

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOFÍSICA

ANÁLISE DE PARÂMETROS DA FUNÇÃO  
CARACTERÍSTICA DE HAMILTON

TESE APRESENTADA POR  
ISABEL CRISTINA TAVARES

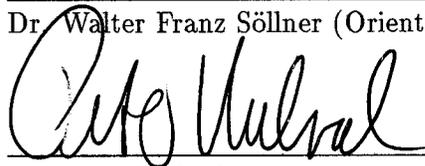
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação :     /     / 1998

COMITÊ DE TESE:



Dr. Walter Franz Söllner (Orientador)



Dr. Peter Hubral



Dr. João Carlos Cruz

BELÉM

1998

## RESUMO

A análise de velocidades é um processo fundamental na sismica de reflexão, onde as velocidades de empilhamento bem como o tempo de trânsito de afastamento nulo (onde supõe-se que a fonte e o detetor ocupam a mesma posição) são parâmetros suficientes na determinação do modelo geológico para meios com camadas horizontais. Por outro lado quando expresso através do formalismo estabelecido por Hamilton, os mesmos parâmetros (velocidade e tempo de afastamento nulo) são suficientes para determinar a função característica para este mesmo tipo de meio.

Para o caso de um modelo geológico heterogêneo com interfaces arbitrariamente curvas, a função característica de Hamilton é dada a partir da estimativa de nove parâmetros, onde os mesmos parâmetros são necessários na determinação do modelo geológico em 3D.

Este trabalho tem por objetivo estimar os parâmetros que determinam a função característica de Hamilton para meios 3D e estudar a influência de cada parâmetro na função, através de cortes horizontais nas seções de tempos de trânsito (conhecidos como *time slices*), nas configurações de ponto médio comum e afastamento nulo. Dentro desta abordagem é dado um exemplo a partir de um modelo sintético onde, aqueles resultados obtidos com estudo da influência de cada parâmetro na função característica, são aplicados como um critério de ajuste entre a função característica calculada e a função de tempos de trânsito obtida no levantamento de dados.

Aos que me apoiaram, em especial a  
meus pais Emilia e Raimundo  
Tavares

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Walter F. Söllner pela orientação e extrema paciência, além das valiosas sugestões.

Aos colegas do curso pela ótima convivência durante o decorrer deste trabalho, especialmente ao amigo Jaime Urban pela colaboração nas horas de "aperto" e ao amigo Paulo Carvalho pela solidariedade e pelo estímulo.

Ao corpo docente, técnico e administrativo do Departamento de Geofísica da UFPA por terem tornado possível a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Peter Hubral e Dr. João C. Cruz.

Ao professor Jessé Costa por permitir o uso de seu programa na fase inicial deste trabalho.

À Roberto Martins pelo companheirismo desde a graduação nesta Universidade.

# SUMÁRIO

	p.
<b>DEDICATÓRIA</b> . . . . .	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> . . . . .	ii
<b>RESUMO</b> . . . . .	1
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	2
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> . . . . .	3
<b>2 - TEORIA DO RAI0 PARAXIAL</b> . . . . .	6
2.1 O SISTEMA SÍSMICO; O RAI0 CENTRAL E O RAI0 PARAXIAL . . . . .	6
2.2 A CONSTRUÇÃO DOS RAIOS . . . . .	7
2.2.1 O Raio Transmitido . . . . .	10
2.2.2 O Raio Refletido . . . . .	14
2.3 O TEMPO DE TRÂNSITO PARA OS RAIOS REFLETIDOS . . . . .	16
2.3.1 A Equação dos Tempos de Trânsito Para os Raios Refletidos (Aproximação Parabólica) . . . . .	17
2.3.2 A Aproximação Hiperbólica dos Tempos de Trânsito . . . . .	18
<b>3 - A CORREÇÃO DINÂMICA</b> . . . . .	19
3.1 INTRODUÇÃO . . . . .	19
3.2 A CORREÇÃO DINÂMICA CONVENCIONAL . . . . .	19
3.3 A CORREÇÃO DINÂMICA ATRAVÉS DA TEORIA DO RAI0 PARAXIAL . . . . .	23
<b>4 - A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E A FUNÇÃO CARACTERÍSTICA</b> . . . . .	28
4.1 AS CONFIGURAÇÕES DE DADOS TÍPICAMENTE USADAS . . . . .	28
4.1.1 A Configuração de Fonte Comum . . . . .	28
4.1.2 A Configuração de Ponto Médio Comum . . . . .	29
4.1.3 A Configuração de Afastamento Nulo . . . . .	30
4.2 A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FUNÇÃO CARACTERÍSTICA . . . . .	30

