

ANÁLISE DE TENSÕES POR ULTRA-SOM EM BARRA DE AÇO SOB FLEXÃO

Daniel Chauviere do Carmo

DISSERTAÇÃO 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.

---

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

---

Dr. Carlos Alfredo Lamy, D. Sc.

---

Prof. Ari Sauer Guimarães, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2006

CARMO, DANIEL CHAUVIERE DO

Análise de tensão por ultra-som em  
barra de aço sob flexão [Rio de Janeiro]  
2006

IX 95 p. 29,7 cm (COPPE / UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de  
Materiais, 2006).

Dissertação - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, COPPE

1. Ensaio Não Destrutivo
2. Ultra-som
3. Análise de Tensões

I. COPPE / UFRJ II. Título (série)

A minha família com todo meu amor.

## **Agradecimentos**

Ao professor João Payão da Cruz Filho, pela motivação, amizade e acompanhamento.

Ao Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt, pelo incentivo, amizade e também pelas idéias e discussões ao longo de todo trabalho.

Ao Carlos Alfredo Lamy, pela amizade e esclarecimentos ao longo do trabalho.

Ao Orlando João Agostinho Gonçalves Filho, pelos esclarecimentos e idéias durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários do IEN, Manoel, Geraldo e Paulinho, pelo empenho que dedicaram na realização da parte experimental deste trabalho.

Ao estagiário Alcides do IEN, pela ajuda que prestou na realização do processamento de sinais.

Ao ex-aluno do PEMM, Adilson Amaral pela amizade e incentivo que prestou durante o tempo que trabalhou no IEN.

A CAPES, pelo suporte financeiro prestado.

Resumo da Dissertação apresentada a COPPE / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE DE TENSÕES POR ULTRA-SOM EM BARRA DE AÇO SUB FLEXÃO

Daniel Chauviere do Carmo

Março / 2006

Orientador: João da Cruz Payão Filho

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho visa avaliar o estado de tensão em uma barra de aço estrutural, utilizando a técnica da birrefringência acústica, submetida à flexão e comparar esses valores experimentais com os valores obtidos teoricamente. A medida de tensão por ultra-som usa basicamente o efeito acustoelástico, que é o fenômeno da variação da velocidade ou do tempo de percurso da onda ultra-sônica em função da tensão no material. A técnica prevê a utilização de ondas cisalhantes de incidência normal, e a birrefringência acústica é calculada em função das medidas de tempo obtidas em duas direções perpendiculares em um mesmo ponto. Um sistema ultra-sônico gerou e adquiriu os sinais que, digitalizados, tiveram os tempos de percurso da onda ultra-sônica medidos através de processamento matemático. Regiões definidas foram examinadas ao longo do comprimento da barra, antes e durante o carregamento. A técnica da birrefringência acústica mostrou-se eficaz para análise de tensões aplicadas na forma qualitativa e quantitativa.

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

## ULTRASONIC STRESS EVALUATION IN A STEEL BAR UNDER BENDING FORCES

Daniel Chauviere do Carmo

March / 2006

Advisor: João da Cruz Payão Filho

Department: Metalurgical and Materials Engineering

This work aims to evaluate the stress changing in a structural steel bar submitted to bending, applying the acoustic birefringence technique, and to compare these experimental values with the theoretically calculated values. This ultrasonic stress evaluation technique uses basically the acoustoelastic effect. This effect is the ultrasonic velocity changing, or the ultrasonic time of flight changing, due to the stress in the material. This technique uses ultrasonic normal incidence shear waves and the birefringence is the fractional difference of the ultrasonic time of flight measurements in two perpendicular directions in the same point. Ultrasonic signals were generated, acquired and digitalized by an ultrasonic system. The time of flight of these signals were measured through mathematical processing. The same chosen regions of the bar were ultrasonically examined before and during the loading. The ultrasonic birefringence technique showed be an effective way to qualitative and quantitative analysis of the applied stress in bending materials.

## ÍNDICE

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 – TENSÕES RESIDUAIS.....</b>	<b>3</b>
2.2.1 – CLASSIFICAÇÃO E ORIGENS DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	3
2.2.2 – TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO PROCESSO DE SOLDAGEM .	7
<b>2.3 – CALCULO TEÓRICO DAS TENSÕES.....</b>	<b>9</b>
2.3.1 – FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR .....	9
2.3.2 – FLEXÃO PURA.....	10
2.3.3 – TENSÕES DE CISALHAMENTO NA FLEXÃO .....	14
2.3.4 – TENSÕES PRINCIPAIS NA FLEXÃO .....	19
<b>2.4 – MEDIÇÃO DAS TENSÕES.....</b>	<b>21</b>
2.4.1 – MÉTODOS EXISTENTES .....	21
2.4.2 – PROPAGAÇÃO DA ONDA CISALHANTE EM UM SÓLIDO HOMOGÊNEO E ISOTRÓPICO.....	22
2.4.3 – AVALIAÇÃO DE TENSÃO POR ULTRA-SOM.....	24
2.4.3.1 – ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGÊNCIA.....	24
<b>2.5 – TEXTURA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6 – GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7 –ABORDAGEM ESTATÍSTICA.....</b>	<b>31</b>
2.7.1 – FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO .....	31
2.7.2 – TESTE DE HIPÓTESES.....	32
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>

<b>3.1 – TÉCNICA USADA.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 – PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DOS SINAIS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 – SISTEMA ULTRA-SÔNICO .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
3.4.1 – MEDIDAS DO TEMPO DE PERCURSO REALIZADAS NA BARRA.....	38
3.4.2 – LEVANTAMENTO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA .....	40
<b>3.6 – PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO .....</b>	<b>41</b>
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 – PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DOS SINAIS ULTRA-SÔNICOS..</b>	<b>44</b>
4.2.1 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS COM CORRELAÇÃO CRUZADA .....	44
4.2.2 – CORRELAÇÃO CRUZADA COM INTERPOLAÇÃO .....	45
<b>4.3 – ANÁLISE DA TEXTURA DO MATERIAL ANTES DE SER SUBMETIDO À TENSÃO.....</b>	<b>47</b>
4.3.1 – ABORDAGEM ESTATÍSTICA .....	49
<b>4.4 – AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ANISOTROPIA DO MATERIAL ANTES E DURANTE O CARREGAMENTO.....</b>	<b>52</b>
4.4.1 – INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO NA VARIAÇÃO DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRA-SÔNICA.....	52
4.4.2 – ESTUDO DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA ANTES E DURANTE O ENSAIO DE FLEXÃO .....	58
4.4.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA OS VALORES DE $B - B_0$ .....	65
<b>4.5 – TENSÕES OBTIDAS POR CÁLCULOS TEÓRICOS E POR ULTRA - SOM .....</b>	<b>67</b>
4.5.1 – CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA.....	67

4.5.2 – TENSÕES OBTIDAS PELA TÉCNICA DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA.....	69
4.5.3 – TENSÕES OBTIDAS PELA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS .....	72
4.5.4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS.....	74
<b>5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>93</b>

## **1 – INTRODUÇÃO**

Materiais estruturais são empregados na indústria em geral, podendo muitas vezes alcançar condições de solitação crítica. A resistência mecânica depende, entre outros fatores, do estado de tensão interna do material. O conhecimento do comportamento destas tensões nas estruturas e componentes tem grande importância devido ao efeito conjunto das tensões residuais com as tensões aplicadas, podendo ocasionar a fratura dos mesmos.

Para solucionar este problema tem-se adotado filosofias conservadoras de projeto, com a utilização de elevados fatores de segurança e a avaliação do estado das condições de uma estrutura tem sido realizada por meio de ensaios não destrutivos que garantem a localização e dimensionamento de trincas auxiliando nos cálculos da mecânica da fratura.

Embora existam diversas técnicas de medição de tensões instaladas em componentes estruturais, tais como a técnica do furo, a neutrongrafia e difração de raios-x, elas possuem limitações que dificultam sua utilização, despertando o interesse da comunidade científica no desenvolvimento de outros métodos.

Neste campo de pesquisa a técnica ultra-sônica tem se mostrado bastante consistente, podendo ser aplicada para análise de tensões. Esta técnica baseia-se na variação da velocidade da onda ultra-sônica quando esta percorre o interior de um sólido elástico submetido à tensão

Quando um material é submetido à flexão são geradas tensões trativas e compressivas. Este trabalho visa avaliar o estado de tensão em uma barra de aço estrutural submetido a esse esforço, utilizando a técnica da birrefringência acústica, assim como, comparar os valores das tensões obtidos experimentalmente com os valores das tensões calculados na teoria.

A técnica de medida de tensão por ultra-som utilizada neste trabalho mostrou ser bastante consistente, embora o estado da arte mostre que existem grandes dificuldades, com a resolução nas medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica, uma vez que as variações de velocidade em função das tensões implicam em alterações de tempo na ordem de nanossegundos, e o efeito da textura que causa variações de tempo no percurso da onda da mesma ordem de grandeza da tensão.

Este trabalho foi dividido em três capítulos, no primeiro é apresentado à revisão bibliográfica onde são abordados os temas necessários para o estudo de tensão por ultra-som, o conceito sobre tensões residuais, as equações utilizadas para o cálculo das tensões obtidas teoricamente e a abordagem estatística empregada. O seguinte, é apresentado os materiais e métodos utilizados mostrando as possíveis fontes de erro ocasionadas durante o experimento e as soluções ou considerações buscadas. No último capítulo é verificado o método utilizado na avaliação de tensões aplicadas por esforços de flexão em uma barra de aço estrutural. Os resultados mostrados permitem concluir a eficácia da análise de tensão por ultra-som.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de se obter um embasamento da técnica ultra-sônica utilizada para avaliar as tensões aplicadas em uma barra de aço estrutural submetida a esforço de flexão. Sendo assim, serão abordados assuntos como tensões residuais, velocidade da onda ultra-sônica, birrefringência e acustoelasticidade, textura e efeito piezoelétrico.

### 2.2 – TENSÕES RESIDUAIS

#### 2.2.1 – CLASSIFICAÇÃO E ORIGENS DAS TENSÕES RESIDUAIS

As tensões residuais são tensões auto-equilibradas existentes nos materiais, em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo. Tais tensões são sempre produzidas, se regiões de um material sofrem deformação, plástica ou elástica, heterogênea de um modo permanente [1].

Para que estas tensões permaneçam na estrutura após a remoção dos carregamentos externos, alguma seção ou uma parte foi solicitada além do limite elástico do material. Se não ocorrem deformações plásticas, não serão geradas tensões residuais.

As tensões residuais existem em praticamente todas as peças rígidas, metálicas ou não. Além dos carregamentos a que estão submetidas, as tensões residuais são o produto da história metalúrgica e mecânica de cada ponto da peça ou da peça como um todo, durante o processo de fabricação [2]. Não é possível diferenciar, por suas aparências externas, peças com tensões residuais daquelas isentas delas. Entretanto, as características físicas e mecânicas podem ser diferentes. Sob a ação externa, as tensões residuais e aplicadas podem somar-se linearmente no regime elástico, e causar a ruptura inesperada do componente.

- Tensões residuais do primeiro tipo: São tensões com características homogêneas estendendo-se por grandes áreas, ou seja, de vários grãos de um material,

sendo equilibradas com todo o sistema de forças internas atuantes na peça (ver figura 1). São as chamadas tensões macroscópicas [3].

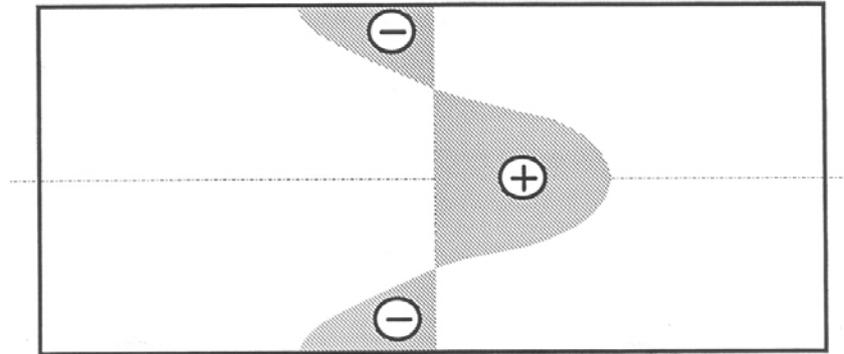


FIGURA 1 – Tensões Residuais do primeiro tipo

Na tabela abaixo são mostradas as principais fontes e sub-fontes de tensões residuais

TABELA 1 – Processos que produzem as tensões residuais do primeiro tipo.

Fontes Principais	Sub-fontes
Carregamento elasto-plástico	Flexão, Torção, Tração, Compressão.
Usinagem	Torneamento, Fresamento, Aplainamento, Furação, Retificação.
Junções	Soldagem, Brasagem.
Fundição	-----
Conformação	Laminação, Trefilação, Forjamento, Estampagem, Jateamento (shot peening)
Tratamento Térmico	Tempera, Endurecimento, Cementação, Nitretação
Revestimento	Deposição, Galvanização, Revestimento.

- **Tensões Residuais do segundo tipo:** São tensões com características homogêneas estendendo-se por pequenas áreas, ou seja, a nível microscópico em um grão ou parte de um grão do material, sendo equilibradas através de um número suficiente de grãos do material (ver figura 2) . São comumente chamadas de tensões microscópicas ou de tensões internas. Podem ocorrer em interfaces e entre partículas ou agregados e a matriz[3].

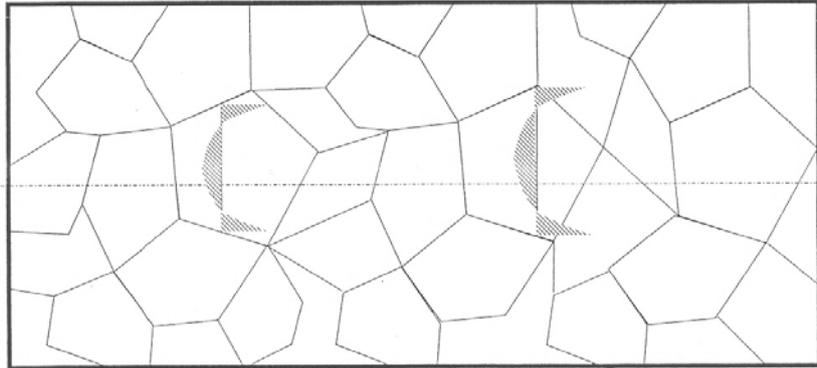


FIGURA 2 – Tensões Residuais do segundo tipo

- **Tensões do terceiro tipo:** São tensões com características heterogêneas estendendo-se através de áreas submicroscópicas do material, ou seja, de algumas distâncias atômicas em um grão (ver figura 3). São as chamadas submicrotensões ou tensões micro-localizadas. Estas tensões são geradas pela ação dos defeitos cristalinos no material, tais como: lacunas, átomos intersticiais, deslocamentos atômicos, defeitos de arranjo de rede, discordâncias, maclas e contornos de grãos[3].

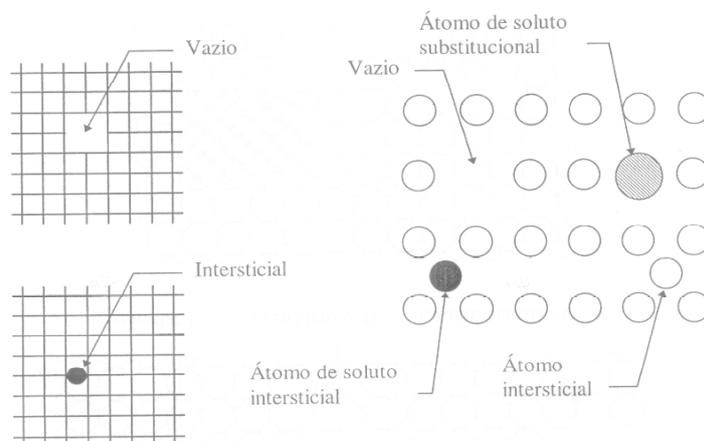


FIGURA 3 – Tensões Residuais do terceiro tipo

As tensões residuais podem ser ocasionadas por diversas solicitações atuando individualmente ou de forma combinada, classificadas nos seguintes tipos:

1. Tensões originadas por carregamento mecânico;
2. Tensões originadas por efeito térmico;
3. Tensões originadas por transformações metalúrgicas.

Normalmente a superposição de tensões residuais do primeiro, segundo e terceiro tipo determina o estado total de tensões em um ponto particular do material.

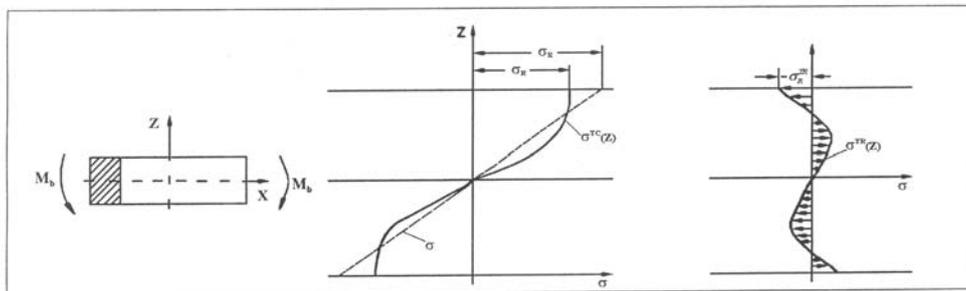


FIGURA 4 – Distribuição não linear das tensões de carregamento em uma barra deformada elasto - plasticamente

A figura 4 pode ser tida como um exemplo dos três tipos de tensões residuais:

- O diagrama com o perfil final após o descarregamento, correspondem às tensões do tipo um;
- As deformações plásticas nas regiões carregadas além do limite de escoamento produzem tensões residuais adicionais devido ao encruamento local do material. Tal efeito é característico de tensões residuais do tipo dois;
- O empilhamento de discordâncias nos contornos dos grãos plastificados, distorcendo o reticulo cristalino do material, gera microtensões locais características de tensões residuais do tipo três.

Como exemplo clássico de tensões residuais originadas por efeito térmico, citam-se os processos de soldagem que invariavelmente produzem gradientes térmicos elevados durante o processo de solidificação e resfriamento, ocasionando tensões residuais pela restrição a dilatação térmica, contração do material de adição e transformação de fases metalúrgicas na região afetada pelo calor do processo de soldagem.

As tensões residuais são, por diversas vezes, produzidas pela combinação dos três tipos de solicitações, podendo ser destacados os seguintes procedimentos de fabricação que acarretam tensões residuais:

- Plastificação do material sob efeito de carregamentos externos (“shot-peening”, passe de encruamento por laminação, etc,...);
- Deformação plástica não homogênea durante processos de têmpera e outros tratamentos térmicos baseados em taxas de aquecimento e resfriamento e transformações metalúrgicas do material;
- Tratamentos termoquímicos causando heterogeneidade de ordem química ou cristalográfica (nitretação, cementação, etc,...);
- Tratamentos superficiais (esmaltação, niquelagem, cromagem, etc,...);

## 2.2.2 – TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO PROCESSO DE SOLDAGEM

As tensões residuais originadas no processo de soldagem são funções de diversas variáveis, relacionadas ao parâmetro utilizados na execução do cordão, geometria, número de passes, composição química dos metais de base e de adição, restrição à dilatação térmica e outros.

A determinação do nível de tensões residuais geradas por um procedimento de soldagem em uma geometria determinada torna-se, portanto, uma tarefa complexa e necessariamente possível de análise pelos aspectos da simulação numérica, acoplada com resultados experimentais.

As três principais fontes de geração de tensões residuais em soldagem são:

- Contração, durante o resfriamento do material com diferentes temperaturas e níveis de plastificação devido à operação de soldagem;
- Resfriamento mais acelerado das superfícies da peça soldada;
- Transformação de fases metalúrgicas.

Pode-se destacar uma outra fonte, qual seja a restrição à dilatação térmica pela presença de vínculos externos, que normalmente é creditada à concentração do material.

A principal parcela contribuindo, durante um processo de soldagem, para a formação do perfil final de tensões residuais é a originada pela contração do material. Esta contração ocorre devido ao gradiente de temperatura existente na peça que faz com que a região com temperatura elevada seja contida pela região com temperatura mais baixa, ocasionando plastificação local. O nível de tensão residual alcançado após o resfriamento de uma estrutura é também dependente das deformações plásticas acumuladas, as quais variam ponto a ponto.

As tensões residuais surgidas devido ao resfriamento mais intenso das superfícies livres de peça não possuem caráter homogêneo ao longo da espessura da peça, notadamente em componentes mais espessos. O gradiente formado por este resfriamento desigual provoca deformação plástica localizada resultando, de uma forma geral, em tensões compressivas na superfície e trativa no interior da peça.

As tensões geradas pela transformação de fases metalúrgicas são originadas no cordão de solda e na zona termicamente afetada da junta, onde surgem fases de ferrita, bainita ou martensita decorrentes da transformação de austenita. Estas novas fases possuem um maior volume específico causando uma tendência à expansão, o que é contida pelo restante do material gerando tensões compressivas.

A referência [4] fornece uma equação para estimativa da variação porcentual de volume decorrente da transformação de fase.

$$\Delta V / V = (4,64 - A \cdot C)$$

Onde; A – coeficiente dependente da transformação de fase: (= 0,53 para a transformação de austenita para martensita); (>1,43 para a transformação de austenita para perlita, bainita e ferrita ou ferrita + carbonetos);

C – teor de carbono em peso do material.

$\Delta V / V$  – variação porcentual do volume da região com a transformação de fase.

## 2.3 – CALCULO TEÓRICO DAS TENSÕES

Como este trabalho visa avaliar o estado de tensão em uma barra de aço estrutural com seção reta retangular submetida ao esforço de flexão, e comparar os valores experimentais determinados pela técnica ultra-sônica com os valores obtidos por cálculos teóricos, torna-se necessário uma abordagem sobre a teoria utilizada para realizar esses cálculos [5] e que serão vistos nesta seção.

### 2.3.1 – FORÇA CORTANTE E MOMENTO FLETOR

Para analisar as grandezas das tensões produzidas numa seção de barra retangular durante a flexão, deve-se admitir que ela possui um plano axial de simetria e que as cargas atuam nesse plano. Então, das considerações de simetria, conclui-se que a flexão ocorre também nesse mesmo plano. Na maioria dos casos da prática esta condição de simetria é perfeitamente satisfeita, uma vez que as formas usuais das seções transversais, tais como círculos, o retângulo ou em T são simétricas.

Desta forma, imaginando que a barra retangular simplesmente apoiada é cortada em duas partes por uma seção transversal mn situada a uma distância x do apoio direito B (ver figura 5), e que a parte esquerda da barra é afastada. Ao estudar o equilíbrio da parte direita da barra restante (ver figura 5b), devem-se considerar não somente as forças externas tais como Q e a reação  $R_2$ , mas também as forças interiores que estão distribuídas na seção transversal mn e que representa a ação da parte esquerda da barra sobre a parte direita. Essas forças interiores devem ter grandeza tal que equilibre as forças exteriores mencionados acima.

Da estática sabe-se que um sistema de forças paralelas pode ser substituído por uma força igual à soma algébrica das forças dadas, juntamente com o conjugado. Nesse caso particular, podem-se substituir as forças Q e  $R_2$  pela força vertical V atuando no plano da seção transversal mn e pelo conjugado M. A grandeza da força é:

$$V = R_2 - Q \quad (\text{eq.1})$$

e a grandeza do conjugado é:

$$M = R_2 X - Q (X - C) \quad (\text{eq. 2})$$

A força  $V$ , que é igual a soma algébrica das forças exteriores que estão à direita da seção transversal  $mn$ , é chamada de força cortante nesta seção. O conjugado  $M$ , que é igual a soma algébrica dos momentos das forças exteriores que estão à direita da seção transversal  $mn$  em relação ao centro de gravidade dessa seção transversal, é chamado de momento fletor nesta seção.

As tensões que estão distribuídas na seção transversal  $mn$  e que representam a ação da parte esquerda da barra sobre sua parte direita, devem ser tais que equilibrem o momento fletor  $M$  e a força cortante  $V$ .

