



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Edson Luiz Alves

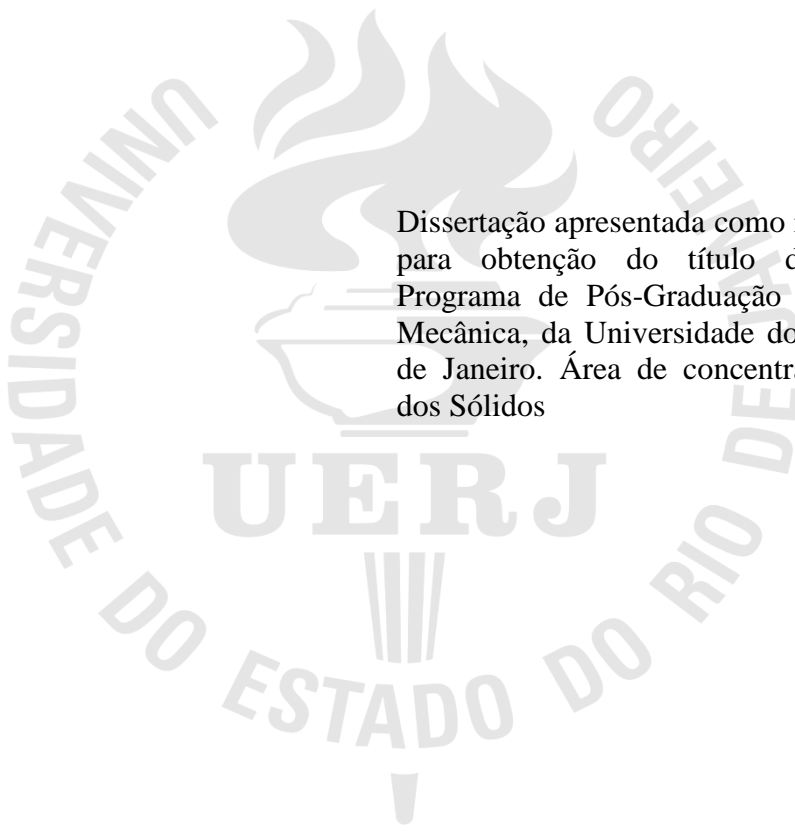
**Estudo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica na
avaliação de tensões residuais e aplicadas**

Rio de Janeiro

2012

Edson Luiz Alves

**Estudo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica na
avaliação de tensões residuais e aplicadas**



Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre, ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade do Estado do Rio
de Janeiro. Área de concentração: Mecânica
dos Sólidos

Orientadores: Prof. Orlando João Agostinho Gonçalves Filho
Prof. Mauro Carlos Lopes Souza

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

A474 Alves, Edson Luiz.

Estudo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica na avaliação de tensões residuais e aplicadas / Edson Luiz Alves. – 2012.
56f: il.

Orientadores: Orlando João Agostinho Gonçalves Filho e Mauro Carlos Lopes Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tensões residuais - Dissertações. 3. Estruturas metálicas - Dissertações. I. Gonçalves Filho, Orlando João Agostinho. II. Souza, Mauro Carlos Lopes. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 620.17

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Edson Luiz Alves

**Estudo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica na
avaliação de tensões residuais e aplicadas**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre, ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Aprovado em 26 de novembro de 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Orlando João Agostinho Gonçalves Filho (Orientador)
Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN
Instituto de Engenharia Nuclear – IEN

Prof. Dr. Mauro Carlos Lopes Souza (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. João da Cruz Payão Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Coordenação de Pós-graduação em Engenharia – COPPE

Prof^a. Dr^a. Rosana da Paz Ferreira
Universidade Estadual da Zona Oeste – UEZO

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

À minha família, em particular à minha esposa Tereza de Fátima Gomes Alves, pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho e também por entender minha ausência nos momentos de confraternização.

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai Todo Poderoso, a quem devo toda honra, louvor, amor, felicidade e vitória em todo tempo em minha vida.

Aos Professores, principalmente meus orientadores, prof. Dr. Mauro Carlos Lopes Souza, pela dedicação, coragem e por acreditar ser possível a realização desta dissertação e, em especial, ao meu tutor intelectual e grande motivador nesta jornada Ph.D. Orlando J. A. Gonçalves Filho, pelo apoio junto ao Instituto de Engenharia Nuclear.

Ao professor Dr. Norberto Mangiavacchi, coordenador da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e incentivo, dentro da humildade que lhe é característica peculiar.

Aos colegas do curso de pós-graduação em engenharia mecânica, em especial aos companheiros de sempre, desde a graduação, Felipe, Fabrício e André, pela colaboração e disposição demonstradas enquanto estudantes nas diversas matérias do curso.

Ao Instituto Militar de Engenharia, em especial ao Coronel Professor Santos e ao Professor Guedes do Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais pelo apoio.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPG-EM) pelos conhecimentos transmitidos e pela abertura de novas fronteiras em minha vida.

RESUMO

ALVES, Edson Luiz. *Estudo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica na avaliação de tensões residuais e aplicadas*. 2012. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Este trabalho apresenta um procedimento numérico para o estudo da precisão e da exatidão da técnica de birrefringência acústica como usada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para avaliação de tensões residuais e aplicadas em estruturas metálicas. Esse procedimento deverá ser incorporado posteriormente ao módulo de processamento de sinal do sistema ultrassônico utilizado no Laboratório de Ultrassom do IEN para levar em conta, de forma automática e sistemática, as incertezas nos dados de entrada e as suas propagações ao longo dos cálculos efetuados. A birrefringência acústica é geralmente definida a partir das velocidades de duas ondas ultrassônicas volumétricas de incidência normal e ortogonais entre si. A birrefringência pode ser definida diretamente a partir dos tempos de percurso dessas duas ondas, uma vez que elas percorrem o mesmo espaço físico. Os tempos de percurso das ondas podem ser assim considerados como as variáveis primárias de interesse. Por meio da teoria da acustoelasticidade é possível relacionar a birrefringência acústica com as tensões atuantes no material explorando o fato da velocidade da onda ultrassônica ser afetada pela presença de um campo de tensões. Nesta dissertação elaborou-se um conjunto de planilhas eletrônicas no aplicativo Microsoft Excel para efetuar de forma automática todos os cálculos necessários ao objetivo proposto, levando em conta as incertezas nos dados, sua propagação ao longo dos cálculos e o número de dígitos significativos nos resultados. Como exemplo do procedimento desenvolvido, o estudo da precisão e da exatidão na determinação das tensões em uma viga de aço sob flexão pela técnica da birrefringência acústica é apresentado. Como valor de referência, para fins do cálculo da exatidão alcançada, utilizou-se uma solução analítica derivada da teoria clássica da resistência de materiais. Os resultados encontrados indicaram uma razoável precisão, com um erro relativo menor do que 8%, e uma baixa exatidão, menor do que 57%, nos pontos da viga sujeitos às maiores tensões principais de flexão.

Palavras-chave: Birrefringência acústica; Tensão; Precisão; Exatidão.

ABSTRACT

This work presents a numerical procedure for estimation of the precision and accuracy of the acoustic birefringence technique as used in the Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) for evaluation of residual and applied stresses in structures. This procedure shall be incorporated latter to the signal processing module of ultrasonic system used at IEN's Ultrasonic Laboratory to account in an automatic and systematic way for the uncertainties in the input data and their propagation throughout the calculations. The acoustic birefringence is generally defined from the speeds of two mutually orthogonal volumetric waves of normal incidence. The birefringence can be defined directly from the time-of-flight of the waves, since they travel the same physical space. The times-of-flight of the waves can thus be regarded as the primary variables of interest. By means of the acoustoelasticity it is possible to relate the acoustic birefringence with the stresses acting in the material exploring the fact that the velocity of the ultrasonic wave is changed by the existence of a stress field. A Microsoft Excel spreadsheet performs all calculations taking into account the uncertainties in the input data, their propagation throughout the calculations and the number of significant digits in the results. As an example of the procedure developed, the estimation of the precision and accuracy in the evaluation of the stresses acting in a beam under bending is presented. The analytical solution derived from the strength of materials theory was used as the reference value for accuracy estimation purpose. The results indicated a reasonable precision, with a relative error less than 8%, and a poor accuracy, with less than 57% in the points of the beam subjected to the maximum and minimum principal bending stresses.

Keywords: Acoustic birefringence; Stress; Precision; Accuracy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Desenho representativo da técnica da birrefringência acústica	16
Figura 2.1	Desenho do sistema ultrassônico do IEN	29
Figura 2.2	Esquema de transdutor – modo transmissão	30
Figura 2.3	Esquema de transdutor – modo pulso-eco	30
Figura 2.4	Equipamentos do sistema ultrassônico do IEN.....	31
Figura 2.5	Ensaio uniaxial para determinação da constante acustoelástica	33
Figura 3.1	Ensaio de flexão na liga de aço 20 MnMoNi 55.....	37
Figura 3.2	Desenho da viga e do carregamento aplicado	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tempo de percurso das ondas ultrassônicas (sem carregamento)	40
Tabela 2	Tempo de percurso das ondas ultrassônicas (com carregamento)	40
Tabela 3	Constante acustoelástica e birrefringência inicial do aço 20 MnMoNi 55	41
Tabela 4(a)	Tempo de percurso das ondas e birrefringência nos pontos C1, C2 e C3	41
Tabela 4(b)	Tempo de percurso das ondas e birrefringência nos pontos C4 e C5	42
Tabela 5	Diferença entre as tensões principais nos pontos C ₁ a C5.....	42
Tabela 6	Dimensões da viga e sistema de carregamento.....	43
Tabela 7	Diferença entre as tensões principais nos pontos C1 a C5 pela resistência dos materiais	44
Tabela 8	Precisão e exatidão do cálculo da diferença entre as tensões principais nos pontos C1 a C5.....	44

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

B_0	Birrefringência acústica inicial devido à textura
B	Birrefringência acústica total
m	Constante acustoelástica
l, m, n	Constantes elásticas de terceira ordem ou de Murnaghan
x_1	Eixo de simetria ortotrópica na direção longitudinal
x_2	Eixo de simetria ortotrópica na direção transversal
x_3	Eixo de simetria ortotrópica na direção da espessura
V_{ij}	Velocidade da onda cisalhante propagando-se na direção do eixo x_i e polarizada na direção x_j ($i, j = 1, 2, 3$)
t_{ij}	Tempo de percurso da onda cisalhante propagando-se na direção do eixo x_i e polarizada na direção x_j ($i, j = 1, 2, 3$)
T_1	Tensão principal na direção de simetria ortotrópica x_1
T_2	Tensão principal na direção de simetria ortotrópica x_2
\bar{x}	Média aritmética de um conjunto de medidas de uma grandeza x
$\sigma_{\bar{x}}$	Desvio padrão da média de um conjunto de medidas
σ_x	Desvio padrão das medidas individuais
s_x	Desvio padrão experimental das medidas individuais
σ_{xy}	Covariância de dois conjuntos de variáveis aleatórias x e y .
r	Coefficiente de correlação de Pearson
ncd	Número de casas decimais
nas	Número de algarismos significativos
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
LABUS	Laboratório de Ultrassom do IEN

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
	Avaliação de tensões por ultrassom (efeito acustoelástico)	12
	Objetivo geral	13
	Objetivos específicos	14
	Organização do trabalho	14
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.1	Técnica da birrefringência acústica	16
1.2	Determinação da diferença entre as tensões principais	17
1.3	Determinação das incertezas experimentais	18
1.3.1	<u>Parâmetros estatísticos de interesse</u>	18
1.3.2	<u>Ajustagem dos dados: regressão linear ponderada</u>	22
1.4	Propagação de erros	23
1.5	Precisão e exatidão	25
1.6	Algarismos significativos	26
2	METODOLOGIA NUMÉRICO-EXPERIMENTAL	29
2.1	Sistema ultrassônico disponível no laboratório de ultrassom do IEN	29
2.1.1	<u>Equipamentos utilizados no laboratório de ultrassom do IEN</u>	31
2.2	Técnicas disponíveis para aquisição de dados	32
2.2.1	<u>Técnica contínua</u>	32
2.2.2	<u>Técnica par a par</u>	32
2.3	Determinação dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas	33
2.4	Caracterização acustoelástica do material	33
2.5	Estimativa da diferença entre as tensões principais	34
2.6	Planilhas eletrônicas de cálculo	35
2.6.1	<u>Planilhas para caracterização acustoelástica do material</u>	35
2.6.2	<u>Planilha para cálculo da diferença entre as tensões principais</u>	36

3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.1	Aplicação numérica: estudo de uma viga biapoiada em flexão	37
3.2	Caracterização ultrassônica do aço 20 MnMoNi 55	32
3.3	Cálculo das diferenças entre as tensões principais	41
3.4	Solução analítica pela resistência dos materiais	43
3.5	Estimativa da precisão e da exatidão dos resultados	44
4	CONCLUSÕES	46
5	SUGESTÕES PARA ESTUDO POSTERIOR	47
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A	49
	A.1 - Planilha de cálculo para caracterização acustoelástica do material	49
	A.2 - Planilha de cálculo das tensões	53

INTRODUÇÃO

Avaliação de tensões por ultrassom (efeito acustoelástico)

Há mais de cinco décadas, o fenômeno denominado efeito acustoelástico foi observado pela primeira vez. Notou-se basicamente que a velocidade das ondas ultrassônicas transversais variava em magnitude ao se propagar no interior de um sólido elástico tensionado. Observou-se também que a velocidade da onda ultrassônica dependia da direção de propagação da onda ultrassônica em relação aos planos cristalinos do material e da direção de movimentação das partículas provocada pela passagem da onda, isto é, da polarização da onda. A variação da velocidade da onda ultrassônica ao se propagar por um material elástico sob tensão foi denominado de efeito acustoelástico, que se assemelha ao fenômeno da fotoelasticidade.