4.3	A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS NA PRESENÇA DE RUÍDO .....	31
4.4	O COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS QUE DETERMINAM A FUNÇÃO CARACTERÍSTICA .....	33
4.4.1	Os Cortes em Seções Horizontais de Tempos de Trânsito .....	33
4.4.2	O Comportamento dos Parâmetros $U_{11}$ , $U_{12}$ e $U_{22}$ na Configuração CMP .....	34
4.4.3	O Comportamento dos Parâmetros $p_0$ , $q_0$ , $V_{11}$ , $V_{12}$ e $V_{22}$ na Configuração de Afastamento Nulo .....	39
4.4.3.1	Considerações Iniciais .....	39
4.5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO A UM MODELO SINTÉTICO .....	47
4.5.1	Considerações Iniciais .....	47
4.5.2	A Recuperação da Função Característica Através de Cortes Horizontais no Tempo .....	48
4.5.2.1	A Recuperação dos Parâmetros na Configuração CMP .....	49
4.5.2.2	A Recuperação dos Parâmetros na Configuração de Afastamento Nulo .....	49
5	CONCLUSÃO .....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
	APÊNDICE .....	59
	A PROPRIEDADE SIMPLÉTICA .....	60

## ABSTRACT

The velocity analysis is a fundamental process in reflection seismic, where the stacking velocity as well as the zero offset traveltime are sufficient for determining the geological model for media with flat layers. On the other hand the Hamilton formalism uses the same parameters (velocity and zero offset traveltime) for determining the characteristic function for that kind of model.

For a three-dimensional heterogeneous geological model with arbitrarily curved surfaces, the characteristic function is defined by nine parameters.

This thesis aims at determining the characteristic function through the analysis of parameters using time slices in traveltime function, both in the CMP and zero offset ensemble.

This analysis is done by the observation of the behavior of each parameter during the fitting between the calculated characteristic function and the traveltime function obtained from the data survey.

# 1 - INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão tem por objetivo medir o campo de onda em superfície a fim de obter a imagem de determinadas estruturas geológicas em subsuperfície.

Para atingir tal resultado é necessário basicamente percorrer três diferentes estágios que consistem na aquisição, processamento e interpretação dos dados que ao final de suas respectivas aplicações e procedimentos nos conduz a obtenção de uma seção sísmica.

De um modo geral, o estágio do processamento de dados sísmicos enfatiza um ponto muito importante que é a determinação do modelo de velocidades para a modelo geológico do qual as técnicas de empilhamento e migração prescindem fortemente.

O conhecimento exato do modelo de velocidades permite, através de determinados procedimentos, estabelecer uma série de parâmetros relacionados a litologia do meio, por exemplo para um modelo com camadas planas e horizontais, as velocidades de empilhamento bem como o tempo de afastamento nulo são os parâmetros suficientes na determinação do modelo geológico, já num caso 3D outros parâmetros devem ser considerados afim de determinarmos tal modelo.

Atualmente a técnica de análise de velocidades utiliza dados que são obtidos em configurações de cobertura múltipla com o objetivo de obter informação das velocidades, explorando as características de NMO afim de relacionar as observações em superfície com as velocidades em subsuperfície.

Vários autores trabalharam neste assunto. Dix (1955) usou modelo simples com camadas horizontais para determinar velocidades intervalares para pequenos afastamentos entre fontes e receptores.

Shah (1973) relacionou as velocidades moveout com os parâmetros associados a um modelo 2D com camadas mergulhantes através do conceito de curvatura da frente de onda e posteriormente Hubral & Krey (1980), estenderam o mesmo conceito para o caso 3D com variação lateral.

Usando a Teoria do Raio Hubral & Krey (1980) determinaram modelos de velocidades a partir dos tempos de trânsito e posteriormente Hubral (1983) aplicou a mesma teoria para

calcular as amplitudes verdadeiras dos eventos sísmicos para modelos lateralmente inhomogêneos.

Apartir da Teoria do Raio Paraxial Bortfeld (1989) estabeleceu leis gerais que representam as propriedades globais para o raio transmitido e o raio refletido num sistema sísmico composto por camadas homogêneas e isotrópicas.

Com base na aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito Bortfeld (1989) determinou uma função geral de tempos de trânsito que corresponde ao ponto característico de Hamilton na ótica geométrica.

Esta função, caracterizada por nove parâmetros, contém todas as configurações de levantamentos de dados sísmicos como casos particulares. Esta função é obtida a partir de pelo menos nove pontos de medidas devidamente escolhidos a partir de uma determinada configuração de dados.

Hubral et al (1993a) mostraram que as amplitudes das reflexões primárias de afastamento nulo podem ser determinadas através do traçamento dinâmico do raio na direção descendente do raio central.

Vides et al (1997) usou a função característica de Hamilton para calcular as velocidades intervalares sem nenhum conhecimento a priori das propriedades do meio.

O objetivo deste trabalho é estimar os parâmetros que determinam a função geral de tempos de trânsito para um meio 3D com camadas curvas e mergulhos arbitrários onde esses parâmetros são fundamentais na determinação da velocidade do meio e no processo de migração.

Este trabalho é composto pelos seguintes capítulos:

**2. A Formulação Teórica Empregada na Determinação da Função Característica:** Aqui apresenta-se toda a formulação teórica do método de aproximação de segunda ordem para a determinação dos parâmetros a partir de um número adequados de medidas, afim de determinarmos a função geral de tempos que caracteriza o meio em questão. Dentro desta formulação apresentam-se as aproximações de segunda ordem parabólica e hiperbólica para os tempos de trânsito.