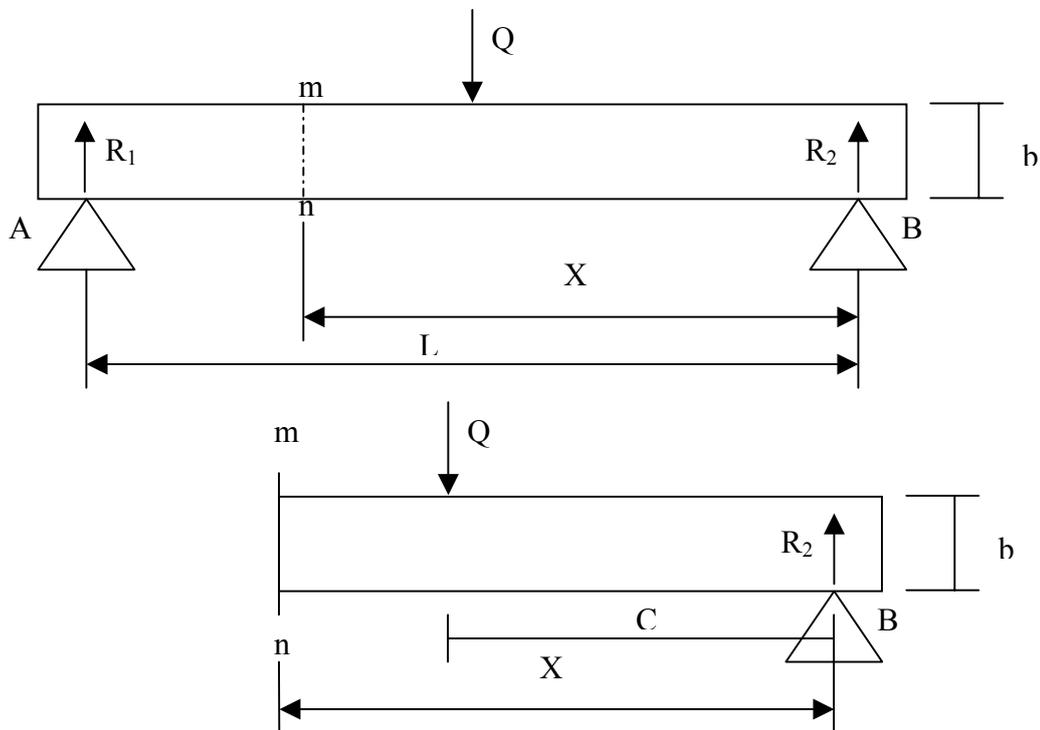


FIGURA 5 – (a) Barra retangular simplesmente apoiada. (b) corte na seção transversal da barra.

### 2.3.2 – FLEXÃO PURA

No item anterior, foi discutido que a grandeza das tensões numa seção transversal é definida pela grandeza da força cortante e do momento fletor naquela seção. Para calcular as tensões, deve-se começar imaginando que a força cortante se anule e atue somente o momento fletor. Este caso é chamado de flexão pura. Um exemplo dessa flexão é dado na figura 6. Considerando o equilíbrio da parte da viga à

esquerda de uma seção transversal  $mn$ , pode-se concluir que as forças interiores que estão distribuídas na seção transversal  $mn$  e representam a ação da parte direita da viga removida sobre a parte esquerda, devem ser estaticamente equivalentes a um conjugado igual e contrario ao momento fletor  $Pa$ .

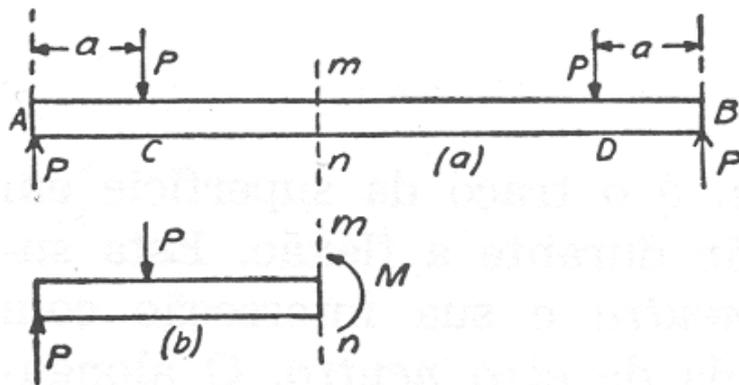


FIGURA 6 – Flexão pura e seus respectivos esforços

Para analisar a distribuição dessas forças interiores na seção transversal, deve-se considerar a deformação da viga. Se forem retiradas duas linhas verticais adjacentes  $mm$  e  $pp$  sobre seus lados (ver figura 7), experiências diretas mostram que essas linhas permanecem retas durante a flexão e giram de tal forma que permanecem normais às fibras longitudinais da viga. A seguinte teoria da flexão é baseada na hipótese de que não só essas linhas permanecem retas, como também a seção transversal inteira da viga, originalmente planas, permanecem planas e normais às fibras longitudinais da viga depois da flexão. As experiências mostram que a teoria baseada nesta hipótese dá resultados muito precisos para deformações das vigas e a deformação das fibras longitudinais.

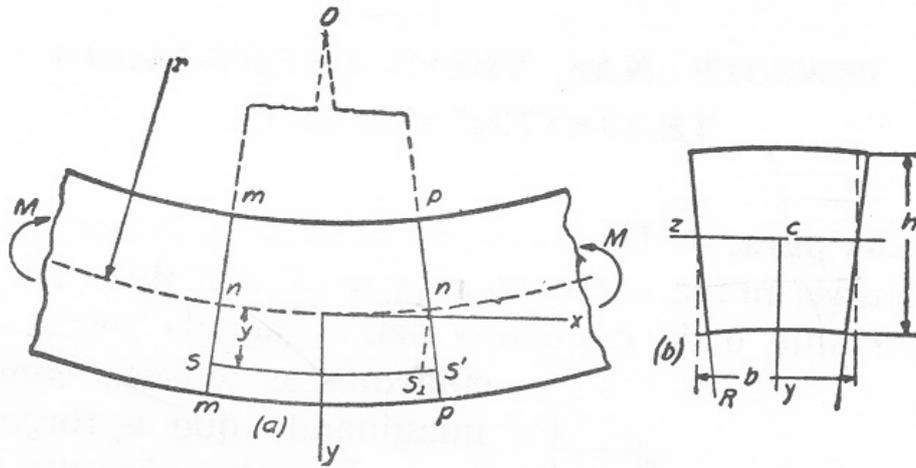


FIGURA 7 – Deformação da viga e das fibras longitudinais.

Da hipótese anterior conclui-se que durante a flexão, as seções transversais  $mm$  e  $pp$  giram, uma em relação à outra, em torno de eixos perpendiculares ao plano da flexão, de modo que as fibras longitudinais do lado convexo sofrem distensão e as do lado côncavo contração. A linha  $nn_1$  é o traço da superfície em que as fibras não sofrem deformação durante a flexão. Esta superfície é chamada de superfície neutra e sua interseção com qualquer seção transversal é chamada de eixo neutro. O alongamento  $s's_1$  de qualquer fibra, à distância  $y$  da superfície neutra, é obtido traçando a linha  $n_1s_1$  paralela à  $mm$  (ver figura 7a). Representando por  $r$  o raio de curvatura do eixo da barra deformado e usando a semelhança de triângulos  $non$  e  $s_1n_1s_1'$ , o alongamento relativo da fibra  $ss'$  é:

$$\varepsilon_x = \frac{s's_1}{nn_1} = \frac{y}{r} \quad (\text{eq. 3})$$

Pode-se ver que as deformações das fibras longitudinais são proporcionais às suas distâncias  $y$  da superfície neutra e inversamente proporcional ao raio de curvatura.

Das deformações das fibras longitudinais, obtém-se as tensões correspondentes, aplicando a Lei de Hooke.

$$\sigma_x = \frac{Ey}{r} \quad (\text{eq. 4})$$

A distribuição destas tensões acha-se indicada na figura 8. A tensão em qualquer fibra é proporcional à sua distância do eixo neutro  $nn$ . A posição do eixo neutro e o raio

de curvatura  $r$  podem ser determinados pela condição de que as forças distribuídas numa seção transversal qualquer da viga, devem dar lugar a um conjugado resistente que equilibre o conjugado exterior  $M$ .

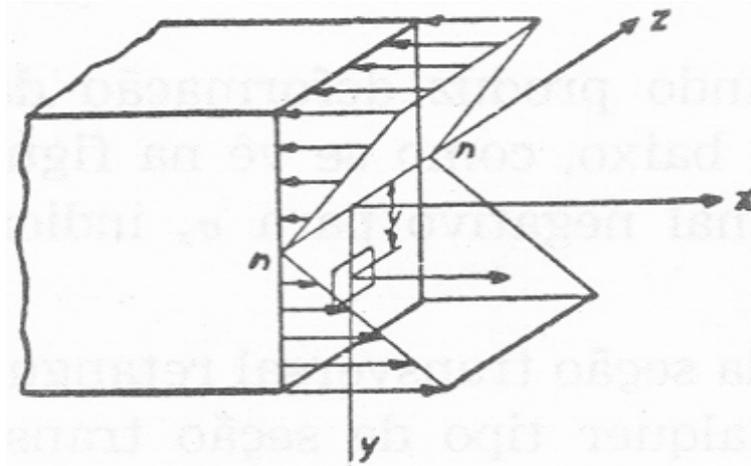


FIGURA 8 – Distribuição de tensões na seção transversal da viga.

Representado por  $dA$  a área elementar da seção transversal distante  $y$  do eixo neutro. A força que atua nesta área elementar é o produto da tensão (equação 4) e sua área  $dA$  isto é,  $(Ey/r)dA$ . Devido ao fato de que todas estas forças distribuídas na seção transversal representam um sistema equivalente a um conjugado, a resultante destas forças na direção  $X$  deve ser igual a zero, e obtemos:

$$\int \frac{Ey}{r} dA = \frac{E}{r} \int y dA = 0 \quad (\text{eq. 5})$$

Isto é, o momento estático da área da seção transversal, em relação ao eixo neutro, é igual zero; portanto, o eixo neutro passa pelo centro de gravidade da seção.

O momento estático da força no elemento anterior em relação ao eixo neutro é  $(Ey/r) \cdot dA \cdot y$ . Somando estes momentos na seção transversal e fazendo a resultante igual ao momento  $M$  das forças exteriores, obteremos a seguinte equação para a determinação do raio de curvatura  $r$ :

$$\int \frac{E}{r} y^2 dA = \frac{EI_z}{r} = M \quad \text{ou} \quad \frac{1}{r} = \frac{M}{EI_z} \quad (\text{eq. 6})$$

Onde

$$I_z = \int y^2 dA \quad (\text{eq. 7})$$

é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo neutro z. Pela equação (6), vemos que a curvatura varia diretamente com o momento fletor e inversamente com a quantidade  $EI_z$ , a qual é chamada de módulo de rigidez à flexão ou módulo da viga. A eliminação de r pelas equações (4) e (6), dá a seguinte equação para as tensões:

$$\sigma_z = \frac{My}{I_z} \quad (\text{eq. 8})$$

Na equação (8) M é positivo quando produz deformações da barra com concavidade voltada para baixo; y é positivo para baixo. Um sinal negativo para  $\sigma_x$  indica tensão de compressão.

As tensões de tração e compressão ocorrem nas fibras extremas, e para a seção transversal retangular ou qualquer outro tipo de seção que tenha seu centro de gravidade no meio da altura h, ocorrem quando  $y = \pm h/2$  e são:

$$(\sigma_z)_{\max} = \frac{Mh}{2I_z} \quad \text{e} \quad (\sigma_z)_{\min} = -\frac{Mh}{2I_z} \quad (\text{eq. 9})$$

Onde no caso da seção transversal retangular, tem-se:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{eq. 10})$$

### 2.3.3 – TENSÕES DE CISALHAMENTO NA FLEXÃO

Quando uma viga é solicitada à flexão por cargas transversais, produzir-se-ão não somente tensões normais  $\sigma_x$ , mas também tensões de cisalhamento T em qualquer seção transversal mn. Considerando a ação sobre a parte direita da viga, pode-se concluir, pelas condições de equilíbrio, que a grandeza dessas tensões de cisalhamento é tal que sua soma é igual à força cortante. Em uma seção transversal retangular é natural

admitir que a tensão de cisalhamento em cada ponto da seção transversal seja paralela à força cortante  $V$ , isto é paralela à seção  $mn$  da seção transversal (ver figura 9). A tensão nesse caso é representada por  $T_{yx}$  (o índice  $y$  indica que a tensão de cisalhamento é paralela ao eixo  $y$  e o índice  $x$  que a tensão atua num plano perpendicular ao eixo dos  $x$ ). Como segunda hipótese, deve-se admitir que a distribuição das tensões de cisalhamento seja uniforme ao longo da largura  $cc_1$  da barra. Estas aproximações são suficientemente precisas e permitem determinar a distribuição das tensões de cisalhamento.

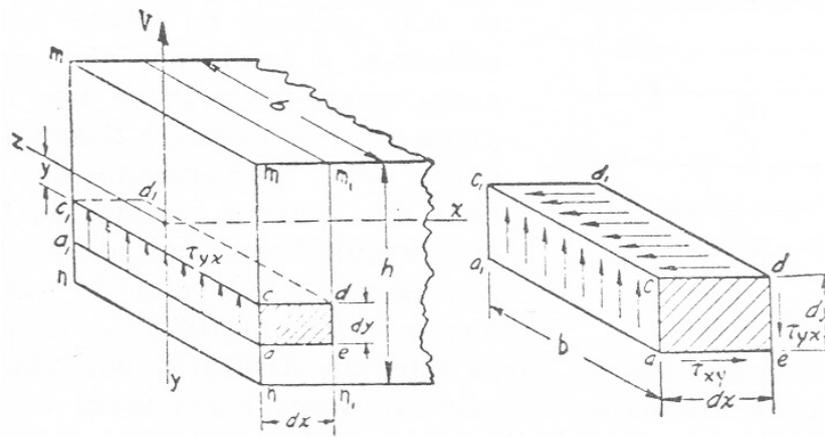


FIGURA 9 – (a) Seção transversal retangular de uma viga. (b) Tensões de cisalhamento produzidas em um elemento da viga.

Cortando um elemento por meio de duas seções transversais adjacentes e dois planos adjacentes paralelos ao plano neutro (ver figura 9b) e considerando as hipóteses feitas conclui-se que, as tensões de cisalhamento distribuídas na face transversal devem equilibrar-se com a distribuição de tensões de cisalhamento geradas sobre a face horizontal. Então  $T_{yx} = T_{xy}$ , isto é, as tensões de cisalhamento que atuam em duas faces perpendiculares do elemento são iguais (considerando valores absolutos).

A existência dessas tensões de cisalhamento nos planos paralelos ao plano neutro pode ser demonstrada colocando-se duas barras retangulares iguais, uma sobre a outra e aplicando uma carga concentrada em sua seção transversal (ver figura 10). Se não houver atrito entre as barras, a flexão de uma barra será independente da outra; cada uma sofrerá compressões nas fibras longitudinais superiores e tração nas inferiores (ver figura 10b). As fibras longitudinais inferiores da barra superior, deslizarão em relação às

fibras superiores da barra inferior. Numa barra única de altura  $2h$  haverá tensões de cisalhamento ao longo do plano neutro  $mn$  de tal grandeza que impeça este deslizamento da parte superior da barra em relação à inferior.

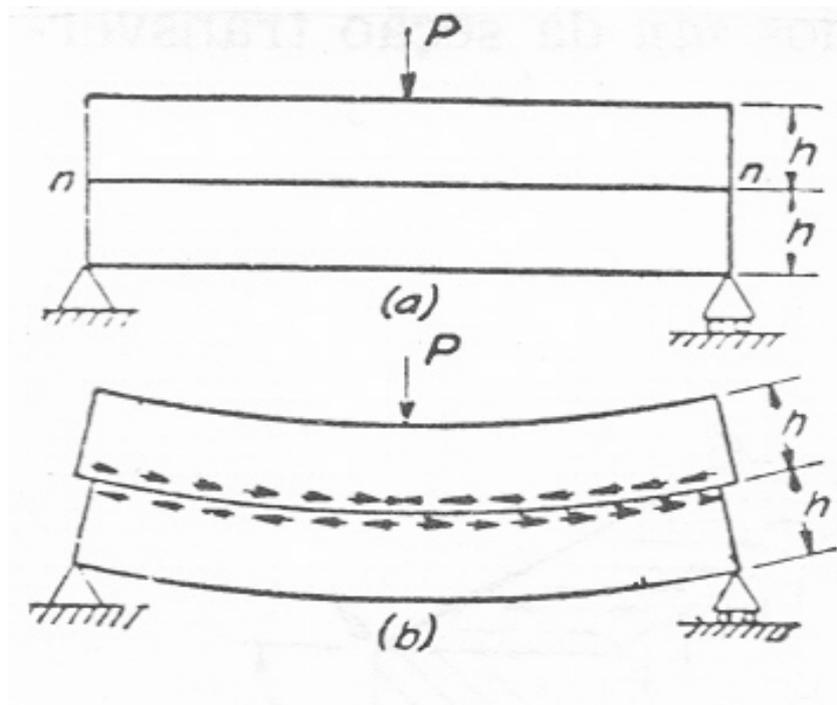


FIGURA 10 – (a) Duas barras retangulares, uma sobre a outra. (b) Flexão das barras com aplicação de uma carga concentrada  $P$ .

A tensão de cisalhamento  $T_{yx}$ , em qualquer ponto da seção transversal vertical, é vertical em direção e numericamente igual à tensão de cisalhamento horizontal  $T_{xy}$  no plano horizontal que passa pelo mesmo ponto. Esta última tensão pode ser calculada pela condição de equilíbrio do elemento  $pp_1nn_1$ , cortado da viga por duas seções transversais adjacentes  $mn$  e  $m_1n_1$  e pelos planos horizontais  $pp_1$  (ver figura 11).

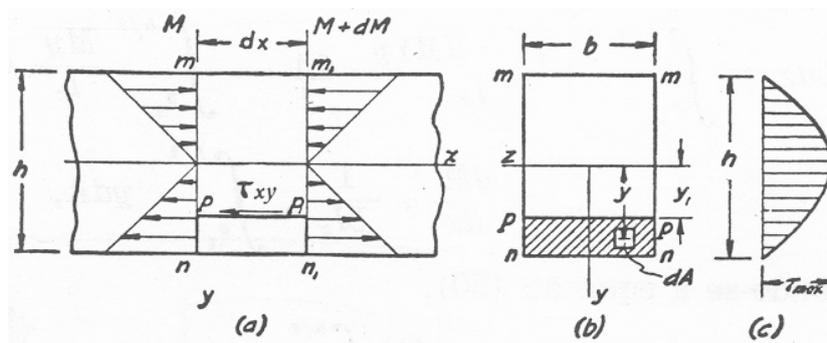


FIGURA 11 – Distribuição de tensão em duas seções transversais da barra

As únicas forças que atuam nesse elemento, na direção do eixo  $x$ , são as tensões de cisalhamento  $T_{xy}$  sobre o lado  $pp_1$ , e a tensão normal  $\sigma_x$ , sobre os lados  $pn$  e  $p_1n_1$ . Se os momentos fletores nas seções  $mn$  e  $m_1n_1$  são iguais, isto é, no caso da flexão pura, as tensões normais  $\sigma_x$  nos lados  $np$   $n_1p_1$  serão, também, iguais e estarão em equilíbrio entre si. Então, a tensão de cisalhamento  $T_{xy}$  deve ser igual a zero.

No caso mais geral de um momento fletor variável, representando por  $M$  e  $M + dM$  os momentos nas seções transversais  $mn$  e  $m_1n_1$ , respectivamente. Então, a força normal que atua na área elementar  $dA$  do lado  $nppn$  será ( equação 8),

$$\int_{y_1}^{\frac{h}{2}} \frac{My}{I_z} dA$$

A soma de todas estas forças distribuídas no lado  $nppn$  do elemento será

$$\sigma_x dA = \frac{My}{I_z} dA \quad (a)$$

Da mesma maneira, a soma das forças normais que atuam no lado  $n_1p_1p_1n_1$  será

$$\int_{y_1}^{\frac{h}{2}} \frac{(M + dM)y}{I_z} dA \quad (b)$$

A força devida às tensões de cisalhamento  $T_{xy}$  que atuam na face superior  $pp_1$  do elemento é

$$\tau_{xy} b dx \quad (c)$$

As forças dadas em (a), (b) e (c) devem satisfazer a equação  $\Sigma X = 0$ , portanto

$$\tau_{xy} b dx = \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} \frac{(M + dM)y}{I_z} dA - \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} \frac{My}{I_z}$$

Onde

$$\tau_{xy} = \frac{dM}{dx} \cdot \frac{1}{bI_z} \cdot \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} y dA$$

Fazendo,

$$\frac{dM}{dx} = V$$

A equação fica,

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q}{bI_z} \int_{y_1}^{\frac{h}{2}} y dA \quad (\text{eq. 11})$$

A integral nesta equação tem significado muito simples. Representam o momento estático da parte tracejada da seção transversal (ver figura 11 b), em relação ao eixo neutro z. para seção retangular estudada.

$$dA = bdy$$

E a integral torna-se

$$\int_{y_1}^{\frac{h}{2}} by dy = \left| \frac{by^2}{2} \right|_{y_1}^{\frac{h}{2}} = \frac{b}{2} \left( \frac{h^2}{4} - y_1^2 \right) \quad (\text{d})$$

Levando a equação (d) na equação (11), obtém-se para seção retangular

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{V}{2I_z} \left( \frac{h^2}{4} - y_1^2 \right) \quad (\text{eq. 12})$$

Vê-se que as tensões de cisalhamento  $T_{yx}$  não estão uniformemente distribuídas da parte superior da barra à inferior. O valor máximo de  $T_{yx}$  ocorre quando  $y_1 = 0$ , isto é, para pontos no eixo neutro.

### 2.3.4 – TENSÕES PRINCIPAIS NA FLEXÃO

Aplicando as equações (8) e (11) pode-se calcular para qualquer ponto e uma seção transversal a tensão  $\sigma_x$  e a tensão de cisalhamento  $T_{yx}$ , contanto que sejam conhecidos o momento fletor  $M$  e a força cortante  $V$  nesta seção. O valor numérico máximo de  $T_{yx}$  atua no eixo neutro.

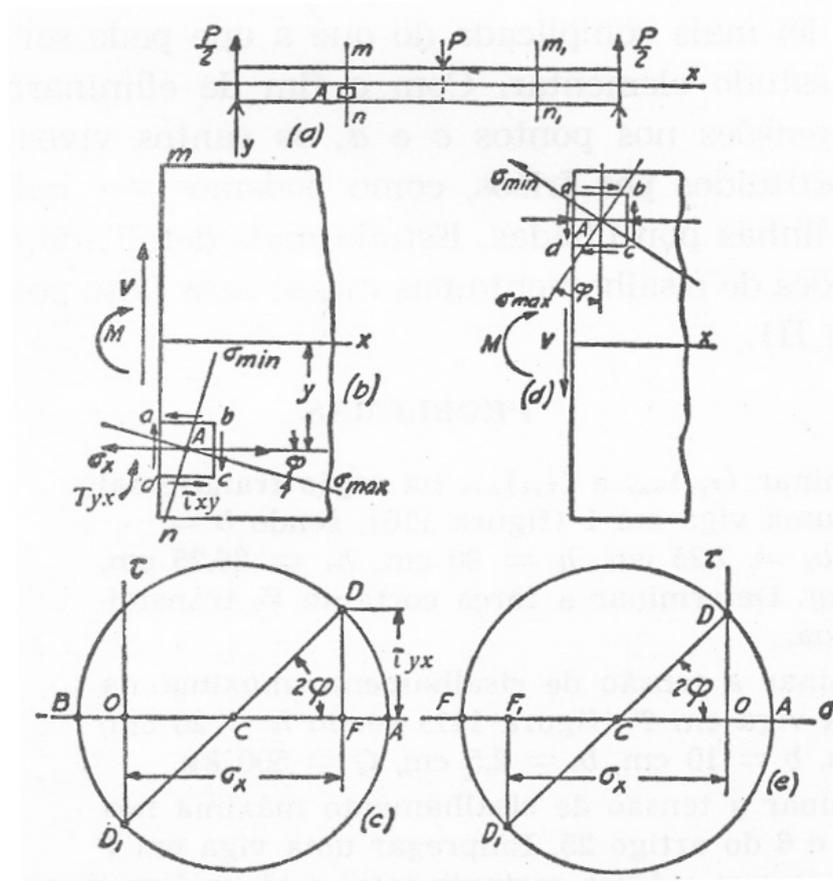


FIGURA 12 – (a) viga simplesmente apoiada e carregada no meio (b) elementos da viga abaixo e acima da linha neutra. (c) representação das tensões no circulo de Mohr.

No caso de uma viga simplesmente apoiada e carregada no meio (ver figura 12). Para o ponto  $A$  abaixo do eixo neutro na seção transversal  $mn$ , as grandezas das tensões  $\sigma_x$  e  $T_{yx} = T_{xy}$ , são dadas pelas equações (8) e (11) e estão indicadas atuando no elemento infinitesimal cortado da barra no ponto  $A$  (ver figura 12 b).

