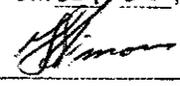


Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por FRANCISCO
SOCLEAN A. VANZELER aprovada
na comissão julgadora em 24/06/1999.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**Uma Comparação entre Dois Algoritmos de
Otimização Global (Algoritmo Genético e
Evolução Diferencial) para Inversão de
Coeficientes de Reflexão em Meios Fraturados**

Autor: Francisco Joclean Alves Vanzeler
Orientador: Ivan De Araújo Simões Filho
Coorientador: Jessé Carvalho Costa

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

**Uma Comparação entre Dois Algoritmos de
Otimização Global (Algoritmo Genético e
Evolução Diferencial) para Inversão de
Coeficientes de Reflexão em Meios Fraturados**

**Autor: Francisco Joclean Alves Vanzeler
Orientador: Ivan De Araújo Simões Filho
Coorientador: Jessé Carvalho Costa**

Curso : Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, Junho -1999
S.P. - Brasil



28610000

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	V396c
V.	Ex.
TOMBO BC/	42015
PROC.	16-278100
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC.º	R\$11,00
DATA	31108100
N.º CPD	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

CM-00145857-2

V396c

Vanzeler, Francisco Joclean Alves

Uma comparação entre dois algoritmos de otimização global (Algoritmo genético e evolução diferencial) para inversão de coeficientes de reflexão em meios fraturados. / Francisco Joclean Alves Vanzeler.-- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Ivan de Araújo Simões Filho, Jessé Carvalho Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Geofísica. 2. Otimização matemática. 3. Algoritmos genéticos. I. Simões Filho, Ivan de Araújo. II. Costa, Jessé Carvalho. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

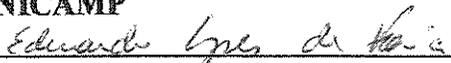
**Uma Comparação entre Dois Algoritmos de
Otimização Global (Algoritmo Genético e
Evolução Diferencial) para Inversão de
Coeficientes de Reflexão em Meios
Fratutados**

Autor: Francisco Joclean Alves Vanzeler
Orientador: Ivan De Araújo Simões Filho
Coorientador: Jessé Carvalho Costa

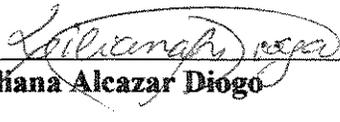
Banca Examinadora:



Ivan De Araújo Simões Filho
UNICAMP



Dr. Eduardo Lopes Faria
PETROBRAS



Prof. Dra. Liliana Alcazar Diogo
USP

Campinas, 24 De Junho De 1999

Agradecimentos

A PETROBRÁS pelo apoio financeiro e pela oportunidade de realizar este trabalho.

As Gerências de Geofísica e de Reservatório representados respectivamente Por Douglas dos Santos Júnior e por Sebastião Benedito Martins Pereira pelo empenho na minha liberação para o mestrado.

A UNICAMP pela infra-estrutura necessária à conclusão desta tese.

Aos orientador e coorientador que através do projeto de dissertação terem proporcionado o contato com uma áreas complexas do conhecimento aplicado à geofísica durante minha capacitação.

Aos colegas João dos Santos Protázio e Fernando Neves respectivamente pelos esclarecimentos sobre as modelagens direta e inversa

Ao colega João Marcelo Brazão Protázio pelos esclarecimentos e discussões sobre Técnicas de Otimização Global.

Resumo

VANZELER, Francisco Joclean Alves, *Uma Comparação entre Dois Algoritmos de Otimização Global (Algoritmo Genético e Evolução Diferencial) para Inversão de Coeficientes de Reflexão em Meios Fraturados*, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado)

Este trabalho calcula os parâmetros elásticos e a densidade de um meio fraturado a partir da inversão dos coeficientes de reflexão de ondas planas qP entre dois meios anisotrópicos com pelo menos um plano de simetria paralelo a interface. O meio fraturado é modelado por um meio anisotrópico equivalente através da formulação de Hudson, neste caso um reservatório isotrópico com fraturas verticais é equivalente a um meio transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal (TIH). Sobre o reservatório, três tipos de rocha são considerados para a modelagem direta: 1) Folhelho Isotrópico; 2) Folhelho transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical (TIV); 3) Folhelho com Fraturas verticais ou meio ortorrômbico. Os coeficientes de reflexão usados neste trabalho são calculados de forma exata. Conjuntos de dados sintéticos para múltiplos azimutes e ângulos de incidência, contaminados por ruído gaussiano, foram gerados para cada modelo considerado. Dois algoritmos de otimização global foram utilizados para inversão: Os algoritmos Genético (AG) e Evolução Diferencial (ED), que estimam os parâmetros do modelo através da minimização da norma L_2 do resíduo entre o coeficientes de reflexão "observado" e o calculado. Foi fornecido os valores dos parâmetros elásticos do meio superior exceto no caso onde a velocidade da onda cisalhante (V_s) do meio superior foi invertida. Cada parâmetro varia dentro dos limites observados durante a propagação de ondas sísmicas em rochas sedimentares. A inversão foi satisfatória nos três modelos estudados. Três azimutes (0° , 45° e 90°) foram considerados na geometria de aquisição. Para o modelo I, a incidência mínima para inversão foi de trinta e quatro graus (AG e ED). Para os modelos II e III, a incidência mínima para inversão foi de cinquenta graus (AG). O ED inverteu o caso que inclui V_s do meio superior do modelo I com incidência mínima de quarenta e quatro graus. Esta abordagem mostra o potencial da análise AVO azimutal de ondas qP para caracterizar a anisotropia associada a meios fraturados.

Palavras Chave – modelagem física, otimização matemática, algoritmos globais

Abstract

VANZELER, Francisco Joclean Alves, *A Comparison between Two Global Optimization Algorithms (Genetic and Differential Evolution) to Calculate the Reflection Coefficients in Fractured Media*, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado)

In this work, we extract the elastic stiffness and mass density from an multi-azimutal qP-wave reflection coefficients at an interface separating two anisotropic media with monoclinic simmetry with at least one of its planes of simmetry parallel to the interface. This objective was reach by forward and inverse modeling. We calculate the qP-wave reflection for three models (I, II, III) of anisotropic equivalent medium: 1) isotropic medium above a TIH medium; 2) TIV medium above a TIH medium; and 3) orthorhombic medium above a TIH medium. The TIH medium is equivalent an isotropic fractured medium with equivalent elastic stiffness and mass density calculated by the Hudson formulation. The reflection coefficients used was on its exact form and was generated for models I, II and III in multi-azimutal/incidence angles and contaminated by gaussian noise. In the inverse modeling we work with GA and with DE algoritms to calculate the inversion parameter (5 elastic stiffness and mass density for bottom media and Vs of upper isotropic media) by minimization of $L2$ norm of difference between the "true" and sinthetic reflection coefficient. We assume that we knwon the parameter of the upper media of the three models, except Vs for model one in especial case of inversion of upper media. The parameter to be determined by inverse modeling are parametrized in model space for values that is in acording with the value of the observed velocity of propagation of elastic waves in the earth crust, and the resolution of measure, and constraints of elastic establiity of the solid media. The GA and DE algoritms reached good inversion to the three models with at least three azimutal angles (0° , 45° and 90°) and incidence angles of 34° for model I, and 50° inverted only by GA for models II and III; and the especial case take by DE that need at least 44° to invert the model I with the Vs of the upper media. From this results we can see the potential to determine from qP-wave the elastic parameter of fractured media and contribute to improve the use of azimutal AVO analises.

Key Words—Physical modeling, mathematics optimization, global algorithms

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xii
Introdução	1
Capítulo 1 - MODELAGEM DIRETA	5
1.1) Introdução	5
1.2) Meio Efetivo	6
1.3) Coeficientes de Reflexão e Transmissão	10
1.4) Exemplos Estudados	13
Capítulo 2 - MODELAGEM INVERSA	19
2.1) Introdução	19
2.2) Algoritmos de Otimização Global	21
2.2.1) Algoritmo Genético – AG	24
2.2.2) Algoritmo Evolução Diferencial – ED	28
2.3) Função Objetivo	30
2.4) Parametrização e Vínculos	31
2.5) Análise de Sensibilidade	33
Capítulo 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
3.1) Meio Folhelho Isotrópico sobre Arenito Fraturado TIH	38
3.2) Meio Folhelho TIV sobre a Arenito Fraturado TIH	41
3.3) Meio Folhelho Fraturado Ortorrômico sobre Arenito Fraturado TIH	43

Capítulo 4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
Referências Bibliográficas	47

Lista de Figuras

1.4.1 Esboço dos três meios estudados nas modelagens direta e inversa: MODELO-I – Folhelho Isotrópico sobre Arenito Fraturado TIH MODELO-II – Folhelho TIV sobre Arenito Fraturado TIH MODELO-III – Folhelho Fraturado Ortorrômbico sobre Arenito Fraturado TIH	14
1.4.2 Coeficientes de reflexão em projeção esterográfica do modelo I	15
1.4.3 Projeção horizontal das superfícies de vagariedades dos meios superior e inferior do modelo II	59
1.4.4 Coeficientes de reflexão em projeção esterográfica do modelo II	17
1.4.5 Coeficientes de reflexão em projeção esterográfica do modelo III.....	18
2.1 Fluxograma de Otimização Global	22
3.1.1 Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais	50
3.1.2 Projeção esterográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo I	51
3.1.3 Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais	52

3.1.4	Projeção estereográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo I	53
3.1.5	Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior mais a velocidade da onda sísmica cisalhante do meio isotrópico superior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais	54
3.1.6	Projeção estereográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo ED, e a diferença entre o valor exato e o calculado para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior mais a velocidade da onda sísmica cisalhante do meio isotrópico superior, para o modelo I	55
3.1.7	Curvas de sensibilidade do modelo I para a velocidade cisalhante V_s do meio superior isotrópico, para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior anisotrópico equivalente TIH	56
3.2.1	Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior para o modelo II, plotados nos três ângulos azimutais	57
3.2.2	Projeção estereográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo AG, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo II	58
3.2.3	Curvas de sensibilidade do modelo II para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior equivalente TIH	60

3.3.1 Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior para o modelo III, plotados nos três ângulos azimutais	61
3.3.2 Projeção esterográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo AG, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo III	62
3.3.3 Curvas de sensibilidade do modelo III para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior equivalente TIH	63

Lista de Tabelas

1.4.1	Parâmetros elásticos do modelo I que representa um Folhelho Isotrópico sobreposto a um Arenito Isotrópico com Fraturas Verticais com simetria equivalente TIH	15
1.4.2	Parâmetros Elásticos do modelo II que representa um Folhelho com estratificação horizontal e simetria equivalente TIV sobreposto a um Arenito Isotrópico com Fraturas verticais e simetria equivalente TIH	16
1.4.3	Parâmetros Elásticos do modelo III que representa um Folhelho com estratificação horizontal e com fraturas verticais equivalente a simetria Ortorrômbica sobre um Arenito Isotrópico com fraturas verticais e simetria equivalente TIH	18
3.1	Resultados da modelagem inversa dos algoritmos AG e ED	37

Introdução

Em certos reservatórios, o fluxo de fluidos se dá preferencialmente através de fraturas. O conhecimento da orientação destas fraturas permite, entre outras definições, escolher as melhores localizações dos poços de produção e injeção, de tal forma que os hidrocarbonos sejam drenados eficientemente. Sistemas de fraturas podem ser caracterizados, entre outros métodos, pela análise dos coeficientes de reflexão das ondas sísmicas. Neste trabalho, investigamos o uso de ondas sísmicas qP para a caracterização de reservatórios fraturados.

Meios isotrópicos com fraturas alinhadas, quando atravessados por ondas sísmicas de comprimentos de onda muito maiores do que o espaçamento médio entre as fraturas, comportam-se como meios transversalmente isotrópicos (TI). Se as fraturas forem verticais, o meio é transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal (TIH). Seus parâmetros elásticos podem ser modelados matematicamente através da formulação de Hudson (1981) para meios equivalentes. Esta formulação é baseada no fraco espalhamento de ondas elásticas pelas fraturas do meio. Os parâmetros elásticos efetivos do meio fraturado são calculados pelo soma dos parâmetros elásticos da rocha não fraturada com dois termos que descrevem o espalhamento da onda sísmica nas fraturas. O primeiro termo representa o espalhamento em apenas uma fratura, enquanto o segundo termo representa o espalhamento em duas fraturas. Segundo essa formulação, os parâmetros elásticos equivalentes dependem dos parâmetros elásticos da rocha matriz, da razão de aspecto das fraturas e da densidade de fraturamento, além das propriedades elásticas do material que preenche as fraturas. Esta formulação é válida para fraturas desconectadas com forma de elipsóides achatados, onde o raio da fratura é muito menor do que do que o comprimento da onda sísmica, e as fraturas com distribuição aleatória.

A anisotropia sísmica TI ocorre também em rochas formadas por finas camadas de meios isotrópicos, quando a espessura das camadas é muito menor do que o comprimento

de onda. Quando as camadas são horizontais, o meio é denominado transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical (TIV). Quando existe uma combinação de fraturas alinhadas dentro de uma rocha formada por camadas finas, a simetria do meio equivalente é ortorrômbica (se a estratificação for perpendicular ao plano de fraturamento) ou monoclinica (se a estratificação for oblíqua ao plano de fraturamento). Esses sistemas de simetria (TIH, TIV, ortorrômbico e monoclinico) são os principais casos de anisotropia das bacias sedimentares.

Neste trabalho, foi usada a formulação exata de Schoenberg & Protazio (1992) para calcular os coeficientes de reflexão de ondas planas incidentes em interfaces planas separando meios anisotrópicos com pelo menos um plano de simetria paralelo à interface (meios com simetria monoclinica ou inferior). Devido a não linearidade dos coeficientes de reflexão em relação aos parâmetros elásticos, foram usados algoritmos de otimização global (algoritmo genético – AG e evolução diferencial – ED) para estimar os parâmetros elásticos e densidades de meios que representam reservatórios fraturados, a partir de dados de variação de coeficientes de reflexão em função do afastamento fonte-receptor (AVO) e do azimute do plano de propagação (AVAz).

As amplitudes das ondas sísmicas são afetadas pelos coeficientes de reflexão e transmissão, além dos fatores de propagação, como o espalhamento geométrico, as variações na energia da fonte e nos receptores, reflexões múltiplas, ondas superficiais, perdas por dissipação, ruídos, etc. Esses fatores devem ser compensados no processamento para que seus efeitos sejam minimizados na fase de interpretação de dados.

Foram usados os seguintes modelos: 1) Folhelho selante isotrópico sobreposto a um arenito fraturado (TIH), 2) folhelho (TIV) sobreposto a um arenito fraturado (TIH), e 3) folhelho fraturado (ortorrômbico) sobreposto a um arenito fraturado (TIH). Para cada modelo, foram calculados os coeficientes de reflexão com variação nos ângulos de incidência e azimute, e contaminados com ruído gaussiano.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Esses coeficientes de reflexão foram invertidos com técnicas de AG e ED, através da minimização de uma função objetivo definida como a norma l_2 da diferença entre os coeficientes de reflexão “verdadeiros” e o sintéticos, com o objetivo de determinar as geometrias de aquisição ótimas para caracterizar esses modelos de reservatórios fraturados.

O AG usa um procedimento de pesquisa e atualização do modelo em cada iteração que simula a evolução biológica, onde uma população inicial de modelos são selecionados aleatoriamente no espaço de modelos tal que AG procura melhorar o ajuste entre os dados “verdadeiros” e os dados sintéticos de geração em geração, atualizando os modelos da população atual através das operações de seleção, cruzamento, e mutação até atingir um modelo ou modelos que se ajustem aos dados observados dentro de uma especificação dada. O algoritmo ED se baseia no mesmo princípio do algoritmo AG e pode ser utilizado para otimizar problemas não lineares e não diferenciáveis em espaços contínuos.

O espaço de modelos foi parametrizado em termos da densidade e do tensor dos parâmetros elásticos do reservatório para os quatro casos de inversão (três casos resolvido pelo AG e um caso resolvido pelo ED), e, para o quinto caso em termos da densidade e do tensor dos parâmetros elásticos do reservatório fraturado inferior mais a velocidade da onda cisalhante do meio isotrópico superior para o algoritmo ED. Os valores máximos e mínimos assumidos pela velocidade da onda cisalhante, pela densidade e pelos parâmetros elásticos respeitam os limites impostos pela propagação de ondas sísmicas nas rochas da superfície da Terra foram mantidos ao longo de toda inversão. As restrições sobre as condições de estabilidade dos sólidos e as condições de anisotropia suave foram introduzidas na modelagem direta.

O intervalo de discretização da densidade e dos parâmetros elásticos usados no algoritmo AG respeitam a máxima resolução esperada nas medidas desses parâmetros através da sísmica de reflexão. O valores assumidos pela velocidade da onda cisalhante, pela densidade e pelos parâmetros elásticos na inversão pelo algoritmo ED são valores contínuos entre os valores máximos e mínimos.

Nas curvas de sensibilidade o valor exato de cada parâmetro esteve sempre associado ao valor mínimo da função erro, dando uma indicação do sucesso da inversão, embora as curvas de sensibilidade mais planas apresentarem maior dificuldade de inversão devido uma maior faixa de valores do parâmetro próximo do valor exato, podendo levar a ambigüidades.

Os três modelos estudados atingem uma inversão satisfatória para três ângulos azimutais (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) e um por cento de ruído aleatório do tipo gaussiano tanto para o algoritmo AG quanto para o algoritmo ED. A máxima abertura angular de incidência depende da complexidade na definição elástica do meio superior. A abertura angular máxima de incidência do modelo I necessária para inversão dos parâmetros do reservatório fraturado obtido pelos algoritmos AG e ED foi de trinta e quatro graus. Os modelos II e III foram invertidos somente pelo algoritmo AG que produziu inversão satisfatória para abertura angular de cinquenta graus. Também foi obtido um caso de inversão pelo ED para o modelo I para os parâmetros do reservatório mais a velocidade da onda cisalhante do meio isotrópico superior, V_s , para uma abertura angular máxima de incidência de quarenta e quatro graus. O espaçamento entre os ângulos de incidência, começando da inclinação zero até a abertura máxima, para todos os casos foram de dois em dois graus.