**3. A Correção Dinâmica a partir da Teoria do Raio Paraxial:** O terceiro capítulo faz uma revisão do método convencional usado na técnica de correção de sobretempo normal (NMO) para refletores planos e a seguir introduz, através da formulação apresentada no capítulo 2, uma das aplicações que o método permite que é a correção de sobretempo normal em 3D, amplamente utilizada na determinação do modelo de velocidades.

**4. A Determinação dos Parâmetros:** Este capítulo aborda as etapas para a determinação dos parâmetros através da configuração de ponto médio comum (*CMP*) e afastamento nulo. Uma análise no comportamento dos parâmetros é discutida bem como a influência que cada parâmetro exerce dentro da função característica. A partir de um conjunto de dados sintéticos em 3D, o método é aplicado a um modelo próximo de uma situação real. Os resultados são apresentados através de várias ilustrações.

**5. Conclusões e Sugestões:** Aqui apresentam-se as principais conclusões obtidas dos resultados como as sugestões de aplicação.

## **6. Referências Bibliográficas**

### **Apêndices**

#### **A - A Propriedade Simplética**

## 2 - TEORIA DO RAIOS PARAXIAL

Baseada na teoria geométrica do raio (Herzberg, 1958), a teoria do raio paraxial (Bortfeld, 1989) descreve a propagação de um feixe de raios através de um sistema sísmico nas proximidades de um raio de referência denominado raio central. Neste sistema uma matriz de transferência, também conhecida como matriz de propagação do raio, estabelece uma relação funcional entre os parâmetros de entrada e saída do raio. Com base na Ótica de Hamilton (Buchdahl, 1970), uma equação geral de tempos de trânsito determinada para todos os raios que atravessam o sistema com o auxílio das aproximações de segunda ordem parabólica e hiperbólica.

### 2.1 O SISTEMA SÍSMICO; O RAIOS CENTRAL E O RAIOS PARAXIAL

O sistema sísmico aqui considerado (Figura 2.1), consiste numa pilha de camadas homogêneas e isotrópicas separadas por interfaces suavemente curvas de tal modo que o gradiente da superfície em qualquer ponto seja contínuo e diferenciável.

Considera-se como superfície anterior a superfície onde localizam-se as fontes e os receptores e a superfície posterior aquela onde acontecem as reflexões dos raios.

O número de camadas entre as duas superfícies anterior e posterior bem como as velocidades intervalares são totalmente arbitrárias.

Para definirmos o raio central primeiramente vamos estabelecer um sistema de coordenadas para este raio.

Considere o ponto  $P_o$ , localizado na superfície anterior, como sendo o ponto que define a origem do sistema Cartesiano de coordenadas  $xyz$ , neste ponto o plano  $xy$  é tangente a superfície anterior e o eixo  $z$  definido pela perpendicular ao plano  $xy$  (Figura 2.2).

Na superfície posterior, onde ocorrem as reflexões dos raios, define-se um outro sistema Cartesiano de coordenadas denominado  $x'y'z'$ . A origem deste sistema é agora definida no ponto  $P'_o$  onde o plano  $x'y'$  é tangente.

Todos os parâmetros associados ao sistema  $x'y'z'$  serão denotados pelo apóstrofe ( $'$ ).

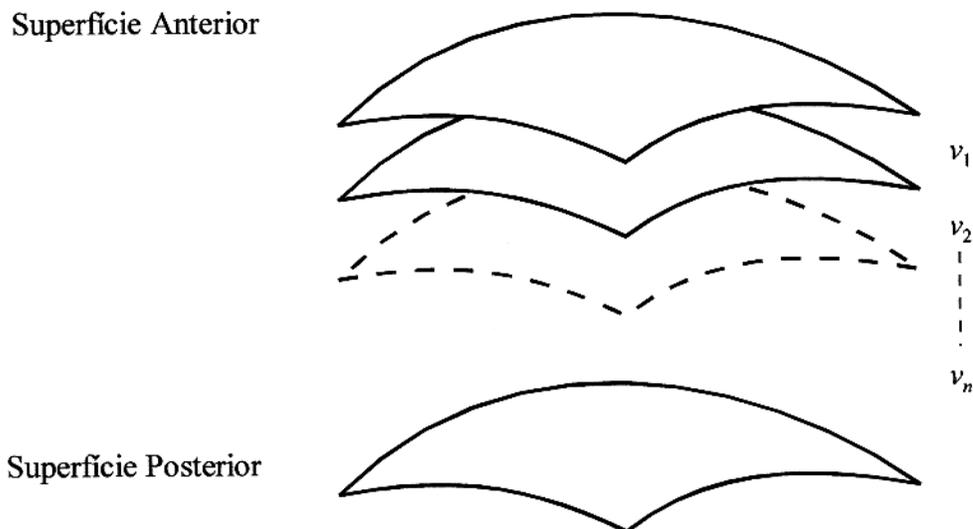


Figura 2.1 - O sistema sísmico é uma pilha de camadas homogêneas e isotrópicas separadas por interfaces suavemente curvas com mergulhos arbitrários.

Define-se o raio central como um raio arbitrário que parte da origem no ponto  $P$  do sistema de coordenadas cartesianas  $xyz$ , previamente introduzido, e atravessa o sistema desde a superfície anterior até a superfície posterior no ponto  $P'$ .

Todos os raios que atravessam o sistema estão relacionados ao raio central.