As tensões internas inerentes a cada material (tensões residuais) e as tensões externas aplicadas foram relacionadas às variações de velocidade sofridas pelas ondas ultrassônicas como mencionado anteriormente. Com o conhecimento do efeito acustoelástico surgiram diversas técnicas para a medição de tensões, residuais e aplicadas, desenvolvidas por diferentes pesquisadores. Contudo, o princípio utilizado baseia-se sempre na variação da velocidade de onda ultrassônica no meio material elástico sob tensão. De um modo geral, essas técnicas são denominadas de técnicas acustoelásticas.

A descrição teórica do efeito acustoelástico só foi possível com o uso da teoria não linear da elasticidade. Em 1953, Hughes e Kelly apresentaram, em sua teoria da acustoelasticidade, os princípios fundamentais que permitem relacionar a velocidade da onda ultrassônica com a deformação causada pela tensão no meio por onde a onda se propaga. Em seu trabalho, Hughes e Kelly utilizaram as constantes elásticas de terceira ordem – **l**, **m** e **n** – introduzidas por Murnaghan em 1937.

A medição experimental das tensões por ultrassom é um problema inverso da acustoelasticidade de muito interesse industrial para avaliação não destrutiva da segurança e integridade de estruturas e componentes. Apesar dos avanços já alcançados, apresenta ainda muitas dificuldades de natureza teórica e prática.

As dificuldades teóricas estão relacionadas, principalmente, à solução da equação de Christoffel generalizada para a propagação de ondas ultrassônicas em meios anisotrópicos sob tensão derivada a partir da teoria da acustoelasticidade (Ortega et al., 2001). As principais causas destas dificuldades estão relacionadas ao fato das constantes elásticas do material

dependerem das tensões atuantes, o que torna a propagação das ondas ultrassônicas um problema de autovalor não linear, e ao fato das influências da textura do material e das tensões sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas serem da mesma ordem de magnitude.

As dificuldades de natureza prática envolvem a escolha do tipo e da frequência da onda ultrassônica a ser utilizada, a escolha do acoplante para colocação do transdutor, a influência da temperatura, a determinação das constantes elásticas efetivas e das constantes acustoelásticas, o protocolo experimental para coleta de dados, entre outras. A escolha de uma frequência baixa é fundamental para que a onda ultrassônica gerada tenha um comprimento de onda maior que as dimensões características dos constituintes do material de modo a poder tratá-lo como um meio contínuo e homogêneo, cujo comportamento elástico é caracterizado por suas constantes elásticas efetivas (Ortega et al., 2011).

Este trabalho apresenta um procedimento numérico para o cálculo da precisão e da exatidão da técnica de birrefringência acústica como utilizada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para avaliação de tensões residuais e aplicadas em estruturas metálicas. Esse procedimento deverá ser incorporado posteriormente ao módulo de processamento de sinal do sistema ultrassônico desenvolvido e utilizado no Laboratório de Ultrassom (LABUS) do IEN para considerar as incertezas nos dados de entrada e sua propagação por todos os cálculos efetuados.

Com base na teoria da acustoelasticidade é possível relacionar a diferença entre as tensões principais com a birrefringência acústica (definida a partir das velocidades de duas ondas ultrassônicas cisalhantes volumétricas de incidência normal e ortogonais entre si) em um determinado ponto da peça. Isto é suficiente para avaliar, por meio do critério de Tresca, se o limite de escoamento do material está sendo atingido localmente. Este conhecimento em vários pontos (áreas) de uma estrutura ou componente é de interesse prático para avaliação de sua integridade estrutural.

Objetivo geral

Este trabalho apresenta um procedimento numérico para o cálculo da precisão e da exatidão da técnica de birrefringência acústica como utilizada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para avaliação de tensões residuais e aplicadas em estruturas metálicas. Esse procedimento deverá ser incorporado posteriormente ao módulo de processamento de sinal do sistema ultrassônico desenvolvido e utilizado no Laboratório de Ultrassom (LABUS) do IEN

para levar em conta de forma automática e sistemática as incertezas nos dados de entrada e sua propagação por todos os cálculos efetuados.

Objetivos específicos

- Rever os conceitos básicos da técnica da birrefringência acústica no contexto de sua aplicação no LABUS/IEN (principalmente, considerando os equipamentos disponíveis e os métodos matemáticos utilizados para processamento dos sinais eletrônicos adquiridos no laboratório);
- Desenvolver planilhas no Excel com base nas fórmulas matemáticas derivadas neste trabalho para cálculo da precisão e da exatidão das tensões obtidas no LABUS/IEN com o uso da técnica da birrefringência acústica;
- Aplicar as planilhas desenvolvidas para recalculas as tensões em uma viga biapoiada em flexão simples, feita de aço 20 MnMoNi55, analisada anteriormente no LABUS/IEN, levando em conta as incertezas nos dados de entrada e sua propagação através dos cálculos de modo a determinar a precisão e a exatidão alcançada nos resultados.

Organização do trabalho

No **primeiro capítulo – Revisão Bibliográfica** – apresentam-se os conceitos básicos para aplicação do ultrassom na medição de tensões, sendo abordada, em particular, a técnica da birrefringência acústica e feita breve discussão sobre a determinação da diferença entre as tensões principais num ponto arbitrário do material e sua relação com a teoria de escoamento baseada no critério de cisalhamento máximo, conhecido como critério de Tresca. Em seguida, apresentam-se os parâmetros estatísticos de interesse, destacando a ajustagem dos dados (ajuste de reta), a propagação de erros, Algarismos significativos e conceitos correlatos.

No **segundo capítulo – Metodologia numérico-experimental** – apresenta-se inicialmente o sistema ultrassônico utilizado no Laboratório de Ultrassom (LABUS) do IEN, incluindo uma lista detalhada dos principais equipamentos disponíveis. Em seguida, são introduzidas as metodologias *par a par* e *contínua* para aquisição dos tempos ação da birrefringência local. Nos dois itens seguintes, discute-se a caracterização acustoelástica do material, isto é a determinação de sua constante acustoelástica e de sua birrefringência (média) inicial do material, e a determinação da diferença de tensões principais. Ainda neste capítulo são descritas as três planilhas em Excel desenvolvidas especificamente para este

trabalho; uma fornece o cálculo automático para caracterização acústica do material por ambas as metodologias *par a par* e *contínua*. A segunda planilha determina a constante acustoelástica levando em conta as incertezas nos dados de entrada, de acordo com o procedimento desenvolvido neste trabalho, e a terceira e última planilha fornece o cálculo das tensões experimentais e suas respectivas incertezas.

No **terceiro capítulo – Resultados e Discussão** – apresentam-se: uma descrição do experimento de flexão de uma viga biapoiada; a caracterização do material 20 MnMoNi 55; os resultados experimentais; o cálculo analítico pela resistência dos materiais; e a estimativa da precisão e da exatidão dos resultados.

O **quarto capítulo – Conclusões** – apresenta um resumo das conclusões devidas à aplicação da metodologia proposta no tratamento das incertezas e no cálculo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica como utilizada no LABUS/IEN para avaliação de tensões residuais e aplicadas.

O **quinto e último capítulo – Sugestões para estudo posterior** – propõe alguns temas para investigação posterior.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Técnica da birrefringência acústica

A birrefringência acústica é definida a partir das velocidades de duas ondas ultrassônicas cisalhantes e volumétricas de incidência normal, polarizadas ortogonalmente entre si e propagadas ao longo do mesmo caminho (Bittencourt et al., 2000). Uma vez que as ondas percorrem o mesmo espaço físico, a birrefringência pode ser definida diretamente dos tempos de percurso dessas duas ondas cisalhantes.

Os tempos de percurso das ondas podem ser assim considerados como as variáveis primárias de interesse. No sistema utilizado no IEN, os tempos de percurso das ondas são estimados pelo acoplamento das técnicas matemática de correlação cruzada e de interpolação de dados, enquanto a constante acustoelástica do material é determinada através de uma regressão linear ponderada. Por meio da teoria da acustoelasticidade é possível relacionar a birrefringência acústica com as tensões atuantes no material explorando o fato da velocidade da onda ultrassônica ser afetada pela presença de um campo de tensões. Este tema será desenvolvido nas seções seguintes.

O cubo elementar da Figura (1.1) apresenta uma ilustração básica da aplicação da técnica da birrefringência acústica para determinação de tensões em um material homogêneo com simetria ortotrópica, definida pelos eixos de simetria (x_1 , x_2 e x_3), e submetido a um estado plano de tensões, dado pelas tensões principais T_1 e T_2 atuantes ao longo no plano definido pelos eixos de simetria x_1 e x_2 .

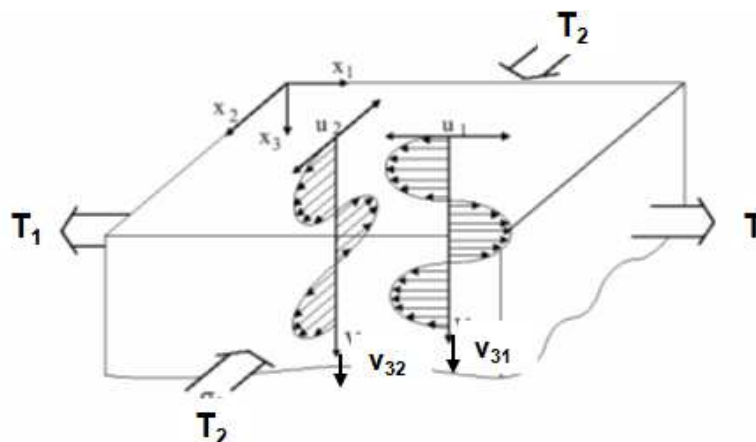


Figura 1.1: Desenho representativo da técnica da birrefringência acústica

1.2 Determinação da diferença entre as tensões principais

A velocidade de propagação de uma onda ultrassônica no interior de um material é função das constantes elásticas deste meio. Hughes e Kelly (1953) apresentaram a relação entre a velocidade da onda ultrassônica, as constantes elásticas do material e as tensões aplicadas. Eles analisaram a variação da velocidade num material isotrópico sujeito a um estado de tensão uniaxial.

Como primeira condição foi escolhida a situação na qual a onda se propagasse paralelamente à direção da tensão aplicada. Em seguida, consideraram o caso de propagação perpendicular à direção da tensão aplicada.

Na determinação da diferença das tensões principais pela técnica da birrefringência acústica, a birrefringência B é medida pela expressão da diferença normalizada das velocidades V_{31} e V_{32} de duas ondas cisalhantes, polarizadas ortogonalmente entre si e alinhadas aos eixos de simetria (x_1 e x_2) do material, e propagadas através da espessura (eixo x_3), de acordo com estabelecido por Hsu (1974) e Schneider (1995). Assim, a birrefringência B é definida de acordo com a equação (1).

$$B = -2 (t_{31} - t_{32}) / (t_{31} + t_{32}), \quad (1)$$

onde os tempos de percursos das ondas t_{31} e t_{32} são utilizados no lugar das respectivas velocidades uma vez que as ondas partem do mesmo ponto percorrendo exatamente a mesma distância. A anisotropia acústica do material (caracterizada pela birrefringência acústica) é dada pela soma da anisotropia devido ao efeito de textura do material (denominada birrefringência inicial B_0) com a anisotropia induzida pelas tensões residuais ou aplicadas atuando ao longo dos eixos de simetria. A contribuição total pode ser expressa linearmente pela equação 2 abaixo, onde m é constante acustoelástica do material e T_1 e T_2 as tensões principais atuando ao longo om os eixos de simetria do material x_1 e x_2 ,

$$B = B_0 + m (T_1 - T_2). \quad (2)$$

B_0 e m são obtidas através de ensaios de tensão uniaxial, fixando os valores da birrefringência e aumentando o carregamento gradativamente. As equações (1) e (2) mostram

que a técnica da birrefringência acústica só pode fornecer um valor médio para as tensões atuando ao longo da espessura do material.

1.3. Determinação das incertezas experimentais

Os objetivos da teoria de erros são investigar o melhor valor possível de uma grandeza a partir de um conjunto de medições, e determinar quanto este valor pode ser diferente do valor verdadeiro, isto é o erro das medições. O melhor valor para o mensurando deve ser o mais próximo possível do valor considerado verdadeiro, segundo Santoro et al. (2005) e Vuolo (1996). Na teoria dos erros, o valor verdadeiro é considerado como desconhecido, e assim também o é o erro das medições. Neste caso, o melhor valor e a sua respectiva incerteza (erro) se resumem em serem obtidos e interpretados em termos de probabilidades.

