. É observado que a interpolação potencializa a capacidade dos osciloscópios consideravelmente, sendo uma técnica altamente eficiente.

Ao contrário das informações de Lindgren [32], foi observado que o tempo de percurso da onda ultra-sônica aumenta com a aplicação de tensões trativas e que a relação entre o tempo de percurso e as tensões é parabólica e não linear. De acordo com o gráfico tempos de percurso versus tensões da tira 12 h do Tubo 03 para o processamento L16 (figura 26), a relação entre os tempos de percurso da onda ultra-sônica e as tensões é parabólica, sendo regida pela equação $y = 6.10^{-6}x^2 + 2.10^{-5}x + 11,213$.

4.6.2 - <u>TRAÇÃO UNIAXIAL NA TIRA 12 h (+) DO TUBO 08 COM O SISTEMA</u> <u>DE AQUISIÇÃO TDS 3054 B</u>

Neste ensaio, foi tracionada a tira 12 h +, região situada próxima ao cordão de solda, de um tubo de aço soldado API X 5L 65, denominado Tubo 08.

São mostrados na Tabela 104, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	24 ⁰ C		
	VOLTAGEM TEMPO I		
PARÂMETROS DO		VARREDURA	
OSCILOSCÓPIO	10 V	2 µs	

TABELA 104 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 105, as cargas aplicadas, a forma de aquisição de sinais, a quantidade de medidas adquiridas em cada carga e as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS (kgf)	AQUISIÇÃO	MEDIDAS	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	AV 256 LONG	6	11,426	11,427	11,426
2000	AV 256 LONG	3	11,618	11,618	11,618
4000	AV 256 LONG	6	11,616	11,616	11,616
6000	AV 256 LONG	4	11,616	11,616	11,616
8000	AV 256 LONG	5	11,618	11,617	11,617
10000	AV 256 LONG	4	11,618	11,618	11,618
12000	AV 256 LONG	5	11,620	11,620	11,620
14000	AV 256 LONG	4	11,620	11,621	11,621
16000	AV 256 LONG	4	11,622	11,622	11,622
18000	AV 256 LONG	6	11,624	11,624	11,624
20000	AV 256 LONG	4	11,626	11,625	11,625
22000	AV 256 LONG	4	11,628	11,628	11,627
24000	AV 256 LONG	5	11,630	11,630	11,630
25000	AV 256 LONG	5	11,632	11,632	11,632
26000	AV 256 LONG	4	11,634	11,634	11,634

TABELA 105 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 106, os desvios-padrão dos tempos de percurso da onda ultra-sônica para cada carga aplicada para os processamentos com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
(Kg)	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	0,000816497	0,000548	0,000536
2000	0	0,000289	0,000312
4000	0	0,000204	0,000194
6000	0	0,00025	0,000125
8000	0,000894427	0,000447	0,000471
10000	0	0,00025	6,93E-05
12000	1,68587E-07	0	8,84E-05
14000	0	0	7,51E-05
16000	0	0,000289	0,00012
18000	1,50789E-07	0	0,000131
20000	0	0,000289	0,000179
22000	0	0	6E-05
24000	1,68587E-07	0,000274	7,12E-05
25000	0	0,000224	0,000142
26000	0	0	6,93E-05

TABELA 106 – Desvios-padrão dos tempos de percurso para cada carga aplicada

As figuras 27 e 28 mostram os gráficos tempos de percurso versus cargas e tempos versus tensões com a equação que rege esta curva do ensaio de tração uniaxial realizado na tira 12 h + do Tubo 08.









O sistema TDS 3054 é capaz de detectar tensões quando é usada somente a correlação cruzada (processamento matemático L0).

A sensibilidade do equipamento, com o uso da interpolação L4 e L16, aumenta com a transformação do tempo de amostragem de 2 ns (nanossegundos) para 1 ns, melhorando ainda mais a detecção de tensões trativas superficiais.

No ensaio de tração uniaxial da tira 12 h + do Tubo 08 (com costura), de acordo com o gráfico tempos de percurso versus tensões (figura 28), foi observado que o tempo de percurso aumenta com as tensões e que a relação entre ambos é parabólica, sendo regida pela equação $y = 9.10^{-6}x^2 - 3.10^{-5}x + 11,616$.

4.6.3 - <u>TRAÇÃO UNIAXIAL NA TIRA 3 h DO TUBO 08 COM O SISTEMA DE</u> <u>AQUISIÇÃO TDS 3054 B</u>

Neste ensaio, foi tracionada a tira 3 h, região afastada do cordão de solda, de um tubo de aço soldado API X 5L 65, denominado Tubo 08.