O vetor vazarosidade inicial  $p_o$  do raio central é definido como  $|p_o| = v_o^{-1}$  e possui a mesma direção do raio central, onde  $v_o$  é a velocidade inicial.

O raio paraxial é um raio arbitrário que parte de um ponto  $P$  nas vizinhanças do raio central na superfície anterior e atravessa o sistema até um ponto  $P'$  nas vizinhanças do raio central na superfície posterior (Figura 2.3).

## 2.2 A CONSTRUÇÃO DOS RAIOS

No sistema sísmico um raio pode ser representado através de quatro parâmetros característicos, com relação as posições assumidas nas superfícies de partida (superfície anterior) e chegada (superfície posterior) do raio ( Herzberger, 1958 ).

A partir da introdução de um sistema de coordenadas Cartesianas nas superfícies, pode-se

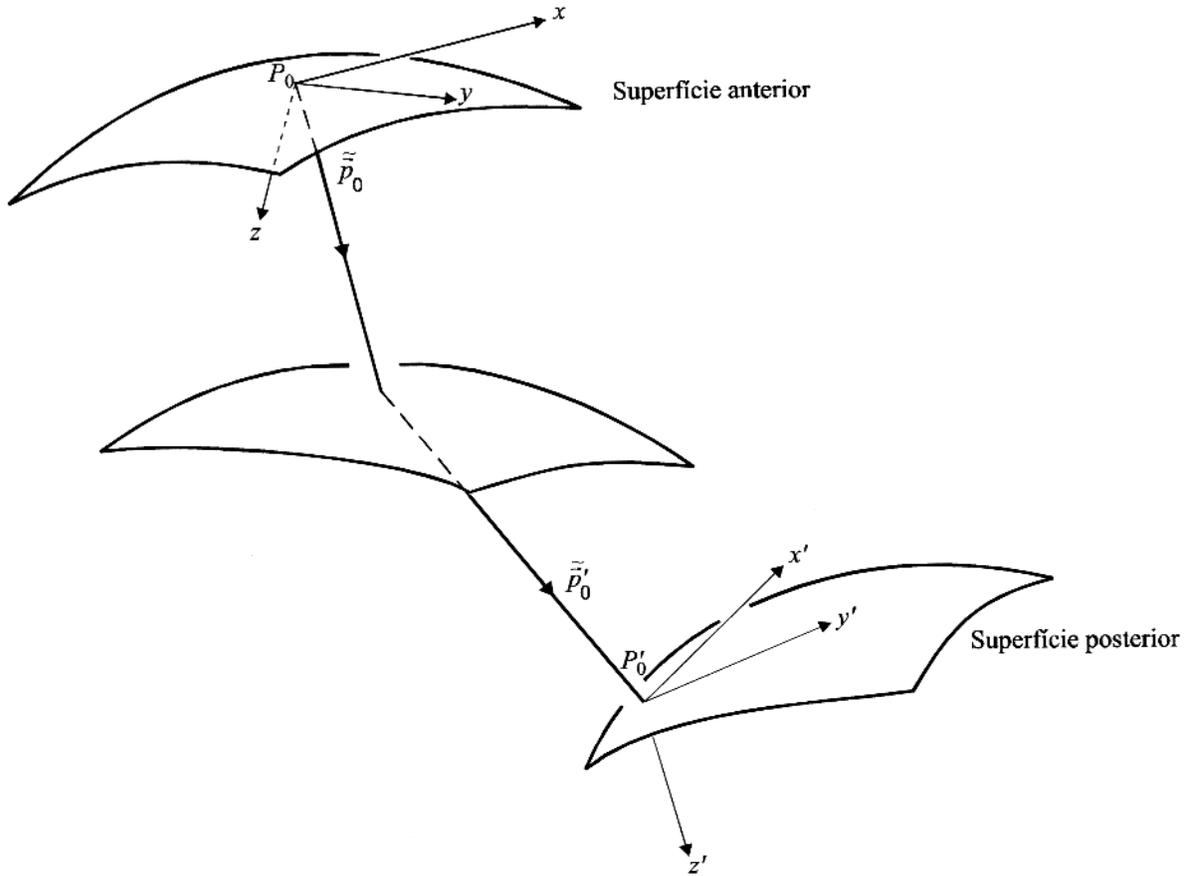


Figura 2.2 - O raio central parte da origem do sistema de coordenadas da superfície anterior e toca perpendicularmente na superfície posterior.

