

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Migração Kirchhoff 2,5D em tempo
no domínio de ângulo comum
e em amplitude verdadeira**

**Autora: Tânia Maria Godinho Santiago
Orientador: Martin Tygel**

**BIBLIOTECA CENTRAL
DESENVOLVIMENTO
COLEÇÃO
UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

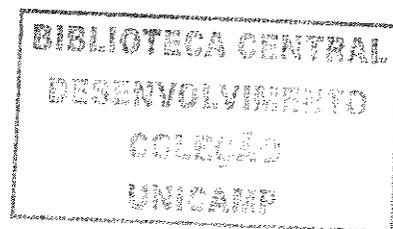
**Migração Kirchhoff 2,5D em tempo
no domínio de ângulo comum
e em amplitude verdadeira**

**Autora: Tânia Maria Godinho Santiago
Orientador: Martin Tygel**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Campinas, 2004
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	
	TRUNICAMP
	Sa-59m
V	EX
TOMBO, BC/	65060
PROC.	16-86-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	14.9.05
Nº CPD	

BbId: 304735

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

Sa59m Santiago, Tânia Maria Godinho
Migração Kirchhoff 2,5D em tempo no domínio de
ângulo comum e em amplitude verdadeira / Tânia Maria
Godinho Santiago. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Martin Tygel.

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

1. Método sísmico de reflexão. 2. Sistemas
imageadores. 3. Método sísmico de reflexão –
Processamento de dados. I. Tygel, Martin. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Instituto de Geociências. IV.
Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

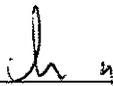
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Migração Kirchhoff 2,5D em tempo
no domínio de ângulo comum
e em amplitude verdadeira**

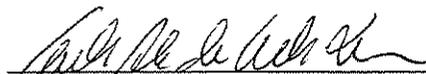
Autora: **Tânia Maria Godinho Santiago**

Orientador: **Martin Tygel**

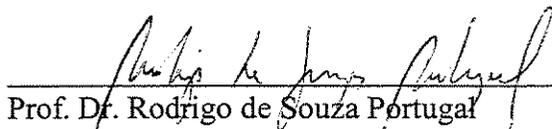
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Martin Tygel, Presidente
UNICAMP / IMECC



Dr. Carlos Alves Cunha
PETROBRAS



Prof. Dr. Rodrigo de Souza Portugal
UNICAMP / DGRN / IG

Campinas, 06 de dezembro de 2004

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, minha pedra fundamental.

Agradecimentos

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho, e em especial:

Aos meus pais que me deram vida e, com seus exemplos, me ensinaram a levar a vida com honestidade, responsabilidade e perseverança;

Ao colega e amigo Cláudio Guerra Cardoso por seu apoio, orientação, boa vontade e boas risadas durante todo este período, sem os quais eu não teria conseguido chegar ao fim;

Ao professor Dr. Lúcio Tunes dos Santos, pela cessão de todos os seus programas sísmicos na linguagem Matlab®, por suas dicas de programação que foram fundamentais para otimização do algoritmo de migração e por sua ajuda e orientação na confecção desta dissertação;

Ao professor Dr. Martin Tygel por ter calculado o peso contido nesta dissertação;

Ao professor Dr. Rodrigo Portugal, por sua paciência infinita e boa vontade em ensinar e discutir sobre todas as dúvidas que surgiram (e que não foram poucas!);

Ao professor Dr. Jörg Schleicher, pela boa vontade e clareza nas discussões;

Ao José Contreras Martinelli por seu empenho em conseguir minha liberação para fazer o mestrado;

Ao colega José Fernando Gamboa por sua disposição e paciência de ajudar em tudo e especialmente nos quesitos de programação;

À Dione Moraes e Alexandre Coelho pelo apoio moral;

Aos colegas Alcides Ribeiro, Andres Ochoa e Lucas Freitas por todo o apoio no Laboratório de Geofísica Computacional;

À Petrobras, pela oportunidade de fazer o mestrado; e

A todos os colegas e funcionários do DEP pelo companheirismo nestes dois anos.

“Se procurar bem, você acaba encontrando
não a explicação (duvidosa) da vida,
mas a poesia (inexplicável) da vida.”

Carlos Drummond de Andrade

Resumo

SANTIAGO, Tânia M. Godinho. *Migração Kirchhoff 2,5D em tempo no domínio de ângulo comum e em amplitude verdadeira*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado).

Atualmente, a indústria do petróleo, tanto na área de caracterização de reservatórios quanto na de exploração, tem feito cada vez mais uso do estudo da variação da amplitude sísmica com o afastamento fonte-receptor, ou com o ângulo de reflexão, como ferramenta auxiliar na previsão da existência de hidrocarbonetos nos reservatórios. Como o método, rotineiramente utilizado, de transformação de afastamento para ângulo de reflexão, em dados migrados na configuração afastamento comum, envolve erros que podem diminuir a confiabilidade deste estudo, torna-se necessário uma nova maneira para a obtenção de dados que produzam curvas mais acuradas da variação da amplitude com o ângulo de reflexão (AVA). Neste sentido, apresenta-se nesta dissertação a migração Kirchhoff no domínio de ângulo comum 2,5D por empilhamento em tempo e em amplitude verdadeira, e os resultados de sua aplicação em dados sísmicos sintéticos de três modelos geológicos. Discute-se a influência, nos resultados, dos parâmetros de aquisição dos dados sísmicos e a parametrização da migração, especificamente a abertura e intervalo entre os ângulos de mergulho da migração. São feitas comparações das curvas de amplitude versus o ângulo de reflexão oriundas dos conjuntos de dados migrados no domínio de ângulo comum e no domínio de afastamento comum, e mostra-se a maior eficiência da primeira migração em obter curvas de AVA que se aproximam mais das curvas teóricas.

Palavras Chave

- migração, ângulo comum, amplitude verdadeira, imageamento, processamento sísmico.

Abstract

SANTIAGO, Tânia M. Godinho. *2.5D True amplitude Kirchhoff time migration in the common angle domain*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado).

The analysis of amplitude variation with offset or reflection angle is of great importance in the oil industry to predict hydrocarbon presence in the reservoir. This analysis is applied to both reservoir and exploration areas. The usual transformation method from offset to reflection angle, for common-offset migrated data, involves errors that may produce unreliable results. Thus, it becomes necessary to find alternative procedures to obtain appropriate data to provide more reliable curves of amplitude versus reflection angle (AVA). This work considers 2.5D true amplitude Kirchhoff-time migration in the common-angle domain, and its application to synthetic seismic data. It also examines the influence of seismic acquisition and migration parameters, aperture and migration dip-angle increment, on the migration results. Comparison between AVA curves obtained from common-angle and common-offset migrated data confirms that the former is a more reliable procedure.

Key Words

- migration, common angle, true amplitude, imaging, seismic processing.

Índice

Lista de Figuras	x
Nomenclatura.....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Migração Kirchhoff.....	5
2.1 Situação 2,5D.....	8
2.2 A integral de migração de Kirchhoff.....	12
2.3 A abertura para a migração Kirchhoff.....	16
2.4 Migração em afastamento comum.....	18
3. Migração Kirchhoff em ângulo comum	25
3.1 Integral de migração Kirchhoff em CA.....	27
3.2 A curva de difração no domínio CA.....	28
3.3 Comparação entre as curvas de difração das migrações em CA e CO.....	32
3.4 Peso para migração em amplitude verdadeira no domínio CA	37
3.5 Determinação da abertura para a migração CA.....	40
3.6 Considerações sobre a implementação numérica da migração CA	45
4. Resultados da aplicação da migração em dados sísmicos sintéticos	49
4.1 Modelo de interface plana horizontal.	50
4.2 Modelo de interface plana inclinada.....	57
4.3 Modelo anticlinal.....	71
5. Conclusões e recomendações	83

Referências Bibliográficas.....	87
Apêndices	91
A. Abertura para migração cinemática no domínio CA	91
B. Zona de Fresnel no domínio CA.....	93
C. Zona de Fresnel projetada no domínio CA	94

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do espalhamento geométrico a) para uma fonte pontual e meio homogêneo (divergência esférica) com os tons de cinza indicando a intensidade na frente de onda e b) a influência da curvatura do refletor sobre a contração (sinclinal) ou expansão (anticlinal) da frente de onda.....	9
Figura 2.2: A situação 2,5D onde a propagação da onda é 3D e as variações do meio ocorrem no plano (ξ, z) verticalmente abaixo da linha sísmica.	10
Figura 2.3: Esquema para o cálculo do espalhamento geométrico na situação 2,5D para um meio de velocidade v constante.	12
Figura 2.4: Tangência entre a curva de difração de um ponto M sobre um refletor e a reflexão.	13
Figura 2.5: As aberturas de migração e suas relações com o ponto estacionário ξ^* , com as zonas de Fresnel $FZ_{(n)}$ e Fresnel projetada $FZ_{(n)}^*$ para uma configuração de afastamento zero (modificado de Hertweck et al., 2003).	19
Figura 2.6: Esquema para o cálculo do tempo de difração para um ponto M(y,z) em subsuperfície com velocidade constante v , para uma par fonte S-receptor G com coordenada, x , do ponto médio e meio afastamento h	20
Figura 2.7: Esquema da curva de difração, $\tau_D^{(h)}(x; M)$, para configuração CO referente ao ponto M de coordenadas (y,z).	22
Figura 2.8: Pirâmide de tempo de difração para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$	22
Figura 2.9: As curvas de difração no domínio CO sobre a pirâmide de tempo de difração, para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$	23

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do espalhamento geométrico a) para uma fonte pontual e meio homogêneo (divergência esférica) com os tons de cinza indicando a intensidade na frente de onda e b) a influência da curvatura do refletor sobre a contração (sinclinal) ou expansão (anticlinal) da frente de onda.....	9
Figura 2.2: A situação 2,5D onde a propagação da onda é 3D e as variações do meio ocorrem no plano (ξ, z) verticalmente abaixo da linha sísmica.	10
Figura 2.3: Esquema para o cálculo do espalhamento geométrico na situação 2,5D para um meio de velocidade v constante.	12
Figura 2.4: Tangência entre a curva de difração de um ponto M sobre um refletor e a reflexão.	13
Figura 2.5: As aberturas de migração e suas relações com o ponto estacionário ξ^* , com as zonas de Fresnel $FZ_{(n)}$ e Fresnel projetada $FZ_{(n)}^*$ para uma configuração de afastamento zero (modificado de Hertweck et al., 2003).	19
Figura 2.6: Esquema para o cálculo do tempo de difração para um ponto M(y,z) em subsuperfície com velocidade constante v , para uma par fonte S-receptor G com coordenada, x , do ponto médio e meio afastamento h	20
Figura 2.7: Esquema da curva de difração, $\tau_D^{(h)}(x; M)$, para configuração CO referente ao ponto M de coordenadas (y,z).	22
Figura 2.8: Pirâmide de tempo de difração para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$	22
Figura 2.9: As curvas de difração no domínio CO sobre a pirâmide de tempo de difração, para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$	23

Figura 3.1: Caminho percorrido pelo raio que sai de A, com ângulo ϕ_A , e chega a B, com ângulo ϕ_B , é o mesmo do que sai de B, com o ângulo ϕ_B .	26
Figura 3.2: Geometria da reflexão em um meio com velocidade constante v para um par de raios incidente, SM, e refletido, MG, onde M tem as coordenadas (y,z) . (Modificado de Fomel et al., 1999).	29
Figura 3.3: Exemplo da violação da condição $ \alpha + \gamma < \pi/2$ ditada pelas equações da curva de tempo de difração.	32
Figura 3.4: Esquema do traçado da curva de difração, $\tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M)$, para configuração CA referente ao ponto M de coordenadas (y,z) . Observar que esta curva é traçada no espaço (x,h,t) .	33
Figura 3.5: Curvas de difração CA (esquerda) para ponto difrator em $y = 0m, z = 1000m, v = 3000m/s$ e $\gamma = 2^\circ$ (vermelha) e $\gamma = 10^\circ$ (azul) e os ângulos de mergulho, α , usados para traçá-las (direita).	34
Figura 3.6: Curvas de difração no domínio CA sobre a pirâmide de tempo de difração para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$. As curvas são de $\gamma = 10^\circ$ a $\gamma = 75^\circ$ com incremento de 5° , sendo que a referente a $\gamma = 0^\circ$ é a traçada no centro da pirâmide ($h = 0m$) e γ crescendo para a direita e esquerda da pirâmide.	34
Figura 3.7: Curvas de difração de um ponto em subsuperfície com coordenadas $(y=0m, z=1000m)$ e $v=3000m/s$ para as migrações CA (esquerda) e CO (direita).	36
Figura 3.8: Curvas de difração CA e CO para ponto M(0,1000), $v=3000m/s$, observar a coincidência total entre as curvas de $\gamma = 0^\circ$ e $h = 0m$ e a coincidência apenas no ápice para as outras.	37
Figura 3.9: Curvas de difração CA (esquerda) para ponto difrator em $y = 0m, z = 1000m, v = 3000m/s$ e $\gamma = 2^\circ$ (vermelha) e $\gamma = 10^\circ$ (azul) e seus respectivos pesos, $W_{DS}^{(\gamma)}$, para migração em amplitude verdadeira (direita).	39
Figura 3.10: Desenho esquemático do raio da abertura (r_{ab1}) para migração cinemática. Na parte superior tem-se a representação do dado sísmico, sendo que o eixo dos meio afastamentos (h) está rebatido no plano (x,t) .	41
Figura 3.11: Geometria para determinação da zona de Fresnel ($FZ_{(n)}$) para ponto M(y,z) sobre refletor plano inclinado com mergulho α (adaptado de Guerra, 2004a).	42

Figura 4.10: Gráfico da variação do raio da abertura mínima com o ângulo de reflexão, incluindo a $FZ_{(2)}^*$ (esquerda) e a $FZ_{(1)}^*$ (direita), para as profundidades $z = 1640\text{m}$ e $z = 2000\text{m}$ no modelo da interface plana inclinada.	60
Figura 4.11: Curvas de difração ($\gamma = 0^\circ, 14^\circ, 25^\circ, 28^\circ$ e 34°) para as profundidades $z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $z = 2000\text{m}$ (direita) com $r_{ab} = 2000\text{m}$	60
Figura 4.12: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para a coordenada $y = 4510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes máximas (direita) em $t_M \approx 0,730\text{s}$ ($z = 1640\text{m}$).	62
Figura 4.13: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para a coordenada $y = 5510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes máximas (direita) em $t_M \approx 0,890\text{s}$ ($z = 2000\text{m}$).	62
Figura 4.14: Migração CA, em $y = 4510\text{m}$, com $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ (topo), $\Delta\alpha = 1^\circ$ (centro) e $\Delta\alpha = 4^\circ$ (base), e $r_{ab} = 2000\text{m}$	63
Figura 4.15: Coeficientes de reflexão acústicos em função do ângulo de reflexão para interface separando meios com as velocidades $v_1 = 4500\text{m/s}$ e $v_2 = 4000\text{m/s}$	64
Figura 4.16: Seção migrada em CA (esquerda), para a coordenada $y = 4510\text{m}$ e (direita) amplitudes mínimas (quadrado verde) em $t_M \approx 0,730\text{s}$ ($z = 1640\text{m}$), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos)...	65
Figura 4.17: Seção migrada em CA (esquerda), para a coordenada $y = 5510\text{m}$ e (direita) amplitudes mínimas (quadrado verde) em $t_M \approx 0,890\text{s}$ ($z = 2000\text{m}$), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos)...	65
Figura 4.18: Migração CO para a coordenada $y = 4510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes mínimas versus meio afastamentos (direita). As informações estão em intervalos de 70m	66
Figura 4.19: Migração CO para a coordenada $y = 5510\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita). As informações estão em intervalos de 70m	66
Figura 4.20: Transformação de h em γ , para os dados migrados em CO, para $z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $z = 2000\text{m}$ (direita), valores calculados (contínua azul), valores da modelagem (traço-ponto vermelho) e diferença (tracejada preta).	68
Figura 4.21: Curvas AVA dos dados migrados em CO para $y = 4510, z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $y = 5510, z = 2000\text{m}$ (direita), com amplitude (quadrado verde), R (contínua vermelha) e diferença normalizada (pontos vermelhos).	68

Figura 4.22: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (4510,1640), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R	69
Figura 4.23: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (5510,2000), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R	70
Figura 4.24: Modelo anticlinal e esquema dos raios para um afastamento de 4000m. As setas indicam as coordenadas que são estudadas	72
Figura 4.25: Ângulos de reflexão da modelagem para os pontos (5000,1000) e (1460,1500) e meio afastamento máximo de 2000m.....	73
Figura 4.26: Gráfico da variação do raio da abertura mínima com o ângulo de reflexão, para os pontos (5000,1000), esquerda, e (1460,1500), direita, incluindo a $FZ_{(2)}^*$ (vermelha) e a $FZ_{(1)}^*$ (azul).....	74
Figura 4.27: Curvas de difração ($\gamma = 0^\circ, 26^\circ, 34^\circ, 36^\circ$ e 44°) para as profundidades $z = 1000\text{m}$ (esquerda) e $z = 1500\text{m}$ (direita) com $r_{ab} = 2000\text{m}$	74
Figura 4.28: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$).	75
Figura 4.29: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$).	75
Figura 4.30: Coeficientes de reflexão acústicos em função do ângulo de reflexão para interface separando meios com as velocidades $v_1 = 4000\text{m/s}$ e $v_2 = 3000\text{m/s}$	76
Figura 4.31: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).	76
Figura 4.32: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).	77

Figura 4.33: Migração CO para a coordenada $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos). As informações estão em intervalos de 70m.....	77
Figura 4.34: Migração CO para a coordenada $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos). As informações estão em intervalos de 70m.....	78
Figura 4.35: Transformação de h em γ , para os dados migrados em CO, para os pontos (5000,1000), esquerda e (1460,1500), direita, com os valores calculados (contínua azul), valores da modelagem (traço-ponto vermelho) e diferença (tracejada preta).	78
Figura 4.36: Curvas AVA dos dados migrados em CO para $y = 5000, z = 1000\text{m}$ (esquerda) e $y = 1460, z = 1500\text{m}$ (direita), com amplitude (quadrado verde), R (contínua vermelha) e diferença normalizada (pontos vermelhos).	79
Figura 4.37: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (5000,1000), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R	80
Figura 4.38: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (1460,1500), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R	81
Figura 4.39: Gráfico de <i>intercept</i> versus gradiente dos modelos de interface plana inclinada, ponto (4510,1640) e anticlinal, ponto (1640,1500), com os valores exatos e os oriundos das migrações CA e CO.....	82
Figura A.1: Geometria para o cálculo do raio, r_{ab_1} , da abertura para migração cinemática em CA.	92

Nomenclatura

Letras Latinas

\mathcal{A}	fatores que afetam as amplitudes sísmicas, exceto o espalhamento geométrico
A_b	abertura de migração
d_1	distância da fonte ao ponto M_n que limita a enésima zona de Fresnel
d_2	distância do receptor ao ponto M_n que limita a enésima zona de Fresnel
$D[.]$	operador de meia derivada em relação ao tempo
$FZ_{(n)}$	enésima zona de Fresnel
$FZ_{(1)}^*$	enésima zona de Fresnel projetada
G	receptor
h	meio afastamento entre fonte e receptor
\bar{h}_B	determinante de Beylkin 2D
l	comprimento do raio até o ponto M
L	espalhamento geométrico 3D
\bar{L}	espalhamento geométrico 2D no plano de propagação
M	ponto no domínio migrado em profundidade
r	raio da esfera
r_{ab}	raio da abertura de migração dinâmica
r_{ab_1}	raio da abertura de migração cinemática
R	coeficiente de reflexão
s	comprimento do raio
S	fonte
t	coordenada temporal
T	período de uma onda mono frequência
U	traço sísmico analítico
U_0	amplitude registrada
v	velocidade
V	amplitude resultante da migração
W	peso da migração
x	coordenada do ponto médio entre fonte e receptor
y	coordenada espacial do ponto M no domínio migrado
z	profundidade

Letras Gregas

α	ângulo de mergulho
ξ	parâmetro de configuração
ξ^*	coordenada do ponto estacionário
ϕ	ângulo que o raio faz com a normal à interface
γ	ângulo de reflexão
σ	componente do espalhamento geométrico 3D fora do plano de propagação
τ_D	tempo de difração
τ_R	tempo de reflexão
τ_W	tempo de duração do pulso sísmico

Superescritos

0	referente à configuração de afastamento nulo
h	referente ao meio afastamento constante
γ	referente ao ângulo de reflexão constante

Subescritos

D	referente à difração
DS	referente à migração por empilhamento (<i>diffraction stack</i>)
F	referente à zona de Fresnel
G	referente ao receptor
M	referente ao ponto M no domínio migrado
S	referente à fonte

Abreviaturas

AVA	amplitude versus ângulo
AVO	amplitude versus afastamento (<i>amplitude versus offset</i>)
CA	ângulo comum (<i>common angle</i>)
CR	receptor comum (<i>common receiver</i>)
CS	ponto de tiro comum (<i>common shot</i>)
CO	afastamento comum (<i>common offset</i>)
DSR	dúpla raiz quadrada (<i>double square root</i>)
MPO	migração pós-empilhamento
MPE	migração pré-empilhamento
MPET	migração pré-empilhamento em tempo
NMO	sobretempo normal (<i>normal moveout</i>)

Capítulo 1

Introdução

A indústria do petróleo, tanto na área de caracterização de reservatórios quanto na de exploração, tem feito cada vez mais uso da sísmica de reflexão, em especial o estudo da variação da amplitude com o afastamento ou com o ângulo de reflexão, AVO (do inglês *amplitude versus offset*) ou AVA (do inglês *amplitude versus angle*), respectivamente, como ferramenta auxiliar na previsão da existência de óleo/gás nos reservatórios. Portanto, qualquer metodologia que venha a produzir curvas de AVO/AVA mais confiáveis torna-se atrativa e merece ser estudada.

Em linhas gerais, no fluxograma usual de processamento de dados sísmicos para análise de AVO/AVA, após a seqüência básica de geometria e deconvolução, e análise de velocidades para a obtenção de um campo de velocidades que represente razoavelmente a distribuição espacial das velocidades na subsuperfície, segue-se a migração pré-empilhamento em tempo na configuração de afastamento fonte-receptor comum (CO, do inglês *common offset*) e em verdadeira amplitude. A migração atua de forma a posicionar corretamente as reflexões e a remover das amplitudes os efeitos do espalhamento geométrico decorrente da propagação da onda em subsuperfície. A partir dos dados migrados, com ou sem análise de velocidade residual para corrigir algumas diferenças de *moveout* entre os afastamentos curtos e longos, segue-se a análise de AVA. Para esta análise deve-se fazer a transformação da variável afastamento para ângulo de reflexão, que, rotineiramente, é feita supondo-se que o modelo é constituído de camadas horizontais e utilizando-se as velocidades intervalares oriundas do campo de velocidades (determinado através da análise de velocidades) e a lei de Snell. A suposição do modelo de camadas horizontais,

aplicada em áreas onde o mergulho das camadas geológicas é acentuado, leva à obtenção de valores de ângulos de reflexão maiores do que os reais, ocasionando estimativas errôneas dos parâmetros *intercept* e gradiente e, conseqüentemente, gerando interpretações não confiáveis da presença ou ausência de hidrocarbonetos nos reservatórios. O erro nas estimativas dos ângulos de reflexão cresce à medida que o mergulho da interface aumenta e sua profundidade diminui.

Existem alternativas mais acuradas para se obter ângulos de reflexão a partir dos dados sísmicos migrados em CO, podendo ser citada a realização de migrações Kirchhoff com pesos diferentes proposta por Bleistein (1987) cuja desvantagem é a necessidade de se realizar duas migrações para alcançar este objetivo. Outra estratégia é a análise do mergulho usando a técnica *slant stack* onde, uma vez estimado o mergulho da reflexão migrada, calcula-se a transformação de afastamento para ângulo de reflexão (Fomel, 2004).

Nos últimos anos tem-se apresentado um novo caminho para a geração de dados para estudos de AVA, que é a migração na configuração de ângulo comum (CA, do inglês *common angle*) cujo dado de saída já está em função do ângulo de reflexão. Em linhas gerais, esta migração separa as reflexões ocorridas com determinado ângulo de reflexão gerando seções sísmicas individuais para cada ângulo de reflexão considerado, e com os refletores corretamente posicionados.

A migração CA foi proposta inicialmente por de Hoop et al. (1994) e vem sendo desenvolvida por outros autores tais como Xu et al. (1998, 2001) e Bleistein et al., (2002), como uma estratégia para a obtenção de imagens em profundidade, de meios geologicamente complexos, mais confiáveis do que as obtidas com a usual migração CO, e também para serem empregadas em análises de velocidades e estudos de AVA. Esta migração em profundidade consegue individualizar e tratar adequadamente as múltiplas trajetórias de raios que ocorrem quando se tem um modelo de velocidades complexo, e conseqüentemente as amplitudes a elas relacionadas, o que não acontece nas migrações CO. Apesar de a principal aplicação da migração CA ser em profundidade, domínio no qual há possibilidade deste tratamento adequado das múltiplas trajetórias, Fomel et al. (1999) consideram que a sua aplicação no domínio do tempo é

uma ferramenta útil para as análises de AVA realizadas após a migração, e é neste sentido que esta dissertação se propõe a empregá-la pretendendo obter curvas de AVA mais acuradas do que as provenientes de dados migrados em CO.

Cabe aqui ressaltar que, embora análises de AVA pressuponham um meio elástico, o meio de propagação considerado nesta dissertação é acústico e com densidade constante o que não invalida a discussão sobre a migração CA e seus resultados. Como a migração é realizada no domínio do tempo, para um determinado ponto no domínio migrado, considera-se o meio como de velocidade constante, cujo valor é equivalente à velocidade em todo o pacote de rochas acima do ponto, e, portanto, o raio representativo da direção de propagação da onda é uma linha reta. Considera-se a situação 2,5D (Bleistein, 1986) para a correção do espalhamento geométrico, ou seja, as propriedades do meio variam apenas no plano formado pela linha de aquisição sísmica 2D mas a propagação da onda é 3D.

Em relação à migração de Kirchhoff por empilhamento, a migração em CA, para um determinado ponto em subsuperfície, é uma integração ao longo da curva de difração traçada, para este domínio, variando-se o mergulho de migração (variável de integração), enquanto o ângulo de reflexão é mantido constante. Na migração em CO, mantém-se o afastamento fonte-receptor fixo e o empilhamento é feito sobre a curva de difração que é traçada variando-se as coordenadas do ponto médio entre fonte e receptor (variável de integração). Estas diferenças implicam em curvas de difração diversas, que por sua vez requerem diferentes expressões para os pesos responsáveis pela remoção do efeito de espalhamento geométrico das amplitudes e também diferentes equações para se estimar a abertura de migração.

Nesta dissertação apresenta-se a migração Kirchhoff CA 2,5D por empilhamento em tempo e em amplitude verdadeira, estudando os parâmetros envolvidos em sua aplicação, tais como a abertura e o incremento dos ângulos de mergulho da migração. O objetivo final é verificar a validade e superioridade de seus resultados para estudos de AVA quando comparados aos oriundos da migração CO. Aplica-se também uma metodologia que envolve estudos da abertura de migração e das curvas de difração para se prever os limites confiáveis de recuperação dos

coeficientes de reflexão e dos ângulos de reflexão em função dos parâmetros dos dados sísmicos de entrada e das estimativas de velocidade e mergulho da interface. Esta metodologia também pode ser utilizada para auxiliar o planejamento da aquisição de novos dados sísmicos aos quais se pretende aplicar a migração CA. Este trabalho está organizado como segue.

O Capítulo 2 descreve a situação 2,5D e aborda o método geral de migração Kirchhoff por empilhamento, seguida de uma visão geral da abertura de migração, que é um parâmetro importante na aplicação da migração, e dos aspectos cinemáticos da migração CO.

No Capítulo 3 a migração Kirchhoff na configuração CA é apresentada em detalhes. Inicia-se com a integral de migração de Kirchhoff nesta configuração, seguida da parte cinemática, ou seja a determinação das equações da curva de difração, segundo o trabalho de Fomel et al. (1999). Conhecendo-se estas curvas na configuração CA elas são comparadas com as curvas na configuração CO. Segue-se a parte dinâmica desta migração, isto é, a determinação da equação que expressa os pesos a serem aplicados às amplitudes, antes da soma, para a remoção do efeito do espalhamento geométrico, sendo que esta parte segue o trabalho de Tygel (2004). Em continuação, são apresentadas as equações da zona de Fresnel e sua projeção para a configuração CA (Guerra, 2004), que regem a determinação da abertura de migração. São tecidos também comentários sobre a implementação numérica desta migração.

O Capítulo 4 apresenta alguns resultados obtidos da aplicação da migração CA em dados sísmicos sintéticos de três modelos geológicos. O primeiro consta de uma interface plana horizontal, o segundo de uma interface plana com inclinação de 20° e o último uma interface formando um anticlinal. Comparações são feitas dos resultados obtidos com as migrações CA e CO.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros. As deduções das equações da abertura para migração cinemática, da zona de Fresnel e da zona de Fresnel projetada para a configuração CA estão nos Apêndices A, B e C, respectivamente.

Capítulo 2

Migração Kirchhoff

A migração de dados sísmicos tem por objetivo corrigir distorções relativas ao posicionamento e às amplitudes das reflexões. Essas distorções são inerentes à aquisição dos dados e à distribuição espacial das propriedades na subsuperfície. O experimento físico consiste em emitir energia mecânica para a subsuperfície e registrar o tempo de chegada da energia refletida nas interfaces. De acordo com a geometria dos tempos de chegada é definido um modelo de velocidades de propagação aproximado, por meio de análise de velocidades, que é entrada para diversos processos, dentre os quais a migração. Estes processos são aplicados aos dados sísmicos com vistas a recuperar uma imagem final confiável da subsuperfície.

Quanto aos tipos de dados a serem migrados, podem ser seções empilhadas simulando dados em afastamento nulo ou painéis de dados pré-empilhamento organizados em tiros (CS, do inglês *common shot*), receptores (CR, do inglês *common receiver*) ou afastamentos tiros-receptores (CO, do inglês *common offset*) comuns. No primeiro caso, a aplicação de um algoritmo de migração a dados empilhados é chamada de migração pós-empilhamento (MPO). Já a migração de dados, organizados em painéis de tiros, receptores ou afastamentos tiros-receptores comuns, é denominada migração pré-empilhamento (MPE).

Os dados sísmicos são adquiridos de forma que uma região em subsuperfície seja iluminada diversas vezes com o intuito de, após algumas correções, melhorar a razão sinal/ruído com soma de eventos coerentes. Essa soma é denominada empilhamento de dados sísmicos. As correções a

serem aplicadas dependem da geologia (estruturação e distribuição de velocidades) amostrada. A correção de NMO (do inglês *normal moveout*), uma das rotineiramente aplicadas, propõe-se a compensar diferenças de tempo de trânsito das reflexões devido a afastamentos tiros-receptores não nulos. Essa correção considera que o meio é composto por camadas plano-horizontais com velocidade de propagação constante no interior de cada camada. Como, na prática, essa premissa é violada torna-se necessário aplicar correções adicionais aos dados antes do empilhamento.

Uma das correções mais rotineiramente aplicada é a MPE. Este processo pode ser aplicado em tempo ou em profundidade. Neste trabalho será considerada apenas a migração pré-empilhamento em tempo (MPET). A MPET é utilizada, principalmente, para melhorar a focalização e dar mais confiabilidade ao posicionamento e amplitudes da imagem sísmica em tempo, podendo também ser empregada para refinar a análise de velocidade.

A migração age em dois aspectos distintos do dado sísmico, tempo de trânsito e amplitude. No tempo de trânsito, que carrega informações da estrutura geológica do meio e de suas velocidades, a migração atua de forma a reposicionar as reflexões tanto em suas coordenadas de superfície quanto nas coordenadas de tempo (no caso da MPET) ou nas coordenadas de profundidade (no caso da migração em profundidade). Na amplitude, que traz informações sobre a litologia e fluidos na subsuperfície, especificamente o contraste das propriedades das camadas que definem a interface de reflexão, a migração (tanto em profundidade quanto a MPET) age de modo a corrigir efeitos de propagação da onda e fornecer valores de amplitude que, relativamente, representam o conjunto das propriedades petrofísicas do meio. Chama-se parte cinemática da migração àquela que trata dos tempos de trânsito e parte dinâmica àquela relacionada às amplitudes.

Existem vários métodos para se realizar a migração e o mais amplamente utilizado é o método de Kirchhoff que se baseia na soma (empilhamento) ou espalhamento ponderado de amplitudes ao longo de curvas (para o caso 3D são superfícies) de tempo de trânsito de difração ou curvas isócronas, respectivamente.

A distorção das amplitudes causada pela propagação da onda é corrigida por meio de ponderação das amplitudes previamente à soma (ou espalhamento) ao longo da curva de difração (ou isócrona). Essa ponderação é feita, em princípio, para remover das amplitudes o efeito do espalhamento geométrico e garantir que, após a migração, estas sejam representativas dos coeficientes de reflexão da respectiva interface, caracterizando assim a migração em amplitude verdadeira.

A migração Kirchhoff pode ser feita em vários domínios tais como afastamento comum, ponto de tiro comum e ângulo de reflexão comum (CA, do inglês *common angle*), cada um com algumas características específicas. Como a migração em CO é a mais comumente usada, algumas de suas características são descritas para comparação com a migração em CA que é o objeto deste trabalho.

Este trabalho está restrito à chamada situação 2,5D (Bleistein, 1986), a qual simplifica sobremaneira a implementação dos processos de migração que são aqui estudados, mantendo o caráter da propagação 3D, mais de acordo com a realidade. Na situação 2,5D fica também mais simples o entendimento da integral de migração de Kirchhoff em domínio geral, bem como a definição dos pesos que devem ser aplicados para a correção automática do espalhamento geométrico no resultado da migração.

Vale observar também que, apesar da MPE aqui tratada ser em tempo (MPET), muitas das expressões que são utilizadas têm como domínio de saída a profundidade. Neste domínio, os pontos são denotados como (y,z) , onde y é a coordenada superficial e z a profundidade. Tal escolha se deve a motivos didáticos, devendo as expressões obtidas (mais simples) serem consideradas como auxiliares. As fórmulas finais (em tempo) são obtidas através de uma simples conversão, utilizando-se a relação $z = vt_M/2$, onde t_M é o tempo migrado do ponto $M(y,z)$, transformado no seu ponto correspondente $N(y,t_M)$, sendo v a velocidade equivalente do meio acima deste ponto.

Uma formulação teórica, segundo a qual são compreendidos os fenômenos da propagação de ondas em subsuperfície, bem como interpretados os resultados observados, é a chamada teoria dos raios. Baseadas nas suas definições e resultados, são obtidas as expressões de cálculo da migração em seus vários domínios, bem como avaliados qualitativamente e quantitativamente os seus resultados.

Após a introdução acima, dá-se continuidade a este capítulo com uma breve revisão dos principais resultados da teoria dos raios, que são de utilidade nos desenvolvimentos aqui apresentados. Prossegue-se então com os conceitos e expressões matemáticas da migração. Em particular, será abordado também o importante problema da abertura da migração, que tem conseqüências práticas importantes na implementação das fórmulas e aplicação aos dados. Por fim, é considerada a caracterização cinemática da migração no domínio do afastamento comum.

2.1 Situação 2,5D

Dentre os fatores de propagação que afetam as amplitudes registradas, o espalhamento geométrico é aquele que a migração em amplitude verdadeira se propõe a corrigir.

Para o entendimento deste efeito será considerado um caso particular do espalhamento geométrico. Em um meio homogêneo e uma fonte pontual a frente de onda propaga-se na forma de uma esfera que se expande continuamente (Figura 2.1.a). Supondo que a propagação ocorre sem perda de energia, o produto da área da esfera pela intensidade da onda deve se manter constante (Rosa, 2001). Em conseqüência, a intensidade da onda em cada ponto diminui à medida que a área da esfera aumenta, segundo um fator de proporcionalidade $1/r^2$, onde r é o raio da esfera. Como a amplitude é proporcional à raiz quadrada da intensidade, segue-se que a amplitude decai segundo o fator $1/r$. A este efeito é dado o nome de divergência esférica, sendo r conhecido como o fator de divergência esférica. Em meios não homogêneos, onde a frente de onda não mais se propaga em forma esférica, o referido efeito é denominado espalhamento geométrico. Nesta situação, também pode ser definido um fator de espalhamento geométrico (L) que quantifica a mudança de amplitude devido à propagação. No caso de reflexões e transmissões em interfaces

(refletores sísmicos), o espalhamento geométrico, além de depender do caminho percorrido pela onda propagada, depende ainda da curvatura das interfaces refletoras e transmissoras encontradas pela frente de onda. Num refletor côncavo, como um sinclinal, há convergência dos raios refletidos indicando a contração da frente de onda e portanto um aumento da amplitude, e o oposto acontece numa interface convexa (por exemplo, um anticlinal), os raios refletidos divergem denotando a expansão da frente de onda e uma diminuição da amplitude registrada (Figura 2.1.b).