São mostrados na Tabela 107, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ			
TEMPERATURA	24 ⁰ C			
	VOLTAGEM	TEMPO DE		
PARÂMETROS DO		VARREDURA		
OSCILOSCÓPIO	10 V	2 µs		

TABELA 107 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 108, as cargas aplicadas, a forma de aquisição de sinais, a quantidade de medidas adquiridas em cada carga e as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS (kgf)	AQUISIÇÃO	MEDIDAS	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	AV 256 LONG	5	11,503	11,503	11,503
2000	AV 256 LONG	4	11,540	11,540	11,540
4000	AV 256 LONG	5	11,502	11,503	11,503
6000	AV 256 LONG	4	11,505	11,505	11,505
8000	AV 256 LONG	5	11,506	11,506	11,506
10000	AV 256 LONG	5	11,506	11,507	11,507
12000	AV 256 LONG	5	11,508	11,508	11,508
14000	AV 256 LONG	4	11,510	11,510	11,509
16000	AV 256 LONG	5	11,510	11,511	11,510
18000	AV 256 LONG	4	11,512	11,511	11,511
20000	AV 256 LONG	5	11,514	11,514	11,514
22000	AV 256 LONG	7	11,516	11,516	11,516
24000	AV 256 LONG	4	11,518	11,518	11,518
25000	AV 256 LONG	4	11,398	11,398	11,398
26000	AV 256 LONG	4	11,034	11,034	11,034

TABELA 108 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 109, os desvios-padrão dos tempos de percurso da onda ultra-sônica para cada carga aplicada para os processamentos com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).
CARGAS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
(Kg)	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	1,0954E-03	2,7386E-04	4,2670E-04
2000	4,3879E-02	4,4167E-02	4,4274E-02
4000	8,9443E-04	2,7386E-04	2,7308E-04
6000	1,0000E-03	0	2,1276E-04
8000	0	2,7386E-04	1,1238E-04
10000	0	2,7386E-04	1,6453E-04
12000	1,6859E-07	2,2361E-04	1,9766E-04
14000	0	0	5,9999E-05
16000	0	0	1,0402E-04
18000	1,0000E-03	2,8868E-04	2,9827E-04
20000	1,6859E-07	2,7386E-04	1,6146E-04
22000	0	2,0412E-04	1,3161E-04
24000	0	2,5000E-04	1,2500E-04
25000	2,8290E-01	2,8868E-04	7,5055E-05
26000	0	2,8868E-04	3,6800E-04

TABELA 109 – Desvios-padrão dos tempos de percurso para cada carga aplicada

O limite de escoamento experimental do material da tira 3 h foi determinado através de um ensaio de tração uniaxial e foi estipulado em $\sigma_y = 45,65 \text{ Kg/mm}^2$.

Logo a partir de 25000 Kg, o material passou a escoar, fato comprovado pela relaxação de tensões, a qual ocasionou queda no tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Este fato acentuou-se mais ainda, quando carregou-se o material com 26000 Kg.

Os valores médios dos tempos de percurso para essas duas cargas (25000 e 26000 Kg), não foram considerados no gráfico tempos de percurso versus tensões, na hora do cálculo da constante acustoelástica do material, pois estes valores interferem na inclinação da curva.

Nas figuras 29 e 30 são mostrados os gráficos tempos de percurso versus cargas e tempos versus tensões. A figura 30 apresenta a equação que rege a curva tempos versus tensões.









O sistema TDS 3054 é capaz de detectar tensões quando é usada somente a correlação cruzada (processamento matemático L0).

A sensibilidade do equipamento, com o uso da interpolação L4 e L16, aumenta com a transformação do tempo de amostragem de 2ns para 1 ns, melhorando ainda mais a detecção de tensões superficiais.

No ensaio de tração uniaxial da tira 3h do Tubo 08, foi observado que o tempo de percurso aumenta com as tensões e que a relação entre ambos é parabólica sendo regida pela equação do gráfico tempos de percurso versus tensões (figura 30) $y = 6.10^{-6}x^2 + 0,0001x + 11,503$.

4.6.4 - <u>TRAÇÃO UNIAXIAL NA TIRA 6 h DO TUBO 08 COM O SISTEMA DE</u> <u>AQUISIÇÃO TDS 3054 B</u>

Neste ensaio, foi tracionada a tira 6 h, região oposta ao cordão de solda, de um tubo de aço soldado API X 5L 65, denominado Tubo 08.

