



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Fabricio Santos Velozo

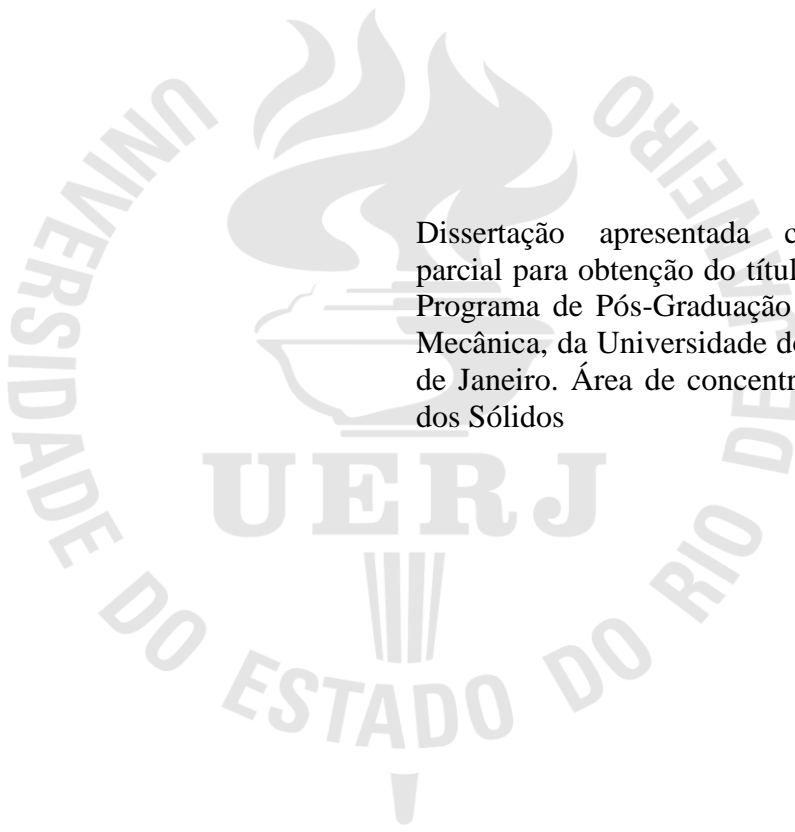
**Implementação de um algoritmo numérico para solução da equação de
Christoffel generalizada em acustoelasticidade**

Rio de Janeiro

2012

Fabricio Santos Velozo

**Implementação de um algoritmo numérico para solução da equação de
Christoffel generalizada em acustoelasticidade**



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. Dr. Mauro Carlos Lopes Souza
Prof. Dr. Orlando João Agostinho Gonçalves Filho

Rio de Janeiro

2012

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

V444 Velozo, Fabricio Santos.
Implementação de um algoritmo numérico para solução da equação de Christoffel generalizada em acustoelasticidade / Fabricio Santos Velozo. – 2012.
67f: il.

Orientadores: Mauro Carlos Lopes Souza e Orlando João Agostinho Gonçalves Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Equação de Christoffel – Dissertação. I. Souza, Mauro Carlos Lopes. II. Gonçalves Filho, Orlando João Agostinho. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621

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

Assinatura

Data

Fabricio Santos Velozo

Implementação de um algoritmo numérico para solução da equação de Christoffel generalizada em acustoelasticidade

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

Aprovado em: 31 de agosto de 2012.

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Carlos Antonio de Moura
Faculdade de Engenharia - UERJ

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

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

Prof. Dr. Marcelo de Siqueira Queiroz Bittencourt
Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN
Instituto de Engenharia Nuclear - IEN

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e aos meus amigos, sem o apoio dos quais não teria sido possível a sua realização.

AGRADECIMENTOS

A parte de agradecimentos é uma tarefa muito difícil, mesmo porque, muitas vezes por esquecimento, deixamos de mencionar pessoas que também contribuíram, mesmo que indiretamente, para esse trabalho.

Primeiramente, devo agradecer a Deus e a minha família, sem o apoio da qual nada disso seria possível.

Meus agradecimentos ao meu orientador, Dr. Mauro C. L. Souza pelo carinho e competência com que acolheu este trabalho, ao Dr. Orlando J. A. Gonçalves Filho que foi o coordenador, tutor intelectual e grande motivador deste estudo, e ao Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), por aceitar-me na qualidade de aluno colaborador do Laboratório de Ultrassom, do Serviço de Tecnologia de Materiais do Instituto.