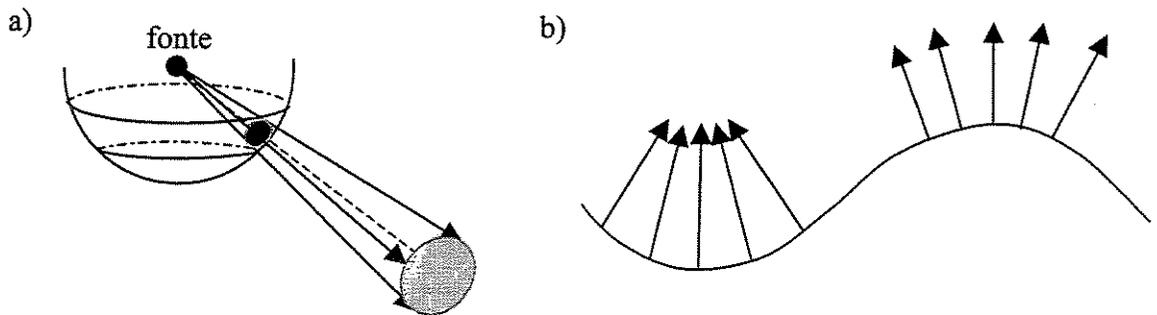


Figura 2.1: Esquema do espalhamento geométrico a) para uma fonte pontual e meio homogêneo (divergência esférica) com os tons de cinza indicando a intensidade na frente de onda e b) a influência da curvatura do refletor sobre a contração (sinclinal) ou expansão (anticlinal) da frente de onda..

Como a propagação da onda ocorre num meio 3D, o efeito do espalhamento geométrico também o é e para removê-lo corretamente das amplitudes registradas deve-se considerá-lo como tal, mesmo que a aquisição tenha sido 2D. O conceito da situação 2,5D (Bleistein, 1986) propõe-se à formulação de um caso onde todos os atributos 3D, particularmente o espalhamento geométrico, podem ser determinados com informações referentes apenas a dados sísmicos registrados em uma única linha sísmica (isto é, uma aquisição 2D). A situação 2,5D se caracteriza por três condições: (a) a propagação da onda é 3D, (b) o meio em subsuperfície tem variações somente em duas dimensões (ξ, z), isto é, as variações ocorrem apenas no plano vertical e (c) a aquisição sísmica situa-se em um desses planos verticais de simetria, definido pela linha sísmica 2D registrada (Figura 2.2).

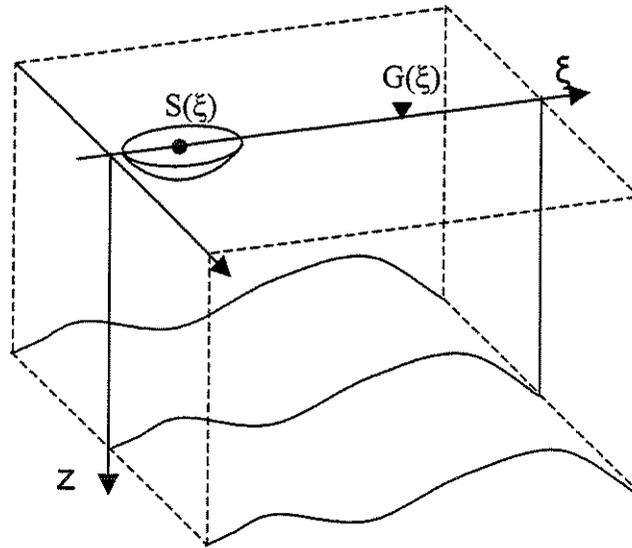


Figura 2.2: A situação 2,5D onde a propagação da onda é 3D e as variações do meio ocorrem no plano (ξ, z) verticalmente abaixo da linha sísmica.

Considerando a situação 2,5D, o espalhamento geométrico 3D (L), devido a uma fonte pontual, ao longo de qualquer raio AB no plano (ξ, z) pode ser calculado através de sua componente, \bar{L} , no plano de aquisição e corrigido por um fator, σ , correspondente à sua componente fora deste plano, ficando como (Bleistein, 1986)

$$L = \bar{L}\sqrt{\sigma}, \quad (2.1)$$

sendo

$$\sigma = \int_A^B v(s) ds, \quad (2.2)$$

onde v é a velocidade do meio ao longo do raio AB e s a variável de comprimento ao longo do raio.

O espalhamento geométrico, L_{SG} , para um raio partindo da fonte pontual em S refletindo-se em M e sendo registrado em G (Figura 2.3) pode ser decomposto em um produto de três fatores (Tygel et al., 1993)

$$L_{SG} = \frac{L_S L_G}{L_F}. \quad (2.3)$$

O primeiro fator, L_S , representa o espalhamento geométrico do raio, SM , que parte da fonte pontual em S e é observado no ponto de incidência, M , no refletor. O segundo fator, L_G , representa o espalhamento geométrico do raio, MG , que parte de uma fonte pontual em M e é observado no receptor, G . O terceiro fator, L_F , denominado espalhamento geométrico de Fresnel em M , representa a influência da curvatura do refletor no ponto M . Observe que o fator de espalhamento geométrico, L_F , é o único que depende da curvatura do refletor. No processo de migração de Kirchhoff, o qual considera um modelo de velocidades dado a priori, os fatores de espalhamento geométrico L_S e L_G , podem ser calculados para cada ponto imagem, M . Na verdade, esses espalhamentos fazem parte da função peso. Como mostrado, por exemplo em Schleicher et al. (1993), o fator de espalhamento de Fresnel, L_F , embora não possa ser calculado, é automaticamente eliminado no processo de migração. Por este motivo, a expressão de L_F não é aqui descrita, recomendando ao leitor interessado a referência acima. Na situação 2,5D em questão, os fatores de espalhamento geométrico 3D, L_S e L_G , podem ser naturalmente decompostos segundo as componentes \bar{L}_S , σ_S e \bar{L}_G , σ_G , respectivamente. Para um meio de velocidade constante v , as componentes do espalhamento geométrico 2D (\bar{L}_S e \bar{L}_G), no plano de propagação, são dadas por

$$\bar{L}_S = \sqrt{\frac{l_S}{v}}, \quad \bar{L}_G = \sqrt{\frac{l_G}{v}} \quad (2.4)$$

e as componentes fora deste plano

$$\sigma_S = vl_S, \quad \sigma_G = vl_G, \quad (2.5)$$

onde l_S e l_G são os comprimentos dos raios SM e MG , respectivamente (Figura 2.3). Observa-se que, tendo em vista a Equação (2.1), pode-se recuperar os espalhamentos geométricos 3D, L_S e L_G , através das relações

$$L_S = \bar{L}_S \sqrt{\sigma_S} = \sqrt{l_S/v} \sqrt{vl_S} = l_S, \quad L_G = \bar{L}_G \sqrt{\sigma_G} = l_G. \quad (2.6)$$

Na próxima seção é apresentada a integral de migração de Kirchhoff em verdadeira amplitude, que faz uso das definições aqui expostas.

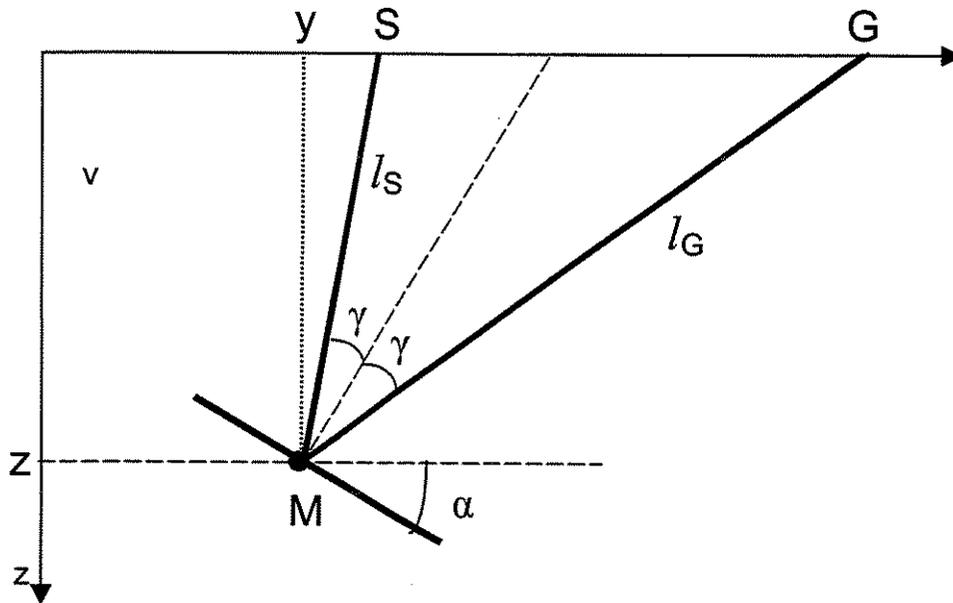


Figura 2.3: Esquema para o cálculo do espalhamento geométrico na situação 2,5D para um meio de velocidade v constante.

2.2 A integral de migração de Kirchhoff

A migração Kirchhoff por empilhamento considera uma reflexão primária (domínio do dado não migrado) como sendo formada pelo envelope de todas as curvas de difração oriundas de pontos difratores posicionados sobre o respectivo refletor (domínio do dado migrado). Já o método por espalhamento considera um refletor (domínio do dado migrado) como o envelope de todas as curvas isócronas calculadas para pontos situados sobre a respectiva reflexão (domínio do dado não migrado). Realizando o empilhamento ou o espalhamento de amplitudes e com base no Princípio de Huygens, a migração Kirchhoff produz valores consideráveis de amplitude onde o ponto em estudo está ou sobre um refletor (empilhamento) ou sobre uma reflexão (espalhamento) e valores de amplitude significativamente mais baixos para os demais pontos (Figura 2.4). Deste modo não há necessidade de um prévio conhecimento das reflexões, apenas deve-se ter um campo de velocidade que represente razoavelmente a distribuição espacial das velocidades na subsuperfície para o cálculo das curvas de difração ou isócronas.

Considerando-se a teoria em que se baseia a migração Kirchhoff, tanto a migração por espalhamento quanto por empilhamento produzem o mesmo resultado. Na prática, entretanto, isto não acontece devido a erros numéricos inerentes à discretização. De fato, ambas as técnicas produzem resultados levemente diferentes. Neste trabalho apenas a migração por empilhamento é abordada.

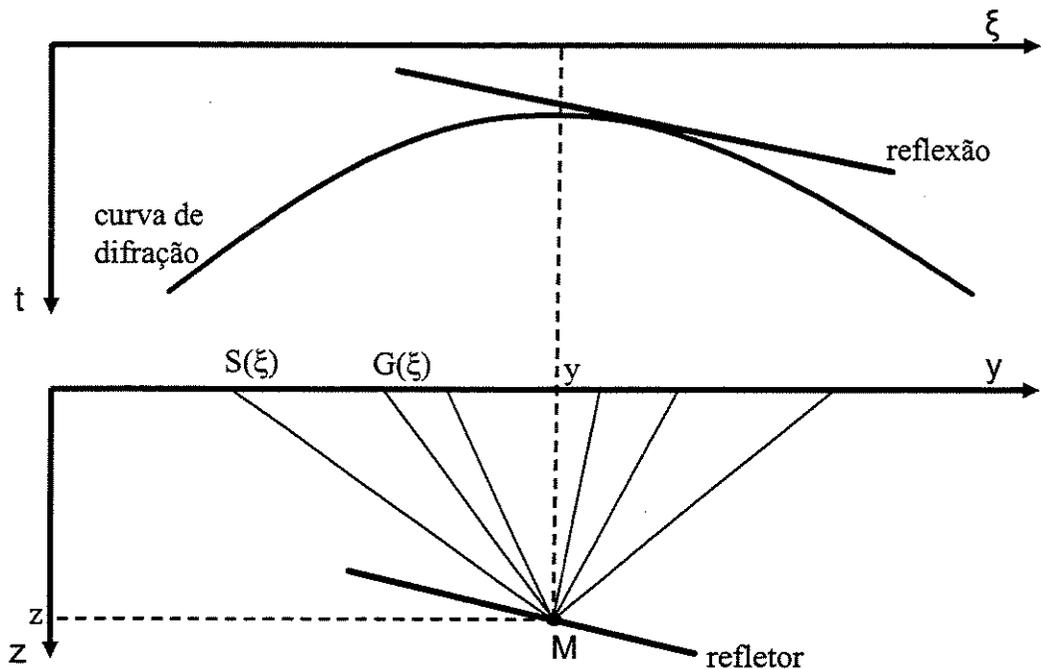


Figura 2.4: Tangência entre a curva de difração de um ponto M sobre um refletor e a reflexão.

Dado um ponto M , de coordenadas (y, z) , e uma determinada configuração dos dados sísmicos de entrada, descrita pelo parâmetro de configuração ξ , a migração Kirchhoff por empilhamento, na situação 2,5D, é expressa pela integral (Martins et al., 1997)

$$V(M) = \int_{A_b} d\xi W_{DS}(\xi; M) D[U(\xi, t = \tau_D(\xi; M))]. \quad (2.7)$$

Isto é, considera-se um ponto M , no domínio de saída migrado e um determinado domínio (CO, CS, CA, etc.) dos dados de entrada, sendo que para cada seção sísmica desse domínio, todos os seus pares fonte, $S(\xi)$, e receptor, $G(\xi)$, e conseqüentemente seus respectivos traços sísmicos, $U(\xi, t)$, são descritos pelo parâmetro de configuração ξ . Variando-se os valores de ξ , são calculados o tempo de difração $\tau_D(\xi; M)$, para cada traço de entrada, e os respectivos pesos

$W_{DS}(\xi; M)$ para retirar das amplitudes resultantes da migração o espalhamento geométrico. Em todos os traços dentro da abertura, A_b , são coletadas as amostras $U(\xi, t = \tau_D(\xi; M))$, dispostas ao longo da curva de difração, aplicam-se os respectivos pesos, somam-se todos os valores e o resultado $V(M)$ é colocado no ponto M de saída. Para o caso 2,5D o dado de entrada deve ser o traço analítico (sinal real mais sua transformada de Hilbert como parte imaginária) submetido à aplicação da meia derivada em relação ao tempo, $D[.]$, (no caso 3D, aplica-se a derivada ao traço analítico). Ao percorrer todos os pontos M do domínio migrado obtém-se a migração da seção sísmica de entrada.

O peso $W_{DS}(\xi; M)$ é dado por (Martins et al., 1997)

$$W_{DS}(\xi; M) = \bar{L}_S \bar{L}_G \sqrt{\sigma_S + \sigma_G} \left(\frac{v^2}{2 \cos^2(\gamma)} \bar{h}_B \right), \quad (2.8)$$

onde v é a velocidade do meio no ponto M , \bar{h}_B representa o determinante de Beylkin 2D relativo ao par fonte-receptor (S, G) e o ponto M e γ é o ângulo que o raio incidente SM faz com a normal ao mergulho de migração, α , (Figura 2.3); \bar{L}_S e \bar{L}_G são os fatores de espalhamento geométrico 2D no plano de propagação (definidos na Equação (2.4)); σ_S e σ_G representam as componentes fora do plano de propagação dos fatores de espalhamento geométrico 3D (definidos na Equação (2.5)).

O peso (2.8) garante a recuperação do coeficiente de reflexão se for considerado que cada evento de reflexão primária pode ser descrito, usando-se a teoria dos raios de ordem zero, como

$$U(\xi, t) = U_0(\xi) F[t - \tau_R(\xi)], \quad (2.9)$$

onde $F[.]$ é a assinatura analítica da fonte sísmica, $\tau_R(\xi)$ é tempo de reflexão e $U_0(\xi)$ é a amplitude registrada, podendo ser escrita como

$$U_0 = \frac{R\mathcal{A}}{L}, \quad (2.10)$$

sendo L o fator de espalhamento geométrico, devido a uma fonte pontual, ao longo do raio considerado, R o coeficiente de reflexão da onda plana no ponto de reflexão e \mathcal{A} representa todos os fatores que afetam as amplitudes sísmicas (incluindo perdas por transmissão através das

interfaces, absorção, intensidade da fonte, etc.). Ressalta-se que na migração pressupõe-se que todos os efeitos contidos em \mathcal{A} foram corrigidos por algum pré-processamento ou podem ser desprezados. Dentro do considerado, a direção de propagação da onda pode ser representada por um raio, que para meios isotrópicos é sempre ortogonal à frente de onda.

A teoria dos raios de ordem zero pressupõe que a propagação da onda ocorre em um meio suavemente não homogêneo e que esta propagação é de alta frequência (Schleicher et al., 2002), isto é a frequência das ondas sísmicas é maior do que a frequência das variações das propriedades do meio e da forma das interfaces. Ou seja, considera-se que o modelo geológico é suave, assim como o seu campo de velocidades. Tal consideração se baseia no fato de que o campo de velocidades utilizado na migração em tempo é o da V_{RMS} que representa, para cada ponto, uma velocidade equivalente do meio acima deste. Tem-se assim um campo de velocidades suavizado, pelo menos no que diz respeito à direção vertical. Durante o processo de definição do campo de velocidades, o intérprete tem normalmente o cuidado de gerar um campo de velocidades horizontalmente suave, com o objetivo de não introduzir ruído na migração. Dessa forma, pode-se dizer que o meio geológico, representado pelo campo de velocidades V_{RMS} , é suave, mesmo que as variações das velocidades intervalares das camadas sejam grandes, lateral e verticalmente. Justifica-se assim a aplicabilidade da teoria do raio de ordem zero na migração em tempo no domínio CA, que é o objeto deste trabalho.

A utilização do sinal analítico (Equações (2.7) e (2.9)) deve-se ao fato de os coeficientes de reflexão (R) e o fator de espalhamento geométrico (L) poderem se tornar quantidades complexas. Portanto a migração deve incorporar esta possibilidade, apesar de os dados sísmicos registrados serem reais.

Analisando a Equação (2.7) constata-se que as quantidades a serem determinadas para realizar a migração são:

- a curva de tempo de difração $\tau_D(\xi; M)$ que indica quais amostras devem ser coletadas para serem somadas e colocadas no ponto M de saída. Estas curvas são discutidas para as migrações no domínio CO (nesse capítulo) e CA (no Capítulo 3);

- o peso $W_{Ds}(\xi; M)$ (Equação (2.8)) a ser aplicado a cada amostra, antes da soma, para corrigir o efeito do espalhamento geométrico nas amplitudes registradas. Na Seção 2.1 as quantidades referentes ao espalhamento geométrico, em um meio de velocidade constante, são explicitadas e sua equação específica para a migração CA será tratada no Capítulo 3;
- e a abertura A_b que limita nos dados de entrada a região onde é realizada a soma, sendo tratada qualitativamente a seguir e quantitativamente para a migração CA no Capítulo 3.

2.3 A abertura para a migração Kirchhoff

Segundo Hertweck et al. (2003), idealmente a soma ao longo da curva de difração deveria ser realizada sem limitação de abertura para evitar qualquer deterioração das amplitudes devido ao truncamento abrupto da soma. Porém, o dado sísmico em si, pela característica finita do levantamento, já é limitado e assim existe sempre uma abertura restringindo a região de soma.

Além disto, existem outras razões práticas para se limitar o comprimento do operador de migração. Yilmaz (1987) mostra que um operador muito pequeno suprime eventos com mergulhos grandes e causa variações incorretas na amplitude. Em contrapartida, um operador muito grande, além de aumentar o esforço computacional desnecessariamente, tende a diminuir a qualidade da imagem pois se a soma incluir dados que estão muito além da região de tangência entre difração e reflexão a chance de incluir ruídos à soma é maior.

Assim, a escolha da abertura é um fator importante na migração tanto no aspecto qualitativo (focalização) e quantitativo (amplitude) da imagem formada quanto no aspecto da eficiência computacional e sua determinação dependerá do domínio estudado e da forma do refletor.

Considerando apenas o aspecto cinemático da migração, o raio da abertura (r_{abl}) necessária para o correto posicionamento do refletor (Hertweck et al., 2003) envolve a parte da curva de difração que vai da coordenada y do ponto M (ápice da difração) até a coordenada $\xi = \xi^*$, chamado ponto estacionário, que indica onde ocorre a tangência entre difração e reflexão, $\tau_D = \tau_R$, que pode ser vista na Figura 2.5 para uma configuração de afastamento zero e refletor plano.

Já a definição da abertura para a migração dinâmica está ligada à questão de interferência entre as reflexões de pontos, sobre o refletor, próximos a M envolvendo o conceito de zona de Fresnel. Segundo Sheriff (1980), a primeira zona de Fresnel é a porção de um refletor a partir da qual a energia refletida pode alcançar um receptor dentro da primeira metade do ciclo da reflexão sendo que as contribuições vindas desta zona somam-se construtivamente para produzir uma reflexão, e a segunda zona de Fresnel é a porção de um refletor a partir da qual a energia chega atrasada de meio a um ciclo adicionando-se destrutivamente à energia da primeira zona. Similarmente existe a terceira zona de Fresnel cujas contribuições somam-se construtivamente e assim por diante. A equação que define os limites da n -ésima zona de Fresnel em termos dos tempos de difração τ_D e reflexão τ_R e do período T de uma onda mono frequência considerada é (Hertweck et al., 2003)

$$|\tau_D - \tau_R| = n \frac{T}{2}. \quad (2.11)$$

Como o conceito de zona de Fresnel é dependente da frequência da onda e na sísmica a assinatura da fonte não é mono frequência e sim um sinal de banda limitada, Sun (1998) sugere que, na Equação (2.11), deve-se substituir o período T pelo comprimento do pulso τ_W ficando

$$|\tau_D - \tau_R| = n \frac{\tau_W}{2}. \quad (2.12)$$

Deste modo, quando o objetivo da migração é recuperar o coeficiente de reflexão da interface, a região de soma deve conter os dados oriundos da primeira zona de Fresnel $FZ_{(1)}$ (Schleicher et al., 1997). Como a zona de Fresnel é definida sobre o refletor e a soma é realizada nos dados sísmicos, que são registrados na superfície, a zona de Fresnel deve ser projetada no datum de aquisição e segundo a configuração estudada (CS ou CO ou CA, etc.) sendo chamada zona de Fresnel projetada, $FZ_{(1)}^*$, (Hubral et al., 1993). A primeira zona de Fresnel e sua projeção para a configuração de afastamento zero está exibida na Figura 2.5. Assim o raio da abertura (r_{ab}) necessária para a migração dinâmica é

$$r_{ab} = r_{ab1} + FZ_{(1)}^*. \quad (2.13)$$

Para evitar o truncamento brusco do operador causando artefatos na imagem final, utiliza-se fazer uma atenuação nas bordas do operador, e segundo Sun (1998) esta região de atenuação deve corresponder à segunda zona de Fresnel projetada (segmento $\overline{\xi_1 \xi_2}$ na Figura 2.5). Assim, para que se consiga uma migração que recupere o coeficiente de reflexão da interface e seja livre dos ruídos causados pelos limites do operador, o raio de abertura, r_{ab} , deve ser

$$r_{ab} = r_{ab1} + FZ_{(2)}^*, \quad (2.14)$$

onde $FZ_{(2)}^*$ é a região que engloba a primeira e segunda zonas de Fresnel projetadas sendo dada pela Equação (2.12) quando $n = 2$. Sua representação gráfica para o domínio do afastamento zero está na Figura 2.5.

Aqui foi falado dos aspectos gerais que envolvem a abertura de migração. Uma visão mais detalhada de sua determinação para o domínio CA é abordada no Capítulo 3.

A seguir discute-se a parte cinemática da migração Kirchhoff por empilhamento no domínio do afastamento comum.

2.4 Migração em afastamento comum

Na configuração de afastamento ($2h$) comum, cada traço sísmico de uma seção CO é individualizado pelo valor x da coordenada do ponto médio, que é a variável de integração na integral de migração de Kirchhoff. Assim tem-se que

$$\xi = x, \quad h = \text{constante}, \quad S(\xi) = x - h, \quad G(\xi) = x + h \quad (2.15)$$

e a integral fica

$$V_h(M) = \int_{A_b^{(h)}} dx W_{DS}^{(h)}(x; M) D[U^{(h)}(x, t = \tau_D^{(h)}(x; M))], \quad (2.16)$$

onde $U^{(h)}(x, t)$ é o dado de entrada, com o sobrescrito indicando que se está numa seção de h constante, e todos os outros termos são similares aos da Equação (2.7), mas calculados para o domínio CO.

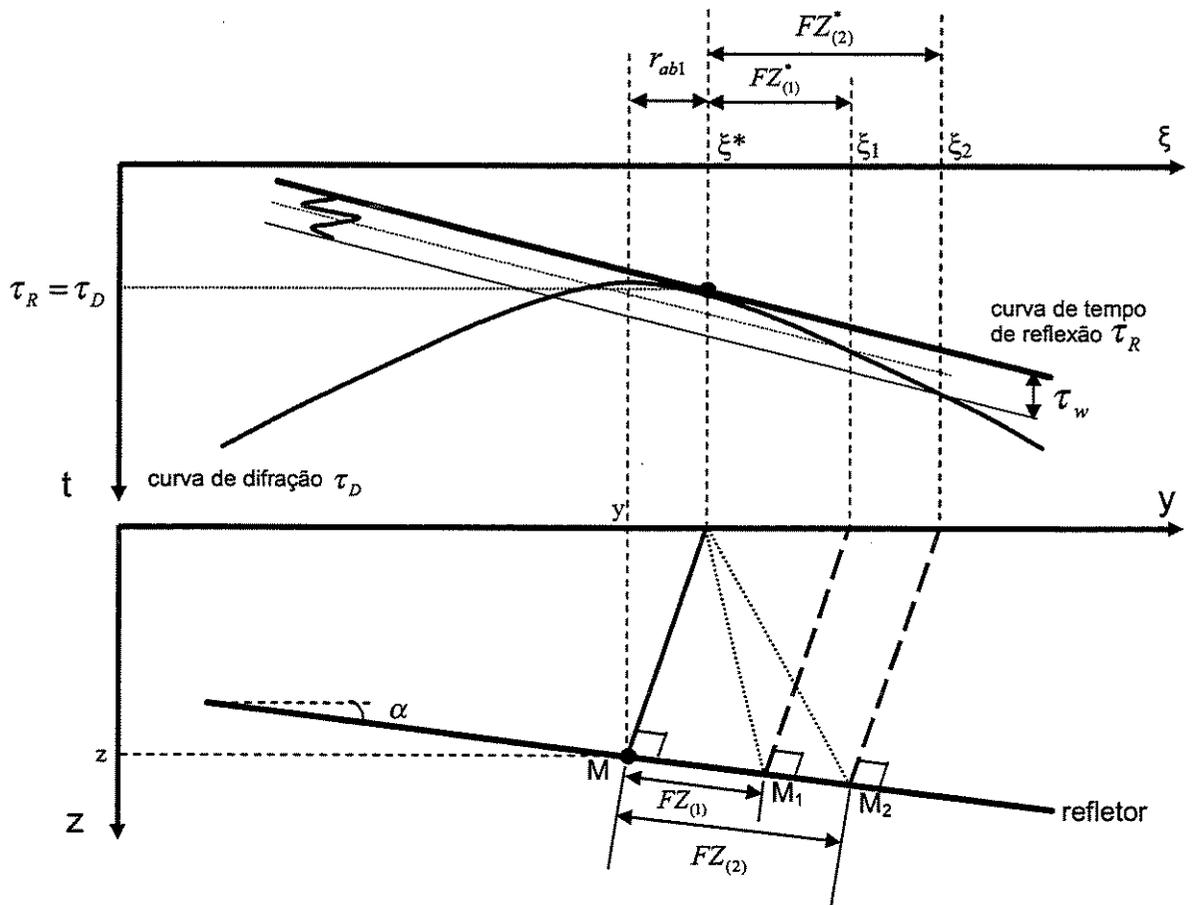


Figura 2.5: As aberturas de migração e suas relações com o ponto estacionário ξ^* , com as zonas de Fresnel $FZ_{(n)}$ e Fresnel projetada $FZ_{(n)}^*$ para uma configuração de afastamento zero (modificado de Hertweck et al., 2003).

Para o meio considerado (distribuição de velocidades e modo de propagação) e o tipo de imageamento (migração em tempo) aqui estudado, os tempos de difração são calculados de forma analítica, pois utiliza-se para um ponto M a ser migrado uma velocidade equivalente para o meio acima dele e portanto o raio é reto (Figura 2.6).

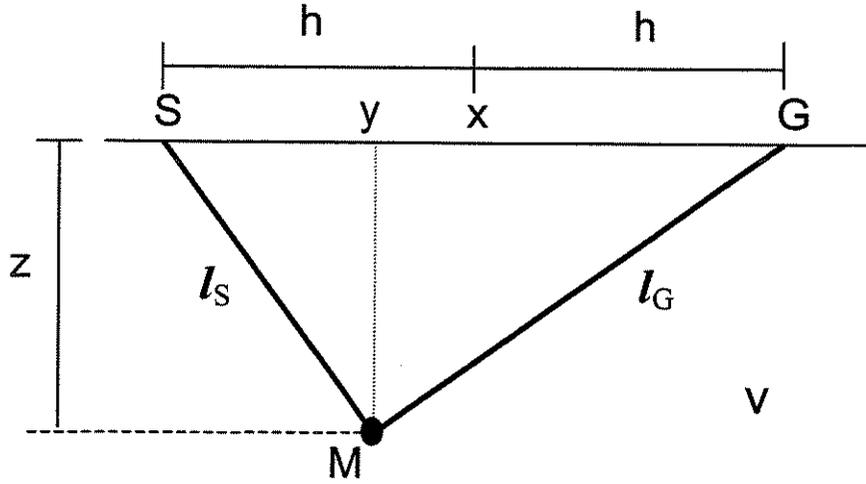


Figura 2.6: Esquema para o cálculo do tempo de difração para um ponto $M(y,z)$ em subsuperfície com velocidade constante v , para uma par fonte S-receptor G com coordenada, x , do ponto médio e meio afastamento h .

O tempo de difração do ponto M em relação ao par fonte-receptor SG é dado pela soma dos comprimentos dos raios SM (l_S) e MG (l_G) dividida pela velocidade v , isto é,

$$\tau_D^{(h)}(x; M) = \frac{l_S + l_G}{v}. \quad (2.17)$$

Da Figura 2.6 tem-se que

$$l_S^2 = (y - x + h)^2 + z^2 \quad (2.18)$$

e

$$l_G^2 = (y - x - h)^2 + z^2. \quad (2.19)$$

Substituindo na Equação (2.17) as Equações (2.18) e (2.19) obtém-se a equação, conhecida como DSR (do inglês *double square root*), para o cálculo do tempo de difração referente ao ponto M

$$\tau_D^{(h)}(x; M) = \frac{\sqrt{(y - x + h)^2 + z^2} + \sqrt{(y - x - h)^2 + z^2}}{v}. \quad (2.20)$$

Assim, para uma mesma seção CO a curva de difração para o ponto M (Figura 2.7) é traçada variando-se as coordenadas x dos pontos médios. E sobre esta curva são coletadas as amostras, no dado de entrada, que após serem multiplicadas pelo respectivo peso $W_{DS}^{(h)}(x; M)$ são somadas e o resultado atribuído ao ponto M do dado de saída.

Supondo que se tenha uma amostragem contínua tanto em h quanto em x , pode-se calcular o tempo de difração para um ponto M em subsuperfície gerando assim a pirâmide de tempo de difração (Figura 2.8) ou pirâmide de Quéops (Claerbout, 1985), descrita pela Equação (2.20) (Fowler, 1997).

Considerando que qualquer dado sísmico 2D pode ser descrito como uma função do tempo t , da coordenada x do ponto médio e do meio afastamento h , a Equação (2.20), descreve a cinemática da MPET em qualquer domínio, ou seja, para qualquer ponto $M(y,z)$ a ser migrado, as curvas de tempo de difração estão sobre uma pirâmide de difração como a da Figura 2.8. A depender do domínio da migração estas curvas são traçadas diferentemente sobre esta pirâmide (Fowler, 1997).

No domínio CO as curvas são traçadas em planos de h constante sobre a pirâmide (Figura 2.9) e assim para realizar a migração pode-se trabalhar individualmente com cada seção de CO.

A migração em CA, que é tratada a seguir, também tem suas curvas de difração traçadas sobre a pirâmide de difração mas de um jeito diferente (o que ocasiona um maior esforço computacional do algoritmo de migração) pois o parâmetro mantido constante é o ângulo de reflexão (em comparação ao h na migração CO) que um raio SM faz com a normal ao mergulho de migração, sendo este último a nova variável de integração na integral de Kirchhoff (Equação (2.7)). No próximo capítulo são discutidas também a parte dinâmica da migração CA e a estimativa da abertura para este domínio.

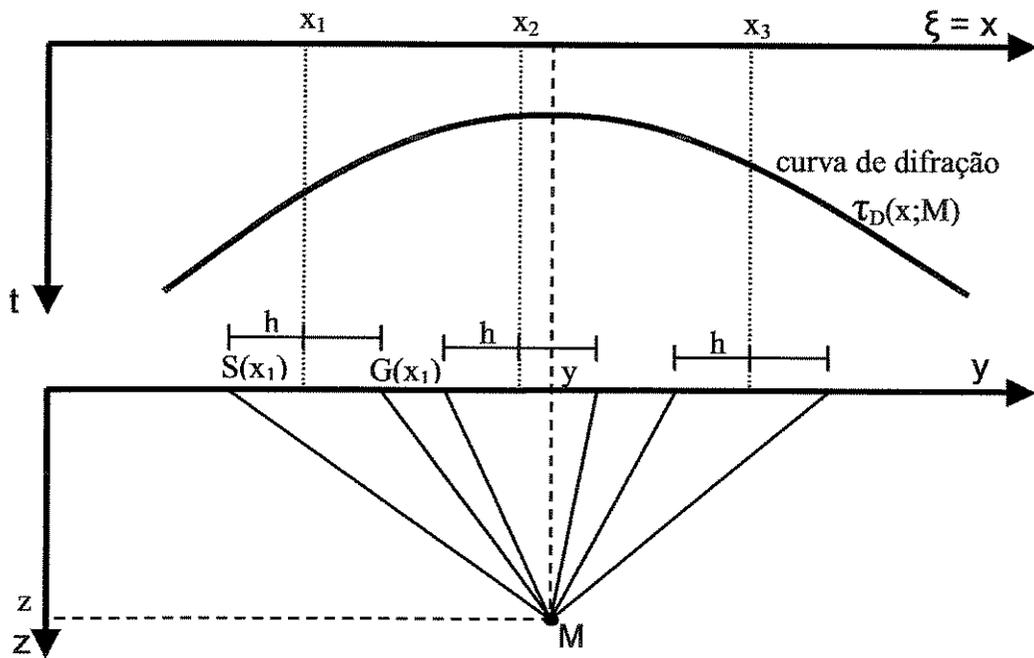


Figura 2.7: Esquema da curva de difração, $\tau_D^{(h)}(x;M)$, para configuração CO referente ao ponto M de coordenadas (y,z) .

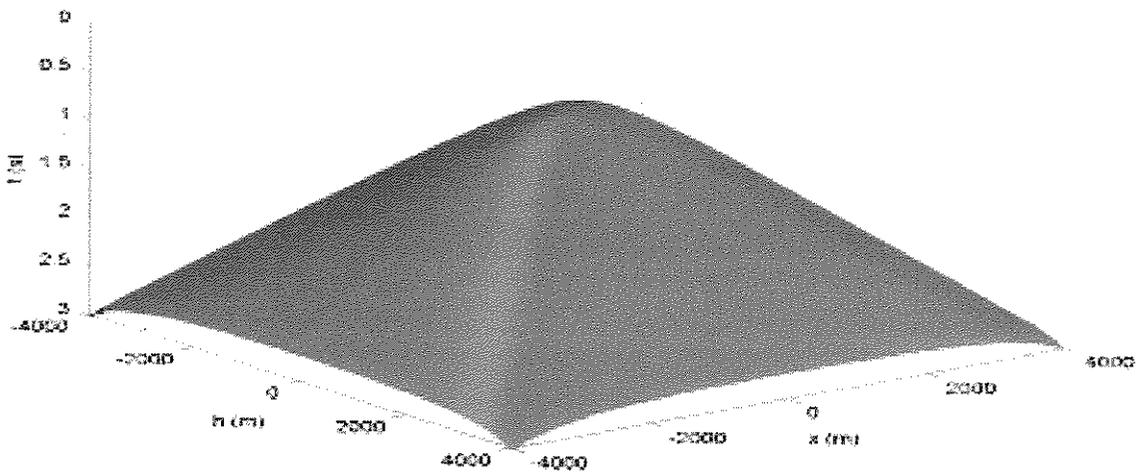


Figura 2.8: Pirâmide de tempo de difração para ponto difrator M em $(y = 0m, z = 1000m)$ e meio com $v = 3000m/s$.