Capítulo 1

Modelagem Direta

1.1) Introdução

Em geral os problemas geofísicos aparecem como um conjunto de propriedades físicas que se tem interesse em conhecer (no caso da propagação de ondas sísmicas em meios anisotrópicos as propriedades físicas são os parâmetros elásticos e a densidade do meio), relacionadas por equações matemáticas a certas propriedades medidas (por exemplo as amplitudes das reflexões sísmicas). O conhecimento das equações ou modelos matemáticos nos permite compreender como os dados ou as medidas são afetadas pelas incógnitas e assim temos uma forma de gerar respostas sintéticos e controlar as condições as quais devem ser satisfeitos pelos modelos físicos.

A construção de modelos matemáticos que nos permitam relacionar os dados com os modelos físicos é definida como modelagem direta. Hoje, a maioria dos problemas de modelagem direta em geofísica tem suas equações matemáticas razoavelmente bem conhecidas. Isto não significa que não existam mais problemas de modelagem direta, que buscará avançar continuamente na representação de complexidades, tornando-o tratável para se obter informações úteis, devido às necessidades impostas por interesses econômicos.

Um dos objetivos da sísmica é determinar as propriedades elásticas do interior da Terra a partir de dados obtidos na superfície ou em poços, através de sismogramas. Destas respostas procuramos inferir quais foram as propriedades elásticas do meio responsáveis por tais efeitos através da modelagem direta. Neste trabalho foi feita a modelagem direta dos coeficientes de reflexão numa interface plana entre um reservatório fraturado de hidrocarbonos sobreposto três tipos diferentes de rochas, com os parâmetros elásticos e a densidade calculados pela teoria de meios equivalentes.

1.2) Meio Efetivo

O conceito de meio efetivo surgiu como uma análise alternativa à limitação da resolução sísmica. Na sísmica convencional a resolução de heterogeneidades está limitada aproximadamente a valor 0.25 da razão entre o tamanho da heterogeneidade e o comprimento de onda. A teoria do meio efetivo permite se tratar o efeito de heterogeneidades em escala menor que esta resolução. Sistemas de fraturas em reservatórios, podem ser representadas por um meio efetivo homogêneo e anisotrópico, através do padrão de interferência do espalhamento sísmico nas heterogeneidades.

O conceito de meio efetivo pode ser usado para a descrição interna das estruturas geológicas através de suas relações com sistemas de simetrias anisotrópicos, criando uma estrutura matemática conveniente para a modelagem dessas estruturas, que podem conter informações sobre a geometria e distribuição das heterogeneidades que compõem a estrutura interna das rochas. Quando ondas planas são espalhadas em heterogeneidades de tamanho muito menores do que o comprimento de onda, produzem espalhamento suficiente para alterar o campo de onda transmitido e produzir uma resposta característica ou um padrão de interferência do conjunto espalhante. O padrão sísmico de interferência produzido pelas heterogeneidades é usado para simular um meio efetivo que substitui o meio heterogêneo com o mesmo padrão sísmico. Se as heterogeneidades possuírem algum grau de alinhamento, o comportamento elástico do meio equivalente é anisotrópico e caracterizado, para o caso mais geral, pela densidade e pelos vinte e um parâmetros elásticos do tensor de elasticidade da lei de Hook generalizada. O conceito de meio efetivo permite que estruturas complexas mas com algum tipo de estruturação nos seus componentes possam ser analisadas usando as ferramentas desenvolvidas para meios homogêneos.

O comportamento elástico de um meio anisotrópico pode ser caracterizado por sua classe de simetria (número de parâmetros elásticos independentes que definem o meio),

pela magnitude das constantes elásticas, e pela orientação dos eixos coordenados ao qual os parâmetros elásticos são referidos.

Um meio anisotrópico pode ser devido a anisotropia inerente causado pela alteração da estrutura cristalina por grandes esforços, ou devido a anisotropia induzida por estruturas alinhadas em material isotrópico como aquelas induzidas por fraturas alinhadas em matriz isotrópica ou por uma espessa seqüência de camadas finas isotrópicas quando percorridas por ondas de comprimento de onda muito maior do que a distância entre fraturas ou da espessura das camadas.

Existem alguns tipos especiais de sistemas de anisotropia que são mais comuns em ambientes sedimentares e que tem importância em sismica, como o caso da anisotropia TI que ocorre quando um pacote de finas camadas de material isotrópico (para camadas horizontais, o meio é transversalmente isotrópico com eixo de simetria vertical - TIV), ou quando fraturas alinhadas em matriz sólida isotrópica (se as fraturas forem verticais, o meio é transversalmente isotrópico com eixo de simetria horizontal - TIH) são atravessadas por ondas sísmicas de comprimento de onda maior do que a espessura ou a distância entre as fraturas. Meios TI são caracterizados por cinco parâmetros elásticos independentes.

Um segundo caso de interesse é a simetria ortorrômbica, caracterizada por nove parâmetros elásticos, ocorrem quando fraturas e camadas se superpõe formando um ângulo de noventa graus.

A maioria dos casos de anisotropia sísmica em ambientes sedimentares podem ser explicados pela simetria monoclinica (como é o caso de camadas inclinadas fraturadas obliquamente), caracterizados por treze parâmetros elásticos independentes. Neste trabalho, a anisotropia suave é assumida (isto é: as velocidades das ondas cisalhantes são sempre menores do que as velocidades das ondas compressoriais em qualquer direção e não ocorre polarizações anômalas nem triplicações) com objetivo de diminuir o tamanho do espaço de modelos usado pelo AG.

A determinação dos parâmetros elásticos e da densidade para meio equivalente fraturado se baseia na formulação de Hudson (1981) que utiliza o fraco espalhamento de ondas elásticas em fraturas. Heterogeneidades do tipo fraturas dispersas num meio isotrópico e homogêneo afetam a direção de propagação e a atenuação de ondas elásticas para comprimentos de ondas maiores que as dimensões e o espaçamento entre fraturas, e apresentam um padrão de resposta sísmica equivalente descritos por respostas de certos sistemas de simetria. Cada parâmetro elástico efetivo do meio fraturado, escrito em notação reduzida de Voigt, consiste de uma série de potências ascendentes do operador de espalhamento, reduzido aos três primeiros termos por considerações de espalhamento de até segunda ordem, como na expressão (1) que segue a modificações propostas por Crampin (1993).

$$c_{mn} = c_{mn}^0 + c_{mn}^1 + c_{mn}^2 \quad (1)$$

Onde o primeiro termo representa a rocha matriz, e os dois últimos termos representam perturbações de primeira e segunda ordem devido a presença de fraturas.

Os dois últimos termos na equação (1) são dependentes do espalhamento de primeira e segunda ordem das ondas nas fraturas como:

$$c_{mn}^1 = \varepsilon M(r) D(r, f, c)$$

$$c_{mn}^2 = \varepsilon^2 N(r) D^2(r, f, c)$$

Onde ε é a densidade de fratura, $M(r)$ e $N(r)$ são matrizes cujos elementos dependem dos parâmetros elásticos de Lamé λ e μ da rocha matriz r , e $D(r, f, c)$ é uma matriz diagonal cujos termos dependem não somente de λ e μ , mas também das propriedades elásticas do material que preenche as fraturas (f), e da relação de aspecto e espessura das fraturas (c) cujo valor foi fixo em 0.1. Esta formulação é válida para fraturas desconectadas em forma

de elipsóides achatados tal que o raio médio das fraturas seja muito menor que o comprimento da onda sísmica, com a distribuição espacial das fraturas podendo ser tanto aleatória quanto alinhadas pois o efeito global obtido é calculado como o somatório dos efeitos individuais de cada fratura, considerados por direção de alinhamento do plano de fratura.

Os parâmetros elásticos equivalentes de um meio fraturado ou a sua anisotropia equivalente dependem do padrão de distribuição espacial das fraturas, cujas expressões permitem considerar tanto o efeito de fraturas com direção preferencial como com direção aleatória, conforme os cinco casos típicos de fraturamento de reservatórios de hidrocarbonetos:

- a) Meio isotrópico com fraturas aleatórias – Representado equivalentemente como um meio isotrópico e descrito pela densidade, e por dois parâmetros elásticos (as velocidades das ondas compressional, V_p , e cisalhante, V_s).
- b) Meio isotrópico com fraturas verticais - Representado equivalentemente como um meio TIH e descrito por cinco parâmetros elásticos efetivos e pela densidade.
- c) Meio estratificado horizontalmente e isotrópico (TIV) com fraturas verticais ou meio isotrópico fraturado ortogonalmente – Com representação equivalente como um meio com simetria ortorrômbica e descrito por nove parâmetros elásticos efetivos e pela densidade.
- d) Meios isotrópicos estratificados com fraturamento alinhado e inclinado ou meios com fraturamento alinhados inclinados que se cruzam – Que podem ser representados equivalentemente como meios anisotrópico com simetria monoclinica, descrito por treze parâmetros elásticos mais a densidade.

1.3) Coeficientes de Reflexão e Transmissão

Para um meio elástico anisotrópico a propagação de ondas elásticas é governada pela equação elastodinâmica do movimento ou equação de Kelvin-Christoffel que mede a variação do momento das partículas numa unidade de volume causada pelas forças de volume e de superfície, ou melhor, uma expressão analítica da igualdade entre as forças inerciais e aquelas induzidas pelo gradiente dos esforços. As relações constitutivas do meio anisotrópico relacionam as deformações ocorridas num corpo e as tensões que as geraram através da lei de Hooke generalizada. Detalhes da fonte sísmica são evitados e a hipótese de onda plana incidindo do meio superior é assumida durante a formulação do modelo direto, e o meio efetivo é homogêneo e anisotrópico elástico. Cada meio apresenta uma resistência natural a uma dada perturbação denominada de impedância elástica, definido como a razão entre a tensão aplicada dividido pela velocidade da partícula. Quando um distúrbio elástico se propaga num meio superior como uma onda plana atingindo uma fronteira também plana de descontinuidade das propriedades elásticas ocorrerá uma partição de energia elástica. A partição da energia foi calculada na forma dos coeficientes de reflexão e transmissão que medem respectivamente a razão entre as amplitudes refletida e transmitida divididas pela amplitude incidente. Utilizou-se este tipo de medida pelo fato de a amplitude relativa das reflexões e transmissões estarem relacionadas com as propriedades físicas dos meios atingidos.

Para o cálculo exato dos coeficientes de reflexão e transmissão das ondas refletidas e transmitidas através das interfaces anisotrópicas utilizou-se a metodologia de Schoenberg & Protazio (1992), onde continuidade das tensões e deslocamentos das soluções da equação da elastodinâmica do movimento para ondas planas é resolvida para uma interface não deslizante entre meios homogêneos anisotrópicos monoclinico com plano de simetria (x_1, x_2) . O sistema de referência usado neste trabalho foi o sistema de coordenadas cartesianas dextrógiro com x_3 apontando para o centro da Terra e x_1 na direção leste e x_2 na direção sul.

Na forma matricial, as equações de Zoeppritz para os coeficientes de transmissão e de reflexão numa interface plana $x_3 = 0.0$ podem ser escritas na forma (Schoenberg & Protazio (1992)):

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(\mathbf{i} + \mathbf{r}) &= \mathbf{X}'\mathbf{t} \\ \mathbf{Y}(\mathbf{i} - \mathbf{r}) &= \mathbf{Y}'\mathbf{t} \end{aligned} \quad (2)$$

Os vetores \mathbf{i} , \mathbf{r} e \mathbf{t} , representam respectivamente a amplitude normalizada das ondas incidentes, a amplitude das ondas refletidas, e a amplitude da onda transmitida.

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_P \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_P \\ r_S \\ r_T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_P \\ t_S \\ t_T \end{bmatrix}$$

As matrizes \mathbf{X} e \mathbf{Y} são as matrizes de impedância elástica do meio superior e dependem da densidade e dos treze parâmetros elásticos (simetria monoclinica) e de duas componentes horizontais dos vetores das vazarosidade s_1 e s_2 e das direções dos vetores de polarização.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} n_{1P} & n_{1S} & n_{1T} \\ n_{2P} & n_{2S} & n_{2T} \\ -(c_{13}n_{1P} + c_{36}n_{2P})s_1 & -(c_{13}n_{1S} + c_{36}n_{2S})s_1 & -(c_{13}n_{1T} + c_{36}n_{2T})s_1 \\ -(c_{23}n_{2P} + c_{36}n_{1P})s_2 & -(c_{23}n_{2S} + c_{36}n_{1S})s_2 & -(c_{23}n_{2T} + c_{36}n_{1T})s_2 \\ -c_{33}n_{3P}s_{3P} & -c_{33}n_{3S}s_{3S} & -c_{33}n_{3T}s_{3T} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix}
-(c_{55}s_1 + c_{45}s_2)n_{3P} & -(c_{55}s_1 + c_{45}s_2)n_{3S} & -(c_{55}s_1 + c_{45}s_2)n_{3T} \\
-(c_{55}n_{1P} + c_{45}n_{2P})s_{3P} & -(c_{55}n_{1S} + c_{45}n_{2S})s_{3S} & -(c_{55}n_{1T} + c_{45}n_{2T})s_{3T} \\
-(c_{45}s_1 + c_{44}s_2)n_{3P} & -(c_{45}s_1 + c_{44}s_2)n_{3S} & -(c_{45}s_1 + c_{44}s_2)n_{3T} \\
-(c_{45}n_{1P} + c_{44}n_{2P})s_{3P} & -(c_{45}n_{1S} + c_{44}n_{2S})s_{3S} & -(c_{45}n_{1T} + c_{44}n_{2T})s_{3T} \\
n_{3P} & n_{3S} & n_{3T}
\end{bmatrix}$$

As matrizes \mathbf{X}' e \mathbf{Y}' são as matrizes de impedância elástica do meio inferior e são caracterizadas da mesma forma que as matrizes \mathbf{X} e \mathbf{Y} do meio superior. Os n_{ij} são os modos de polarização incidente, para $i = 1, 2, 3$ eixos coordenados, e $j = P, S$ e T modos de polarizações.

1.4) Exemplos Estudados

Foi feita a modelagem direta dos coeficientes de reflexão para três modelos efetivos usando a equação (2). Os três modelos estudados representam interfaces elástica entre um reservatório isotrópico fraturado verticalmente, equivalente a um meio efetivo anisotrópico com simetria TIH, e três tipos diferentes de rochas, representados no modelo I por um Folhelho Isotrópico; no modelo II por um Folhelho com estratificação horizontal e equivalente a um meio anisotrópico com simetria TIV; e no modelo III por um Folhelho com estratificação horizontal com fraturas verticais e equivalente a um meio com anisotropia ortorrômbica.

Os cinco parâmetros elásticos efetivos para o meio equivalente homogêneo anisotrópico TIH que representa um reservatório isotrópico com fraturas verticais foram calculados através conceito de meio efetivo desenvolvido por Hudson (1981) e Crampin (1984). Estes parâmetros elásticos foram calculados usando dados de um reservatório real (Simões Filho et al (in press)).

Na **FIGURA 1.4.1** são esboçados os três modelos físicos estudados e suas orientações.

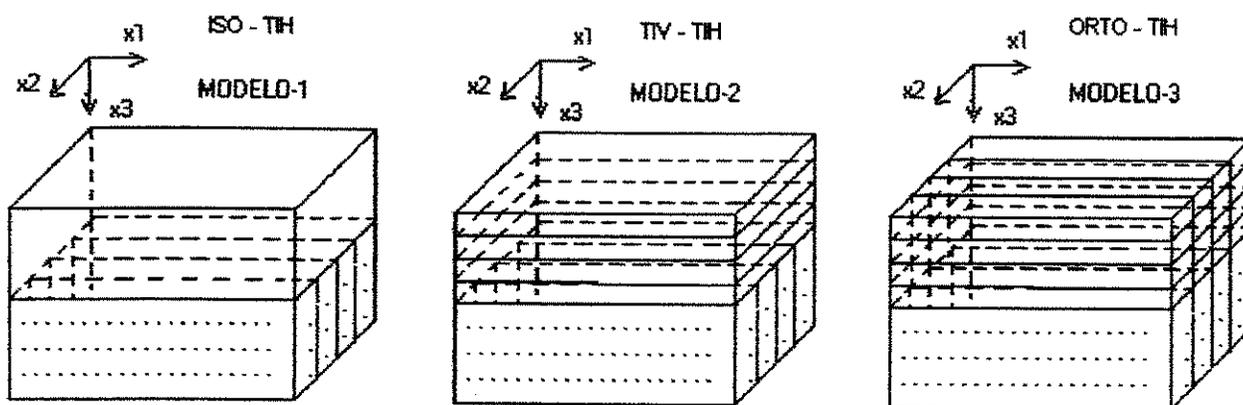


FIGURA 1.4.1 - Esboço dos três meios estudados nas modelagens direta e inversa:
MODELO-1 - Folhelho Isotrópico sobre Arenito Fraturado TIH
MODELO-2 - Folhelho TIV sobre Arenito Fraturado TIH
MODELO-3 - Folhelho Fraturado Ortorrômbico sobre Arenito Fraturado TIH

Os três modelos investigados e suas propriedades físicas efetivas são descritos numericamente nas **TABELAS 1.4.1, 1.4.2, e 1.4.3** que utilizam como Sistema de Unidades de Medidas Físicas, o sistema SI.

MODELO I - Folhelho isotrópico sobreposto a um reservatório fraturado do tipo arenito isotrópico com fraturas verticais representado como um meio efetivo anisotrópico com simetria TIH. O meio superior é caracterizado elasticamente pela densidade e pelas velocidades das ondas compressoriais (V_p) e cisalhantes (V_s) mostrados na **TABELA 1.4.1**. O meio efetivo inferior é caracterizado elasticamente pela densidade e por cinco parâmetros elásticos (C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55}) conforme **TABELA 1.4.1** e possui densidade de fratura igual a sete por cento.