1.3.1. Parâmetros estatísticos de interesse

Em física, as medidas estão sempre sujeitas a certo grau de incerteza. Existem fundamentalmente dois tipos diferentes de erros experimentais, denominados *erros estatísticos* e *erros sistemáticos*. Erros estatísticos são de natureza aleatória, como descreve Taylor (1997); medidas repetidas serão diferentes umas das outras e do valor esperado em magnitudes que não são individualmente previsíveis. Entretanto, o comportamento da média dos valores medidos, após muitas repetições, pode ser previsto. Erros sistemáticos surgem de problemas na concepção do experimento. Eles não são aleatórios e afetam todas as medições de alguma forma bem definida. O erro total é a composição destes dois tipos de erro.

Para evitar as limitações da classificação das incertezas em estatísticas ou sistemáticas e unificar os procedimentos para relatar os erros nas medições, o Bureau Internacional de Pesos e Medidas recomenda que as incertezas sejam classificadas de acordo com o método de avaliação. As incertezas do tipo A, segundo Santoro et al. (1995) e Vuolo (1996), são aquelas avaliadas por métodos estatísticos, com medidas repetidas, enquanto as incertezas do tipo B são avaliadas com base em informações das propriedades dos materiais envolvidos, especificações do fabricante do instrumento utilizado ou por medições prévias das grandezas envolvidas.

Nas discussões seguintes são apresentados alguns parâmetros estatísticos de posição, dispersão e correlação de interesse para este trabalho, seguido por uma discussão dos conceitos de valor esperado e de erros em medidas diretas. A importante questão dos erros

em medidas indiretas, ou seja, da propagação dos erros ao longo dos cálculos, é abordada com mais detalhes na seção 1.4, em conjunto com a técnica da birrefringência acústica. Ao longo das discussões serão consideradas duas coleções de N medições diretas (*amostras*) das grandezas x e y : amostras $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ e $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$.

Parâmetros de posição

Quando se ordena e agrupa os dados de acordo com sua quantidade (frequência) em certos intervalos de valores (classes), a *moda* – valor mais frequente da coleção de dados – é definida pelo ponto médio da classe que corresponde à frequência máxima. A *média quadrática*, também conhecida como *valor eficaz*, é a raiz quadrática positiva da média dos quadrados dos dados. A *mediana* é o valor que divide uma distribuição ordenada de dados, tal que metade dos dados na coleção é maior do que a mediana e metade dos dados é menor. Isto é, divide a distribuição ordenada dos dados, tal que metade dos dados fica abaixo e a outra metade acima desse valor, tomado como referência.

Do ponto de vista descritivo, quanto menor a dispersão dos valores numa coleção de dados numéricos, melhor os parâmetros de posição descrevem as informações contida na coleção.

Parâmetros de dispersão

Define-se *amplitude* como a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de uma coleção de N dados numéricos; *Desvio médio*, como a média dos módulos dos desvios de cada medida em relação à média (desvios dados por: $\delta x_i = (x_i - \bar{x})$, $i = 1, N$).

A *variância* é definida como a média dos quadrados dos desvios em relação à média, ou desvio médio quadrático, enquanto o *desvio padrão* é definido como a média quadrática dos desvios, ou a raiz quadrada positiva da variância. O desvio padrão mantém, portanto, a mesma unidade de medida dos valores da grandeza.

Parâmetros de correlação

A variação (desvios) das medidas associadas a uma grandeza x $\{\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_N\}$ pode, em muitos casos, acompanhar a variação (desvios) dos dados associados a outra

grandeza y $\{\delta y_1, \delta y_2, \dots, \delta y_N\}$. Nestes casos, diz-se que as grandezas x e y estão correlacionadas. A interdependência de duas coleções de dados pode ser quantificada, por exemplo, pela *covariância* e pelo *coeficiente de correlação linear de Pearson* (r).

A *covariância* é definida como a média dos produtos dos desvios (δx_i e δy_i) de cada medida em relação à média dos valores da respectiva grandeza. Já o *coeficiente de correlação linear de Pearson* (r) é um parâmetro adimensional que varia entre -1 e +1 e é dado pela razão da covariância das medidas das grandezas x e y pelo produto do desvio padrão das medidas de cada grandeza. Expressões específicas para estes dois parâmetros de correlação são dadas ao final deste item 1.3.1.

Valor esperado e incertezas em medidas diretas

O valor mais provável que uma série de medidas de igual confiança permite atribuir a uma grandeza é a média aritmética dos valores individuais da série (Taylor, 1997). Assim, o resultado da medição de uma grandeza é dado pela expressão (3), onde \bar{x} é a *média aritmética* dos valores, ou *valor esperado* da grandeza, parâmetro de posição dado pela equação (4), enquanto $\sigma_{\bar{x}}$ é o *desvio padrão da média*, parâmetro de dispersão calculado pela equação (5),

$$\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}, \quad (3)$$

onde

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{média ou valor esperado}), \quad (4)$$

e

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (\text{desvio padrão da média}), \quad (5)$$

sendo

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{desvio padrão das medidas individuais}). \quad (6)$$

Quando o número das medidas diretas em um processo de medição (tamanho da *amostra*) não for grande o suficiente para que o seu desvio padrão seja uma estimativa adequada do desvio padrão da totalidade de medidas possíveis, isto é, da *população* de dados,

a estimativa padrão para o erro de cada medida (equação 6) deve ser alterada (Santoro et al., 2005).

Em geral, quando o número de elementos N da amostra for maior do que 30, ela já pode ser considerada como uma grande amostra. As distribuições amostrais de grandes amostras tendem a uma distribuição de Gauss, ou distribuição normal. As amostras com menos de 30 elementos são denominadas pequenas amostras.

Se o número de medidas N não for suficientemente grande (caso dos experimentos usualmente realizados no Laboratório de Ultrassom do IEN), o desvio padrão das medidas individuais deve ser substituído por S_x , denominado desvio padrão experimental das medidas individuais,

$$s_x = \sqrt{\frac{N}{N-1}} \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)}} \quad (7)$$

de modo que o desvio padrão da média torna-se,

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (8)$$

A covariância de dois conjuntos de variáveis aleatórias x e y extraídos de duas amostras de N medidas diretas, $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ e $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ é dada por

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \overline{xy} - \bar{x} \bar{y} = \sigma_{yx} \quad (9)$$

e coeficiente de correlação de Pearson (r) dos conjuntos x e y por,

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (-1 \leq r \leq 1) \quad (10)$$

Dois conjuntos de variáveis aleatórias são ditos fortemente correlacionados quando o valor de r for próximo da unidade, e são ditos não correlacionados quando r é nulo.

1.3.2 Ajustagem dos dados: regressão linear ponderada

Suponha que exista uma forte correlação entre as medidas associadas a um par de variáveis (x, y) e que uma relação de causa e efeito exista entre elas descrita por uma relação funcional $y=f(x)$. A determinação dessa relação é conhecida como ajuste de curvas (ou regressão). A mais simples relação funcional ocorre quando o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os pares (x_i, y_i) de N medições das variáveis x e y é próximo da unidade. Neste caso, a variação de y como uma função de x pode ser expressa como uma relação linear,

$$y = f(x) = ax + b \quad , \quad (11)$$

onde os coeficientes angular (a) e linear (b) da reta podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados, minimizando a expressão funcional (Santoro et al., 2005),

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{y_i - (ax_i - b)}{\sigma_i} \right]^2 \quad , \quad (12)$$

onde

$$\sigma_i^2 = \sigma_{y_i}^2 + a^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (13)$$

σ_{x_i} e σ_{y_i} são as incertezas nas medidas do x_i e y_i , levando a em conta que x_i é tomada isenta de erros, pois os mesmos são transferidos para y_i , conduzindo a

$$a = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad \text{e} \quad b = \bar{y} - a \bar{x} \quad . \quad (14)$$

As incertezas nos valores dos coeficientes: angular (a) e linear (b) são dadas por

$$\sigma_a = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad \text{e} \quad \sigma_b = \sigma_a \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{N}} \quad (15)$$

A identificação da constante acustoelástica m e da birrefringência B_0 inicial (e suas incertezas) é feito através da aplicação da regressão linear ponderada descrita acima à função linear dada pela equação (2), que relaciona a birrefringência B com a diferença das tensões principais ΔT ($\Delta T = T_1 - T_2$). Os dados de entrada para este procedimento são os valores de B_i a determinado número N de níveis de carga ΔT_i e suas incertezas associadas e (ver item 2.4). Assim,

$$B = f(\Delta T) = m \Delta T + B_0, \quad (16)$$

onde

$$m = r \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Delta T}} \quad ; \quad B_0 = \bar{B} - m \Delta \bar{T} = \bar{B} - m (\bar{T}_1 - \bar{T}_2), \quad (17)$$

e,

$$\sigma_m = \frac{1}{\sigma_{\Delta T} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad ; \quad \sigma_{B_0} = \sigma_m \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta T_i^2}{N}}. \quad (18)$$

com

$$\sigma_i^2 = \sigma_{B_i}^2 + m^2 \sigma_{\Delta T_i}^2 \quad (19)$$

1.4 Propagação de erros

A propagação de erros é determinada utilizando as fórmulas fornecidas pelo cálculo diferencial com base na expansão da série de Taylor aplicada a um função multivariada. Assim, se uma variável ϕ depende de M outras variáveis $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$, de acordo com alguma função $f(X)$, e se as N medidas de cada uma das variáveis independentes são distribuídos em torno do valor médio $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_M)$, de tal forma que em torno desse ponto $f(X)$ possa ser aproximada pelos primeiros termos de sua expansão em série de Taylor, então,

$$\phi = f(X) = f(\bar{X}) + \sum_{k=1}^M \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)_{\bar{X}} (x_k - \bar{x}_k) \quad (20)$$

A estimativa para o valor esperado de ϕ é dado pelo valor da função $f(X)$ no ponto médio \bar{X} ,

$$\bar{\phi} = f(\bar{X}), \quad (21)$$

e a incerteza associada a cada medida indireta de ϕ por,

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\sum_{k,l}^M \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \right)_{\bar{X}} V_{kl} \left(\frac{\partial f}{\partial x_l} \right)_{\bar{X}}} \quad (22)$$

onde V_{kl} é a covariância dos conjuntos $x_k = (x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_N})$ e $x_l = (x_{l_1}, x_{l_2}, \dots, x_{l_N})$,

$$V_{kl} = \sigma_{x_k x_l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ki} - \bar{x}_k) (x_{li} - \bar{x}_l) = \sigma_{x_l x_k} \quad (23)$$

e a incerteza no valor médio de ϕ por

$$\sigma_{\bar{\phi}} = \frac{\sigma_{\phi}}{\sqrt{N}}. \quad (24)$$

As funções multivariáveis consideradas neste trabalho são dadas pela equação (1), para a birrefringência B , e a equação (2), para a diferença entre as tensões principais $\Delta T (\Delta T = T_1 - T_2)$. A primeira é uma função (de *duas variáveis*) dos tempos de percurso t_{31} e t_{32} . Aplicando o procedimento acima para levar em conta a propagação de erros nos cálculos, o *valor esperado* da birrefringência é

$$\bar{B} = f(\bar{t}_{31}, \bar{t}_{32}) = 2 \left(\frac{\bar{t}_{31} - \bar{t}_{32}}{\bar{t}_{31} + \bar{t}_{32}} \right) \quad (25)$$

com uma incerteza associada dada por

$$\sigma_{\bar{B}} = \sqrt{\left(\frac{4 \bar{t}_{32}}{(\bar{t}_{31} + \bar{t}_{32})^2} \right)^2 \sigma_{\bar{t}_{31}}^2 + \left(\frac{4 \bar{t}_{31}}{(\bar{t}_{31} + \bar{t}_{32})^2} \right)^2 \sigma_{\bar{t}_{32}}^2 - \frac{32 \bar{t}_{31} \bar{t}_{32}}{N (\bar{t}_{31} + \bar{t}_{32})^4} \sigma_{t_{31} t_{32}}}. \quad (26)$$

A equação (2) para a diferença tensão entre as tensões principais pode também ser tratada como uma subtração e divisão de números com incertezas independentes, ou seja, $B \pm \sigma_B$, $B_0 \pm \sigma_{B_0}$ e $m \pm \sigma_m$. Aplicando o procedimento geral para levar em conta a propagação de erros, o *valor esperado* da diferença entre as tensões principais chega-se a,

$$\Delta \bar{T} = f(\bar{B}, B_0, m) = \left(\frac{\bar{B} - B_0}{m} \right) \quad (27)$$

e a uma incerteza associada dada por

$$\sigma_{\Delta \bar{T}} = \left(\frac{\bar{B} - B_0}{m} \right) \sqrt{\frac{\sigma_B^2 + \sigma_{B_0}^2}{(\bar{B} - B_0)^2} + \left(\frac{\sigma_m}{m} \right)^2} \quad (28)$$

1.5 Precisão e exatidão

A exatidão pode ser estimada pelo cálculo do erro absoluto e a precisão por medidas de dispersão, tais como, como erro relativo, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação. A precisão costuma ser expressa como repetitividade, precisão intermediária ou reprodutividade. A repetitividade refere-se à variação dos resultados obtidos em pequenos intervalos de tempo no mesmo laboratório (mesmo dia, analista e equipamento). A precisão intermediária é expressa pela variação entre resultados obtidos em dias diferentes pelo mesmo laboratório. A reprodutividade é estudada entre diferentes laboratórios, em diversas localidades do mundo, utilizando o mesmo conjunto de amostras.