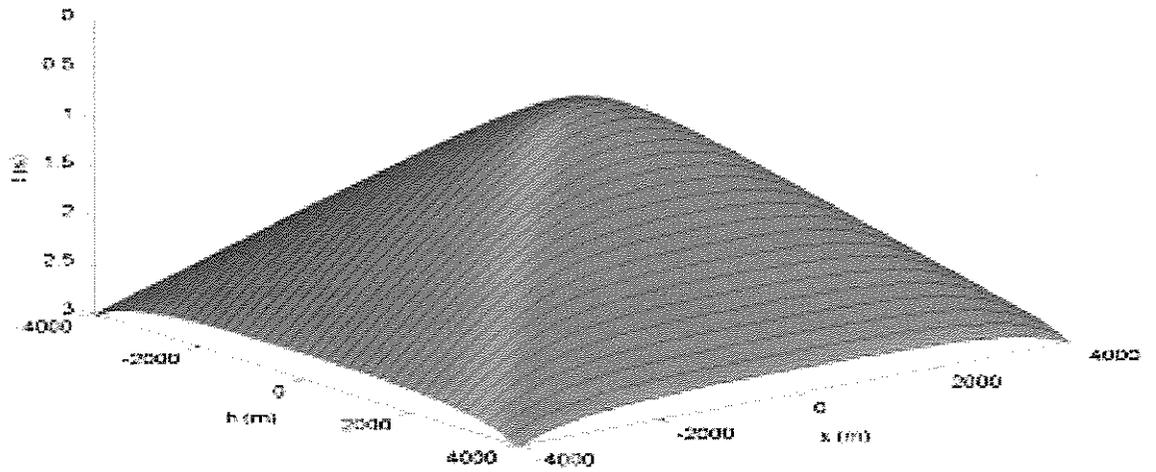


Figura 2.9: As curvas de difração no domínio CO sobre a pirâmide de tempo de difração, para ponto difrator M em ($y = 0\text{m}, z = 1000\text{m}$) e meio com $v = 3000\text{m/s}$.

Capítulo 3

Migração Kirchhoff em ângulo comum

A migração no domínio CA visa obter seções sísmicas migradas que representam dados que se refletiram nas interfaces da subsuperfície com o mesmo ângulo de reflexão γ , diferentemente da migração em CO cujas imagens finais obtidas são de dados com o mesmo afastamento fonte-receptor na superfície. Para uma mesma profundidade, os resultados destas duas migrações se equivalem, após a transformação da variável afastamento em ângulo de reflexão, somente se todas as interfaces da subsuperfície forem horizontais, pressupondo-se o uso do mesmo campo de velocidades.

A validade cinemática da migração em CA é embasada na lei de Snell que regendo a trajetória do raio garante a sua unicidade, ou seja, um raio que sai de um ponto A (Figura 3.1) com um ângulo ϕ_A , percorre um determinado caminho seguindo essa lei e chega a um ponto B qualquer com um ângulo ϕ_B . Um outro raio partindo do ponto B , com o mesmo ângulo ϕ_B , percorre o mesmo caminho do raio anterior, mas em sentido contrário, até chegar no ponto A .

E o princípio da reciprocidade, segundo o qual um sinal emitido no ponto A (Figura 3.1) e registrado no ponto B é igual a um sinal emitido no ponto B e registrado no ponto A (Rosa, 2001), garante a validade dinâmica desta migração.

Do mesmo modo que a migração em CO, para um determinado ponto em subsuperfície as curvas de difração, sobre as quais a soma é realizada, são traçadas sobre a pirâmide de tempo de difração. Essas curvas têm seu traçado não mais em planos de afastamento constante e sim em regiões do dado de entrada que têm como parâmetro constante o ângulo de reflexão. Como é visto adiante, esta mudança do parâmetro que se mantém constante dá origem a curvas completamente diferentes das obtidas na configuração CO, exceto quando $h = 0m$ na migração CO, e $\gamma = 0^\circ$ na migração CA.

Na integral de migração a variável de integração é agora o mergulho de migração α , em substituição à coordenada x do ponto médio na migração CO, e a função peso também é diferente e dependente de α .

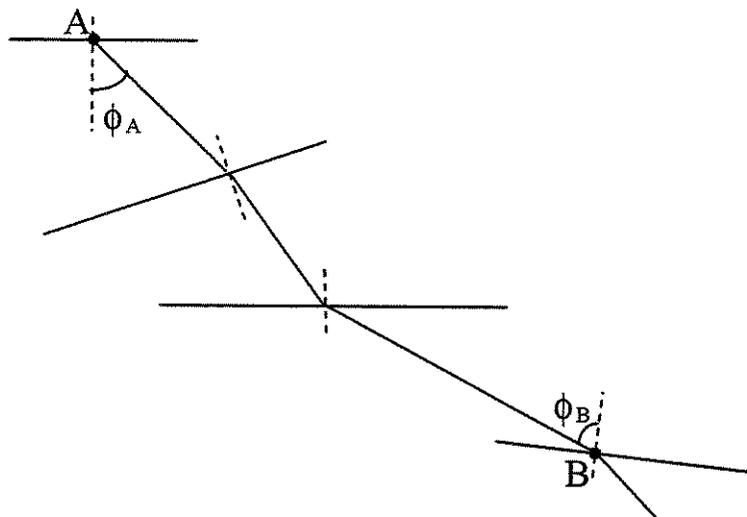


Figura 3.1: Caminho percorrido pelo raio que sai de A, com ângulo ϕ_A , e chega a B, com ângulo ϕ_B , é o mesmo do que sai de B, com o ângulo ϕ_B .

Nas próximas seções são discutidos a integral da migração Kirchhoff em CA por empilhamento, e os parâmetros necessários para realizá-la, quais sejam, a curva de difração, o peso para obtenção de dados migrados em amplitude verdadeira e a abertura de migração.

3.1 Integral de migração Kirchhoff em CA

Matematicamente a migração Kirchhoff por empilhamento em CA pode ser expressa pela mesma integral de migração geral (Equação (2.7)) onde agora o parâmetro de configuração é o ângulo α ,

$$V_{\gamma}(M) = \int_{A_b^{\gamma}} d\alpha W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M) D[U^{(\gamma)}(\alpha, t = \tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M))] \quad (3.1)$$

sendo M o ponto em subsuperfície (domínio migrado), γ é o ângulo de reflexão, mantido constante, α é o ângulo de mergulho da migração (a variável de integração), $\tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M)$ é o tempo de difração para o ponto M ; $D[.]$ indica o operador de meia derivada em relação ao tempo aplicado ao dado de entrada, $W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M)$ é o peso a ser aplicado para correção dos efeitos do espalhamento geométrico, A_b^{γ} é a abertura que limita a região de soma nos dados de entrada e $V_{\gamma}(M)$ é a amplitude resultante da soma que é atribuída ao ponto M . Observa-se que, com a mudança de variável envolvida nesta migração pode-se escrever que

$$\xi = \alpha, \quad \gamma = \text{constante}, \quad S(\xi) = x(\alpha) - h(\alpha), \quad G(\xi) = x(\alpha) + h(\alpha), \quad (3.2)$$

ou seja, os traços sísmicos continuam sendo individualizados pela coordenada do ponto médio e o meio afastamento h , mas eles são funções do ângulo de mergulho de migração α e portanto o dado sísmico analítico de entrada fica descrito como $U^{(\gamma)}(\alpha, t)$, onde o sobrescrito indica que o domínio é de γ constante.

Assim, para um dado ponto M no domínio migrado, fixa-se o ângulo de reflexão γ , e variando o ângulo de mergulho α são calculados a curva de difração $\tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M)$ e os pesos $W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M)$. Nos dados de entrada $U^{(\gamma)}(\alpha, t)$ são coletadas as amostras especificadas pela curva de difração, a cada uma é aplicado seu respectivo peso, faz-se o somatório destas amostras e o resultado é colocado no ponto M . Repetindo-se este procedimento para todos os pontos do domínio migrado, obtém-se uma seção migrada correspondente ao determinado ângulo de reflexão. Após ter sido realizada a migração para diversos ângulos de reflexão γ pode-se selecionar traços migrados com coordenada espacial (y) comum e com valores de ângulos de reflexão crescentes, o que fornece dados condicionados para estudos de AVA

A seguir a determinação da curva de difração no domínio CA é discutida.

3.2 A curva de difração no domínio CA

A dedução aqui apresentada da parte cinemática da migração CA segue o trabalho de Fomel et al. (1999). Inicialmente considera-se um ponto refletor M , de coordenadas (y,z) , em um meio com velocidade constante v e um par fonte-receptor com meio afastamento h e coordenada do ponto médio igual a x como exibido na Figura 3.2.

O tempo de trânsito é dado por

$$t = \frac{l_S + l_G}{v} \quad (3.3)$$

Fazendo uso da lei dos senos no triângulo SMG tem-se:

$$\frac{2h}{\text{sen}(2\gamma)} = \frac{l_S}{\text{sen}[(\pi/2) - (\alpha + \gamma)]} = \frac{l_G}{\text{sen}[(\pi/2) + (\alpha - \gamma)]} = \frac{l_S}{\cos(\alpha + \gamma)} = \frac{l_G}{\cos(\alpha - \gamma)} \quad (3.4)$$

e portanto

$$l_S = 2h \frac{\cos(\alpha + \gamma)}{\text{sen}(2\gamma)} \quad (3.5)$$

e

$$l_G = 2h \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\text{sen}(2\gamma)} \quad (3.6)$$

Substituindo as Equações (3.5) e (3.6) na Equação (3.3) e fazendo algumas transformações trigonométricas obtém-se

$$t = \frac{2h \cos(\alpha)}{v \text{sen}(\gamma)} \quad (3.7)$$

Analisando a Equação (3.7) nota-se que ainda faltam informações pois ela relaciona o tempo de trânsito apenas com o meio afastamento, a velocidade e os ângulos de reflexão e mergulho mas não diz nada sobre o ponto médio e as coordenadas (y,z) do ponto M que são

necessários para a especificação completa do traço sísmico e do ponto em subsuperfície, respectivamente.

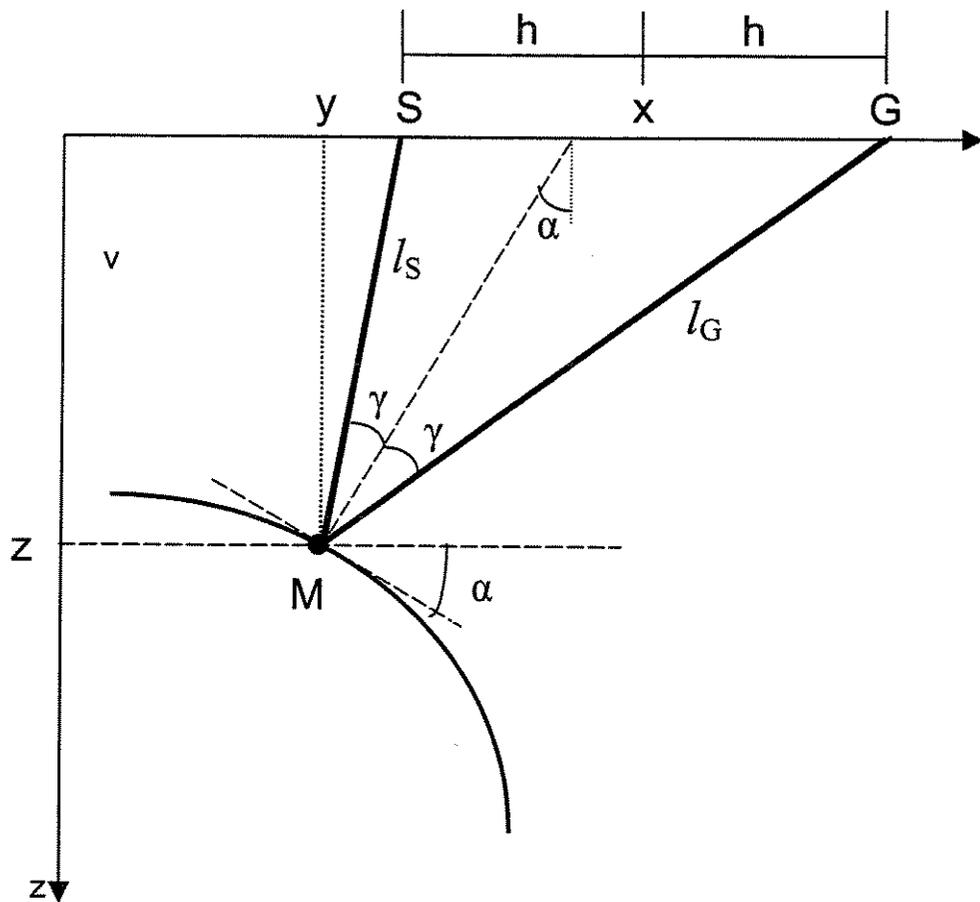


Figura 3.2: Geometria da reflexão em um meio com velocidade constante v para um par de raios incidente, SM, e refletido, MG, onde M tem as coordenadas (y,z) . (Modificado de Fomel et al., 1999).

Para relacionar o meio afastamento h com a profundidade z do ponto M , da Equação (3.4) tem-se que

$$h = \frac{l_s \operatorname{sen}(2\gamma)}{2 \cos(\alpha + \gamma)} \quad (3.8)$$

e do triângulo SyM (Figura 3.2) tira-se que

$$l_s = \frac{z}{\cos(\alpha - \gamma)}. \quad (3.9)$$

Substituindo a Equação (3.9) na Equação (3.8) e fazendo algumas transformações obtém-se

$$h = z \frac{\text{sen}(\gamma) \cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)}. \quad (3.10)$$

Substituindo a Equação (3.10) na Equação (3.7) o tempo de trânsito fica

$$t = \frac{2z}{v} \frac{\cos(\alpha) \cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)}. \quad (3.11)$$

Necessita-se ainda introduzir as informações das coordenadas x do ponto médio e y do ponto M que é feito calculando a distância horizontal, $x - y$, entre o ponto médio e o ponto M . Sendo x_S a coordenada da fonte S e x_G a coordenada do receptor G , a coordenada do ponto médio pode ser escrita como

$$x = \frac{x_S + x_G}{2}. \quad (3.12)$$

Dos triângulos GyM e SyM tem-se, respectivamente, que

$$x_G - y = z \tan(\alpha + \gamma) \quad (3.13)$$

e

$$x_S - y = z \tan(\alpha - \gamma). \quad (3.14)$$

Somando as Equações (3.13) e (3.14), dividindo por 2 e fazendo uso da igualdade de (3.12) e após algumas manipulações obtém-se

$$x - y = z \frac{\text{sen}(\alpha) \cos(\alpha)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)}. \quad (3.15)$$

No início desta seção o ponto M foi considerado como um ponto refletor, retirando esta exigência do posicionamento sobre o refletor o ponto M torna-se um ponto difrator, α o ângulo de mergulho da migração e γ o ângulo que o raio SM faz com a normal ao mergulho de migração no ponto M e assim as Equações (3.10), (3.11) e (3.15), repetidas a seguir, definem a parte cinemática, ou a curva de difração, da migração Kirchhoff, por empilhamento, em CA.

$$t = \frac{2z}{v} \frac{\cos(\alpha) \cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)}, \quad (3.16)$$

$$h = z \frac{\sin(\gamma) \cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)} \quad (3.17)$$

e

$$x = y + z \frac{\sin(\alpha) \cos(\alpha)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)}. \quad (3.18)$$

Como já dito anteriormente, para realizar esta migração em tempo basta fazer a seguinte substituição $z = vt_M/2$, onde t_M é o tempo migrado do ponto M , agora com coordenadas (y, t_M) e v é a velocidade no ponto M , assumida constante.

As três equações anteriores limitam os valores possíveis do ângulo α com a seguinte condição

$$\cos^2(\alpha) > \sin^2(\gamma) \quad \text{ou} \quad |\alpha| + |\gamma| < \frac{\pi}{2}. \quad (3.19)$$

A Figura 3.3 exemplifica um raio que viola esta condição com $\alpha + \gamma = \pi/2$, indicando que, para um meio de velocidade constante, o raio refletido não retorna à superfície e portanto sua chegada não é registrada. Assim, esta condição também implica na limitação do máximo mergulho da interface que se pode migrar adequadamente para determinado ângulo de reflexão.

A curva de difração para um ponto $M(y, z)$ no domínio migrado é construída através das Equações (3.16), (3.17) e (3.18), fixando γ e variando α , o que pode ser visto no esquema exibido na Figura 3.4. Nota-se que esta curva é traçada no espaço (x, h, t) .

Na Figura 3.5 tem-se as curvas de difração, desenhadas em 3D (x, h, t) , de um ponto M em $y = 0\text{m}$ e $z = 1000\text{m}$, em um meio com velocidade de 3000m/s , para $\gamma = 2^\circ$ e $\gamma = 10^\circ$ e os respectivos ângulos de mergulho de migração usados para traçá-las. Deve-se observar os altos valores assumidos pelas variáveis x , h e t à medida que os ângulos de mergulho aproximam-se do

limite imposto pela condição expressa na Equação (3.19). Ressalta-se que valores de h e t desta magnitude não são usuais na aquisição sísmica atual e assim a porção das curvas de difração próximas a este limite está, normalmente, fora dos dados sísmicos de entrada.

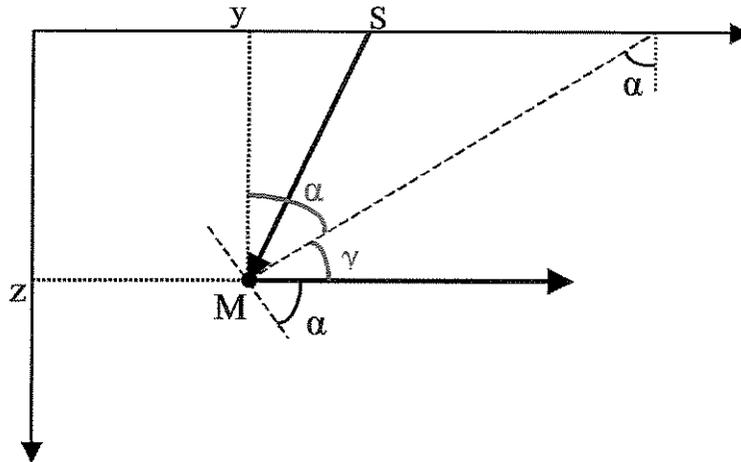


Figura 3.3: Exemplo da violação da condição $|\alpha| + |\gamma| < \pi/2$ ditada pelas equações da curva de tempo de difração.

Similarmente ao mostrado na migração CO, as curvas de difração para vários ângulos de reflexão podem ser traçadas sobre a pirâmide de tempo de difração (Figura 3.6). Nota-se que elas não estão contidas em nenhum plano de organização pré-existente dos dados sísmicos, tal como ponto de tiro comum, receptor comum, etc. A exceção é a curva para $\gamma = 0^\circ$ que está contida no plano de $h = 0\text{m}$.

3.3 Comparação entre as curvas de difração das migrações em CA e CO

Como a migração em CO é atualmente a mais utilizada e portanto a mais bem compreendida cabe aqui uma comparação entre as suas curvas de difração e as relacionadas à migração CA.

O aspecto mais evidente é a equação que rege as curvas nos dois domínios. Enquanto na migração CO a curva é descrita por apenas uma equação (Equação (2.20)), na CA são necessárias

três equações (Equações (3.16), (3.17) e (3.18)) para descrevê-la, já dando uma indicação de que a soma nesta migração é feita em uma região mais complexa dos dados sísmicos. Na migração CO, para um mesmo ponto no domínio migrado, mantém-se o h constante e variando-se x calcula-se o seu respectivo tempo de difração. Já na migração CA mantém-se o γ fixo, que é um parâmetro que não existe no dado sísmico quando da definição de sua geometria, varia-se α , também inexistente na geometria do dado sísmico, e calcula-se o x , o h e o respectivo tempo de difração.

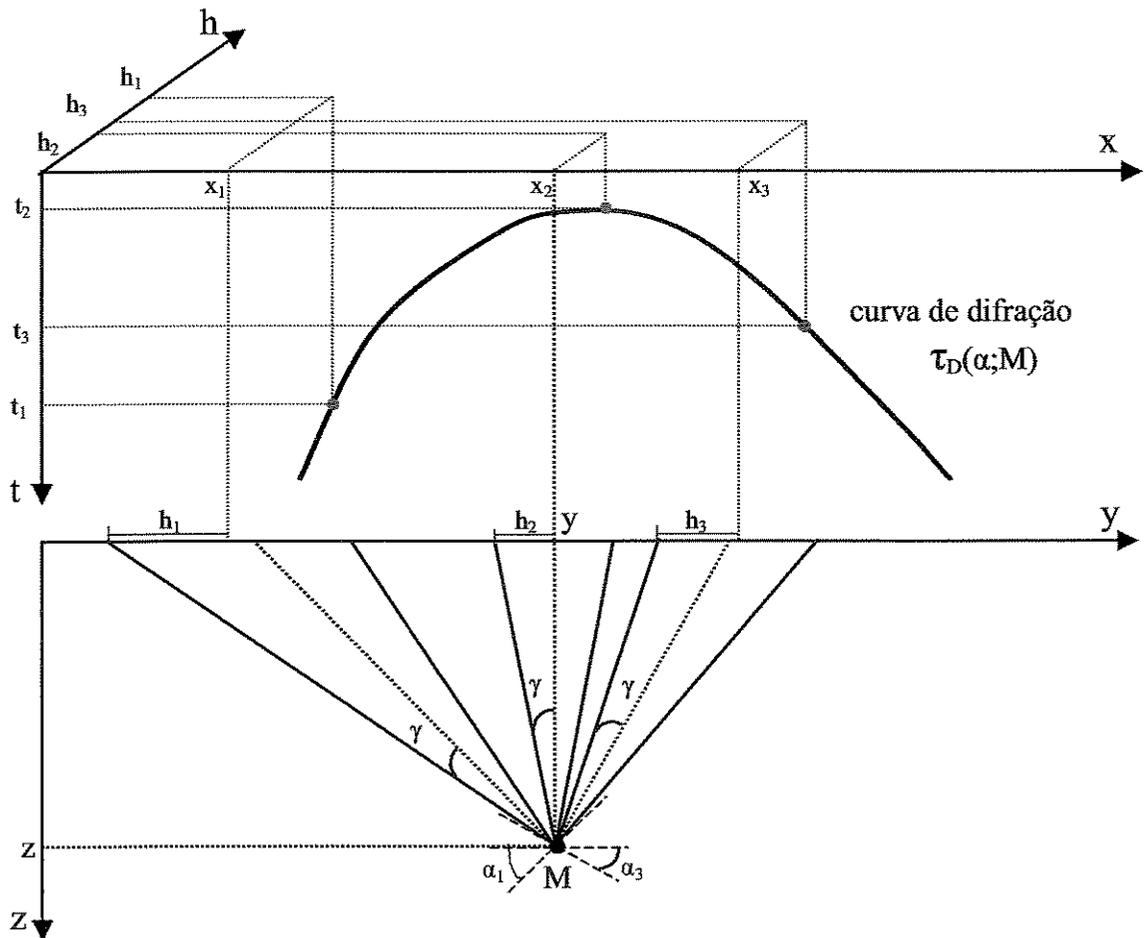


Figura 3.4: Esquema do traçado da curva de difração, $\tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M)$, para configuração CA referente ao ponto M de coordenadas (y, z) . Observar que esta curva é traçada no espaço (x, h, t) .

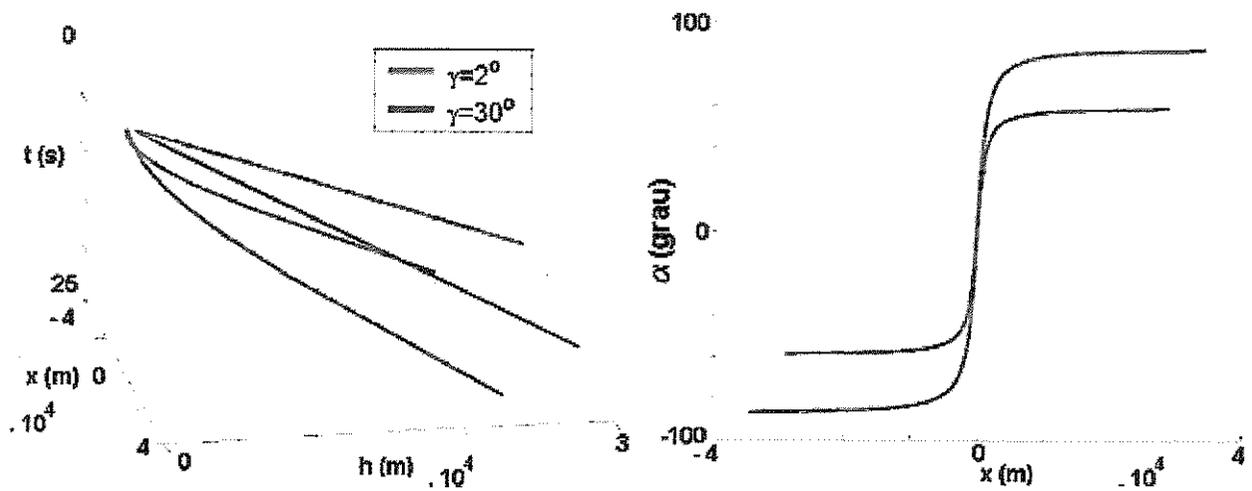


Figura 3.5: Curvas de difração CA (esquerda) para ponto difrator em $y = 0\text{m}$, $z = 1000\text{m}$, $v = 3000\text{m/s}$ e $\gamma = 2^\circ$ (vermelha) e $\gamma = 10^\circ$ (azul) e os ângulos de mergulho, α , usados para traçá-las (direita).

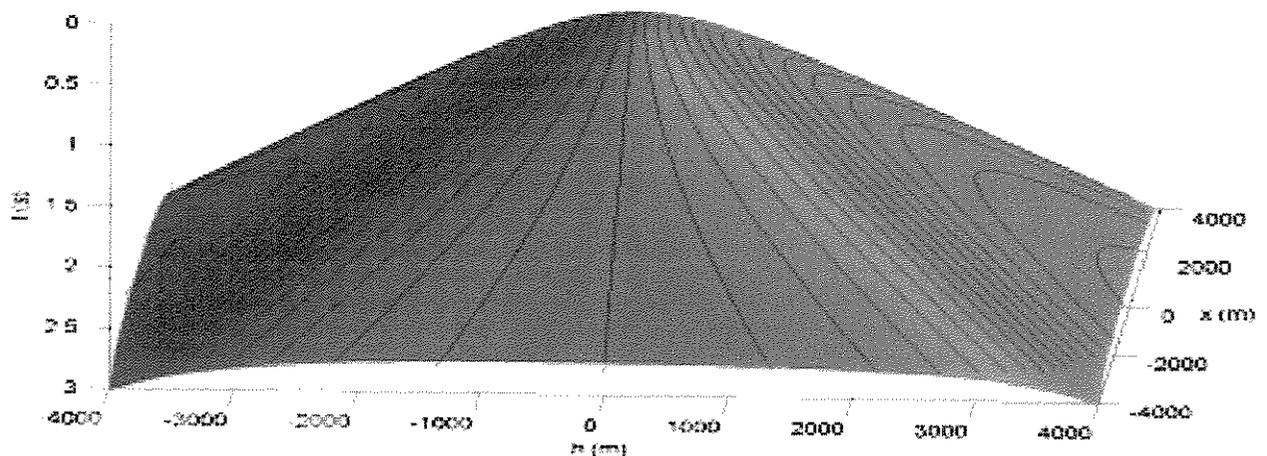


Figura 3.6: Curvas de difração no domínio CA sobre a pirâmide de tempo de difração para ponto difrator M em $(y = 0\text{m}, z = 1000\text{m})$ e meio com $v = 3000\text{m/s}$. As curvas são de $\gamma = 10^\circ$ a $\gamma = 75^\circ$ com incremento de 5° , sendo que a referente a $\gamma = 0^\circ$ é a traçada no centro da pirâmide ($h = 0\text{m}$) e γ crescendo para a direita e esquerda da pirâmide.

A Figura 3.7 exibe as curvas de difração, de um mesmo ponto em subsuperfície, para as migrações CA (esquerda) e CO (direita). Na parte superior tem-se um gráfico no espaço (x, h, t) , e no sentido da porção inferior da figura tem-se o rebatimento das curvas primeiramente no plano (h, t) , em seguida no plano (x, t) e por último no plano (x, h) . Nota-se mais claramente que as curvas da migração CA não estão contidas em nenhum plano de organização presente nos dados de entrada (por exemplo, CS, CR, etc), em contraste com as curvas de migração CO. Assim, para realizar a soma sobre uma curva para qualquer ângulo de reflexão (exceto para $\gamma = 0^\circ$) um cubo 3D (x, h, t) do dado de entrada tem que ser percorrido e não apenas uma seção 2D como é o caso da migração CO, o que ocasiona um esforço computacional maior.

As curvas de difração CA e CO (Figura 3.8), para um mesmo ponto M e velocidade v , são coincidentes em seus ápices (exceto para $\gamma = 0^\circ$, quando a coincidência com $h = 0\text{m}$ é total), onde $\alpha = 0^\circ$ e $x = y$ para a curva CA e $x = y$ para a curva CO, para todos os afastamentos que seguem a relação

$$h = z \tan(\gamma), \quad (3.20)$$

onde h é o meio afastamento da curva CO considerada, γ é o ângulo de reflexão da curva CA considerada e z é a profundidade do ponto M . Isto pode ser entendido supondo o ponto $M(y, z)$ sobre um refletor horizontal, assim o ângulo de reflexão de um raio neste ponto, referente a um determinado meio afastamento h , é dado por

$$\gamma = \arctan(h/z) \quad (3.21)$$

e como as curvas de difração, independente do domínio da migração, são tangentes à reflexão onde o ângulo de mergulho da migração é igual ao ângulo de mergulho do refletor ($\alpha = 0^\circ$) as curvas CA e CO obrigatoriamente são coincidentes neste ponto. A Figura 3.8 exibe as curvas de difração CA e CO para o ponto $y = 0\text{m}$, $z = 1000\text{m}$, com $v = 3000\text{m/s}$, para os seguintes afastamentos (ângulos), baseados na Equação (3.21): $h = 0\text{m}$ ($\gamma = 0^\circ$), $h = 500\text{m}$ ($\gamma \approx 26,6^\circ$), $h = 1000\text{m}$ ($\gamma = 45^\circ$) e $h = 3000\text{m}$ ($\gamma \approx 71,6^\circ$).

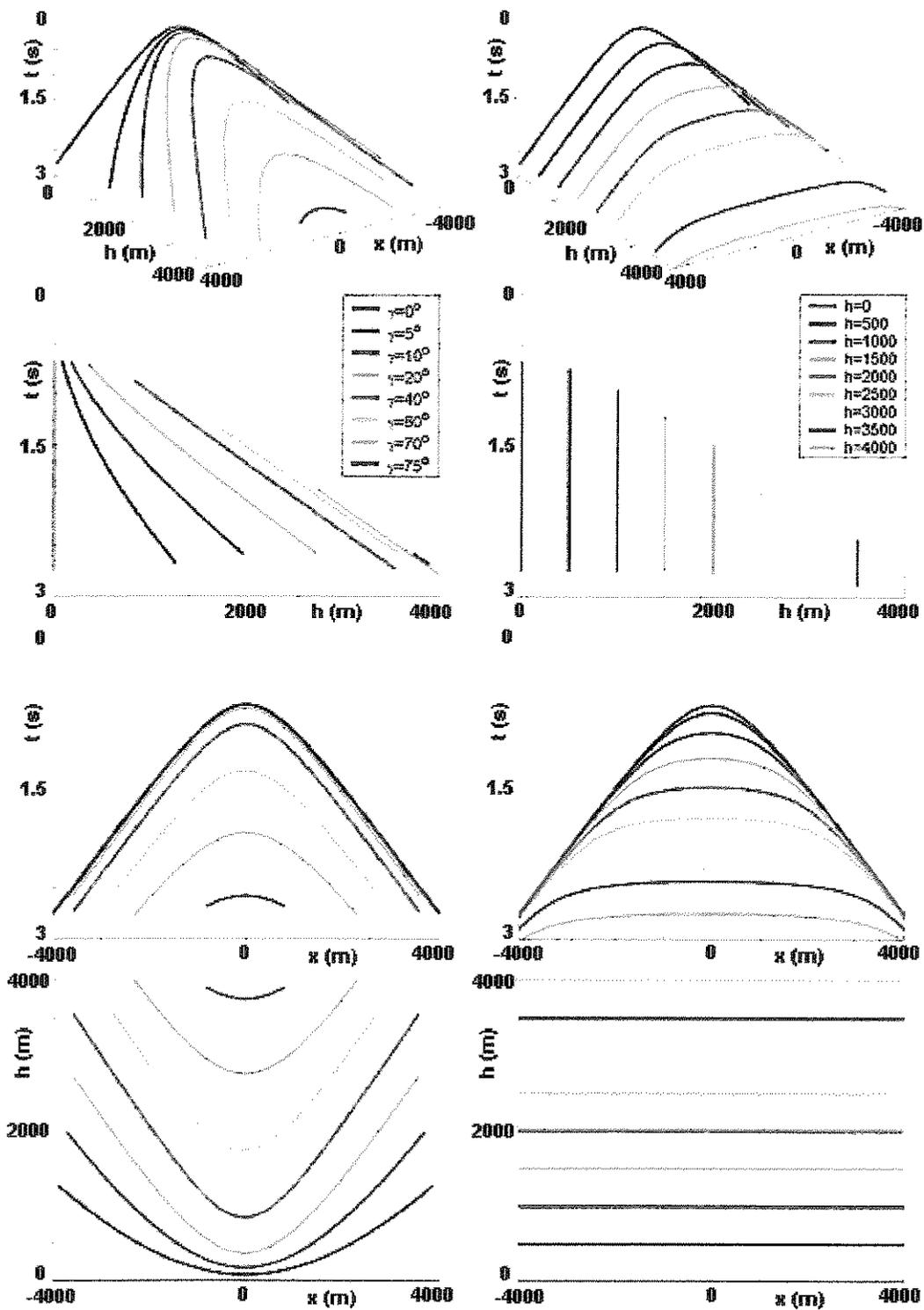


Figura 3.7: Curvas de difração de um ponto em subsuperfície com coordenadas ($y=0m, z=1000m$) e $v=3000m/s$ para as migrações CA (esquerda) e CO (direita).