São mostrados na Tabela 110, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	24 ⁰ C		
PARÂMETROS DO	VOLTAGEM TEMPO DE		
OSCILOSCÓPIO		VARREDURA	
	10 V	2 μs	

TABELA 110 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 111, as cargas aplicadas, a forma de aquisição de sinais, a quantidade de medidas adquiridas em cada carga e as médias dos tempos de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS (kgf)	AQUISIÇÃO	MEDIDAS	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	AV 256 LONG	4	11,202	11,201	11,201
2000	AV 256 LONG	5	11,409	11,409	11,409
4000	AV 256 LONG	5	11,410	11,410	11,409
6000	AV 256 LONG	4	11,410	11,411	11,410
8000	AV 256 LONG	5	11,410	11,411	11,411
10000	AV 256 LONG	5	11,412	11,412	11,412
12000	AV 256 LONG	5	11,412	11,413	11,412
14000	AV 256 LONG	5	11,414	11,414	11,413
16000	AV 256 LONG	4	11,414	11,414	11,414
18000	AV 256 LONG	5	11,416	11,415	11,415
20000	AV 256 LONG	5	11,416	11,417	11,417
22000	AV 256 LONG	5	11,418	11,418	11,418
24000	AV 256 LONG	5	11,420	11,420	11,420
25000	AV 256 LONG	4	11,420	11,421	11,421
26000	AV 256 LONG	4	11,422	11,422	11,422

TABELA 111 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 112, os desvios-padrão dos tempos de percurso da onda ultra-sônica para cada carga aplicada para os processamentos com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
(Kg)	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	1,0000E-03	2,8868E-04	2,7158E-04
2000	1,0954E-03	1,6859E-07	1,0521E-04
4000	0	3,5355E-04	2,0511E-04
6000	0	0	1,0210E-04
8000	0	0	5,3666E-05
10000	1,6859E-07	0	5,8138E-05
12000	1,6859E-07	0	1,0402E-04
14000	0	1,6859E-07	7,1204E-05
16000	0	2,5000E-04	1,2500E-04
18000	1,6859E-07	2,7386E-04	6,5727E-05
20000	1,6859E-07	0	1,2502E-04
22000	0	2,7386E-04	1,4167E-04
24000	0	0	1,1127E-04
25000	0	0	6,9282E-05
26000	0	0	6,0000E-05

TABELA 112 – Desvios-padrão dos tempos de percurso para cada carga aplicada

As figuras 31 e 32 mostram os gráficos tempos de percurso versus cargas e tempos versus tensões com a equação que rege esta curva, do ensaio de tração uniaxial realizado com a tira 6 h do Tubo 08.



Figura 31 – Tira 6 h do tubo 08



Figura 32 – Gráfico tempos versus tensões da tira 6 h do Tubo 08

O osciloscópio TDS 3054 B somente com o uso de correlação cruzada

(processamento L0), consegue detectar variações do tempo de percurso de 2 ns, suficiente para detectar tensões.

A sensibilidade do osciloscópio é aumentada com o uso das interpolações L4 e L 16, que transformam o tempo de amostragem de 2ns para 1ns, melhorando ainda mais as medições.

No caso da tira 6h do Tubo 08, foi observado que os tempos de percurso da onda ultra-sônica aumentam com as tensões e que a relação entre ambos é parabólica sendo regida pela equação do gráfico (figura 32) que é $y = 5.10^{-6}x^2 + 3.10^{-5}x + 11,409$.

4.6.5 - <u>TRAÇÃO UNIAXIAL NA TIRA 9 h DO TUBO 08 COM O SISTEMA DE</u> <u>AQUISIÇÃO TDS 2221A</u>

Neste ensaio, foi tracionada a tira 9 h, região afastada do cordão de solda, de um tubo de aço soldado API X 5L 65, denominado Tubo 08.

Foi trocado o osciloscópio anterior (TDS 3054 B) pelo TDS 2221 A para tentar detectar tensões trativas na superfície da tira com este equipamento durante o carregamento trativo uniaxial.

São mostrados na Tabela 113, a frequência do transdutor, a temperatura de aquisição de sinais e os parâmetros do osciloscópio utilizados nesta experiência.

TRANSDUTOR	4 MHZ		
TEMPERATURA	24 ⁰ C		
PARÂMETROS DO	VOLTAGEM	TEMPO DE	
OSCILOSCÓPIO		VARREDURA	
	5 V	2 µs	

TABELA 113 – Características da aquisição

São mostrados na Tabela 114, as cargas aplicadas, a forma de aquisição de sinais, a quantidade de adquiridas em cada carga e as médias dos tempos de percurso da onda ultrasônica de Rayleigh com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS (kgf)	AQUISIÇÃO	MEDIDAS	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	AV 256 LONG	3	11,238	11,237	11,237
2000	AV 256 LONG	3	11,330	11,330	11,330
4000	AV 256 LONG	3	11,327	11,328	11,327
6000	AV 256 LONG	3	11,327	11,328	11,328
8000	AV 256 LONG	3	11,328	11,328	11,328
10000	AV 256 LONG	3	11,330	11,330	11,330
12000	AV 256 LONG	3	11,330	11,330	11,330
14000	AV 256 LONG	3	11,332	11,332	11,332
16000	AV 256 LONG	3	11,283	11,285	11,285
18000	AV 256 LONG	3	11,333	11,333	11,333
20000	AV 256 LONG	3	11,335	11,337	11,337
22000	AV 256 LONG	3	11,340	11,340	11,339
24000	AV 256 LONG	3	11,348	11,346	11,347

TABELA 114 – Sinais aquisitados e médias dos tempos de percurso

São mostrados na Tabela 115, os desvios-padrão dos tempos de percurso da onda ultra-sônica para cada carga aplicada para os processamentos com correlação cruzada (L0) e com interpolação de sinais (L4 e L16).