No desenvolvimento dado ao longo deste trabalho, a precisão experimental é caracterizada pelo erro relativo dado pela razão entre o desvio padrão da média (equação 8) e o valor absoluto da média (equação 4), enquanto que a exatidão experimental é definida pela valor absoluto da razão entre a diferença do valor médio da grandeza (equação 4) e o valor tomado como referência, e o próprio valor de referência, isto é,

$$\text{Precisão} = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{|\bar{x}|} \quad (29)$$

e

$$\text{Exatidão} = \left| \frac{\bar{x} - x_{REF}}{x_{REF}} \right| \quad (30)$$

1.6. Algarismos significativos

No valor que expressa a magnitude de uma grandeza através de uma unidade de medida, todos os algarismos conhecidos com *certeza* mais o primeiro algarismo de *duvidoso* são denominados de algarismos significativos. Os algarismos significativos de uma medida indicam a sua precisão e, portanto, são determinados pelo erro a ela associado.

A precisão de uma medida simples depende do instrumento utilizado em sua medição. No caso de medidas diretas individuais, o número de algarismos significativos usado para expressar o resultado de uma medição é determinado pela resolução (ou limite de erro) do instrumento utilizado.

O conceito de algarismos significativos foi também explorado no estudo da propagação de erros neste trabalho. Assim, procurou-se determinar o número de algarismos significativos com que os resultados das medidas diretas (tempo de percurso das ondas ultrassônicas) e das medidas indiretas (birrefringência, constante acustoelástica e tensões) deveriam ser expressos a cada etapa do processo de determinação das tensões pela técnica da birrefringência acústica.

O número de dígitos significativos utilizados para expressar cada resultado foi determinado considerando basicamente a resolução dos equipamentos utilizados e o desvio padrão da média da grandeza em estudo (tempos de percurso das ondas ultrassônicas, constante acustoelástica, birrefringência inicial e tensões). Para isto, um algoritmo específico foi elaborado e introduzido em planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel (item 2.6) para determinação dos algarismos significativos em cada passo dos cálculos até a obtenção do resultado final (tensões). Este algoritmo, que utiliza algumas funções implícitas da planilha do Excel, é introduzido a seguir.

Seja \bar{x} a mediana aritmética de um conjunto de medidas de uma grandeza x (tempo de percurso, birrefringência, constante acustoelástica, birrefringência inicial e tensões) expressa em *notação decimal* com certo número de dígitos. No caso, por exemplo, em que a grandeza em estudo é o tempo de percurso das ondas ultrassônicas (variável primária do problema em estudo), este número é função da resolução do equipamento e dos procedimentos numéricos de correlação cruzada e de interpolação adotados para melhorar a resolução básica do equipamento. Esta resolução melhorada matematicamente é aqui denominada de *tempo de amostragem*.

Seja σ_x^- o desvio padrão da média \bar{x} , expresso em *notação científica normalizada*, com até duas casas decimais. Todos os dígitos nesta notação são, por convenção, algarismos significativos (a rigor, o número de algarismos significativos com que se expressa o erro é determinado pelo erro do erro). O expoente da notação científica normalizada do valor de σ_x^- indica o número de casas decimais (*ncd*) com que o valor da média \bar{x} deve ser expresso em *notação decimal*.

- Se $\sigma_x^- \geq 1$, então $ncd = 0$
- Se $\sigma_x^- < 1$, então $ncd = \text{INT}(\text{LOG10}(1/\sigma_x^-) + 1)$

Conhecido assim o número de casas decimais (*ncd*) com que o valor da média \bar{x} deve ser expresso em *notação decimal*, o número de algarismos significativos (*nas*) no valor da média \bar{x} é então determinado pelo seguinte algoritmo:

- Se $\text{ABS}(\bar{x}) < 1,0\text{E-}30$ então $nas = ncd$
- Se $1,0\text{E-}30 \leq \text{ABS}(\bar{x}) < 1,0$ então $nas = ncd - \text{TRUNCAR}(\text{LOG10}(\text{ABS}(1/\bar{x})); 0)$
- Se $\text{ABS}(\bar{x}) \geq 1,0$ então $nas = ncd + \text{INT}(\text{LOG10}(\text{ABS}(\bar{x})) + 1)$

onde $\text{INT}(num)$, $\text{LOG10}(num)$, $\text{ABS}(num)$ e $\text{TRUNCAR}(num)$ são funções implícitas do planilha do programa Microsoft Excel, definidas como ⁽¹⁾:

- $\text{INT}(número)$ - arredonda um *número* para baixo, até o número inteiro mais próximo.
- $\text{LOG10}(número)$ - retorno o logaritmo de base 10 de um *número*.
- $\text{TRUNCAR}(número, número\ de\ dígitos)$ – trunca um *número* até um número inteiro removendo a parte decimal ou a parte fracionária do número (*número de dígitos* é um número que especifica a precisão da operação, dado pelo número de casas decimais a reter. O valor padrão para *número de dígitos* é 0 (zero)).
- $\text{ABS}(número)$ - retorna o valor absoluto de um *número*.

⁽¹⁾ As funções TRUNCAR e INT são semelhantes, pois as duas retornam números inteiros. A função TRUNCAR remove a parte fracionária do número. A função INT arredonda para menos até o número inteiro mais próximo de acordo com o valor da parte fracionária do número. As funções INT e TRUNCAR diferem apenas quando aplicadas a números negativos: por exemplo, TRUNCAR(-4,3;0) retorna -4, enquanto INT(-4,3;0) retorna -5.

Quando as grandezas em estudo são a constante acustoelástica m e a birrefringência inicial B_0 , duas alternativas, além do critério baseado no expoente da notação científica normalizada do valor do desvio padrão da média (σ_x), são disponibilizadas para determinação do número de casas decimais (ncd) e do número de algarismos significativos (nas) com que o valor da média \bar{x} deva ser expresso em *notação decimal*.

As duas alternativas baseiam-se nos valores da birrefringência e da tensão no teste de carga para determinação de m e de B_0 (item 2.4). A primeira alternativa considera o número de algarismos significativos destes valores, e a segunda os seus erros relativos.

Na versão atual das planilhas (item 2.6), cabe ao usuário escolher a melhor opção para definição do número de algarismos significativos a serem usados nos valores da constante acustoelástica m e a birrefringência inicial B_0 . No futuro, algum critério de decisão pode ser estabelecido, a partir da experiência da aplicação da metodologia a um maior número de aplicações práticas.

2 METODOLOGIA NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

O procedimento numérico-experimental proposto nesta dissertação para a avaliação automática e sistemática da precisão e exatidão experimental da técnica da birrefringência acústica como empregada no Laboratório de Ultrassom do IEN para a medição de tensões residuais e aplicadas é resumido neste capítulo. Inicialmente são abordados os equipamentos disponíveis no laboratório (item 2.1), as técnicas empregadas para aquisição dos sinais (item 2.2) e a determinação do tempo de percurso das ondas (item 2.3). O procedimento proposto é então abordado nos itens seguintes. Ele é dividido em duas partes: *caracterização do material* (isto é, a determinação dos parâmetros B_0 e m) e *determinação das tensões* (isto é, determinação da diferença entre as tensões principais ΔT ($\Delta T = T_1 - T_2$)). O capítulo é concluído com uma apresentação sumária das planilhas em Excel desenvolvidas para execução de todos os cálculos necessários ao trabalho proposto.

2.1 Sistema ultrassônico disponível no laboratório de ultrassom do IEN

A geração das ondas ultrassônicas volumétrica e a avaliação dos seus tempos de percurso para determinação das tensões em um corpo de prova pela técnica da birrefringência acústica são feitas no Laboratório de um Ultrassom do IEN usando o conjunto de equipamentos representado esquematicamente na Figura 2.1.

O núcleo do sistema de ultrassom é composto por um gerador de ondas ultrassônicas, um osciloscópio para a aquisição de sinal, e um computador pessoal para processamento de sinais. O tempo de percurso da onda é determinado acoplando as técnicas de correlação cruzada e de interpolação de dados (Bittencourt, 2000). Transdutores de frequências diferentes estão disponíveis para aplicações específicas.

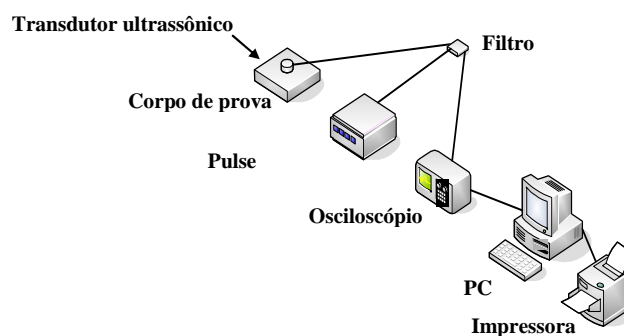


Figura 2.1: Desenho do sistema ultrassônico do IEN

Embora existam diversos tipos de transdutores, a técnica básica utiliza dois transdutores para efetuar a inspeção. Um transdutor funciona como emissor e o outro, colocado geralmente na superfície oposta ao primeiro transdutor, funciona como receptor. Assim, o pulso ultrassônico emitido pelo primeiro transdutor atravessa o material e é captado pelo segundo transdutor. Entretanto, o posicionamento e o alinhamento deles são de difícil execução prática, principalmente quando a distância entre eles é significativa, como ilustra a figura 2.2.

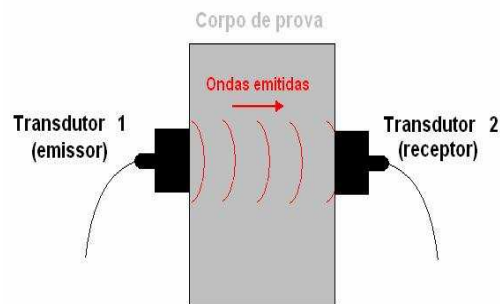


Figura 2.2: Esquema de transdutores – modo transmissão (Baroni, 2008)

A técnica pulso-eco utiliza apenas um transdutor, que funciona como emissor e receptor. É bastante utilizada por ser simples e não necessitar de acesso à face oposta do corpo de prova para realizar a inspeção. O pulso emitido pelo transdutor é refletido pela face oposta e retorna ao transdutor (Figura 2.3). Desta forma, o pulso percorre duas vezes a espessura do material desde sua emissão até sua captura. Isto pode ser uma dificuldade em inspeções de materiais muito dispersivos, fazendo com que o sinal seja fortemente atenuado, o que impossibilitaria a sua análise.

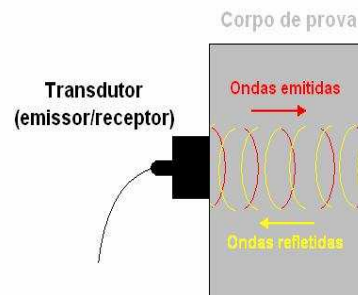


Figura 2.3: Esquema de transdutor – modo pulso-eco (Baroni, 2008)

2.1.1 Equipamentos utilizados no laboratório de ultrassom do IEN

Os equipamentos que compõem o sistema ultrassônico básico do IEN, empregados para a coleta dos dados experimentais (Dutra, 2009) utilizados como referência por este autor são (Figura 2.4):

- 01 osciloscópio digital, marca *Tektronik*: z: TDS 3032 B – (canal 1);
- 01 aparelho convencional de ultrassom funcionando como gerador de pulsos ultrassônicos, marca *Krautkraumer*, modelo USK6 NB
- 01 computador portando os programas: “*Wave Star*” e “*Chronos* ou *Atraso V9*”
- 01 corpo de prova (Barra de aço 20 MnMoNi 55)
- 01 material acoplante: *COUPLANT SWC* de uso de incidência normal da “*Panametrics*”
- 01 filtro de amplitude, com duas saídas: de alta e de baixa tensão, 250 – 300 V (transdutor) e de 8V (osciloscópio) - 01 transdutor de ondas cisalhante de modo pulso-eco, marca; “*Panametrics*” modelo V 151# 0,5 MHz e diâmetro 25 mm. Além de outros três transdutores, utilizados em função da espessura desafiadora do corpo de prova estudado.



Figura 2.4. Equipamentos do sistema ultrassônico do IEN.

2.2 Técnicas disponíveis para aquisição de dados

No laboratório do IEN, duas técnicas diferentes são empregadas para propagar ondas ultrassônicas cisalhantes e para adquirir os sinais eletrônicos em um determinado ponto: a técnica contínua e a técnica par a par. O tempo de percurso das ondas é determinado a partir de seus sinais eletrônicos usando as técnicas matemáticas de correlação cruzada e interpolação de dados.