Sabendo-se que as tensões nas faces de um elemento cortado de um corpo sobre solicitação, variam com as direções dessas faces e que é possível girar o elemento, de tal

forma, que apareçam tensões normais. As direções das faces são então, chamadas de direções principais e as tensões correspondentes de tensões principais. As grandezas dessas tensões e suas direções podem ser determinadas pelas equações retiradas do Circulo de Mohr (13) e (14) e (15), fazendo nessas equações  $\sigma_y = 0$ .

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2} \quad (\text{eq. 13})$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2} \quad (\text{eq. 14})$$

$$|\text{tg } 2\alpha| = \frac{\overline{DE}}{\overline{CE}} \quad (\text{eq. 15})$$

Para uma barra com seção transversal retangular e considerando material homogêneo, isotrópico e com dimensões bem definidas as equações ficam:

Para  $0 < x < L/2$

$$\sigma_I(x, y) = \frac{-3Pxy}{bh^3} + \sqrt{\left(\frac{3Pxy}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2} \quad (\text{eq. 16})$$

$$\sigma_{II}(x, y) = \frac{3Pxy}{bh^3} - \sqrt{\left(\frac{3Pxy}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2} \quad (\text{eq. 17})$$

$$tg 2x(x, y) = -\frac{1}{xy} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (\text{eq. 18})$$

Para  $L/2 < x < L$

$$\sigma_I(x, y) = \frac{-3P(L-x)y}{bh^3} + \sqrt{\left( \frac{3P(L-x)y}{bh^3} \right)^2 + \left[ \frac{-3P}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) \right]^2} \quad (\text{eq. 19})$$

$$\sigma_{II}(x, y) = \frac{-3P(L-x)y}{bh^3} - \sqrt{\left( \frac{3P(L-x)y}{bh^3} \right)^2 + \left[ \frac{-3P}{bh^3} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) \right]^2} \quad (\text{eq. 20})$$

$$tg 2x(x, y) = +\frac{1}{(L-x)y} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (\text{eq. 21})$$

onde  $x$  é a distancia entre o apoio esquerdo e o ponto onde se pretende fazer as medidas,  $y$  a distancia (altura) entre superfície neutra da barra e o ponto a ser medido,  $L$  a distancia entre os apoios da barra,  $h$  e  $b$  a altura e espessura da barra e  $P$  a carga utilizada.

## 2.4 – MEDIÇÃO DAS TENSÕES

### 2.4.1 – MÉTODOS EXISTENTES

A análise experimental das tensões atuantes em uma estrutura é tradicionalmente realizada com o auxílio de extensômetros (“strain gages”) instalados na peça estudada. A extensimetria já é uma técnica bastante desenvolvida e aplicada, permitindo determinar o campo de tensões requerido para análise da segurança estrutural e ainda o acompanhamento da variação das tensões com o tempo, em estruturas solicitadas por carregamentos cíclicos. Uma das variantes da extensimetria é a técnica do furo central, que permite avaliar o nível das tensões residuais em uma peça. Ela apresenta resultados confiáveis para a situação de tensões constantes ao longo da espessura, na região do furo.

Atualmente existem 4 (quatro) outras técnicas para medição das tensões residuais: a difração de nêutrons, a elasto-magnética, a difração de raios-x e a ultra-sônica.

A técnica de difração de nêutrons é a mais precisa, pois mede diretamente a distância dos planos cristalinos do metal, a qual varia com a tensão absoluta atuante. Essa medida é dada pela variação do ângulo de difração na peça, correspondendo ao feixe incidente. É uma técnica onerosa, pelo alto custo do acelerador de partículas, responsáveis pela fonte de nêutrons. Na prática, a indústria optou pela troca de radiação, de raios de nêutrons para raios-X, ganhando-se em portabilidade e em investimento, perdendo-se, porém penetração, dado a menor energia do feixe incidente.

A técnica elasto-magnética se baseia no princípio de anisotropia magnética provocada por um campo de tensões. Há uma alteração no campo magnético induzido originalmente sobre a peça, podendo ser convertida em valores das tensões atuantes, conhecido por efeito “Barkhausen Noise”.

O método elasto-magnética mede a diferença entre as tensões principais, e é mais utilizado para uma varredura da peça tensionada, identificando os locais mais tensionados (“hot spots”).

A técnica ultra-sônica mede indiretamente as tensões residuais pela variação da velocidade do som entre os planos cristalinos do material, afetadas pelo estado de tensões. A desvantagem desta técnica, é que a medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica é afetada pela textura do material na mesma ordem de grandeza aos das tensões. Separar a influência da textura ao da tensão tem sido objeto de estudo de pesquisadores como será visto na seção (2.5).

#### 2.4.2 – PROPAGAÇÃO DA ONDA CISALHANTE EM UM SÓLIDO HOMOGÊNEO E ISOTRÓPICO

Um carregamento repentino, como o gerado por uma fonte ultra-sônica, representa basicamente um problema dinâmico. Embora a ação da força aplicada não seja transmitida instantaneamente a todas as partes do corpo, ondas de tensão e deformação são geradas, se propagando com velocidades finitas a partir da região carregada.

Para estabelecer a equação de ondas cisalhantes, devem-se substituir as equações de equilíbrio que se aplicam ao carregamento estático por equações de movimento. Sendo assim, para pequenos deslocamentos em sólidos elásticos isotrópicos infinitos ou semi-infinitos, basta acrescentar as forças de inércia às equações de equilíbrio [6 – 10].

A propagação de ondas está associada à expansão volumétrica, rotação e distorções cisalhantes. Se a deformação produzida consiste apenas de distorção e rotação (sem expansão de volume), as equações de movimento são simplificadas como pode ser visto na equação (22):

$$\begin{aligned} G\nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ G\nabla^2 v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \\ G\nabla^2 w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (\text{eq. 22})$$

onde  $\rho$  é a densidade do meio e  $t$ , o tempo.

Para uma onda cisalhante propagando-se na direção  $x$ , e com o deslocamento das partículas na direção transversal  $y$ ,  $u = w = 0$  e o deslocamento  $v$  é função de  $x$  e  $t$ . Então a partir da equação (22),

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c_c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \quad (\text{eq. 23})$$

Onde  $c_c$  é a velocidade de propagação da onda ao longo do eixo  $x$ , dada por,

$$c_c = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{eq. 24})$$

Sabendo-se que,

$$\frac{1 + \nu}{E} = \frac{1}{2G} \quad (\text{eq. 25})$$

A velocidade de propagação da onda pode ser expressa em termos de  $\nu$ ,  $E$ ,  $\rho$  substituindo  $G$  da equação (25) em (23). Então,

$$c_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\nu)}} \quad (\text{eq. 26})$$

onde  $c_c$  é a velocidade da onda cisalhante,  $E$  é o módulo de Young,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e  $\rho$  a densidade do meio.

### 2.4.3 – AVALIAÇÃO DE TENSÃO POR ULTRA-SOM

#### 2.4.3.1 – ACUSTOELASTICIDADE E BIRREFRINGÊNCIA

Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização. Materiais que apresentam esta propriedade são chamados duplamente refratores ou birrefringentes [11, 12]. A anisotropia do material é causada tanto pela textura, quanto pelo estado de tensões em um sólido elástico.

A velocidade das ondas ultra-sônicas em um meio isotrópico livre de tensões é constante, o mesmo não acontece em materiais anisotrópicos. Essa variação da velocidade da onda ultra-sônica, ao percorrer um material elástico sob tensão é chamado de efeito acustoelástico.

A birrefringência acústica pode ser mais bem explicada usando sua semelhança com a birrefringência óptica. A fotoelasticidade foi investigada em 1816 quando Brewster descobriu o efeito da birrefringência em uma barra de vidro de baixa tensão.

Ele verificou que quando uma luz polarizada penetra um sólido com baixa tensão as ondas geradas possuem a mesma direção de polarização se o feixe de luz incidente for paralelo ao eixo de simetria da chapa. No caso onde a direção de polarização está em certo ângulo em relação a um dos eixos de simetria a luz torna elipticamente polarizada.

A vibração elíptica pode ser descrita matematicamente por duas emissões de luz polarizada a cada um dos eixos de simetria do material. A figura 13 esboça o efeito da birrefringência na incidência de uma luz polarizada [13].

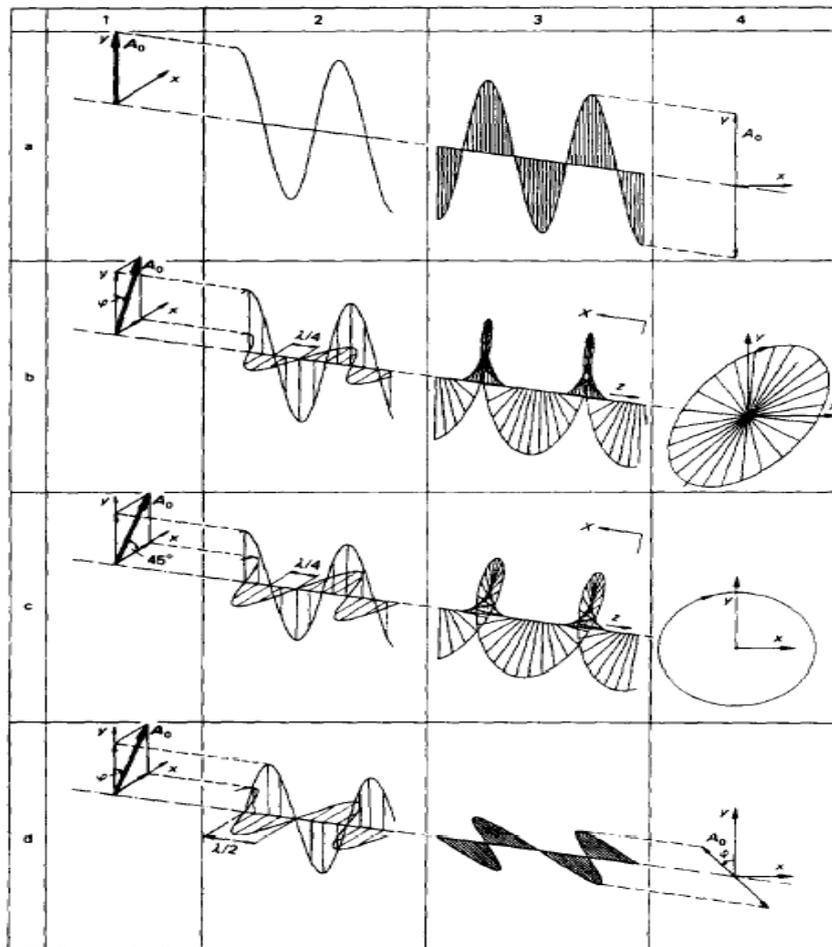


FIGURA 13 - Comportamento das duas componentes de onda, com a polarização do transdutor alinhado com o eixo principal (a). E quando as componentes de onda estão a um certo ângulo com o eixo principal (b, c, d) [13].

A velocidade da onda vibrando paralelo ao primeiro eixo principal é,

$$Vt_1 = Vt + c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2 \quad (\text{eq. 27})$$

se um estado plano de tensão é assumido.

A velocidade da onda vibrando paralelo ao segundo eixo principal é,

$$Vt_2 = Vt + c_2\sigma_1 + c_1\sigma_2 \quad (\text{eq. 28})$$

onde  $V_t$  é a velocidade da onda num sólido sem tensão,  $c_1$  e  $c_2$  são as constantes elásticas e  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as tensões principais. Assim;

$$V_{t_1} - V_{t_2} = (c_1 - c_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \quad (\text{eq. 29})$$

Essa equação é similar à equação básica ao do efeito óptico da birrefringência

$$n_1 - n_2 = (K_1 - K_2)(\sigma_2 - \sigma_1) \quad (\text{eq. 30})$$

$n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração das duas direções principais da birrefringência do material,  $k_1$  e  $k_2$  são constantes dependentes do material. Variação da direção de vibração da onda ultra-sônica com os respectivos eixos principais produz vibrações elípticas num sólido sob tensão. A forma elíptica depende do ângulo de incidência da onda ultra-sônica e os eixos principais, bem como a diferença de velocidade das duas componentes de ondas  $V_{t_2} - V_{t_1}$ .

Uma situação especial é determinada se o ângulo for  $45^\circ$ . A diferença de velocidade das duas componentes em um sólido causa uma diferença de fase entre elas, quando essa diferença de fase atinge  $\frac{1}{2}$  comprimento de onda uma interferência destrutiva ocorre como pode ser visto na figura 14.

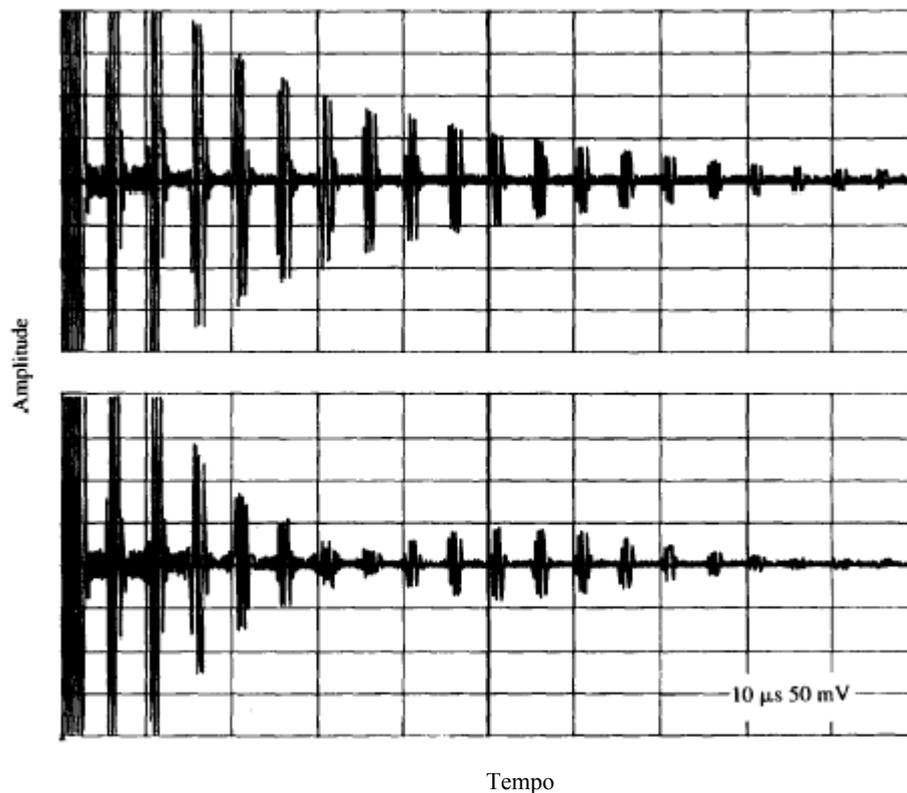


FIGURA 14 – comportamento da amplitude de onda quando as duas componentes estão em fase (a). E quando estão fora de fase (b) [13].

Para aplicação prática a vibração da onda incidente é sempre ajustada para ser paralelo com os eixos principais, o que produz um valor individual das velocidades  $V_{t1}$  e  $V_{t2}$ , resultando em um aumento na precisão das aquisições das velocidades ou dos tempos de percurso da onda.

Como já foi dito, a influência do estado de tensões (ou estado de deformações) sobre as velocidades de propagação de ondas elásticas é chamado de efeito acustoelástico. Usualmente, este efeito é descrito de modo conceitual pela equação (29).

A descrição teórica do efeito acustoelástico, que relaciona a influência do estado de tensão no material à velocidade da onda ultra-sônica, somente foi possível considerando a teoria não linear (deformações finitas) da elasticidade. Murnaghan [apud 14] incluiu termos de terceira ordem na definição da energia elástica e introduziu as constantes elásticas de terceira ordem ( $l$ ,  $m$  e  $n$  que foram chamadas de constantes de Murnaghan).

Tendo por base a teoria desenvolvida por Murnaghan em 1937, Hughes e Kelly [14] em 1953 desenvolveram as relações básicas entre velocidade da onda ultra-sônica e a deformação que surge devido à tensão no material onde essa onda se propaga.

As equações desenvolvidas por Hughes e Kelly são representadas em termo da variação da velocidade da onda ultra-sônica em relação à tensão, e podem ser apresentadas, de maneira genérica, da seguinte forma [15]:

Para ondas cisalhantes,

$$\frac{V_{ij} - V_c^0}{V_c^0} = k_3 \sigma_i + k_4 \sigma_j + k_5 \sigma_k \quad (\text{eq. 31})$$

onde  $V_c^0$  é a velocidade da onda cisalhante no material sem tensão,  $V_{ij}$  é a velocidade da onda ultra-sônica propagando na direção  $i$  e polarizada na direção  $j$ ,  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$ ,  $\sigma_k$  são as tensões principais nas respectivas direções e  $k_3$  a  $k_5$  são chamadas de constantes acustoelástica normalizadas. Cada constante acustoelástica corresponde a uma relação entre a direção de propagação da onda e a direção de movimentação das partículas em relação à tensão obtidas a partir da variação relativa da velocidade das ondas em um material tensionado uniaxialmente, assumindo variações muito pequenas.

Na aplicação do ultra-som para medida de tensão utiliza-se o termo da birrefringência ao se empregar ondas cisalhantes e denomina-se birrefringência acústica à diferença fracional da velocidade ou tempo de trânsito da onda ultra-sônica, em relação a duas direções perpendiculares, como pode ser visto na equação abaixo:

$$B = \frac{\frac{V_l - V_t}{V_l + V_t}}{2} = \frac{t_l - t_t}{t_l + t_t} \quad (\text{eq. 32})$$

Onde  $t_l$  e  $t_t$  são os tempos de percurso da onda ultra-sônica em duas direções perpendiculares.

Em um material isotrópico, sem efeito da tensão ou textura, os tempos de percurso da onda ultra-sônica são iguais ( $B = 0$ ). Porém, quando neste material é aplicada uma tensão isso não ocorre e a equação genérica da onda cisalhante de

incidência normal (equação 31), combinada para as duas direções, pode ser expressa da seguinte forma:

$$B = \frac{(V_{31} - V_{32})}{V_c^0} = (k_4 - k_5)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{eq. 33})$$

Um material ortotrópico é aquele que tem propriedades de simetria elástica com relação a três planos cristalinos. Em geral, os materiais não são completamente ortotrópicos, o que pode influenciar na medida de tensão por ultra-som uma vez que uma pequena variação na orientação dos grãos pode produzir anisotropia acústica de mesma ordem de grandeza produzida pela tensão.

No caso em que a tensão cisalhante é igual a zero, o que significa que as direções das tensões principais coincidem com as direções de simetria ortotrópicas do material, a equação para medida de tensão pela técnica da birrefringência pode ser representada pela equação abaixo, se as ondas cisalhantes forem polarizadas nas direções de ortotropia do material:

$$B = B_0 + m(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (\text{eq. 34})$$

Onde, B é a birrefringência induzida pela textura e pelo estado de tensão do material, B<sub>0</sub> é a birrefringência induzida pela textura e m a constante acustoelástica do material.

## 2.5 – TEXTURA

Um sólido policristalino consiste de grãos com orientações cristalográficas distribuídas aleatoriamente, de modo que apresentam, em sua distribuição global, propriedades elásticas isotrópicas. Em geral, durante os processos de fabricação, ao serem mecanicamente trabalhados, ocorre a presença de orientação cristalina preferencial, a textura, o que a exemplo das tensões, também os torna acusticamente anisotrópicos [16 - 18].

A teoria aqui mostrada para medida de tensão por ultra-som é adequada a materiais originalmente acusticamente isotrópicos (isto é antes de submetidos a tensão).

Assim, a textura dos materiais aparece como problema para a medida de tensão por ultra-som, uma vez que influenciam na velocidade da onda ultra-sônica na mesma ordem de grandeza que as tensões, mascarando resultados da medida de tensão. Por isto, são necessários esforços na tentativa de separar os efeitos da textura dos da tensão.

Clark sugere o uso de corpos-de-prova de referência, e a determinação de curvas de calibração a partir destes. A idéia embora atraente e prática deixa dúvida quanto à certeza de que a amostra de referência e o material em questão são realmente iguais, ou seja, tenham a mesma microestrutura.

Fisher [19] adotou para uma situação particular sua: medir tensões residuais causadas pelo processo de laminação, um método bastante interessante. Uma vez que na extremidade da chapa não existe tensão residual ele mediu neste ponto a velocidade da onda ultra-sônica. Assim, a velocidade nesta região só estaria sendo afetada pela textura. Esta medida serviu então como referência. Ele mediu a velocidade em uma parte da chapa laminada com tensão e, a partir da referência, conseguiu medir a tensão com excelente precisão.

## 2.6 – GERAÇÃO DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS

Esta seção visa dar um conhecimento sobre a geração de ondas ultra-sônicas baseada no efeito piezoelétrico de materiais. Um estudo mais aprofundado sobre esse assunto pode ser encontrado nas referências [11].

As ondas são geradas ou introduzidas no material através de um elemento emissor com uma determinada dimensão e que vibra com uma certa frequência. Essas ondas exercem uma pressão na superfície do material e seu valor (grandeza) pode ser medido. Tanto o elemento emissor com o receptor é denominado transdutor, muitas vezes também designados por cabeçotes, pois transformam um tipo de energia em outro.

Diversos materiais apresentam o efeito piezoelétrico. Se tomarmos uma chapa de certo formato e aplicarmos uma pressão sobre a mesma, surgem em sua superfície cargas elétricas (o efeito inverso também é verdadeiro). Se forem introduzidos dois eletrodos sobre as faces opostas dessa chapa, de maneira que se possa carregá-la eletricamente, ela comporta-se como se estivesse sob pressão e diminui de espessura, emitindo ondas cuja forma depende da frequência de excitação e das dimensões da chapa.

Quando o material está fixo, ele então é capaz de gerar uma pressão mecânica (efeito piezoelétrico inverso). O efeito piezoelétrico direto fornece o transdutor receptor de ondas ultra-sônicas, o inverso o transdutor emissor.

## 2.7 – ABORDAGEM ESTATÍSTICA

Em sua interpretação moderna, a estatística é uma teoria e uma metodologia de se deduzir e tomar decisões sob condições de incerteza. Trata também de como essas deduções podem ser estendidas além do conjunto particular de dados examinados, e de como as decisões podem ser neles baseadas, mediante apropriada análise.

Conceitos e métodos estatísticos fornecem um meio lógico, objetivo e sistemático de se tomar decisões em problemas de qualquer natureza. Em muitas áreas da atividade humana, a tomada de decisão é baseada somente no julgamento intuitivo. Em outras, elas requerem cuidadosas pesquisas, com refinada triagem dos dados e detalhada análise estatística.

Os procedimentos estatísticos, entretanto, não substitui ou descartam a intuição e o senso comum. Ao contrário, ajudam na estruturação e condução do problema até a decisão.

### 2.7.1 – FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO

As distribuições de freqüência encontradas na vida real podem, com boa aproximação, serem simuladas por funções matemáticas. Algumas destas funções apresentam um grupo de propriedades especiais, que permitem a descrição do comportamento estatístico de muitos fenômenos, e é denominada de “Função Distribuição”.

A função distribuição t de student esta associada a randomicidade dos eventos. Ela é uma distribuição extensivamente usada em testes de hipóteses e se aplica para amostras pequenas ( $n < 30$ ) [ 20 ].

Os valores de t servem para fixar os limites do intervalo de confiança desejado. Desta forma um resultado de medida é dado por,

(eq. 36)

$$\bar{x} \pm t_p s_x$$

onde  $\bar{x}$  é valor médio da amostra,  $S_x$  o desvio padrão da amostra,  $t_p$  o valor t crítico que limita o intervalo de confiança onde  $p = (1 - \alpha/2)$  é o percentual exigido com  $\alpha$  sendo a incerteza associada ou nível de significância.

Os valores de  $t_p$  são encontrados fazendo uso da tabela que se encontra no apêndice A, onde  $t_p$  é função do número de graus de liberdade da amostra e do percentual  $p$ . Quando se deseja um intervalo de confiança de 95%, por exemplo, buscase na tabela o valor correspondente de nível de significância de 0,05 ( 5 %).

### 2.7.2 – TESTE DE HIPÓTESES

Métodos estatísticos de testes de hipóteses são freqüentemente utilizados para julgar se existem diferenças significativas, dentro de um grau de confiança  $P$ , ou incerteza  $\alpha$ , entre dois ou mais resultados de medida.

As alternativas de teste são várias, englobando os resultados comparativos de amostra x população, amostra x amostra, para os seus valores médios e suas variâncias.

Além destas alternativas existe condição de detalhamento do teste, no sentido se a igualdade dos valores em questão possui ou não uma causa ou direção [20-25].