CARGAS	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO	DESVIO-PADRÃO
(Kg)	L0 (µs)	L4 (µs)	L16 (µs)
0	0,00288675	2,6021E-03	2,6229E-03
2000	0	1,4434E-03	1,7188E-03
4000	0,00288675	0,0000E+00	1,7898E-04
6000	0,00288675	7,2169E-04	6,5092E-04
8000	0,00288675	0,0000E+00	1,7898E-04
10000	0	7,2169E-04	4,7353E-04
12000	0	0	1,7898E-04
14000	0,00288675	7,2169E-04	1,0079E-03
16000	0,08082904	0,081550726	0,081282405
18000	0,00288675	1,4434E-03	1,0022E-03
20000	0	7,2169E-04	4,7899E-04
22000	1,6859E-07	7,2169E-04	4,7899E-04
24000	0,00288675	3,3072E-03	3,0160E-03

TABELA 115 – Desvios-padrão dos tempos de percurso para cada carga aplicada

As figuras 33 e 34 mostram os gráficos tempos de percurso versus cargas e tempos versus tensões com a equação que rege esta curva do ensaio de tração da tira 9 h do tubo 08.









No sistema TDS 2221 A, a interpolação de sinais (L4 e L16) melhorou a

sensibilidade do osciloscópio. O tempo de amostragem caiu de 5 ns (nanossegundos) do processamento com correlação cruzada, para 1 ns com a interpolação de sinais (L4 e L16). Com isso, tensões superficiais foram detectadas.

Foi provada a eficiência da técnica multitaxas que interpola sinais, para este equipamento.

No ensaio de tração da tira 9 h do Tubo 08, foi observado que os tempos de percurso aumentam com as tensões e que a relação entre ambos é parabólica sendo regida pela equação do gráfico tempos de percurso versus tensões (figura 34) que é $y = 2.10^{-5}x^2 - 0,0004x + 11,33$.

<u>OBSERVAÇÃO</u> – A tira 12 h (-) não foi tracionada devido a problemas no equipamento de tração.

4.6.6 – <u>VALORES OBTIDOS DAS CONSTANTES ACUSTOELÁSTICAS</u> <u>EXPERIMENTAIS</u>

Os valores das constantes acustoelásticas obtidas experimentalmente nos ensaios de tração uniaxial realizados, com propagação das ondas paralelamente à direção da carga [40], são a inclinação (coeficiente angular) das curvas tempos de percurso versus tensões aplicadas, ajustando esses pontos da curva à uma reta, como comentado na revisão bibliográfica (equação 21)

Este valor é obtido graficamente através de uma linha de tendência retilínea, recurso próprio do programa Excel da Microsoft, que fornece a inclinação da reta.

Os valores obtidos dessas constantes acustoelásticas para unidades de tensão em Kg/mm² e psi (libra por polegada quadrada), para diferentes sistemas ultra-sônicos de aquisição de sinais, são mostrados nas Tabelas 118 e 119.

Na tabela 116 são mostrados os coeficientes angulares da curva tempo versus carga, ou seja, do tempo de percurso da onda ultra-sônica superficial versus cargas aplicadas nos ensaios de tração. Vale frisar que estes coeficientes angulares não são os valores das constantes acustoelásticas experimentais.

SISTEMA ULTRA-SÔNICO	CORPO DE	COEFICIENTE ANGULAR
	PROVA	(µs/Kg)
TDS 360 (TIRA 12 H)	TUBO 03	3 x 10 ⁻⁷
TDS 3054 B (TIRA 12 H +)	TUBO 08	8 x 10 ⁻⁷
TDS 3054B (TIRA 3 H)	TUBO 08	8 x 10 ⁻⁷
TDS 3054 B (TIRA 6 H)	TUBO 08	5 x 10 ⁻⁷
TDS 2221 A (TIRA 9 H)	TUBO 08	8 x 10 ⁻⁷

TABELA 116 – Coeficiente angular da curva tempo (µs) versus carga (Kg)

Na Tabela 117, estão mostrados os valores das áreas das tiras, com as quais foram calculadas as tensões (cargas por unidade de área) aplicadas nas tiras:

TIRA	ÁREA (mm ²)
12 H DO TUBO 03	515,0
12 H + DO TUBO 08	568,96
3 H DO TUBO 08	557,98
6 H DO TUBO 08	558,65
9 H DO TUBO 08	558,20

TABELA 117 – Áreas das tiras dos tubos 03 e 08

Para as tensões calculadas em Kg/mm² as constantes acustoelásticas obtidas são as seguintes (tabela 118):

SISTEMA ULTRA-SÔNICO	CORPO DE	CONSTANTE
	PROVA	ACUSTOELÁSTICA
		[µs/(Kg/mm ²)]
TDS 360 (TIRA 12 H)	TUBO 03	2×10^{-4}
TDS 3054 B (TIRA 12 H +)	TUBO 08	5×10^{-4}
TDS 3054B (TIRA 3 H)	TUBO 08	4×10^{-4}
TDS 3054 B (TIRA 6 H)	TUBO 08	3 x 10 ⁻⁴
TDS 2221 A (TIRA 9 H)	TUBO 08	5×10^{-4}

TABELA 118 – Constantes acustoelásticas experimentais para Kg/mm²

Convertendo-se as tensões de Kg por milímetro quadrado (Kg/mm²) para psi (libra por polegada quadrada ou lb/sq. in) teremos os seguintes valores para as constantes acustoelásticas (Tabela 119):

TADEL A 110	A A A	. 17	• , •	•
TABELA 119-	Constantes	acustoelasticas	experimentais	nara nsi
	Constances	<i>acastociasticas</i>	onpor micheurs	para por

SISTEMA ULTRA-SÔNICO	CORPO DE	CONSTANTE
	PROVA	ACUSTOELÁSTICA (µs/psi)
TDS 360 (TIRA 12 H)	TUBO 03	1 x 10 ⁻⁷
TDS 3054 B (TIRA 12 H +)	TUBO 08	3 x 10 ⁻⁷
TDS 3054B (TIRA 3 H)	TUBO 08	3 x 10 ⁻⁷
TDS 3054 B (TIRA 6 H)	TUBO 08	2 x 10 ⁻⁷
TDS 2221 A (TIRA 9 H)	TUBO 08	3 x 10 ⁻⁷

Foi constatado que as constantes acustoelásticas obtidas experimentalmente, mesmo sendo utilizados três osciloscópios diferentes (TDS 360, TDS 3054 B e TDS 2221 A) são da ordem de 10^{-4} para tensões em Kg/mm² e da ordem de 10^{-7} para as unidades de tensão em psi. Vale frisar que os tubos 03 e 08 foram fabricados com o mesmo tipo de aço (API X 5L 65).

Apesar de diferentes sistemas de aquisição de sinais terem sido utilizados; as constantes acustoelásticas apresentaram resultados próximos para um mesmo tipo de material.

È concluído que os resultados são satisfatórios.

4.6.6.1 - <u>CÁLCULO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA TEÓRICA DA TIRA</u> <u>12 h + DO TUBO 08</u>

O objetivo do cálculo da constante acustoelástica teórica da tira 12 h + do tubo soldado 08 é mostrar que os resultados experimentais são coerentes.

Os resultados experimentais dos ensaios de tração obtidos neste trabalho, mostram que existe uma relação parabólica entre a tensão e o tempo de percurso da onda ultrasônica. Lindgren [32] mostra que essa relação segue a equação:

$$v(T) = v(0)(1 + CT^{1/2})$$
 (Equação 20)

O valor da constante acustoelástica obtido experimentalmente para a tira 12 h + do tubo 08 com o sistema TDS 3054 B através do coeficiente angular da reta do gráfico tempos versus tensão, com unidade de tensão em Kg/mm², foi $5 \times 10^{-4} \,\mu s/(Kg/mm^2)$.

Este valor é obtido quando se aproxima os resultados experimentais para uma relação linear (equação 21) sendo possível fazer a verificação que segue:

$$v(T) = v(0)(1+CT)$$
 (Equação 21)

Como os espaços percorridos pela onda ultra-sônica superficial antes e depois de aplicada a tensão trativa uniaxial são os mesmos (s (T) = s (0)), esses termos podem ser cortados da equação, restando <u>os tempos de percurso da onda ultra-sônica</u> (t₀ e t) que são

diferentes, pois a aplicação de tensão trativa uniaxial altera o tempo de percurso da onda ultra-sônica, <u>o valor da constante acustoelástica C</u> que desejamos calcular, e <u>a tensão T</u>, transformando a equação acima na seguinte expressão:

$$\mathbf{t}_0 = \mathbf{t} \ (\mathbf{1} + \mathbf{CT}) \qquad \text{equação } 24)$$

Substituindo os valores dos tempos de percurso aquisitados no mesmo ponto, sem tensão (t_0), ou seja, antes da tira ser tracionada e o tempo de percurso da tira sob tensão trativa uniaxial (t), tempo obtido com o último carregamento da tira 12 h + e o valor da tensão aplicada (T), então é obtido o valor da constante acustoelástica teórica.