2.2.1 Técnica contínua

Na técnica *contínua*, uma direção inicial, alinhada com um dos eixos de simetria material, é escolhida (seja a direção 1) e mantida fixa enquanto uma seqüência de N (geralmente de 5 a 10) ondas de cisalhamento é gerada e polarizada nesta direção. Os sinais destas ondas são capturados e os tempos de percurso de cada onda $(t_{31})_i$ ($i = 1, N$) são determinados usando as técnicas matemáticas de correlação cruzada e interpolação dos dados. Somente após a aquisição da série de sinais ter sido concluída, o transdutor é girado para a direção ortogonal à primeira (direção 2) e uma série similar de medições é feita levando ao conjunto $(t_{32})_i$ ($i = 1, N$). Estes resultados são então utilizados para determinar o tempo médio de percurso de propagação da onda ultrassônica em cada direção ortogonal $(\bar{t}_{31}, \bar{t}_{32})$ e suas incertezas correspondentes que são então finalmente empregadas para calcular o valor de birrefringência e suas incertezas associadas.

2.2.2 Técnica par a par

Na técnica de *par a par*, o transdutor é alinhado com um eixo de simetria do material escolhido (seja a direção 1) e o tempo de percurso da onda de cisalhamento t_{31} gerada e polarizada nessa direção é determinada. O transdutor é girado na direção do eixo de simetria material 2 (ortogonal à direção 1) para determinação do tempo de percurso da onda t_{32} . Usando os tempos de percursos das ondas t_{31} e t_{32} , a birrefringência B é determinada em seqüência de acordo com a equação (1). Este procedimento é repetido um número pré-determinado de vezes N (novamente de 5 a 10 medições). Diferentemente da técnica anterior, somente após a série de medições N estarem concluídas, resultando num conjunto de B_i ($i = 1, N$), o valor médio da birrefringência e sua incerteza associada são calculadas.

2.3 Determinação dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas

Como mencionado anteriormente, os tempos de percurso das ondas são determinados a partir de seus respectivos sinais eletrônicos usando as técnicas matemáticas de correlação cruzada e interpolação de dados. Inicialmente os sinais adquiridos são tratados pelo programa *Wave Star* e em seguida pelo programa *Chronos* desenvolvidos no Laboratório de Ultrassom do IEN por Marcelo Bittencourt em sua tese de doutorado (Bittencourt, 2000).

2.4 Caracterização acustoelástica do material

A caracterização do material utilizando a técnica da birrefringência acústica é feita pelo teste de carga uniaxial Fig. 2.5. Em um ponto pré-selecionado do corpo de prova, aplicam-se diferentes níveis de carga abaixo do limite de escoamento do material. A direção da carga aplicada deve coincidir com um dos eixos de simetria. É possível que a escolha do eixo de simetria na direção do qual a carga uniaxial será aplicada possa afetar o valor da constante acustoelástica e esta questão merece um estudo mais aprofundado, como sugerido por Thompson et al. (1986).



Figura 2.5: Ensaio uniaxial para determinação da constante acustoelástica.

Aplicação da Técnica Contínua:

a) Para cada nível de carga $\bar{T}_k \pm \sigma_{\bar{T}_k}$ [$k = 1, P$ ($P = \text{n}^\circ$ de nível de tensões no teste de carga)], calcula-se o tempo médio de percurso da onda em cada direção ortogonal ($\bar{t}_{31}, \bar{t}_{32}$) e suas incertezas correspondentes ($\sigma_{\bar{t}_{31}}, \sigma_{\bar{t}_{32}}$) usando as equações (4) e (8); em seguida, estima-se o valor médio birrefringência \bar{B} e sua incerteza $\sigma_{\bar{B}}$ utilizando novamente as equações (4) e (8);

b) Para os conjunto de valores \bar{B} e \bar{T}_k e incertezas associadas $\sigma_{\bar{T}_k}$ e $\sigma_{\bar{B}}$ calcula-se os parâmetros m e B_0 e suas incertezas σ_m e σ_{B_0} aplicando as equações (17) a (19).

Aplicação da Técnica: Par a par

a) Para cada nível de carga $\bar{T}_k \pm \sigma_{\bar{T}_k}$ [$k = 1, P$ ($P = n^\circ$ de níveis de tensões no teste de carga)], estima-se os tempo de percurso para o par de direções ortogonais (t_{31} e t_{32}) e, em seguida, calcula-se a o valor da birrefringência B_k . A partir do conjunto de valores B_k calcula-se o valor médio birrefringência \bar{B} e sua incerteza associada $\sigma_{\bar{B}}$ usando as equações (4) e (8).

b) Para os conjunto de valores \bar{B} e \bar{T}_k e incertezas associadas $\sigma_{\bar{T}_k}$ e $\sigma_{\bar{B}}$ calcula-se os parâmetros m e B_0 e suas incertezas σ_m e σ_{B_0} aplicando as equações 17 a 19.

2.5 Estimativa da diferença entre as tensões principais

Com os parâmetros do material caracterizados, a equação (2) pode ser aplicada na ordem inversa para calcular a diferença de tensões principais em pontos selecionados de uma estrutura sob carregamento:

a) Primeiro, selecione a técnica (*contínua* ou *par a par*) para a propagação das ondas ultrassônicas de cisalhamento; e capte os sinais e trate os dados (os tempos de percurso das ondas) de acordo com o descrito no item 2.4 para obter o valor esperado da birrefringência média \bar{B} e o da sua respectiva incerteza $\sigma_{\bar{B}}$ pela equações (25) e (26);

b) Aplicar a equação (2) na ordem inversa para calcular o valor esperado da diferença de tensões principais $\Delta\bar{T} = (T_1 - T_2)$ e sua respectiva incerteza $\sigma_{\Delta\bar{T}}$, dadas pelas equações (27) e (28), respectivamente;

c) Determine a precisão experimental e a exatidão (se uma solução de referência estiver disponível) do resultado, de acordo com a Seção 1.5.

2.6 Planilhas eletrônicas de cálculo

Para elaboração deste trabalho foi de fundamental importância a preparação de três planilhas eletrônicas elaboradas utilizando o aplicativo da Microsoft Excel. As planilhas elaboradas utilizam algumas das fórmulas matemáticas disponíveis no aplicativo da Microsoft Excel. A seguir é feita uma breve descrição das planilhas desenvolvidas. Nos apêndices 1 a 3 são disponibilizadas as planilhas eletrônicas com os resultados encontrados em pontos pré-selecionados da viga em flexão analisada nesta dissertação.

2.6.1 Planilhas para caracterização acustoelástica do material

A caracterização acustoelástica de um material elástico e homogêneo consiste na determinação de sua constante acustoelástica m e de sua birrefringência inicial B_0 . Estes parâmetros são levantados através do teste de carga, conforme discutido no item 2.4. Para trabalhar os dados coletados no teste de carga são utilizadas duas planilhas eletrônicas. A primeira permite o cálculo da birrefringência acústica (B) e de sua incerteza associada em cada nível de carga, a partir dos tempos de percurso das ondas ultrassônicas (t_{31} e t_{32}), aquisitados tanto pela metodologia *contínua* quanto pela metodologia *par a par*. A partir destes resultados, a segunda planilha calcula a constante acustoelástica m e a birrefringência inicial B_0 do material, utilizando o método de regressão linear ponderada discutido no item 1.3.2.

Como discutido no item 1.4, a questão da determinação dos algarismos significativos nos valores de m e B_0 tem um tratamento especial. Além da utilização do critério baseado no desvio padrão da média destas grandezas, suas oferecidas duas outras opções baseadas no número de algarismos significativos utilizados e no erro relativo dos dados de entrada relativos ao teste de carga. Na versão atual desta segunda planilha, a escolha da melhor opção é deixada para o usuário. No futuro, algum critério de decisão pode ser estabelecido, a partir da experiência da aplicação da metodologia a um maior número de aplicações práticas.

2.6.2 Planilha para cálculo da diferença entre as tensões principais

Esta terceira planilha apresenta o cálculo automático do valor médio da diferença das tensões principais ($\overline{\Delta T} = T_1 - T_2$) ao longo do caminho percorrido pela onda (usualmente a espessura do material) em pontos pré-selecionados do corpo de prova, a partir de um conjunto de N medidas experimentais. O cálculo deste valor e das incertezas associadas é feito de acordo com as equações (27) e (28) seguindo os procedimentos numéricos discutidos ao longo dos Capítulos 1 e 2.

O número de algarismos significativos a serem retidos nos resultados finais é determinado seguindo o procedimento geral apresentado no item 1.3.2.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Aplicação numérica: estudo de uma viga biapoiada em flexão

Para ilustrar o procedimento numérico proposto para calcular a precisão e a exatidão da técnica de birrefringência acústica como usada no Laboratório Ultrasonic IEN para a determinação de tensões em estruturas, alguns resultados experimentais reportados por Dutra (2009) em sua dissertação de mestrado sobre o comportamento de uma viga sob flexão são exploradas aqui. Uma solução analítica derivada da teoria da resistência dos materiais foi utilizada como valor de referência para cálculo da exatidão dos resultados.

Uma amostra do aço 20 MnMoNi 55 fornecida pela NUCLEP - Nuclebrás Equipamentos Pesados SA - foi utilizada por Dutra (2009) para a fabricação de um corpo de prova, com 107 mm de altura x 95 mm de espessura x 895 mm de comprimento. O corpo de prova foi apoiada em dois pontos (viga biapoiada) com 827 milímetros de distância entre os apoios, e depois carregado até 42.000 Kgf , por uma carga linear distribuída ao longo de um pequeno trecho de sua região central definida a partir da força aplicada e da área da seção reta do pistão de carga (Figura 3.1).



Figura 3.1: Ensaio de flexão na liga de aço 20 MnMoNi 55.

Apenas os pontos localizados ao longo da altura da seção da viga situada na metade de seu comprimento foram selecionados para as medições (pontos C1, C2, C3, C4, e C5 na Figura 3.2).

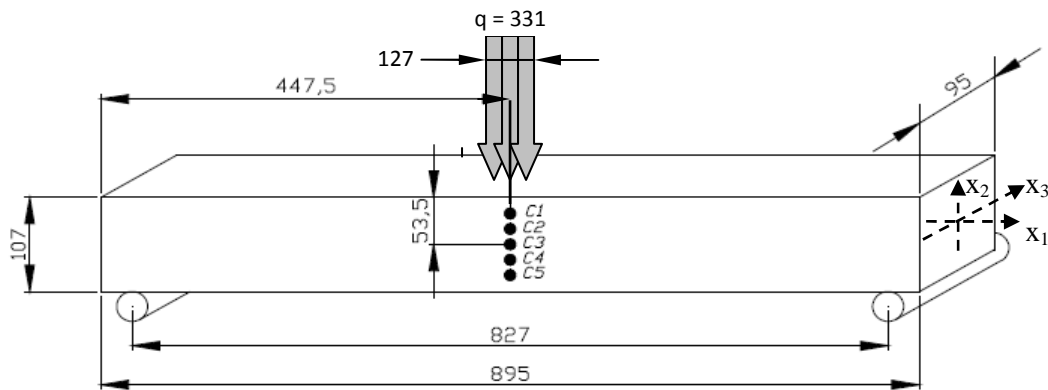


Figura 3.2: Desenho da viga e do carregamento aplicado (dimensões em mm; carga do pistão (q) linearmente distribuída sobre viga (Kgf/mm); (Dutra, 2009).

Um sistema de aquisição de dados usando um transdutor de duplo elemento (emissor e receptor) e 0,5 MHz de frequência foi montado para gerar ondas cisalhantes e captar os seus ecos, a fim de determinar os seus tempos de percurso.

Os sinais do ultrassom foram adquiridos em primeiro lugar com a viga livre de tensões. Foram medidos inicialmente os tempos de percurso das ondas nas direções longitudinal e, transversal, nesta ordem, optando-se pela metodologia contínua, por apresentar maior vantagem e rapidez para este caso. Foram realizadas cinco medições em cada ponto, uma amostra pequena. Em seguida, a viga foi submetida a uma carga de 42.000 Kgf, gerando uma tensão máxima de 48 Kgf/mm^2 , correspondente a 96% do limite de escoamento elástico do aço em estudo.

A técnica contínua foi utilizada para adquirir os sinais ultrassônicos. As ondas de cisalhamento foram propagadas ao longo da espessura e polarizada ao longo dos eixos de simetria material de x_1 (sentido longitudinal: comprimento) e x_2 (direção transversal: altura). Em cada ponto, 5 pares de sinais foram adquiridos para determinar o tempo de percurso médio da onda ultrassônica, perfazendo um total de 10 sinais de aquisição por ponto. Os 5 primeiros sinais foram adquiridos com a onda de cisalhamento polarizada ao longo da direção longitudinal da viga e os restantes 5 com a onda de cisalhamento polarizada ao longo da direção transversal da viga (as direções de simetria do material).