TABELA 1.4.1 – *Parâmetros elásticos do modelo I que representa um folhelho isotrópico sobreposto a um arenito isotrópico com fraturas verticais com simetria TIH.*

Meio Superior - Isotrópico						
ρ (g/cm ³)		Vp (km/s)		Vs (km/s)		
2.250		2.541		1.490		
Meio Inferior - Arenito Fraturado						
Densidade de Fratura	ρ (g/cm ³)	C ₁₁ (x10 ⁹ N/m ²)	C ₁₂ (x10 ⁹ N/m ²)	C ₂₂ (x10 ⁹ N/m ²)	C ₄₄ (x10 ⁹ N/m ²)	C ₅₅ (x10 ⁹ N/m ²)
7	2.280	27.690	10.220	33.860	10.990	9.360

Os valores dos coeficientes de reflexão para ondas planas qP do modelo I são mostrados na FIGURAS 1.4.2 em projeção estereográfica, plotados em todos os ângulos de incidência e azimutes.

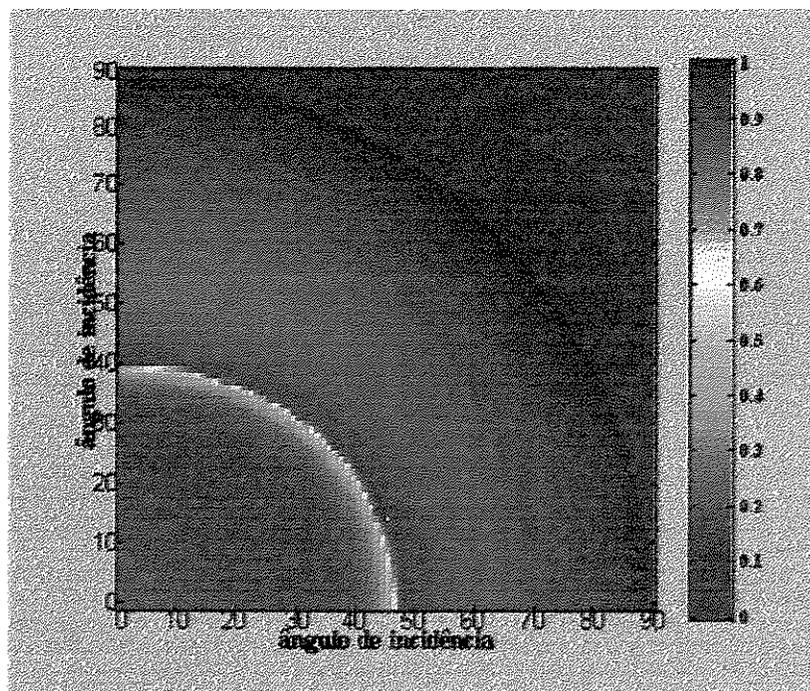


FIGURA 1.4.2 – *Coefficientes de reflexão em projeção estereográfica para o modelo I.*

MODELO II - Folhelho com estratificação horizontal e equivalente a um meio efetivo anisotrópico com simetria TIV sobreposto a um reservatório fraturado do tipo arenito isotrópico com fraturas verticais e equivalente a um meio anisotrópico com simetria TIH. Neste modelo o meio superior necessita de mais variáveis para a sua caracterização (densidade mais cinco parâmetros elásticos independentes - C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{33} , C_{44}) do que o caso isotrópico do modelo I. O meio inferior é caracterizado pela densidade e por cinco parâmetros elásticos (C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55}) conforme TABELA 1.4.2. e possui densidade de fratura igual a sete por cento.

TABELA 1.4.2 – Parâmetros elásticos do modelo II que representa um folhelho com estratificação horizontal e simetria equivalente TIV sobreposto a um arenito isotrópico com fraturas verticais e simetria equivalente TIH.

Meio Superior - Folhelho TIV						
ρ (g/cm ³)	C_{11} (x10e9N/m ²)	C_{12} (x10e9N/m ²)	C_{13} (x10e9N/m ²)	C_{33} (x10e9N/m ²)	C_{44} (x10e9N/m ²)	
2.540	33.500	14.100	14.800	22.500	5.000	
Meio Inferior - Arenito Fraturado						
Densidade de Fratura	ρ (g/cm ³)	C_{11} (x10e9N/m ²)	C_{12} (x10e9N/m ²)	C_{22} (x10e9N/m ²)	C_{44} (x10e9N/m ²)	C_{55} (x10e9N/m ²)
7	2.280	27.690	10.220	33.860	10.990	9.360

A modelagem direta dos coeficientes de reflexão das ondas planas qP do modelo II da TABELA 1.4.2 são mostrados na FIGURA 1.4.3 plotados em projeção estereográfica para todos os ângulos de incidência e azimutes. É observado que entre os azimutes zero até aproximadamente quarenta e cinco graus, este modelo não apresenta ângulo crítico e a reflexão total só ocorre próximo à incidência de noventa graus. Esta ausência de angulo crítico é mostrada na FIGURA 1.4.4 onde são plotados as superfícies de vagarosidades dos meios superior e inferior.

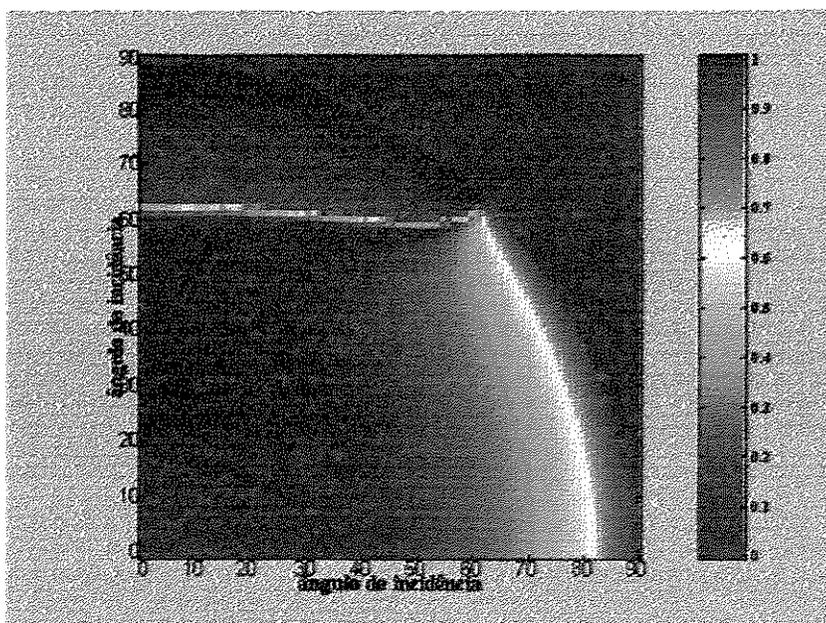


FIGURA 1.4.4 – Coeficientes de reflexão em projeção estero-gráfica para o modelo II.

MODELO III - Folhelho com estratificação horizontal com fraturas verticais com simetria equivalente ortorrômbica sobreposto a arenito isotrópico com fraturas verticais com simetria equivalente TIH. Para este terceiro modelo temos também um tipo de meio superior que necessita de mais variáveis para sua caracterização (densidade e nove parâmetros elásticos independentes - C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{22} , C_{23} , C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{66}) do que o caso isotrópico do modelo I, **TABELA 1.4.3**. O meio inferior é caracterizado pela densidade e mais cinco parâmetros elásticos (C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55}) **TABELA 1.4.3**. A densidade de fratura do meio inferior foi de sete por cento.

TABELA 1.4.3 – Parâmetros elásticos do modelo III que representa um folhelho com estratificação horizontal e com fraturas verticais equivalente a simetria ortorrômbica sobre um arenito isotrópico com fraturas verticais e simetria equivalente TIH.

Meio Superior - Folhelho fraturado (ortorrômbico)									
ρ (g/cm ³)	C ₁₁ x10e9N/m ²	C ₁₂ x10e9N/m ²	C ₁₃ x10e9N/m ²	C ₂₂ x10e9N/m ²	C ₂₃ x10e9N/m ²	C ₃₃ x10e9N/m ²	C ₄₄ x10e9N/m ²	C ₅₅ x10e9N/m ²	C ₆₆ x10e9N/m ²
2.540	26.350	11.460	12.160	32.520	13.820	21.520	5.000	3.400	8.100
Meio Inferior - Arenito Fraturado									
Densidade de Fratura	ρ (g/cm ³)	C ₁₁ (x10e9N/m ²)	C ₁₂ (x10e9N/m ²)	C ₂₂ (x10e9N/m ²)	C ₄₄ (x10e9N/m ²)	C ₅₅ (x10e9N/m ²)			
7	2.280	27.690	10.220	33.860	10.990	9.360			

Os valores dos coeficientes de reflexão para ondas planas qP do modelo III são mostrados na FIGURAS 1.4.5, plotados em projeção estero-gráfica para todos os ângulos de incidência e azimute.

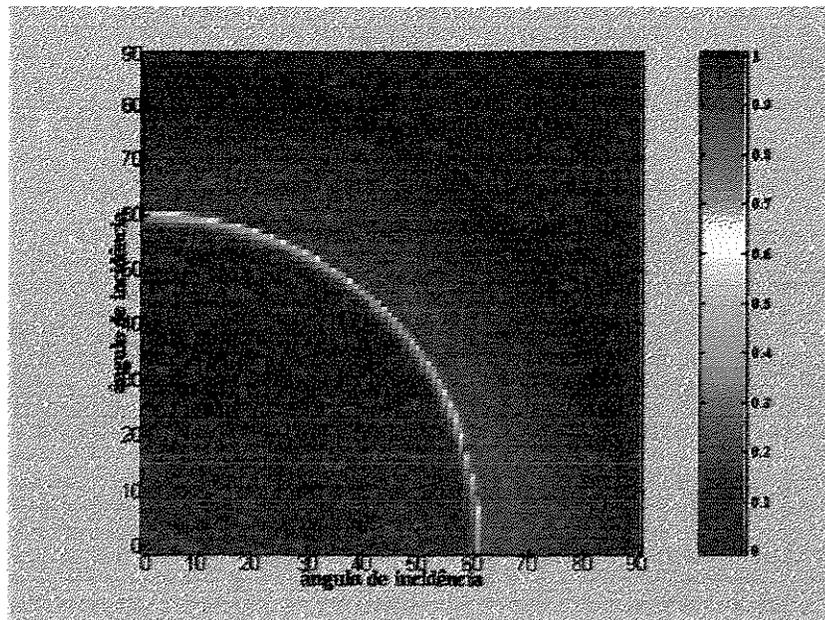


FIGURA 1.4.5 – Coeficientes de reflexão em projeção estero-gráfica para o modelo III.

Capítulo 2

Modelagem Inversa

2.1) Introdução

O problema da modelagem inversa consiste em se determinar um modelo físico a partir dos dados observados e que descreva-os de forma consistente, com base numa relação funcional assumida (modelo direto) entre o modelo físico e os dados. O conhecimento do problema direto ou da modelagem direta é de fundamental importância para se efetivar a inversão. Os métodos de inversão podem ser classificados em duas categorias, Hampson, (1991):

- a) Métodos de Inversão Baseada no Operador onde é assumido que o processo direto possa ser invertido através da aplicação de operadores matemáticos aos dados observados e obter o modelo compatível, como no caso dos Métodos de Deconvolução. Estes métodos de inversão são muito sensíveis à efeitos de ruídos nos dados.
- b) Métodos de Inversão Baseado no Modelo onde são gerados dados sintéticos através da modelagem direta e comparados com os dados observados. Se a comparação for aceitável, o modelo correspondente será aceito como solução. Caso contrário, o modelo atual será alterado e sua resposta sintética será calculada e comparada de novo com o dado observado. Este processo iterativo de se gerar modelos direto até que um modelo aceitável seja gerado caracteriza a inversão como um processo de otimização, onde uma medida ou uma comparação entre os dados observados e os dados sintéticos é estabelecida como critério de aceitabilidade para o modelo.

A solução do problema inverso pelo método baseado no modelo se reduz, assim, em determinar o modelo que otimiza uma norma quantitativa da similaridade, medida como a diferença entre os dados observados e os dados sintéticos através de uma função objetivo. Os métodos de otimização variam dependendo do método de pesquisa aplicado para a determinação do modelo ótimo podendo ser classificados como Métodos de Otimização

Local e como Métodos de Otimização Global, Sen and Stoffa, (1995). Os Métodos de Otimização Global são usados em situações em que a função objetivo é do tipo não linear, apresentando vários máximos, e mínimos, onde a solução obtida por Métodos de Otimização Local pode ficar aprisionada.

Neste trabalho, a relação não linear entre o coeficiente de reflexão e os parâmetros elásticos e a densidade dos meios, juntamente com a análise de sensibilidade da função objetivo onde se percebe múltiplos mínimos locais, foi usado como critério para que a modelagem inversa fosse feita com métodos de otimização global.

O objetivo da modelagem inversa foi descobrir os parâmetros elásticos e a densidade do meio fraturado a partir dos dados sísmicos “observados”. A partir dos coeficientes de reflexão nas interfaces estudadas (dado “observado”) e do conhecimento das equações do problema direto, podemos usar métodos de otimização global que possam descobrir quais parâmetros elásticos e densidades produziram os dados observados e estudar a ocorrência de ambigüidade no problema inverso.

Os algoritmos AG e ED usados neste trabalho são métodos de otimização global que usam amostragem aleatória e critérios de seleção para guiar o método de pesquisa aplicado para a determinação do modelo ótimo.

Neste trabalho, os algoritmos de modelagem inversa AG e ED otimizam a função objetivo definida como a diferença entre os coeficientes de reflexão “observado” e os coeficientes de reflexão sintéticos para ondas sísmicas quasi-compressionais (qP) através da norma l_2 . Os parâmetros do modelo devem ser modificados durante o processo de inversão até que uma concordância aceitável entre os dados “observados” e os dados sintéticos.

As restrições devido as condições de estabilidade dos sólidos e as condições de anisotropia suave mais as limitações imposta pelos valores máximos e mínimos medidos dos parâmetros elásticos e da densidade (explícitos na **SEÇÃO 2.4**) foram obedecidas ao longo da inversão.

2.2) Algoritmos De Otimização Global

Os algoritmos de otimização global preocupam-se com o cálculo e a caracterização de máximos ou mínimos de funções não lineares. Estes algoritmos são amplamente aplicados em problemas de otimização em áreas como economia e finanças, telecomunicações, projetos de engenharia e controle, problemas de redes e tráfego, entre outros usos.

Diferentemente dos métodos de otimização local, a inversão baseada na otimização global trabalha com o espaço de modelos, não necessitando da escolha de um bom modelo inicial que exija o conhecimento prévio (conhecimento específico), mas apenas o conhecimento dos limites do espaço de pesquisa onde esteja incluída a solução. Uma outra característica dos algoritmos globais é que eles não trabalham com inversão de matrizes, nem precisam do cálculo da matriz gradiente e da matriz Hessiana. Neste tipo de estratégia o que temos que fazer é calcular iterativamente a resposta sintética do modelo direto que é atualizado por métodos de pesquisa aleatória até que o dado sintético convirja para o dado observado.

As técnicas de otimização global, que em geral otimizam uma função objetivo matematicamente formulada, podem ser simplificadas através das seguintes etapas:

- 1 – Definição do espaço de modelos e suas respostas como dado sintético.
- 2 – Cálculo da resposta do modelo direto como dado observado.
- 3 – Cálculo da função objetivo baseado numa comparação entre o dado observado e o dado sintético.
- 4 – Aplicação de uma técnica de otimização global para atualizar do modelo sintético.
- 5 – Análise da função objetivo para escolha do modelo ótimo ou retorno a etapa 3.

Na **FIGURA 2.1** é mostrado o fluxograma da otimização global ou melhor, as cinco etapas na forma de fluxograma.

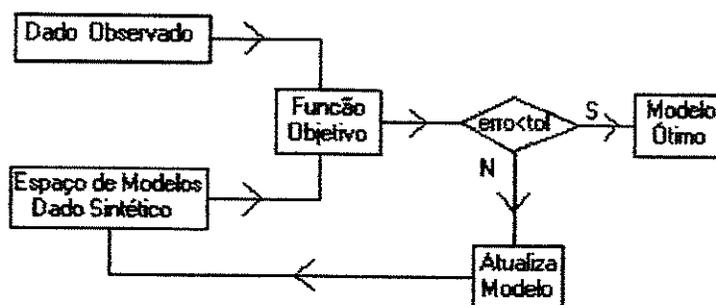


FIGURA 2.1 - Fluxograma de Otimização Global

Os algoritmos *Simulated Annealing* (SA), os algoritmos Genéticos (AG) e os algoritmos Evolução diferencial (ED) são os principais algoritmos de otimização global implementados na indústria e funcionam de acordo com o fluxograma da **FIGURA 2.1** e aparecem a cada iteração durante a etapa de atualização do modelo.

Os algoritmos SA simulam os processos de busca dos estados de energia mínima durante o resfriamento e cristalização de um sólido aquecido onde para cada temperatura é permitido alcançar o equilíbrio térmico cuja probabilidade de atingir este estado de energia segue alguma função distribuição.

Os algoritmos AG simulam processos da evolução biológica de uma população de modelos que são gerados aleatoriamente e comparações entre o dado observado e o dado sintético, são feitas através de uma função objetivo com atualizações da população de modelos até se atingir o ajuste ótimo. As atualizações do modelo visando o ajuste ótimo no AG são atingidos através dos processos de codificação binária, seleção, cruzamento e mutação.

Recentemente, Storm and Price (1995) propuseram um esquema adaptativo para otimização global em espaço contínuo denominado de Evolução Diferencial (ED). O ED mimetiza a evolução biológica similar ao algoritmo AG com a diferença da natureza contínua do espaço de modelos trabalhado pelo algoritmo ED.

Neste trabalho foram utilizados os algoritmos AG e o ED. Optou-se pelo AG em relação ao SA pelo fato de o AG estar instalado no Laboratório de computação e a implementação do algoritmo SA demandaria tempo. Segundo Mallick, (1995), o algoritmo SA e o algoritmo AG produzem resultados similares. Já a utilização do algoritmo ED em geofísica não tem nenhuma documentação a respeito, e sua utilização nesta tese para modelagem inversa dos coeficientes de reflexão produziu resultados encorajadores. Em geral estas três classes de algoritmos de minimização global são as principais opções para minimizar uma função objetivo não linear.

2.2.1) Algoritmo Genético - AG

Algoritmos Genéticos são algoritmos de otimização global com métodos de pesquisa e atualização dos parâmetros de inversão baseados em mecanismos de seleção natural, com sobrevivência das melhores estruturas em cada geração. Desenvolvido em 1985 por John Holland, tem aplicações em problemas de otimização em áreas como, Física, Engenharia, Economia, Ciências da Computação dentre outras, Goldberg (1989). Alguns exemplos do uso de AG em geofísica são mostrados em Mallick (1995), e Sen e Stoffa (1995).