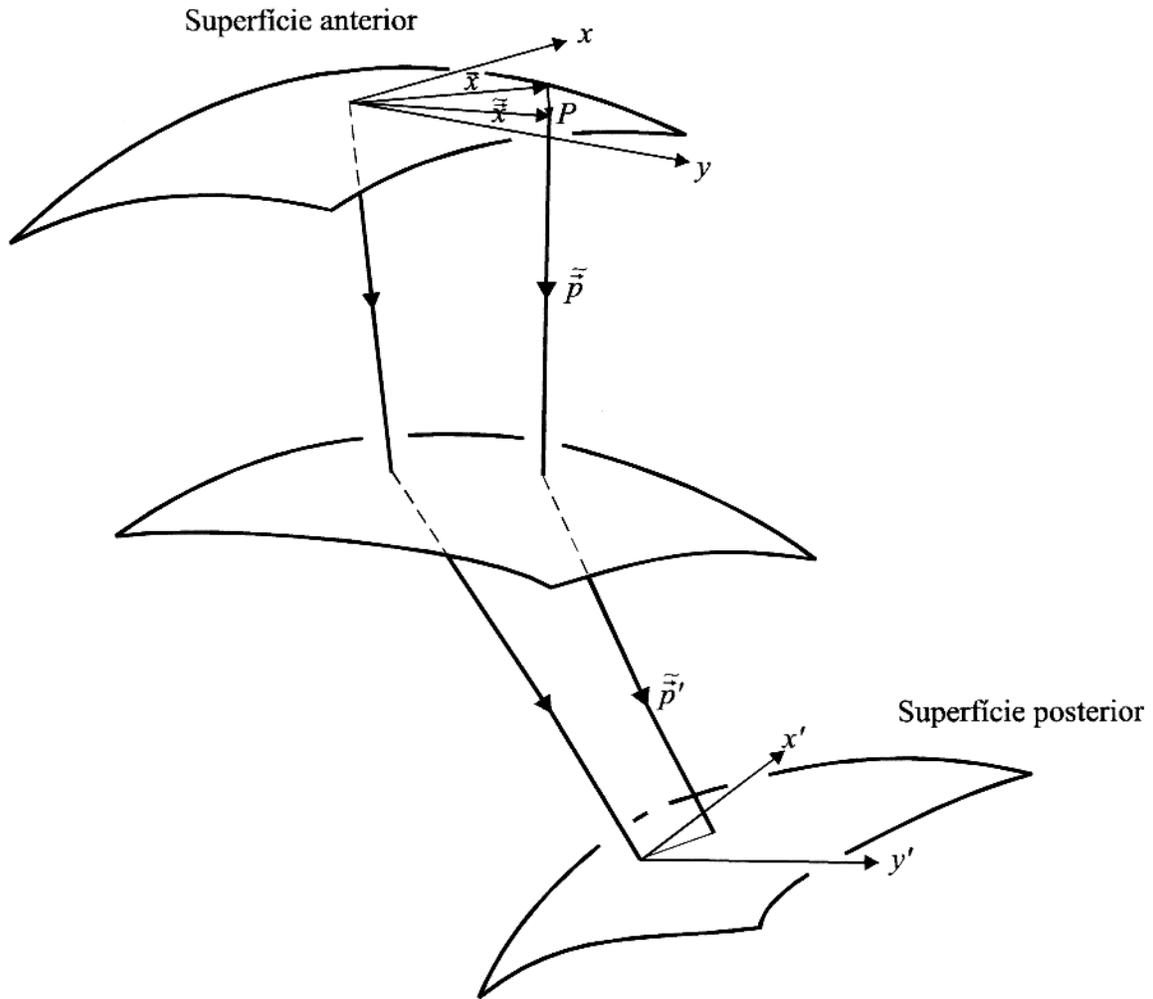


Figura 2.3 - Um raio paraxial atravessa o sistema sísmico partindo do ponto  $P$  na superfície anterior até o ponto  $P'$  na superfície posterior.

reduzir os vetores posição e vagarosidade de três componentes para vetores de dois componentes; uma relação funcional entre os vetores iniciais e finais do raio estabelecida pela matriz de transferência, e a determinação da função característica é feita através do auxílio das aproximações parabólica e hiperbólica (Bortfeld, 1989; Kahn, 1987).

### 2.2.1 O Raio Transmitido

No sistema de coordenadas  $xyz$  o raio paraxial definido pelos vetores de três componentes,  $\tilde{\vec{x}} = (x, y, z)^t$  e  $\tilde{\vec{p}} = (p, q, r)^t$  na superfície anterior e pelos vetores  $\tilde{\vec{x}}' = (x', y', z')^t$  e  $\tilde{\vec{p}}' = (p', q', r')^t$  na superfície posterior, como será demonstrado estes vetores podem ser representados através de vetores de duas componentes onde  $\vec{x} = (x, y)^t$  e  $\vec{p} = (p, q)^t$  são os vetores posição e vagarosidade iniciais e  $\vec{x}' = (x', y')^t$  e  $\vec{p}' = (p', q')^t$  são os vetores posição e vagarosidade finais (Figura 2.3).

O vetor  $\vec{x}$  é representado através da projeção do vetor de três componentes  $\tilde{\vec{x}}$  no plano  $xy$ , sob a hipótese de que  $z = f(x, y)$ .

$$\tilde{\vec{x}} = (x, y, f(x, y))^t \rightarrow \vec{x} = (x, y)^t \quad (2.1)$$

Um ponto infinitesimalmente afastado de  $\tilde{\vec{x}}$  pode ser representado por  $\tilde{\vec{x}} + d\tilde{\vec{x}}$  onde  $d\tilde{\vec{x}}$  é dado por:

$$d\tilde{\vec{x}} = (dx, dy, f_x dx + f_y dy)^t = \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ \nabla f \cdot d\vec{x} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

sendo  $f_x$  e  $f_y$  as derivadas parciais de  $f(x, y)$  em relação a  $x$  e  $y$  respectivamente e  $\nabla f$  o gradiente de  $f$  no ponto  $P$ .