3.2 Caracterização ultrassônica do aço 20 MnMoNi 55

Para se obter a constante acustoelástica, que é o coeficiente angular da reta que aproxima a relação entre a velocidade da onda e da carga aplicada, uma amostra do material da viga com um comprimento de 60 mm e uma seção transversal de 40x40 mm² foi submetido a um carregamento (compressão) composto por 6 incrementos de carga de 5.000 Kgf aplicado uniformemente sobre a amostra (Figura 2.5, repetida abaixo, por conveniência de apresentação).



Figura 2.5: Ensaio uniaxial para determinação da constante acustoelástica (Dutra, 2009)

Ondas cisalhantes foram propagadas ao longo da espessura da viga e polarizadas ao longo dos eixos de simetria do material (direções x_1 e x_2) e seus tempos de percurso foram adquiridos em cada nível de carga. Dutra (2009) considerou dois testes de carga nos quais a direção da carga de compressão é aplicada alinhada, alternativamente, com os eixos de simetria do material x_1 e x_2 , tendo encontrando valores diferentes para a constante acustoelástica. Neste trabalho, a constante acustoelástica para a carga alinhada com o eixo x_2 de simetria do material (direção transversal) foi utilizada para calcular a diferença entre as tensões principais.

Aplicando o procedimento indicado no item 2.4 para a técnica contínua, e tendo em conta os tempos de percurso das ondas longitudinal e transversal, indicados nas Tabelas 1 e 2, foram determinados os seguintes valores esperados (e respectivas incertezas) para a constante acustoelástica e a birrefringência inicial (Tabela 3):

Tabela 1: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas
(sem carregamento)

Técnica Contínua	0 Kgf	
Medidas	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)
1	0,000024504	0,000024660
2	0,000024504	0,000024660
3	0,000024504	0,000024660
4	0,000024504	0,000024660
5	0,000024504	0,000024660
Média	0,000024504	0,000024660
Incertezas	2,50e-10	2,50e-10

a. Considerando a resolução do equipamento e o efeito dos dados interpolados

Tabela 2: Tempos de percurso das ondas ultrassônicas
(com carregamento)

Técnica Contínua	5.000 Kgf		10.000 Kgf		15.000 Kgf	
Medidas	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)
1	0,000024504	0,000024660	0,000024516	0,000024612	0,000024516	0,000024624
2	0,000024516	0,000024660	0,000024516	0,000024624	0,000024528	0,000024636
3	0,000024516	0,000024660	0,000024516	0,000024636	0,000024528	0,000024624
4	0,000024516	0,000024660	0,000024516	0,000024636	0,000024528	0,000024636
5	0,000024516	0,000024660	0,000024516	0,000024636	0,000024528	0,000024624
Média	0,000024514	0,000024660	0,000024516	0,000024629	0,000024526	0,000024629
Incertezas	2,4E-09	2,5E-10	2,5E-10	4,8E-09	2,4E-09	2,9E-09
Técnica Contínua	20.000 Kgf		25.000 Kgf		30.000 Kgf	
Medidas	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)
1	0,000024528	0,000024624	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024636
2	0,000024540	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024612
3	0,000024540	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024600
4	0,000024528	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024600
5	0,000024528	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024600
Média	0,000024533	0,000024614	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024610
Incertezas	2,9E-09	2,4E-09	2,5E-10	2,5E-10	2,5E-10	7,0E-09

a. Inclui a resolução do equipamento e os efeitos da interpolação dos dados.

Tabela 3: Constante acustoelástica e birrefringência inicial do aço 20 MnMoNi 55

Constante acustoelástica - m	$0,000230 \pm 0,000009$ (mm ² /Kgf)
Birrefringência inicial (valor médio) - B_0	$-0,006334 \pm 0,000097$

3.3 Cálculo das diferenças entre as tensões principais

As tabelas 4(a) e 4(b) abaixo fornecem o valor médio esperado para a birrefringência acústica e sua incerteza nos cinco pontos pré-selecionados da seção reta central da viga (pontos C1, C2, C3, C4 e C5).

Tabelas 4(a): Tempo de percurso das ondas e birrefringência nos pontos C1, C2 e C3

CARREGAMENTO	0 Kgf		42.000 Kgf	
Medidas no ponto C1	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)
C1 (1ª medidas)	0,000058770	0,000058650	0,000058560	0,000058680
C1 (2ª medidas)	0,000058810	0,000058650	0,000058560	0,000058650
C1 (3ª medidas)	0,000058780	0,000058650	0,000058560	0,000058650
C1 (4ª medidas)	0,000058780	0,000058650	0,000058560	0,000058680
C1 (5ª medidas)	0,000058780	0,000058650	0,000058560	0,000058680
Média (tempo de percurso)	0,000058784	0,000058650	0,000058560	0,000058668
Incertezas	6,8E-09	2,5E-10	2,5E-10	7,4E-09
Média (birrefringência)	0,0023		-0,0018	
Incertezas	0,0001		0,0001	
C2 (1ª medidas)	0,00005886	0,00005898	0,00005877	0,00005895
C2 (2ª medidas)	0,00005883	0,00005900	0,00005880	0,00005895
C2 (3ª medidas)	0,00005885	0,00005900	0,00005880	0,00005895
C2 (4ª medidas)	0,00005881	0,00005900	0,00005880	0,00005895
C2 (5ª medidas)	0,00005881	0,00005900	0,00005880	0,00005895
Média do tempo de percurso	0,00005883	0,000058996	0,000058794	0,000058695
Incertezas	0,000000001	0,000000004	0,000000006	0,000000003
Media da birrefringência	0,028		-0,0017	
Incertezas	0,0002		0,0001	
C3 (1 st medidas)	0,00005907	0,00005913	0,00005877	0,00005895
C3 (2 nd medidas)	0,00005907	0,00005914	0,00005880	0,00005895
C3 (3 rd medidas)	0,00005907	0,00005914	0,00005880	0,00005895
C3 (4 th medidas)	0,00005907	0,00005914	0,00005880	0,00005895
C3 (5 th medidas)	0,00005907	0,00005914	0,00005880	0,00005895
Média do tempo de percurso	0,00005907	0,000059138	0,000058794	0,000058695
Incertezas	0,000000003	0,000000002	0,000000006	0,000000003
Media da birrefringência	0,00115		-0,0021	
Incertezas	0,0002		0,0002	

Tabelas 4(b): Tempo de percurso das ondas e birrefringência nos pontos C4 e C5

CARREGAMENTO	0 Kgf		42.000 Kgf	
Medidas no ponto C1	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)	Tempo de percurso (longitudinal) (s)	Tempo de percurso (transversal) (s)
C4 (1ª medidas)	0,00005904	0,00005907	0,00005907	0,00005910
C4 (2ª medidas)	0,00005904	0,00005907	0,00005907	0,00005910
C4 (3ª medidas)	0,00005904	0,00005910	0,00005907	0,00005910
C4 (4ª medidas)	0,00005904	0,00005907	0,00005907	0,00005914
C4 (5ª medidas)	0,00005907	0,00005907	0,00005907	0,00005910
Média do tempo de percurso	0,000059046	0,000059076	0,00005905	0,000058925
Incertezas	0,000000006	0,000000006	0,000000007	0,000000001
Média da birrefringência	0,0005		0,0014	
Incertezas	0,0002		0,0002	
C5 (1ª medidas)	0,000058920	0,000059000	0,000059070	0,000058920
C5 (2ª medidas)	0,000058960	0,000059000	0,000059040	0,000058920
C5 (3ª medidas)	0,000058960	0,000059000	0,000059040	0,000058920
C5 (4ª medidas)	0,000058960	0,000059000	0,000059040	0,000058950
C5 (5ª medidas)	0,000058960	0,000059000	0,000059070	0,000058920
Média do tempo de percurso	0,000058952	0,000059000	0,000059052	0,000058926
Incertezas	8,0E-09	2,5E-10	7,4E-09	6,0E-09
Média da birrefringência	-0,0008		0,0021	
Incertezas	0,0001		0,0002	

a. Inclui a resolução do equipamento e os efeitos da interpolação dos dados.

Os valores da birrefringência inicial B_0 nos pontos localizados na seção transversal da viga de C1 a C5 (Tabela 4) indicam que o material da viga é acusticamente *heterogêneo*. A fim de levar em conta essa característica, como uma primeira aproximação, os valores *locais* (isto é, determinados em cada ponto em estudo) da birrefringência inicial B_0 foram utilizados ao invés dos valores médios indicados na tabela 3. Com esta importante consideração, os valores esperados para a diferença entre as tensões principais e sua respectiva incerteza nos pontos C1, C2, C3, C4 e C5 foram calculados pelas equações (27) e (28) e compilados na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Diferença entre as tensões principais nos pontos C1 a C5

Ponto	m (mm ² /Kgf)	B_0	\bar{B}	$\Delta T (= T_1 - T_2)$ (Kgf/mm ²)	Erro relativo (%)
C1	- 0,000230 ± 0,000002	- 0,0023 ± 0,0001	- 0,0018 ± 0,0001	- 17,8 ± 0,6	3,37
C2	- 0,000230 ± 0,000002	0,0028 ± 0,0002	0,0026 ± 0,0001	0,9 ± 0,6	111,11
C3	- 0,000230 ± 0,000002	0,00115 ± 0,00003	0,0006 ± 0,0003	2,4 ± 0,5	20,83
C4	- 0,000230 ± 0,000002	0,0005 ± 0,0002	0,0015 ± 0,0002	-4,0 ± 1,0	25,00
C5	- 0,000230 ± 0,000002	0,0008 ± 0,0001	0,0021 ± 0,0002	12,6 ± 1,0	7,94

3.4 Solução analítica pela resistência dos materiais

Para o caso da viga biapoiada da figura 3.1, de seção retangular, sujeita a ação de uma carga distribuída uniformemente sobre uma pequena área no meio da viga, a magnitude das tensões principais (T_1 na direção longitudinal, x_1) e (T_2 na direção transversal, x_2) são dados pela teoria elementar da Resistência dos Materiais (Timoshenko, 1949). Para pontos localizados na seção central da viga, $x_1 = l/2$, a distribuição da tensões ao longo da direção transversal x_2 ($-h/2 \leq x_2 \leq h/2$) é dada por,

$$T_1\left(\frac{l}{2}, x_2\right) = -\frac{12}{bh^3} \frac{qd}{4} \left(l - \frac{d}{2}\right) x_2 ; \quad T_2\left(\frac{l}{2}, x_2\right) = 0 \quad (31)$$

onde q é a carga exercida pelo pistão numa área retangular (de base d e altura igual à espessura da viga) equivalente à sua seção transversal circular de diâmetro d ; l é a distância longitudinal entre os suportes da máquina de ensaio, h é a altura da viga, e b sua espessura. O carregamento exercido pelo pistão é representado por uma carga linearmente distribuída ao longo da direção longitudinal da viga x_1 , de magnitude q igual ao quociente da força exercida pelo pistão (42.000 Kgf) por seu diâmetro (127 mm).

Os dados de entrada referentes à geometria da viga e à carga aplicada são compilados na Tabela (6), enquanto as tensões principais determinadas nos pontos C_1 a C_5 da viga são mostrada na Tabela 7.

Desta forma, os pontos da seção central da viga acima da linha neutra da viga, definida por $x_2 \equiv 0$, estão submetidos a um estado de compressão, ao passo que aqueles abaixo da linha neutra estão submetidos a um estado de tração.

Tabela 6: Dimensões da viga e sistema de carregamento

Dimensões da viga			Carga uniformemente distribuída		
Comprimento entre apoios (l) (mm)	Espessura (b) (mm)	Altura (h) (mm)	Carga aplicada (Kgf)	Diâmetro do pistão (d) (mm)	Carga por comprimento (q) (Kgf/mm)
827	95	107	42.000	127	331

O aço 20 MnMoNi 55 possui limite de escoamento de 50 Kgf/mm² (490 MPa) a temperatura ambiente (Dutra, 2009). Com base nesta informação, e de modo a manter o material em regime elástico, a tensão máxima de carregamento foi limitada a 96% deste valor limite, isto é, a 48 Kgf/mm². Considerando as dimensões da viga e utilizando conceitos básicos da resistência dos materiais determinou-se a magnitude do carregamento (42.000 Kgf) aplicada pelo pistão da máquina de ensaio.

Tabela 7: Diferença entre as tensões principais nos pontos C1 a C5 pela resistência dos materiais

Ponto	Coordenadas (mm)		Tensões T1 (Kgf/mm ²)	Tensões T2 (Kgf/mm ²)	Delta (T1 – T2) (Kgf/mm ²)
	X ₁	X ₂			
C1	413,5	-35,0	-28,96	0,0	-28,96
C2	413,5	-17,5	-14,48	0,0	-14,48
C3	413,5	0,0	0,00	0,0	0,00
C4	413,5	17,5	14,48	0,0	14,48
C5	413,5	35,0	28,96	0,0	28,96

3.5 Estimativas da precisão e da exatidão dos resultados

Considerando as equações (29) e (30), os resultados nas Tabelas 5 e 7, a precisão e a exatidão no cálculo da diferença de tensões principais nos pontos C1 e C5 são finalmente compiladas na Tabela 8.