Em cada geração, o algoritmo AG cria novos elementos usando os melhores fragmentos de antigos elementos buscando melhorar o desempenho dos novos elementos até atingir um objetivo a ser satisfeito. Os mecanismos básicos do algoritmo AG são a cópia de elementos e a permuta de trechos de elementos de uma população executados através das operações de reprodução ou seleção, cruzamento e mutação.

Os elementos da população, ou os parâmetros de otimização, (ou parâmetros de inversão) devem ser codificados numa cadeia finita de caracteres para que seja gerado o espaço de pesquisa que contenha todos os possíveis elementos da população (espaços de modelos) a serem acessados por pesquisa aleatória durante os processos de otimização da função objetivo.

Podemos visualizar o processo de otimização seguido pelo algoritmo AG na FIGURA 2.1, onde no espaço de modelos, uma população inicial de modelos são selecionados aleatoriamente (parâmetro controlado pelo usuário), calculada a sua resposta sintética e comparada com o valor observado através da função objetivo. Para o algoritmo AG usado neste trabalho o critério de parada do programa não é estipulado por um nível de tolerância da função objetivo com na FIGURA 2.1, mas ocorre somente quando for atingido o número máximo de iterações (definido pelo usuário) e, a partir daí são

selecionados um número estipulado de melhores respostas ao longo da inversão. Assim, a cada iteração o algoritmo AG procura diminuir o valor da função objetivo, atualizando o último modelo, através dos processos de seleção, cruzamento e mutação controlados respectivamente pelos valores pré definidos das probabilidades de seleção, (Ps), de cruzamento, (Pc), e de mutação, (Pm), até atingir o número máximo de iterações. A seguir são detalhadas as etapas de codificação, seleção, cruzamento e mutação, fundamentais para implementação do algoritmo AG.

CODIFICAÇÃO – Na codificação é gerado o espaço de modelos ou seja o conjunto de todos os modelos possíveis gerados pela combinação cartesiana de seus parâmetros. Inicialmente cada modelo é discretizado pela codificação binária de seus parâmetros, ou seja uma série de zeros e uns que definem o valor de cada parâmetro no espaço de modelos.

A discretização de cada parâmetro de inversão pode ser descrita da seguinte forma:

$$m_j = m_j^{\min} + k_j \Delta m_j \quad j = 1, \dots, n$$

onde m_j^{\min} é o valor mínimo do j -ésimo parâmetro

Δm_j é o intervalo de discretização do j -ésimo parâmetro

k_j é um valor inteiro que define o valor da j -ésimo parâmetro

n bits armazena 2^n valores de k_j

O número de bits para a codificação depende dos valores máximo e mínimo de cada parâmetro e de sua taxa de incremento. Um parâmetro codificado representa os seus valores discretos assumidos.

Neste trabalho foi feita a codificação da densidade e dos cinco parâmetros elásticos que definem o reservatório fraturado do meio inferior, utilizando os valores máximos, mínimos e os intervalos de discretização.

SELEÇÃO – A seleção governa os processos reprodutivos da população atual baseado nos valores da função objetivo e na probabilidade associada. Um conjunto de modelos são selecionados aleatoriamente do espaço de modelos, e os modelos que tiverem os menores valores da função objetivo (estes valores são usados para controlar a seleção de cada modelo) terão mais chances de serem selecionados para geração seguinte do que os que tiverem os piores valores da função objetivo na nova população de descendentes. A operação de seleção pode ser implementada de várias formas, sendo conhecido basicamente três métodos de seleção, Neves and De Hoop, (1997):

i) O método de seleção proporcionais a função objetivo usa a razão entre a função objetivo de cada modelo e a soma dos n valores das funções objetivo da população como um indicador do número de cópias de cada modelo da população irá compor a nova população. É conhecida como seleção estocástica com substituição, onde um modelo selecionado pode ser selecionado outra vez, podendo ser visualizado como uma roleta com áreas proporcionais aos valores da probabilidades.

ii) O método de seleção estocástica remanescente sem substituição. O número de cópias esperado de cada modelo selecionado é calculado por:

$$c_I = Qe(m^I) \quad I = 1, \dots, Q \quad (3)$$

onde $e(m^I)$ é o valor da função objetivo do I -ésimo modelo

Inicialmente cada modelo I é copiado $N_I = \text{int}[C_I]$ vezes. Se denotarmos o fracional remanescente como ϕ_I , podemos expressar o número de cópias em cada iteração como $C_I = N_I + \phi_I$. Então, neste método de seleção, um modelo é copiado com probabilidade proporcional a ϕ_I e não poderá ser selecionado novamente.

iii) O método de seleção determinística remanescente a população é sorteada de acordo

com ϕ e os modelos copiados são os que possuem melhor classificação durante o sorteio.

CRUZAMENTO – No cruzamento, os modelos selecionados são emparelhados e atualizados pela comutação da informação entre pares de modelos em pontos selecionados aleatoriamente ao longo do comprimento, produzindo assim uma nova população de novos modelos que ainda preserva as características dos modelos originais. O cruzamento é baseado na probabilidade de cruzamento (P_c), especificada pelo usuário, que para um alto valor terá maiores chances de cruzamento. Os pontos de cruzamento podem ser simples ou múltiplos. Nos pontos simples de cruzamento um bit de posição é selecionado aleatoriamente e todos os bits à direita são comutados. Nos pontos múltiplos de cruzamento um ponto de cruzamento é encontrado independentemente para cada parâmetro que compõe o modelo. A operação de cruzamento pode levar a convergência prematura que ocorre quando após sucessivas gerações, a população inteira converge para um mesmo valor de tal forma que a operação não gera mais novos cromossomos. Embora a mutação produza diversidade, a taxa de mutação é muito baixa de tal forma que nenhuma melhoria seja conseguida nas gerações finais. Os algoritmos evolucionários tentam superar este problema.

MUTAÇÃO – O principal objetivo desta etapa é adicionar e manter algum grau de diversidade no processo de inversão de tal forma que as características básicas dos modelos não sejam perdidas. A operação de mutação é feita trocando-se um bit 0 por um bit 1 na cadeia. A probabilidade de mutação, P_m , possui geralmente um valor muito baixo, e de acordo com Goldberg (1989) o valor é igual ao recíproco do comprimento da cadeia que garante que a maioria dos modelos sofra pelo menos uma mutação, ou de acordo com Stoffa e Sen (1991) e Mallick(1995), a probabilidade de mutação é implementada pela operação de atualização onde o valor da função residual de dois modelos descendentes e seus pais são comparados e os dois com menores valores para a função residual são preservados para a próxima geração .

2.2.2) Algoritmo Evolução Diferencial - ED

Storn and Price (1995) descrevem um novo algoritmo de otimização de funções contínuas não lineares e não diferenciáveis, denominado de algoritmo de evolução diferencial. Este algoritmo pertence ao ramo dos algoritmos genéticos mas que não utilizam codificação binária em sua implementação. Os processos de seleção e cruzamento são implementados com aritmética de ponto flutuante. Esta característica permite que este algoritmo seja diretamente aplicado na otimização de espaços contínuos. Embora esta seja uma estratégia heurística de otimização, o algoritmo ED tem convergido mais rápido e com maior precisão em vários problemas que outros métodos de pesquisa aleatória mais tradicionais como a classe de algoritmos SA (Storn and Price (1995)).

Os processos de seleção, cruzamento e mutação também são empregados pelo algoritmo ED. Neste algoritmo cada indivíduo é representado por um vetor contendo os parâmetros do modelo representados em aritmética de ponto flutuante. Uma população inicial de indivíduos (modelos) é gerada aleatoriamente dentro do domínio admissível para cada parâmetro. O tamanho da população, NP , é um parâmetro do algoritmo definido pelo usuário.

Em cada iteração, cada indivíduo desta população, \mathbf{x}_p , é seqüencialmente comparado a um vetor gerado aleatoriamente pelos processos de seleção, cruzamento e mutação. O processo de seleção consiste em escolher aleatoriamente da população três indivíduos diferentes de \mathbf{x}_p (\mathbf{x}_a , \mathbf{x}_b e \mathbf{x}_c). Um novo vetor, \mathbf{v} , é gerado a partir dos indivíduos selecionados pela combinação linear,

$$\mathbf{v} = \mathbf{x}_a + F(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_c), \quad (4)$$

em que F é um outro parâmetro do algoritmo variando no intervalo $0,5 < F < 1,4$.

O processo de cruzamento consiste em recombinar aleatoriamente os parâmetros de \mathbf{v} e \mathbf{x}_p gerando um novo indivíduo \mathbf{t} . Cada componente do vetor \mathbf{t} é obtida gerando-se um número aleatório, r , no intervalo $[0, 1]$ a partir de uma distribuição uniforme. Se $r < CR$ esta componente do vetor \mathbf{t} é igual a mesma componente de \mathbf{v} , caso contrário esta componente de \mathbf{t} é igual a mesma componente de \mathbf{x}_p . Neste processo o parâmetro de cruzamento, CR , é um parâmetro do algoritmo e varia entre 0 e 1. Para garantir diversidade, pelo menos uma componente de \mathbf{t} , escolhida aleatoriamente, é tomada do vetor \mathbf{v} , o que seria análogo a um processo de mutação no algoritmo genético descrito anteriormente.

Finalmente o valor da função objetivo, ϵ , é avaliado para \mathbf{t} . Se este valor $\epsilon(\mathbf{t})$ for menor que $\epsilon(\mathbf{x}_p)$, o vetor \mathbf{t} substitui \mathbf{x}_p na população que será utilizada na próxima iteração caso contrário \mathbf{x}_p permanece na nova população.

2.3 – Função Objetivo

Para se otimizar problemas usando computadores deve-se primeiro formula-los matematicamente, onde esclarecemos nossos objetivos quando vamos otimizar alguma função ou processo. Um problema de otimização consiste encontrar máximos e mínimos de uma função não linear de várias variáveis, denominada de função objetivo, com variáveis restritas ao espaço multidimensional. Os algoritmos de otimização global permitem o uso de funções objetivos não lineares e não diferenciáveis.

Neste trabalho, o problema de otimização consiste em minimizar a função objetivo definida matematicamente como a raiz quadrada da diferença ao quadrado entre os coeficientes de reflexão exato ou “observado” e os coeficientes de reflexão sintéticos para ondas sísmicas qP, ou seja, através da norma l_2 da seguinte forma:

$$e(m) = \sum_{\varphi} \sum_{\theta} (|R_{obs}(\varphi, \theta, m_o) - R_{syn}(\varphi, \theta, m)|^2)^{1/2} \quad (5)$$

Onde, R_{obs} e R_{syn} são os coeficientes de reflexão observado e o gerado sinteticamente na pesquisa no espaço de parâmetros, m representa todos os possíveis modelos gerados sinteticamente através das combinações dos valores dos parâmetros de inversão no espaço de modelos, φ é o ângulo de azimuth, θ é o ângulo de incidência, e m_o são os parâmetros do modelo exato.

2.4) Parametrização e Vínculos

A modelagem inversa precisa saber que variáveis ou parâmetros de inversão devem ser estimados e quais as restrições nos seus valores durante a otimização da função objetivo. As variáveis (a densidade e os parâmetros elásticos) que dependem o coeficiente de reflexão na interface dos meios anisotrópicos, são usadas como parâmetros de inversão e os valores permitidos são denominados de vínculos.

Os parâmetros de inversão podem ter diferentes representações, tais como a densidade e os parâmetros elásticos que descrevem completamente a anisotropia, ou pelos parâmetros anisotrópicos de Thomsen (1986), ou como pelos parâmetros que definem fraturas alinhadas (Hudson, 1981).

Os parâmetros de inversão usados pelos algoritmos de modelagem inversa durante este trabalho foram a densidade e os parâmetros elásticos. A utilização desta parametrização foi justificada pelo valor exato e por não se ter que fazer linearizações nos coeficientes de reflexão, e também pelo fato que as parametrizações de Thomsen (1986) e de Hudson (1981) não descrevem completamente a anisotropia e por serem obtidas facilmente dos parâmetros elásticos e da densidade.

Os valores máximos e mínimos assumidos pela densidade e pelos parâmetros elásticos (ver gráficos de análise de sensibilidade) respeitam os limites impostos pela propagação de ondas sísmicas nas rochas da superfície da Terra, e mantidos para os algoritmos AG e ED ao longo de toda modelagem inversa.

O intervalo de discretização da densidade e dos parâmetros elásticos usados pelo algoritmo AG foram respectivamente:

$$\Delta\rho=0.01g/c^3 \quad e \quad \Delta c_{\text{min}} = 0.01 \times 10^9 N/m^2$$

Esses valores foram escolhidos de acordo com a máxima resolução esperada nas medidas desses parâmetros através da sísmica de reflexão. O espaço de modelos discreto gerado pelo algoritmo AG é composto de aproximadamente de $10E20$ modelos já levando em conta as restrições de estabilidade dos sólidos e as condições de anisotropia suave. O algoritmo ED trabalha no espaço contínuo e seu espaço de modelo contém infinitos modelos.

As restrições sobre as condições de estabilidade dos sólidos e as condições de anisotropia suave foram introduzidas para reduzir o número de modelos no espaço de modelos. As condições de estabilidade dos sólidos exige que uma quantidade não nula de energia seja usada para se deformar um sólido ou que a matriz que define os parâmetros elásticos seja positiva definida, e foram calculadas e mapeadas durante a execução do modelo direto de onde são informados quais os modelos que ferem esta condição e sendo dada uma alta penalidade para respectiva função objetivo, criando assim uma região proibida no espaço de modelos.

As restrições de anisotropia suave exige que a velocidade de propagação das ondas qP em qualquer direção seja maior do a velocidade de propagação das ondas qS, e também que não ocorram triplicações nem polarizações anômalas, Simões Filho at all, (1998) colocadas como:

$$\begin{aligned} \max(c_{44}, c_{55}, c_{66}) &< \min(c_{11}, c_{22}, c_{33}) \\ (c_{13} + c_{55})^2 &< c_{33}(c_{11} - c_{55}) \\ (c_{13} + c_{55})^2 &< c_{11}(c_{33} - c_{55}) \\ c_{13} + c_{15} &> 0 \end{aligned}$$

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

2.5 – Análise de Sensibilidade

Em geral as funções de várias variáveis não lineares são multimodais com os pontos mínimo ou máximo muitas vezes quase indistintos. Pontos de máximo e mínimo múltiplos podem levar a não unicidade das soluções durante a inversão.

A análise de sensibilidade dos parâmetros de inversão nos dá uma indicação do grau de multimodalidade e não linearidade da função objetivo através da medida do desvio desta função ao seu valor exato, e foi usado para justificar a inversão através de algoritmos de otimização global. A análise de sensibilidade é feita enquanto se varia um parâmetro do modelo de refletividade em relação ao seu valor exato enquanto os valores dos outros parâmetros do modelo de refletividade são mantidos fixos no seu valor exato. Os valores máximos e mínimos de cada parâmetro estão dentro dos limites impostos pela propagação de ondas sísmicas nas rochas da superfície da Terra.

Curvas da função sensibilidade muito planas ou com pouca sensibilidade a variação de um parâmetro também provocam não unicidade das solução do problema inverso.

A análise de sensibilidade dos parâmetros de inversão usados na modelagem inversa dos três modelos (velocidade da onda cisalhante do meio um, densidade e parâmetros elásticos do reservatório fraturado) são apresentados no Capítulo três onde são apresentados os resultados e discussões. Os resultados gráficos da análise de sensibilidade dos modelos I, II e III são mostrados nas **FIGURAS 3.1.7, 3.2.3, e 3.3.3** respectivamente.

Capítulo 3

Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos um resumo dos principais resultados obtidos pela modelagem inversa da velocidade de propagação da onda cisalhante do meio superior do modelo I, da densidade e dos parâmetros elásticos do meio inferior dos modelos I, II e III executada pelos algoritmos AG e ED.

O algoritmo AG foi usado durante a modelagem inversa da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do meio inferior para os modelos I, II e III. O algoritmo ED foi usado duas vezes na modelagem inversa do modelo I. No primeiro caso, se determinou a densidade e os parâmetros elásticos do meio inferior, enquanto que no segundo caso, se determinou a velocidade de propagação da onda cisalhante do meio superior isotrópico mais a densidade e os parâmetros elásticos do meio inferior. Os coeficientes de reflexão usados pelos algoritmos de inversão foram adquiridos com controle da variação do ângulo de incidência e de azimute e do percentual de ruído gaussiano.

Na TABELA 3.1 é mostrado um resumo dos resultados da modelagem inversa dos três modelos estudados. Nesta Tabela são mostrados os valores dos parâmetros que afetam a convergência dos algoritmos (POP SIZE = Tamanho da população inicial; ITER/GERA = Número de iterações para o AG / Número de gerações para o ED; Pc = Probabilidade de cruzamento; Pm = Probabilidade de mutação; F. CUSTO = Valor da função objetivo; CPU TIME = Tempo de CPU), as geometrias de aquisição da onda qP e o nível de ruído (AZIMUTES = ângulo de azimute, INCIDENCIA = Ângulo de incidência RUIDO = Nível de ruído gaussiano), o valor exato da densidade e dos parâmetros elásticos do meio superior (RHO(1)EXAT = Densidade do meio superior; C11(1)EXAT, C12(1)EXAT, C13(1)EXAT, C22(1)EXAT, C23(1)EXAT, C33(1)EXAT C44(1)EXAT, C55(1)EXAT, e C66(1)EXAT são os valores exatos dos parâmetros elásticos do meio superior; VP(1)EXAT = Valor exato da velocidade da onda compressional para o modelo I isotrópico;

VS(1)EXAT, VS(1)CALC, VS(1)MED, e VS(1)DESV são os valores exato, invertido, médio e o desvio padrão da velocidade da onda cisalhante para o modelo I isotrópico), além do valor exato, do valor calculado, do valor médio e do desvio padrão das variáveis invertidas do meio inferior (RHO(2)EXAt = Densidade do meio inferior; C₁₁(2)EXAT, C₁₁(2)CALC, C₁₁(2)MED, C₁₁(2)DESV, C₁₂(2)EXAT, C₁₂(2)CALC, C₁₂(2)MED, C₁₂(2)DESV, C₂₂(2)EXAT, C₂₂(2)CALC, C₂₂(2)MED, C₂₂(2)DESV, C₄₄(2)EXAT, C₄₄(2)CALC, C₄₄(2)MED, C₄₄(2)DESV, C₅₅(2)EXAT, C₅₅(2)CALC, C₅₅(2)MED, e C₅₅(2)DESV, são os valores exatos, invertidos, médios e os desvios padrão dos parâmetros elásticos do meio inferior). Nas **SECÇÕES 3.1, 3.2, e 3.3** deste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da **TABELA 3.1** para os modelos I, II e III respectivamente.