Basicamente existem dois tipos de hipóteses:

- a) Hipótese Nula,  $H_0$ , onde se faz o teste se dois resultados são iguais, dentro de um determinado nível de confiança (ou grau de incerteza);
- b) Hipótese Alternativa,  $H_1$ , onde se faz o teste se dois resultados são diferentes, dentro de um determinado nível de confiança (ou grau de incerteza).

O procedimento estatístico que permite julgar essas hipóteses encontra-se no apêndice A.

### **3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 – TÉCNICA USADA**

A técnica de medida do tempo utilizada neste trabalho é a do pulso-eco empregando a birrefringência de ondas cisalhantes com incidência normal. Ela consiste na medida do tempo entre dois ecos da onda ultra-sônica, e através do espaço percorrido por esta onda, que será a espessura do corpo-de-prova, calcular sua velocidade. Como a aplicação dessa técnica será usada na verificação de tensão em material, usando a birrefringência, não há a necessidade do cálculo da velocidade, já que a onda percorre exatamente o mesmo espaço, podendo-se trabalhar diretamente com os tempos medidos.

Para a obtenção de variações de tempo ao longo da espessura, um único transdutor é usado como emissor/receptor e o sinal adquirido corresponde a uma sucessão de ecos provenientes da face oposta a que o transdutor está acoplado.

Na configuração pulso-eco, uma técnica de medida de tempo é tradicionalmente empregada. A medida é feita vinculada diretamente à base de tempo do osciloscópio. Neste caso costuma ser tomada uma referência comum a dois ecos consecutivos, que pode ser o ponto de máximo dos ecos ou o ponto de inflexão. O tempo é medido diretamente pela distância entre esses dois pontos, marcados nos dois ecos consecutivos, que corresponde ao tempo que a onda ultra-sônica levou para percorrer a espessura do material. A necessidade da localização de um ponto de referência entre dois ecos consecutivos introduz fonte de erro na medida de tempo devido à dificuldade de se encontrar com precisão os pontos de máximos dos ecos. Logo, para avaliação de tensão onde se trabalha com variações de tempo na ordem de nanossegundos esta técnica é insatisfatória.

Para medida de tensão é utilizado o emprego da técnica de processamento de sinal com a utilização da correlação cruzada e o aumento da taxa de amostragem (técnica multitaxas) [11]. Elas permitem alcançar uma alta resolução nas medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica.

### 3.2 – PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DOS SINAIS

Neste trabalho foi utilizado um método para medir o tempo de trânsito da onda ultra-sônica baseado inteiramente no processamento do sinal ultra-sônico utilizando um algoritmo de correlação cruzada para permitir a exatidão e resolução necessária às medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica para avaliação de tensão em materiais.

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 significa que cada ponto de um sinal é multiplicado e somado a todos os outros pontos do outro sinal, resultando em uma outra função cujo máximo indica o valor do atraso entre os dois sinais [27, 28]. Dessa forma, o que ocorre é uma comparação ponto a ponto dos dois sinais, assim, o erro originado para se estabelecer à referência do máximo é eliminado.

Para melhorar a resolução dos resultados, foi utilizado outro método matemático da interpolação dos sinais. Neste método, são inseridos pontos entre dois pontos consecutivos do sinal original através de um sistema eletrônico de filtragem [29].

A técnica utilizada para aumentar a taxa de amostragem foi a multitaxas, que consiste em aumentar uma dada taxa de amostragem de um valor  $F$  para outro  $F'$ , por um fator inteiro  $L$  (ou seja,  $F' = FL$ ), isto é, consiste em inserir  $(L - 1)$  amostras nulas entre cada par de amostras da seqüência original, cuja taxa se quer modificar.

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

A figura 15 a seguir refere-se a um exemplo da interface gráfica do programa “Atraso V. 9”, visualizada no Windows. Onde o índice inicial e final corresponde ao número de aquisições realizadas. O resultado desse programa fornece os tempos medidos e os valores de  $B$  ou  $B_0$  com correlação e interpolação (no caso interpolação  $L4$ ).

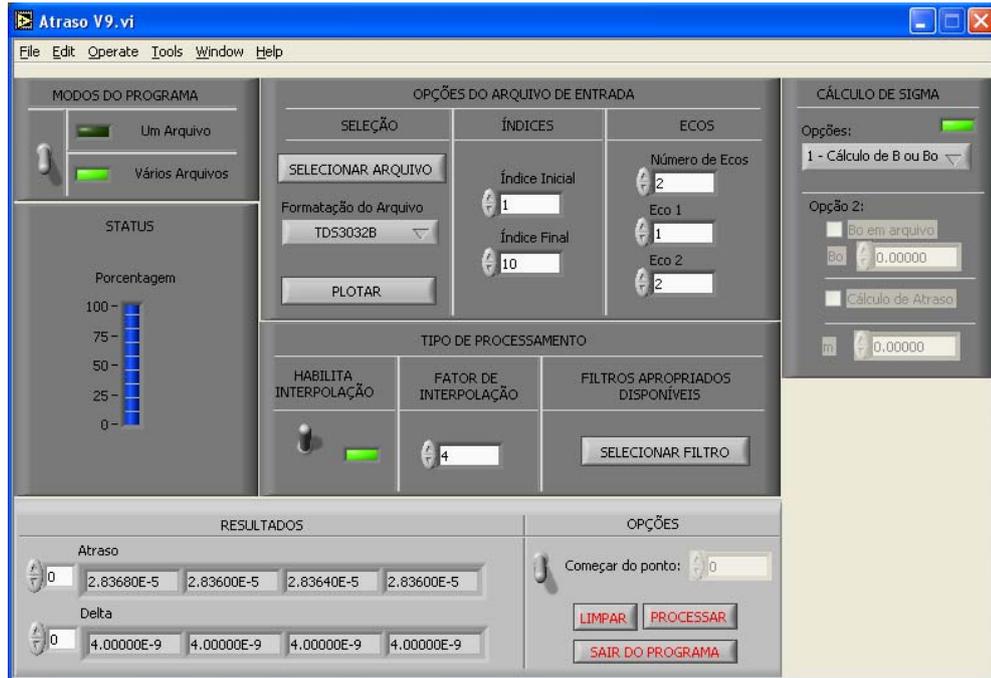


FIGURA 15 – Visualização da tela do programa “Atraso versão 9” no computador

### 3.3 – SISTEMA ULTRA-SÔNICO

O sistema ultra-sônico montado para a aquisição dos sinais foi composto de um aparelho de ultra-som MATEC modelo PR 5000, capaz de gerar, adquirir e amplificar os sinais ultra-sônicos, um osciloscópio digital analógico (Tektronix 3032B) e um transdutor de ondas cisalhantes de incidência normal de 5 Mhz.

O sinal ultra-sônico é transmitido ao material e seu eco retorna ao osciloscópio. Assim são observados no osciloscópio os sinais do pulso de excitação do cristal piezoelétrico e de seu eco. O sistema eletrônico montado está conectado a um microcomputador para receber o sinal ultra-sônico do osciloscópio e permitir seu processamento matemático e conseqüentemente sua medida de tempo de percurso da onda ultra-sônica. Um diagrama esquemático do sistema é mostrado no diagrama da figuras 16 e sua foto na figura 17.

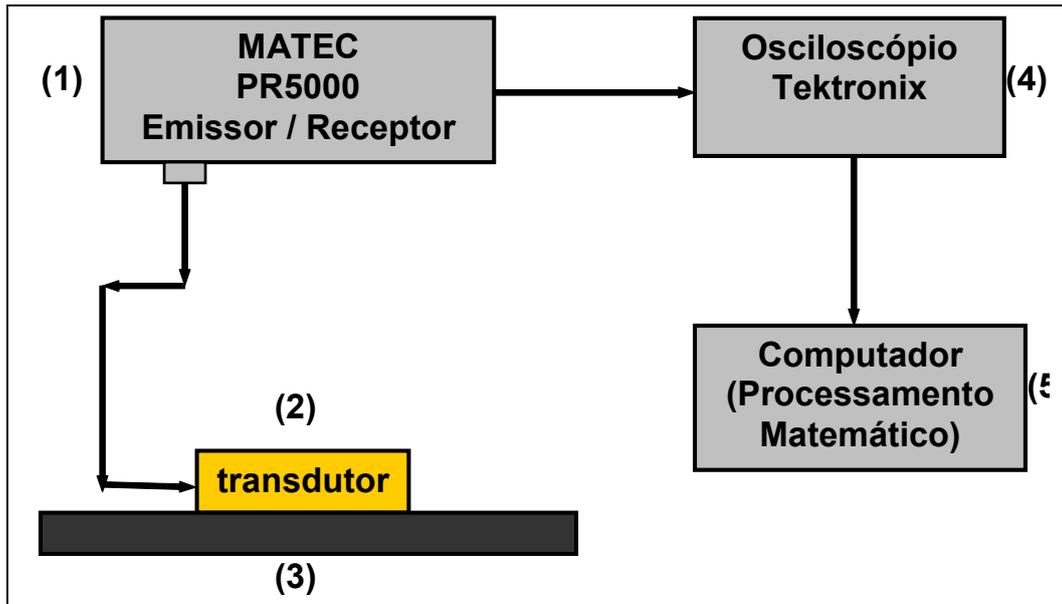


FIGURA 16 - Diagrama esquemático do sistema ultra-sônico: (1) gerador de pulso, (2) transdutor, (3) corpo-de-prova, (4) osciloscópio e (5) microcomputador.

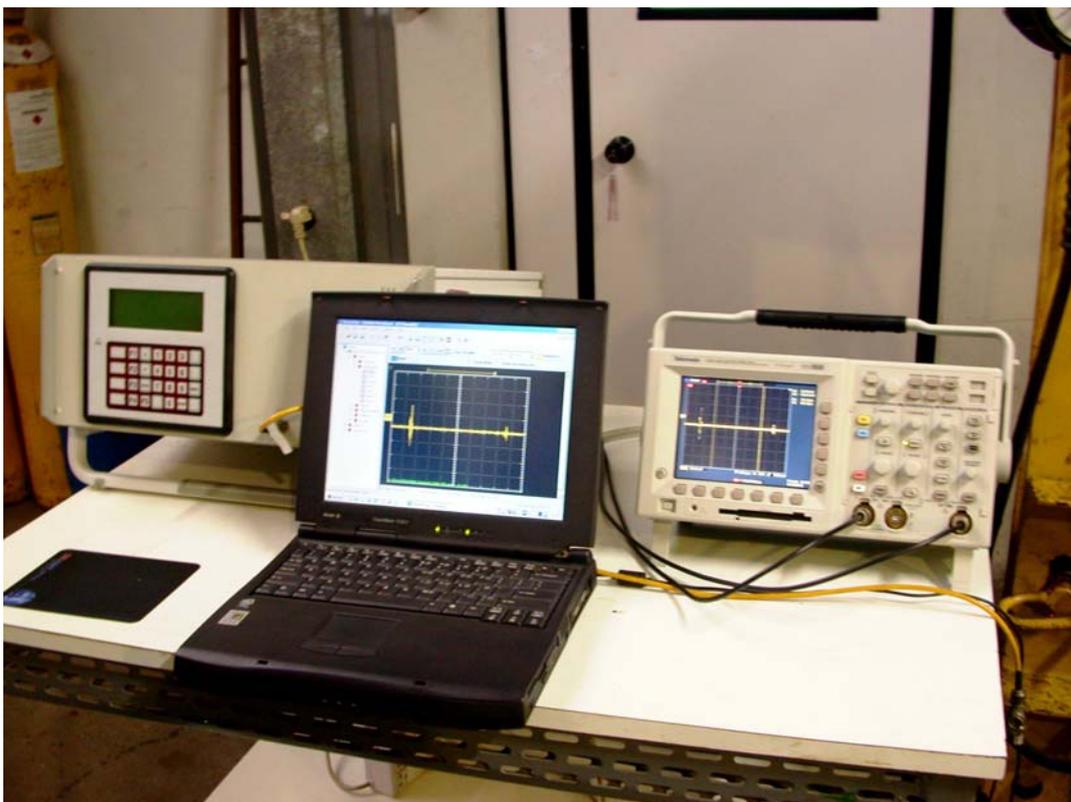


FIGURA 17 – Fotografia do sistema ultra-sônico montado para medida de tensão

O sinal ultra-sônico obtido na configuração pulso eco, é adquirido pelo computador através do programa Wavestar da tektronix (o arquivo é armazenado com extensão \*.221). Ainda no Wavestar o arquivo é exportado para o formato MS Excel (com a extensão \*.csv). A seguir é feita a leitura de formatação do arquivo utilizando o MS Word, para isso deve ser eliminado o cabeçalho dos dados e alguns caracteres e então armazenado no formato texto com extensão \*. Txt para que o arquivo seja compatível com o programa de processamento do sinal que foi escrito no aplicativo matemático MatLab

O aparelho de ultra-som MATEC PR 5000, possui um controle dos parâmetros do pulso ultra-sônico que devem ser ajustados de forma a obter os sinais visualizados na tela do osciloscópio [30, 31]. São eles:

**PRF** (Pulse Repetition Frequency) – Taxa de repetição do pulso

**WIDTH** (Pulse Width) – Largura do pulso ou tempo de vibração do cristal

**FREQ** (Pulse Frequency) – Frequência do transdutor utilizado

**AMP** (Pulse Amplitude) – Amplitude do pulso

**GAIN** (Gain Amplitude) – 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

Utilizou-se o transdutor de onda cisalhante de 5 MHz. Neste caso, os valores escolhidos como parâmetros de trabalho ajustados e que representaram a melhor visualização no osciloscópio, estão mostrados na tabela 2.

TABELA 2 – Parâmetros do gerador ultra-sônico para o transdutor de 5 MHz

<b>PRF</b>	106,3 Hz
<b>WIDTH</b>	0,12 $\mu$ s
<b>FREQ</b>	5 MHz
<b>AMP</b>	55 % Tr +1
<b>GAIN</b>	13,0 dB
<b>LPF</b>	None
<b>HPF</b>	None
<b>RECT</b>	RF PE

### 3.4 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.4.1 – MEDIDAS DO TEMPO DE PERCURSO REALIZADAS NA BARRA

Neste trabalho foi utilizada uma barra de aço SAE 1045. A barra foi usinada de forma que suas faces ficassem paralelas e com um bom acabamento superficial, para facilitar o acoplamento do transdutor, resultando nas dimensões 900 mm x 93 mm x 45 mm (comprimento x altura x espessura).

Foram traçadas regiões definidas, ao longo do comprimento da barra (uma região no centro e as outras duas equidistantes em 200 mm do centro da barra). Em cada região foram marcados pontos para indicar os locais de acoplamento do transdutor, como mostrado na figura 18 (onde E indica o lado esquerdo, C o centro e D o lado direito da barra). Em cada ponto adquiriu-se 10 sinais ultra-sônico (cinco pares, sendo cada par o conjunto de dois sinais com a polarização do transdutor alinhada e ortogonal a direção longitudinal da barra), para medida do tempo de percurso da onda ultra-sônica, em duas direções ortogonais.

Foi calculado por meio da equação 8, a carga para que a barra submetida à flexão, alcançasse 80% do seu limite de escoamento, o que representou

aproximadamente 8000 Kgf. A barra, então, foi posicionada no equipamento para ensaio de flexão de modo que ficasse apoiada em dois pontos, distando 800 mm entre si, e fosse submetida àquela carga calculada em seu ponto central, conforme o ensaio de flexão descrito na seção 2.3.4, como pode ser visto na figura 19.

Com um transdutor de ondas cisalhantes e incidência normal, com frequência de 5,00 MHz, acoplado nas marcações feitas na barra, foram gerados e aquisitados os sinais ultra-sônicos estando a barra sem carregamento e com carregamento.

Como foi visto na revisão bibliográfica, quando uma barra de seção transversal retangular é solicitada, as seções transversais permanecem planas durante a flexão e giram de tal forma que permanecem normais às fibras longitudinais da barra e que a equação de análise de tensão por ultra-som utilizada é válida quando as medidas são realizadas nas direções principais onde a tensão cisalhante é nula.

Foi calculado por meio das equações teóricas (17) e (20) as direções principais, para que na prática fossem realizadas medidas nessas direções. Assim, nos pontos  $E_2$ ,  $C_3$  e  $D_2$  foram realizadas medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica com a polarização do transdutor alinhado a  $45^\circ$  dos eixos  $x$  e  $y$  (ver figura 18), onde segundo os cálculos teóricos estão localizadas as direções principais (eixos  $x'$  e  $y'$ ). Já nos outros pontos, não foi utilizado o mesmo procedimento, uma vez que, os ângulos calculados foram muito pequenos (entre 3 e 7 graus) o que dificultaria uma precisão no posicionamento do transdutor para essas direções.

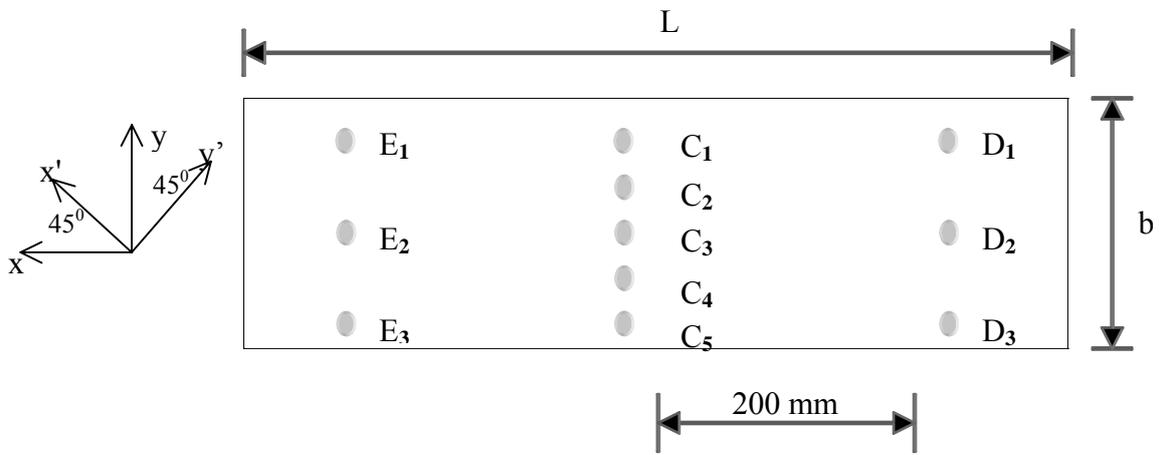


FIGURA 18 – Diagrama do corpo de prova



FIGURA 19 – Fotografia do sistema ultra-sônico e da barra sendo submetida à flexão

### 3.4.2 – LEVANTAMENTO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA

Um corpo-de-prova retirado da barra foi comprimido uniaxialmente na mesma prensa onde a barra foi fletida. Com o material comprimido foi realizada medida de tempo de percurso da onda ultra-sônica em intervalos de carregamento de 10.000 em 10.000 Kgf (num total de 4 carregamentos variando de 0 a 40.000 Kgf), com o objetivo

de levantar uma reta, que exprimisse o comportamento da variação do tempo de propagação da onda ultra-sônica em função da tensão aplicada e a partir desse comportamento obter a constante acustoelástica que é coeficiente angular desta reta.

Esse comportamento da variação do tempo de percurso da onda ultra-sônica a tensão aplicada ao material é o comportamento que rege toda a teoria da análise de tensão por ultra-som [32- 45].

As medidas ultra-sônicas foram executadas em um ponto central no corpo-de-prova, como pode ser visto na figura 20. Com o transdutor acoplado no ponto, foi emitidos um pulso ultra-sônico com a direção de polarização alinhada com a direção de carregamento, e aquisitado o sinal. A seguir o transdutor era girado a  $90^{\circ}$ , com o material ainda submetido à mesma carga, e novamente era aquisitado o sinal de tempo de percurso da onda ultra-sônica, desta vez com a direção de polarização perpendicular a direção de carregamento. A seguir, os sinais foram tratados matematicamente, como já descrito neste capítulo, e obtido os tempos de percurso da onda ultra-sônica em cada condição (polarização e carregamento).



FIGURA 20 – Fotografia do corpo-de-prova sendo comprimido para levantamento da constante acustoelástica

### 3.6 – PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Foi realizado o teste da hipótese nula ( $H_0$ ) para julgar se os resultados das birrefringências, calculadas pelas medidas de tempo obtidas nos pontos da barra, podem ser consideradas iguais do ponto de vista estatístico.

Na realização do teste  $H_0$  entre os valores médios de dois resultados, é preciso seguir algumas etapas que podem ser vistas no apêndice A. O Microsoft Excel permitiu realizar esses testes estatísticos no ícone ferramentas, selecionando análise de dados [26]. A tela do programa é mostrada na figura 21.

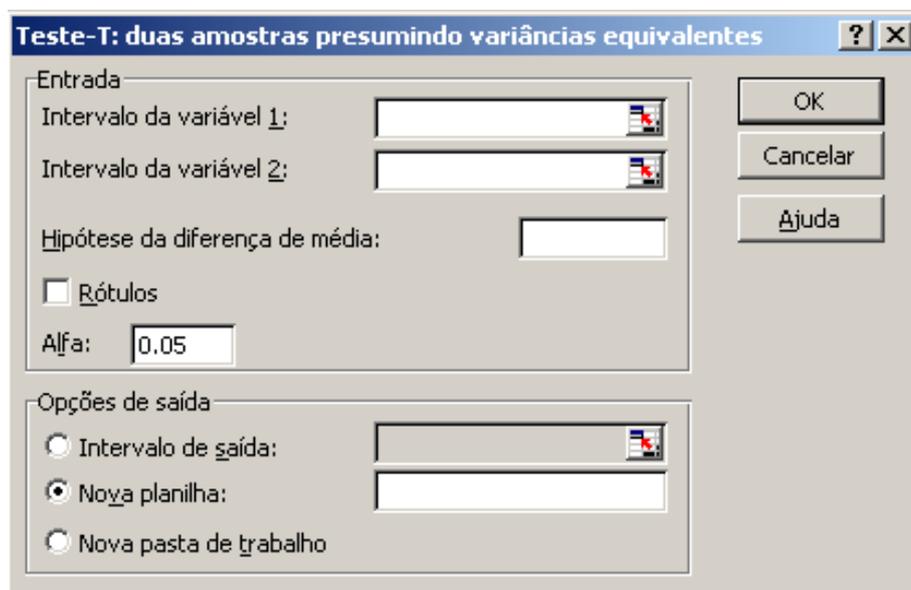


FIGURA 21 – Visualização da tela do programa análise de dados que permite realizar o teste da hipótese nula  $H_0$

No intervalo da variável 1 e 2, deve-se colocar a seqüências dos valores obtidos para as amostras que serão testadas, e em alfa o nível de incerteza do teste.

A tabela 3 apresenta um exemplo do resultado de duas amostras utilizando esse programa. Em comparação com o procedimento mostrado no apêndice A, pode-se dizer que o  $t$  crítico bi-caudal corresponde ao  $t$  obtido pela tabela do apêndice A,  $St$  ao valor de  $t$  calculado e  $gl$  ao número de graus de liberdade. Todos os dados da tabela 3 são obtidos diretamente da resposta desse programa.

Neste exemplo, como  $St_a$  é maior que  $t$  crítico bi-caudal, a hipótese nula seria rejeitada, isto é, o valor médio das amostras não poderia ser considerado igual estatisticamente.

Tabela 3 – Exemplo dos resultados obtidos utilizando o programa de análise de dados do Microsoft Excel

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
Amostras	B1	B2
Média	-0,01994826	-0,019129346
Variância	2,07127E-07	1,76384E-07
Observações	5	5
gl	8	
Sta t	-2,956883161	
t crítico bi-caudal	2,306005626	

Este exemplo foi utilizado presumindo que as variâncias das duas amostras são iguais. Se as variâncias fossem diferentes selecionaria no programa o teste  $t$  para variâncias diferentes e seguiria o mesmo procedimento anterior.

## **4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 – INTRODUÇÃO**

O presente trabalho visa avaliar o estado de tensão em uma barra de aço submetida à flexão, utilizando a técnica da birrefringência acústica, e comparar esses valores experimentais com os valores calculados obtidos teoricamente.

O corpo-de-prova usado neste experimento foi uma barra de aço estrutural SAE 1040, em forma retangular. Este material possui boa resistência mecânica e geralmente é empregado na indústria agrícola, em máquinas, equipamentos e construção estrutural.

Nesta seção é apresentado e discutido o resultado referente ao processamento matemático da correlação cruzada, com e sem interpolação, utilizada nas medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica, análise da anisotropia do material antes de ser submetido ao estado de carregamento, comparação da anisotropia do material antes de ser submetido ao carregamento e durante o carregamento utilizando a técnica da birrefringência, comparação dos resultados da tensão obtidos experimentalmente com os resultados da tensão obtidos teoricamente e os resultados da análise estatística empregada.