Tabela 8: Precisão e exatidão do cálculo da diferença entre as tensões principais nos pontos C1 a C5

Ponto	Técnica da Birrefringência	Delta (T1- T2) (Kgf/mm ²)		
		Precisão (erro relativo) (%)	Resistência dos Materiais	Exatidão (%)
C1	- 17,8 ± 0.6	3,37	-28,96	38,53
C2	0,9 ± 1.0	111,11	-14,48	93,78
C3	2,4 ± 0.5	20,83	0,00	---
C4	-4,0 ± 1,0	25,00	14,48	72,38
C5	12,6 ± 1.0	7,94	28,96	56,49

Os resultados encontrados nos pontos C1 e C5, onde se esperam as maiores diferenças de tensão (T1-T2), indicam que a técnica da birrefringência acústica permite distinguir qualitativamente as regiões da viga sob tração ou sob compressão. Um primeiro resultado de certo interesse prático. A precisão (erro relativo) alcançada nas medidas experimentais das diferenças das tensões principais (T1-T2) nestes pontos é inferior a 8% tendo os resultados 3

algarismos significativos. Comparados aos resultados fornecidos pela resistência dos materiais, a exatidão ficou em torno de 39% e 57%, nos pontos superior C1 (região de compressão) e inferior C5 (região de tração), respectivamente.

Os resultados nos pontos C2, C3 e C4 não apresentaram um boa precisão (erro relativo). Além disto, observa-se que os resultados das diferenças das tensões principais nestes pontos diferem muito dos valores de referência fornecidos pela resistência dos materiais, apresentando ainda uma inversão na identificação dos estados de tensão (se trativo ou compressivo) nos pontos C2 e C4.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um procedimento numérico-experimental para cálculo da precisão e da exatidão da técnica da birrefringência acústica como usada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) para determinação de tensões residuais e aplicadas em estruturas. Este procedimento

Para os pontos mais tensionados da viga biapoiada submetida a flexão simples, estudada nesta dissertação (pontos C1 e C5), a técnica da birrefringência acústica forneceu resultados com razoável precisão (menos de 8% de erro relativo), porém, com pouca exatidão (cerca de 59% diferente dos resultados fornecidos pela resistência dos materiais, tomados como os valores de referência). Ao se avaliar esses resultados, no entanto, deve-se considerar que o material da viga apresentou, em realidade, um comportamento acusticamente heterogêneo, como destacado no item 3.3 (Tabela 4). Devido a estas características, algumas aproximações foram implicitamente introduzidas no presente estudo: o uso da hipótese teórica básica da acustoelasticidade (isto é, a de homogeneidade acústica do material), e a utilização da birrefringência local no cálculo das diferenças de tensões principais em lugar da birrefringência média do material. Uma possível explicação para este fato pode advir das acentuadas divergências observadas nas análises microestruturais do aço em estudo. Segundo Dutra (2009), elas são devidas, principalmente, às dimensões e às variações na composição química da peça da liga de aço 20 MnMoNi 55. Como as propriedades mecânicas e a microestrutura são função, fundamentalmente, da taxa de resfriamento no tratamento térmico de têmpera, que em determinadas situações deve ser seguido do tratamento térmico de revenimento, a diferença da taxa de resfriamento ao longo de uma espessura de uma estrutura de grandes dimensões pode provocar variação nas suas propriedades mecânicas, gerando no interior deste aço uma região com comportamento diferenciado, identificada como “banda de segregação”. Assim, o material do corpo de prova estudado deixa de ser mecanicamente homogêneo, e, por consequência, deixa de ser também acusticamente homogêneo. A realização de outros ensaios de flexão com vigas manufaturados com diferentes materiais estruturais e menores dimensões ajudará a esclarecer a questão.

5 SUGESTÕES PARA ESTUDO POSTERIOR

Alguns temas são sugeridos para continuação deste trabalho, a saber:

- Aplicar o procedimento numérico desenvolvido a vários outros exemplos de estruturas submetidas a estado plano de tensões de modo a ter uma percepção mais consistente do grau de precisão e da exatidão dos resultados que se pode obter com a técnica da birrefringência acústica para avaliação de tensões residuais e aplicadas.
- Desenvolver uma interface que facilite a incorporação do conjunto de planilhas do Excel desenvolvidas neste trabalho aos programas automáticos *Wave star* e *Chronos* utilizados no LABUS/IEN que captam e processam os sinais eletrônicos para obtenção dos valores de birrefringência e tensões; e,
- Estender o procedimento numérico desenvolvido para o caso em que as direções das tensões principais não estão alinhadas com os eixos de simetria ortotrópica do material. Isso irá requerer a modificação das Equações (1) e (2), como discutido, por exemplo, por Ortega et al., 2011.

REFERÊNCIAS

- BITTENCOURT, M. da S. Q. Desenvolvimento de um Sistema de Medida do Tempo Decorrido da Onda Ultra-sônica e Análise do Estado de Tensões em Materiais Metálicos pela Técnica da Birrefringência Acústica. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- BARONI, D. B. Desenvolvimento de Técnica Ultra-sônica para Medida de Porosidade em Pastilhas de UO₂. Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2008.
- DUTRA, M. A. M. Avaliação Acustoelástica do Aço 20 MnMoNi 55, Material Estrutural do Vaso de Pressão dos Reatores Nucleares de Angra II e Angra III. Dissertação de mestrado, Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009.
- HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. Second-order elastic deformation of solids. *Physics Review*, Vol. 92, No. 5, p. 1145 – 1149, 1953.
- HSU, N. N. Acoustical birefringence and the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis. *Experimental Mechanics*, v.14, p. 169-176, 1974.
- MURNAGHAN, F. D. Finite deformation of an elastic solid. *American Journal of Mathematics*, v. 59 (2), p. 235 – 260, 1937.
- ORTEGA, L. P. C.; BITTENCOURT, M. S. Q.; LAMY, C. A.; PAYÃO FILHO, J. C.; GONÇALVES FILHO, O. J. A. *Introdução à avaliação de tensões por ultrassom*. Editora Virtual Científica, Rio de Janeiro, 2011.
- SANTORO, A., MAHON, J. R., DE OLIVEIRA, J. U. C. L., MUNDIN FILHO, L., OGURI, V., DA SILVA, W. L. P. *Estimativas e erros em experimentos de física*. Editora da UERJ, Rio de Janeiro, 2005.
- SCHNEIDER, E. Ultrasonic birefringence effect – its application for materials characterization. *Optics and Laser in Engineering*, v.22, p.305-323, 1995.
- TAYLOR, J.R. *Error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. 2nd. edition, University Science Books, Sausalito, 1997.
- THOMPSON, R. B.; LEE, S. S.; SMITH, J. F. Angular dependence of ultrasonic wave propagation in a stressed, orthorhombic continuum: theory and application to the measurement of stress and texture. *Journal of Acoustical Society of America*, v.80, p. 921 – 931, 1986.
- TIMOSHENKO, S. P. *Strengthen of Materials*, D. Van Nostrand Company, Inc., 2nd edition, New York, 1949.
- VUOLO, J. H. *Fundamentos da teoria dos erros*. 2^a edição. Editora Blücher Ltda., Rio de Janeiro, 1976.

APÊNDICE A

A.1 - Planilhas de cálculo para caracterização acustoelástica do material

Esquemas de subdivisão das planilhas de cálculo para efeito de sua apresentação nas páginas subsequentes:

Planilha de cálculo da birrefringência acústica

Página A Parte 1	Página B Parte 3
Página A Parte 2	Página B Parte 4

Planilha de cálculo da constante acustoelástica e da birrefringência inicial

Página C Parte 5
Página C Parte 6

**Planilha de cálculo da birrefringência acústica
(página A, partes 1 e 2)**

Parte 1

CÁLCULO DA BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA PELO MÉTODO CONTÍNUO						
LEGENDA	0 kgf		5000 kgf		10000 kgf	
PONTO No.	1	1	2	2	3	3
	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
Leituras de tempo	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001
Tempo de amostragem	0,000024504	0,00002466	0,000024504	0,00002466	0,000024516	0,000024612
No. Máx.: 10 medidas	1	2	3	4	5	6
	2	3	4	5	6	7
	3	4	5	6	7	8
	4	5	6	7	8	9
	5	6	7	8	9	10
	6	7	8	9	10	
	7	8	9	10		
	8	9	10			
	9	10				
	10					
No med. (<=10)	5	5	5	5	5	5
Média	0,000024504	0,00002466	2,45136E-05	0,00002466	0,000024516	2,46288E-05
Desv padrão estatístico	0,000E+00	3,388E-21	4,800E-09	3,388E-21	0,000E+00	9,600E-09
Desv padrão sistemático	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10
Desv padrão TOTAL	5,000E-10	5,000E-10	4,826E-09	5,000E-10	5,000E-10	9,613E-09
Desvio padrão experim.	5,590E-10	5,590E-10	5,396E-09	5,590E-10	5,590E-10	1,075E-08
Desvio padrão da MÉDIA	2,50E-10	2,50E-10	2,41E-09	2,5E-10	2,5E-10	4,8E-09
Covariância (T long; T tr)	0,000E+00		4,592E-42		0,000E+00	
No casas decimais	10	10	9	10	10	9
No algs significativos	6	6	5	6	6	5
MEDIDA do TEMPO	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
Tempo	0,0000245040	0,0000246600	0,000024514	0,0000246600	0,0000245160	0,000024629
+ / - erro	0,0000000003	0,0000000003	0,000000002	0,0000000003	0,0000000003	0,0000000005
Erro relativo (%)	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,02%

Parte 2

CÁLCULO DA BIRREFRINGÊNCIA - B (Método CONTÍNUO)			
Valor aritmético	0,006346107	0,005938097	0,004598637
Desv Pad Birr Média	1,4E-05	9,9E-05	2,0E-04
No. Casas decimais	5	5	4
No algs. Significativos	3	3	2
BIRREFRINGÊNCIA	0,00635	0,00594	0,0046
+ / - erro	0,00001	0,00010	0,0002
Erro relativo (%)	0,16%	1,68%	4,35%
PREC EXP (%) = 1 - err rel	99,84%	98,32%	95,65%
TESTE DE CARGA			
Unidades (kgf; mm)			
Carga (val. médio) - T1 =T long	0	0	0
Carga (val. médio) - T2 =T transv	0	-5000	-10000
Carga (T1 - T2)	0	5000	10000
Desv padr da média da carga	60	60	60
Seção reta (base) +/- desv pad	40	40	40
Seção reta (altura)+/- desv pad	40	40	40
Seção reta (área) (valor médio)	1600	1600	1600
Desv padr da MÉDIA seção reta)	0,00	0,00	0,00
Delta T (=T1-T2)(val aritm)	0	3,125	6,25
Desv Padr da MÉDIA	5,0E-01	3,8E-02	3,8E-02
No casas decimais	1	2	2
No algs significativos	1	3	3
Delta T (= T1 - T2)	0,0	3,13	6,25
+ / - erro	0,5	0,04	0,04
Erro relativo (%)		1,28%	0,64%
PREC EXP (%) = 1 - err rel		98,72%	99,36%

Planilha de cálculo da birrefringência acústica (cont.)