Os programas-fonte usados pelo algoritmo AG na modelagem direta e inversa foram desenvolvidos e escritos em linguagem mista C e Fortran 77 e estão instalados nas estações de trabalho SUN SPARC-10 do Laboratório de Computação Científica do Geociências da Unicamp em ambiente UNIX. O programa de inversão do AG foi uma adaptação da versão desenvolvida por Grefenstette, (1990) que usa programas para a modelagem direta desenvolvido por Costa, (1996). Os algoritmos ED foram desenvolvidos Costa, (1996), escritos em Linguagem C++ e executados em microcomputador Pentium 333 com 128 k de memória RAM.

A operação do algoritmo AG consiste da execução de um programa principal que atua em outras subrotinas (como a subrotina do cálculo da refletividade, da seleção da população inicial, da geração de números aleatórios, da atualização do último modelo, etc.). Partindo de uma população inicial de modelos definida pelo usuário e selecionadas aleatoriamente no espaço de modelos o programa principal segue suas iterações testando o valor da função objetivo e atualizando a população de modelos até atingir o número máximo de iterações. É necessário informar o número de iterações, o tamanho da população inicial, as probabilidades de cruzamento e mutação, e o número dos melhores resultados ao longo de toda inversão (na **TABELA 3.1** são apresentados as estatísticas sobre os 20 melhores resultados ao longo de toda inversão com o algoritmo AG).

A operação do algoritmo ED consta da execução de um programa principal que executa outras subrotinas usando a idéia de objetos e não sendo muito diferente do ponto de vista operacional do algoritmo AG, com a diferença de que o número de iterações é substituído pelo número de gerações e que não tem o mesmo significado. É necessário informar o número de gerações, a probabilidade de cruzamento, o tamanho da população inicial, o percentual de ruído gaussiano, e o parâmetro F da equação 4.

Durante a execução da modelagem inversa, procurou-se testar e controlar:

- 1) qual a quantidade mínima de ângulos de incidência e de azimutes (geometria mínima de aquisição) para aquisição da onda plana qP refletida,
- 2) qual a quantidade máxima de ruído gaussiano a ser adicionado nos dados e
- 3) quais os valores ótimos dos parâmetros operacionais dos algoritmos AG e ED necessários para se reproduzir corretamente as variáveis de inversão.

TABELA 3.1 - Resultados da modelagem inversa dos algoritmos AG e ED.

PROGRAMA	AG	ED	ED	AG	AG
MODELO	I	I	I	II	III
POP SIZE	30	60	90	20	20
ITER/GERA	200000	1947	2001	100000	100000
Pc	0.75	0.5	0.5	1.0	0.52
Pm	0.01			0.01	0.01
CPU TIME	0.2764 horas	4.687 horas	22.125 horas	0.5518 horas	0.54888 horas
F. CUSTO	0.00158010	0.000265972	0.000230952	0.050651	0.000092
RUIDO	1%	1%	1%	1%	1%
AZIMUTES	3 - (0,45,90°)	3 - (0,45,90°)	3 - (0,45,90°)	3 - (0,45,90°)	3 - (0,45,90°)
INCIDENCIA	34° - (2/2°)	34° - (2/2°)	44° - (2/2°)	50° - (2/2°)	50° - (2/2°)
C11(1)EXAT	X	X	X	33.500	26.350
C12(1)EXAT	X	X	X	14.100	11.460
C13(1)EXAT	X	X	X	14.800	12.160
C22(1)EXAT	X	X	X	33.500	32.520
C23(1)EXAT	X	X	X	14.800	13.820
C33(1)EXAT	X	X	X	22.500	21.520
C44(1)EXAT	X	X	X	5.000	5.000
C55(1)EXAT	X	X	X	5.000	3.400
C66(1)EXAT	X	X	X	9.700	8.100
RHO(1)EXAt	2.250	2.250	2.250	2.540	2.540
VP(1)EXAT	2.541	2.541	2.541	X	X
VS(1)EXAT	1.490	1.490	1.490	X	X
VS(1)CALC	X	X	1.42926	X	X
VS(1)MED	X	X	1.44393	X	X
VS(1)DESV	X	X	0.0233595	X	X
RHO(2)EXAt	2.2800	2.280	2.280	2.280	2.280
RHO(2)CAL	2.2630	2.28451	2.2797	2.278	2.282
RHO(2)MED	2.2630	2.28449	2.27968	2.278	2.282
RHO(2)DESV	0.0170	0.000019019	0.000497139	0.002	0.002
C11(2)EXAT	27.6900	27.690	27.690	27.690	27.690
C11(2)CALC	27.6150	27.5989	27.7442	27.5450	27.715
C11(2)MED	27.6055	27.5970	27.7492	27.5335	27.717
C11(2)DESV	0.085177	0.00113425	0.0143577	0.15872	0.29749
C12(2)EXAT	10.2200	10.220	10.220	10.220	10.220
C12(2)CALC	9.95400	10.18638	10.90368	10.2440	10.214
C12(2)MED	9.95400	10.18692	10.7173	10.2455	10.214
C12(2)DESV	0.266207	0.00115852	0.00812912	0.026702	0.007484
C22(2)EXAT	33.8600	33.860	33.860	33.860	33.860
C22(2)CALC	34.0860	33.7982	33.8908	33.936	33.816
C22(2)MED	34.0835	33.7984	33.8891	33.936	33.8165
C22(2)DESV	0.223540	0.000340389	0.00874379	0.0760	0.043553
C44(2)EXAT	10.9900	10.990	10.990	10.990	10.990
C44(2)CALC	11.0840	11.01	10.6322	11.054	10.964
C44(2)MED	11.0850	11.0101	10.7243	11.054	10.9635
C44(2)DESV	0.095047	0.000206799	0.143566	0.06400	0.026589
C55(2)EXAT	9.3600	9.360	9.360	9.360	9.360
C55(2)CALC	9.0430	9.28871	8.99531	9.3630	9.353
C55(2)MED	9.0440	9.28849	9.08845	9.3625	9.353499
C55(2)DESV	0.316029	0.000404847	0.143626	0.00781	0.009849

3.1 – Meio Isotrópico Sobre Arenito Fraturado

Este meio é exatamente o meio descrito pelo modelo I da **TABELA 1.4.1**. A modelagem inversa deste modelo foi feita tanto pelo algoritmo AG quanto pelo ED, permitindo uma comparação dos resultados produzidos por estes dois tipos de algoritmos de otimização global, conforme mostrado nas colunas dois, três e quatro da **TABELA 3.1**.

Para este meio, foram resolvidos dois casos de modelagem inversa: a) no primeiro caso, o problema foi determinar os cinco parâmetros elásticos e a densidade do reservatório fraturado, calculados pelos algoritmos AG e ED com os resultados mostrados nas colunas dois e três da **TABELA 3.1**; b) no segundo caso, o problema foi determinar os cinco parâmetros elásticos e a densidade do reservatório fraturado mais a velocidade de propagação da onda cisalhante do folhelho isotrópico do meio superior, calculados pelos algoritmos ED apenas e com os resultados mostrados na coluna quatro da **TABELA 3.1**.

Os resultados da modelagem inversa para o primeiro caso usando o algoritmo AG estão mostrados na coluna dois da **TABELA 3.1**. A geometria mínima de aquisição obtida pelo algoritmo AG foi três ângulos de azimute (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) com ângulos de incidência variando desde zero até trinta e quatro graus igualmente espaçados de dois em dois graus. São também apresentados na coluna dois da **TABELA 3.1** o valor exato, o valor calculado, o valor médio e o desvio padrão da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do reservatório fraturado usados como variáveis de inversão. Os parâmetros operacionais utilizados pelo AG na execução do modelo I foram: o número de iterações (200000), o tamanho da população inicial (30) e a probabilidade de cruzamento (0.75). Foram escolhidas as vinte melhores soluções da modelagem inversa em 200 mil iterações e feito estatística básica sobre eles (cálculo da média e do desvio padrão). Os parâmetros elásticos C_{12} , C_{22} e C_{55} apresentaram os maiores desvios (0.266207, 0.22354, e 0,316029 respectivamente) e foram considerados os menos resolvidos, enquanto que a densidade e os parâmetros elásticos C_{11} , e C_{44} apresentaram os menores desvios (0.01700,

0.08517, e 0.095047 respectivamente). Na **FIGURA 3.1.1** são mostrados os coeficientes de reflexão exato, os coeficientes de reflexão extrapolado e calculado pelo algoritmo AG para os três ângulos azimutais. Na **FIGURA 3.1.2** são mostrados a projeção estereográfica dos coeficientes de reflexão do modelo I exato, do calculado pelo algoritmo AG, e da diferença entre os mesmos. Foi adicionado 1% de ruído gaussiano do valor máximo dos coeficientes de reflexão durante a inversão.

Os principais resultados da modelagem inversa para o primeiro caso usando o algoritmo ED estão mostrados na coluna três da **TABELA 3.1**. A geometria mínima de aquisição obtida pelo algoritmo ED foi de três ângulos de azimute (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) com ângulos de incidência variando desde zero até trinta e quatro graus igualmente espaçados de dois em dois graus. São também mostrados na coluna três da **TABELA 3.1** o valor exato, o valor calculado, o valor médio e o desvio padrão da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do reservatório usados como variáveis de inversão. Os parâmetros operacionais usados pelo algoritmo ED foram o número de gerações (1947), o tamanho da população (60), a probabilidade de cruzamento (0.5) e F (0.95). O parâmetro elástico C_{12} apresentou o maior desvio (0.00115852) enquanto a densidade apresentou o menor desvio (0.000019019). Na **FIGURA 3.1.3** são mostrados os coeficientes de reflexão exato, os coeficientes de reflexão extrapolado e os calculados pelo algoritmo ED plotados nos três ângulos azimutais. Na **FIGURA 3.1.4** são mostrados, em projeção estereográfica para o modelo I, os coeficientes de reflexão exato, os calculados pelo algoritmo ED e a diferença entre os mesmos. Foram adicionados um por cento de ruído gaussiano nos coeficientes de reflexão durante a inversão.

Os principais resultados da modelagem inversa para o segundo caso, obtidos pelo algoritmo ED, estão mostrados na coluna quatro da **TABELA 3.1**. A geometria mínima de aquisição obtida foi de três ângulos de azimute (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) com ângulos de incidência variando desde zero até a quarenta e quatro graus igualmente espaçados de dois em dois graus. São também mostrados na coluna quatro da **TABELA 3.1** o valor exato, o valor calculado, o valor médio e o desvio padrão da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do reservatório fraturado usados como variáveis de inversão. Os

parâmetros operacionais usados pelo algoritmo ED foram o número de gerações (2001), o tamanho da população inicial (90), a probabilidade de cruzamento (0.5) e F (0.75). Os parâmetros elásticos C_{44} e C_{55} apresentaram o maior desvio (0.143566 e 0.143626 respectivamente) enquanto que a densidade apresentou menor desvio (0.000497139). Na **FIGURA 3.1.5** são mostrados os coeficientes de reflexão exato, os coeficientes de reflexão extrapolado e o calculado pelo algoritmo ED, para os três ângulos azimutais. Na **FIGURA 3.1.6** são mostrados, em projeção esterográfica para o modelo I, os coeficientes de reflexão exato, o calculado pelo algoritmo ED, e a diferença entre os mesmos. Foram adicionados um por cento de ruído gaussiano nos coeficientes de reflexão durante a inversão.

As análises de sensibilidade das variáveis de inversão do modelo I (velocidade de propagação da onda cisalhante do meio superior, densidade e cinco parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , e C_{55} do meio inferior) são mostradas nas curvas dos gráficos da **FIGURA 3.1.7**. O valor mínimo global nos gráficos sempre aparecem em torno do valor exato da variável analisada sugerindo a possível unicidade da inversão.

3.2 – Meio Folhelho TIV sobre Arenito Fraturado

Este meio está descrito como modelo II na **TABELA 1.4.2**. A modelagem inversa foi feita somente pelo algoritmo AG (algoritmo ED não implementado na época) e seus resultados estão apresentados na coluna cinco da **TABELA 3.1**, permitindo uma comparação com os resultados da inversão do modelo I realizado pelo algoritmo AG e mostrado na coluna dois. A única diferença entre esses dois modelos consiste do tipo de material do meio superior (o modelo I tem uma descrição elástica mais simples do que o modelo II) o que implica em diferentes geometrias mínimas de aquisição.

Para este modelo, o problema inverso foi determinar os cinco parâmetros elásticos e a densidade do reservatório fraturado, idêntico ao problema inverso do modelo I resolvido pelo algoritmo AG.

Os resultados da modelagem inversa deste modelo estão resumidos na coluna cinco da **TABELA 3.1**. A geometria mínima de aquisição requerida para inversão foi de três ângulos de azimute (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) com ângulos de incidência variando desde zero até cinqüenta graus igualmente espaçados de dois em dois graus. São também mostrados o valor exato, o valor calculado, o valor médio e o desvio padrão da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do reservatório fraturado usados como variáveis de inversão, com maior desvio padrão (0.15872) apresentado pelo parâmetro elástico C_{11} , e menor desvio (0.002) apresentado pela densidade. Os parâmetros operacionais do algoritmo AG foi o número de iterações (100000), o tamanho da população inicial (20), a probabilidade de cruzamento (1.0) e mutação (0.01). Foram escolhidas as vinte melhores soluções da modelagem inversa nas cem mil iterações calculadas com um por cento de ruído gaussiano. Nos gráficos da **FIGURA 3.2.1** são mostrados os coeficientes de reflexão exato, os coeficientes de reflexão extrapolado e o calculado pelo algoritmo AG, para os três ângulos azimutais. Na **FIGURA 3.2.2** são mostradas as projeções esterográfica dos coeficientes de reflexão exato, do calculado pelo algoritmo de inversão AG, e da diferença entre os mesmos. Foram adicionados 1% de ruído gaussiano do valor máximo dos coeficientes de reflexão durante a inversão.

As análises de sensibilidade das variáveis de inversão do modelo II (densidade e os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior) são mostradas nas curvas da **FIGURA 3.2.3**. O valor mínimo global nos gráficos sempre aparecem em torno do valor exato da variável analisada sugerindo a possível unicidade da inversão.

3.3 – Meio Folhelho Ortorrômico sobre Arenito Fraturado

Este meio está descrito como modelo III na TABELA 1.4.3. A modelagem inversa deste modelo foi feita somente pelo algoritmo AG (algoritmo ED não implementado na ocasião) e seus resultados estão apresentados na coluna seis da TABELA 3.1, permitindo uma comparação com os resultados da inversão do modelo I realizado pelo algoritmo AG e mostrado na coluna dois. A única diferença entre esses dois modelos consiste do tipo de material do meio superior (o modelo I tem uma descrição elástica mais simples do que o modelo III) o que implica em diferentes geometrias mínimas de aquisição.

Para este modelo, o problema inverso foi determinar os cinco parâmetros elásticos e a densidade do reservatório fraturado, idêntico ao problema inverso do modelo I resolvido pelo algoritmo AG.

Os resultados da modelagem inversa deste modelo estão mostrados na coluna seis da TABELA 3.1. A geometria mínima de aquisição necessária para inversão foi de três ângulos de azimute (zero, quarenta e cinco, e noventa graus) com ângulos de incidência variando desde zero até cinqüenta graus igualmente espaçados de dois em dois graus. São também mostrados o valor exato, o valor calculado, o valor médio e o desvio padrão da densidade e dos cinco parâmetros elásticos do reservatório fraturado usados como variáveis de inversão, com maior desvio padrão (0.29749) apresentado pelo parâmetro elástico C_{11} , enquanto que a densidade apresenta o menor desvio (0.002). Os parâmetros operacionais do algoritmo AG foi o número de iterações (100000), o tamanho da população inicial (20), a probabilidade de cruzamento (0.52) e mutação (0.01). Foram escolhidas as vinte melhores soluções da modelagem inversa nas cem mil iterações calculadas com um por cento de ruído gaussiano. Nos gráficos da FIGURA 3.3.1 são mostrados os coeficientes de reflexão exato, os coeficientes de reflexão extrapolado e os calculado pelo algoritmo AG, para os três ângulos azimutais. Na FIGURA 3.3.2 são mostradas as projeções esterográficas dos coeficientes de reflexão exato, do calculado pelo algoritmo AG, e da diferença entre os mesmos. Foram adicionados 1% de ruído gaussiano do valor máximo dos coeficientes de

reflexão durante a inversão.

As análises de sensibilidade das variáveis de inversão do modelo III (densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior) são mostradas na **FIGURA 3.3.3**. O valor mínimo global nos gráficos sempre aparecem em torno do valor exato da variável analisada sugerindo a possível unicidade da inversão.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Capítulo 4

Conclusões e Recomendações

Foi demonstrado para os três modelos estudados neste trabalho que o coeficiente de reflexão de ondas sísmicas planas qP podem ser usados para estimar os cinco parâmetros elásticos e a densidade de um meio equivalente anisotrópico com simetria TIH através dos algoritmos de modelagem inversa AG e ED.

As geometrias mínimas de aquisição para os três modelos obtidos pelos algoritmos AG sugerem que quanto mais complexa for a descrição elástica do meio superior (como é o caso dos modelos II e III) mais complexa será a geometria de aquisição para a modelagem inversa dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior. Para os mesmos azimutes, a abertura angular mínima de 34° para o caso isotrópico do modelo I é compatível com as aberturas angulares da aquisição das ondas compressoriais, enquanto que as aberturas angulares de 50° dos casos dos folhelhos TIV e ortorrômbico dos modelos II e III exigem grandes distancias fonte receptor que ainda estão pouco disponíveis atualmente, limitando a modelagem inversa destas situações.