 $11,352 = 11,634 (1 + C \cdot 45,7)$

Logo, o valor teórico em módulo obtido da constante acustoelástica foi $C = 5 \times 10^{-4} \mu s/(Kg/mm^2)$, mesmo valor obtido experimentalmente, o que torna os resultados experimentais coerentes e satisfatórios.

5. <u>CONCLUSÕES</u>

O presente trabalho consistiu num estudo para a medição de tensão por ultra-som, sendo baseado no efeito acustoelástico. Foram utilizadas ondas superficiais de Rayleigh para medir tensões superficiais em chapas de aço visando a avaliação de tensões. Foi estudado o efeito da variação no tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh, em função da temperatura e de carregamento trativo uniaxial. Foram analisados diferentes sistemas de aquisição de sinais, uma vez que para a avaliação de tensões é necessário uma resolução de nanossegundos na medição do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

Foi concluído que a melhor maneira de aquisitar sinais com todos os sistema ultrasônicos utilizados (TDS 360, TDS 2221 A, TDS 3032 B e TDS 3054 B) é com Average 256 (média de 256 pulsos), pois esta forma de aquisição apresenta menor ruído do sinal.

Foi observado que o tempo de percurso da onda ultra-sônica de Rayleigh é menor quando a direção de polarização da onda é paralela a direção de laminação da chapa de aço, mesmo comportamento observado com ondas cisalhantes.

O processamento matemático com a interpolação de sinais mostrou ser um método bastante eficiente pois potencializa a capacidade dos osciloscópios. Nos carregamentos trativos uniaxiais, com os sistemas TDS 360 e TDS 2221 A, foram detectadas variações no tempo de percurso quando foi usada a interpolação L16, a qual diminui o tempo de amostragem dos sinais. Nos demais sistemas (TDS 3032 B e TDS 3054 B), o processamento matemático somente com correlação cruzada (processamento L0) com tempos de amostragem da ordem de dois nanossegundos (2ns) é suficiente para se detectar tensões trativas.

No estudo da influência da temperatura foi observada uma relação praticamente linear entre o tempo de percurso da onda ultra-sônica e a temperatura. Logo, pode-se corrigir este efeito para avaliação de tensões em campo.

No estudo de detecção de tensões externas aplicadas (tensão trativa uniaxial), foi observada uma relação quadrática (parabólica) entre o tempo de percurso e as tensões trativas uniaxiais e que os tempos de percurso aumentam com as tensões.

Conclui-se que este sistema de aquisição de ondas de Rayleigh é promissor, sendo uma ferramenta de grande valor para a avaliação de tensões superficiais de componentes metálicos.

6. PREVISÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aquisição de sinais com média dos pulsos da forma Average 512, recurso já disponível em osciloscópios, fator importante para a diminuição do ruído do sinal.
- Aquisição de sinais com o parâmetro do gerador ultra-sônico WIDTH (tempo de vibração do transdutor) superior ao utilizado (0,08 µs) mas inferior à sua frequência de ressonância, de forma que a vibração do cristal piezoelétrico provoque o aquecimento do cristal, afastando suas moléculas, afetando sua densidade e consequentemente alterando o tempo de percurso da onda ultra-sônica.
- Aquisição de sinais com o corpo de prova sendo submetido à tensão trativa com o transdutor perpendicular à direção de aplicação da tensão.
- Aquisição de sinais com o corpo de prova sendo submetido à tensão compressiva com o transdutor paralelo e perpendicular `a direção de aplicação da tensão.
- Estudo da influência da temperatura com outros sistemas de aquisição de sinais (TDS 3032 B e TDS 3054 B), para maior precisão das medidas de variações do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

7. <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>

[1] ARAÚJO, L. S., *Estudo da Influência da Rugosidade Superficial na Propagação das Ondas Ultra-sônicas de Rayleigh.*, Projeto Final de Curso, Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

[2] MEDEIROS, R.C., BITTENCOURT, M.S.Q., LAMY, C.A et al; "Avaliação por ultrasom das tensões impostas em tubo API X-65", *Rio Pipeline Conference and Exposition*, IBP452_03, Rio de Janeiro, Brasil, outubro 2003.

[3] ANDREUCCI, R.; *Ensaio por Ultra-som – Aspectos Básicos*, 3 ed., São Paulo, Abende (Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos), 2002.

[4] AREAS, V. L. F., Avaliação da Distribuição de Tensões em um Corpo de Prova Submetido à Flexão utilizando a Técnica Ultra-sônica da Birrefringência Acústica., Projeto Final de Curso, Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

[5] KUTTRUFF, H.; Ultrasonics Fundamentals and Applications. London, Elsevier Applied Science, 1991.