A representação do vetor vagarosidade  $\tilde{\vec{p}}$  de três componentes em um vetor de dois componentes  $\vec{p}$  é feita através da projeção do vetor  $\tilde{\vec{p}}$  sobre o plano tangente ao ponto  $P$ , gerando o vetor  $\tilde{\vec{p}}_T$  e em seguida pela projeção de  $\tilde{\vec{p}}_T$  sobre o plano  $xy$  obtendo o vetor  $\vec{p}$ .

O vetor vagarosidade  $\tilde{\vec{p}}$  (três componentes) reduz-se a  $\vec{p}$  (dois componentes) através de duas projeções seguidas (Figura 2.4), à saber:

- (1) - Projeção de  $\tilde{\vec{p}}$  sobre a superfície tangencial ao plano da fonte no ponto  $P$ .

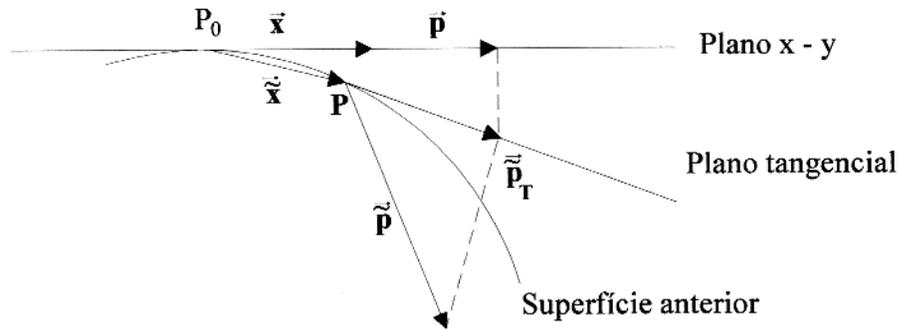


Figura 2.4 - A representação do vetor vagarosidade  $\tilde{p}$  em um vetor de dois componentes  $\vec{p}$  através de duas projeções desde a superfície anterior até o plano  $xy$ . (1) A projeção do vetor  $\tilde{p}$  sobre o plano tangente ao ponto  $P$ . (2) A projeção do vetor sobre ao plano  $xy$

$$\tilde{p}_T = \tilde{p} - (\tilde{p} \cdot \tilde{n}) \cdot \tilde{n}, \quad (2.3)$$

onde  $\tilde{n} \equiv$  vetor normal à superfície  $(f_x, f_y, -1)^t / (f_x^2 + f_y^2 + 1)^{1/2}$

(2) - Projeção de  $\tilde{p}_T$  sobre o plano  $xy$

$$\tilde{p}_T = \left( \begin{array}{c} \vec{p} \\ \nabla f \cdot d\vec{p} \end{array} \right) \rightarrow \vec{p} = \left( \begin{array}{c} p \\ q \end{array} \right) \quad (2.4)$$

Note que  $\vec{p}$  é zero, se e somente se,  $\tilde{p}_t$  for normal à superfície anterior em  $P$ . Isto ocorre quando  $\tilde{p}_t = 0$ .

Da mesma forma a partir de qualquer par de vetores  $\vec{x}$  e  $\vec{p}$  no plano  $xy$  pode-se reconstruir o vetor associado  $\tilde{p}$  pela projeção de  $\vec{p}$  na direção perpendicular ao plano  $xy$  sobre o plano que tangencia a superfície anterior em  $P$  originando o vetor  $\tilde{p}_T$  e posteriormente projetando  $\tilde{p}_T$  normal ao plano tangencial a  $P$  obtém o vetor  $\tilde{p}$  procurado.

Esta representação possibilita tratar os raios e os tempos de trânsito, em superfícies curvas, através de vetores de dois componentes no plano  $xy$ .

Vale ressaltar que os vetores  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  sofrem a mesma transformação em vetores de dois componentes na superfície posterior, onde assume-se que o raio central é normal a esta superfície, isto é,  $\vec{p}'_o = 0$ .

Considerando a correspondência unívoca entre os vetores iniciais e finais, para cada par de vetores  $\vec{x}$  e  $\vec{p}$  então existe um vetor correspondente, representado por  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  onde cada um dos quatro componentes de  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  é uma função dos vetores iniciais  $\vec{x}$  e  $\vec{p}$

$$\vec{x}' = \vec{x}'(\vec{x}, \vec{p}) \quad (2.5)$$

$$\vec{p}' = \vec{p}'(\vec{x}, \vec{p}) \quad (2.6)$$

Em geral as funções (2.5) e (2.6) são analíticas e suas soluções bastante complicadas, por isso é necessário introduzir uma aproximação para o cálculo dos vetores iniciais  $\vec{x}$  e  $\vec{p}$ .