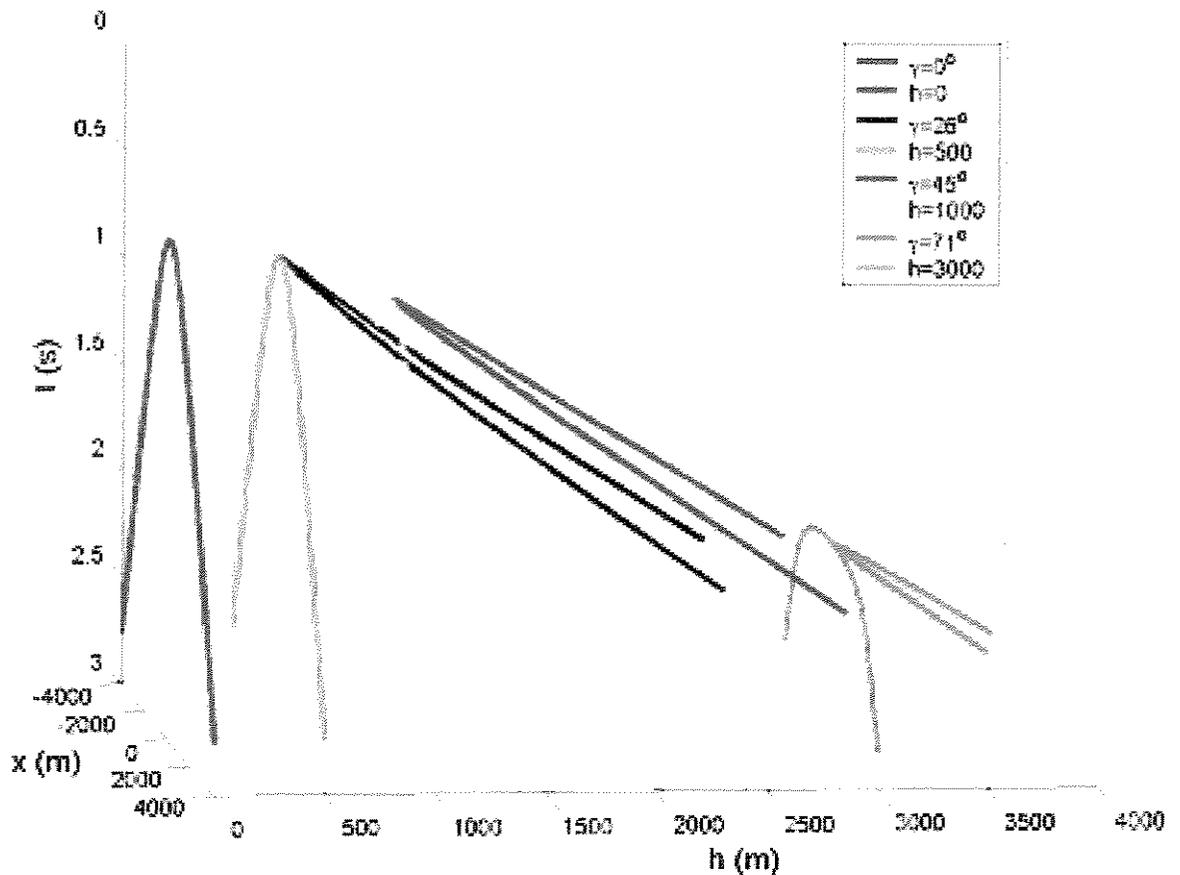


Figura 3.8: Curvas de difração CA e CO para ponto $M(0,1000)$, $v=3000\text{m/s}$, observar a coincidência total entre as curvas de $\gamma = 0^\circ$ e $h = 0\text{m}$ e a coincidência apenas no ápice para as outras.

3.4 Peso para migração em amplitude verdadeira no domínio CA

Como o objetivo desta migração envolve o estudo de amplitudes, o efeito do espalhamento geométrico deve ser removido das amplitudes migradas. Esta correção é feita através do peso $W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M)$, calculado para a configuração CA, que é aplicado a cada amostra pré-soma.

A apresentação desta parte dinâmica da migração Kirchhoff no domínio CA segue o trabalho de Tygel (2004).

Para facilitar a exposição, repete-se aqui a expressão geral do peso para amplitude verdadeira (Equação (2.8)) da migração Kirchhoff na situação 2,5D,

$$W_{DS}(\xi; M) = \bar{L}_S \bar{L}_G \sqrt{\sigma_S + \sigma_G} \left(\frac{v^2}{2 \cos^2(\gamma)} \bar{h}_B \right). \quad (3.22)$$

O determinante de Beylkin 2D (\bar{h}_B) em termos do ângulo de mergulho de migração α , pode ser escrito como

$$\bar{h}_B = \frac{4 \cos^2(\gamma) d\alpha}{v^2 d\xi}. \quad (3.23)$$

As componentes do espalhamento geométrico no plano de propagação (\bar{L}_S e \bar{L}_G) e fora do plano (σ_S e σ_G), para um meio de velocidade constante são dadas pelas Equações (2.4) e (2.5), respectivamente, onde l_S e l_G representam os comprimentos dos segmentos dos raios SM e GM (Figura 3.2).

Substituindo estas equações e a Equação (3.23), na Equação (3.22) tem-se que

$$W_{DS}(\xi; M) = 2 \sqrt{\frac{l_S l_G}{v} (l_S + l_G)} \frac{d\alpha}{d\xi}. \quad (3.24)$$

Considerando que a migração CA envolve a mudança da variável de integração de ξ para α através da relação diferencial $d\xi = (d\xi/d\alpha)d\alpha$, a parte $(d\xi/d\alpha)$ pode ser incorporada ao peso cancelando o termo $(d\alpha/d\xi)$ da Equação (3.24), introduzido pelo determinante de Beylkin (Equação (3.23)). Assim a expressão do peso, na configuração CA pode ser escrita como

$$W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M) = 2 \sqrt{\frac{l_S l_G}{v} (l_S + l_G)}. \quad (3.25)$$

O comprimento l_S está definido na Equação (3.9) e o l_G pode ser obtido do triângulo GyM (Figura 3.2) como

$$l_G = \frac{z}{\cos(\alpha + \gamma)}. \quad (3.26)$$

Da Equação (3.3) tira-se que

$$l_S + l_G = vt, \quad (3.27)$$

onde t é o tempo de difração expresso pela Equação (3.16). Substituindo-a na Equação (3.27) e o resultado na Equação (3.25), juntamente com as Equações (3.9) e (3.26), obtém-se

$$W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M) = 2 \sqrt{\frac{2z^3}{v} \frac{1}{\cos(\alpha - \gamma) \cos(\alpha + \gamma)} \frac{\cos(\alpha) \cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)}}, \quad (3.28)$$

que após algumas manipulações fica

$$W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M) = 2 \sqrt{\frac{2z^3}{v} \frac{\sqrt{\cos(\alpha) \cos(\gamma)}}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)}}, \quad (3.29)$$

estabelecendo-se assim os pesos a serem aplicados a cada amostra, antes da soma, necessários para a migração em amplitude verdadeira. A Figura 3.9 exhibe os pesos e as curvas de difração de um ponto M em $y = 0\text{m}$ e $z = 1000\text{m}$, em um meio com velocidade de 3000m/s , para $\gamma = 2^\circ$ e $\gamma = 10^\circ$. Vale destacar que as curvas de peso nunca atingem o valor zero, apesar de na Figura 3.9, devido à escala, parecer que os pesos atingem este valor para $x = 0\text{m}$.

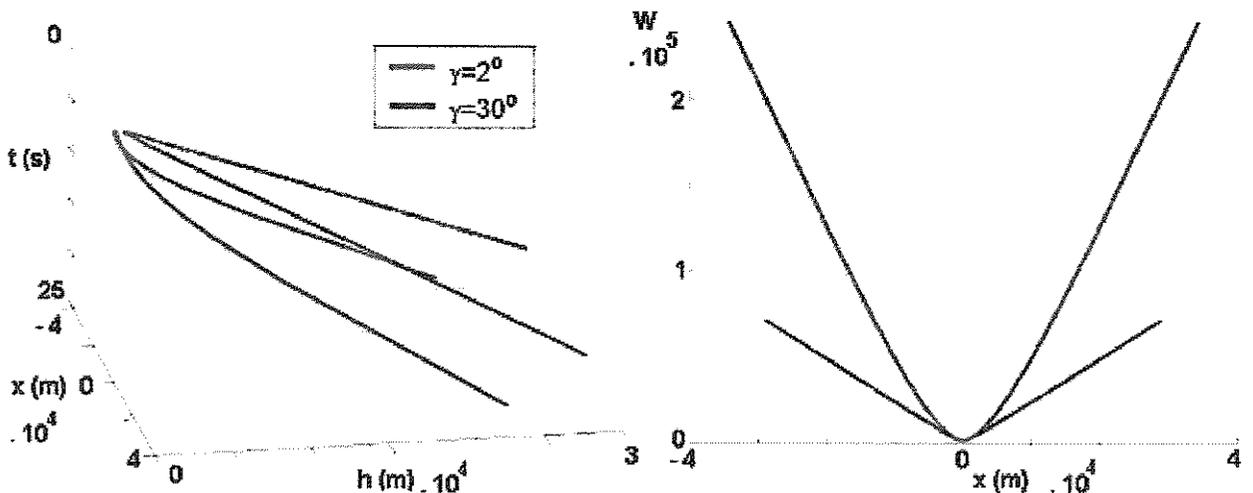


Figura 3.9: Curvas de difração CA (esquerda) para ponto difrator em $y = 0\text{m}$, $z = 1000\text{m}$, $v = 3000\text{m/s}$ e $\gamma = 2^\circ$ (vermelha) e $\gamma = 10^\circ$ (azul) e seus respectivos pesos, $W_{DS}^{(\gamma)}$, para migração em amplitude verdadeira (direita).

Ressalta-se mais uma vez que para a migração em tempo deve-se fazer a substituição $z = vt_M/2$, sendo t_M o tempo migrado do ponto M e v é a velocidade no ponto M .

3.5 Determinação da abertura para a migração CA

A realização da migração Kirchhoff por empilhamento em amplitude verdadeira envolve a determinação de três parâmetros:

- os tempos de difração $\tau_D^{(\gamma)}(\alpha; M)$ (Seção 3.2) que determinam a curva de difração, na configuração em CA, no domínio (x, h, t) dos dados de entrada,
- os pesos $W_{DS}^{(\gamma)}(\alpha; M)$ (Seção 3.4) a serem aplicados a cada amostra sobre a curva para retirar os efeitos do espalhamento geométrico
- e a abertura $A_b^{(\gamma)}$ que limita a região da curva sobre a qual a soma ocorre, e que é discutida nesta seção.

No Capítulo 2, Seção 2.3 é apresentada uma visão geral da abertura, e aqui é focado o seu cálculo para a configuração CA.

Como visto, o raio da abertura r_{ab1} para garantir uma migração apenas cinemática, deve conter a parte da curva de difração que vai da coordenada y do ponto M (ápice da difração) até a coordenada x do ponto médio onde ocorre a tangência entre difração e reflexão ($\tau_D = \tau_R$) e para o domínio CA é dada por (Guerra, 2004b)

$$r_{ab1} = h + z \tan(\alpha - \gamma), \quad (3.30)$$

sendo que sua dedução encontra-se no Apêndice A.

A Figura 3.10 exhibe a relação desta abertura com o ponto M em subsuperfície e o domínio do dado sísmico de entrada. Observar que nesta figura o eixo dos meio afastamentos (h) está rebatido no plano (x, t) , e portanto a curva de difração e a reflexão estão desenhadas no plano (x, t) , mas de fato, para o domínio CA, considera-se o espaço (x, h, t) .

Tratando-se de migração dinâmica, a abertura tem que incluir a primeira zona de Fresnel que deve ser projetada no datum de aquisição e segundo a configuração CA (zona de Fresnel projetada).

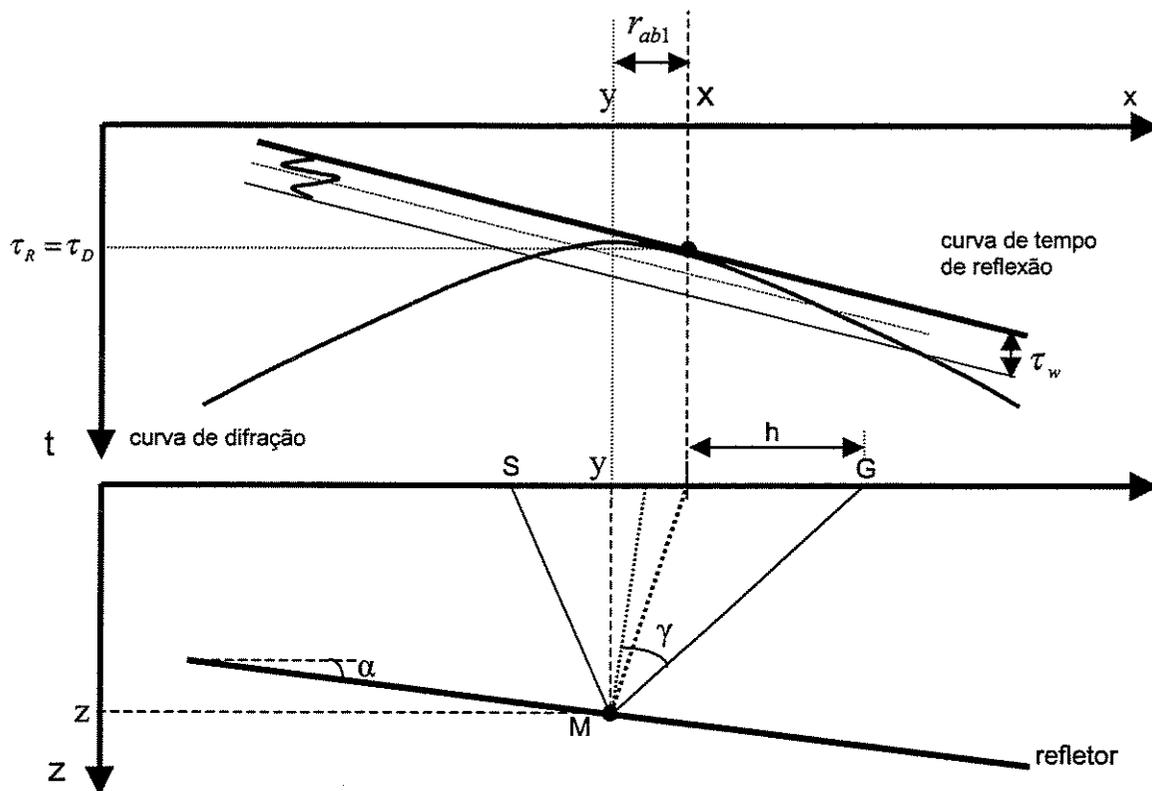


Figura 3.10: Desenho esquemático do raio da abertura (r_{ab1}) para migração cinemática. Na parte superior tem-se a representação do dado sísmico, sendo que o eixo dos meios afastamentos (h) está rebatido no plano (x,t) .

Através da condição expressa na Equação (2.12) e da geometria exibida na Figura 3.11, a n ésima zona de Fresnel, para uma interface plana e meio de velocidade constante, em termos do ângulo de reflexão γ e do ângulo de mergulho α pode ser escrita como (Guerra, 2004a)

$$FZ_{(n)} = \sqrt{\frac{n\tau_w vZ}{2\cos(\alpha)\cos^3(\gamma)}} \quad (3.31)$$

A dedução completa desta equação está no Apêndice B.

Dois pontos devem ser destacados. O primeiro é que a determinação da zona de Fresnel depende do raio de curvatura da interface e que o resultado aqui apresentado é para interface plana e portanto fornecerá valores corretos para refletores suficientemente planos. O segundo é a utilização da série de Taylor até segunda ordem para aproximar as distâncias d_1 e d_2 (Figura 3.11) ocasionando valores médios para a zona de Fresnel calculada que é simétrica em relação ao ponto M , o que não é verdade para uma interface inclinada onde a zona de Fresnel verdadeira é maior na direção em que a profundidade aumenta (Figura 3.13).

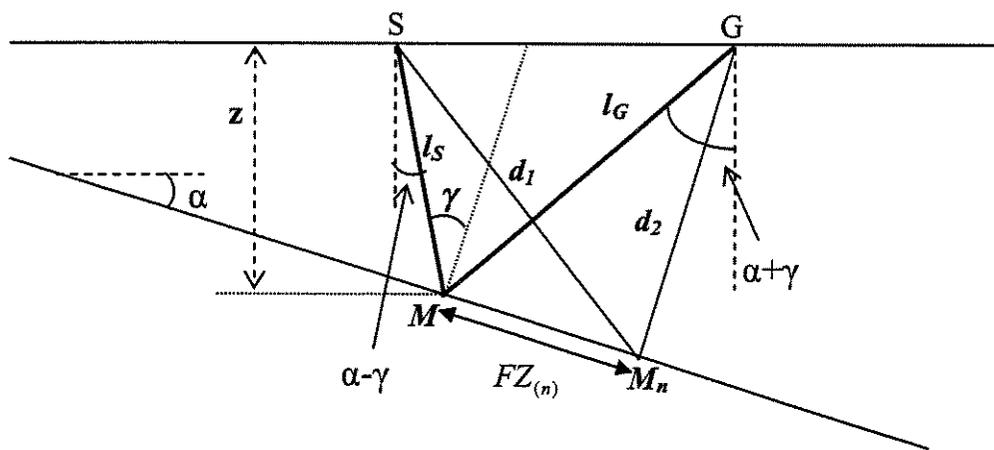


Figura 3.11: Geometria para determinação da zona de Fresnel ($FZ_{(n)}$) para ponto $M(y,z)$ sobre refletor plano inclinado com mergulho α (adaptado de Guerra, 2004a).

Tendo estabelecido como encontrar a zona de Fresnel, sobre o refletor, em termos do ângulo de reflexão γ e do ângulo de mergulho α , é necessário agora fazer a sua projeção para o datum de aquisição segundo a configuração CA.

A Figura 3.12 exibe o esquema da projeção da zona de Fresnel segundo a configuração CA. A partir do ponto M_n , que delimita a zona de Fresnel de ordem n , deve-se encontrar o ponto médio, de coordenada x_n , do traço que receberia uma reflexão ocorrida em M_n com o ângulo de reflexão γ . A zona de Fresnel projetada é a região entre o ponto médio, de coordenada x , do traço que registra a reflexão ocorrida em M com o ângulo γ e o ponto médio de coordenada x_n , e sua equação, para a projeção no domínio CA, é (Guerra, 2004c)

$$FZ_{(n)}^* = FZ_{(n)} \frac{\cos(\alpha) \cos^2(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)} = \sqrt{\frac{n\tau_w v z}{2} \cos(\alpha) \cos(\gamma)} \frac{\cos(\alpha) \cos^2(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)} \quad (3.32)$$

e sua dedução está no Apêndice C.

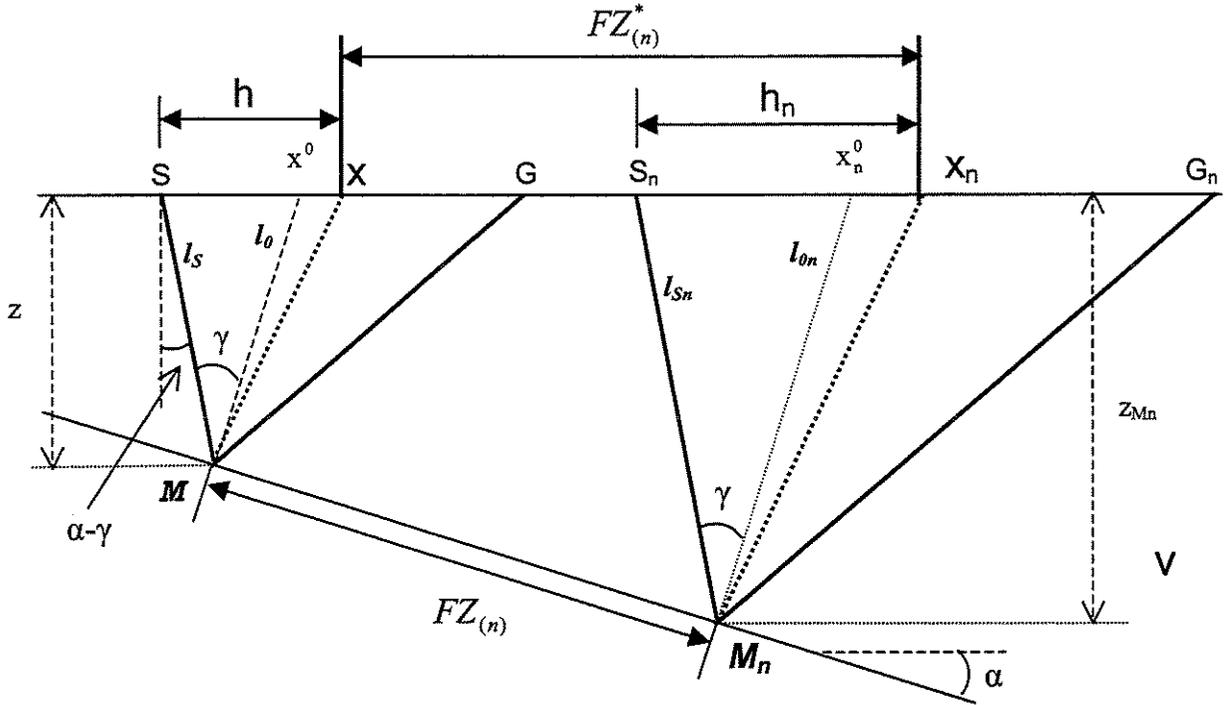


Figura 3.12: Geometria para determinação da zona de Fresnel projetada ($FZ_{(n)}^*$), segundo a configuração CA, para ponto $M(y,z)$ sobre refletor plano inclinado com mergulho α (adaptado de Guerra, 2004c).

Assim o raio, r_{ab} , da abertura necessária para que a migração consiga recuperar o coeficiente de reflexão da interface (segmento $\overline{yx_1}$ na Figura 3.13) é

$$r_{ab} = r_{abl} + FZ_{(1)}^* \quad (3.33)$$

onde r_{abl} , raio da abertura para migração cinemática, é dado pela Equação (3.30) e $FZ_{(1)}^*$, a primeira zona de Fresnel projetada, é dada pela Equação (3.32) fazendo $n = 1$.

E, como dito no Capítulo 2, Seção 2.3, para diminuir os ruídos da migração devidos ao truncamento brusco do operador, acrescenta-se a segunda zona de Fresnel projetada (segmento

$\overline{x_1 x_2}$ na Figura 3.13) como região de atenuação do operador. Assim, para que se realize uma migração dinâmica e livre dos artefatos causados pelos limites do operador, o raio de abertura, r_{ab} , deve ser

$$r_{ab} = r_{ab1} + FZ_{(2)}^* \quad (3.34)$$

onde $FZ_{(2)}^*$ é a região que engloba a primeira e segunda zonas de Fresnel projetadas sendo dada pela Equação (3.32) quando $n = 2$.

A Figura 3.13 faz um resumo das três aberturas citadas anteriormente, para a configuração CA, relacionando as zonas de Fresnel reais e as projetadas e o domínio dos traços sísmicos de entrada.

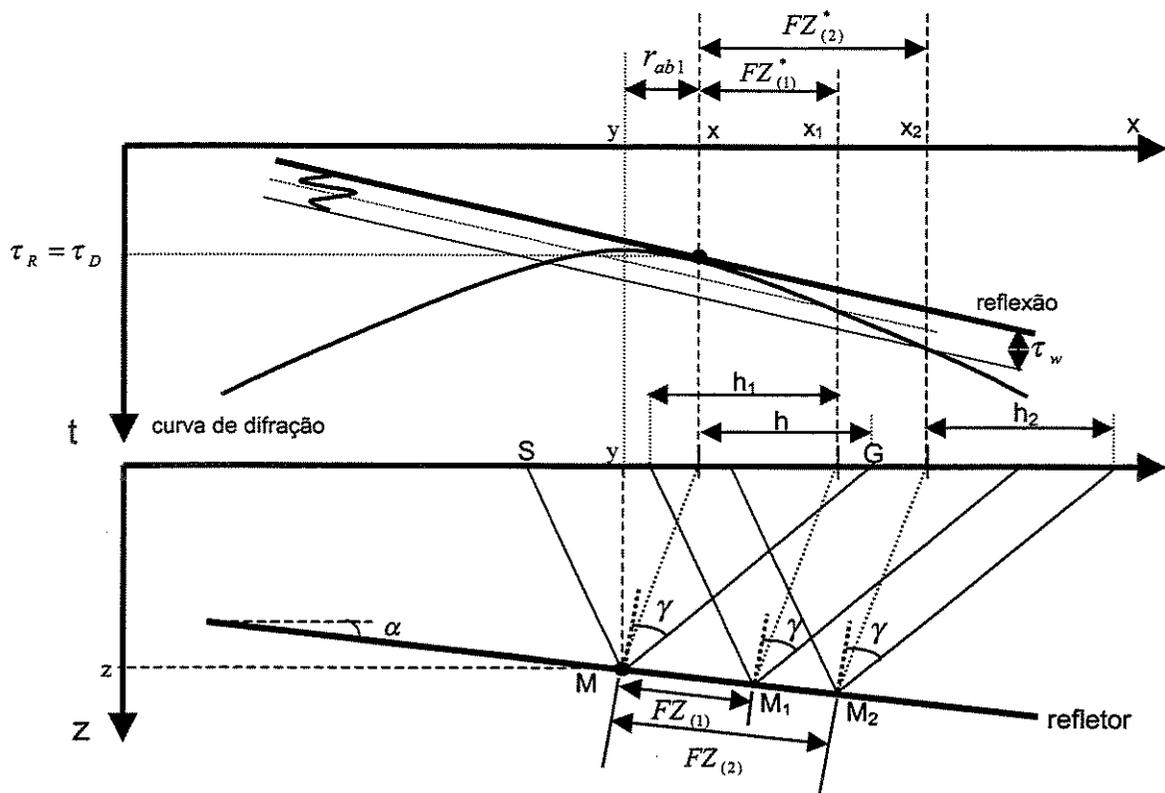


Figura 3.13: As zonas de Fresnel real e projetada (configuração CA) e sua relação com as aberturas no domínio do traço sísmico. No domínio do dado sísmico de entrada (parte superior) o eixo h está rebatido no plano (x, t) .

As informações necessárias para realizar a migração Kirchhoff 2,5D na configuração CA, em tempo e em amplitude verdadeira foram descritas. A seguir são mostradas algumas características da implementação numérica utilizada e finalmente, no próximo capítulo, são vistos alguns resultados da aplicação desta migração em dados sísmicos sintéticos.

3.6 Considerações sobre a implementação numérica da migração CA

O programa de migração CA por empilhamento em tempo foi implementado utilizando o pacote MATLAB® (versão 5.3). Seus principais parâmetros de entrada são:

- matriz 3D do dado sísmico analítico, com a meia derivada em relação ao tempo aplicada, organizado em painéis de afastamento comum;
- vetores das coordenadas superficiais dos dados de entrada e saída (ponto médio);
- vetor dos meios afastamentos;
- vetores com os tempos das amostras da entrada e saída;
- vetor ou matriz 2D com as velocidades NMO;
- vetor dos ângulos de reflexão de saída;
- valor do incremento dos ângulos de mergulho da migração; e
- valor do raio da abertura.

Os principais passos do algoritmo (Figura 3.14) estão descritos a seguir.

Laço no ângulo de reflexão

- cria vetor dos ângulos de mergulho segundo a condição $|\gamma| + |\alpha| < \pi/2$.

Laço na coordenada de saída

- calcula peso W_{DS}^{γ} em função dos tempos de saída, das velocidades em cada tempo, dos ângulos de mergulho e do ângulo de reflexão;
- calcula as curvas de difração (coordenada do ponto médio, meio afastamento e tempo de difração) para cada tempo de saída;
- interpola as amplitudes nos pontos calculados que estão dentro da abertura especificada
- aplica a cada amostra interpolada o seu respectivo peso;

- realiza o somatório das amplitudes de cada curva de difração; e
- coloca a parte real dos resultados acima na coordenada e nos respectivos tempos de saída.

Fim do laço na coordenada

Grava saída com um painel de ângulo comum migrado

Fim do laço no ângulo

Passar da integral matemática que descreve a migração Kirchhoff em CA para um programa que realiza esta migração nos dados sísmicos requer algumas aproximações, pois se está passando de um domínio contínuo para um domínio discreto (amostras). A integral é substituída por uma soma e o intervalo infinitesimal da variável de integração é trocado por um incremento finito. E o próprio dado sísmico tem seus próprios intervalos de amostragem na coordenada do ponto médio, no afastamento fonte-receptor e no tempo, gerando a necessidade de realizar interpolação entre os dados existentes para colher as amostras sobre as curvas de difração. Aqui são expostas as implementações utilizadas no algoritmo que foi feito utilizando o pacote MATLAB[®] (versão 5.3) e alguns comentários são feitos sobre a interferência da implementação numérica nos resultados.

No programa, a integral descrita pela Equação (3.1) é aproximada pela regra dos retângulos e considera-se sempre $\Delta\alpha$ constante, escolhido pelo usuário. Assim espera-se que quanto menor for o $\Delta\alpha$ melhor será a aproximação. É bom lembrar que para a migração CO o incremento da variável de integração x (coordenada do ponto médio) já é pré-estabelecido pelo próprio dado sísmico.

A amostra a ser coletada dificilmente cai exatamente sobre uma existente no dado fazendo-se necessário interpolar sua amplitude. Como as curvas de difração estão no espaço (x, h, t) , a interpolação ocorre neste espaço e portanto os intervalos de amostragem de x , h e t têm uma grande influência no resultado obtido, principalmente os dois primeiros pois o último normalmente é suficientemente pequeno. Ao comparar com a migração CO, nota-se que nesse caso normalmente a interpolação só acontece em t . O método de interpolação 3D utilizado no programa foi por polinômios de terceiro grau (cúbicas).

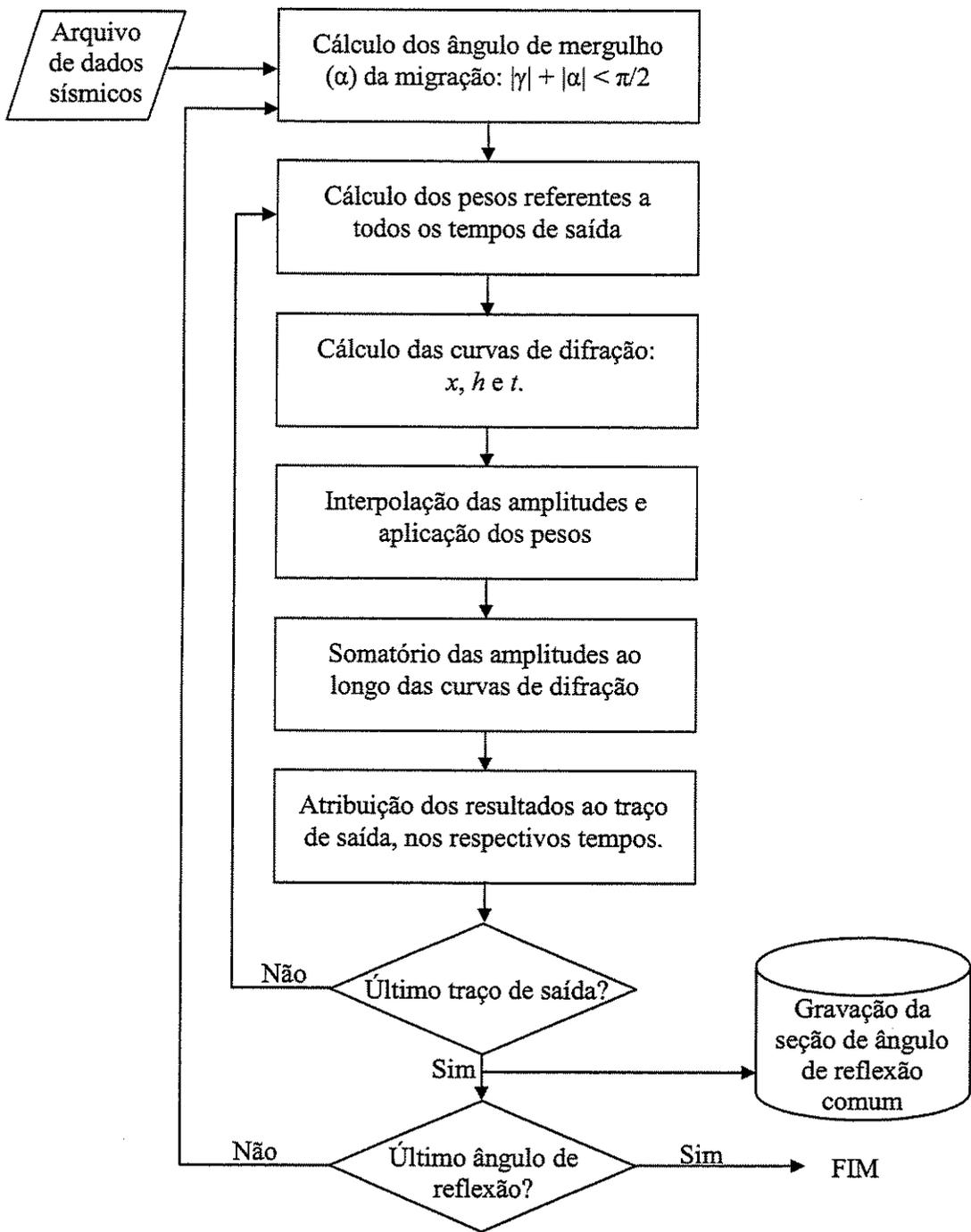


Figura 3.14: Algoritmo da migração Kirchhoff em ângulo comum por empilhamento

Tendo abordado a parte teórica da migração Kirchhoff em CA e alguns aspectos de sua implementação numérica, no próximo capítulo são apresentados alguns resultados obtidos da sua aplicação em dados sísmicos sintéticos.

Capítulo 4

Resultados da aplicação da migração em dados sísmicos sintéticos

Neste capítulo são exibidos os resultados obtidos da aplicação da migração em ângulo comum em dados sísmicos sintéticos e, sempre que forem adequadas, comparações com a migração em CO são feitas.

O programa de modelagem utilizado, cedido pelo Prof. Dr. Lúcio T. Santos, realiza a modelagem acústica para um meio homogêneo, com densidade constante, e uma interface refletora. Neste programa pode-se optar para que os coeficientes de reflexão (R) sejam constantes e unitários, independentemente dos ângulos de reflexão, opção esta que foi utilizada nas primeiras versões das modelagens de todos os modelos para facilitar a verificação da eficácia da migração.

Os dados sísmicos foram gerados a partir de três modelos geológicos com o objetivo de testar o comportamento da migração com o mergulho e curvatura das interfaces. O primeiro modelo é de uma interface plana horizontal, no segundo a interface é plana inclinada e o último é uma interface na forma anticlinal. Os detalhes são especificados à medida que os resultados são apresentados.

Ao comparar as amplitudes dos dados migrados com os coeficientes de reflexão considera-se que um erro de 5% é aceitável. Os gráficos de AVA como, por exemplo, a Figura 4.2), para os modelos com $R = +1$, apresentam dois valores para cada amostra: um refere-se à amplitude máxima/mínima amostrada no traço (ponto azul) e o outro é o valor máximo/mínimo da

amplitude interpolada entre as amostras do traço (quadrado verde). Para os modelos com R variável, apenas o valor da amplitude interpolada é exibido.

4.1 Modelo de interface plana horizontal.

Neste modelo (Figura 4.1) a interface está a 1000m de profundidade e utiliza-se uma velocidade constante de 3000m/s e a opção do coeficiente de reflexão constante e unitário. A razão de amostragem temporal foi de 4ms. Os resultados apresentados referem-se à migração na coordenada $y = 2500$ m.

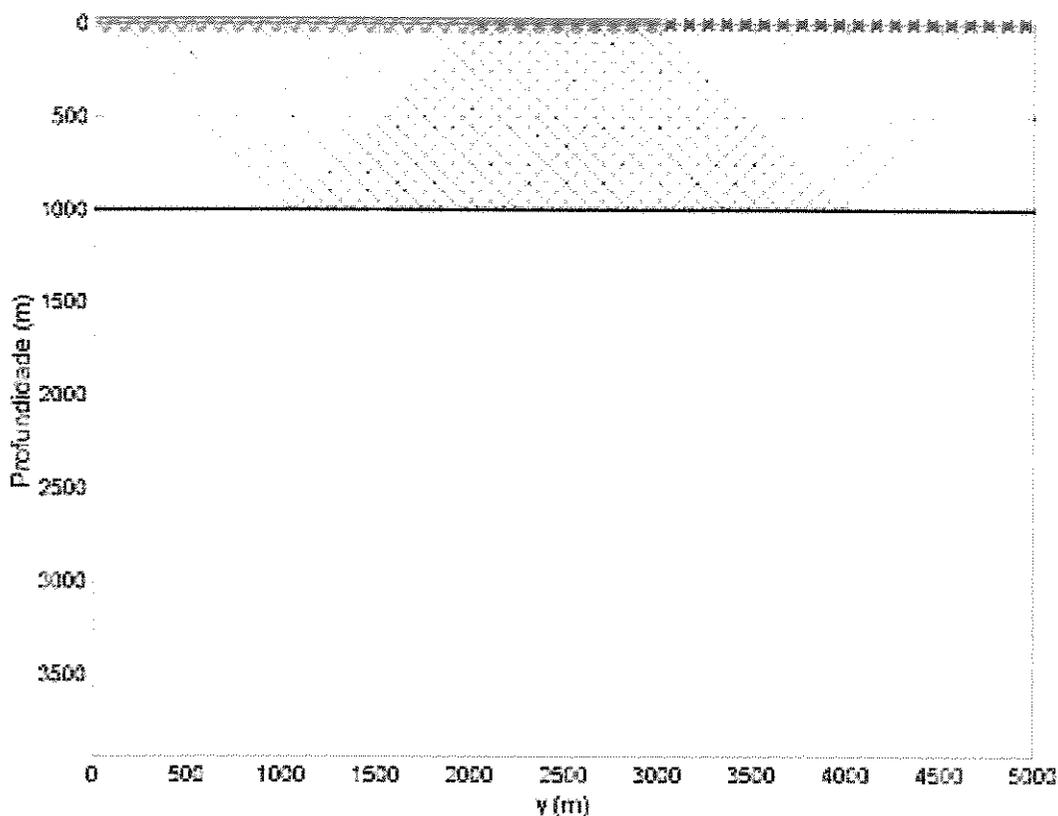


Figura 4.1: Modelo de interface plana horizontal em $z = 1000$ m e esquema dos raios para um afastamento de 2000m, os triângulos representam os receptores e as cruzes representam as fontes.