[6] BITTENCOURT, M. S. Q., Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido da Onda Ultra-sônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica., Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

[7] LAMY, C.A.; Um estudo sobre o dimensionamento de descontinuidades superficiais pela técnica ultra-sônica do tempo decorrido, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1990.

[8] ZEEMANN, A.; "Tensões residuais de soldagem", site da Internet: http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol03.pdf, 2003.

[9] ORTEGA, L.P.C., Análise de Tensões por Ultra-som através da Refração de Ondas com Incidência Oblíqua., Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

[10] AGUIAR, L.A..D., ESTEFEN, S.F., BRUM, F.P. et al; *Influência de tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais no colapso de dutos submarinos*, Engenharia Oceânica (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

[11] SILVEIRA, J.P.; BARROS, S.M., *Tensões residuais e deformações em soldagem*, ed.Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás)

[12] LAMY, C.A.; FILHO, J.P.C,; BITTENCOURT, M.S.Q. et al, *Avaliação por Ultra*som do Tratamento Térmico para Alívio de Tensões., XXI Congresso Nacional de Ensaios Não-Destrutivos, Salvador, BA, Brasil, Agosto 2002.

[13] BLAKE, R. J., BOND, L. J., *Rayleigh wave scattering from surface features: up-steps and troughs, Ultrasonics,* vol 30, n. 4, pp.255-265, 1992.

[14] BLAKE, R. J., BOND, L. J., Rayleigh wave scattering fron surface features: wedges and down-steps, , Ultrasonics, vol 28, pp.214-228, Jul. 1990.

[15] CHANDRASEKHARAIAH, D. S., *Effects of surface stresses and voids on Rayleigh waves in an elastic solid, Journal of Engineering Science*, vol 25, n.2, pp.205-211, 1997.

[16] PECORARI, C., Attenuation and dispersion of Rayleigh waves propagating on a cracked surface: an effective field approach, Ultrasonics, n. 38, pp.754-760, 2000.

[17] CLARK, A. Jr; "On the use of acoustic birefringence to determine components of plane stress", *Ultrasonics*, pp.21-30, Jan. 1985.

[18] DUQUENNOY, M., OUAFTOUH, QIAN, M.L. et al, *Ultrasonic characterization of residual streeses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers, Non-Destructive Testing & E International*, n.34, pp. 355-362, 2001.

[19] IWASHIMIZU, Y.; KOBORI, O., *The Rayleigh Wave in a Finitely Isotropic Elastic Material, Acoustical Society of America*, Vol 64, n.3, pp. 910-916, Sep. 1978.

[20] MARTIN, B.G., Rayleigh Wave Velocity, Stress and Preferred Grain Orientation in Aluminium, Non-Destructive Testing, pp. 199-202, Aug. 1974.

[21] AKBAROV, S. D., OZISIK, M., The influence of the third order elastic constants to the generalized Rayleigh wave dispersion in a pre-stressed stratified half-plane, International Journal of Engineering Science, vol. 41, pp. 2047-2061, 2003.

[22] DUQUENNOY, M., OUAFTOUH, M., OURAK, M, *Ultrasonic evaluation of stresses in orthotropic materials using Rayleigh waves, Non-Destructive Testing & E International,* n.32, pp. 189-199, 1999.

[23] PANTERMUEHL, J., BIRRING, A.S., Ultrasonic Procedure for Measuring Bolt-up and Long-term Relaxation Stress in Stell Studs, Materials Evaluation, n. 46, pp. 708-711, May 1988.

[24] PIO, R. R., FACCINI, J. L. H., LAMY, C. A, BITTENCOURT, M. S. Q, "Sistema para Medição de Velocidades de Escoamentos através de Ondas Ultra-Sônicas", In: *Proceedings of Joint Nuclear Conferences*, XI ENFIR/IV ENAN, Poços de Caldas, agosto de 1997.

[25] BRAY, D.E., STANLEY, R. K., *Nondestructive Evaluation a Tool in Design Manufacturing and Service*. Revised Edition. ISBN-0-8493-2655-9, CRC Press, 1997.

[26] DELSANTO, P.P.; CLARK A.V., Jr., Rayleigh Wave Propagation in Deformed Orthotropic Materials, Acoustical Society of America, Vol. 81, n.4, pp.952-960, Apr. 1987.

[27] DITRI, J.J., Determination of nonuniform stresses in an isotropic elastic half space from measurements of the dispersion of surface waves, Journal Mech.Phys.Solids, Vol 45, n.1, pp. 51-66, 1997.

[28] NIKITINA, N. Ye., OSTROVSKY, L.A., *An ultrasonic method for measuring stresses in engineering materials, Ultrasonics*, n.35, pp.605-610, 1998.