O vetor afastamento entre o raio central e o raio paraxial na superfície anterior é dado por  $d\vec{x}$  e a diferença entre os vetores vagarosidade  $\vec{p}$  e  $\vec{p}_o$  é dado por  $d\vec{p}$ , da mesma forma define-se as quantidades  $d\vec{x}'$  e  $d\vec{p}'$ , na superfície posterior que podem ser representadas pelos diferenciais totais de (2.5) e (2.6) e são expressas da seguinte forma:

$$d\vec{x}' = \underline{\underline{A}}d\vec{x} + \underline{\underline{B}}d\vec{p} \quad (2.7)$$

$$d\vec{p}' = \underline{\underline{C}}d\vec{x} + \underline{\underline{D}}d\vec{p} \quad (2.8)$$

Onde  $\underline{\underline{A}}$ ,  $\underline{\underline{B}}$ ,  $\underline{\underline{C}}$ ,  $\underline{\underline{D}}$  são matrizes jacobianas  $2 \times 2$  representadas por,

$$\underline{\underline{A}} = \frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)}; \quad \underline{\underline{B}} = \frac{\partial(x', y')}{\partial(p, q)} \quad (2.9)$$

$$\underline{\underline{C}} = \frac{\partial(p', q')}{\partial(x, y)}; \quad \underline{\underline{D}} = \frac{\partial(p', q')}{\partial(p, q)} \quad (2.10)$$

Aplicando a expansão em série de Taylor em torno do raio central, as quantidades  $d\vec{x}'$  e  $d\vec{p}'$  podem ser expressas como:

$$d\vec{x}' \approx \sum_{k=1}^n d\vec{x}'_k = \sum_{k=0}^{n-1} \underline{A}_k d\vec{x} + \sum_{k=0}^{n-1} \underline{B}_k d\vec{p} \quad (2.11)$$

$$d\vec{p}' \approx \sum_{k=1}^n d\vec{p}'_k = \sum_{k=0}^{n-1} \underline{C}_k d\vec{x} + \sum_{k=0}^{n-1} \underline{D}_k d\vec{p} \quad (2.12)$$

O índice  $k$  das matrizes estabelece que os elementos dessas matrizes representam polinômios homogêneos de grau  $k$ , isto é, os componentes são combinações lineares dos termos na forma  $x^l y^m (p - p_o)^g (q - q_o)^f$  com  $l + m + g + f = k$ .

Integrando as equações 2.9 tem-se:

$$\vec{x}' \approx \sum_{k=1}^n \vec{x}'_k = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \underline{A}_k \vec{x} + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \underline{B}_k (\vec{p} - \vec{p}_o) \quad (2.13)$$

$$\vec{p}' \approx \sum_{k=1}^n \vec{p}'_k = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \underline{C}_k \vec{x} + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k+1} \underline{D}_k (\vec{p} - \vec{p}_o) \quad (2.14)$$

Desta forma a aproximação de primeira ordem de  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  é considerada como a aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito e corresponde a mesma nomenclatura na Ótica de Hamilton (Herzeberger, 1958; Buchdahl, 1970) onde essas aproximações são avaliadas nas vizinhanças do raio central. O tratamento matemático usado em aproximações de ordens superiores foi tratado por Brühl (1988).

Tomando o primeiro termo da série, isto é, quando  $k = 0$ , nas equações 2.13 e 2.14 têm-se:

$$\vec{x}' \approx \vec{x}'_1 = \underline{A}_o \vec{x} + \underline{B}_o (\vec{p} - \vec{p}_o) \quad (2.15)$$

$$\vec{p}' \approx \vec{p}'_1 = \underline{C}_o \vec{x} + \underline{D}_o (\vec{p} - \vec{p}_o) \quad (2.16)$$

As matrizes jacobianas com subscrito zero denotam matrizes constantes tomadas no raio central. Essas equações (2.15 e 2.16) ordenam cada par de vetores iniciais  $\vec{x}$  e  $\vec{p}$  aos vetores finais  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  e representam um formalismo matricial que descreve qualquer raio transmitido através do sistema sísmico nas proximidades do raio central onde é válida a aproximação. Este mapeamento é único desde que exista um único par de vetores finais iniciais  $\vec{x}'$  e  $\vec{p}'$  associados com um par de vetores iniciais  $\vec{x}$  e  $(\vec{p} - \vec{p}_o)$  (Bortfeld, 1989).

## 2.2.2 O Raio Refletido

A representação do raio refletido no sistema sísmico é dividido em duas etapas. Na primeira o raio percorre o caminho que vai desde a superfície anterior até a superfície posterior onde se dá a reflexão, na segunda parte um outro raio parte desde a superfície posterior no ponto refletor e atinge o detetor na superfície anterior (Figura 2.5), deste modo o primeiro raio é um raio regularmente transmitido e o segundo raio seria o mesmo raio transmitido porém com o sentido inverso.

Tomando as equações 2.15 e 2.16 e fazendo as respectivas substituições dos vetores associados ao raio transmitido no refletor, onde os subscritos  $s$  e  $g$  representam respectivamente os parâmetros associados a fonte e ao receptor temos,

$$\vec{x}'_s = \underline{A}_o \vec{x}_s + \underline{B}_o (\vec{p}_s - \vec{p}_o) \quad (2.17)$$

$$\vec{p}'_s = \underline{C}_o \vec{x}_s + \underline{D}_o (\vec{p}_s - \vec{p}_o) \quad (2.18)$$

e

$$\vec{x}'_g = \underline{A}_o \vec{x}_g + \underline{B}_o (\vec{p}_g - \vec{p}_o) \quad (2.19)$$

$$\vec{p}'_g = \underline{C}_o \vec{x}_g + \underline{D}_o (\vec{p}_g - \vec{p}_o) \quad (2.20)$$

Os dois raios transmitidos encontram-se no ponto  $R$  da superfície posterior onde  $\vec{x}'_s = \vec{x}'_g$ . Pela lei de Snell a componente tangencial do vetor vazarosidade é invariante, tanto na reflexão como na transmissão, em qualquer interface (Herzberger, 1958; Buchdahl, 1970; Diebold, 1987; Hubral, 1980) ao considerar-se a inversão no sentido de propagação do raio  $\vec{p}'_s = -\vec{p}'_g$  ( ver Figura 2.5 ).