O algoritmo ED mostrou-se mais eficiente do que o algoritmo AG tanto para os valores dos desvios observados na inversão do modelo I, como no caso em que o algoritmo ED conseguiu inverter para o modelo I as variáveis do meio inferior mais a velocidade de propagação da onda sísmica cisalhante V_s do meio superior. O algoritmo AG não resolveu este problema. Sabe-se que, em geral a dificuldade de convergência e a ambigüidade das soluções dos algoritmos de modelagem inversa cresce quando se desconhece parcial ou totalmente as variáveis elásticas necessárias para a completa definição dos meios anisotrópicos em contato, e a solução para V_s pelo algoritmo ED é um fato importante, pois, em geral não são feitas medidas de velocidade das ondas sísmicas cisalhantes.

Em geral, para estes três modelos de meios estudados, percebeu-se o potencial do método de modelagem direta e inversa das ondas qP para resolver os parâmetros elásticos e a densidade de meios equivalentes TIH, podendo auxiliar a caracterização de reservatórios fraturados, se as condições assumidas para os dados no que diz respeito a efeitos de propagação e atenuação de ondas forem satisfeitas. A metodologia precisa ser testada para meios geológicos mais complexos que precisam de representações equivalentes mais gerais como o caso das simetrias monoclinica e triclinica que necessitam ainda do desenvolvimento de algoritmos e programas de modelagem direta e inversa para a validação do método para todas as simetrias. Outros testes que podem ser feitos imediatamente são a implementação da modelagem inversa do algoritmo ED para inversão dos parâmetros elásticos e da densidade dos modelos II e III e comparar com a execução feita neste trabalho pelo algoritmo AG, e a implementação do método para modelagem inversa do algoritmo SA dos parâmetros elásticos e da densidade dos três modelos.

Uma validação do método para dados sísmico PP real seria extremamente desejável.

Referências Bibliográficas

ABREU, Carlos Eduardo Borges de Salles. *Uma aplicação de Modelagem Sísmica: Caracterização de Fraturas utilizando ondas Quase-Cisalhantes*. Universidade Estadual de Campinas, 1995. 132 p. Tese(Mestrado).

AKI, K. & RICHARDS, P. *Quantitative seismology. Theory and methods*. S. Francisco: Freeman, 1980, 932p.

CASTAGNA, J. P. AND BACKUS, M. M. *Offset – Dependent reflectivity – Theory and Practice of AVO Analysis*. Investigations in geophysics number 8. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1993, 348p.

CRAMPIN, S. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, v.76, p.135-145, 1984.

CRAMPIN, S. A Review of the effects of crack geometry on wave propagation through aligned cracks. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, v.29, p.3-7, 1993.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989, 412p.

HAMPSON, D. AVO inversion, theory and practice. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration.*, p.39-42, june 1991.

HELBIG, K. *Foundations of Anisotropy for exploration seismics*. Handbook of Geophysical Exploration, Section I – Seismic Exploration, Helbig And Treitel (eds.), vol. 22, Pergamon Press, 1994, 486p.

HUDSON, J. A. Wave speed and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, v.64, p.133-150, 1981.

KIM, K. Y., WROLSTAD, K. H., AMINZADEH, F. Effects on transverse isotropy on P-wave AVO for gas sands. *Geophysics*, v.58, n.6, p.883-888, june 1993.

MALLICK, S. Model-based inversion of amplitude-variations-with-offset data using a genetic algorithm. *Geophysics*, v.58, n.4, p.939-954, August 1995.

MUSGRAVE, M. J. P. *Crystal Acoustics*. London: Holden-Day, 1970, 299p.

NEVES, F. A. P. S & DEHOOP. Some remarks on non-linear AVA inversion. *Geophysics*, in press.

PROTAZIO, João dos Santos. *Espalhamento Elástico em Meios Anisotrópicos Estratificados*. Tese de Doutorado em Ciências na Área de Geofísica, Universidade Federal do Pará - UFPA, 1994, 108p.

RÜGER, A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. *Geophysics*, v.63, n.3, p.935-947, june 1998.

SCHOENBERG, M. & PROTAZIO, J. S. 'Zoeppritz' rationalized and generalized to anisotropy. *Journal of Seismic Exploration*, v.1, p.125-144, 1992.

SEM, M. K. AND STOFFA, P. L. *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*. Amsterdam: Elsevier, 1995, 281p.

SHERIFF, R. E. *Reservoir Geophysics*. Tulsa: SEG press, 1992, 400p.

SIMÕES FILHO, Ivan de Araujo. *Modelagem e inversão de tempos de trânsito em meios heterogêneos anisotrópicos fatorados*. Tese de Doutorado em Ciências na Área de Geofísica, Universidade Federal da Bahia - UFBA, 1992, 97p.

SIMÕES FILHO, I. A. , NEVES, F. A., TINEN, J. S., PROTÁZIO, J. S., COSTA, J. C. Multi-azimutal modeling and inversion of qP reflection coefficients in fractured media using genetic algorithm. *Geophysics*, in press.

STORN, R. Constrained Optimization. *Dr. Dobb's Journal*, May 1995, p.119-123, 1995.

STORN, R. AND PRICE, K. Differential Evolution – A simple and efficient adaptative scheme for global optimization over continuous spaces. *Technical Report – ICSI Berkeley*, p.1-12, March 1995.

THOMSEN, L. Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, v.51, n.10, p. 1954-1966, 1986.

TICHELAAR, B. W. AND HATCHELL, P. J. Inversion of 4-C borehole flexural waves to determine anisotropy in a fractured carbonate reservoir. *Geophysics*, v.62, n.5, p.1432-1441, 1997.

TSVANKIN, I. Body-wave radiation patterns and AVO in transversely isotropic media. *Geophysics*, v.60, n.5, p.1409-1425, 1995.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

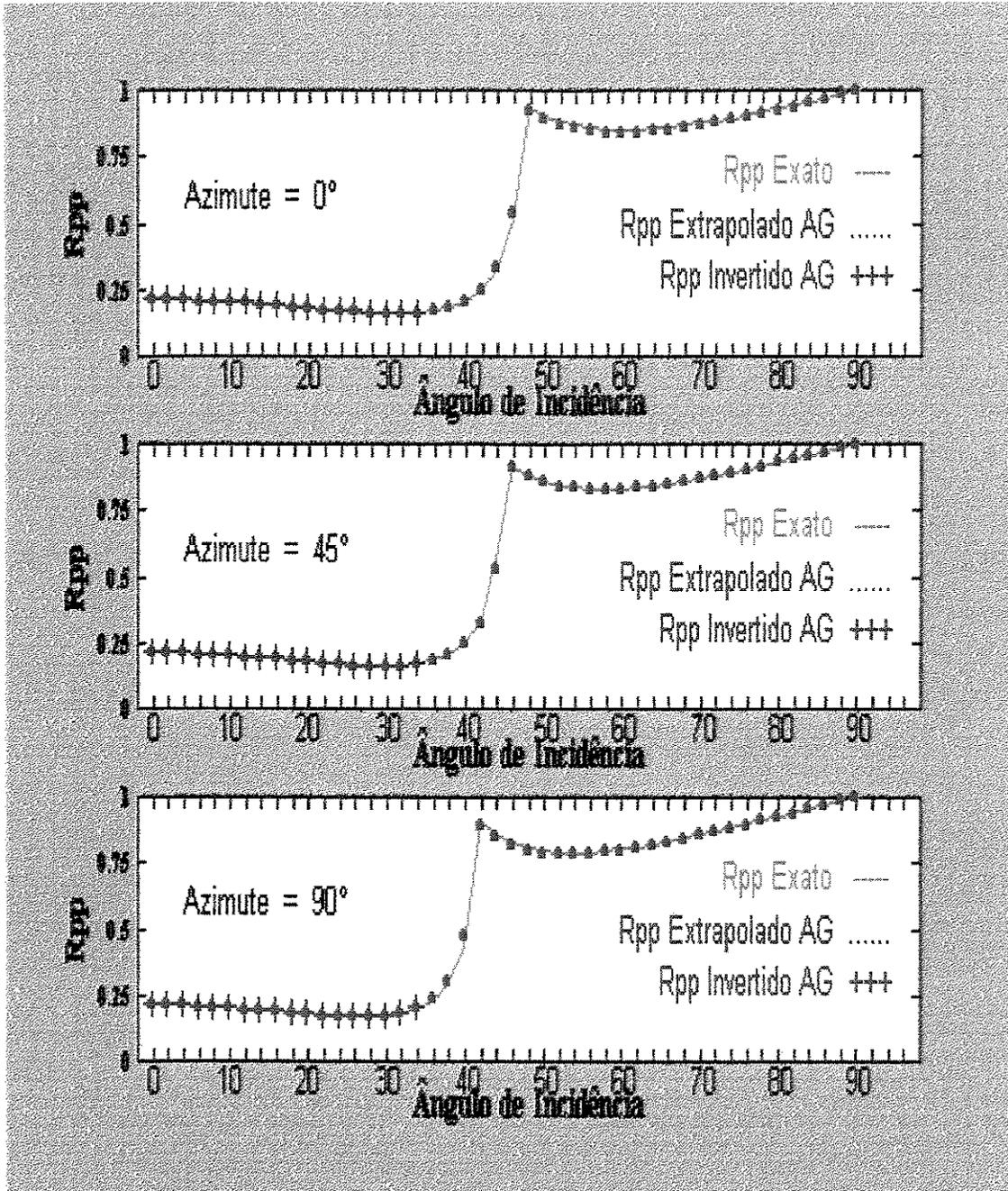


FIGURA 3.1.1 - Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais.

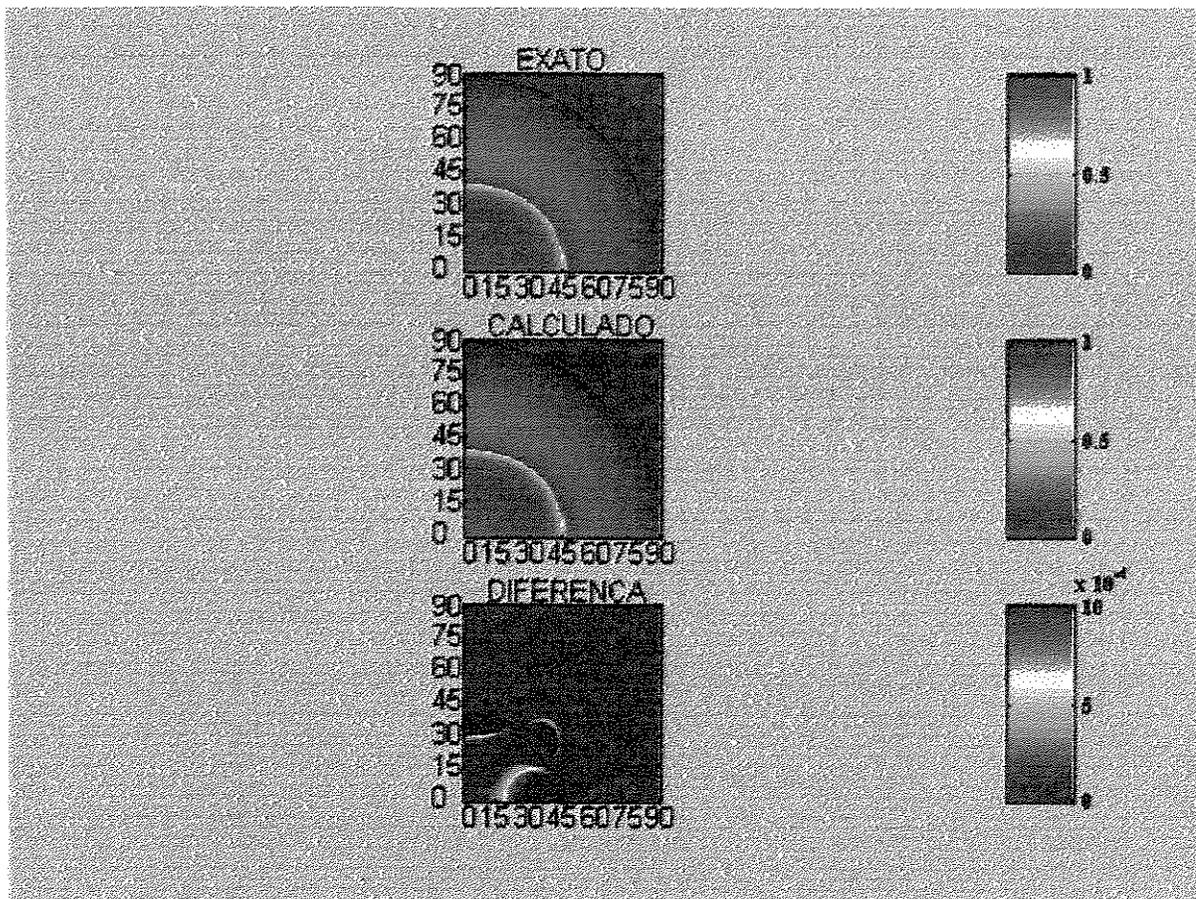


FIGURA 3.1.2 – Projeção estereográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo I.

UNICAMP
 BIBLIOTECA CENTRAL
 SEÇÃO CIRCULANTE

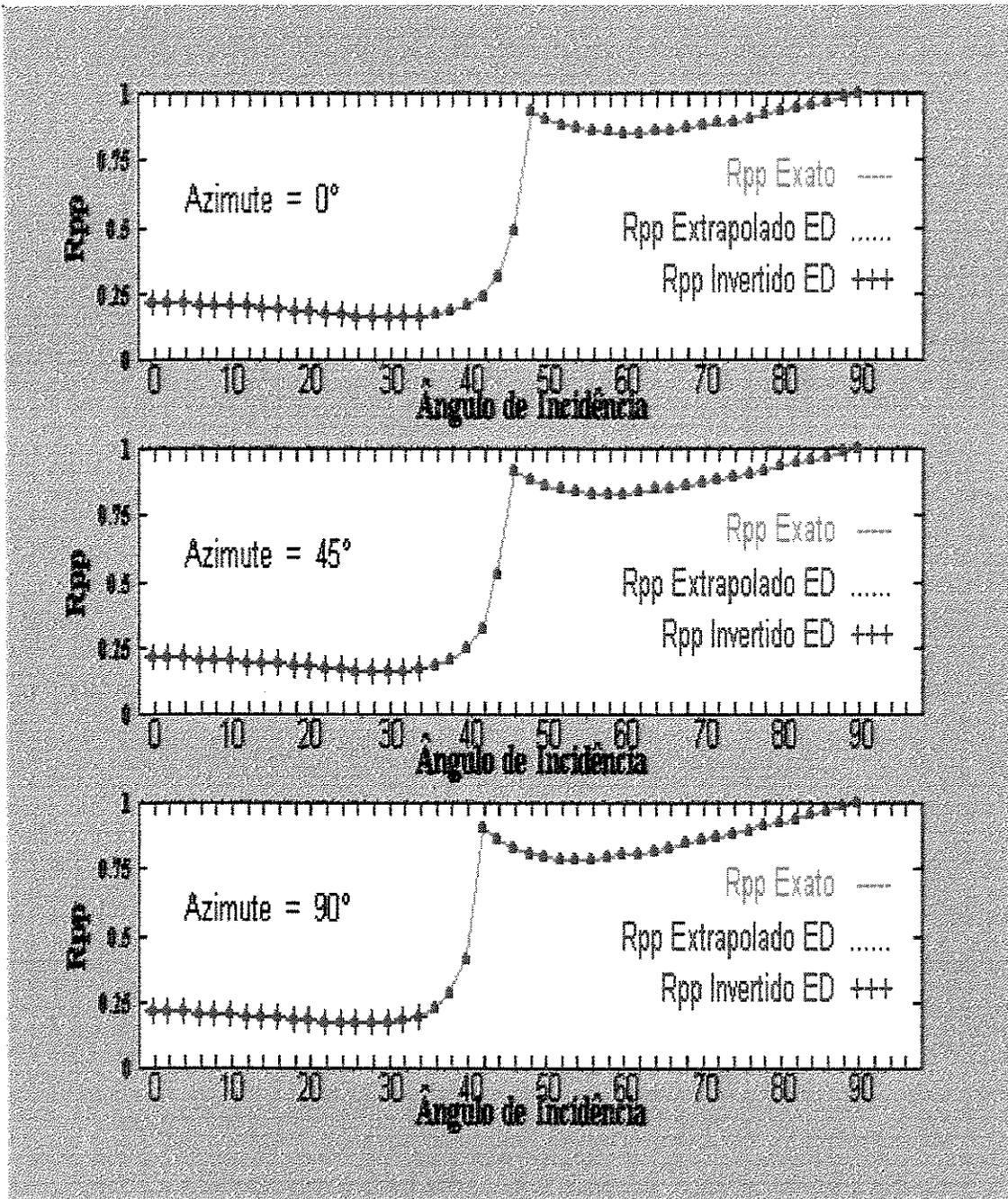


FIGURA 3.1.3 - Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais.