### **4.2 – PROCESSAMENTO MATEMÁTICO DOS SINAIS ULTRA-SÔNICOS**

#### **4.2.1 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS COM CORRELAÇÃO CRUZADA**

A avaliação de tensão por ultra-som é “recente” e a técnica utilizada nesse trabalho e a da birrefringência que se baseia no fenômeno acustoelástico. A variação da velocidade da onda ultra-sônica em função do estado de tensão no material foi observada há décadas atrás, porém a tecnologia para medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica alcançou as condições de aplicação com o desenvolvimento da área da informática e com a utilização de métodos de processamento de sinal.

Na tabela 4 são apresentadas medidas de tempo realizadas no corpo de prova retirado da barra para o levantamento da constante acustoelástica onde foi utilizado o

processamento de sinal da correlação cruzada. Os resultados dos tempos mostrados foram obtidos durante a realização do ensaio para obtenção da constante acustoelástica com a direção de polarização do transdutor paralelo ao carregamento. Na primeira coluna são mostradas as medidas de tempo obtidas para uma carga de 10.000 Kgf, e a segunda coluna com 40.000 Kgf.

Quando o material é comprimido os átomos se aproximam facilitando a transmissão da onda. Foi observado que os resultados dos tempos medidos para o carregamento de 40.000 Kgf é menor que para o carregamento de 10.000 Kgf, mostrando a eficiência do processamento do sinal da correlação cruzada na distinção do efeito da tensão nas medidas de tempo. Pode ser observado também que para carregamentos diferentes a maior variação de tempo entre as medidas realizadas são praticamente iguais (aproximadamente 8 ns).

Tabela 4 - Tempos de percurso da onda ultra-sônica cisalhante aquisitados na direção de carregamento do corpo de prova comprimido

Tempos Correlação Cruzada ( $\mu$ s)		
Medidas / Carregamentos	10 kgf	40 kgf
1	2,8696E-05	2,8670E-05
2	2,8691E-05	2,8670E-05
3	2,8688E-05	2,8668E-05
4	2,8687E-05	2,8662E-05
5	2,8694E-05	2,8668E-05
6	2,8695E-05	2,8670E-05
7	2,8690E-05	2,8666E-05
Média	2,8691E-05	2,8668E-05

#### 4.2.2 – CORRELAÇÃO CRUZADA COM INTERPOLAÇÃO

Para melhorar a capacidade de resolução das medidas de tempo obtidas pela correlação cruzada, que tem como limitação o tempo de amostragem (4 ns) do sinal aquisitado, foram aplicados sistemas eletrônicos de filtragem que permitem a interpolação de pontos ao sinal aquisitado, como descrito no capítulo anterior.

A correlação cruzada e a interpolação são realizadas no programa “Atraso versão 9” onde sua tela é mostrada na figura 15. Este programa permite interpolação com sistema de filtragem L 2, L 4 e L 16.

Ao nível de comparação, são mostrados na tabela 5 os valores da diferença do tempo de percurso da onda ultra-sônica aquisitados em duas direções (com o sentido de polarização do transdutor alinhado com a direção longitudinal da barra e perpendicular a esta direção), com correlação cruzada e correlação / interpolação L4. Essas medidas foram realizadas na região central da barra no ponto C1, antes do carregamento, onde sua localização pode ser vista na figura 18.

Assim, são formados 5 pares de medidas de tempo em cada coluna da tabela abaixo. A diferença de tempo desses pares quando comparados entre si oscilam em 4ns na correlação cruzada, já na correlação com interpolação L 4 essa oscilação diminui para 2ns. Esses resultados mostram que as dispersões das medidas de tempo realizadas no mesmo ponto diminuíram com a interpolação melhorando sua resolução.

Tabela 5 – Processamento matemático dos tempos de percurso da onda ultra-sônica com correlação cruzada e correlação cruzada com interpolação

Pares ( $t_l - t_t$ )	Correlação (ns)	Correlação e Interpolação L4 (ns)
1	16	14
2	12	14
3	16	14
4	12	16
5	12	14

Foi Observado que uma variação de 4 ns, na correlação cruzada, entre as medidas de tempo realizadas no mesmo ponto provoca uma diferença de aproximadamente 1,4 entre os resultados de  $B_0$ . Já na correlação cruzada / interpolação L4 esse valor, em  $B_0$ , passa a ser 0,7.

A correlação cruzada com interpolação L4 representa um processamento matemático rápido e com boa resolução. A interpolação L 16 foi realizada nesse mesmo ponto, embora ela melhore a capacidade de resolução dos tempos medidos sua

utilização requer um tempo maior de processamento e não apresentou uma diferença significativa comparada com a correlação L4.

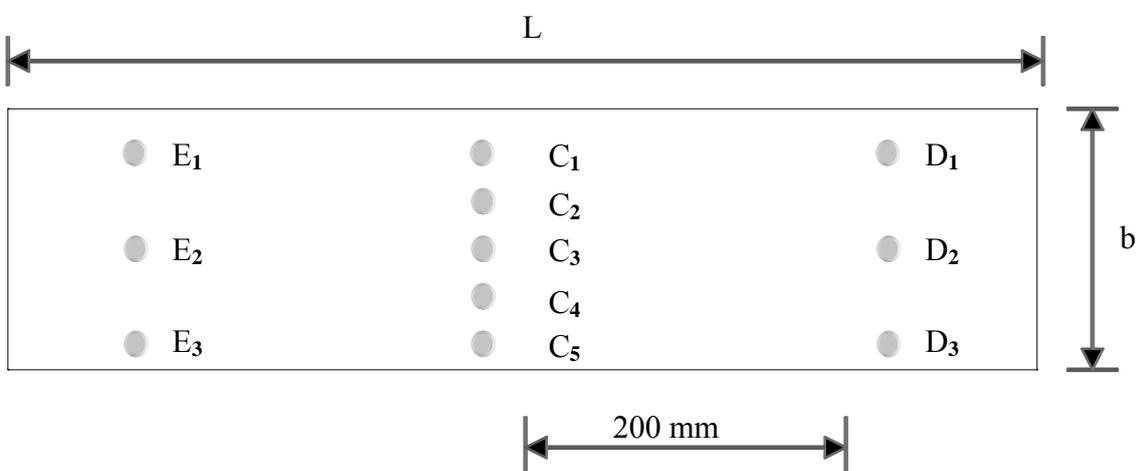
Os resultados dos tempos de percurso da onda ultra-sônica obtidos nos outros pontos da barra pode ser visto no anexo 1.

#### 4.3 – ANÁLISE DA TEXTURA DO MATERIAL ANTES DE SER SUBMETIDO À TENSÃO

Como foi visto, a textura do material provoca variações na medida do tempo na mesma ordem de grandeza que a tensão. A forma de minimizar essa influência na medida de tensão é conhecer o valor da textura por algum parâmetro. Neste trabalho, a anisotropia do material é avaliada através da birrefringência acústica ( $B_0$ ) (a equação 32 que já foi apresentada pode ser vista abaixo).

$$B = \frac{V_l - V_t}{\frac{V_l - V_t}{2}} = \frac{t_l - t_t}{\frac{t_l + t_t}{2}}$$

Esta anisotropia foi avaliada pontualmente nas marcações realizadas na barra (a figura que já foi apresentada neste trabalho está representada abaixo) onde foram posteriormente observados os efeitos da tensão pela mesma técnica da birrefringência acústica, sendo que no estado sob tensão é representada por B que é o resultado da anisotropia causada pelo efeito da tensão mais a anisotropia causada pelo efeito da textura.



O gráfico da figura 22 e a tabela 6, apresentam os valores da birrefringência calculados a partir dos tempos de percurso da onda ultra-sônica obtidos ao longo da espessura da barra nos respectivos pontos marcados, mostrados na figura acima.

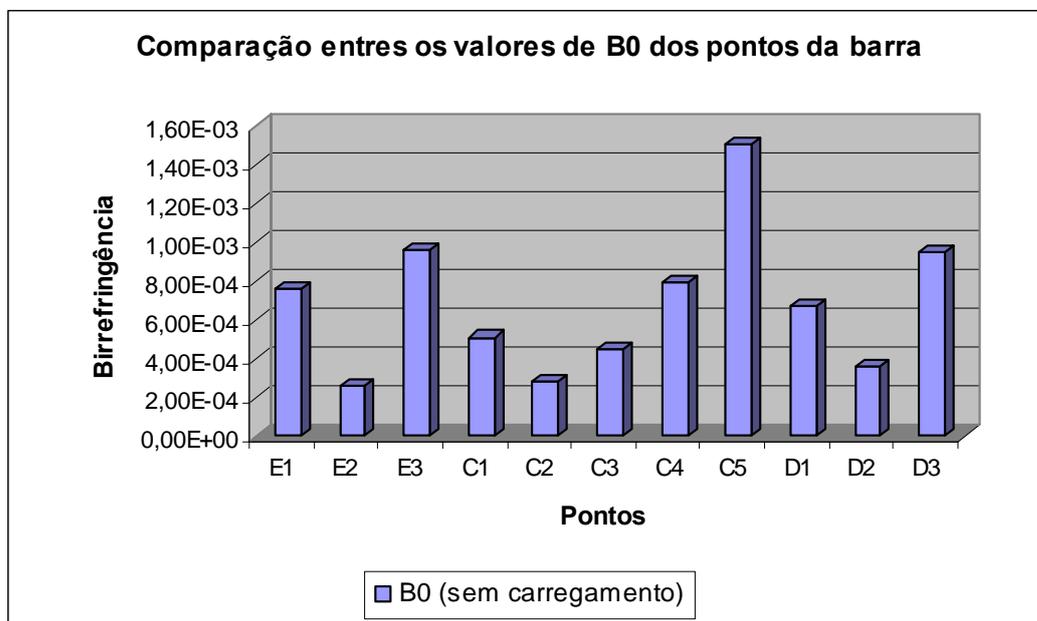


Figura 22 – Variação dos valores da birrefringência entre os pontos da barra

Os pontos analisados da barra apresentaram variações nos valores de  $B_0$ . Sabe-se que o material como recebido foi retirado de uma **chapa** que sofreu um processo de conformação mecânica de laminação, e que os laminadores passaram na superfície inferior e superior da chapa.

Quando o material é conformado as regiões mais próximas dos laminadores sofrem maiores deformações que as regiões mais afastadas. A técnica da birrefringência avaliou essas deformações por camadas como pode ser visto pelo gráfico da figura 22, onde os pontos mais próximos dos laminadores ( $E_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$  e  $E_3$ ,  $C_5$ ,  $D_3$ ) possuem maiores valores de  $B_0$  indicando haver nessas regiões um grau de anisotropia maior.

Os dados mostram que todos os valores da camada 3 (pontos  $E_3$ ,  $C_5$  e  $D_3$ ) são maiores que os valores da camada 1 (pontos  $E_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ ) e que essa tendência também é evidenciada quando são comparados os valores de  $B_0$  dos pontos  $C_4$  e  $C_1$  que pertencem a camadas diferentes.

Tabela 6 – Valores de  $B_0$  calculados pelos tempos obtidos nos respectivos pontos da barra

Pontos	$B_0$	desvio padrão
E1	7,6169504E-04	$\pm 1,79794E-05$
E2	2,5388988E-04	$\pm 6,70930E-05$
E3	9,5921710E-04	$\pm 7,05019E-05$
C1	5,1015388E-04	$\pm 2,12588E-05$
C2	2,8322655E-04	$\pm 5,00712E-05$
C3	4,5157300E-04	$\pm 2,37578E-05$
C4	7,9661120E-04	$\pm 1,57254E-04$
C5	1,5096268E-03	$\pm 2,74537E-05$
D1	6,7341736E-04	$\pm 1,32597E-05$
D2	3,5447918E-04	$\pm 1,22795E-05$
D3	9,4998378E-04	$\pm 3,20969E-05$

#### 4.3.1 – ABORDAGEM ESTATÍSTICA

O estudo estatístico foi utilizado para determinar se os valores médios de  $B_0$ , calculados a partir dos tempos de percurso da onda ultra-sônica, obtidos nos respectivos pontos do material podem ser considerados iguais.

Como a deformação ocorre por camadas, a análise estatística foi realizada através das possíveis combinações entre os valores médios de  $B_0$  obtidos nos pontos que pertencem à mesma camada, isto é, combinação entre os pontos da camada 1 (E<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>, D<sub>1</sub>), camada 2 (E<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, D<sub>2</sub>) e camada 3 (E<sub>3</sub>, C<sub>5</sub>, D<sub>3</sub>) e também entre as regiões mais próximas dos laminadores e que estão equidistantes da camada 2 (camada 1 e 3).

A hipótese nula,  $H_0$ , é utilizada para verificar se a média de dois resultados é igual, dentro de um determinado nível de confiança (ou grau de incerteza). Os valores

de  $B_0$  mostrados na figura 22 é o resultado da média de 5 valores calculados em função das medidas de tempo.

O estudo estatístico foi realizado no programa análise de dados do Microsoft Excel e o teste diferencia entre amostras com variâncias iguais e diferentes. As tabelas 7, 8 e 9, mostram os resultados do teste da hipótese nula para os pontos que apresentaram variâncias iguais entre os pontos que estão localizados na mesma camada. As tabela 10 e 11 apresentam os resultados da hipótese nula entre os pontos localizados na camada 1 e 3, para as médias de  $B_0$  que apresentaram variâncias iguais e diferentes. Os testes foram realizados com um nível de confiança de 95 % (ou incerteza de 5 %).

Tabela 7 – Teste de hipótese nula para as médias de  $B_0$  dos pontos da camada 1 considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t critico bi-caudal	Decisão
E1 / C1	10,987	2,306	Médias diferentes
E1 / D1	4,167	2,306	Médias diferentes
C1 / D1	9,035	2,306	Médias diferentes

Tabela 8 – Teste da hipótese nula para as médias de  $B_0$  dos pontos da camada 2 considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t critico bi-caudal	Decisão
E2 / C3	4,813	2,306	Médias diferentes
E2 / D2	1,487	2,306	Médias iguais
D2 / C3	4,786	2,306	Médias diferentes

Tabela 9 – Teste de hipótese nula para as médias de  $B_0$  entre os pontos da camada 3 considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t crítico bi-caudal	Decisão
E3 / C5	8,223	2,306	Médias diferentes
E3 / D3	0,145	2,306	Médias iguais
C5 / D3	15,790	2,306	Médias diferentes

Tabela 10 – Teste de hipótese nula para as médias de  $B_0$  entre os pontos da camada 1 e 3 considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t crítico bi-caudal	Decisão
E1 / C5	22,033	2,306	Médias diferentes
E1 / D3	6,874	2,306	Médias diferentes
C1 / C5	31,143	2,306	Médias diferentes
C1 / D3	17,551	2,306	Médias diferentes
D1 / C5	27,064	2,306	Médias diferentes
D1 / D3	11,764	2,306	Médias diferentes

Tabela 11 – Teste de hipótese nula para as médias de  $B_0$  entre os pontos da camada 1 e 3 considerando variâncias diferentes

Pontos	Sta t	t crítico bi-caudal	Decisão
C1 / E3	7,235	2,571	Médias diferentes
E1 / E3	3,133	2,571	Médias diferentes
D1 / E3	4,650	2,571	Médias diferentes

O resultado da hipótese nula foi rejeitado na comparação entre os valores médios de quase todos os pontos (exceto para os pontos E3 / D3 e E2 / D2), pois  $t_{\text{crítico}}$  foi menor que o Sta t. Desta forma, conclui-se que a probabilidade encontrada é menor que o nível de significância de 5 % indicando que os valores testados são diferentes.

Embora o número de pontos seja insuficiente para realizar uma análise sobre a homogeneidade do material, os valores obtidos no gráfico da figura 22 apresentam elevadas variações de  $B_0$ , quando comparados os valores da camada 2 com os da camadas 1 e 3. Estas variações permitem concluir, mesmo com poucos pontos analisados, que a barra é heterogênea entre essas camadas.

A análise estatística foi realizada entre os pontos localizados em uma mesma camada (tabelas 7, 8, 9). Os resultados mostram que os valores médios de  $B_0$  não podem ser considerados iguais, exceto entre os pontos  $E_2 / D_2$  e  $E_3 / D_3$ , levantando dúvidas sobre a homogeneidade do material por camadas.

O resultado da figura 22 mostrou que os valores de  $B_0$  na camada 3 são maiores que os da camadas 1. A análise estatística comprovou que esses valores são diferentes (tabela 10 e 11).

Esses dados são importantes pois a tensão obtida por cálculos teóricos considera o material isotrópico e homogêneo, o que na prática isso não acontece dificilmente é encontrado um material com essas características teóricas. Os resultados obtidos permitem concluir que o material é anisotrópico e heterogêneo, evidenciando diferenças entre a teoria e a prática.

#### 4.4 – AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ANISOTROPIA DO MATERIAL ANTES E DURANTE O CARREGAMENTO

##### 4.4.1 – INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO NA VARIAÇÃO DOS TEMPOS DE PERCURSO DA ONDA ULTRA-SÔNICA

Quando a barra é submetida à flexão surge um estado de tensão com regiões trativas e compressivas. Os resultados a seguir mostram as variações dos tempos de percurso da onda ultra-sônica antes e durante o carregamento para pontos localizados na região compressiva (pontos  $E_1$  e  $C_1$ ) e trativa (pontos  $E_3$  e  $C_5$ ), em duas direções perpendiculares. As tabelas 12, 13, 14 e 15 mostram os tempos obtidos nos pontos  $E_1$  e  $C_1$  (região compressiva) e as tabelas 16, 17, 18 e 19 são referentes aos tempos obtidos, nos pontos  $E_3$  e  $C_5$  (região trativa). A mesma abordagem podem ser observadas para os pontos  $D_1$  e  $D_3$  (ver tabelas dos anexos 1 e 2) que são simétricos aos pontos  $E_1$  e  $C_1$ .

Desta forma, em nível de comparação foram escolhidos pontos localizados nas regiões de maiores tensões ( $C_1$  e  $C_5$ ) onde a carga é aplicada e pontos mais afastados que possuem menores tensões ( $E_1$  e  $E_3$ ).

Tabela 12 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto  $E_1$  sem carregamento

Tempos de Bo (sem carregamento)	
Longitudinal	Transversal
2,83690E-05	2,83480E-05
2,83690E-05	2,83470E-05
2,83690E-05	2,83460E-05
2,83690E-05	2,83470E-05
2,83670E-05	2,83470E-05
Média	
2,83686E-05	2,83470E-05

Tabela 13 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto  $E_1$  com carregamento (região compressiva)

Tempos de B (com carregamento)	
Longitudinal	Transversal
2,83660E-05	2,83590E-05
2,83640E-05	2,83600E-05
2,83630E-05	2,83600E-05
2,83650E-05	2,83600E-05
2,83630E-05	2,83600E-05
Média	
2,83642E-05	2,83598E-05

Tabela 14 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto C<sub>1</sub> sem carregamento

Tempos de Bo (sem carga)	
Longitudinal	Transversal
2,82350E-05	2,82210E-05
2,82340E-05	2,82200E-05
2,82340E-05	2,82200E-05
2,82340E-05	2,82180E-05
2,82330E-05	2,82190E-05
Média	
2,82340E-05	2,82196E-05

Tabela 15 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto C<sub>1</sub> com carregamento

(região compressiva)	
Tempos de B (com carga)	
Longitudinal	Transversal
2,82250E-05	2,82380E-05
2,82250E-05	2,82400E-05
2,82240E-05	2,82390E-05
2,82200E-05	2,82380E-05
2,82220E-05	2,82370E-05
Média	
2,82232E-05	2,82384E-05

Tabela 16 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto E<sub>3</sub> sem carregamento

Tempos de Bo (sem carregamento)	
Longitudinal	Transversal
2,83770E-05	2,83440E-05
2,83690E-05	2,83430E-05
2,83660E-05	2,83420E-05
2,83670E-05	2,83430E-05
2,83700E-05	2,83410E-05
Médias	
2,83698E-05	2,83426E-05

Tabela 17 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto E<sub>3</sub> com carregamento

Tempos de B (com carregamento) (região tratativa)	
Longitudinal	Transversal
2,84040E-05	2,83540E-05
2,83540E-05	2,83520E-05
2,84050E-05	2,83550E-05
2,84050E-05	2,83520E-05
2,84050E-05	2,83530E-05
Médias	
2,83946E-05	2,83532E-05

Tabela 18 – Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto C<sub>5</sub> sem carregamento

Tempos de Bo (sem carregamento)	
Longitudinal	Transversal
2,82420E-05	2,81970E-05
2,82400E-05	2,81990E-05
2,82400E-05	2,81960E-05
2,82400E-05	2,81990E-05
2,82390E-05	2,81970E-05
Médias	
2,82402E-05	2,81976E-05

Tabela 19–Tempos de percurso da onda ultra-sônica no ponto C<sub>5</sub> com carregamento  
(região tratativa)

Tempos de B (com carregamento)	
Longitudinal	Transversal
2,82920E-05	2,82110E-05
2,82930E-05	2,82040E-05
2,82930E-05	2,82030E-05
2,82920E-05	2,82070E-05
2,82900E-05	2,82080E-05
Médias	
2,82920E-05	2,82066E-05

A comparação dos tempos aquisitados com a polarização do transdutor alinhado na direção longitudinal da barra antes e durante o carregamento na região compressiva (tabelas 12, 13) e trativa (tabelas 16, 17), indicam que na compressão o valor dos tempos medidos diminui em relação ao estado sem carga, e na região trativa aumenta. Nos pontos  $C_1$  (localizado na região compressiva) e  $C_5$  (localizado na região trativa) onde a distribuição de tensão é maior, região de aplicação da carga, esses resultados são mais evidenciados, com uma variação entre os valores médios (antes e durante o carregamento) de aproximadamente 10 ns no ponto  $C_1$  (ver tabelas 14, 15) e 50 ns no ponto  $C_5$  (ver tabelas 18, 19). Esses resultados parecem concordar com a referência [46], onde foram empregadas ondas longitudinais em uma barra sob flexão mostrando que velocidade (espaço / tempo) da onda na região compressiva é maior que na região trativa.

Do ponto de vista teórico, como a propagação da onda se faz por meio de átomos e moléculas, quando o material é comprimido os átomos das fibras longitudinais, que possui um estado de tensão maior que na direção transversal, se aproximam facilitando a propagação da onda ocasionando em um tempo de percurso menor. Já no estado trativo ocorre o inverso, isto é, os átomos se afastam dificultando a propagação da onda.

Devido ao fato de que durante a flexão as tensões geradas na direção longitudinal são maiores que as tensões geradas na direção transversal, esperava-se que houvesse maior variação no tempo de percurso da onda ultra-sônica aquisitados na direção de maior tensão (direção longitudinal). Porém, os resultados mostram que as maiores variações de tempo no regime compressivo ocorrem na direção transversal e que pode ser um indício que as tensões geradas na direção longitudinal podem estar influenciando na mobilidade dos átomos na direção transversal. A diferença das médias dos tempos ( $t_L - t_T$ ) de  $B_0$  que era de aproximadamente 22 ns diminui para 4 ns quando o material é carregado (B) ( ver tabelas 12 e 13), e que esta variação é motivada diretamente pelos tempos medidos na direção transversal que varia em 13 ns do estado sem carga para o estado com carregamento enquanto na direção longitudinal essa variação é de aproximadamente 4 ns. O mesmo pode ser visto na tabela 14 e 15 (para o ponto  $C_1$ ). A situação inversa ocorre na região trativa, onde a diferença dos tempos ( $t_L - t_T$ ) são mais influenciadas pelos tempos aquisitados na direção longitudinal (ver tabelas 16, 17, 18 e 19).

Os resultados dos tempos de percurso da onda ultra-sônica realizada nos outros pontos da barra durante o carregamento encontram-se no anexo 2.

#### 4.4.2 – ESTUDO DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA ANTES E DURANTE O ENSAIO DE FLEXÃO

Os resultados dos valores de B, calculados a partir dos tempos obtidos durante o carregamento podem ser vistos na tabela 20. As figuras 23, 24 e 25 apresentam a distribuição da birrefringência, calculada a partir das medidas de tempo, realizadas em todos os pontos marcados sobre a barra.

Essas figuras, que mostram a distribuição da anisotropia do material em relação ao comportamento ultra-sônico, são expressas por gráficos de barra o que permite uma visualização do comportamento ao longo dos pontos medidos no material, antes e durante o ensaio de flexão. As barras em azul representam a birrefringência do material antes do carregamento e as barras em vermelho durante o ensaio de flexão.