E, finalmente, sempre me esquecendo de alguém, aos grandes amigos de estudo e de república que fiz ao longo dessa trajetória acadêmica.

RESUMO

VELOZO, Fabricio Santos. *Implementação de um algoritmo numérico para solução da equação de Christoffel generalizada em acustoelasticidade*. 2012. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Extensos estudos realizados nas últimas décadas sobre a propagação de ondas ultrassônicas em sólidos levaram ao desenvolvimento de técnicas não destrutivas para a avaliação da segurança e integridade de estruturas e componentes industriais. O interesse na aplicação de técnicas ultrassônicas para medição de tensões aplicadas e residuais decorre da mudança mensurável da velocidade das ondas ultrassônicas na presença de um campo de tensões, fenômeno conhecido como efeito acustoelástico. Uma teoria de acustoelasticidade fornece um meio atrativo e não destrutivo de medir a tensão média ao longo do caminho percorrido pela onda. O estudo da propagação das ondas ultrassônicas em meios homogêneos anisotrópicos sob tensão conduz a um problema não linear de autovalores dado pela equação de Christoffel generalizada. A característica não linear deste problema decorre da interdependência entre as constantes elásticas efetivas do material e as tensões atuantes. A medição experimental de tensões por técnicas ultrassônicas é um problema inverso da acustoelasticidade. Esta dissertação apresenta a implementação de um algoritmo numérico, baseado no método proposto por Degtyar e Rokhlin, para solução do problema inverso da acustoelasticidade em sólidos ortotrópicos sujeitos a um estado plano de tensões. A solução da equação de Christoffel generalizada apresenta dificuldades de natureza numérica e prática. A estabilidade e a precisão do algoritmo desenvolvido, bem como a influência das incertezas na medição experimental das velocidades das ondas ultrassônicas, foram então investigadas. Dados sintéticos para as velocidades das ondas ultrassônicas de incidência oblíqua em uma placa sujeita a um estado plano de tensões foram gerados pela solução direta da equação de Christoffel generalizada para ilustrar a aplicação do algoritmo desenvolvido. O objetivo maior desta dissertação é a disponibilização de uma nova ferramenta de cálculo para suporte às atividades experimentais de medição de tensões por ultrassom no país.

Palavras-chave: Acustoelasticidade; Equação de Christoffel generalizada; Algoritmo numérico.

ABSTRACT

Extensive studies carried out in the last decades on the propagation of ultrasonic waves in solids led to the development of nondestructive techniques for the assessment of the safety and integrity of industrial structures and components. The interest in the application of ultrasound techniques for stress measurement for example comes from the measurable change in the speed of the ultrasonic elastic waves in the presence of a stress field, a phenomenon known as acoustoelastic effect. An acoustoelastic theory provides an attractive way of non-destructively measuring the average stress along the wave's path. The study of the propagation of ultrasonic waves in homogenous anisotropic bodies under stress leads to a nonlinear eigenvalue problem given by the generalized Christoffel equation. The nonlinearity characteristic of the problem derives from the interdependence between the material's effective elastic constants and the acting stresses. The experimental measurement of stresses using ultrasound techniques is an inverse problem of acoustoelasticity. This dissertation presents the implementation of a numeric algorithm, based on the method proposed by Degtyar and Rokhlin, for solution of the inverse problem of acoustoelasticity in orthotropic solids subjected to a plane stress state. The solution of the generalized Christoffel equation poses difficulties of numerical and practical order. The stability and precision of the algorithm developed, as well as the influence of the experimental uncertainties in the measurement of the speed of the ultrasonic waves, were thus investigated. Synthetic data for the speeds of ultrasonic waves of oblique incidence in a plane-stress plate were generated to illustrate the application of the algorithm developed. The main objective of this dissertation is to make available in the country a new numerical tool to support the use of ultrasonic waves for experimental stress analysis.