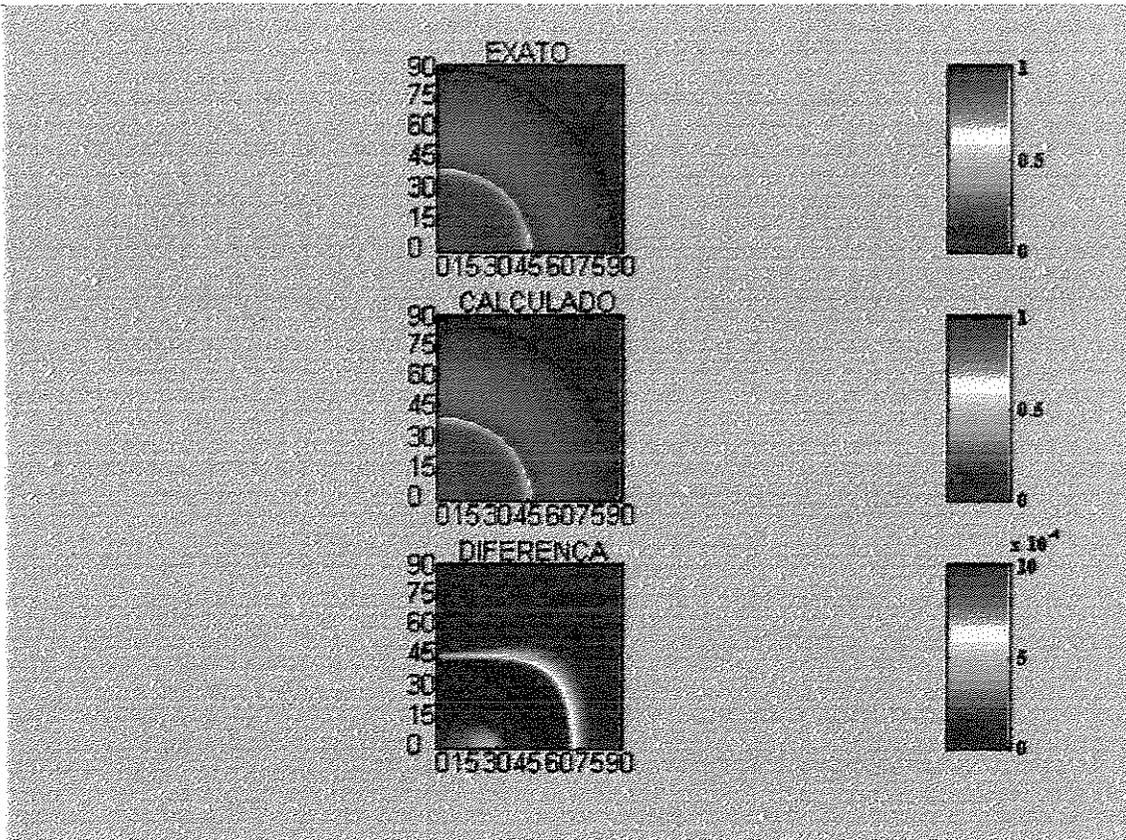


FIGURA 3.1.4 - Projeção estereográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo I.

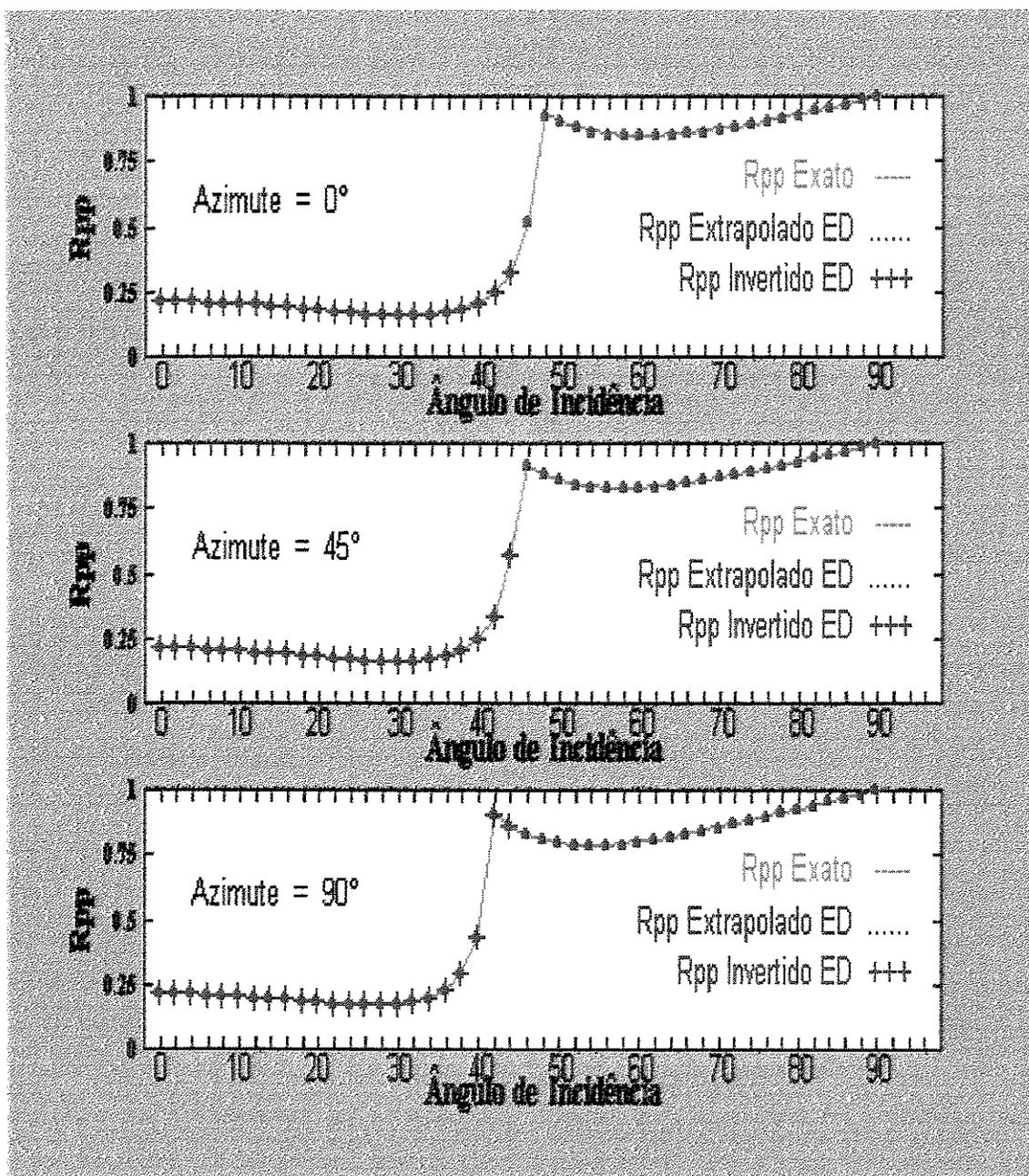


FIGURA 3.1.5 - Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo ED para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior mais a velocidade da onda sísmica cisalhante do meio isotrópico superior do modelo I, plotados nos três ângulos azimutais.

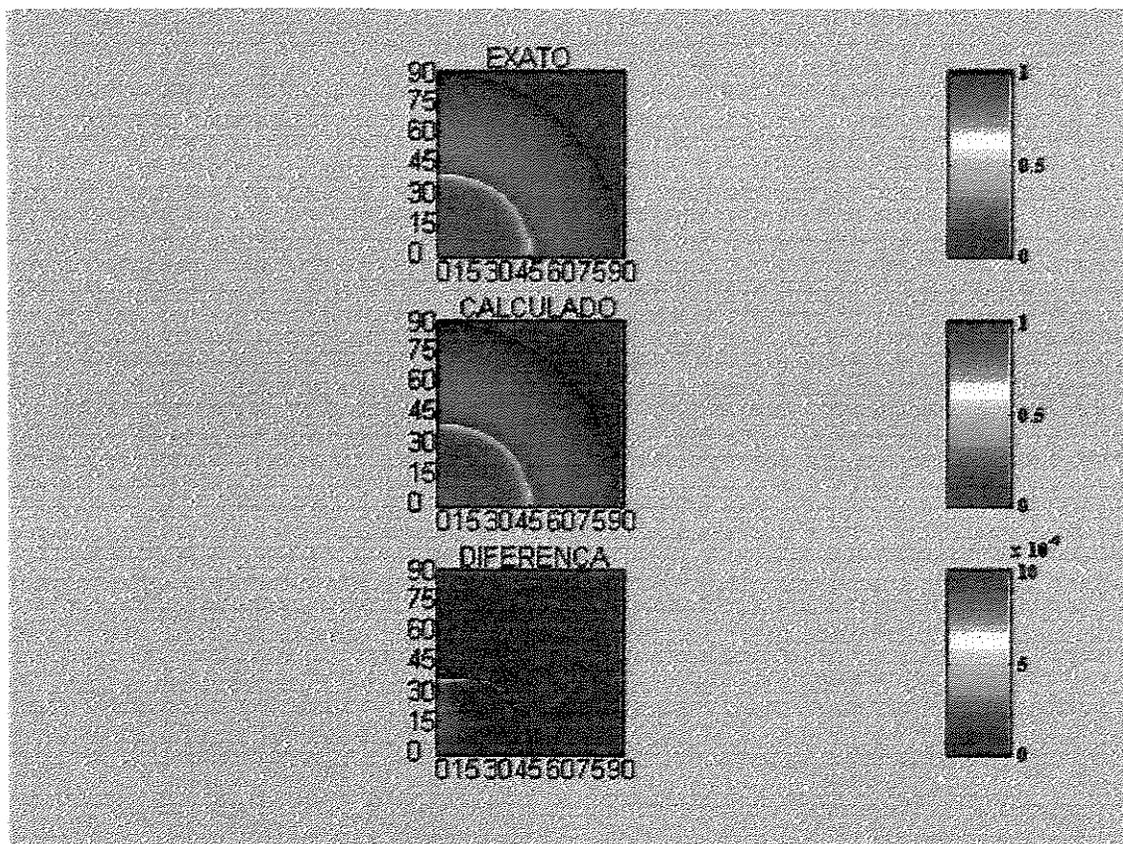


FIGURA 3.1.6 - Projeção esterográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, do invertido pelo ED, e da diferença entre o valor exato e o calculado para o caso da inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do Reservatório Fraturado mais a velocidade da onda sísmica cisalhante do meio isotrópico superior, para o modelo I.

UNICAMP
 BIBLIOTECA CENTRAL
 SEÇÃO CIRCULANTE

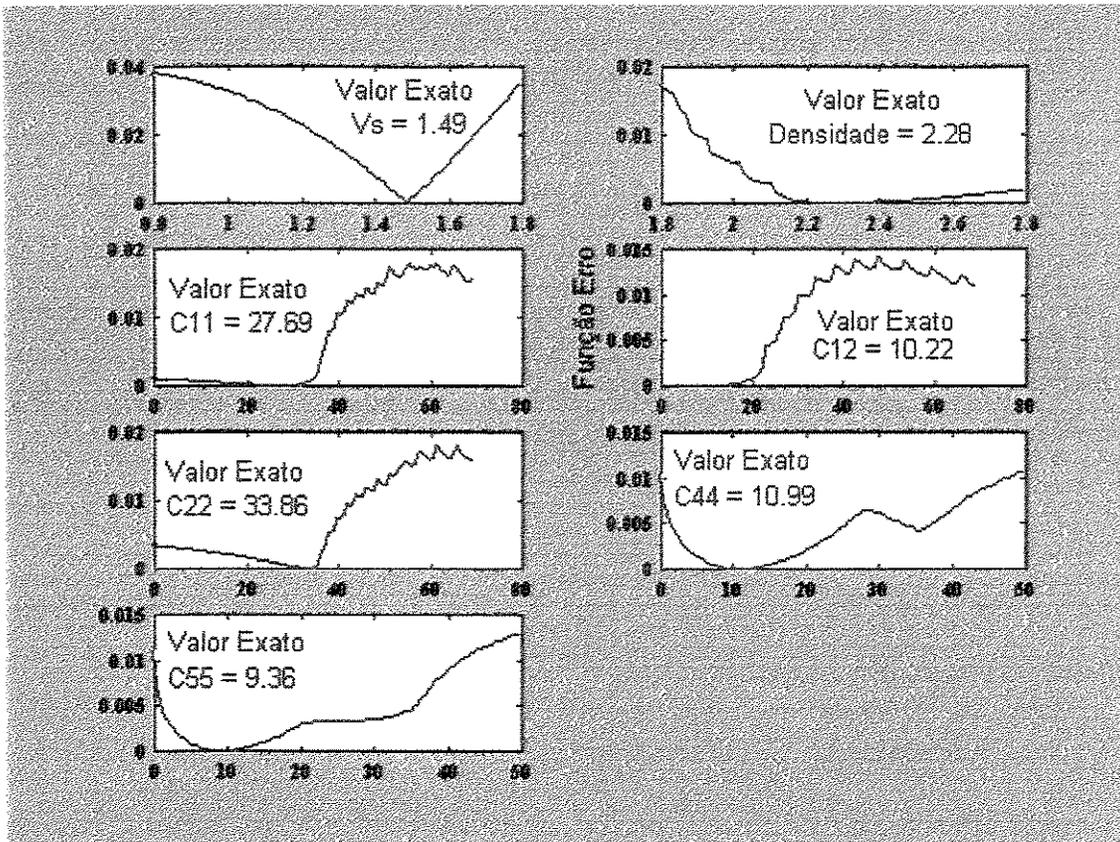


FIGURA 3.1.7 – Curvas de sensibilidade do modelo I para a velocidade cisalhante V_s do meio superior isotrópico, para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior anisotrópico equivalente TIH.

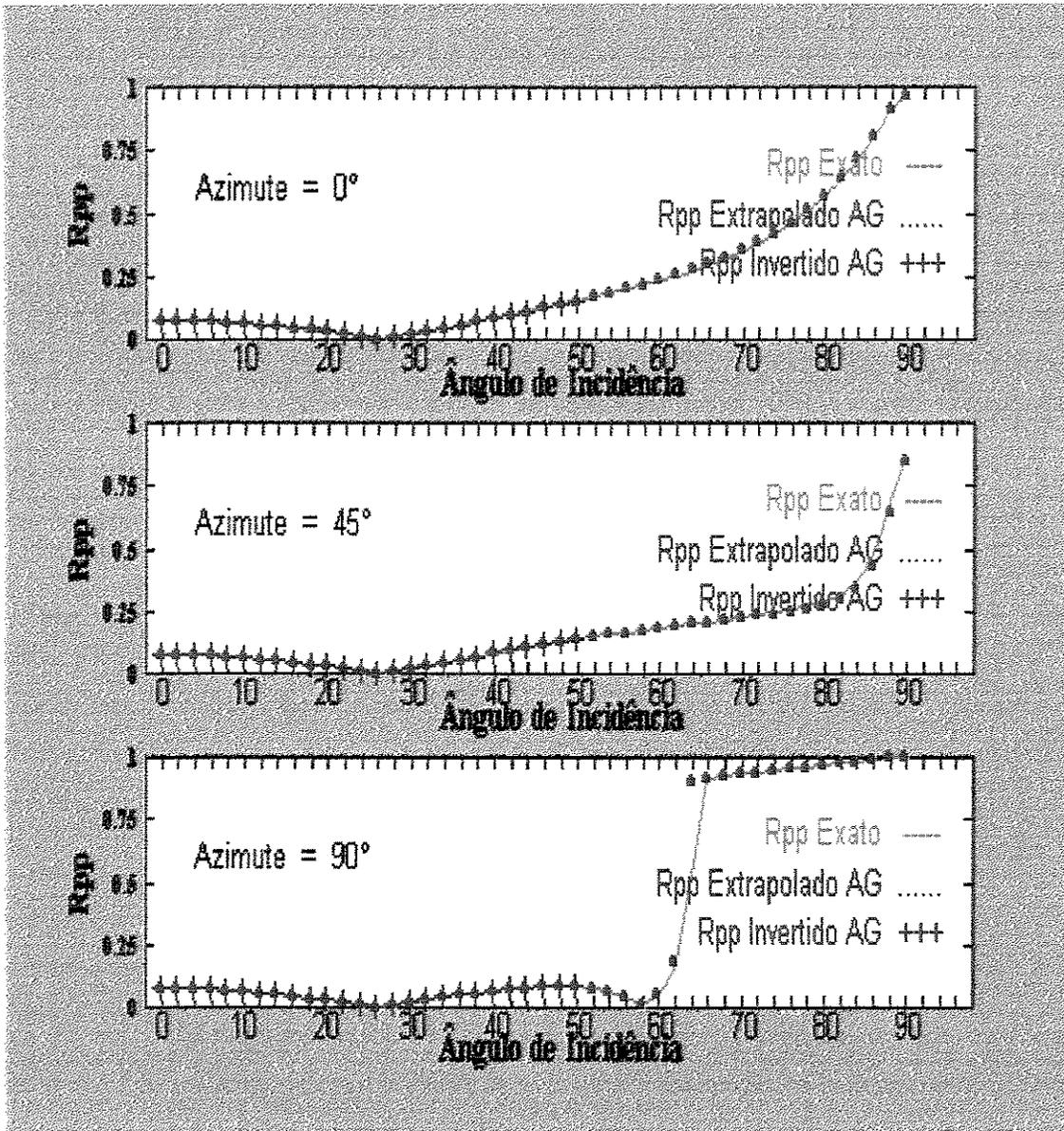


FIGURA 3.2.1 – Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior para o modelo II, plotados nos três ângulos azimutais.

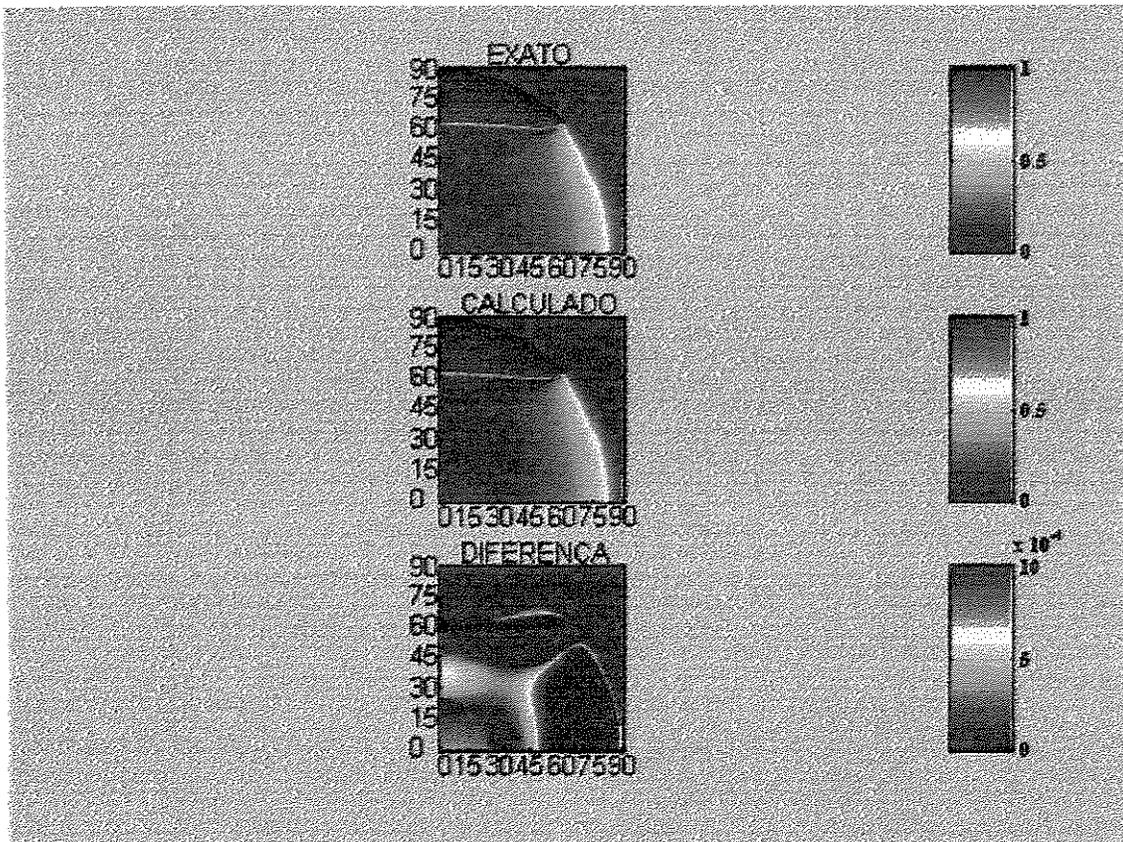


FIGURA 3.2.2 - Projeção esterográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo AG, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo II.