Tabela 20 – Valores de B calculados a partir dos tempos aquisitados durante o carregamento

Pontos	B	Desvio padrão de B
E1	1,3221933E-04	± 2,17334E-05
E2	1,0571010E-04	± 1,86447E-05
E3	1,7971368E-03	± 3,58118E-04
C1	-5,3842072E-04	± 3,88091E-05
C2	-3,5409562E-04	± 1,58384E-05
C3	4,9544044E-04	± 4,36259E-05
C4	1,3022550E-03	± 6,13233E-05
C5	3,0230882E-03	± 5,44425E-05
D1	1,4174010E-04	± 3,04831E-05
D2	4,1797054E-04	± 2,24056E-05
D3	1,6432696E-03	± 2,24115E-05

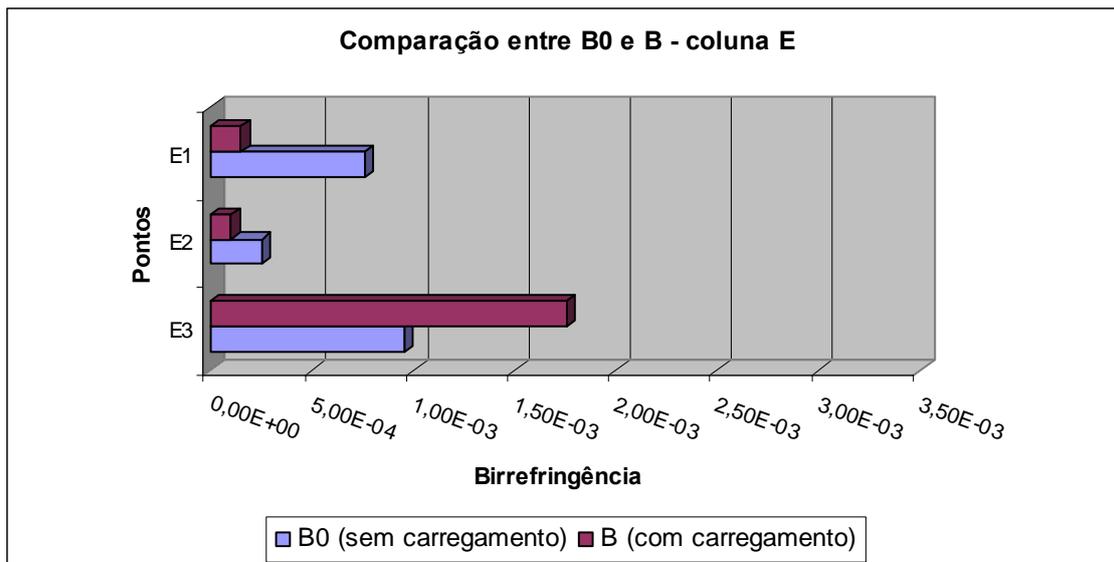


Figura 23 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

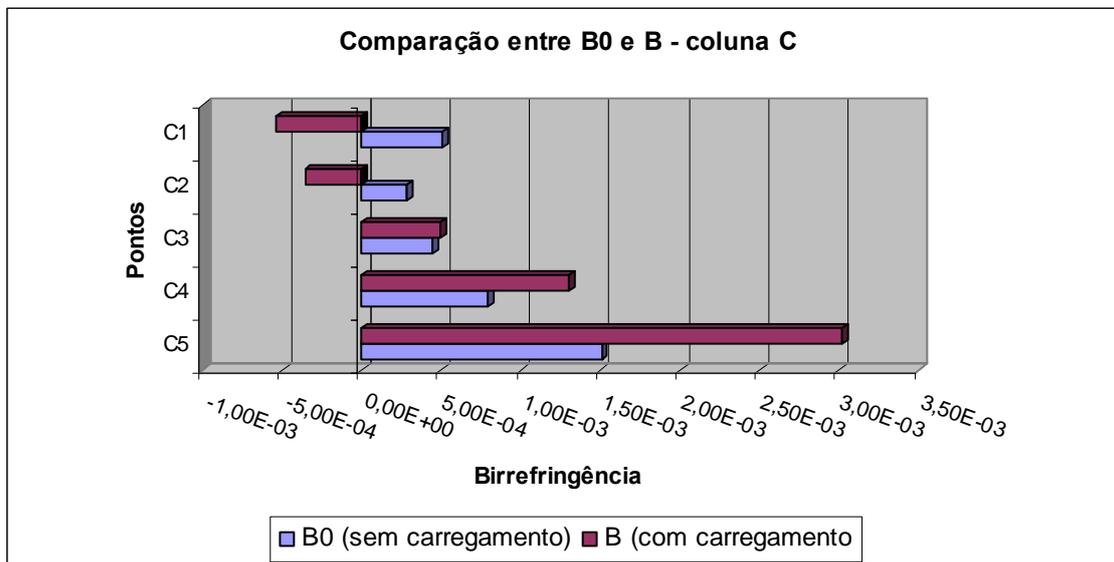


Figura 24 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

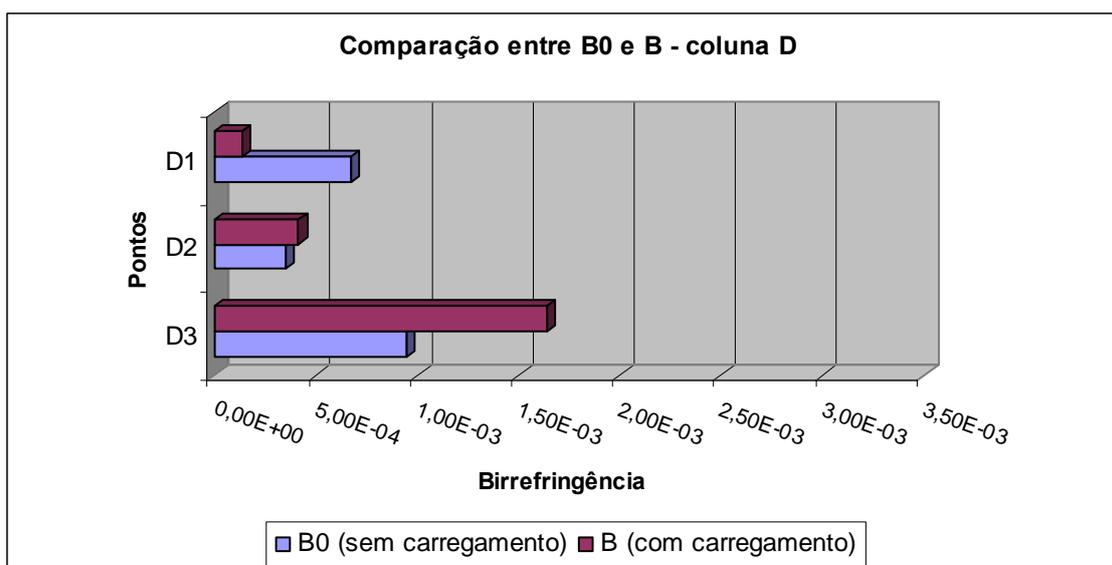


Figura 25 – Comparação entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento

As figuras 23, 24 e 25 mostram que durante o carregamento os pontos localizados acima e abaixo da superfície neutra (pontos E<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e D<sub>2</sub>), apresentam uma influência nos valores da birrefringência completamente diferentes. Nos pontos acima da superfície neutra 2, ocorre uma diminuição da birrefringência e abaixo esses valores aumentam. Pode ser notado também que na coluna C (pontos C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub>), as variações de B em relação à B<sub>0</sub> são mais acentuadas, quando comparadas com as variações ocorridas nas regiões equidistantes da coluna C (coluna E, e coluna D).

Quando a barra é submetida à flexão são geradas regiões compressivas e trativas. Os resultados mostram que a técnica da birrefringência acústica é capaz de diferenciar esses estados de tensão, isto é, durante o carregamento B tende a assumir valores negativos na região compressiva, e positivos na região trativa (ver figura 23, 24 e 25). Essa tendência está relacionada com a influência da distribuição de tensões na variação dos tempos adquiridos nas duas direções perpendiculares. Foi visto na seção anterior, que na compressão o tempo de percurso da onda ultra-sônica aumenta na direção transversal e diminui na direção longitudinal, assim, o resultado da diferença ( $t_l - t_t$ ) tende a ficar negativo. Já na região trativa o tempo de percurso da onda ultra-sônica aumenta nas duas direções, porém na direção longitudinal a variação do tempo é bem maior que na direção transversal, resultando em uma diferença de ( $t_l - t_t$ ) positiva. Na região de aplicação da carga (ver figura 24), onde há maior influência da tensão sobre os tempos de percurso da onda, as variações de B em relação à B<sub>0</sub> são maiores que nas

regiões equidistante (ver figura 23 e 25). Esses resultados estão de acordo com a teoria da resistência dos materiais, onde as regiões mais próximas do ponto de aplicação da carga possuem maiores tensões [5].

As figuras dos gráficos 26, 27 e 28 apresentam os valores de  $B - B_0$ , entre as regiões compressivas e trativas. Quando é realizada a diferença de  $B - B_0$ , indica que esta sendo retirado o efeito da textura, ficando apenas o valor da anisotropia referente à tensão aplicada.

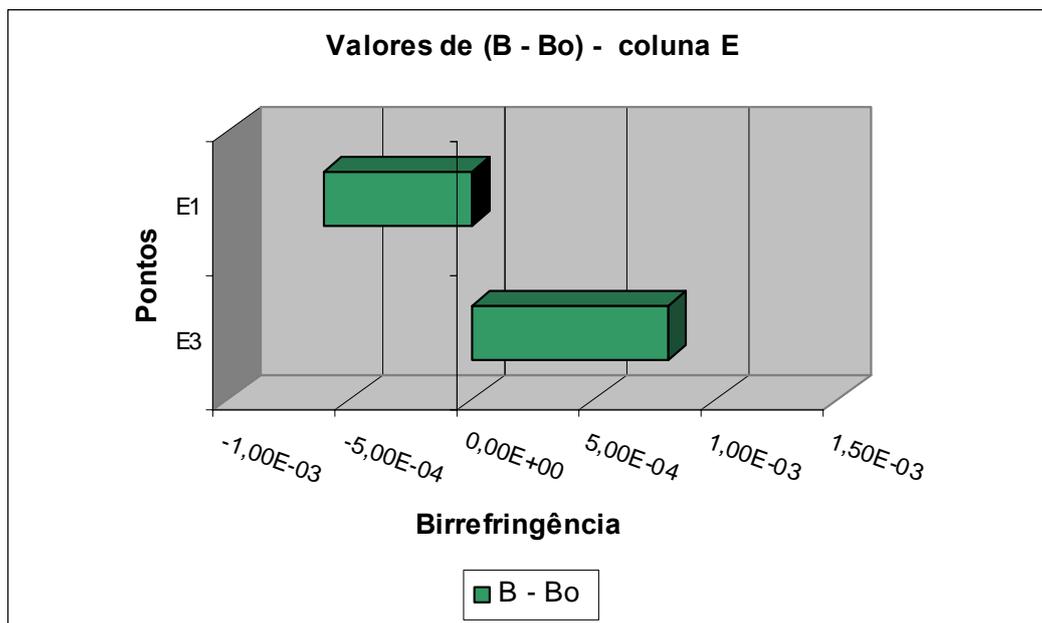


Figura 26 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento nos pontos da coluna E

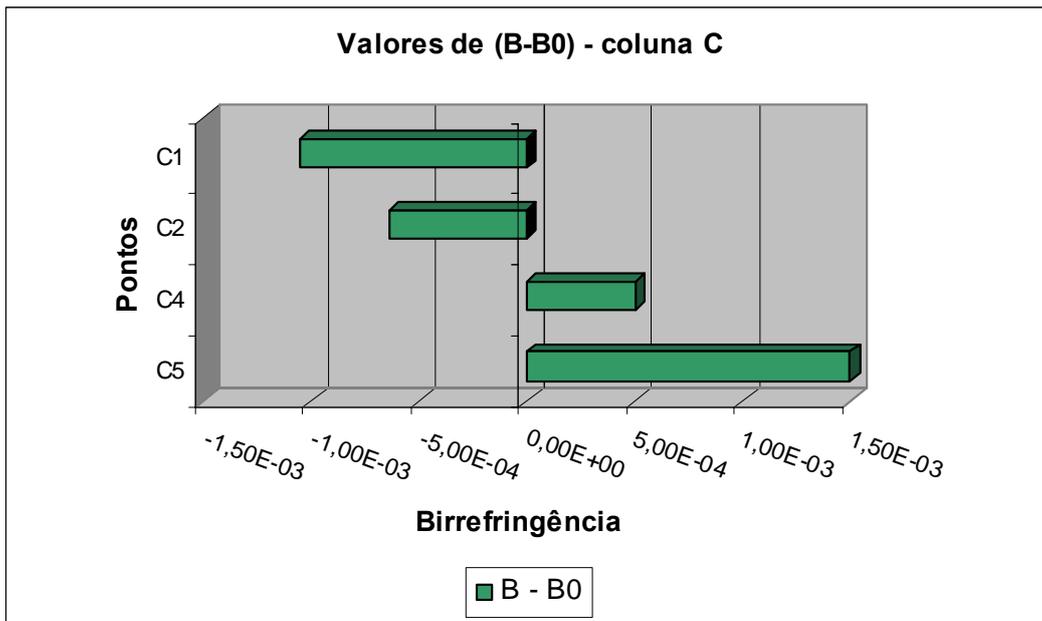


Figura 27 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento nos pontos da coluna C

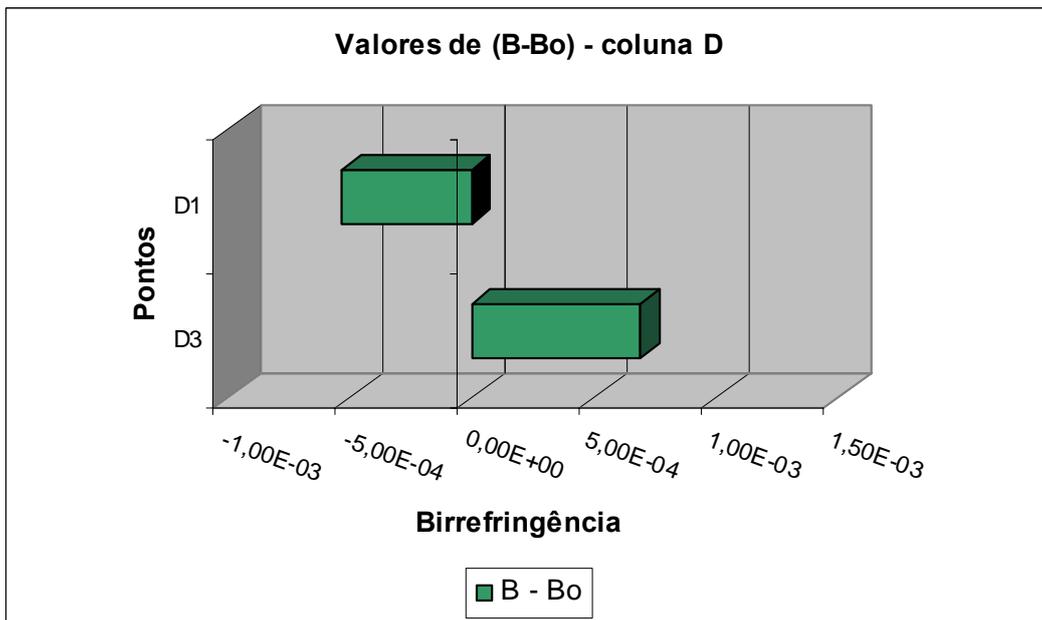


Figura 28 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento nos pontos da coluna D

A técnica da birrefringência acústica mostrou-se eficaz na determinação das regiões compressivas e trativas para um material submetido a um estado de tensões. Na prática muitas vezes é desejável saber se um componente estrutural encontra-se no regime trativo, pois esse estado de tensão é o maior responsável pelo colapso prematuro dos materiais em geral, com a propagação de trincas.

No presente trabalho, durante o carregamento não foi possível observar visualmente a flexão da barra o que permitiria distinguir a região compressiva e trativa. Porém, por se tratar de uma barra submetida à flexão, carregada em seu ponto central, já havia um conhecimento prévio dessas duas regiões confirmadas pela técnica da birrefringência acústica. Em diversas situações na prática também é difícil diferenciar visualmente, assim como, ter um conhecimento prévio dessas duas regiões. Essas situações ocorrem em componentes de aço estrutural submetidos a diversos esforços simultâneos e também em dutos instalados em terrenos geologicamente instáveis, cujas movimentações lentas do solo não são percebidas visualmente.

Os tempos de percurso da onda ultra-sônica foram obtidos com a direção de polarização do transdutor alinhado com a direção longitudinal (eixo  $x$ ) da barra, e perpendicular a esta direção (eixo  $y$ ). Este procedimento foi realizado na barra antes e durante o carregamento, porém quando a barra é fletida, há uma rotação dos eixos de simetria e um novo sistema de coordenadas se estabelece ( $x'$  e  $y'$ ) surgindo direções principais [5].

Quando a onda ultra-sônica é incidida, em um material submetido à tensão, fora das direções principais ela é refratada formando duas componentes de onda com diferentes ângulos de polarização. A diferença de fase entre as componentes de onda podem interferir nas medidas de tempo quando não são polarizadas nas direções principais [13].

As direções principais foram calculadas teoricamente, utilizando o círculo de Mohr, pelas equações 18 e 21. Os cálculos apresentaram valores entre 3 e 7 graus nos pontos equidistantes da superfície neutra. Como esses ângulos em relação aos eixos de simetria do material antes de ser submetido ao carregamento provoca uma pequena diferença de fase entre as ondas refratas [13], optou-se por não girar o transdutor para as direções principais. Em aspectos práticos essa variação angular pode ser um erro do próprio operador durante o acoplamento do transdutor. Já na superfície neutra as direções principais de tensão encontram-se a 45 graus em relação ao eixo de simetria da barra (direções  $x$  e  $y$ ) antes do carregamento. Nestes pontos foram realizadas medidas

do tempo de percurso da onda ultra-sônica com o transdutor girado a 45 graus (direções  $x'$  e  $y'$ ).

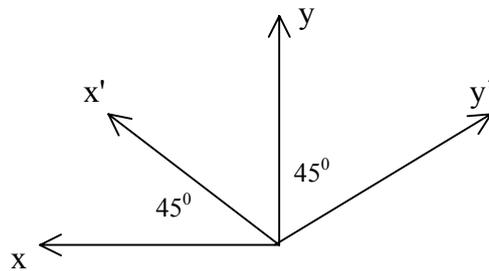


Figura 29 – Rotação dos eixos de simetria da barra durante o ensaio de flexão para os pontos localizados na superfície neutra.

O gráfico da figura 25 mostra os resultados de  $B$  (45 graus) –  $B_0$ . Os valores de  $B$  (45 graus) foram calculados pelos tempos aquisitados com a direção de polarização do transdutor alinhado nas direções  $x'$  e  $y'$  e os valores de  $B_0$  na direção  $x$  e  $y$ .

Na teoria os valores das tensões obtidas na superfície neutra devem ser iguais, para que esta condição seja alcançada experimentalmente os valores de  $B$  (45 graus) –  $B_0$  que representam os valores da anisotropia causada somente pelo efeito da tensão devem ser próximos. Os resultados mostram que os valores obtidos nos pontos da superfície neutra são bem diferentes (ver figura 30), evidenciando que não foi possível encontrar as direções principais na prática através das direções calculadas pela teoria.

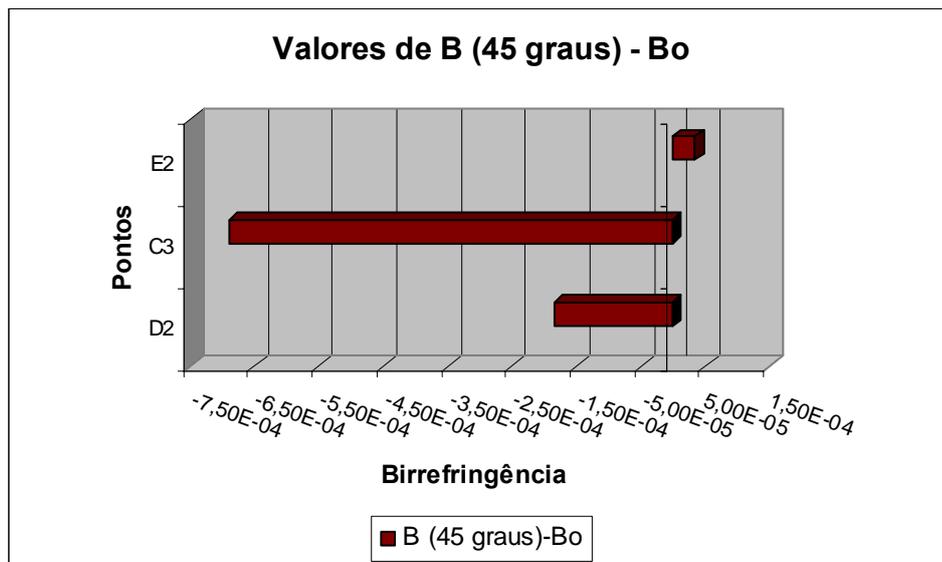


Figura 30 – Diferença entre os valores da birrefringência antes e durante o carregamento nos pontos da coluna C

#### 4.4.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA OS VALORES DE $B - B_0$

Foi realizado um estudo para analisar se os valores da anisotropia do material ocasionados somente pelo efeito da tensão aplicada ( $B - B_0$ ) podem ser considerados iguais estatisticamente. Para um material homogêneo e isotrópico os valores da tensão obtidos nas regiões que estão simétricas do ponto de aplicação da carga são iguais, assim como os valores que estão equidistantes da superfície neutra.

As tabelas 21, 22 apresentam o teste estatístico da hipótese nula para os pontos localizados simetricamente em relação à região de aplicação da carga (comparação entre os pontos  $E_1 / D_1$ ,  $E_2 / D_2$  e  $E_3 / D_3$ ), para os valores médios que apresentaram variâncias iguais e diferentes. Na tabela 23 e 24, são mostrados os mesmos testes para os pontos que estão equidistantes da superfície neutra (comparação entre as possíveis combinações entre os pontos  $E_1, D_2, E_3, D_3$  e comparação entre os pontos  $C_1 / C_5$  e  $C_2 / C_4$ ).

Tabela 21 – Teste da hipótese nula para as médias de  $B - B_0$  dos pontos simétricos a região de aplicação da carga considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t critico bi-caudal	Decisão
$E_1 / D_1$	2,081	2,306	Médias iguais
$E_2 / D_2$	6,482	2,306	Médias diferentes

Tabela 22 – Teste da hipótese nula para as médias de  $B - B_0$  dos pontos simétricos à região de aplicação da carga considerando variâncias diferentes

Pontos	Sta t	t critico bi-caudal	Decisão
$E_3 / D_3$	2,0257	2,776	Médias iguais

Tabela 23 – Teste da hipótese nula para as médias de  $B - B_0$  dos pontos equidistantes da superfície neutra considerando variâncias iguais

Pontos	Sta t	t crítico bi-caudal	Decisão
E1 / E3	18,551	2,306	Médias diferentes
E1 / D3	35,122	2,306	Médias diferentes
D1 / D3	67,801	2,306	Médias diferentes
C1 / C5	29,518	2,306	Médias diferentes
C2 / C4	19,3534	2,306	Médias diferentes

Tabela 24 – Teste da hipótese nula para as médias de  $B - B_0$  dos pontos equidistantes da superfície neutra considerando variâncias diferentes

Pontos	Sta t	t crítico bi-caudal	Decisão
D1 / E3	19,331	2,776	Médias diferentes

Os resultados das tabelas 21 e 22 mostram que os valores médios de  $B - B_0$  obtidos nos pontos  $E_1 / D_1$  e  $E_3 / D_3$  podem ser considerados iguais estatisticamente. Já os valores obtidos nos pontos  $E_2 / D_2$  não apresentaram essa igualdade, assim como os valores da tabela 23 e 24.

Foi observado que os pontos localizados na mesma camada e que estão simétricos à região de aplicação da carga possuem valores médios de  $B - B_0$  iguais estatisticamente. Exceto o ponto  $E_2 / D_2$  que não deve ser levado em consideração, pois era esperado um erro na avaliação das tensões realizadas nos pontos localizados na superfície neutra.

A tabela 21 mostra que os valores médios de  $B - B_0$  localizados nos pontos  $E_1 / D_1$  que não eram considerados iguais estatisticamente na avaliação de  $B_0$  (ver tabela 7), passaram a ser iguais na avaliação da anisotropia causada somente pelo efeito da tensão aplicada. O mesmo era esperado nos resultados da tabela 23, porém a análise estatística mostrou que os valores médios de  $B_0$  são diferentes entre todos os pontos comparados das camadas 1 e 3.