[29] SZELAZEK, J., Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails, Non-Destructive Testing & E International, , Vol. 25, n. 2 pp. 77-85, 1992.

[30] OKADE, M., KAWASHIMA, K.; *Local measurement on polycrystalline aluminum by na acoustic microscope, Ultrasonics,* Vol 36, pp. 933-939, 1998.

[31] PRITCHARD, S.E., The use of ultrasonics for residual stress analysis, Non-Destructive Testing & E International, , Vol. 20, n.1 pp. 57-60, 1987.

[32] LINDGREN, E.A.; JONES, T.S.; BERGER H. et al; *Determining residual stress in plates with Rayleigh Waves, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,* pp. 2039-2046, Plenum Press, New York, 1994.

[33] DITRI, J. J., HONGERHOLT, D., Stress distribution determination in isotropic materials via inversion of ultrasonic Rayleigh wave dispersion data, Int. J. Solids Structures, vol.33,n 17,pp.2437-2451

[34] DUQUENNOY, M., OUAFTOUH, M., OURAK, M et al, *Theoretical determination* of Rayleigh wave acoustoelastic coefficients: comparison with experimental values, *Ultrasonics*, n. 39, pp.575-583, 2002.

[35] COOK, D.A., BERTHELOT, Y.H., Detection of small surface-breaking fatigue cracks in steel using scattering of Rayleigh waves, Non-Destructive Testing & E International, n.34, pp. 483-492, 2001.

[36] HASSAN, W., VERONESI, W., *Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size surface-breaking cracks*, *Ultrasonics*, n. 41, pp.41-52, 2003.

[37] VIKTOROV, I. A.; Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications., Plenun Press, New York, 1967.

[38] DIXON, S., PLAMER S.B., Wideband low frequency generation and detction of Lamb and Rayleigh waves using electromagnetic acoustic transducers (EMATs), Ultrasonics, 2004

[39] SCHWARZ, R. B., HARMS, U., JAIN, H., *Elastic stiffness of interfaces studied by Rayleigh waves, Materials Science Engineering,* 2004.

[40] NKEMZI, D.; A new formula for the velocity of Rayleigh waves, Wave motion, vol.26, pp. 199-205, 1997.

[41] CHAIB, M.O., MENAD, S., DJELOUAH et al; "Na ultrasonic method for the acoustoelastic evaluation of simple bending stresses", *Non-Destructive Testing & E International*, vol 34, pp. 521-529, 2000.

[42] SOUZA, S.A., Ensaios mecânicos de materiais metálicos, 5^a edição, São Paulo, Edgar Blucher Ltda, 1987.

[43] EGLE, D. M., BRAY, D.E., "Application of the Acousto-elastic effect to Rail Stress Measurement", Materials Evaluation, v. 37, n. 3, pp. 41-55, Março 1979.

[44] HSU, N. N., "Acoustical Birefringence and the Use of Ultrasonic Waves for Experimental Stress Analysis", *Experimental Mechanics*, v. 14, n. 5, pp. 169-176, May 1974.

[45] TANALA, E., BOURSE,G., FREMIOT,M et al, Determination of near surface residual stresses on welded joints using ultrasonic methods, Non-Destructive Testing & E International, vol 28, n.2, pp. 83-88, 1995.

[46] *PR 5000 Gated Amplifier, Rate Genetaror and Broadband receiver Operator's Manual*, version 3.4, Northborough, U.S.A., Matec Instrument Companies, Mar. 2000.

[47] *PR 5000 Pulser/Receiver Operator's Manual*, version 3.04, Northborough, U.S.A., Matec Instrument Companies, Jul. 2000.

[48] DALI-ALI, M., BENECH, P., PERRIER, J.P., Generation and detection of Rayleigh waves with improved attenuation using a piezo-copolymer transducer P(VDF-TrFE), Ultrasonics, Vol 33, n. 4, pp.321-322, 1995.

[49] DUQUENNOY, M., OUAFTOUH, M., OURAK, M., Determination of Stresses in Aluminium Alloy using Optical Detection of Rayleigh Waves, Ultrasonics, n. 37, pp.365-372, Fev. 1999.

[50] SHAIKH, N., Stress measurement in structural plastics by L-cr waves, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 13, pp. 2047-2054, Plenum Press, New York, 1994.

[51] WU,T.T., TONG,J.H., On the study of elastic wave scattering and Rayleigh wave velocity measurement of concrete with steel bar, Non-Destructive Testing & E International, n.33, pp. 401-407, 2000.

[52] BALTAR, L. G.; *Avaliação de tensões por ultra-som*, Relatório técnico-científico de estágio no IEN (Instituto de Engenharia Nuclear), Rio de Janeiro, RJ, 2001