Com o auxílio deste modelo apresenta-se a influência dos intervalos entre traços (Δx e Δh) e entre os ângulos de mergulho da migração ($\Delta\alpha$) e a abertura para a migração CA.

Inicialmente os dados sísmicos foram modelados com $\Delta x = 50\text{m}$ (distância entre pontos médios) e $\Delta h = 50\text{m}$ e meio afastamento máximo de 1000m . Estes dados foram migrados em CA e CO, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, e suas amplitudes comparadas (Figura 4.2). Nota-se que a migração CA só recupera o coeficiente de reflexão ($R = +1$) até, aproximadamente, o ângulo de reflexão $\gamma = 16^\circ$. Já a migração CO consegue recuperar perfeitamente os coeficientes de reflexão ($R = +1$) para todos os afastamentos, ou seja, até $\gamma = 45^\circ$ pois considerando que a interface é horizontal, $h = 1000\text{m}$ equivale a este ângulo de reflexão.

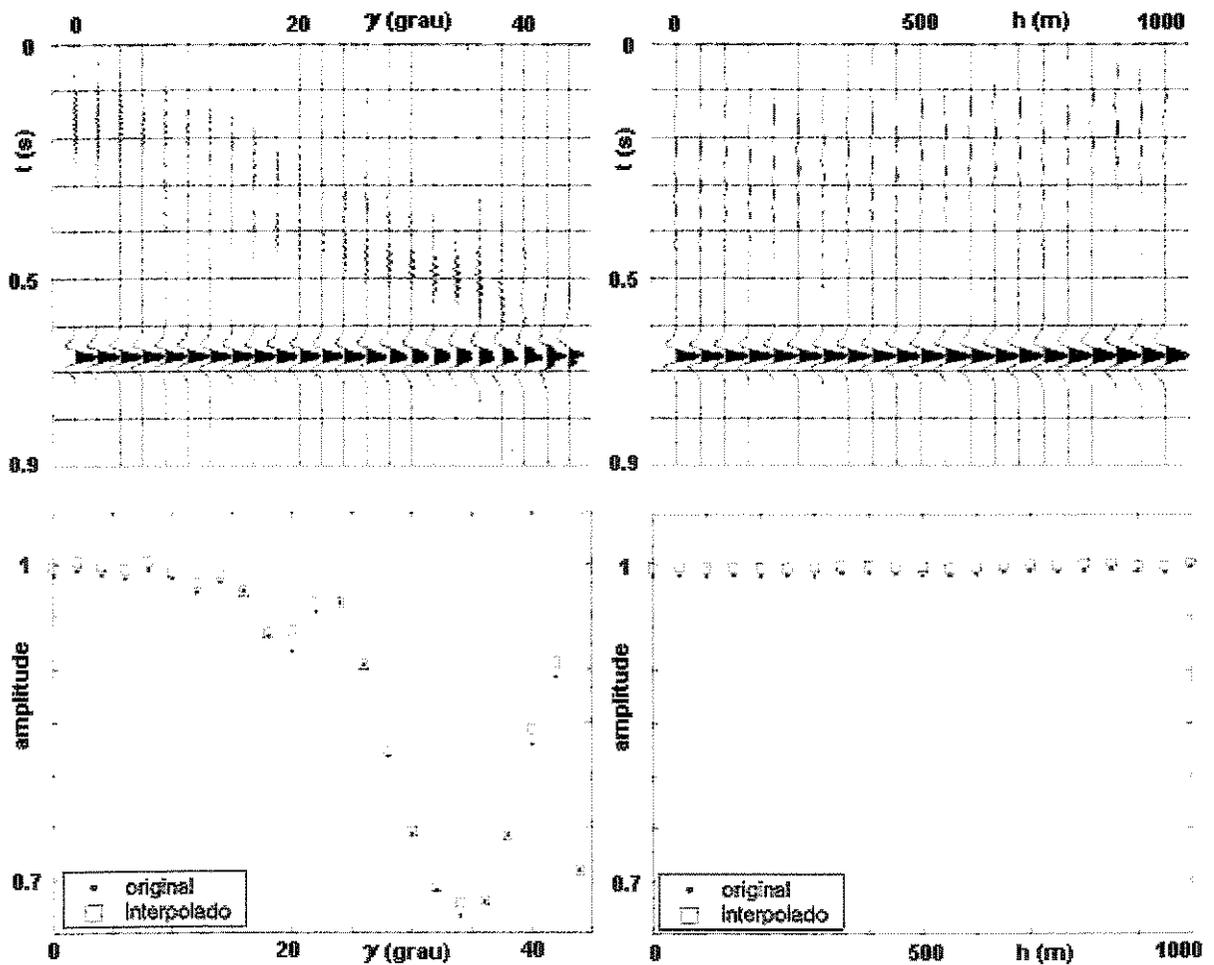


Figura 4.2: Migração ($\gamma = 2500\text{m}$) em CA (esquerda) e CO (direita) do modelo com $\Delta x = \Delta h = 50\text{m}$ e $R = +1$, seção (topo) e amplitudes máximas (base), com $r_{ab} = 2000\text{m}$.

Baseado nestes resultados foram modelados dois conjuntos de dados com intervalos entre traços menores, um com $\Delta x = \Delta h = 25\text{m}$ e o outro com $\Delta x = \Delta h = 10\text{m}$. Os resultados da aplicação da migração CA nestes dois conjuntos de dados estão na Figura 4.3.

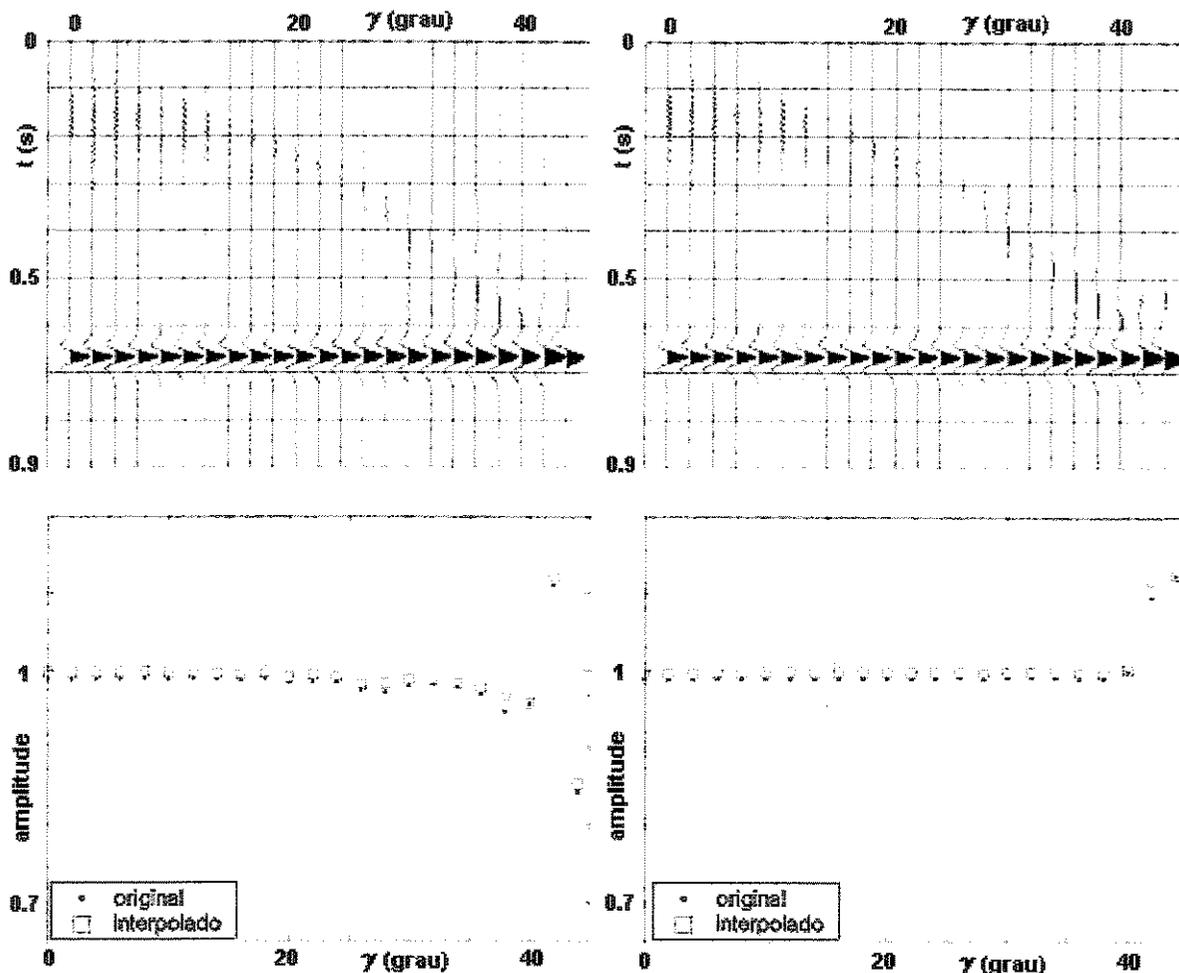


Figura 4.3: Migração ($y = 2500\text{m}$) em CA dos modelos com $\Delta x = \Delta h = 25\text{m}$ (esquerda) e $\Delta x = \Delta h = 10\text{m}$ (direita) e $R = +1$, seção (topo) e amplitudes máximas (base), com $r_{ab} = 2000\text{m}$.

Pode-se observar que o intervalo de 25m para x e h é suficiente para recuperar os coeficientes de reflexão até $\gamma = 40^\circ$, mas o comportamento das amplitudes não está muito estável (oscilações entre $\gamma = 26^\circ$ e $\gamma = 40^\circ$). Analisando as amplitudes obtidas com o intervalo de 10m nota-se que, apesar de não conseguir recuperar o coeficiente de reflexão até o ângulo de reflexão máximo contido nos dados ($\gamma = 45^\circ$), seu comportamento torna-se estável e assim este intervalo é

considerado adequado e utilizado em todas as modelagens apresentadas a partir daqui. Esta influência dos intervalos de amostragem de x e h nos resultados da migração CA é esperada, como citado no capítulo anterior, devido à interpolação das amplitudes ocorrer nas três variáveis x , h e t , fato que não ocorre na migração CO onde a interpolação é apenas em t . Sendo assim, quanto maior é o espaçamento entre as amostras dos dados de entrada, tanto em x quanto em h e em t também (mas 4ms é um intervalo suficientemente pequeno), pior é a estimativa da amplitude interpolada. O fato de não se conseguir recuperar as amplitudes até $\gamma = 45^\circ$ é discutido um pouco mais a frente.

A influência do incremento entre os ângulos de mergulho da migração ($\Delta\alpha = 1^\circ$, $\Delta\alpha = 2^\circ$ e $\Delta\alpha = 4^\circ$) é testada no modelo com $\Delta x = \Delta h = 10\text{m}$ e $h_{\text{max}} = 1000\text{m}$. Os resultados (Figura 4.4) mostram que, apesar de as amplitudes máximas no tempo do refletor (0,670s) permanecerem praticamente as mesmas, o nível de ruído em tempos menores aumenta proporcionalmente com o aumento do incremento. Havendo refletores nestes tempos, o ruído provavelmente interferiria em suas amplitudes.

Analisando a Figura 4.5, que exhibe as curvas de difração com amostragens de $\Delta\alpha = 1^\circ$, $\Delta\alpha = 2^\circ$ e $\Delta\alpha = 4^\circ$ e os respectivos mergulhos, nota-se que o intervalo de amostragem constante não significa uma amostragem igualmente espaçada na curva, sendo que a parte do operador que equivale a mergulhos menores (ápice da curva) é mais densamente amostrada no plano (x, h) . Portanto uma razão de amostragem maior do operador é muito mais danosa para mergulhos maiores justificando assim os resultados obtidos (Figura 4.4). Em outras palavras, considerando que a interface é horizontal, a tangência entre curva de difração e reflexão ocorre em $\alpha = 0^\circ$ (ápice da curva) e como é uma região que continua bem amostrada mesmo para $\Delta\alpha = 4^\circ$ (Figura 4.5 base) as amplitudes no tempo do refletor (0,670s) não são prejudicadas, o que provavelmente não ocorre para refletores mergulhantes pois a tangência ocorre onde o ângulo de mergulho de migração é igual ao mergulho do refletor. Por outro lado, para profundidades menores que a da interface do modelo, as amplitudes de uma curva de difração só são anuladas se houver interferência destrutiva, e à medida que o operador vai ficando mais mal amostrado, nos

mergulhos maiores, esta interferência é prejudicada gerando assim valores significativos de amplitudes nestas profundidades.

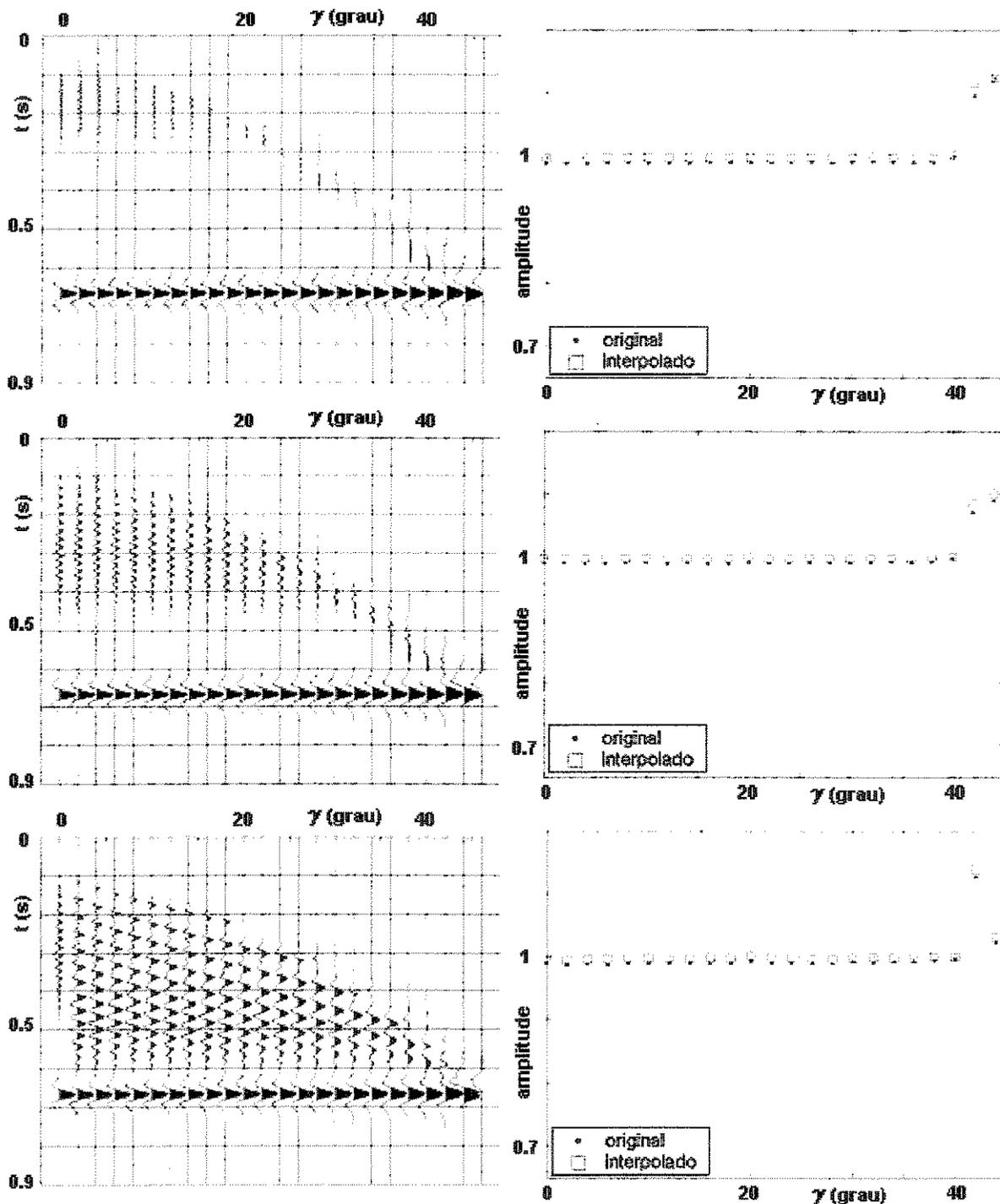


Figura 4.4: Comparação entre incrementos do ângulo de mergulho da migração (topo) $\Delta\alpha = 1^\circ$, (centro) $\Delta\alpha = 2^\circ$ e (base) $\Delta\alpha = 4^\circ$.

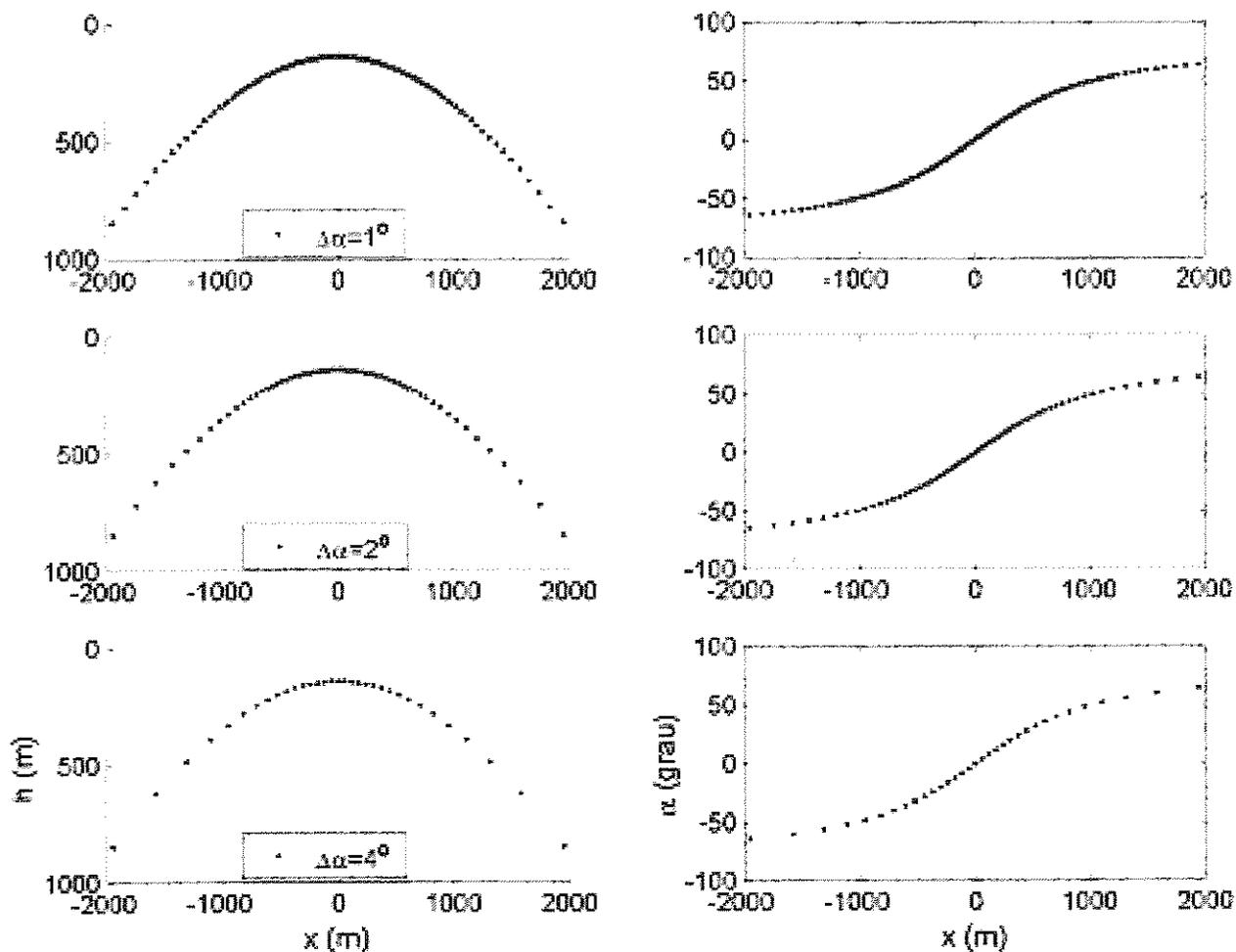


Figura 4.5: Curvas de difração (esquerda) com diferentes intervalos de amostragem (curvas projetadas no plano (x,h)) e os respectivos mergulhos de migração (direita).

Voltando ao problema da não recuperação do coeficiente de reflexão para $40^\circ < \gamma \leq 45^\circ$, o seu entendimento e solução são esclarecidos pela análise da abertura e das curvas de difração.

Fazendo um estudo da abertura necessária para recuperar as amplitudes até $\gamma = 45^\circ$ (Figura 4.6, esquerda) a uma profundidade de 1000m e velocidade de 3000m/s, através do uso das Equações (3.33) e (3.34), espera-se que usando uma abertura mínima (incluindo a segunda zona de Fresnel projetada) de 2100m atinja-se este objetivo. E ao analisar a curva de difração para $\gamma =$

45°, traçada apenas dentro desta abertura, (Figura 4.6, direita) observa-se que esta curva estende-se até quase o meio afastamento de 1500m.

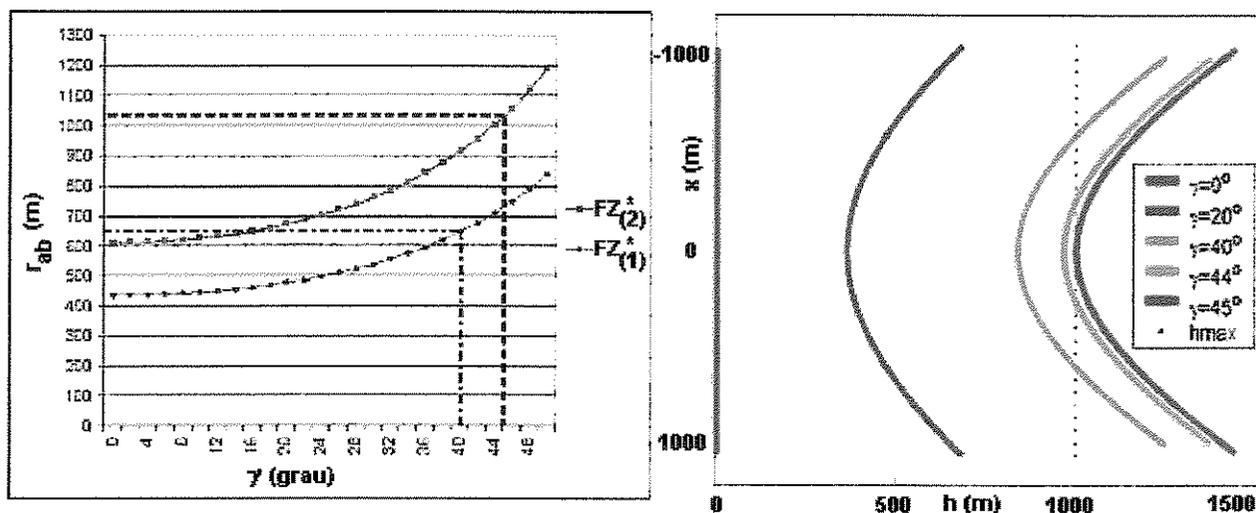


Figura 4.6: Gráfico da variação da abertura (incluindo $FZ_{(1)}^*$, verde, e $FZ_{(2)}^*$, azul) com o ângulo de reflexão (esquerda) e as curvas de difração (direita) para $r_{ab} = 1050$ m, adequado para $\gamma = 45^\circ$, $z = 1000$ m e $v = 3000$ m/s.

Justifica-se assim o resultado mostrado na Figura 4.3, apesar de a migração ter sido feita com uma abertura bem maior (4000m) do que a mínima (2100m), a ausência dos meios afastamentos maiores do que 1000m não permite que os coeficientes de reflexão para $40^\circ < \gamma \leq 45^\circ$ sejam recuperados. Vale notar que na seção exibida na Figura 4.3 a reflexão existe e está posicionada corretamente (horizontalizada) para todos os ângulos de reflexão, mesmo quando $40^\circ < \gamma \leq 45^\circ$, pois, apesar de não ter os afastamentos necessários para a migração dinâmica, existe afastamento suficiente para a migração cinemática, ou seja, a região de tangência está entre os afastamentos presentes no dado (Figura 4.6, direita).

Um outro aspecto é a recuperação da amplitude para $\gamma = 40^\circ$ pois, embora o raio da abertura adequado (incluindo a $FZ_{(2)}^*$) seja de 950m (Figura 4.6) e aponte para um $h_{max} \approx 1200$ m que não existe no dado, o raio da abertura que inclui só a primeira zona de Fresnel projetada ($r_{ab} = 650$ m), mas garante a migração dinâmica correta, indica um meio afastamento próximo a 1000m, presente no dado.

Novos dados foram modelados com meio afastamento máximo de 1440m (ângulo de reflexão máximo presente é ao redor de 55°) e migrados com a abertura de 2100m. Os resultados estão na Figura 4.7, onde pode-se observar que o coeficiente de reflexão é recuperado até $\gamma = 48^\circ$, maior do que o esperado, mas justificado pela abertura incluindo apenas a primeira zona de Fresnel projetada como exposto anteriormente.

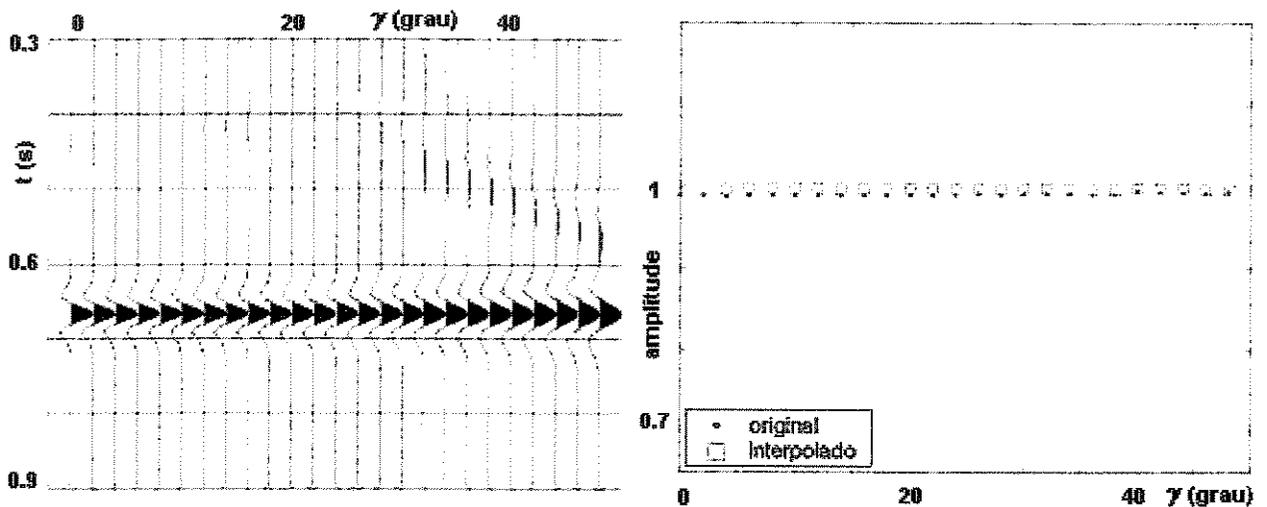


Figura 4.7: Migração em CA com $r_{ab} = 1050m$ do modelo com $h_{max} = 1440m$ e $R = +1$, seção (esquerda) e amplitudes máximas (direita).

4.2 Modelo de interface plana inclinada

A apresentação destes resultados tem um enfoque ligeiramente diferente. Enquanto no modelo anterior a modelagem foi sendo modificada para recuperar os coeficientes de reflexão até $\gamma = 45^\circ$, neste as limitações da modelagem, que equivalem aos problemas presentes na aquisição de dados reais, é que norteiam as previsões de até qual ângulo de reflexão as amplitudes são recuperadas para duas profundidades distintas ($z = 1640m$ e $z = 2000m$). Primeiramente é visto o modelo com coeficiente de reflexão (R) constante e unitário e depois um outro com R variável para comparação das curvas de AVA obtidas nos dados migrados em CA e CO.

O modelo pode ser visto na Figura 4.8 e os ângulos de reflexão da modelagem estão na Figura 4.9. Os dados para a modelagem são:

- inclinação da interface = 20° ;
- $v = 4500\text{m/s}$;
- $R = +1$;
- $\Delta t = 8\text{ms}$, $\Delta x = \Delta h = 10\text{m}$;
- $h_{\min} = 0\text{m}$ e $h_{\max} = 2500\text{m}$;
- o comprimento do modelo permite uma abertura máxima de 4000m , sem efeitos de borda, para uma das coordenadas que é estudada, $y = 4510\text{m}$ e $z = 1640\text{m}$ (Figura 4.8).

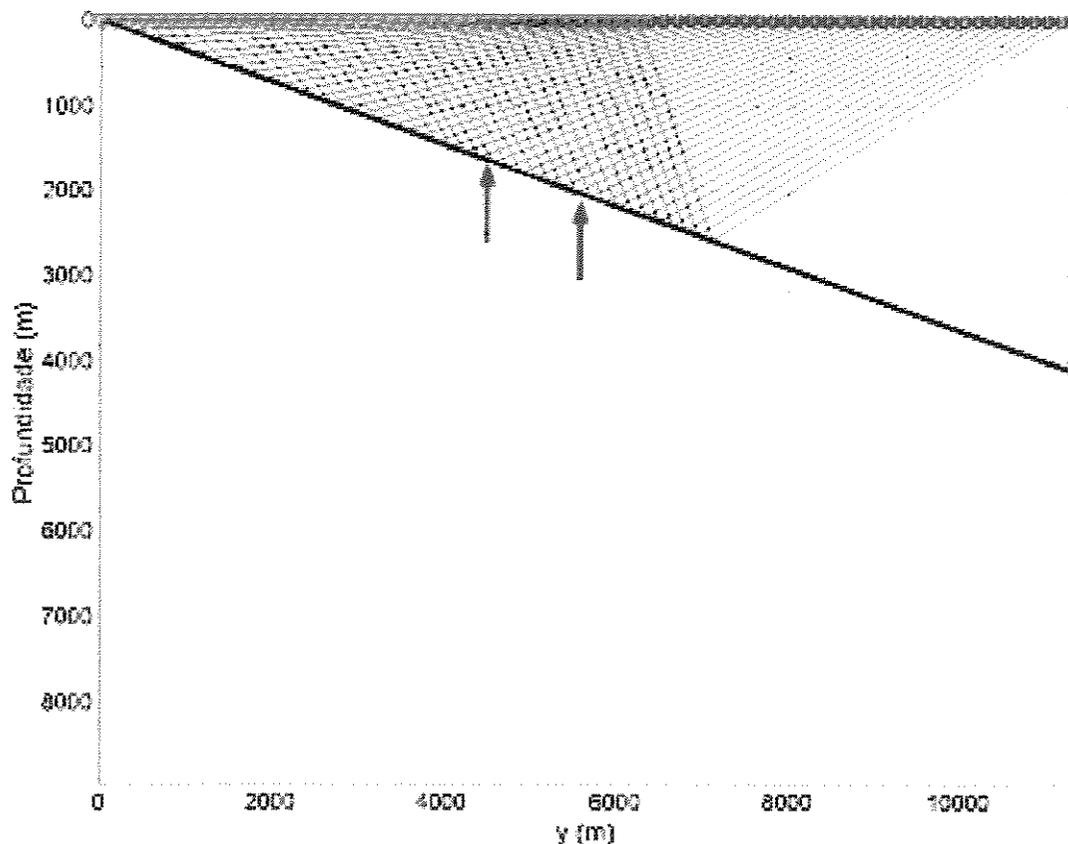


Figura 4.8: Modelo de interface plana inclinada de 20° e esquema dos raios para um afastamento de 5000m . As setas indicam as coordenadas que são estudadas.

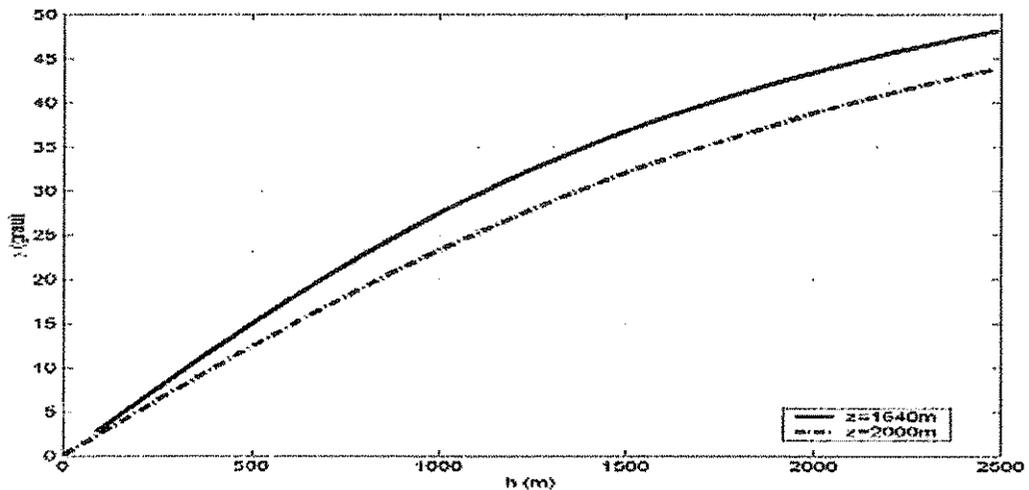


Figura 4.9: Ângulos de reflexão da modelagem para as profundidades de 1640m e 2000m e meio afastamento máximo de 2500m

Escolheu-se a razão de amostragem temporal de 8ms devido a limitações computacionais, para que o tamanho do arquivo de dados ficasse menor, ocupando menos memória no processo de migração.

Considerando a abertura incluindo a segunda zona de Fresnel projetada (Figura 4.10, esquerda), observa-se que com o raio da abertura máxima permitida pelos dados sísmicos (2000m) é possível recuperar os coeficientes de reflexão até $\gamma = 25^\circ$, para a profundidade de 1640m, e até $\gamma = 14^\circ$ para a profundidade de 2000m, se os afastamentos presentes nos dados forem suficientes. Levando-se em conta o raio de abertura incluindo apenas a primeira zona de Fresnel projetada (Figura 4.10, direita) espera-se a recuperação das amplitudes até $\gamma = 34^\circ$ para $z = 1640\text{m}$ e até $\gamma = 28^\circ$ para $z = 2000\text{m}$, com a mesma consideração sobre os afastamentos. Assim, mesmo que os dados tenham ângulos de reflexão até 48° (Figura 4.9), não se espera conseguir recuperar as amplitudes até este valor de γ .

A Figura 4.11 exibe as curvas de difração referentes aos ângulos de reflexão 0° , 14° , 25° , 28° e 34° para as profundidades de 1640m (esquerda) e 2000m (direita). Observa-se que para $z = 1640\text{m}$ a curva de 34° termina antes do meio afastamento de 2500m e para $z = 2000\text{m}$ a curva de

28° também tem este comportamento. Assim, existem nos dados sísmicos os afastamentos necessários para se recuperar os coeficientes de reflexão até os ângulos de reflexão indicados pelo estudo da abertura.