Supõe-se que mesmo que pontualmente esteja sendo analisado somente o efeito da anisotropia causada pela tensão ( $B - B_0$ ), a heterogeneidade do material entre o espaço de um ponto e outro, pode estar influenciando na distribuição de tensão, pois foi observado pela figura 20 que os valores de  $B_0$  (imposta pela textura) entre as camadas possuem variações acentuadas.

#### 4.5 – TENSÕES OBTIDAS POR CÁLCULOS TEÓRICOS E POR ULTRA - SOM

##### 4.5.1 – CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA

Para realizar uma análise quantitativa dos valores da tensão obtidos pela técnica da birrefringência foi necessário realizar o levantamento da constante acustoelástica.

O material apresentou variações na anisotropia causada pela textura, porém a constante acustoelástica independe dessa anisotropia. Bittencourt [11] relacionou os valores da birrefringência às tensões aplicadas, durante o ensaio de tração, para medidas de tempo feitas em corpos-de-prova com transdutores em diferentes frequências, e obteve retas paralelas mostrando que a constante acustoelástica independe da frequência do transdutor e da anisotropia inicial imposta pela textura do material, pois a constante é obtida pelo coeficiente angular da reta.

Neste trabalho, um corpo-de-prova retirado da barra foi comprimido uniaxialmente. As medidas ultra-sônicas foram executadas na região central da amostra com a direção de polarização do transdutor perpendicular à direção de carregamento e paralela a esta direção. A figura 31 mostra os valores da birrefringência relacionados às tensões e a constante acustoelástica obtida pelo coeficiente angular da reta ( $6,2677 \cdot 10^{-4}$ ).

A figura 32 apresenta o comportamento do tempo de percurso da onda ultra-sônica em função da tensão para as duas direções ortogonais. Os tempos aquisitados na direção longitudinal foram obtidos com a polarização do transdutor perpendicular ao carregamento (pontos vermelhos do gráfico), e os tempos medidos na transversal com a direção de polarização do transdutor paralela ao carregamento (pontos azuis do gráfico). Os resultados mostram que antes do carregamento as medidas dos tempos adquiridas na direção longitudinal são maiores que os tempos aquisitados na direção transversal, e que durante o carregamento os tempos obtidos na direção transversal diminuem e possuem

uma tendência linear. Na direção perpendicular ao carregamento os tempos não variam muito em relação a diferentes carregamentos.

Observe que durante a compressão do corpo-de-prova, para obter a constante acustoelástica, os valores da birrefringência acústica aumentam e durante o ensaio de flexão, na barra, as regiões compressivas apresentam uma diminuição dos valores de B (ver figuras 26, 27 e 28). A posição do transdutor para as medidas de tempo foi mantida a mesma para os dois tipos de carregamento, isto é, com a direção de polarização do transdutor alinhado com a direção longitudinal e perpendicular a esta direção. Porém, no corpo-de-prova o carregamento é realizado na direção transversal, e na barra as maiores tensões são produzidas na direção longitudinal. Sendo assim, no corpo-de-prova os tempos medidos na direção transversal diminuem e na barra essa variação ocorre na direção longitudinal, explicando esse comportamento diferenciado em B (aumenta no corpo-de-prova e diminui na região compressiva da barra), que é calculado pela diferença fracional das medidas de tempo ( $t_l - t_t / t_{\text{médio}}$ ).

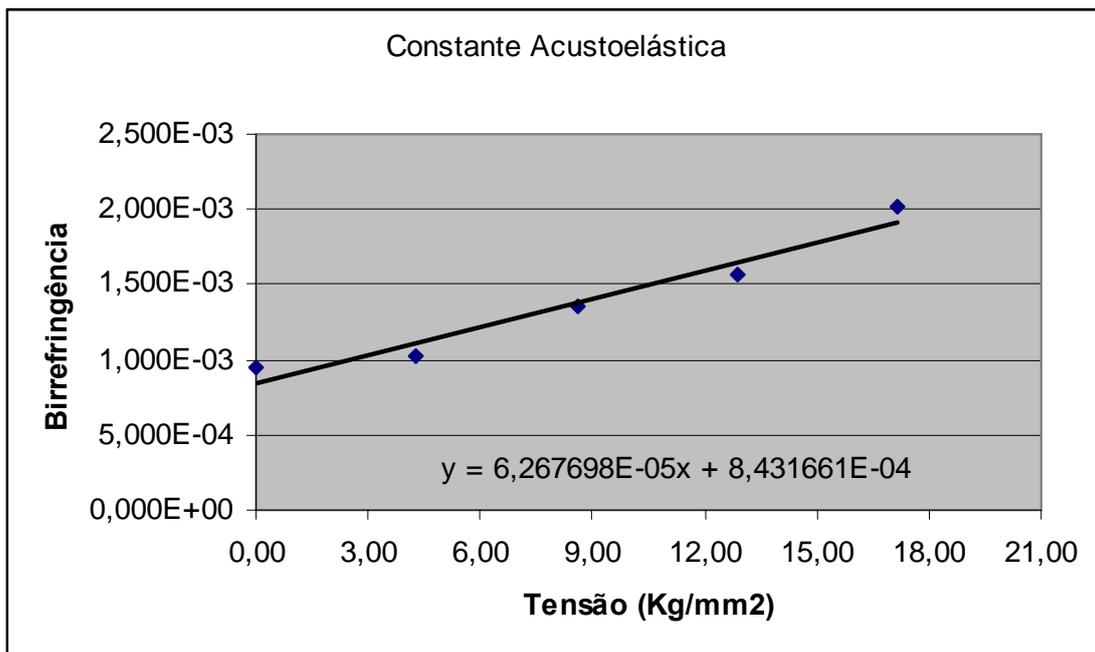


Figura 31 – Constante Acustoelástica obtida pelo coeficiente angular durante o ensaio de compressão realizada no corpo-de-prova retirado da barra

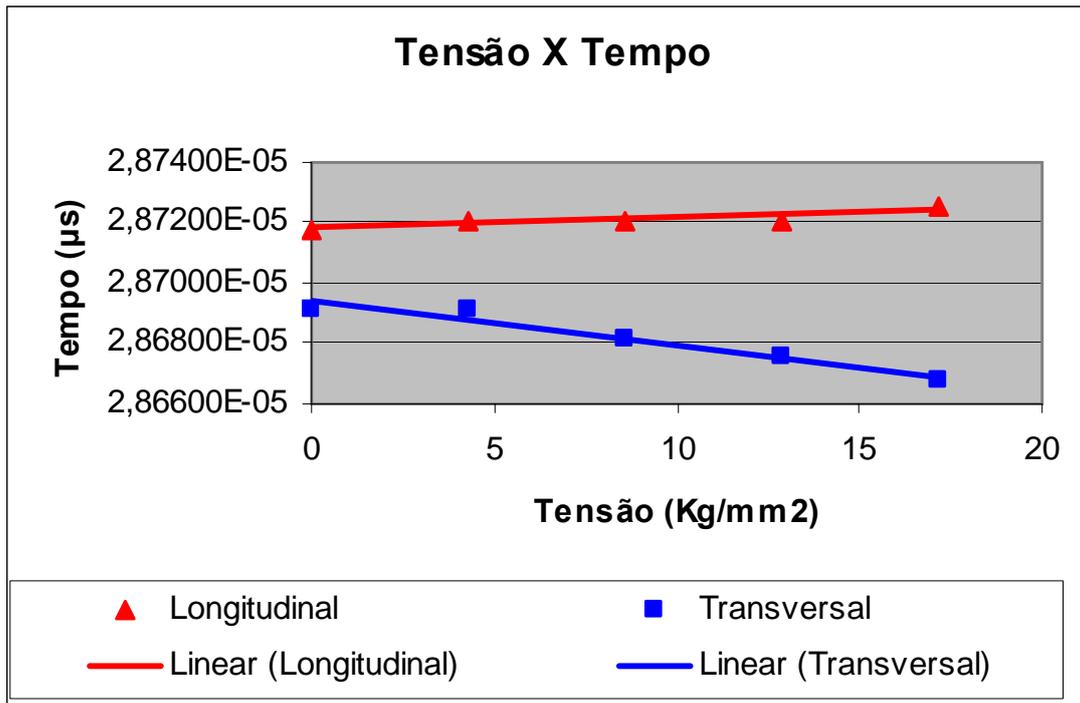


Figura 32 – Comportamento do tempo de percurso da onda ultra-sônica em função da tensão para as duas direções ortogonais

#### 4.5.2 – TENSÕES OBTIDAS PELA TÉCNICA DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA

Foi observado, que a técnica da birrefringência acústica é capaz de avaliar tensões de forma qualitativa, mostrando as regiões de maiores tensões e diferenciando o regime trativo e compressivo durante o ensaio de flexão.

Para analisar a tensão aplicada de forma quantitativa, utilizou-se a equação da birrefringência considerando nulas as tensões cisalhantes, expressa pela equação 34 já apresentada anteriormente e mostrada abaixo.

$$B = B_0 + m (\sigma_1 - \sigma_2)$$

Os valores de B, B<sub>0</sub> e m já foram analisados e as tensões obtidas são mostradas na tabela 25, assim como, os valores de B – B<sub>0</sub>.

A equação 34 é utilizada para as medidas de tensão realizadas nas direções principais. Os valores de B<sub>0</sub> foram calculados com as medidas de tempo tomadas nas

direções de simetria do material, porém quando a barra é submetida à flexão há uma rotação dos eixos de simetria e um novo sistema coordenado se estabelece surgindo direções principais.

Como B foi calculado a partir dos tempos obtidos com a onda ultra-sônica incidindo fora das direções principais, isto é, na direção de simetria do material antes do carregamento, haverá um erro nas tensões obtidas pela técnica da birrefringência acústica. É esperado um erro maior nos pontos localizados na superfície neutra (E<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> e D<sub>2</sub>), pois nestes pontos as tensões cisalhantes são máximas e possuem a maior variação angular entre a direção de polarização da onda e as direções principais [11].

A técnica da birrefringência acústica fornece uma equação quando a direção de simetria do material não está alinhada com as direções de polarização da onda [10, 11], entretanto sua utilização prática é mais complicada. Pretende-se quantificar o erro experimental comparando esses dados com as tensões obtidas por cálculos teóricos.

Tabela 25 – Tensões obtidas pela técnica da birrefringência acústica

Pontos	B – B <sub>0</sub>	Desvio Padrão	$\sigma_1 - \sigma_2$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	Desvio Padrão
E1	6,066E-04	7,645E-05	-9,68	1,220
E2	-2,351E-04	6,870E-05	-3,75	1,096
E3	8,379E-04	1,564E-04	13,37	2,496
C1	1,049E-03	9,241E-05	-16,73	1,474
C2	6,302E-04	6,335E-05	-10,05	1,011
C3	4,209E-05	1,130E-04	0,67	1,804
C4	5,163E-04	1,163E-04	8,24	1,856
C5	1,513E-03	1,707E-04	24,15	2,723
D1	5,317E-04	2,506E-05	-8,48	0,400
D2	6,349E-05	5,823E-05	1,01	0,929
D3	6,933E-04	3,169E-05	11,06	0,506

Os valores das tensões mostradas nos pontos E<sub>1</sub>, E<sub>3</sub>, D<sub>1</sub> e D<sub>3</sub> devem ser próximos considerando sua simetria em relação à região de aplicação da carga. A maior e menor variação apresentada entre esses valores foi de aproximadamente 5 Kg/mm<sup>2</sup> (E<sub>3</sub> – D<sub>1</sub>), e 1 Kg/mm<sup>2</sup> (E<sub>1</sub> – D<sub>1</sub>). Observe que no ponto E<sub>3</sub> há uma dispersão dos valores de B – B<sub>0</sub> em relação a sua média (desvio padrão) maior que nos outros pontos podendo estar

associado a um erro experimental. O mesmo pode ser observado no ponto  $C_5$ , quando comparado com o valor mostrado no ponto  $C_1$ .

Foi verificado na avaliação de  $B_0$  (ver figura 22) que os valores obtidos na camada 3 (pontos  $E_3$ ,  $C_5$  e  $D_3$ ) são maiores que os calculados na camada 1 ( $E_1$ ,  $C_1$  e  $D_1$ ), e que após realizar a diferença  $B - B_0$  o mesmo comportamento é verificado (ver figuras 26, 27 e 28), porém de forma menos acentuada pois os resultados da tabela 25 informam as tensões obtidas nos pontos sem a influencia da anisotropia causada pela textura. Sendo assim, é levantada a hipótese que a heterogeneidade da barra, entre os pontos medidos, podem estar influenciando na distribuição das tensões.

Na camada 2 ( $E_2$ ,  $C_3$  e  $D_2$ ), embora os resultados não apresentem uma variação considerável aparentemente, é verificado que as dispersões dos valores no ponto  $C_3$  é maior que o valor médio. A tabela 26 mostra a diferença de  $B - B_0$  dos cinco valores obtidos que fornecem a media desse ponto.

Tabela 26 – Valores da anisotropia causada pela tensão aplicada no ponto  $C_3$  da barra.

Medidas	B - B <sub>0</sub>
1	17,66E-05
2	-3,582E-05
3	10,59E-05
4	7,039E-05
5	-10,65E-05

Os valores mostrados nessa tabela mostram a influência quando a polarização da onda não esta alinhada com a direção principal do material. Os resultados além de apresentarem grandes diferenças entre uma medida e outra (em valor absoluto), também mostra a troca de sinal.

Foi comentado que quando a onda incide no material fora das direções principais, ela é refratada em duas ondas e a diferença de fase dessas ondas interferem nas medidas de tempo. Como a variação angular entre a polarização da onda e as direções principais, é de aproximadamente 45 graus, nesse ponto, pode estar ocorrendo uma interferência destrutiva dessas duas ondas. Esse comportamento permitiu concluir que essa interferência ocorre nas medidas de tempo realizadas durante o carregamento da barra, provocando alguns valores de  $B$  menores que  $B_0$ . Essa discussão serve para os

outros pontos da camada 2, pois o desvio padrão é considerado muito altos comparando com o valor médio de  $B - B_0$ .

#### 4.5.3 – TENSÕES OBTIDAS PELA RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

As equações 16, 17, 19 e 20 utilizadas para calcular as tensões teóricas obtidas pela resistência dos materiais já foram apresentadas e podem ser vistas abaixo [5].

Para  $0 < x < L/2$

$$\sigma_I(x, y) = \frac{-3Pxy}{bh^3} + \sqrt{\left(\frac{3Pxy}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2}$$

$$\sigma_{II}(x, y) = \frac{3Pxy}{bh^3} - \sqrt{\left(\frac{3Pxy}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2}$$

Para  $L/2 < x < L$

$$\sigma_I(x, y) = \frac{-3P(L-x)y}{bh^3} + \sqrt{\left(\frac{3P(L-x)y}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{-3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2}$$

$$\sigma_{II}(x, y) = \frac{-3P(L-x)y}{bh^3} - \sqrt{\left(\frac{3P(L-x)y}{bh^3}\right)^2 + \left[\frac{-3P}{bh^3}\left(\frac{h^2}{4} - y^2\right)\right]^2}$$

Onde  $P$  é a carga em que o material foi submetido,  $L$  a distancia entre os apoios,  $h$  a altura da barra,  $b$  a espessura e  $x$  e  $y$  as coordenadas dos pontos onde serão realizados os cálculos. As tabelas 27 e 28 apresentam esses valores.

Tabela 27 – Carregamento e dimensionamento da barra

P (kg)	L (mm <sup>2</sup> )	h (mm <sup>2</sup> )	b (mm <sup>2</sup> )
8000	827	93	46,6

Tabela 28 – localização dos pontos na barra

Pontos	Coordenadas (x, y)
E1	(214, -35)
E2	(214, 0)
E3	(214, 35)
C1	(414, -35)
C2	(414, -17,5)
C3	(414, 0)
C4	(414, 35)
C5	(414, 17,5)
D1	(614, -35)
D2	(614, 0)
D3	(614, -35)

A carga aplicada representa 80 % do limite de escoamento do material e a origem dos eixos coordenados foram tomados no meio da altura da barra de uma das extremidades da barra, com a direção positiva de y adotada para baixo.

A partir desses dados foi possível calcular as tensões principais utilizando as equações 16, 17 18 e 19. Os resultados de  $\sigma_1 - \sigma_2$  podem ser vistos na tabela 29.

Tabela 29 – Tensões obtidas por cálculos teóricos

Pontos	$\sigma_1 - \sigma_2$ (kgf / mm <sup>2</sup> )
E1	- 9,59
E2	2,79
E3	9,59
C1	- 18,55
C2	- 9,20
C3	2,79
C4	9,20
C5	18,55
D1	- 9,59
D2	2,79
D3	9,59

Esses cálculos foram baseados supondo material homogêneo e isotrópico. Na prática essas condições raramente são encontradas, como foi verificado no caso da barra utilizada neste trabalho, pois os materiais estruturais passam por processos mecânicos que causam anisotropia no material.

#### 4.5.4 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

A tabela 30 mostra as tensões teóricas e experimentais, nas regiões compressivas e trativas, com a diferença desses valores em termos percentuais considerando os resultados teóricos como referência.

Tabela 30 – Erro percentual dos valores da tensão experimental  $\sigma_1 - \sigma_2$  em relação aos resultados teóricos para os pontos localizados na região trativa e compressiva

Pontos	$\sigma_{\text{Teórica}}$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{\text{Experimental}}$ (Kg / mm <sup>2</sup> )	(%)
E1	-9,59	-9,68	1
E3	9,59	13,37	39
C1	-18,55	-16,73	10
C2	-9,20	-10,05	9
C4	9,20	8,24	10
C5	18,55	24,15	30
D1	-9,59	-8,48	12
D3	9,59	11,06	15

É observado que os maiores erros percentuais ocorreram nas regiões sob regime trativo, chegando a 39 % no ponto E<sub>3</sub>. Foi visto na seção 4.5.2 que os pontos E<sub>3</sub> e C<sub>5</sub>, podem estar sujeitos a erro experimental. Na região compressiva há uma variação entre 1 e 12 % (pontos E<sub>1</sub> e D<sub>1</sub>).

Considerando que a equação da birrefringência, adotada neste trabalho, é adequada para as condições em que as direções de simetria do material coincidem com as direções principais, o que não ocorreu nas medidas realizadas durante o carregamento, pode-se dizer pelos resultados obtidos que para regiões onde as direções principais estão “levemente” fora do eixo de simetria que a equação pode ser utilizada para medir tensão com um erro percentual médio de aproximadamente 15 % (incluindo os prováveis erros experimentais ocorridos nos pontos E<sub>3</sub> e C<sub>5</sub>). Os resultados médios das tensões obtidas experimentalmente podem aproximar-se ainda mais dos valores teóricos se for considerado o desvio padrão (ver tabela 25).

Para os pontos localizados na região central é necessário realizar uma correção para a equação utilizada neste trabalho e que pode ser vista nas referências [10 e 11]. O erro médio obtido foi de 58 %. A tabela 31 apresenta o erro percentual quando comparado com o valor da tensão obtida por cálculos teóricos.

Tabela 31 - Erro percentual dos valores da tensão experimental em relação aos resultados teóricos para os pontos localizados na região central da barra

Pontos	$\sigma_{\text{Teórica}} \text{ (Kg / mm}^2\text{)}$	$\sigma_{\text{Experimental}} \text{ (Kg / mm}^2\text{)}$	%
E2	2,797	-3,752	-34,145
C3	2,797	0,672	-75,9874
D2	2,797	1,013	-63,7803

É interessante observar que a variação angular das direções principais em relação ao eixo de simetria da barra durante o carregamento depende da altura da barra e da localização dos pontos (coordenadas x, y) e não da magnitude da carga aplicada (ver equações 38 e 39) [5]. Dessa forma, as medidas realizadas mais próximas das superfícies da barra terão maior precisão nas medidas das tensões, quando utilizada a equação 41.

O gráfico da figura 29 mostra uma comparação entre os valores teóricos e experimentais da distribuição de tensão na região central (local de aplicação da carga). Os pontos vermelhos apresentam os valores teóricos e os pontos azuis as tensões obtidas experimentalmente. Observe que as retas praticamente se sobrepõem, mostrando a eficácia da análise de tensão por ultra-som.

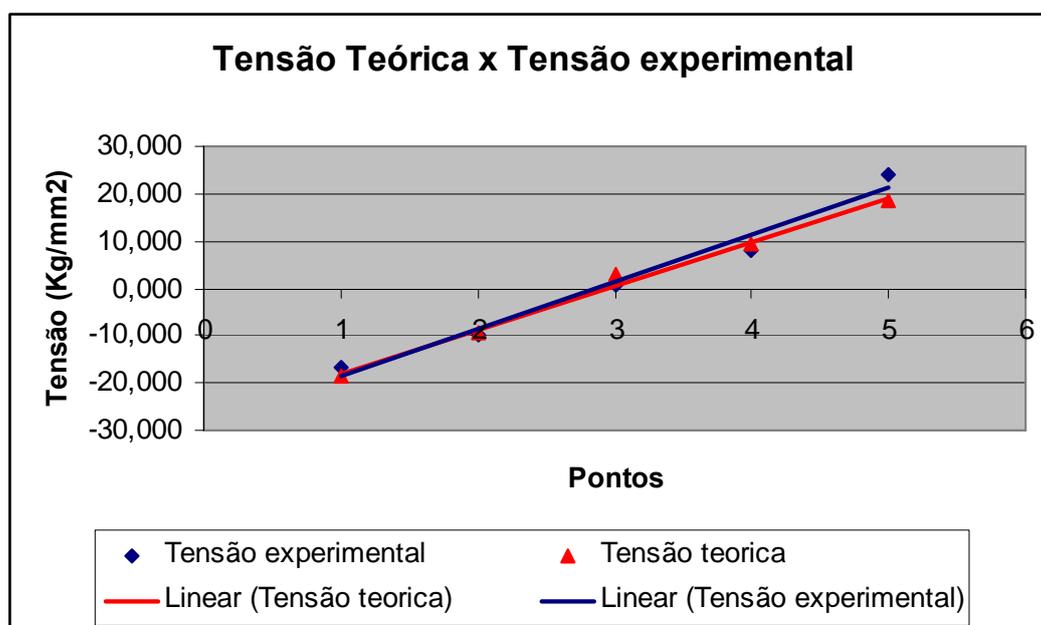


Figura 31 – comparação da distribuição de tensões obtidas pela teoria e pela técnica da birrefringência para a região central

## 5 – CONCLUSÕES

Este trabalho avalia o estado biaxial de tensões gerados em uma barra de aço estrutural, submetida à flexão pela técnica da birrefringência acústica. Os resultados foram comparados com os valores das tensões calculadas pelas equações da resistência dos materiais. As seguintes conclusões foram obtidas.

1. O sistema ultra-sônico utilizado mostrou-se eficaz na determinação das medidas de tempo de percurso da onda ultra-sônica.
2. Ao avaliar a textura do material utilizando a técnica da birrefringência acústica, foi possível verificar as regiões que apresentaram maiores deformações ocasionadas pelo processo de laminação.
3. Foi mostrada que a técnica da birrefringência acústica foi capaz de avaliar as regiões de maior tensão, e diferenciar as regiões compressivas e trativas na barra durante o ensaio de flexão de forma qualitativa.
4. O trabalho mostrou que a equação da birrefringência utilizada para determinar as tensões no material obtém uma boa precisão para as regiões trativas e compressivas com um erro médio de 15 % em relação aos valores teóricos.

## **SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

1. Foi levantada a hipótese que a heterogeneidade do material entre a distância de um ponto ao outro possa estar influenciando na distribuição de tensão durante o carregamento da barra. É proposto que se faça um estudo sobre a influência da heterogeneidade da anisotropia na avaliação da distribuição de tensão comparando-o com um material homogêneo, utilizando a técnica da birrefringência acústica.
2. A análise de tensão utilizando a equação da birrefringência para as medidas de tempo realizadas nas direções principais não apresentou grandes problemas para o caso onde essas medidas são realizadas levemente fora dessas direções. Propõe-se que se realize um estudo que permita identificar em que variação angular entre a direção de polarização da onda e as direções principais, começam a influenciar de maneira significativa nas medidas de tensão.
3. A técnica da birrefringência acústica mostrou que durante o ensaio de flexão as variações das medidas de tempo realizadas na direção transversal são maiores que na direção longitudinal no regime compressivo, e o inverso acontece no regime trativo. Seria interessante estender esse estudo para outros tipos de materiais, pois é de grande importância prática na determinação das regiões compressivas e trativas.
4. Foi observado que durante o carregamento da barra os tempos de percurso da onda ultra-sônica diminuem quando polarizadas na direção longitudinal no regime compressivo, e aumentam no regime trativo quando comparados com os tempos medidos no material sem tensão. Como esses tempos não foram adquiridos nas direções principais, é sugerido que se faça um trabalho que permita determinar as direções principais girando o transdutor sobre o material. Espera-se que na direção longitudinal, no regime compressivo, a posição do transdutor que indicar a menor tempo de aquisição será uma das direções principais, a outra estará perpendicular a esta. A situação inversa é esperada no regime trativo. Se for confirmada esta situação as medidas de tensão realizadas neste trabalho poderão ser obtidas com melhor precisão.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] MACHERAUCH, E., WOHLFAHRT, H., “Different Sources of Residual Stress as Result of Welding”. In: *Proceedings of the International Conference on Residual Stress in Welded Construction and their effect*, v.1, pp. 267-280, London, 1997.