(página B, partes 3 e 4)

Parte 3

15000 kgf		20000 kgf		25000 kgf		30000 kgf	
4	4	5	5	6	6	7	7
T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001
0,000024516	0,000024624	0,000024528	0,000024624	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024636
0,000024528	0,000024636	0,00002454	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,000024612
0,000024528	0,000024624	0,00002454	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,0000246
0,000024528	0,000024636	0,000024528	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,0000246
0,000024528	0,000024624	0,000024528	0,000024612	0,000024552	0,000024612	0,000024552	0,0000246
5	5	5	5	5	5	5	5
2,45256E-05	2,46288E-05	2,45328E-05	2,46144E-05	0,000024552	0,000024612	0,000024552	2,46096E-05
4,800E-09	5,879E-09	5,879E-09	4,800E-09	3,388E-21	0,000E+00	3,388E-21	1,399E-08
5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10
4,826E-09	5,900E-09	5,900E-09	4,826E-09	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	1,400E-08
5,396E-09	6,596E-09	6,596E-09	5,396E-09	5,590E-10	5,590E-10	5,590E-10	1,566E-08
2,4E-09	2,9E-09	2,9E-09	2,4E-09	2,5E-10	2,5E-10	2,5E-10	7,0E-09
1,152E-17		-1,152E-17		0,000E+00		-4,592E-42	
9	9	9	9	10	10	10	9
5	5	5	5	6	6	6	5
T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
0,000024526	0,000024629	0,000024533	0,000024614	0,0000245520	0,0000246120	0,0000245520	0,000024610
0,000000002	0,000000003	0,000000003	0,000000002	0,0000000003	0,0000000003	0,0000000003	0,000000007
0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%

Parte 4

0,004190825	0,003296234	0,00244081	0,002359546
1,3E-04	1,8E-04	1,4E-05	2,8E-04
4	4	5	4
2	2	3	2
0,0042	0,0033	0,00244	0,0024
0,0001	0,0002	0,00001	0,0003
2,38%	6,06%	0,41%	12,50%
97,62%	93,94%	99,59%	87,50%
0	0	0	0
-15000	-20000	-25000	-30000
15000	20000	25000	30000
60	60	60	60
40	40	40	40
40	40	40	40
1600	1600	1600	1600
0,00	0,00	0,00	0,00
9,375	12,5	15,625	18,75
3,8E-02	3,8E-02	3,8E-02	3,8E-02
2	2	2	2
3	4	4	4
9,38	12,50	15,63	18,75
0,04	0,04	0,04	0,04
0,43%	0,32%	0,26%	0,21%

**Planilha de cálculo da constante acustoelástica e da birrefringência inicial
(página C, partes 5 e 6)**

Parte 5

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA (método da regressão linear ponderada)						
Birrefringências calculadas pelo método (indicar): (Se Método Contínuo, D3 = 1; Se método Par-a-Par, D3 = 2)				1 CONTÍNUO		
MEDIDAS (Max. 10)	Birrefringência	Erro (+/-)	Erro relativo	Tensão	Erro (+/-)	Erro relativo
1	0,00635	0,00001	0,16%	0	0,5	
2	0,00594	0,0001	1,68%	3,13	0,04	1,28%
3	0,0046	0,0002	4,35%	6,25	0,04	0,64%
4	0,0042	0,0001	2,38%	9,38	0,04	0,43%
5	0,0033	0,0002	6,06%	12,5	0,04	0,32%
6	0,00244	0,00001	0,41%	15,63	0,04	0,26%
7	0,0024	0,0003	12,50%	18,75	0,04	0,21%
8						
9						
10						
No med. (<=10)	7	7		7	7	
Média	0,004175714	0,000131429		9,377142857	0,105714286	
Desvio padrão	1,462E-03	9,949E-05		6,250E+00	1,610E-01	
Covariância (Birrefring.; Tensão)	-8,995E-03					
Coefficiente de Pearson	-9,847E-01					
Cálculo do VALOR ARITMÉTICO						
	Const. Acustoelástic:		Birrefring. Inicial			
Valor aritmético	-2,303E-04		6,335E-03			
Cálculo do DESVIO PADRÃO						
	MEDIDAS (máx 10)					
Inverso da soma dos quadrados ...	1	7,4863E+07				
... do peso por medida	2	9,9159E+07				
	3	2,4947E+07				
	4	9,9159E+07				
	5	2,4947E+07				
	6	5,4098E+09				
	7	1,1101E+07				
	8					
	9					
	10					
Peso ponderado		1,3195E-05				

Parte 6

Desvio padrão	Const. Acustoelástic: 2,1E-06		Birrefring. Inicial 2,4E-05	
Determinação do no. de ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS com base no desvio padrão				
	Const. Acustoelástic:		Birrefring. Inicial	
No casas decimais	6	5		
No MAX algs signif	3	3		
No algs signif (menor dos máxs.)	3			
Determinação do no. de ALGs SIGNIFICATIVOS com base no núm. MÁX. de algs signif dos dados de entrada (birref. e tensão)				
	Birrefringência	Tensão		
No min casas decimais	4	1		
No MAX algs signif	2	1		
No algs signif (menor dos máxs.)	1			
DETERMINAÇÃO FINAL DO NÚMERO DE ALGARISMOS SIGNIFICATIVOS com base nos erros relativos das variáveis de interesse				
	Birrefringência	Tensão		
Erro relativo nos dados de entrada				
Valor mínimo	0,16%	0,21%		
Valor máximo	12,50%	1,28%		
Valor médio (média aritmética)	6,33%	0,75%		
Erro relativo na const. Acustoelast	0,92%	-4,35%		
No min casas decimais	6	5		
No min algs signif	3	2		
CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA				
+ / - erro	-0,000230	-0,00023		
	0,000002	0,00001		
BIRREFRINGÊNCIA INICIAL				
+ / - erro	0,006335	0,00634		
	0,000024	0,00001		

A.2 - Planilha de cálculo das tensões

Esquema de subdivisão da planilha para efeito de sua apresentação nas páginas subsequentes:

Planilha de cálculo das tensões

Página D Parte 7	Página E Parte 9	Página F Parte 11
Página D Parte 8	Página E Parte 10	Página F Parte 12

Planilha de cálculo das tensões
(Página D, partes 7 e 8)

Parte 7

CÁLCULO DAS TENSÕES						
Birrefringências calculadas pelo método (indicar):						
(Se Método Contínuo, D3 = 1; Se método Par-a-Par, D3 = 2)						
CONSTANTE ACUSTOELÁSTICA = -0,00023 +/- 0,000002 -0,00023						
LEGENDA	0 kgf		42000 Kgf		0 kgf	
PONTO No.	C1	C1	C1	C1	C2	C2
Leituras de tempo	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
Tempo de amostragem	0,00000001	0,00000001	0,00000001	0,00000001	0,00000001	0,00000001
No. Máx.: 10 medidas	1	1	1	1	1	1
	0,00005877	0,00005865	0,00005856	0,00005868	0,00005886	0,00005898
	0,00005881	0,00005865	0,00005856	0,00005865	0,00005883	0,00005900
	0,00005878	0,00005865	0,00005856	0,00005865	0,00005885	0,00005900
	0,00005878	0,00005865	0,00005856	0,00005868	0,00005881	0,00005900
	0,00005878	0,00005865	0,00005856	0,00005868	0,00005881	0,00005900
No med. (<=10)	5	5	5	5	5	5
Média	0,000058784	0,00005865	0,00005856	0,000058668	0,000058832	0,000058996
Desv padrão estatístico	1,356E-08	0,000E+00	0,000E+00	1,470E-08	2,040E-08	8,000E-09
Desv padrão sistemático	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10
Desv padrão TOTAL	1,357E-08	5,000E-10	5,000E-10	1,471E-08	2,040E-08	8,016E-09
Desvio padrão experim.	1,518E-08	5,590E-10	5,590E-10	1,644E-08	2,281E-08	8,962E-09
Desvio padrão da MÉDIA	6,79E-09	2,50E-10	2,50E-10	7,4E-09	1,02E-08	4,01E-09
Covariância (T long; T tr)	0,000E+00		0,000E+00		-1,120E-16	
No casas decimais	9	10	10	9	8	9
No algs significativos	5	6	6	5	4	5

Parte 8

MEDIDA do TEMPO	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
Tempo	0,000058784	0,0000586500	0,0000585600	0,000058668	0,00005883	0,000058996
+ / - erro	0,000000007	0,0000000003	0,0000000003	0,000000007	0,000000001	0,0000000004
Erro relativo (%)	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,01%
PREC EXP (%) = 1 - err rel	99,99%	100,00%	100,00%	99,99%	99,98%	99,99%
CÁLCULO DA BIRREFRINGÊNCIA - B (Método CONTÍNUO)						
Valor aritmético	-0,002282133		0,001842563		0,002817714	
Desv Pad Birr Média	1,2E-04		1,3E-04		2,2E-04	
No. Casas decimais	4		4		4	
No algs. Significativos	2		2		2	
	B(0)		B(x)		B(0)	
BIRREFRINGÊNCIA	-0,0023		0,0018		0,0028	
+ / - erro	0,0001		0,0001		0,0002	
Erro relativo (%)	4,35%		5,56%		7,14%	
PREC EXP (%) = 1 - err rel	95,65%		94,44%		92,86%	
TENSÕES (T1 - T2)	C1				C2	
Unidades (kgf; mm)						
B(x) - B(0)	0,0041				-0,0002	
m	-0,00023				-0,00023	
Delta T (= T1 - T2)	-17,82608696				0,869565217	
Delta T (T long - T transv)						
Delta T (valor aritmético)	-17,82608696				0,869565217	
Desv Padr da MÉDIA	6,3E-01				9,7E-01	
No casas decimais	1				1	
No algs significativos	3				1	
Delta T (= T1 - T2)	-17,8				0,9	
+ / - erro	0,6				1,0	
Erro relativo (%)	3,37%				111,11%	

Planilha de cálculo das tensões (cont.)
(Página E, partes 9 e 10)

Parte 9

+/- 0,000002		-0,00023		+/- 0,000002		
42000 Kgf C2	0 kgf C3	42000 Kgf C3	0 kgf C4			
T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long
0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001
0,00005877	0,00005895	0,00005907	0,00005913	0,00005907	0,00005910	0,00005904
0,00005880	0,00005895	0,00005907	0,00005914	0,00005907	0,00005910	0,00005904
0,00005880	0,00005895	0,00005907	0,00005914	0,00005907	0,00005910	0,00005904
0,00005880	0,00005895	0,00005907	0,00005914	0,00005907	0,00005914	0,00005904
0,00005880	0,00005895	0,00005907	0,00005914	0,00005907	0,00005910	0,00005907
5	5	5	5	5	5	5
0,000058794	0,00005895	0,00005907	0,000059138	0,00005907	0,000059108	0,000059046
1,200E-08	6,776E-21	0,000E+00	4,000E-09	0,000E+00	1,600E-08	1,200E-08
5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10
1,201E-08	5,000E-10	5,000E-10	4,031E-09	5,000E-10	1,601E-08	1,201E-08
1,343E-08	5,590E-10	5,590E-10	4,507E-09	5,590E-10	1,790E-08	1,343E-08
6,01E-09	2,5E-10	2,50E-10	2,02E-09	2,50E-10	8,0E-09	6,01E-09
0,000E+00		0,000E+00		0,000E+00		-3,600E-17
9	10	10	9	10	9	9
5	6	6	5	6	5	5

Parte 10

T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long
0,000058794	0,0000589500	0,0000590700	0,000059138	0,0000590700	0,000059108	0,000059046
0,000000006	0,0000000003	0,0000000003	0,000000002	0,0000000003	0,000000008	0,000000006
0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%
99,99%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,99%	99,99%
0,002649817		0,001150514		0,000643098		0,000507949
1,0E-04		3,4E-05		1,4E-04		1,6E-04
4		5		4		4
2		3		1		1
B(x)		B(0)		B(x)		B(0)
0,0026		0,00115		0,0006		0,0005
0,0001		0,00003		0,0001		0,0002
3,85%		2,61%		16,67%		40,00%
96,15%		97,39%		83,33%		60,00%
		C3				C4
		-0,00055				0,001
		-0,00023				-0,00023
		2,391304348				-4,347826087
		2,391304348				-4,347826087
		4,5E-01				1,2E+00
		1				0
		2				1
		2,4				-4
		0,5				1
		20,83%				25,00%

Planilha de cálculo das tensões (cont.)
(Página F, partes 11 e 12)

Parte 11

				-0,00023	+/-	0,000002		
	C4	42000 Kgf C4	C4	0 kgf C5	C5	42000 Kgf C5	C5	
	T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv	
	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	0,000000001	
	0,00005907	0,00005907	0,00005918	0,00005892	0,000059	0,00005907	0,00005892	
	0,00005907	0,00005907	0,00005914	0,00005896	0,000059	0,00005904	0,00005892	
	0,0000591	0,00005907	0,00005917	0,00005896	0,000059	0,00005904	0,00005892	
	0,00005907	0,00005907	0,00005914	0,00005896	0,000059	0,00005904	0,00005895	
	0,00005907	0,00005907	0,00005919	0,00005896	0,000059	0,00005907	0,00005892	
	5	5	5	5	5	5	5	
0,000059076	0,00005907	0,000059164	0,000058952	0,000059	0,000059052	0,000058926		
1,200E-08	0,000E+00	2,059E-08	1,600E-08	6,776E-21	1,470E-08	1,200E-08		
5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10	5,000E-10		
1,201E-08	5,000E-10	2,060E-08	1,601E-08	5,000E-10	1,471E-08	1,201E-08		
1,343E-08	5,590E-10	2,303E-08	1,790E-08	5,590E-10	1,644E-08	1,343E-08		
6,01E-09	2,50E-10	1,0E-08	8,00E-09	2,50E-10	7,35E-09	6,0E-09		
	0,000E+00		-2,755E-41		-7,200E-17			
9	10	8	9	10	9	9		
5	6	4	5	6	5	5		

Parte 12

T transv	T long	T transv	T long	T transv	T long	T transv
0,000059076	0,0000590700	0,00005916	0,000058952	0,0000590000	0,000059052	0,000058926
0,000000006	0,0000000003	0,000000001	0,000000008	0,0000000003	0,000000007	0,000000006
0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%
99,99%	100,00%	99,98%	99,99%	100,00%	99,99%	99,99%
	0,001522456		0,00081389		-0,002135991	
	1,7E-04		1,4E-04		1,8E-04	
	4		4		4	
	2		1		2	
	B(x)		B(0)		B(x)	
	0,0015		0,0008		-0,0021	
	0,0002		0,0001		0,0002	
	13,33%		12,50%		9,52%	
	86,67%		87,50%		90,48%	
			C5			
			-0,0029			
			-0,00023			
			12,60869565			
			12,60869565			
			9,8E-01			
			1			
			3			
			12,6			
			1,0			
			7,94%			