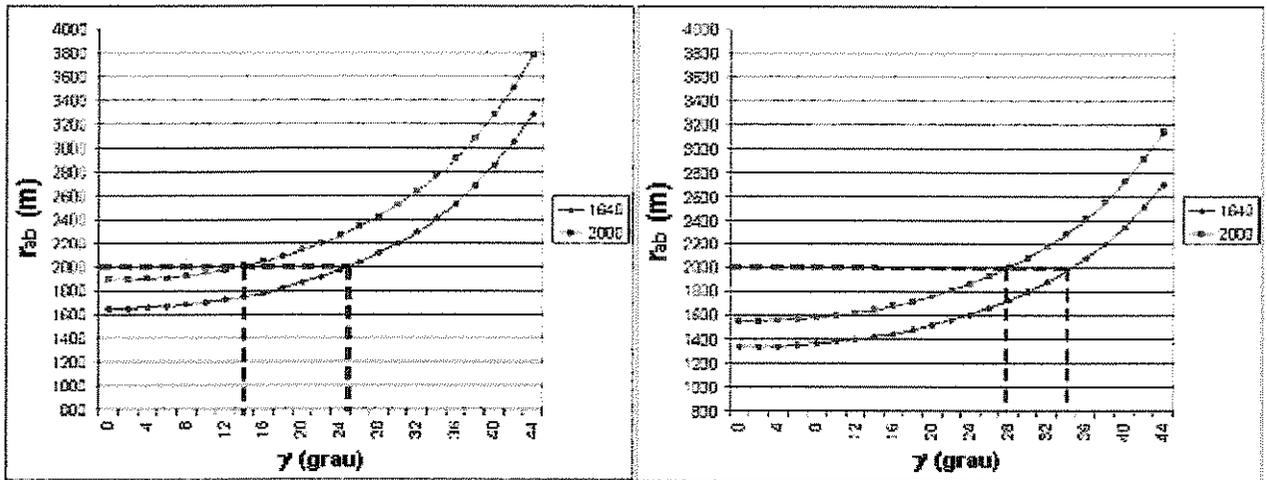


Figura 4.10: Gráfico da variação do raio da abertura mínima com o ângulo de reflexão, incluindo a $FZ_{(2)}^*$ (esquerda) e a $FZ_{(1)}^*$ (direita), para as profundidades $z = 1640\text{m}$ e $z = 2000\text{m}$ no modelo da interface plana inclinada.

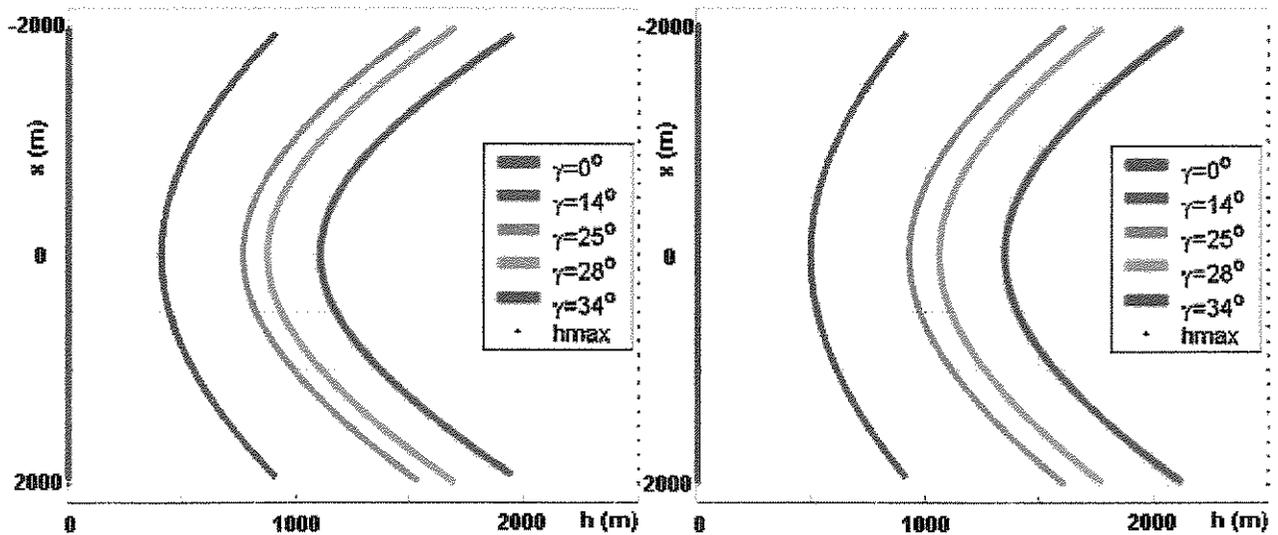


Figura 4.11: Curvas de difração ($\gamma = 0^\circ, 14^\circ, 25^\circ, 28^\circ$ e 34°) para as profundidades $z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $z = 2000\text{m}$ (direita) com $r_{ab} = 2000\text{m}$.

Os dados migrados em CA (com $\Delta\alpha = 1^\circ$ e $r_{ab} = 2000\text{m}$) para a coordenada $y = 4510\text{m}$, onde a profundidade do refletor é de 1640m , bem como o gráfico dos ângulos de reflexão versus a amplitude máxima do refletor estão na Figura 4.12. Constata-se que o coeficiente de reflexão é recuperado até $\gamma = 32^\circ$, muito próximo do previsto pelo estudo apresentado acima ($\gamma = 34^\circ$).

Observa-se que as amplitudes não ficam tão próximas a +1, quando comparadas às obtidas para o modelo horizontal (Figura 4.7), mas isto é consequência da razão de amostragem temporal (8ms) do dado que interfere no valor interpolado das amplitudes, do mesmo jeito que os intervalos de x e h fazem (ver modelo interface plana horizontal, Figuras 4.2 e 4.3). Mas devido a limitações computacionais esta razão de amostragem não pôde ser diminuída.

Do mesmo modo, os resultados da migração CA (Figura 4.13), com $\Delta\alpha = 1^\circ$ e $r_{ab} = 2000\text{m}$, da coordenada $y = 5510\text{m}$ (refletor a uma profundidade de 2000m) mostram que os coeficientes de reflexão são recuperados até $\gamma = 26^\circ$, muito próximo do esperado ($\gamma = 28^\circ$), e nota-se também o efeito da razão de amostragem temporal.

Um outro aspecto que se deve considerar é o incremento entre os ângulos de mergulho da migração, $\Delta\alpha$. Como mostrado, este incremento não interfere nos resultados das amplitudes do refletor horizontal, pelos motivos citados, apenas causando ruídos acima do refletor. Mas para um refletor inclinado, onde a região de tangência entre reflexão e difração não ocorre mais no ápice da curva de difração e sim no seu flanco, e como dito, o aumento do $\Delta\alpha$ é mais prejudicial nas direção dos maiores ângulos de mergulho de migração, este incremento pode afetar as amplitudes do refletor. Para um mesmo incremento de α este efeito será mais nocivo quanto maior for o mergulho da interface.

Os resultados da migração CA, para a coordenada $y = 4510\text{m}$, com $\Delta\alpha = 0,5^\circ$, $\Delta\alpha = 1^\circ$ e $\Delta\alpha = 4^\circ$ e $r_{ab} = 2000\text{m}$ podem ser vistos na Figura 4.14. Nota-se com o aumento do $\Delta\alpha$, o mesmo efeito do aparecimento de amplitudes espúrias acima do refletor, como no modelo de interface horizontal, mas agora as amplitudes no tempo do refletor (0,730s) estão sendo afetadas. Pode-se observar que à medida que $\Delta\alpha$ aumenta, oscilações começam a aparecer e tendem a aumentar.

Com isto, as próximas migrações do modelo de interface plana inclinada foram realizadas com $\Delta\alpha = 0,5^\circ$.

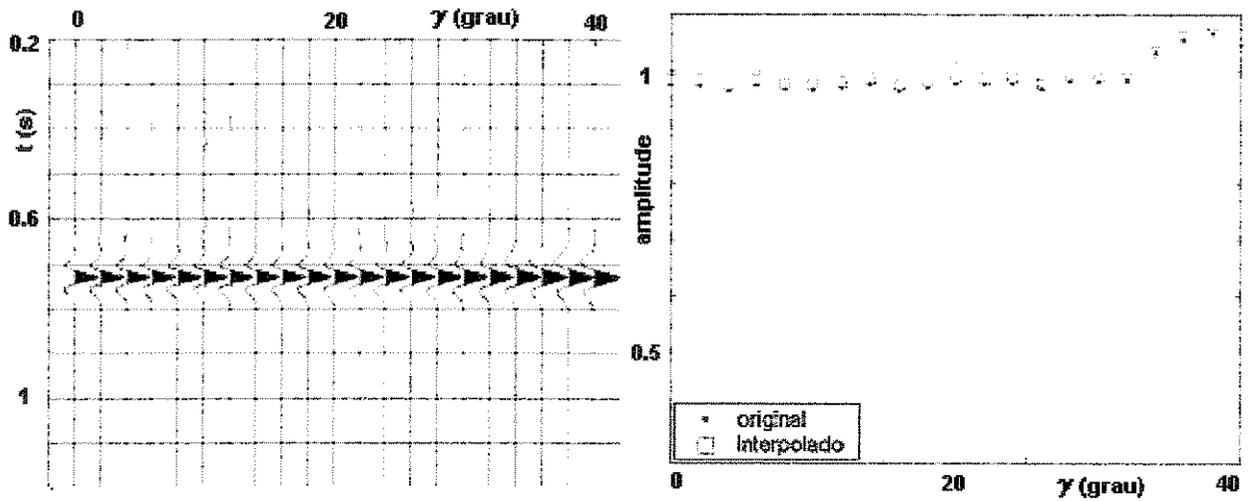


Figura 4.12: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para a coordenada $y = 4510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes máximas (direita) em $t_M \approx 0,730\text{s}$ ($z = 1640\text{m}$).

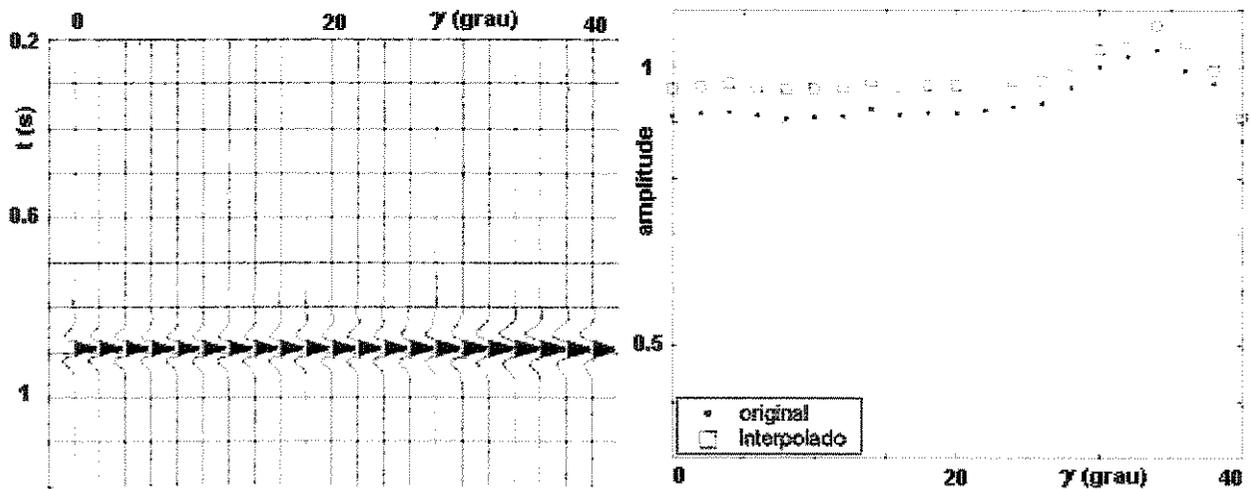


Figura 4.13: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para a coordenada $y = 5510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes máximas (direita) em $t_M \approx 0,890\text{s}$ ($z = 2000\text{m}$).

Com os resultados obtidos verifica-se que o algoritmo da migração CA funcionou bem para modelos de interface plana inclinada e que os estudos da abertura da migração e das curvas de difração estão fornecendo boas previsões dos resultados da migração, mesmo que a equação da

zona de Fresnel projetada inclua a aproximação, citada no Capítulo 2, que fornece um valor médio para esta zona no caso de interface inclinada.

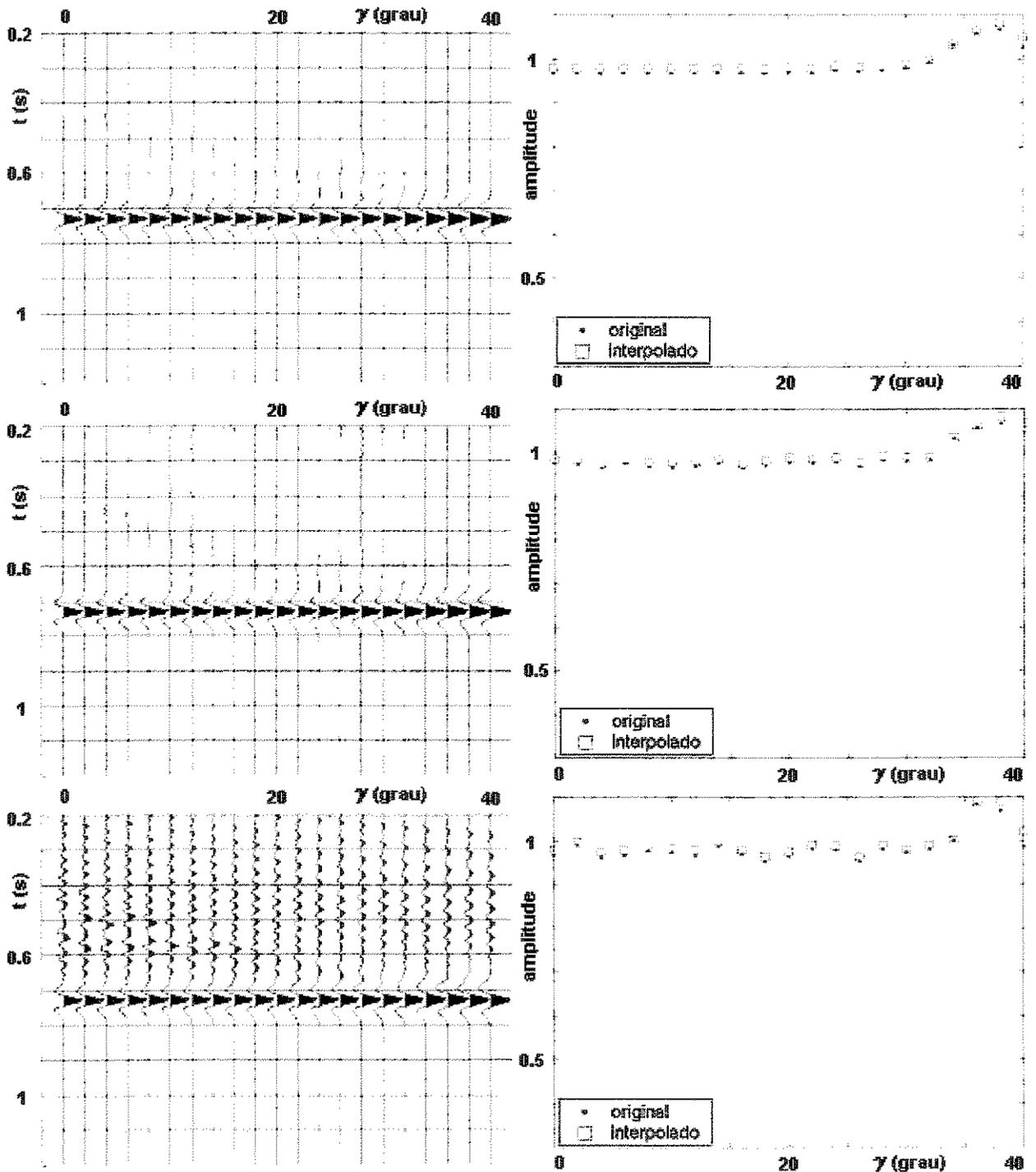


Figura 4.14: Migração CA, em $y = 4510\text{m}$, com $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ (topo), $\Delta\alpha = 1^\circ$ (centro) e $\Delta\alpha = 4^\circ$ (base), e $r_{ab} = 2000\text{m}$.

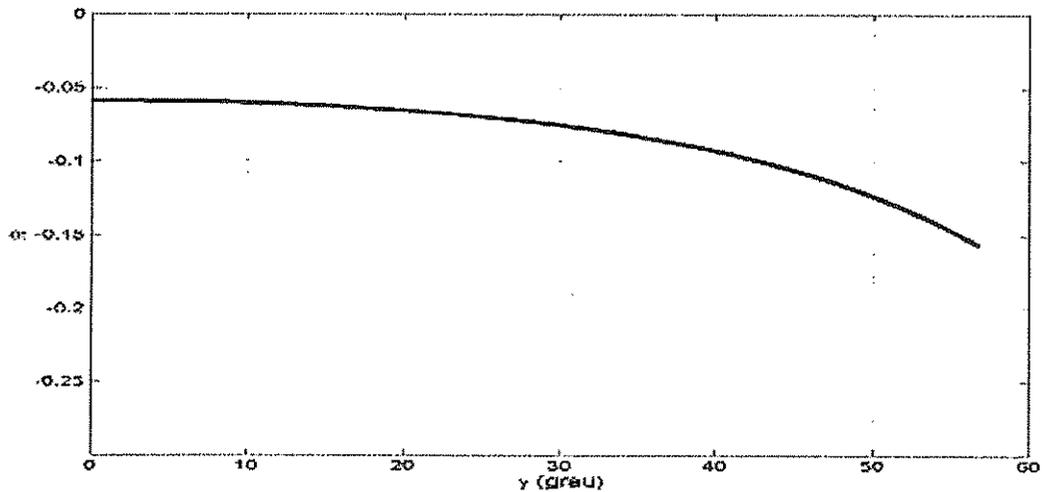


Figura 4.15: Coeficientes de reflexão acústicos em função do ângulo de reflexão para interface separando meios com as velocidades $v_1 = 4500\text{m/s}$ e $v_2 = 4000\text{m/s}$.

Uma nova modelagem foi realizada com os mesmos parâmetros da anterior, mas agora com as velocidades da camadas 1 e 2 iguais a 4500m/s e 4000m/s , respectivamente, e calculando o coeficiente de reflexão acústico correto (Figura 4.15). Estes dados sísmicos são usados para comparar as curvas de AVA obtidas com a migração CA e CO, para as duas coordenadas estudadas anteriormente. As migrações foram realizadas com $r_{ab} = 2000\text{m}$ e $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ (migração CA) e $\Delta x = 10\text{m}$ (migração CO).

Os resultados obtidos migrando em CA das coordenadas onde as profundidades da interface são 1640m e 2000m podem ser vistos nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente. Nos gráficos de AVA estão desenhadas, além dos valores das amplitudes mínimas (quadrado verde), as curvas dos coeficientes de reflexão acústico R (linha vermelha) e o valor absoluto das diferenças entre R e as respectivas amplitudes, normalizadas pelo respectivo R (pontos vermelhos).

Observa-se que, como era de se esperar, a recuperação das amplitudes ocorre até os mesmos ângulos de reflexão do modelo anterior, ou seja, até $\gamma = 32^\circ$ para $z = 1640\text{m}$ e até $\gamma = 26^\circ$ para $z = 2000\text{m}$.

Os mesmos dados foram migrados em CO e os resultados são exibidos na Figura 4.18 para $y = 4510\text{m}$ ($z = 1640\text{m}$) e na Figura 4.19 para $y = 5510\text{m}$ ($z = 2000\text{m}$). Nos gráficos de AVO a simbologia é similar à descrita para os resultados da migração CA deste modelo. Consta-se que os coeficientes de reflexão são recuperados até $h \approx 1800\text{m}$ para o ponto $(4510,1640)$ e até $h \approx 1700\text{m}$ para o ponto $(5510,2000)$.

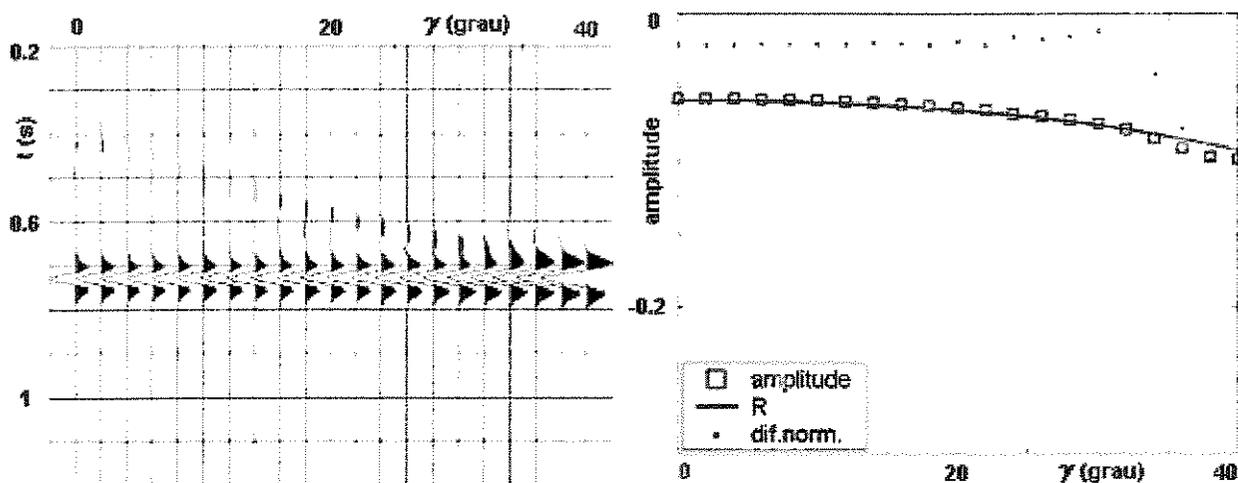


Figura 4.16: Seção migrada em CA (esquerda), para a coordenada $y = 4510\text{m}$ e (direita) amplitudes mínimas (quadrado verde) em $t_M \approx 0,730\text{s}$ ($z = 1640\text{m}$), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).

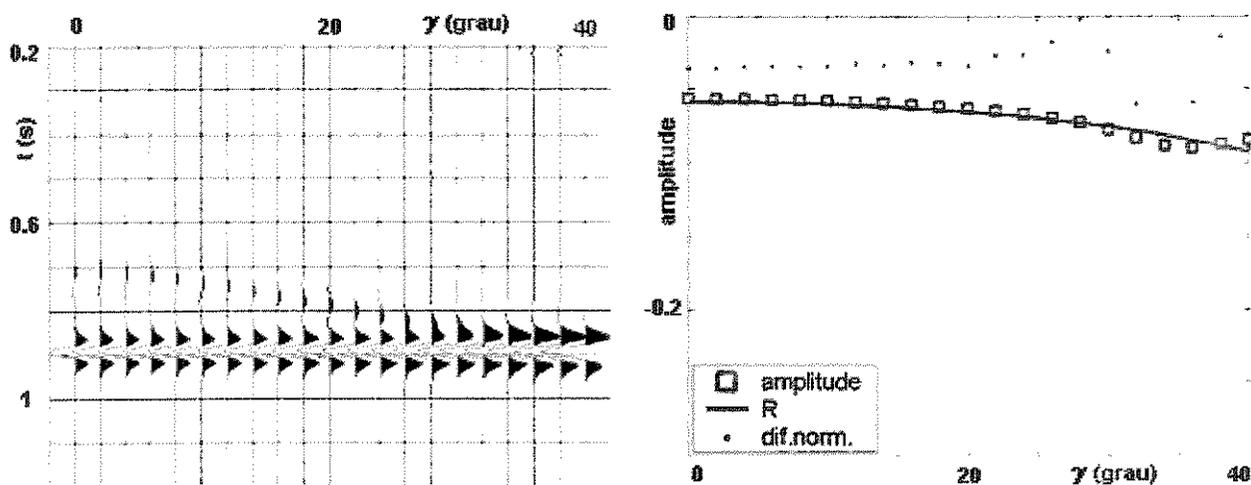


Figura 4.17: Seção migrada em CA (esquerda), para a coordenada $y = 5510\text{m}$ e (direita) amplitudes mínimas (quadrado verde) em $t_M \approx 0,890\text{s}$ ($z = 2000\text{m}$), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).

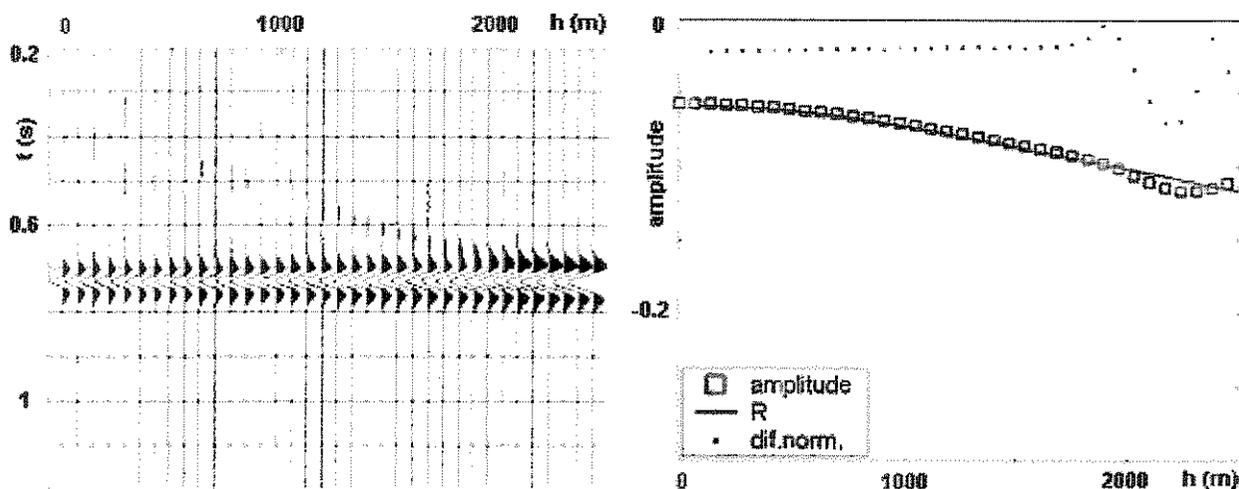


Figura 4.18: Migração CO para a coordenada $y = 4510\text{m}$ (esquerda) e amplitudes mínimas versus meio afastamentos (direita). As informações estão em intervalos de 70m.

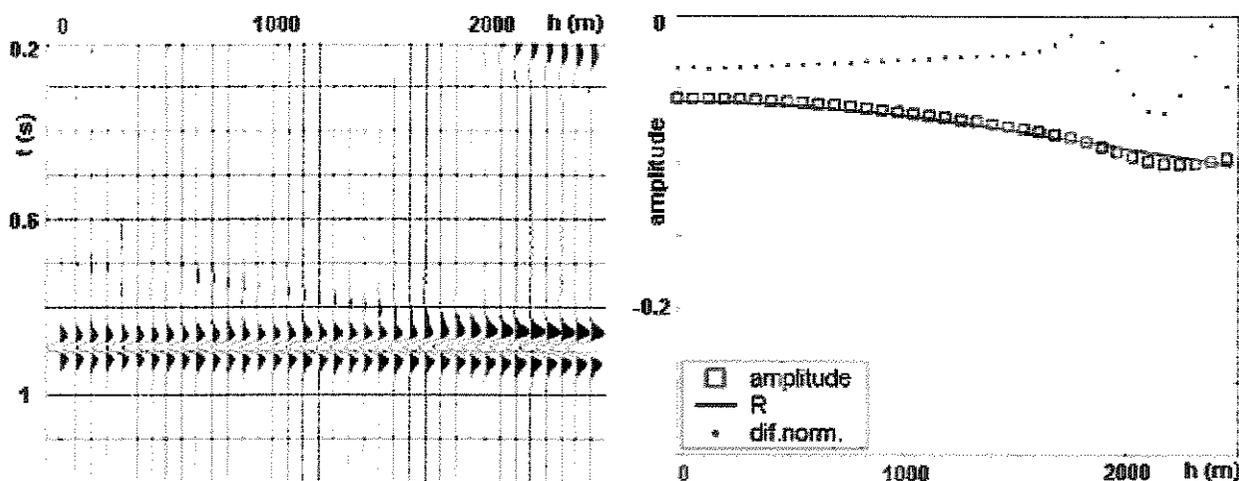


Figura 4.19: Migração CO para a coordenada $y = 5510\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita). As informações estão em intervalos de 70m.

Para comparar os resultados das curvas de AVA obtidas dos dados migrados em CA e CO deve-se transformar a variável meio afastamento, h , da última, em ângulo de reflexão, γ . Esta transformação normalmente é feita considerando-se que o modelo é de camadas horizontais e utilizando-se as velocidades intervalares, obtidas a partir do campo de velocidades disponível. Aplicando-se a lei de Snell calculam-se os ângulos de reflexão correspondentes a cada ponto

(y, h, z) . Como o modelo apresentado tem apenas uma interface esta transformação é feita simplesmente utilizando a Equação (3.21) repetida a seguir

$$\gamma = \arctan(h/z), \quad (4.1)$$

onde mais uma vez é lembrado que profundidade (z) e tempo migrado (t_M) são intercambiáveis através da relação $z = vt_M/2$ e v é a velocidade equivalente à do meio acima do ponto considerado.

A Figura 4.20 é o gráfico de h versus γ , para as profundidades de $z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $z = 2000\text{m}$ (direita), com os valores calculados (linha contínua azul) pela Equação (4.1), os valores da modelagem (linha traço-ponto vermelha) e a diferença entre eles (linha tracejada preta). Pode-se observar que, além do ângulo de reflexão calculado ser maior do que o da modelagem, quanto maior o afastamento maior é a diferença entre eles, e quanto menor a profundidade do ponto em estudo, considerando um mesmo afastamento, esta diferença também aumenta. Um outro aspecto, não mostrado na figura, é que quanto maior o mergulho da interface maior é esta diferença.

Após realizar a transformação de h para γ , foram feitos os gráficos de AVA para os dados migrados em CO, que podem ser vistos na Figura 4.21 para $y = 4510, z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $y = 5510, z = 2000\text{m}$ (direita).

Utilizando o mesmo critério de confiabilidade das amplitudes (máximo de 5% de erro em relação aos R) adotado nas análises da migração CA, pode-se dizer que para o ponto (4510,1640) (Figura 4.21, esquerda) a amplitude é recuperada até $\gamma = 22^\circ$, o que equivale a $h \approx 650\text{m}$ (Figura 4.20, esquerda), e para o ponto (5510,2000) (Figura 4.21, direita) esta recuperação é até $\gamma = 16^\circ$ ($h \approx 550\text{m}$ (Figura 4.20, direita)). Mas observando o comportamento das diferenças entre amplitudes e coeficientes de reflexão, dentro dos limites de γ citados, nota-se que não há estabilidade, isto é, as diferenças estão em contínuo aumento.

Deve ficar claro que as diferenças entre amplitudes e coeficientes de reflexão observadas na Figura 4.21 devem-se ao método utilizado na transformação das variáveis h para γ , pois no

domínio do meio afastamento h (Figuras 4.18 e 4.19, direita) as amplitudes equivalem aos coeficientes de reflexão, até os meio afastamentos citados na discussão dessas figuras.

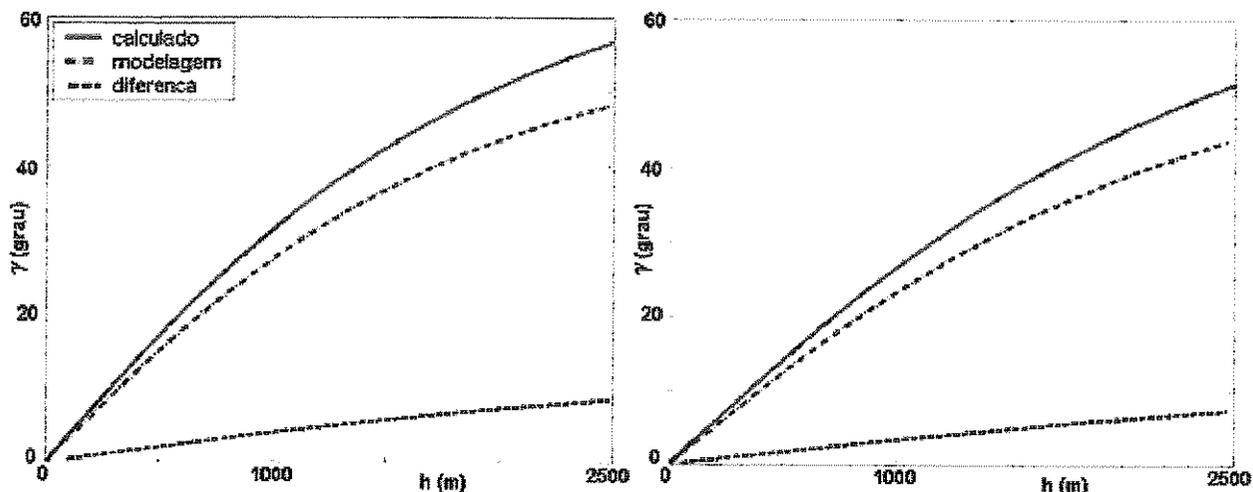


Figura 4.20: Transformação de h em γ , para os dados migrados em CO, para $z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $z = 2000\text{m}$ (direita), valores calculados (contínua azul), valores da modelagem (traço-ponto vermelho) e diferença (tracejada preta).

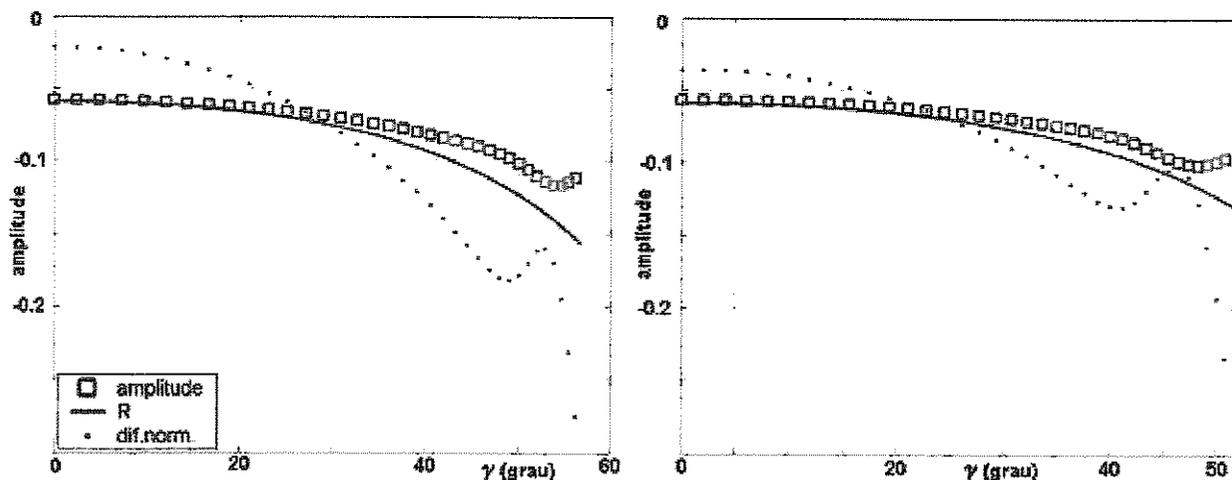


Figura 4.21: Curvas AVA dos dados migrados em CO para $y = 4510, z = 1640\text{m}$ (esquerda) e $y = 5510, z = 2000\text{m}$ (direita), com amplitude (quadrado verde), R (contínua vermelha) e diferença normalizada (pontos vermelhos).

Para facilitar a comparação entre as curvas de AVA obtidas com os dados migrados em CA e CO, elas são colocadas em um mesmo gráfico de seno ao quadrado do ângulo de reflexão versus a amplitude, bem como os coeficientes de reflexão e as diferenças entre amplitudes e R

normalizadas pelos respectivos R . Na Figura 4.22 tem-se as curvas referentes ao ponto (4510,1640) e na Figura 4.23 as referentes ao ponto (5510,2000). O ângulo de reflexão máximo de cada figura foi escolhido de acordo com a consideração, feita anteriormente, de que os coeficientes de reflexão tenham sido recuperados na migração CA, ou seja, $\gamma = 32^\circ$ ($\text{sen}^2 32^\circ = 0,281$) para $y = 4510\text{m}$, $z = 1640\text{m}$ (Figura 4.22) e $\gamma = 26^\circ$ ($\text{sen}^2 26^\circ = 0,192$) para $y = 5510\text{m}$, $z = 2000\text{m}$ (Figura 4.23).