[2] BENNING, I.O. “Non-destructive determination of Load and Residual Stresses by the X-ray stress method”, *The Rigaku Journal*, vol. 6, n.2, 1989.

[3] GUROVA, T., *Variação do Estado de Tensões Residuais introduzidas por Shot-Peening, durante Deformação Plástica por Tração Uniaxial, em aços*, Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1997.

[4] PATHINAJ, B., VASUDEVAN, R., “Residual Stress in Materials and their Measurement by X-Ray”, *Tisco*, v.24, n.3, pp.109-120, 1977.

[5] TIMOSHENKO, S. P., *Resistência dos Materiais*, v.1, 1 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1971.

[6] TIMOSHENKO, S. P., GOODIER J. N., “ Theory of Elasticity”, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill Book co., Tokyo, pp. 219-246, 485-508, 1970.

[7] 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.

[8] NDTnet, NONDESTRUCTIVE TESTING ENCYCLOPEDIA, [http://www.ndt.net/article/az/ut\\_idx.htm](http://www.ndt.net/article/az/ut_idx.htm), 2005.

[9] ROSE, J. L., “Ultrasonic Waves in Solid Media”, Cambridge University Press, UK, pp.27-33, 272-285, 1999.

[10] ORTEGA, L.P.C., *Análise de Tensões por Ultra-Som Através da Refração de Ondas com Incidência Obliqua*. Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

[11] BITTENCOURT, M.S.Q., *Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Tempo Decorrido na 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.

[12] SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W., *Física-Calor, Ondas e Ótica*, v.2, 6 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1981.

[13] SCHNEIDER, E., “Ultrasonic Birefringence Effect-Its Application for Materials Characterizations”. Fraunhofer-Institute for Nondestructive Testing, Bldg 37, D-66123 Saarbriicken, Germany.

[14] HUGHES, D. S., KELLY, J.K., “ Second Order Elastic Deformation of Solids”, *Physical Review*, v. 92, n. 5, pp. 1145-1149, 1953.

[15] THOMPSON, R.B., LU, N.Y., CLARK, A.V., “Ultrasonic Methods”, In: Lu, Jian, *Handbook of Measurement of Residual Stresses / Society for Experimental Mechanics, Inc.*, ISBN 0-88173-229-X, chapter 7, The Fairmont Press, 1996.

[16] BRAY, D.E., MEGLE, D., “Ultrasonic Studies of anisotropy in Cold-Worked layer of used Rail”, *Metal-Science*, v.15, pp. 574-582, November-December 1981.

[17] ALLEN, D.R., LANGMAN, R., SAYERS, C.M., “Ultrasonic S. H. Wave Velocity in Textured Aluminium Plates”, *Ultrasonics*, pp. 215-222, September 1985.

[18] DELSANTO, P.P., MIGNOGNA, R, B., CLARK, A.V., “Ultrasonic textured and Stress Measurement in Anisotropic Polycrystalline Aggregates”, *J. Acoustic. Soc. Am.*, v.87, n. 1, January 1990, pp. 215-224.

[19] FISHER, M.J., “Acoustoelastic Measurements of Elastic-Plastic and Residual Stresses”, In: *Proceedings of AMES/DARPA Conference*, v. 4B, *Review of Progress in Quantitative NDE*, Ed. D. O. Thompson, D. E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp 1051-1059, 1984.

[20] BLAND, M., *An Introduction to Medical Statistics.*, 2<sup>o</sup> ed. New York., Oxford University Press, 1995.

[21] BUNCHAFT, G., *Estatística Sem Mistérios*, 4<sup>o</sup> ed. Petrópolis, Rj, Vozes, 1997.

[22] SPIEGEL, M.R., *Estatística*, 3<sup>o</sup> Ed, São Paulo, Macron Book, 1993.

[23] TRIOLA, M.F., *Introdução À Estatística*, 7<sup>o</sup> Ed, Rio de Janeiro, LTC, Livros Técnicos e científicos, 1999.

[24] MARTINS G.A., *Estatística Geral E Aplicada*, São Paulo, Atlas, 2001.

[25] GUIMARÃES, R.C., CABRAL, J.A.S, *Estatística*, Lisboa, McGraw-Hill, 1997.

[26] LAPPONI, J.C., *Estatística usando Excel 5 e 7*, Editado por Laponi Treinamento e Editora Ltda, ISBN 85-85624-08-6, Agosto 1998.

[27] CASTAGNEDE, B., ROUX, J., HOSTEN, B., “Correlation Method for Normal Mode Tracking in anisotropic Media Using and Ultrasonic Immersion System” , *Ultrasonic*, v.27, n. 5, pp. 280-287, Setember 1939.

[28] LU, W.Y., MAXFIELD, B.W., KURAMOTO, A, “Ultrasonic Velocity Measurement by Correlation Method”, In: *Procceedings of the 1990 Spring conference on Experimental Mechanics*, pp. 279-284, Bethel, 1990.

[29] OPPENHEIN, A.V., SCHAFER, R.W., *Discrete-time Signal Processing*, Prentice Hall, Prentice Hall, 2 ed., Upper Saddle River, NJ, USA, 1998.

[30] *PR 5000 Gate Amplifer, Rate Genetaror and Broadband Receive Operato's Manual*, version 3.4, Northborough, U.S.A., Matec Instrument Companies, 2000

[31] *PR Pulser / Receiver Operator's Manual*, version 3.4, Northborough, U. S.A, Matec Instrument companies, 2000.

[32] SAYERS, C.M., "Ultrasonic Determination of Texture and Residual Stress in Polycrystalline Metals", In: *Ultrasonic Methods in Evaluation of Inhomogeneous Materials*, n. 126, *Serie E: Applied Sciences*, edited by A. Alippi and W. G. M., Nato, ASI, pp 367 – 379, 1987.

[33] MARTIN, B.G., "Rayleigh-wave velocity, Stress and Preferred Grain Orientation in Aluminium", *Non-Destructive Testing*, pp. 199 – 203, August 1974.

[34] CHATELIER, J.Y., TOURATIER, M., "A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates", *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 83, n.1, pp. 109 – 117, January 1988.

[35] GUEZJOURA, R., DESCHAMPS, M., GERÁRD, A., "Acoustoélasticité sous incidence variable: une détermination des constantes élastiques du troisième ordre", *Acustica*, v. 77, pp. 183 – 192, 1992.

[36] OKADA, K., "Acoustoelastic Determination of Stress in Slightly orthotropic Materials" *Experimental Mechanics*, pp. 461-466, December 1981.

[37] MIGNOGNA, R.B., CLARK, A.V., RATH, B.B., VOLD, C.L., "Acoustic Stress Measurement in Aluminium and Steel Considering Differences in Textura due to Rolled Plate Thickness", In: *Proceeding of Ultrasonics International 83*, Canada, pp. 201-206, 12-14 July, 1983.

[38] LÜTHI, T., "Determination of biaxial and triaxial stress distributions using ultrasonics", *NDT International*, v. 23, n. 6, pp. 351 – 356, December 1990.

[39] BLINKA, D.M., BRAY, D.E., "Application of Ultrasonic-Pulse-Spectroscopy Measurements to Experimental Stress Analysis", *Experimental Mechanics*, v. 16, n. 12, pp. 448-453, December 1976.

[40] HIRAO, M., OGI, H., FUKUOKA, H., “Advanced Ultrasonic Method for Measuring Rail Axial Stresses With Eletromagnetic Acoustic Transducer”, *Res. Nondest. Eval.*, Springer-Verlag N. Y. Inc, v. 5, pp. 211 – 223, 1994.

[41] MAN, C.S., “Ultrasonic measurement of Stress in Weakly anisotropic thin sheets”, *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 91, n. 5, pp. 2643 – 2643, May 1992.

[42] EGGLE, 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.

[43] JASSBY, K., KISHONI, D., “Experimental Technique for Measurement os Stress-Acoustic Coeficients of Rayleigh Waves’, *Experimental Mechanics*, pp. 74-80, March 1983.

[44] JAMES, M.R., BUCK, O., Quantitative Nondestructive Measurements of Residual Stresses, *Critical Reviews in Solid State Materials Sciences*, pp. 61 – 105, August 1980.

[45] MENU, P.H., HALLOUX, B., MOESTER, B., “Influence of Shear Stresses on the Velocity of Ultrasonic Compressive and Shear Waves”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluations*, Thompson, D. O., Chimenti, D. E., 5B, pp. 1439-1448, 1988.

[46] SI-CHIB, M, O., DJELOUAH, H., BOUTKEDJIRT, T., “Propagation of Ultrasonic Waves in Materials under Beding Forces”, *NDT&E International*, v. 38, pp.283-289, 2005.

## APÊNDICE A

A probabilidade de se encontrar o valor de uma variável randômica dentro de um certo intervalo, está associada à obtenção da área sob a curva de uma função distribuição. Essa área expressa a integral da função distribuição até o valor da variável. Estes valores podem ser tabelados e, o uso das tabelas difere se a distribuição é simétrica ou não, ou se para grandes ou pequenas amostras.

Na realização do teste  $H_0$  entre dois resultados de medida, é preciso seguir algumas etapas que foram mostrados no capítulo anterior e que serão brevemente lembradas.

1<sup>o</sup>) etapa: Calcular as variâncias para cada amostra

As variâncias são obtidas pelo desvio padrão das amostras elevado ao quadrado, e são representadas por  $S^2$ .

$$s_i^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Onde,  $x_i$  são os valores de B obtidos no mesmo ponto e  $x_{\text{médio}}$ , o valor de B médio das amostras.  $n - 1$  é o numero de graus de liberdade, dado pelo numero de amostras menos 1.

2<sup>o</sup>) etapa: Realizar o teste da hipótese nula para as variâncias e decidir sobre sua aceitação, comparando o valor de  $F_{\text{calculado}}$  com o valor de  $F_{\text{critico}}$ .

A comparação das variâncias de duas amostras é dada:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

No numerador coloca-se a maior e no denominador a menor das variâncias encontradas nas amostras. O valor F calculado será comparado ao valor F crítico obtido na tabela de distribuição F, considerando o nível de significância adotado, os graus de liberdade do numerador ( $n_1-1$ ) e os graus de liberdade do denominador ( $n_2-1$ ).

Construindo o teste de hipóteses:

A hipótese nula afirma que as variâncias das amostras são iguais, enquanto a hipótese alternativa que elas são diferentes. Assim;

$$H_0: S_1^2 = S_2^2$$

$$H_1: S_1^2 \neq S_2^2$$

Calculamos o valor de F e procuramos o valor crítico de F na tabela. Se o valor de F é **menor** que o considerado na tabela, não podemos rejeitar a hipótese nula  $H_0$  (significa que a probabilidade de F é maior que o nível de significância adotado), concluindo que as amostras tem variâncias iguais. Quando o valor de F for **maior ou igual** ao valor encontrado na tabela rejeitamos  $H_0$ , concluindo que as variâncias comparadas são diferentes.

A tabela de F crítico encontra-se no final do apêndice.

3<sup>o</sup>) etapa: Se  $F_{\text{calculado}} < F_{\text{critico}}$  realizar o teste da hipótese nula para a distribuição t de student quando as variâncias são iguais.

$$t = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2}{EP(\overline{X}_1 - \overline{X}_2)}$$

onde, o numerador é a diferença entre as médias das duas amostras e  $EP_{(\overline{X}_1 - \overline{X}_2)}$  é o erro padrão ou erro Standard da diferença entre as médias.

Uma maneira bastante adequada para calcular o Erro Padrão das Diferenças entre as médias é:

$$EP_{(X_1 - X_2)} = \sqrt{\frac{S_p^2}{n_1} - \frac{S_p^2}{n_2}}$$

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

considera-se  $S_p^2$  a melhor estimativa da variância da população ( $\sigma^2$ )

o valor de t obtido deve ser comparado ao valor de t crítico obtido na tabela de distribuição t de student considerando  $(n_1 + n_2 - 2)$  graus de liberdade.

A hipótese nula inclui a igualdade das médias das amostras, enquanto que a hipótese alternativa que elas sejam diferentes.

Assim:

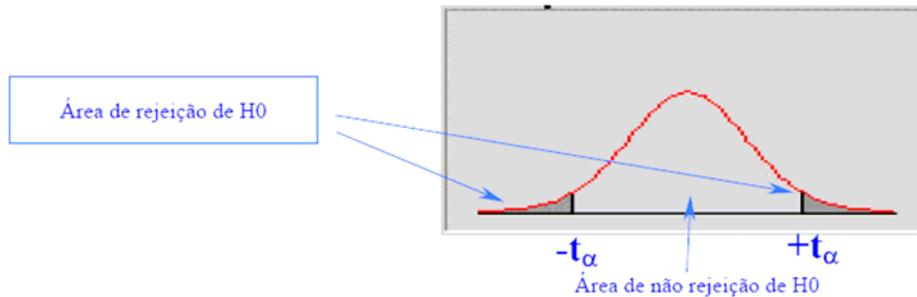
$$H_0: m_1 = m_2$$

$$H_1: m_1 \neq m_2$$

Nos testes bilaterais (utilizada neste trabalho) trabalhamos com as duas caudas da distribuição t, sendo que a área de não rejeição de  $H_0$  corresponde aos valores de  $t < t$  crítico e  $t > -t$  crítico.

As áreas de rejeição de  $H_0$  correspondem aos valores de  $t >$  ou igual t crítico ou  $t <$  ou igual  $-t$  crítico.

Essa situação pode ser observada na figura a seguir, e a tabela de t crítico encontra-se no final do apêndice.



4<sup>o</sup> etapa: Se  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{critico}}$  realizar o teste da hipótese nula para a distribuição t de student quando as variâncias são diferentes, decidindo sobre sua aceitação da mesma forma que foi mostrado na etapa anterior.

Uma situação especial é aquela em que temos duas amostras com variâncias diferentes. Esta situação é conhecida como problema de Benhrens-Fischer e várias soluções tem sido proposta para resolvê-la. Uma boa alternativa foi proposta por Smith (1936), que é também conhecida por Aproximação de t de Welch, em que se calcula o valor de t por:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

os graus de liberdade deverão ser calculados pela fórmula:

$$gl = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)}{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right) + \left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)} \frac{n_1 - 1 + n_2 - 1}{n_1 - 1 + n_2 - 1}$$

Deve-se comparar os valores de t com o valor de t crítico da mesma forma que foi comparado na etapa anterior decidindo-se sobre a aceitação da hipótese nula.

Valores críticos de F ao nível de 5 % (bilateral) ou 2,5 % (unilateral)								
$S_2^2$ (denominador)	$S_1^2$ (numerador)							
	1	2	3	4	5	6	120	infinito
1	647,79	799,50	864,16	899,58	921,85	937,11	1014,02	1018,26
2	38,51	39,00	39,17	39,25	39,30	39,33	39,49	39,50
3	17,44	16,04	15,44	15,10	14,88	14,73	13,95	13,90
4	12,22	10,65	9,98	9,60	9,36	9,20	8,31	8,26
5	10,01	8,43	7,76	7,39	7,15	6,98	6,07	6,02
6	8,81	7,26	6,60	6,23	5,99	5,82	4,90	4,85
7	8,07	6,54	5,89	5,52	5,29	5,12	4,20	4,14
8	7,57	6,06	5,42	5,05	4,82	4,65	3,73	3,67
9	7,21	5,71	5,08	4,72	4,48	4,32	3,39	3,33
10	6,94	5,46	4,83	4,47	4,24	4,07	3,14	3,08
11	6,72	5,26	4,63	4,28	4,04	3,88	2,94	2,88
12	6,55	5,10	4,47	4,12	3,89	3,73	2,79	2,73
13	6,41	4,97	4,35	4,00	3,77	3,60	2,66	2,60
14	6,30	4,86	4,24	3,89	3,66	3,50	2,55	2,49
15	6,20	4,77	4,15	3,80	3,58	3,41	2,46	2,40
16	6,12	4,69	4,08	3,73	3,50	3,34	2,38	2,32
120	5,15	3,80	3,23	2,89	2,67	2,52	1,43	1,31
infinito	5,02	3,69	3,12	2,79	2,57	2,41	1,27	1,00

Tabela de distribuição t						
Bilateral	80%	50%	20%	10%	5%	2%
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764
11	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718
30	0,256	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457
infinito	0,253	0,674	1,282	1,645	1,956	2,326

## ANEXO 1

Tempos de percurso da onda ultra-sônica obtida nos pontos da barra sem carregamento (correlação cruzada e interpolação L4).

Tempos medidos na direção longitudinal

Região 1				
Ponto E <sub>1</sub>		Ponto E <sub>2</sub>		Ponto E <sub>3</sub>
2,83690E-05		2,83660E-05		2,83770E-05
2,83690E-05		2,83640E-05		2,83690E-05
2,83690E-05		2,83630E-05		2,83660E-05
2,83690E-05		2,83600E-05		2,83670E-05
2,83670E-05		2,83600E-05		2,83700E-05
Média				
2,83686E-05		2,83633E-05		2,83698E-05

Região 2				
Ponto C <sub>1</sub>	Ponto C <sub>2</sub>	Ponto C <sub>3</sub>	Ponto C <sub>4</sub>	Ponto C <sub>5</sub>
2,82350E-05	2,82490E-05	2,82420E-05	2,82600E-05	2,82420E-05
2,82340E-05	2,82500E-05	2,82420E-05	2,82570E-05	2,82400E-05
2,82340E-05	2,82500E-05	2,82400E-05	2,82540E-05	2,82400E-05
2,82340E-05	2,82510E-05	2,82400E-05	2,82520E-05	2,82400E-05
2,82330E-05	2,82480E-05	2,82400E-05	2,82540E-05	2,82390E-05
Média				
2,82340E-05	2,82500E-05	2,82410E-05	2,82558E-05	2,82402E-05

Região 3		
Ponto D <sub>1</sub>	Ponto D <sub>2</sub>	Ponto D <sub>3</sub>
2,82240E-05	2,82160E-05	2,82260E-05
2,82240E-05	2,82150E-05	2,82250E-05
2,82240E-05	2,82150E-05	2,82250E-05
2,82240E-05	2,82150E-05	2,82240E-05
2,82230E-05	2,82160E-05	2,82220E-05
Média		
2,82240E-05	2,82153E-05	2,82250E-05

#### Tempos Obtidos na Direção Transversal

Região 1		
Ponto E <sub>1</sub>	Ponto E <sub>2</sub>	Ponto E <sub>3</sub>
2,83480E-05	2,83550E-05	2,83440E-05
2,83470E-05	2,83540E-05	2,83430E-05
2,83460E-05	2,83550E-05	2,83420E-05
2,83470E-05	2,83610E-05	2,83430E-05
2,83470E-05	2,83520E-05	2,83410E-05
Média		
2,83470E-05	2,83554E-05	2,83426E-05

Região 2				
Ponto C <sub>1</sub>	Ponto C <sub>2</sub>	Ponto C <sub>3</sub>	Ponto C <sub>4</sub>	Ponto C <sub>5</sub>
2,82210E-05	2,82420E-05	2,82290E-05	2,82360E-05	2,81970E-05
2,82200E-05	2,82410E-05	2,82280E-05	2,82320E-05	2,81990E-05
2,82200E-05	2,82410E-05	2,82290E-05	2,82330E-05	2,81960E-05
2,82180E-05	2,82440E-05	2,82270E-05	2,82320E-05	2,81990E-05
2,82190E-05	2,82480E-05	2,82270E-05	2,82540E-05	2,81970E-05
Média				
2,82196E-05	2,82420E-05	2,82283E-05	2,82333E-05	2,81976E-05

Região 3		
Ponto D <sub>1</sub>	Ponto D <sub>2</sub>	Ponto D <sub>3</sub>
2,82050E-05	2,82050E-05	2,82000E-05
2,82050E-05	2,82050E-05	2,81970E-05
2,82050E-05	2,82060E-05	2,81970E-05
2,82040E-05	2,82050E-05	2,81970E-05
2,82050E-05	2,82060E-05	2,81970E-05
Média		
2,82048E-05	2,82054E-05	2,81976E-05

## ANEXO 2

Tempos de percurso da onda ultra-sônica obtida nos pontos da barra com carregamento (correlação cruzada e interpolação L4).

Tempos medidos na direção longitudinal

Região 1		
Ponto E <sub>1</sub>	Ponto E <sub>2</sub>	Ponto E <sub>3</sub>
2,83660E-05	2,83800E-05	2,84040E-05
2,83640E-05	2,83810E-05	2,83540E-05
2,83630E-05	2,83810E-05	2,84050E-05
2,83650E-05	2,83810E-05	2,84050E-05
2,83630E-05	2,83830E-05	2,84050E-05
Média		
2,83642E-05	2,83810E-05	2,84050E-05

Região 2				
Ponto C <sub>1</sub>	Ponto C <sub>2</sub>	Ponto C <sub>3</sub>	Ponto C <sub>4</sub>	Ponto C <sub>5</sub>
2,82250E-05	2,82370E-05	2,82670E-05	2,82780E-05	2,82920E-05
2,82250E-05	2,82360E-05	2,82660E-05	2,82760E-05	2,82930E-05
2,82240E-05	2,82350E-05	2,82640E-05	2,82790E-05	2,82930E-05
2,82200E-05	2,82370E-05	2,82650E-05	2,82760E-05	2,82920E-05
2,82220E-05	2,82350E-05	2,82610E-05	2,82770E-05	2,82900E-05
Média				
2,82232E-05	2,82360E-05	2,82646E-05	2,82772E-05	2,82920E-05

Região 3		
Ponto D <sub>1</sub>	Ponto D <sub>2</sub>	Ponto D <sub>3</sub>
2,82220E-05	2,82380E-05	2,82600E-05
2,82180E-05	2,82380E-05	2,82600E-05
2,82190E-05	2,82370E-05	2,82590E-05
2,82190E-05	2,82380E-05	2,82590E-05
2,82220E-05	2,82370E-05	2,82600E-05
Média		
2,82200E-05	2,82376E-05	2,82596E-05

#### Tempos Obtidos na Direção Transversal

Região 1		
Ponto E <sub>1</sub>	Ponto E <sub>2</sub>	Ponto E <sub>3</sub>
2,83590E-05	2,83770E-05	2,83540E-05
2,83600E-05	2,83780E-05	2,83520E-05
2,83600E-05	2,83780E-05	2,83550E-05
2,83600E-05	2,83780E-05	2,83520E-05
2,83600E-05	2,83780E-05	2,83530E-05
Média		
2,83598E-05	2,83777E-05	2,83533E-05

Região 2				
Ponto C <sub>1</sub>	Ponto C <sub>2</sub>	Ponto C <sub>3</sub>	Ponto C <sub>4</sub>	Ponto C <sub>5</sub>
2,82380E-05	2,82460E-05	2,82490E-05	2,82380E-05	2,82110E-05
2,82400E-05	2,82460E-05	2,82530E-05	2,82370E-05	2,82040E-05
2,82390E-05	2,82460E-05	2,82500E-05	2,82390E-05	2,82030E-05
2,82380E-05	2,82460E-05	2,82500E-05	2,82460E-05	2,82070E-05
2,82370E-05	2,82460E-05	2,82510E-05	2,82420E-05	2,82080E-05
Média				
2,82384E-05	2,82460E-05	2,82506E-05	2,82404E-05	2,82066E-05

Região 3		
Ponto D <sub>1</sub>	Ponto D <sub>2</sub>	Ponto D <sub>3</sub>
2,82200E-05	2,82280E-05	2,82140E-05
2,82210E-05	2,82260E-05	2,82120E-05
2,82200E-05	2,82250E-05	2,82130E-05
2,82200E-05	2,82250E-05	2,82120E-05
2,82200E-05	2,82250E-05	2,82150E-05
Média		
2,82203E-05	2,82258E-05	2,82132E-05