Keywords: Acoustoelasticity, Generalized Christoffel equation, Numeric algorithm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	Elemento de controle e componentes do tensor de tensões	10
Figura 1.2	Distribuição aleatória dos cristais sem textura	16
Figura 1.3	Distribuição não aleatória dos cristais com textura	16
Figura 1.4	Efeito da textura e da tensão em ondas ultrassônicas	17
Figura 2.1	Orientação do plano de propagação das ondas em relação ao plano de tensões	19
Figura 2.2	Fluxograma do algoritmo de inversão.	22
Figura 3.1	Gráficos com menos 20% de desvio nos parâmetros C11 e a tensão	38
Figura 3.2	Gráficos com mais 20% de desvio nos parâmetros C11 e a tensão	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Notações tensorial e reduzida para tensões e deformações	12
Tabela 2.1	Informações de erros	28
Tabela 3.1	Valores reconstruídos das constantes elásticas e da tensão	36
Tabela 3.2	Estudo da influência da dispersão dos dados experimentais	39

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

K	Constante acustoelstica
σ	Tensão aplicada (pascal)
ν	Coefficiente de Poisson (adimensional)
ε_x	Deformao em x (transversal)
ε_y	Deformao em y (transversal)
ε_z	Deformao em z (longitudinal)
$\frac{\partial P}{\partial V}$	Derivada parcial da pressão em relao ao volume
σ_{ij}^0	Tensor de tensão de Cauchy
σ_{ij}	Primeiro tensor de tensão de Piola – Kirchhoff
ε_{kl}	Deformao elástica devido  propagao da onda
$\mu_{i,k}$	Gradiente de deslocamento
C_{ijkl}	Tensor de quarta ordem das constantes elásticas dependentes da tensão
u_i	Vetor deslocamento
ρ	Densidade
δ_{ij}	Delta de Kronecker
p_i	Vetor unitário de deslocamento na direo de polarizao da onda
k	Número de ondas
n_i	Vetor normal  frente de onda no sentido de propagao da onda
V^{exp}	Velocidade de fase da onda ultrassnica (valor experimental)
V^{calc}	Velocidade de fase da onda ultrassnica (valor calculado)
QL	Onda ultrassnica quase longitudinal
QT	Onda ultrassnica quase transversal

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	1
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
1.1	Propagação de ondas ultrassônicas em sólidos ortotrópicos sob tensão ...	7
1.1.1	<u>Equações constitutivas para materiais ortotrópicos</u>	9
1.2.	Teoria acustoelástica de Man e Lu	13
1.2.1	<u>A equação de Christoffel generalizada</u>	14
1.3	Influência da textura sobre a velocidade das ondas ultrassônicas	16
2	METODOLOGIA E MATERIAIS	18
2.1	Considerações iniciais	18
2.2	Método de Degtyar e Rokhlin para determinação das constantes elásticas e das tensões absolutas	18
2.2.1	<u>Tensões principais ao longo dos eixos de simetria ortotrópica. Propagação das ondas ultrassônicas em plano perpendicular ao plano de tensões</u>	19
2.2.2	<u>Tensões principais fora dos eixos de simetria ortotrópica. Propagação das ondas no plano de tensões</u>	21
2.3	Fluxograma para a construção do algoritmo de inversão	22
2.4.	Método de Levenberg-Marquardt para solução do problema de mínimos quadrados não linear	23
2.5	Programa em FORTRAN para solução do problema de mínimos quadrados não linear	24
2.5.1	<u>Uso da biblioteca IMSL</u>	25
2.5.2	<u>Comentários sobre o programa fonte</u>	27
2.6	Geração de dados sintéticos	31
2.6.1	<u>Solução direta da equação de Christoffel</u>	32
2.6.2	<u>Constantes elásticas efetivas para um estado geral de tensões em um material ortotrópico</u>	33
2.7	Material de referência: Alumínio texturizado	35
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
3.1	<u>Influência do número de ondas ultrassônicas utilizadas na estimativa das constantes elásticas e das tensões atuantes</u>	36

3.2	<u>Estabilidade e precisão do algoritmo</u>	37
3.3	<u>Influência do erro das medidas experimentais das velocidades das ondas ultrassônicas na estimativa das constantes elásticas e tensões atuantes</u>	39
4	CONCLUSÕES	40
5	SUGESTÕES PARA ESTUDO POSTERIOR	42
	BIBLIOGRAFIA	43
	APÊNDICES	45
	A.1 Listagem do programa fonte para solução do problema direto	45
	A.2 Listagem do programa fonte para solução do problema inverso	48