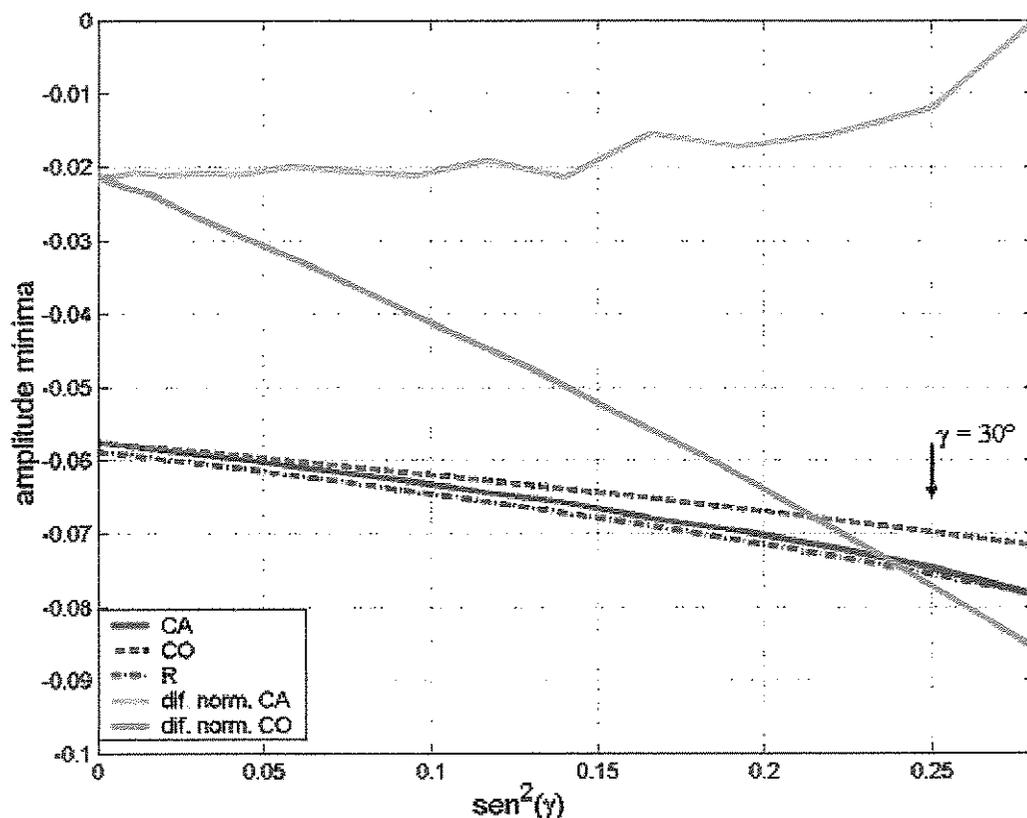


Figura 4.22: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (4510,1640), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R .

Em ambas as figuras observa-se que, para ângulos de reflexão próximos a zero, as curvas CA e CO têm, praticamente, o mesmo valor, o que, num estudo da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, leva a valores bem próximos do parâmetro *intercept* (coeficiente de reflexão ou amplitude para incidência normal). À medida que γ aumenta o comportamento das duas curvas já não é mais o mesmo. Enquanto a curva CA permanece praticamente paralela à curva do

coeficiente de reflexão, a curva CO vai se distanciando, continuamente, no sentido das menores amplitudes (em módulo). Estes comportamentos ocasionam, em estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, diferentes valores do parâmetro gradiente (inclinação da reta nos gráficos de $\text{sen}^2(\gamma)$ versus R ou amplitudes), enquanto as curvas CA fornecem valores de gradiente muito próximos do real, os valores obtidos com as curvas CO são menores.

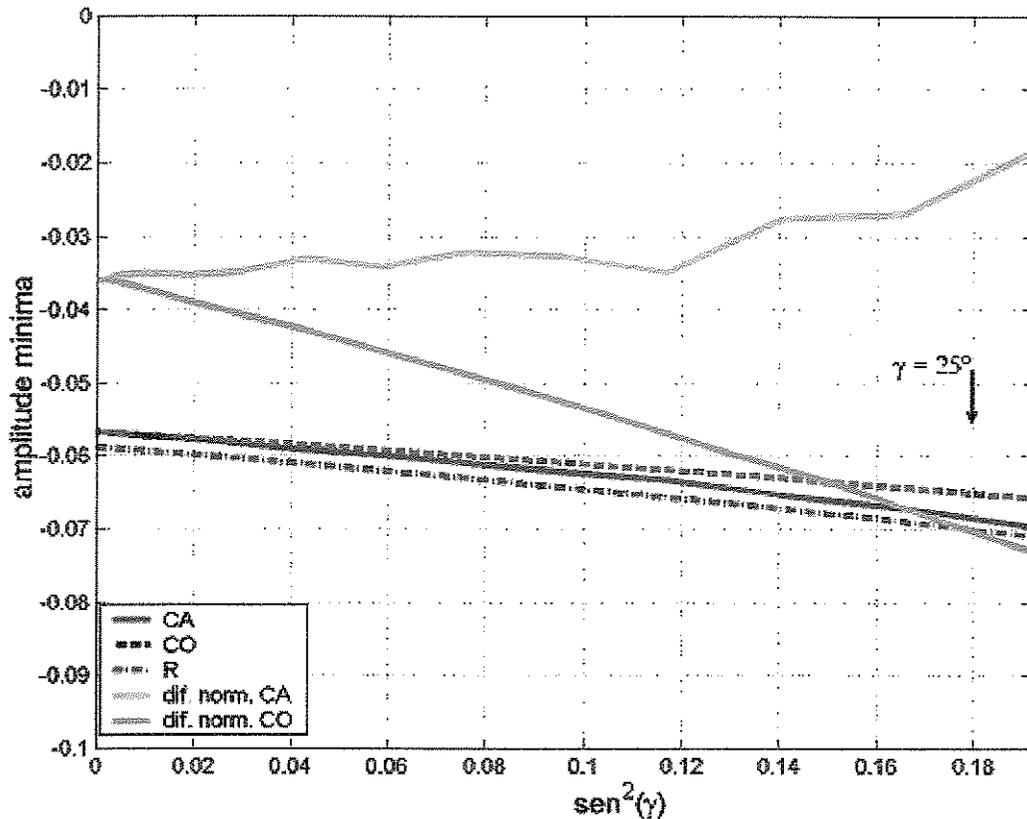


Figura 4.23: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (5510,2000), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R .

Pode-se observar nas duas figuras anteriores que, próximo de seus ângulos de reflexão máximos, as curvas CA vão deixando de ser paralelas às respectivas curvas de R tendendo a se encontrarem. A causa deste efeito ainda não foi identificada.

Assim, comparando as curvas de AVA obtidas de dados migrados CA e CO, para uma interface plana inclinada, pode-se dizer que, nos estudos da variação da amplitude com o ângulo

de reflexão, as primeiras dão resultados mais confiáveis do que as segundas, considerando o método utilizado para a mudança de h para γ .

4.3 Modelo anticlinal

Seguindo o mesmo enfoque dado ao modelo da interface plana inclinada, as limitações da modelagem (“aquisição”) é que norteiam as previsões de até qual ângulo de reflexão as amplitudes são recuperadas para dois pontos sobre o refletor, que ao contrário do estudo anterior, têm mergulhos diferentes. No primeiro, de coordenadas $y = 5000\text{m}$, $z = 1000\text{m}$, a interface tem mergulho de 0° , enquanto no segundo, $y = 1460\text{m}$, $z = 1500\text{m}$, o mergulho é de aproximadamente 15° (Figura 4.24). O modelo inicial tem coeficiente de reflexão (R) constante e unitário e depois é utilizado um novo modelo, com R variável, para comparação das curvas de AVA obtidas nos dados migrados em CA e CO.

Os ângulos de reflexão da modelagem estão na Figura 4.25 e os principais parâmetros da modelagem são:

- $v = 4000\text{m/s}$;
- $R = +1$;
- $\Delta t = 4\text{ms}$, $\Delta x = \Delta h = 10\text{m}$;
- $h_{\min} = 0\text{m}$ e $h_{\max} = 2000\text{m}$;
- o comprimento do modelo permite uma abertura máxima de 4000m , sem efeitos de borda, para a coordenada $y = 1460\text{m}$.

Utilizando a mesma metodologia aplicada aos modelos anteriores, faz-se o estudo da abertura da migração (Figura 4.26) e das curvas de empilhamento (Figura 4.27) para prever até que ângulo de reflexão os coeficientes de reflexão são recuperados, com um $h_{\max} = 2000\text{m}$ e $r_{\text{ab}} = 2000\text{m}$

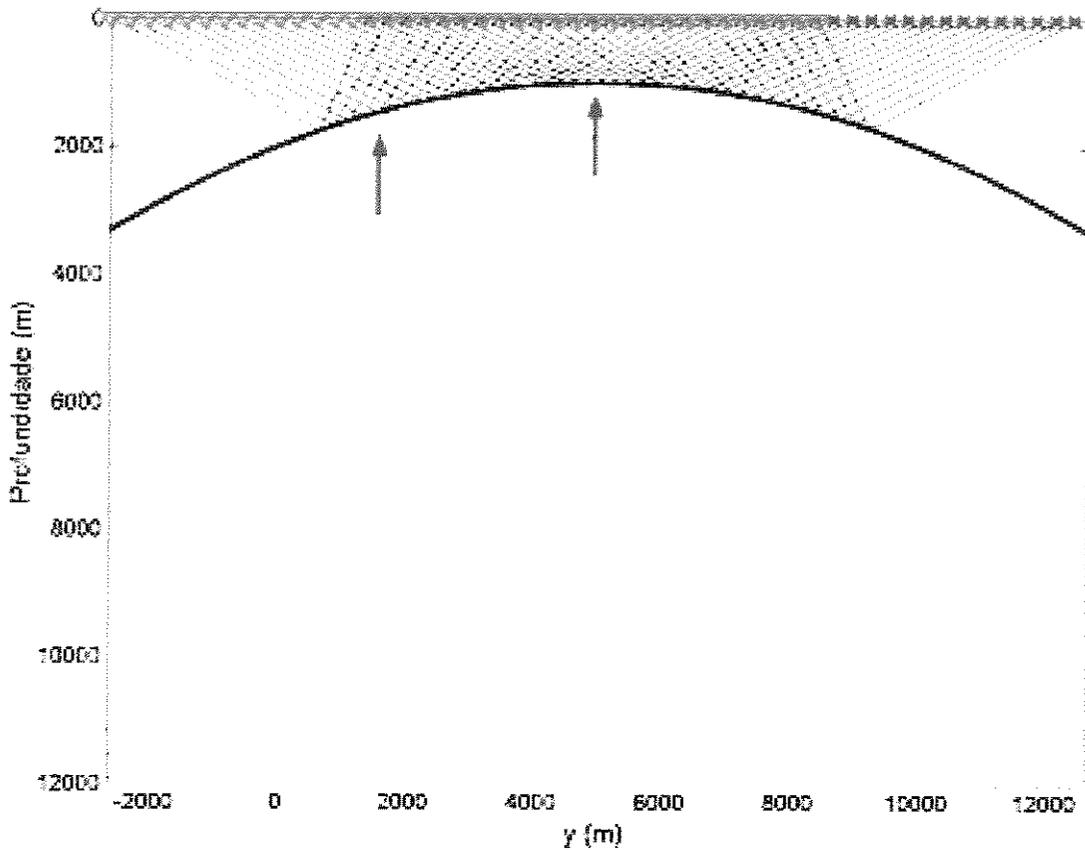


Figura 4.24: Modelo anticlinal e esquema dos raios para um afastamento de 4000m. As setas indicam as coordenadas que são estudadas

Para o refletor em (5000,1000), onde o mergulho da interface é 0° , o estudo da abertura (Figura 4.26, esquerda) indica que o $r_{ab} = 2000\text{m}$ permite recuperar os coeficientes de reflexão até ângulos de reflexão bem maiores do que 50° . Mas as curvas de difração (Figura 4.27, esquerda) indicam que se γ for muito maior do que 44° não há afastamentos suficientes para a recuperação.

Considerando o refletor em (1460,1500), onde o mergulho da interface é próximo a 15° , o estudo da abertura (Figura 4.26, direita) aponta para a recuperação de R até $\gamma = 36^\circ$, levando em conta a zona de atenuação, e até $\gamma = 44^\circ$, se r_{ab} só incluir a primeira zona de Fresnel projetada ($FZ_{(1)}^*$). Mas as curvas de difração (Figura 4.27, direita) mostram que para $\gamma = 44^\circ$ não existem

afastamentos suficientes , $h_{\max} = 2000\text{m}$, e que este valor é suficiente para recuperar até ângulos de reflexão próximos a 36° .

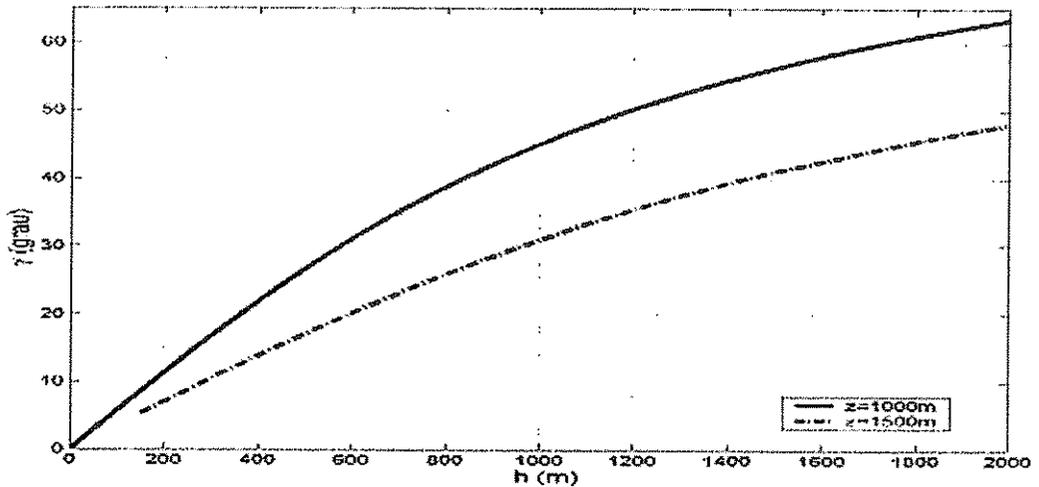


Figura 4.25: Ângulos de reflexão da modelagem para os pontos (5000,1000) e (1460,1500) e meio afastamento máximo de 2000m

Assim, mesmo que nos dados estejam presentes ângulos de reflexão (Figura 4.25) até 62° para o ponto (5000,1000) e 48° para o ponto (1460,1500), espera-se recuperar as amplitudes apenas até o limites do ângulos de reflexão em torno de 44° e 36° , respectivamente.

A migração CA foi realizada com $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ e $r_{ab} = 2000\text{m}$ e as seções migradas e curvas de AVA podem ser vistos na Figura 4.28, para as coordenadas (5000,1000), e na Figura 4.29, para as coordenadas (1460,1500). Constata-se que as previsões feitas anteriormente são acertadas, e que a migração em CA está dando bons resultados para modelos de interface com curvatura.

Ressalta-se também que, como a razão de amostragem temporal utilizada foi de 4ms, os valores das amplitudes do refletor, onde os coeficientes de reflexão são recuperados, estão praticamente iguais a +1, não se observando o efeito detectado no modelo de interface plana inclinada cuja razão de amostragem é de 8ms.

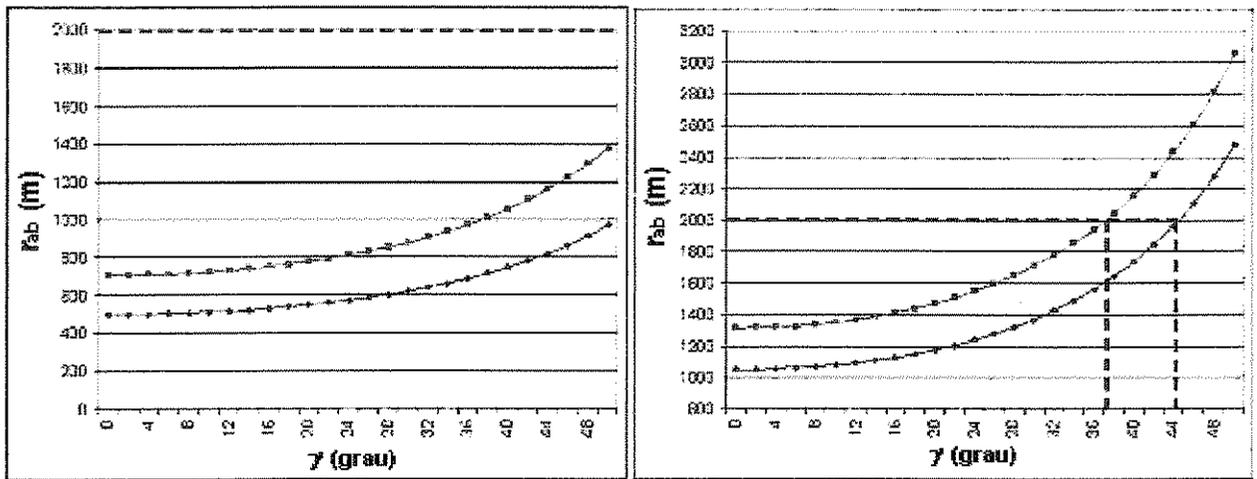


Figura 4.26: Gráfico da variação do raio da abertura mínima com o ângulo de reflexão, para os pontos (5000,1000), esquerda, e (1460,1500), direita, incluindo a $FZ_{(2)}^*$ (vermelha) e a $FZ_{(1)}^*$ (azul).

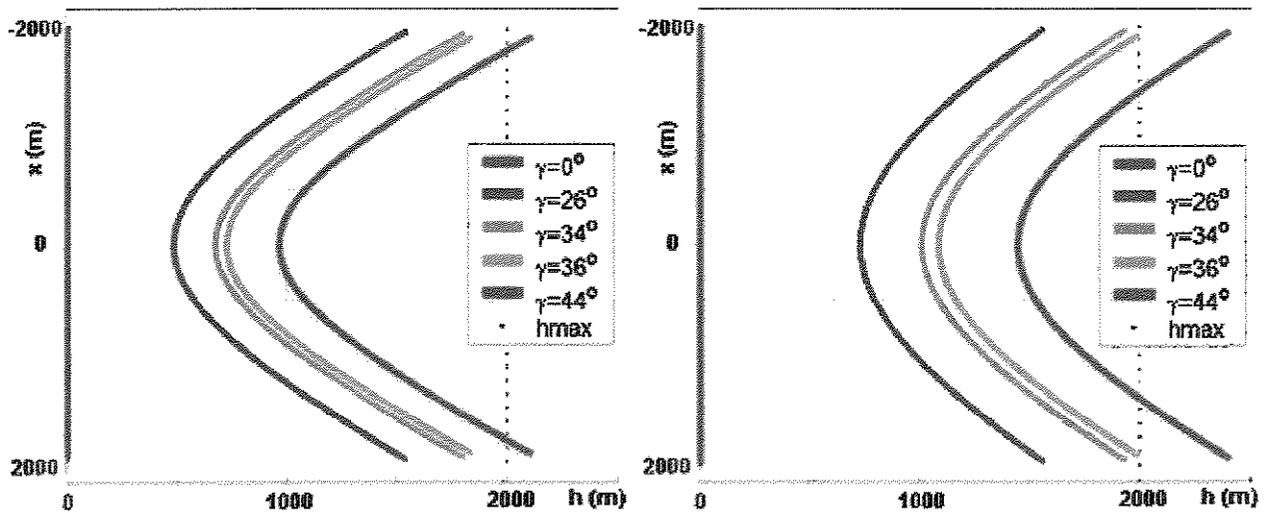


Figura 4.27: Curvas de difração ($\gamma = 0^\circ, 26^\circ, 34^\circ, 36^\circ$ e 44°) para as profundidades $z = 1000\text{m}$ (esquerda) e $z = 1500\text{m}$ (direita) com $r_{ab} = 2000\text{m}$

Com o intuito de comparar as curvas de AVA obtidas a partir de dados migrados em CA e CO, nova modelagem foi realizada com os mesmos parâmetros da anterior, mas com as velocidades da camadas 1 e 2 iguais a 4000m/s e 3000m/s, respectivamente, e calculando o coeficiente de reflexão acústico correto (Figura 4.30). As migrações CA e CO foram realizadas com $r_{ab} = 2000\text{m}$ e $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ (CA) e $\Delta x = 10\text{m}$ (CO).

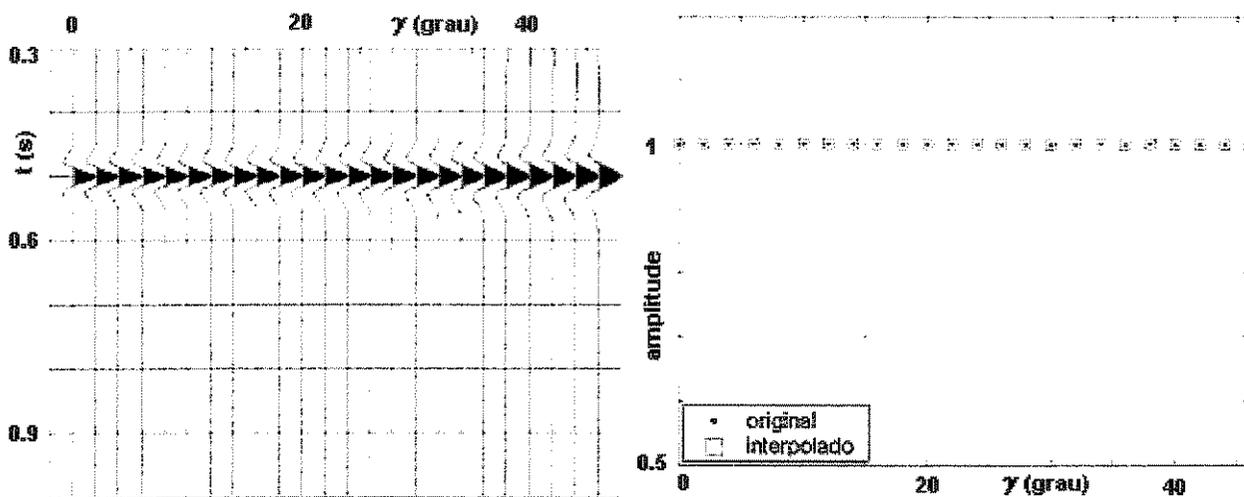


Figura 4.28: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$).

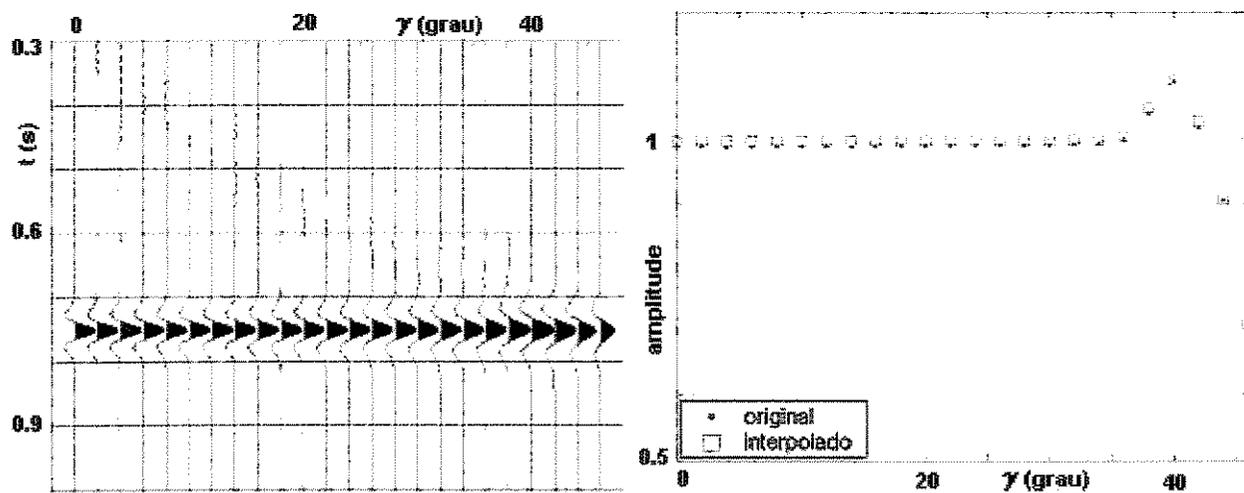


Figura 4.29: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$).

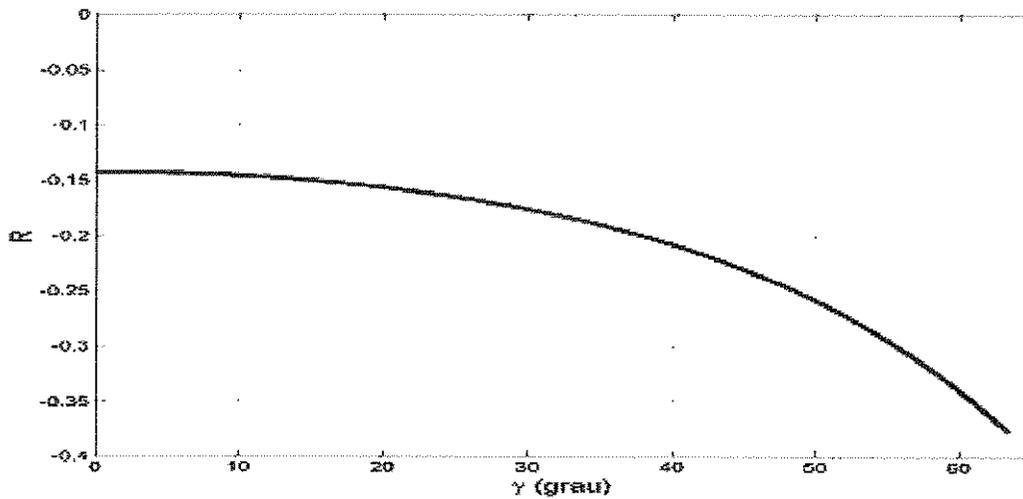


Figura 4.30: Coeficientes de reflexão acústicos em função do ângulo de reflexão para interface separando meios com as velocidades $v_1 = 4000\text{m/s}$ e $v_2 = 3000\text{m/s}$.

Os resultados da migração CA podem ser vistos na Figura 4.31, para o refletor em (5000,1000), e na Figura 4.32, para as coordenadas (1460,1500) e, como esperado, as amplitudes são recuperadas até, pelo menos, $\gamma = 46^\circ$ (a migração só foi realizada até este ângulo) e até $\gamma = 36^\circ$, respectivamente.

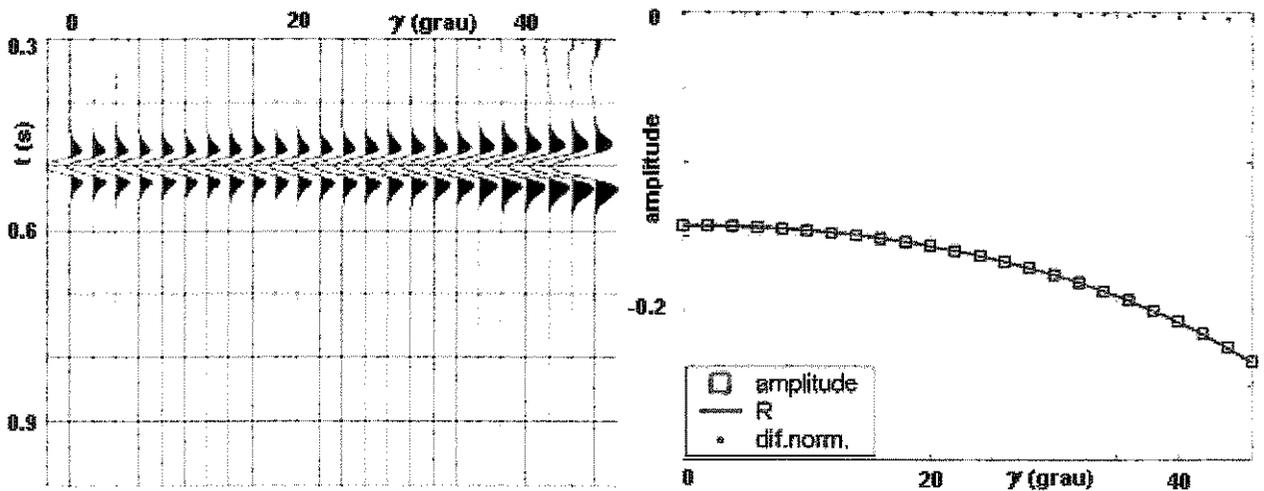


Figura 4.31: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).

Quanto à migração CO, os resultados estão exibidos nas Figuras 4.33 e 4.34, podendo-se observar que os coeficientes de reflexão são recuperados até o meio afastamento máximo de 2000m.

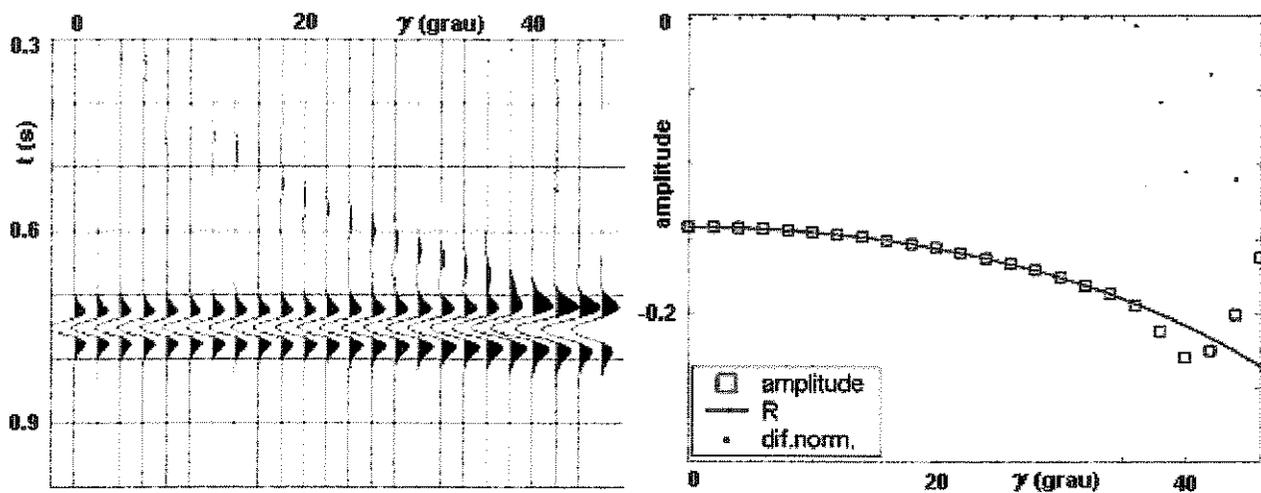


Figura 4.32: Seção migrada em CA, com $r_{ab} = 2000\text{m}$, para $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVA (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos).

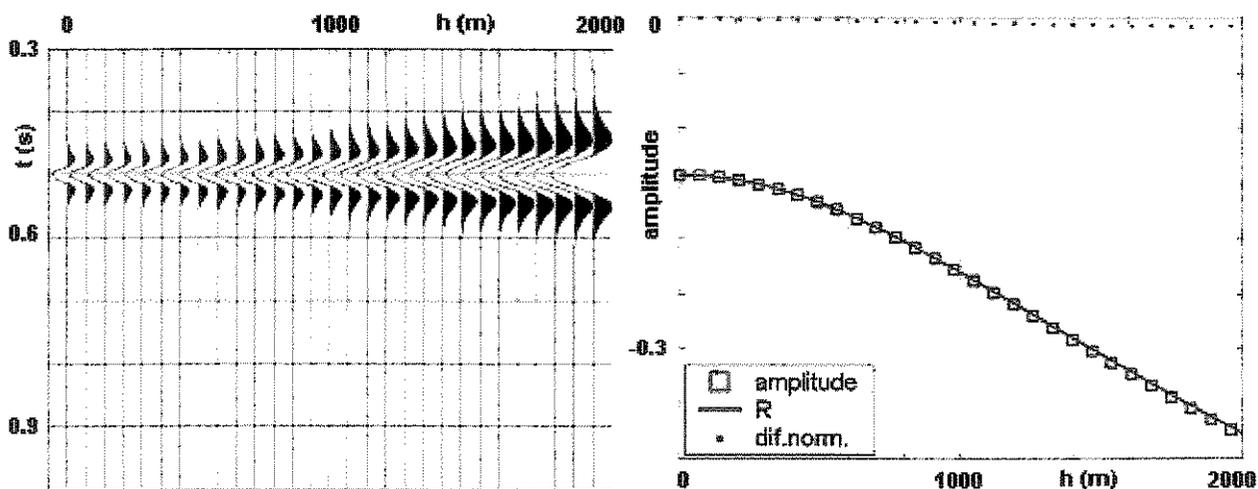


Figura 4.33: Migração CO para a coordenada $y = 5000\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita) para $t_M \approx 0,500\text{s}$ ($z = 1000\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos). As informações estão em intervalos de 70m.

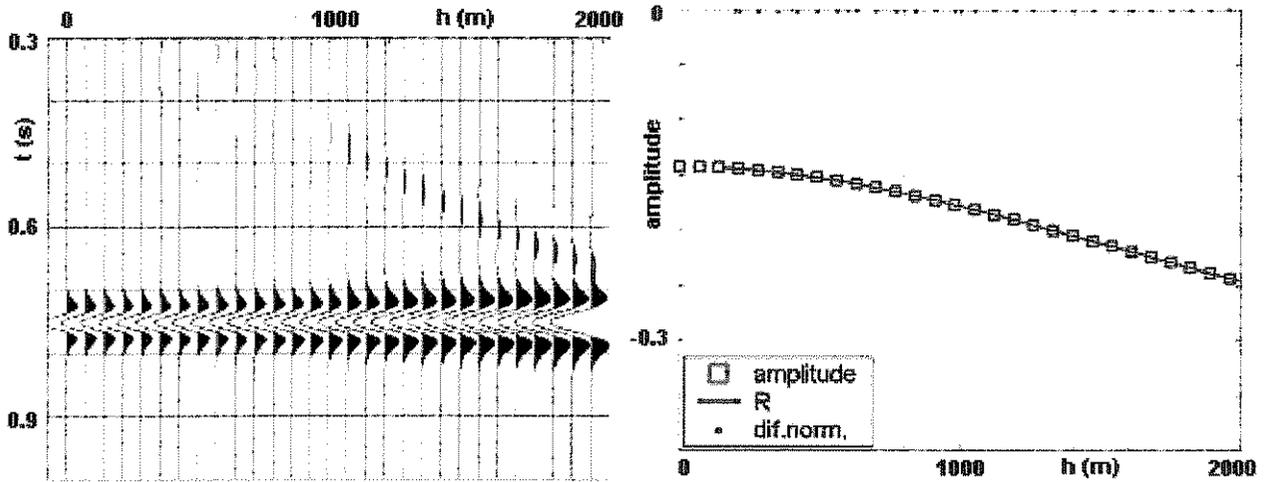


Figura 4.34: Migração CO para a coordenada $y = 1460\text{m}$ (esquerda) e gráfico de AVO (direita) para $t_M \approx 0,750\text{s}$ ($z = 1500\text{m}$), com amplitudes (quadrado verde), coeficientes de reflexão R (linha vermelha) e diferença entre os dois normalizada pelo respectivo R (pontos vermelhos). As informações estão em intervalos de 70m.

A transformação de variáveis de h para γ foi feita utilizando a Equação (4.1), cujo gráfico pode ser visto na Figura 4.35. Nota-se que como no ponto (5000,1000) o mergulho do refletor é 0° , não há diferença entre os ângulos de reflexão calculados e os da modelagem.