UNICAMP
 BIBLIOTECA CENTRAL
 SEÇÃO CIRCULANTE

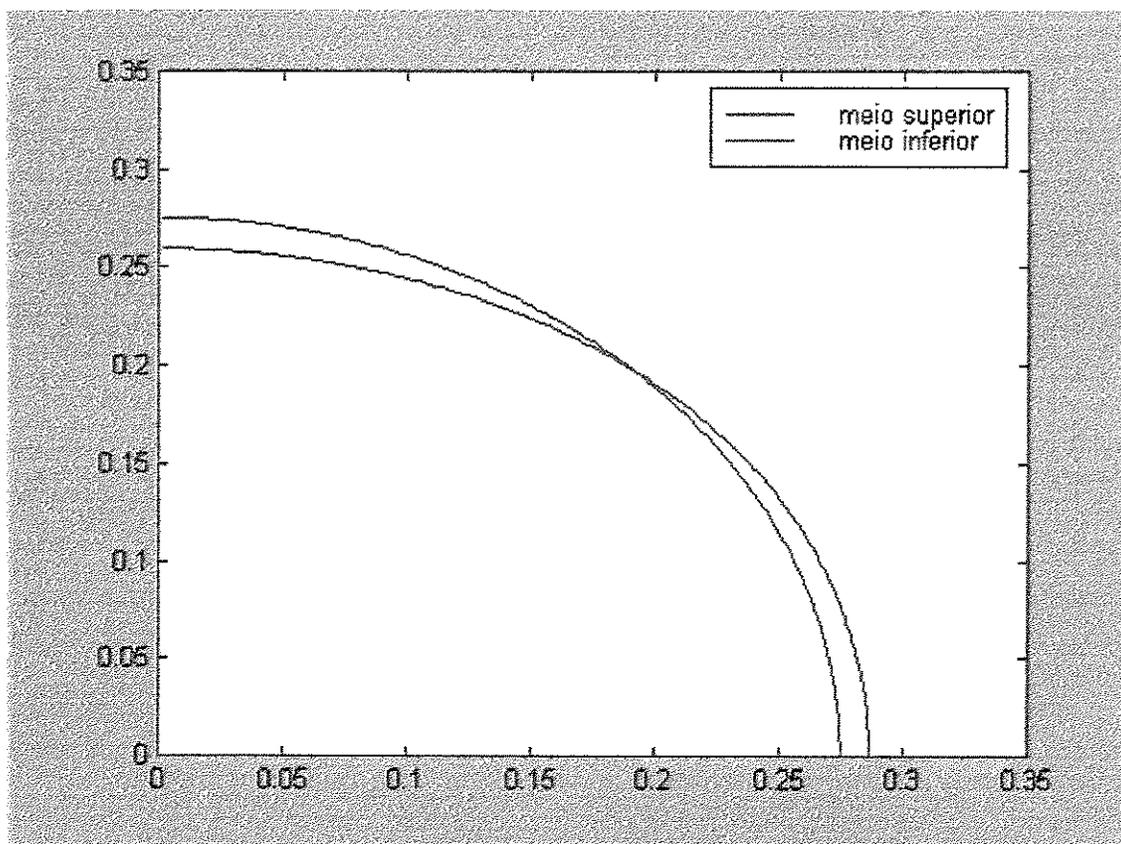


FIGURA 1.4.3 – Projeção horizontal das superfícies de vagarosidades dos meios superior e inferior do modelo II.

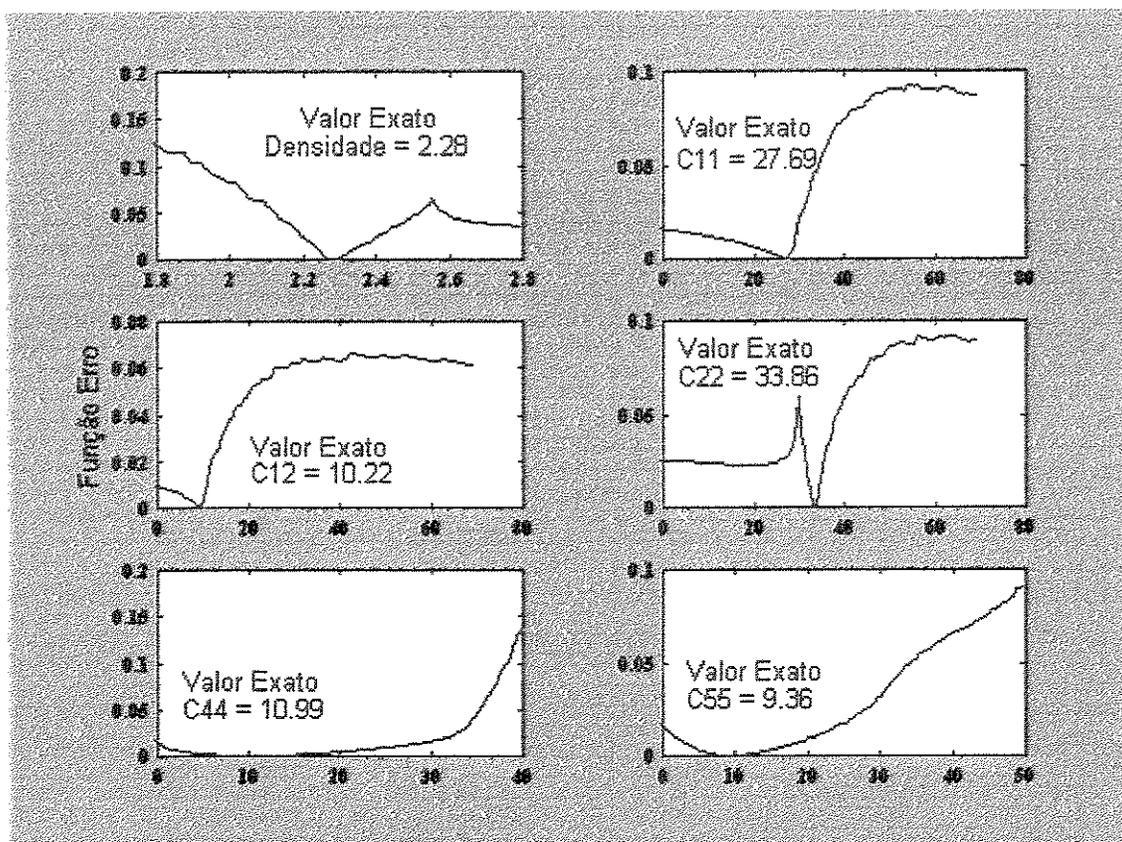


FIGURA 3.2.3 - Curvas de sensibilidade do modelo II para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior equivalente TII.

UNICAMP
 BIBLIOTECA CENTRAL
 SEÇÃO CIRCULANTE

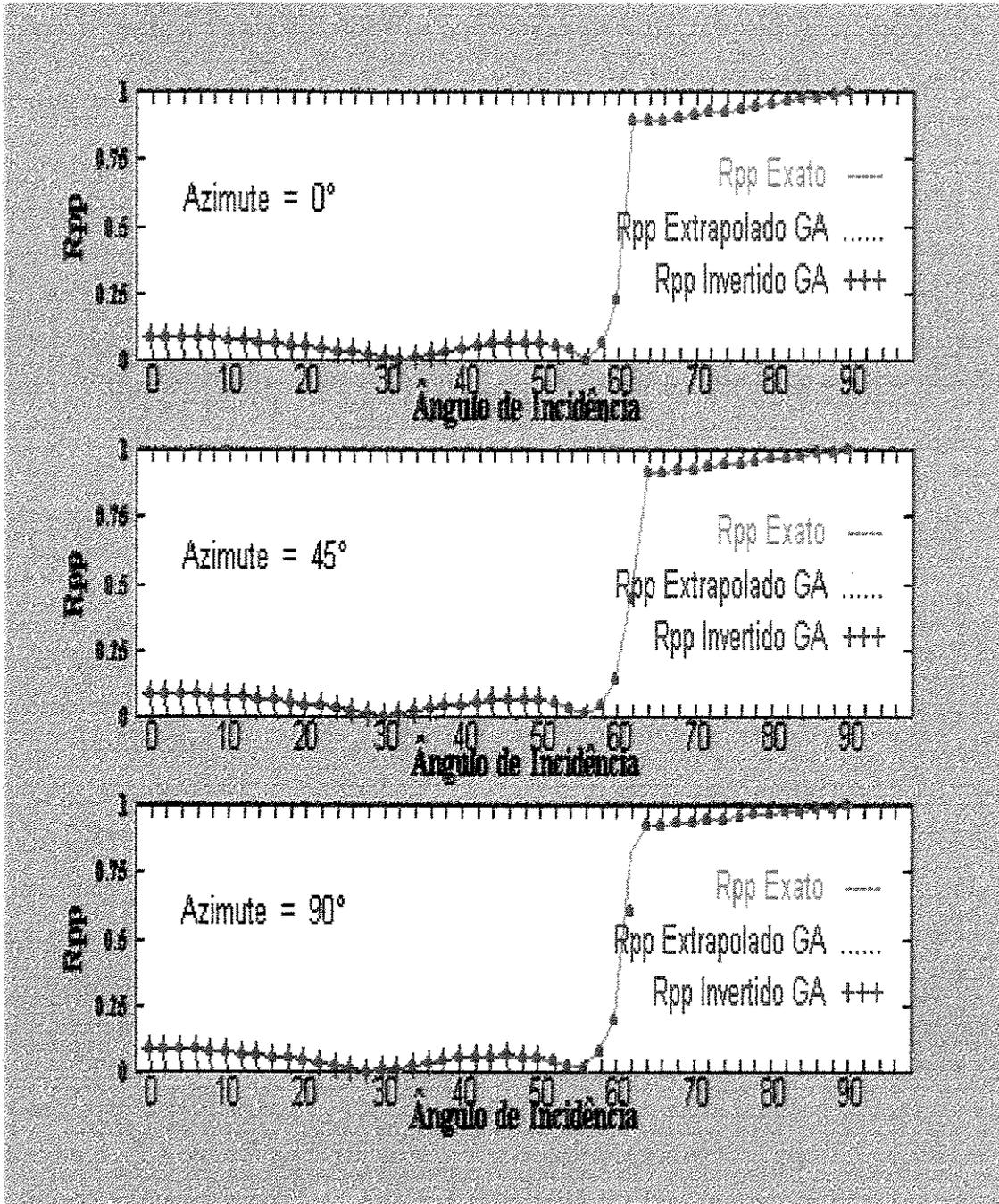


FIGURA 3.3.1 - Coeficientes de reflexão exato, extrapolado, e invertido pelo AG para o caso de inversão dos parâmetros elásticos e da densidade do meio inferior para o modelo III, plotados nos três ângulos azimutais.

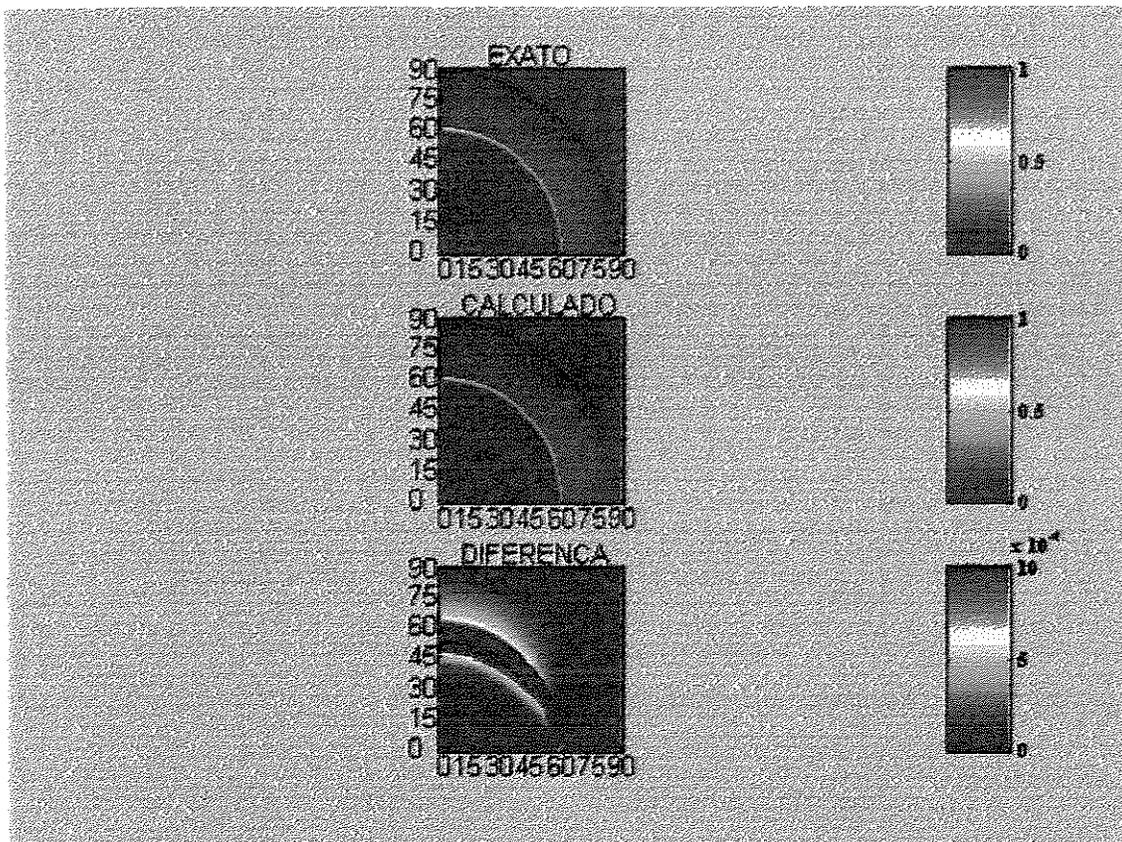


FIGURA 3.3.2 - Projeção esterográfica dos Coeficientes de Reflexão Exato, Calculado pelo algoritmo AG, e a diferença entre o valor exato e o calculado, para o modelo III.

UNICAMP
 BIBLIOTECA CENTRAL
 SEÇÃO CIRCULANTE

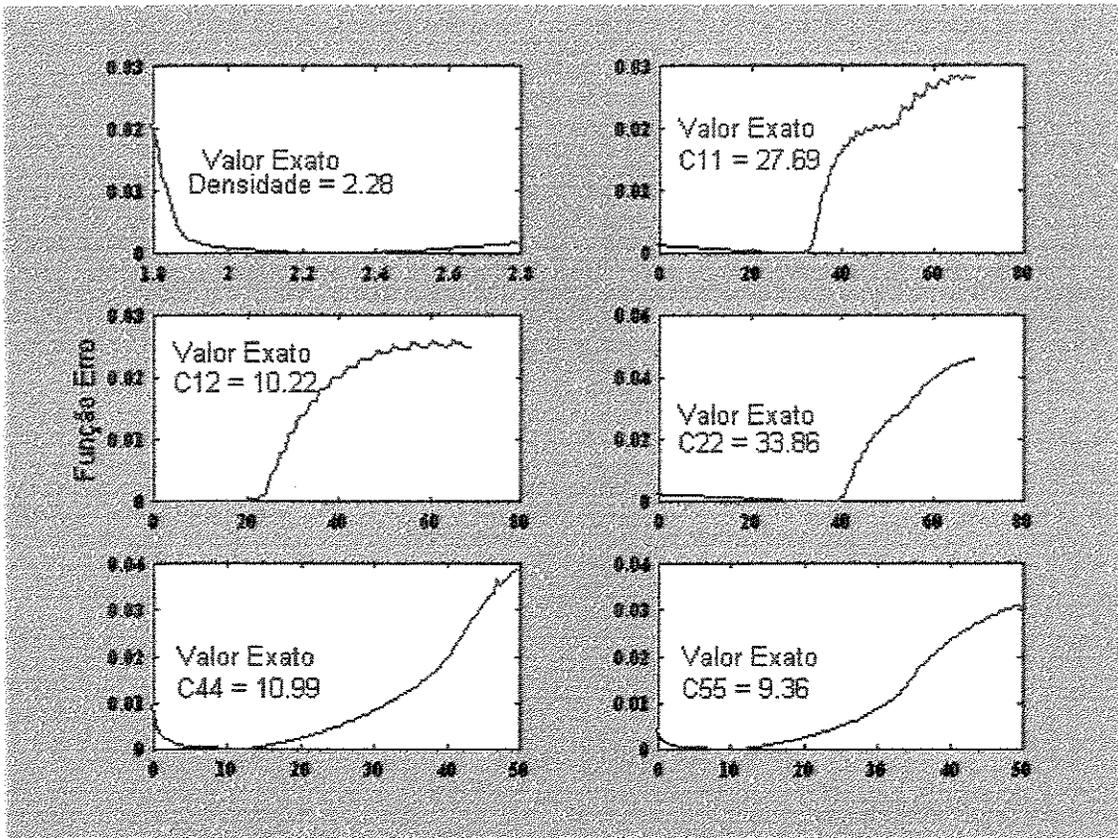


FIGURA 3.3.3 -- Curvas de sensibilidade do modelo III para a densidade e para os parâmetros elásticos C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{44} , C_{55} do meio inferior equivalente TIH.