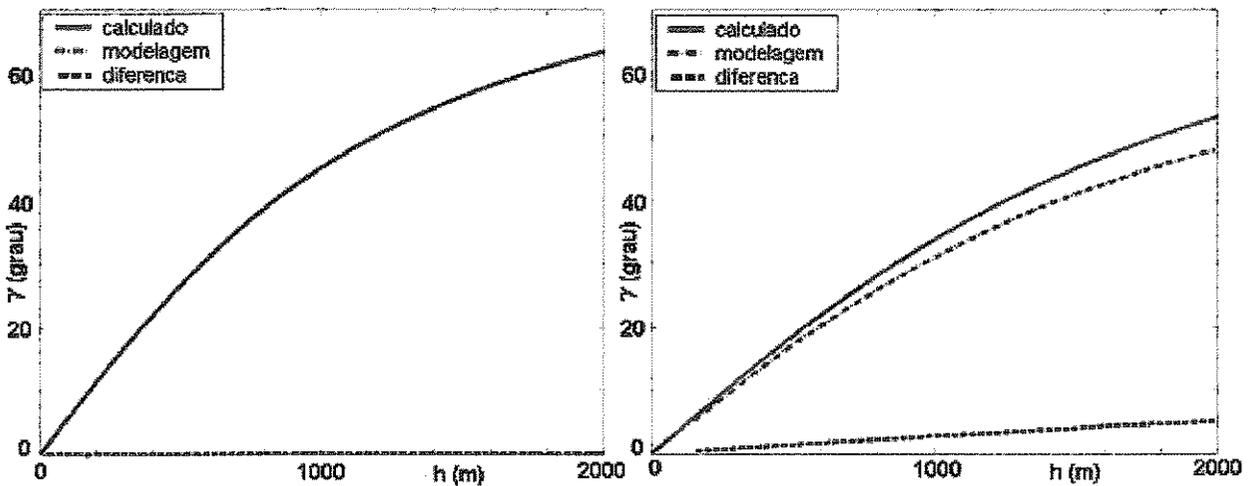


Figura 4.35: Transformação de h em γ , para os dados migrados em CO, para os pontos (5000,1000), esquerda e (1460,1500), direita, com os valores calculados (contínua azul), valores da modelagem (traço-ponto vermelho) e diferença (tracejada preta).

As curvas de AVA, para os dados migrados em CO, obtidas após esta transformação estão na Figura 4.36. Como no ponto (5000,1000) a interface tem mergulho 0° os ângulos de reflexão calculados e os da modelagem são iguais e a sua curva de AVA está, praticamente em toda a sua extensão, sobre a curva dos coeficientes de reflexão (Figura 4.36, esquerda).

Analisando a curva de AVA do ponto em (1460,1500) (Figura 4.36, direita) poderia ser dito que os coeficientes de reflexão foram recuperados até $\gamma = 35^\circ$ (máximo de 5% de erro), mas o seu comportamento é o mesmo apresentado para o modelo de interface plana inclinada, mostrando um aumento contínuo da diferença entre amplitude e R . Assim, o efeito no parâmetro gradiente, para estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, é também o de diminuir o valor desse parâmetro.

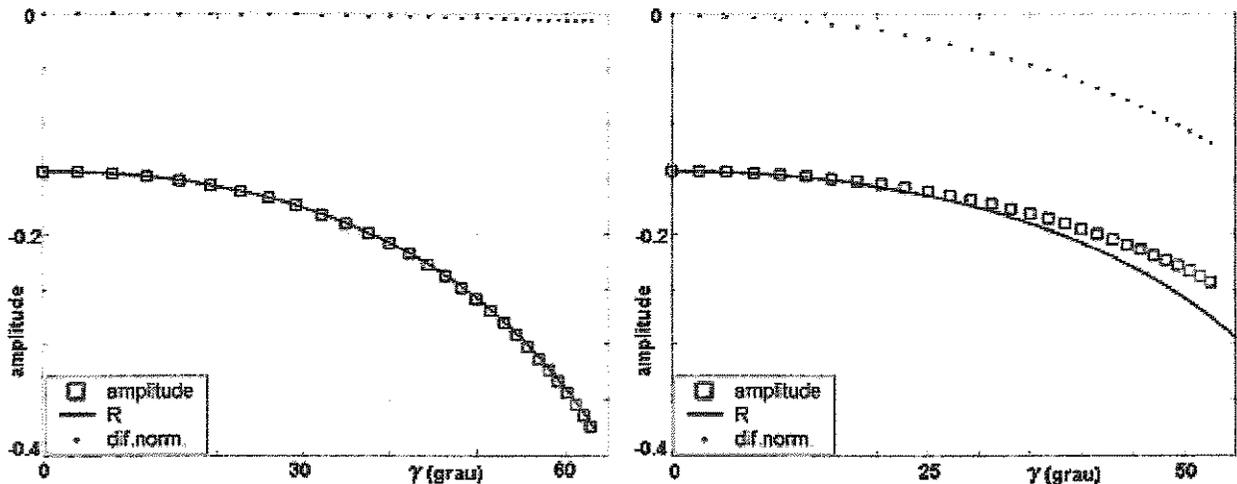


Figura 4.36: Curvas AVA dos dados migrados em CO para $y = 5000$, $z = 1000\text{m}$ (esquerda) e $y = 1460$, $z = 1500\text{m}$ (direita), com amplitude (quadrado verde), R (contínua vermelha) e diferença normalizada (pontos vermelhos).

As curvas de AVA oriundas dos dados migrados em CA e CO são colocadas no mesmo gráfico de seno ao quadrado do ângulo de reflexão versus a amplitude para facilitar a comparação, sendo que as referentes ao ponto (5000,1000) estão na Figura 4.37 e as relativas ao ponto (1460,1500) estão na Figura 4.38. Para as duas posições, as amplitudes perto de $\gamma = 0^\circ$ são,

praticamente, iguais ao R , o que fornece valores muito próximos do parâmetro *intercept* nos estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão.

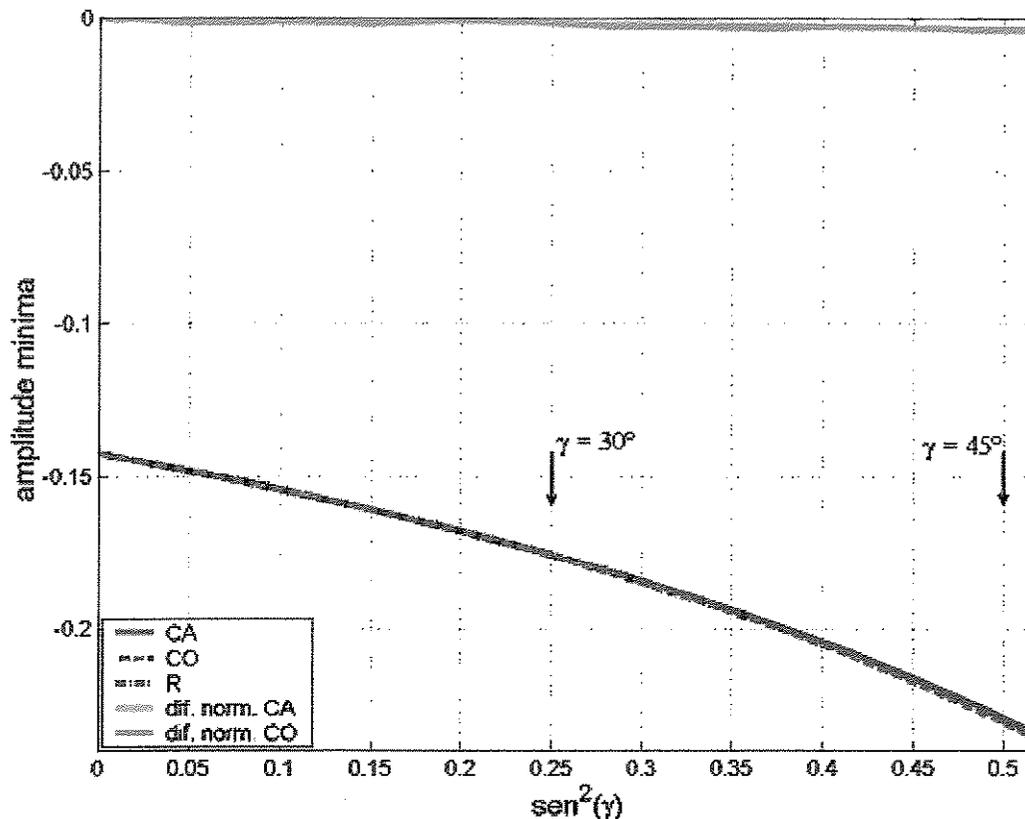


Figura 4.37: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (5000,1000), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R , normalizadas com os respectivos R .

Nota-se que no primeiro caso, (5000,1000) e mergulho da interface 0° , os resultados são praticamente iguais pois aí a transformação de h para γ não causa nenhum erro pois a metodologia utilizada para esta transformação pressupõe que o refletor seja horizontal. Assim, nos estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, ambas as migrações dão valores do parâmetro gradiente muito próximos.

Já os resultados no ponto (1460,1500), onde a inclinação da interface é de 15° , mostram que a curva CA é praticamente coincidente com a curva de R , enquanto a curva CO vai se afastando, progressivamente, em direção a menores amplitudes (em módulo), como observado no modelo de

interface plana inclinada. E do mesmo modo, enquanto o valor de gradiente, para estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, proveniente da migração CA é praticamente igual ao da modelagem, o obtido com a migração CO é menor.

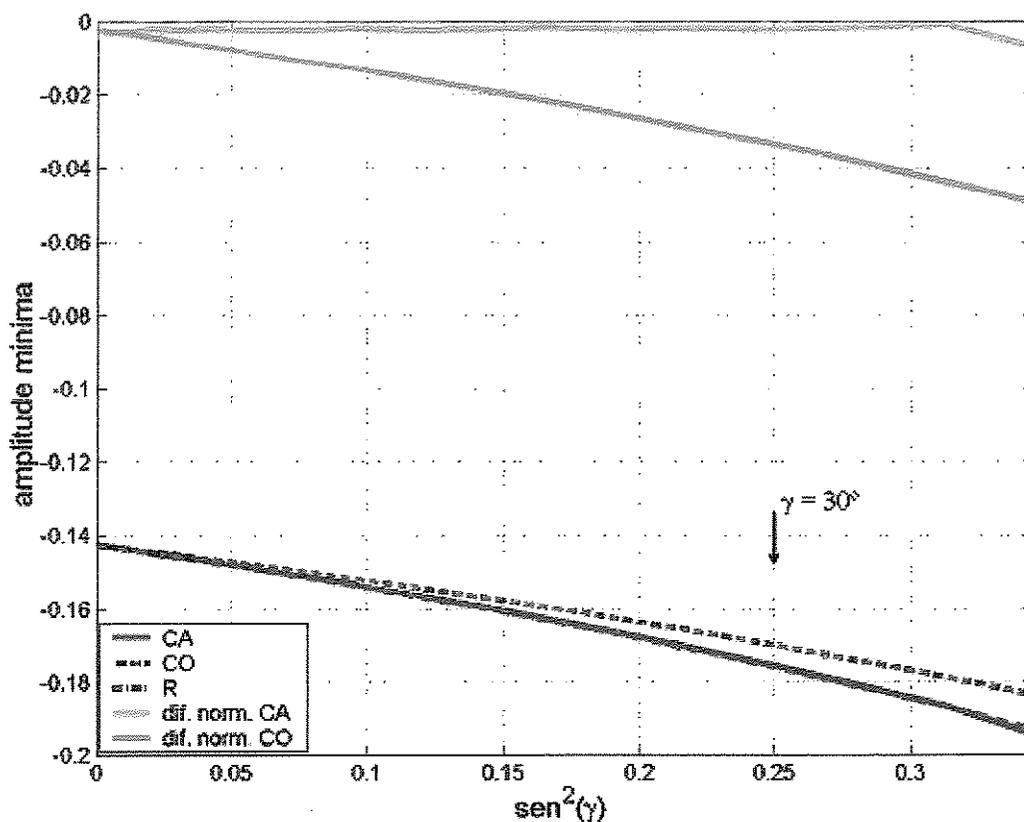


Figura 4.38: Curvas AVA dos dados migrados em CA e CO para refletor em (1460,1500), e os coeficientes de reflexão e as diferenças entre as amplitudes e os R, normalizadas com os respectivos R.

Nos modelos apresentados verificou-se a eficácia da migração CA em recuperar os coeficientes de reflexão, dentro dos limites impostos pelos dados sísmicos, e o seu melhor desempenho em fornecer curvas de AVA que possibilitem a obtenção de valores mais acurados dos parâmetros (*intercept* e gradiente) utilizados nos estudos da variação da amplitude com os ângulos de reflexão, em comparação com a migração CO utilizando a metodologia adotada na transformação do meio afastamento em ângulo de reflexão. E que, para uma mesma profundidade, quanto maior o mergulho da interface maior é esta diferença. O gráfico de *intercept* versus gradiente (Figura 4.39) mostra os valores oriundos das migrações CA, CO e exatos dos modelos de interface plana inclinada, ponto (4510,1640), e anticlinal, ponto (1640,1500).

Apresentou-se também uma metodologia para se fazer uma estimativa da abertura mínima necessária para realizar a migração dinâmica, conhecendo-se o mergulho da camada objetivo e o campo de velocidades e também, através do estudo das curvas de difração, pode-se ter uma idéia dos limites confiáveis dos resultados da migração CA, levando-se em consideração os parâmetros dos dados sísmicos.

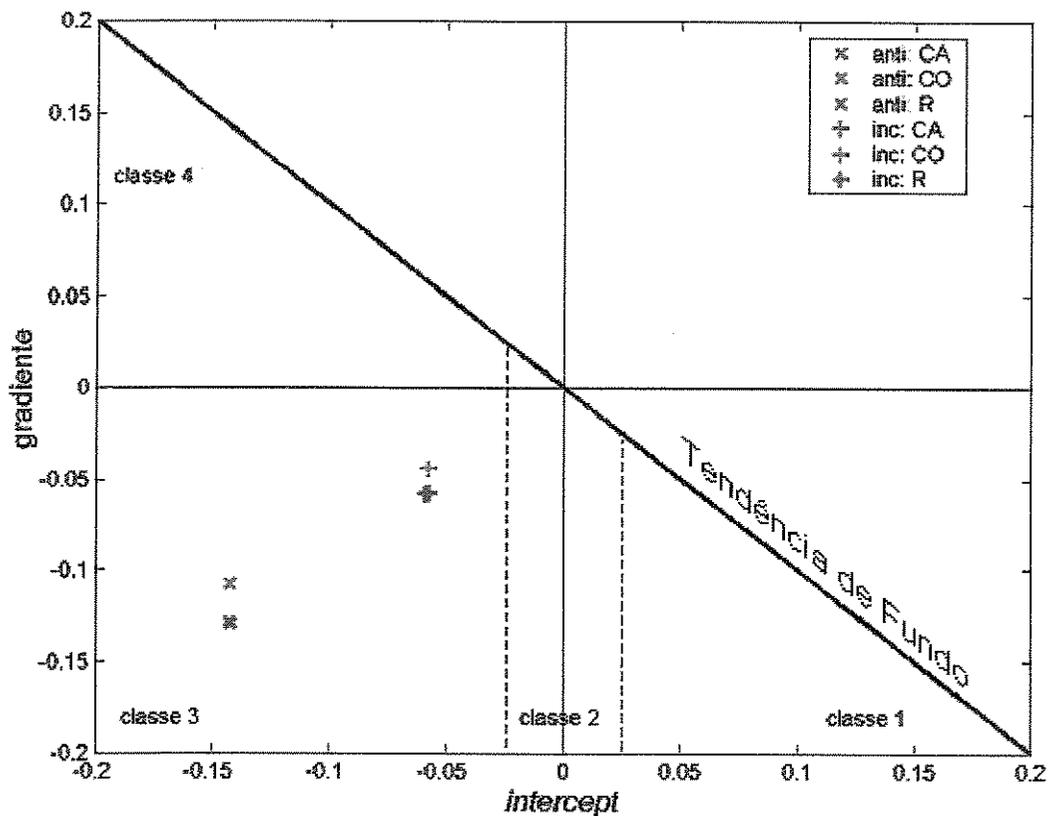


Figura 4.39: Gráfico de *intercept* versus gradiente dos modelos de interface plana inclinada, ponto (4510,1640) e anticlinal, ponto (1640,1500), com os valores exatos e os oriundos das migrações CA e CO.

Capítulo 5

Conclusões e recomendações

Este trabalho apresenta a migração na configuração de ângulo comum (CA) em tempo como uma técnica válida para a obtenção de curvas de amplitude versus ângulo (AVA). Ela fornece valores dos parâmetros *intercept* e gradiente, usados nos estudos da variação da amplitude com o ângulo de reflexão, muito mais próximos dos teóricos do que os obtidos com os dados migrados na configuração de afastamento comum (CO), utilizando a transformação de afastamento fonte-receptor para ângulo de reflexão descrita.

O valor do parâmetro gradiente obtido via migração CA é muito próximo do teórico, considerando o ângulo máximo de reflexão onde os coeficientes de reflexão são recuperados, enquanto o gradiente oriundo da migração CO é sempre menor do que o real.

Os valores do parâmetro *intercept* obtidos das migrações CA e CO nos modelos de interface plana inclinada e do anticlinal são, praticamente, iguais pois estes modelos foram gerados incluindo o afastamento zero. Considerando que o afastamento zero não existe em dados reais, a determinação do parâmetro *intercept* é feita por extrapolação da reta obtida nos gráficos de amplitude versus o seno ao quadrado do ângulo de reflexão. Assim, para dados sísmicos reais, o valor do parâmetro gradiente influi também no valor do *intercept*, sendo que o obtido dos dados migrados em CA é também mais próximo do verdadeiro, enquanto o da migração CO é maior (em módulo) pois o respectivo gradiente é menor.

Pode-se dizer que as análises da variação das amplitudes com o ângulo de reflexão provenientes de dados sísmicos migrados em CA fornecem resultados mais próximos dos verdadeiros, e os resultantes da migração CO são deslocados de sua posição real em direção a valores de *intercept* maior (em módulo) e gradiente menor. O efeito deste deslocamento depende da classe real de AVA em que o ponto em estudo está inserido, podendo originar resultados otimistas (afastando da reta de tendência de fundo no gráfico de *intercept* versus gradiente) ou pessimistas (aproximando da reta de tendência de fundo) ou até mesmo mudar a classe. Este deslocamento é maior quanto menor é a profundidade da interface e quanto maior é o seu ângulo de mergulho, justificando a realização da migração CA em dados sísmicos de áreas onde as camadas geológicas apresentam mergulhos acentuados.

Ao mesmo tempo em que se obtém valores mais acurados dos parâmetros *intercept* e gradiente, a migração CA requer maiores recursos de máquina que a CO e é mais restritiva quanto aos parâmetros de aquisição. O maior esforço computacional está relacionado ao fato de o traçado da curva de difração ser no espaço (x,h,t) levando à necessidade de se trabalhar com um cubo de dados, ao invés de um plano de dados (x,t) como na migração CO. Com isso também a interpolação das amplitudes a serem somadas é 3D, em comparação à interpolação 1D (em t) utilizada na migração CO. Outro fator que aumenta o custo computacional é a exigência de incrementos da variável de integração (ângulo de mergulho de migração) cada vez menores à medida que o mergulho das interfaces aumenta, ao passo que na migração CO o incremento da variável de integração (coordenada do ponto médio), que é pré-estabelecido pelos parâmetros de aquisição dos dados sísmicos, não se mostra importante nos modelos estudados. Quanto aos parâmetros dos dados sísmicos de entrada, pode-se dizer que a migração CA exige que os intervalos de amostragem sejam menores, tanto na coordenada do ponto médio quanto no afastamento, do que o requerido pela migração CO. Por outro lado, nos últimos anos esses parâmetros de aquisição já vêm sendo praticados rotineiramente na indústria.

O estudo da abertura de migração expressa nas Equações (3.33) e (3.34), tendo-se uma estimativa do mergulho máximo de interesse e do campo de velocidades, mostra-se adequado e necessário para a determinação da abertura mínima exigida para a migração em amplitude

verdadeira e também para diminuir o esforço computacional evitando a coleta de amplitudes em regiões desnecessárias.

A aplicação do estudo conjunto da abertura e das curvas de difração é eficiente em prever os limites confiáveis das amplitudes e seus ângulos de reflexão nos dados migrados em CA, tendo como entrada os parâmetros de aquisição dos dados sísmicos, o campo de velocidades e a estimativa do mergulho geológico.

Da mesma forma, este estudo conjunto é útil no planejamento da aquisição sísmica, estimando o comprimento da faixa para os efeitos de borda da migração, usualmente programada nos levantamentos sísmicos, bem como o afastamento máximo necessário para se obter amplitudes confiáveis, pós-migração CA, até o ângulo de reflexão desejado.

A Equação (3.32), que expressa a zona de Fresnel projetada para a configuração CA, serve como base para futuramente se fazer um algoritmo da migração que use o conceito de abertura limitada centrada no ponto estacionário (Sun, 1998) e não na coordenada do ponto migrado como utilizado no presente algoritmo. Isto é, conhecendo-se o ponto de tangência entre difração e reflexão, a abertura será centrada neste ponto e com raio igual à soma da primeira e segunda zonas de Fresnel projetada.

A determinação, aqui apresentada, da zona de Fresnel e sua projeção no domínio CA envolve aproximações por série de Taylor até segunda ordem, proporcionando estimativas da abertura da migração adequadas para os mergulhos das interfaces, de até 20°, nos modelos estudados. Para mergulhos maiores estas aproximações podem ocasionar aberturas não suficientes para a migração dinâmica. Um estudo do mergulho máximo até onde estas aproximações fornecem resultados válidos, bem como uma aproximação de ordem maior devem ser objetos de estudos futuros.

Outro fator não levado em consideração na determinação da zona de Fresnel e sua projeção no domínio CA, e que também deve ser alvo de estudos futuros, é a influência da curvatura das interfaces no cálculo das zonas de Fresnel e sua inclusão nas equações.

Referências Bibliográficas

- Bleistein, N. Two and one half dimensional in plane waves propagation. **Geophysical Prospecting**, v.34, p.686-703, 1986.
- Bleistein, N. On the imaging of reflectors in the earth. **Geophysical Prospecting**, v.52, p.931-942, 1987.
- Bleistein, N., Gray, S.H. A proposal for common-opening-angle migration/inversion. CWP Research Report, CWP-420, p.293-304, 2002.
- Claerbout, J.F. Imaging the Earth's interior. Blackwell Scientific Publ., 1985.
- de Hoop, M., Burridge, R., Spencer, C., Miller, D. Generalized Radon Transform/Amplitude Versus Angle (GRT/AVA) migration/inversion in anisotropic media. SPIE-The Internat.Soc. For Optical Engineering, v.2301, p15-27, 1994.
- Fomel, S., and Prucha, M. Angle gather time migration. **Stanford Exploration Project**, Report 100, p.141-151, april, 1999.
- Fomel, S. Theory of 3-D angle gather in wave-equation imaging. 74th Ann. Internat. Mtg., SEG - 2004, Expanded Abstracts. Obtido via base de dados Technical Program. CD-ROM. 2004.

- Fowler, P.J. A comparative overview of prestack time migration methods. 67th Ann. Internat. Mtg., SEG - 1987, Expanded Abstracts, p.1571-1574.
- Guerra, C. (claudio-guerra@uol.com.br) **Zona de Fresnel - common angle**. 20 jul 2004a. Enviado à 1h:34min. Mensagem para Tânia Santiago (tania@dep.fem.unicamp.br)
- Guerra, C. (cguerra@petrobras.com.br) **Abertura(h)**. 11 ago. 2004b. Enviado às 9h:05min. Mensagem para Tânia Santiago (tania@dep.fem.unicamp.br).
- Guerra, C. (cguerra@petrobras.com.br) **Nova abertura**. 16 ago. 2004c. Enviado às 9h:02min. Mensagem para Tânia Santiago (tania@dep.fem.unicamp.br).
- Hertweck, T., Jäger, C., Goertz, A., Schleicher, J. Aperture effects in 2.5D Kirchhoff migration: A geometrical explanation. **Geophysics**, v.68, n.5, p.1673-1684, sept.-oct., 2003.
- Hubral, P., Schleicher, J., Tygel, M., Hanitzsch, C. Determination of Fresnel zones from travelttime measurements. **Geophysics**, v.58, n.5, p.703-712, may, 1993.
- Martins, J.M., Schleicher, J., Tygel, M. Santos, L.T. True-amplitude migration and demigration. **Journal of Seismic Exploration**, v.6, p.159-180, 1997.
- Rosa, A.L.R. Análise do sinal sísmico. Apostila de Curso. Rio de Janeiro: Petrobras-SEREC, 2001. 406p.
- Schleicher, J., Tygel, M., Hubral, P. 3-D true-amplitude finite-offset migration. **Geophysics**, v.58, n.8, p.1112-1126, ago., 1993.
- Schleicher, J., Hubral, P., Tygel, M., Jaya, M.S. Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration. **Geophysics**, v.62, n.1, p.183-194, jan.-feb., 1997.

- Schleicher, J., Tygel, M., Hubral, P. Seismic true-amplitude imaging. Campinas: nov., 2002. 328p.
- Sheriff, R.E. Nomogram for Fresnel-zone calculation. **Geophysics**, v.45, n.5, p.968-972, may, 1980.
- Sheriff, R.E. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, **Geophysical References Series**, 3th.ed., SEG, v.1, 1991.
- Sun, J. On the limited aperture migration in two dimensions. **Geophysics**, v.63, n.3, p.984-994, may-june, 1998.
- Tygel, M., Schleicher, J., Hubral, P., Hanitzsch, C. Multiple weights in diffraction stack migration. **Geophysics**, v.58, n.12, p.1820-1830, dez., 1993.
- Tygel, M. Migração Kirchhoff em ângulo comum: tempo de trânsito e pesos de verdadeira amplitude. Campinas: DMA/IMECC/Unicamp, 2004.
- Xu, S., Chauris, H., Lambaré, G., Noble, M. Common angle migration: A strategy for imaging complex media. 68th Ann. Internat. Mtg., SEG - 1998, Expanded Abstracts, p.1538-1541.
- Xu, S., Chauris, H., Lambaré, G., Noble, M. Common-angle migration: A strategy for imaging complex media. **Geophysics**, v.64, n.6, p.1877-1894, nov-dez, 2001.
- Yilmaz, O. Seismic data processing. **Investigations in geophysics**, SEG, v2, 1987.

Apêndices

A. Abertura para migração cinemática no domínio CA

Apresenta-se aqui a dedução da abertura para a migração cinemática (Equação (3.30)), seguindo o trabalho de Guerra (2004b), de modo que ela seja dada em função da profundidade z do ponto M , dos ângulos de mergulho α do refletor e de reflexão γ e do meio afastamento h . A Figura A.1 exibe a geometria utilizada para se chegar à citada equação, bem como todas as variáveis envolvidas.

O raio r_{ab1} da abertura pode ser escrito como

$$r_{ab1} = \overline{yx^0} + \overline{x^0x} = \overline{yx^0} + (h - \overline{Sx^0}). \quad (\text{A.1})$$

Do triângulo x^0yM tem-se que

$$\overline{yx^0} = z \tan(\alpha) \quad (\text{A.2})$$

que representa a abertura normalmente utilizada para a migração cinemática de dados com afastamento nulo.

Aplicando a lei dos co-senos no triângulo SMx^0 escreve-se

$$(\overline{Sx^0})^2 = l_s^2 + l_0^2 - 2l_s l_0 \cos(\gamma) \quad (\text{A.3})$$

sendo que l_s e l_0 são dados por

$$l_s = \frac{z}{\cos(\alpha - \gamma)}, \quad l_0 = \frac{z}{\cos(\alpha)}. \quad (\text{A.4})$$

Substituindo a Equação (A.4) na (A.3) tem-se

$$\left(\overline{Sx^0}\right)^2 = \left[\frac{z}{\cos(\alpha - \gamma)}\right]^2 + \left[\frac{z}{\cos(\alpha)}\right]^2 - 2\frac{z}{\cos(\alpha - \gamma)}\frac{z}{\cos(\alpha)}\cos(\gamma), \quad (\text{A.5})$$

que após uma série de manipulações fornece

$$\overline{Sx^0} = z \left[\frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)} \right]. \quad (\text{A.6})$$

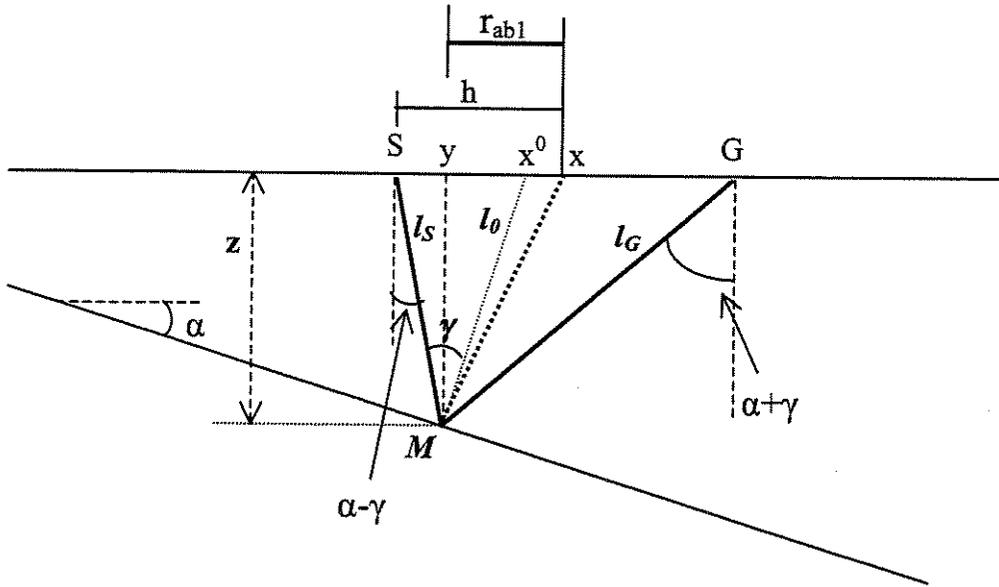


Figura A.1: Geometria para o cálculo do raio, r_{abl} , da abertura para migração cinemática em CA.

Substituindo as Equações (A.2) e (A.6) na Equação (A.1) e manipulando os termos obtém-se o raio de abertura, em função de h , z , γ e α , para a migração cinemática (Equação (3.30)), ou seja

$$r_{abl} = h + z \tan(\alpha - \gamma). \quad (\text{A.7})$$

B. Zona de Fresnel no domínio CA

A geometria necessária para a dedução da zona de Fresnel (Equação (3.31)) (Guerra, 2004a) é exibida na Figura 3.11 com todas variáveis necessárias, e utiliza-se a Equação (2.12) como a condição para a definição do limite da zona de Fresnel de ordem n .

Considera-se a reflexão no ponto M representada pelos raios incidente SM e refletido MG que fornece o tempo de reflexão τ_R . O tempo de difração τ_D é dado pelo par de raios fictícios SM_n e M_nG . Assim tem-se

$$\tau_R = \frac{l_S + l_G}{v} \quad (\text{B.1})$$

e

$$\tau_D = \frac{d_1 + d_2}{v}. \quad (\text{B.2})$$

Conforme a lei dos co-senos nos triângulos SMM_n e GMM_n pode-se escrever

$$\begin{aligned} d_1^2 &= l_S^2 + FZ_{(n)}^2 - 2l_S FZ_{(n)} \cos(\pi/2 + \gamma) = l_S^2 + FZ_{(n)}^2 + 2l_S FZ_{(n)} \text{sen}(\gamma) \\ d_2^2 &= l_G^2 + FZ_{(n)}^2 - 2l_G FZ_{(n)} \cos(\pi/2 - \gamma) = l_G^2 + FZ_{(n)}^2 - 2l_G FZ_{(n)} \text{sen}(\gamma) \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

Faz-se a expansão de d_1 e d_2 em séries de Taylor até segunda ordem e obtém-se

$$\begin{aligned} d_1 &= l_S + \text{sen}(\gamma)FZ_{(n)} + \frac{\cos^2(\gamma)}{2l_S} FZ_{(n)}^2 \\ d_2 &= l_G - \text{sen}(\gamma)FZ_{(n)} + \frac{\cos^2(\gamma)}{2l_G} FZ_{(n)}^2. \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

Com isto pode-se escrever

$$|\tau_D - \tau_R| = \frac{\left| l_S + \text{sen}(\gamma)FZ_{(n)} + \frac{\cos^2(\gamma)}{2l_S} FZ_{(n)}^2 + l_G - \text{sen}(\gamma)FZ_{(n)} + \frac{\cos^2(\gamma)}{2l_G} FZ_{(n)}^2 - l_S - l_G \right|}{v}$$

e após algumas manipulações

$$|\tau_D - \tau_R| = \frac{\cos^2(\gamma)}{2v} FZ_{(n)}^2 \left(\frac{1}{l_S} + \frac{1}{l_G} \right). \quad (\text{B.5})$$

Substituindo a Equação (B.5) na Equação (2.12) tem-se

$$\frac{\cos^2(\gamma)}{2v} FZ_{(n)}^2 \left(\frac{1}{l_S} + \frac{1}{l_G} \right) = n \frac{\tau_W}{2}. \quad (\text{B.6})$$

As distâncias l_S e l_G podem ser expressas como

$$l_S = \frac{z}{\cos(\alpha - \gamma)} \quad e \quad l_G = \frac{z}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (\text{B.7})$$

que substituídas na Equação (B.6) fornece

$$\frac{\cos^2(\gamma)}{2vz} FZ_{(n)}^2 2 \cos(\alpha) \cos(\gamma) = n \frac{\tau_W}{2}. \quad (\text{B.8})$$

E finalmente explicitando $FZ_{(n)}$ chega-se à Equação (3.31)

$$FZ_{(n)} = \sqrt{\frac{n \tau_W v z}{2 \cos(\alpha) \cos^3(\gamma)}}. \quad (\text{B.9})$$

Deve-se ressaltar que a aproximação feita de d_1 e d_2 por séries de Taylor até segunda ordem dá origem a um raio de zona de Fresnel médio simétrico em relação ao ponto M . No caso de um refletor plano inclinado, a zona de Fresnel é assimétrica com relação ao ponto M e deslocada na direção das maiores profundidades (Figura 3.13).

C. Zona de Fresnel projetada no domínio CA

A dedução da zona de Fresnel projetada, $FZ_{(n)}^*$, para configuração CA (Equação (3.32)) segue o trabalho feito por Guerra, 2004c e utiliza a Figura 3.12 que exhibe a geometria do problema e suas variáveis.

A zona de Fresnel projetada é

$$FZ_{(n)}^* = x_n - x = (x_n^0 - x^0) - (x - x^0) + (x_n - x_n^0). \quad (\text{C.1})$$

O termo $(x_n^0 - x^0)$ é a projeção da zona de Fresnel real via raio normal e pode ser escrita como

$$x_n^0 - x^0 = \frac{FZ_{(n)}}{\cos(\alpha)}. \quad (C.2)$$

O termo $(x - x^0)$ pode ser expresso como

$$x - x^0 = h - \overline{Sx^0} \quad (C.3)$$

sendo que $\overline{Sx^0}$ é dado pela Equação (A.6) que substituída em (C.3) fornece

$$x - x^0 = h - z \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)}. \quad (C.4)$$

Analogamente, tem-se para o termo $(x_n - x_n^0)$ da Equação (C.1)

$$x_n - x_n^0 = h_n - z_{Mn} \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)}. \quad (C.5)$$

O meio afastamento h pode ser determinado pela Equação (3.17) (uma das equações da curva de difração CA) e assim as Equações (C.4) e (C.5) ficam

$$x - x^0 = z \left[\frac{\text{sen}(\gamma)\cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)} - \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)} \right] \quad (C.6)$$

e

$$x_n - x_n^0 = z_{Mn} \left[\frac{\text{sen}(\gamma)\cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)} - \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)} \right]. \quad (C.7)$$

Fazendo a substituição das Equações (C.2), (C.6) e (C.7) na (C.1) tem-se

$$FZ_{(n)}^* = \frac{FZ_{(n)}}{\cos(\alpha)} + (z_{Mn} - z) \left[\frac{\text{sen}(\gamma)\cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)} - \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)} \right]. \quad (C.8)$$

Mas $z_{Mn} - z = FZ_{(n)} \text{sen}(\alpha)$ e assim

$$FZ_{(n)}^* = \frac{FZ_{(n)}}{\cos(\alpha)} + FZ_{(n)} \text{sen}(\alpha) \left[\frac{\text{sen}(\gamma)\cos(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \text{sen}^2(\gamma)} - \frac{\text{sen}(\gamma)}{\cos(\alpha - \gamma)\cos(\alpha)} \right]. \quad (C.9)$$

Após várias manipulações trigonométricas e substituindo a equação da zona de Fresnel (3.31) (ou Equação (B.9)) obtém-se a equação final da zona de Fresnel projetada (Equação (3.32))

$$FZ_{(n)}^* = FZ_{(n)} \frac{\cos(\alpha) \cos^2(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)} = \sqrt{\frac{n\tau_w vZ}{2} \cos(\alpha) \cos(\gamma)} \cdot \frac{\cos(\alpha) \cos^2(\gamma)}{\cos^2(\alpha) - \sin^2(\gamma)} \quad (C.10)$$