Supondo que as matrizes inversas ( $\underline{B}_o^{-1}$  e  $\underline{D}_o^{-1}$ ) existam (quando não há problemas de focalização (Bortfeld e Kemper, 1991)), segue a relação para os raios refletidos onde

$$\frac{1}{2}(\vec{p}_g - \vec{p}_s) = -\underline{B}_o^{-1} \underline{A}_o \frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s) \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{2}(\vec{p}_g + \vec{p}_s - 2\vec{p}_o) = -\underline{D}_o^{-1} \underline{C}_o \frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s) \quad (2.22)$$

onde as notações para aos vetores  $\frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s)$  e  $\frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s)$  representam respectivamente o

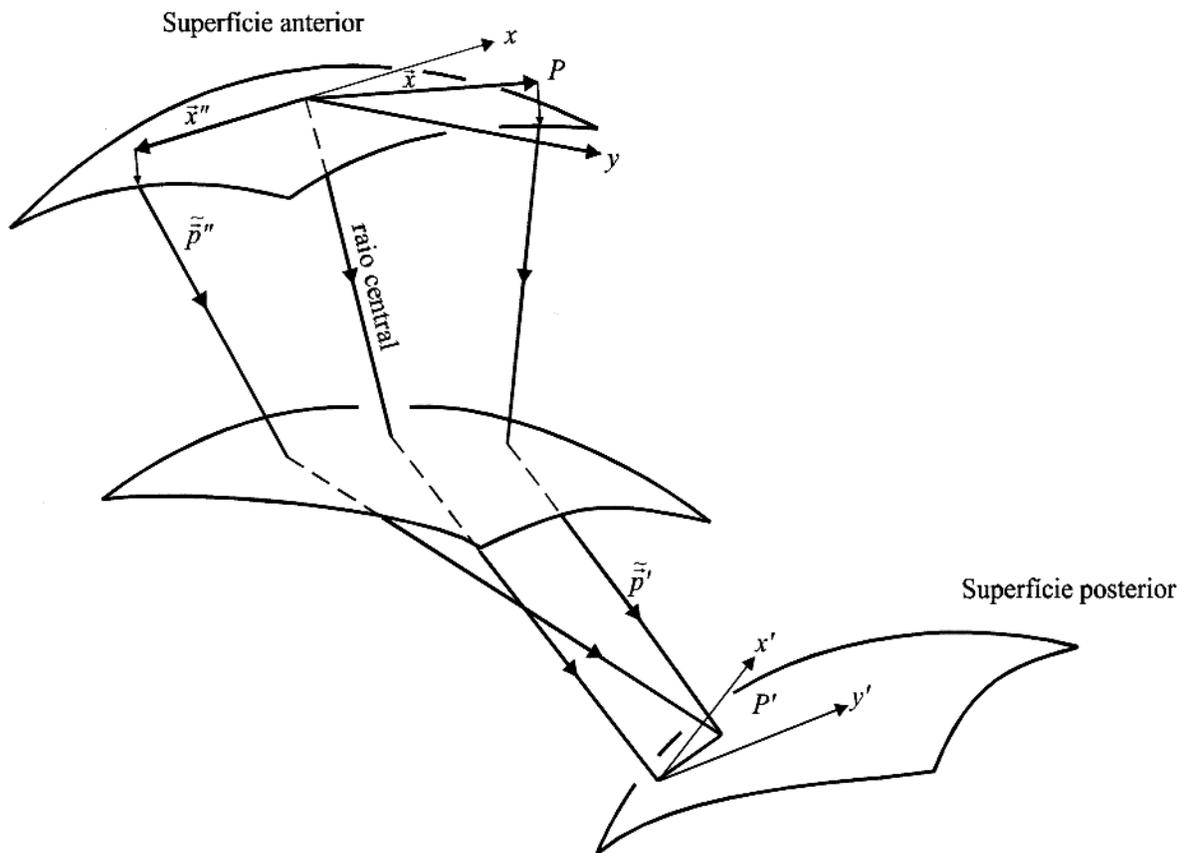


Figura 2.5 - A Representação do raio refletido é feita através de dois raios transmitidos. O primeiro percorre o caminho que vai desde a fonte até o receptor e o segundo é um raio transmitido com o sentido inverso, os dois encontram-se no mesmo ponto  $P'$

vetor ponto médio e o vetor meio afastamento.

A posição final dos vetores  $\vec{x}'_s$  e  $\vec{p}'_s$  podem ser expressas como:

$$\vec{x}'_s = \vec{x}'_g = (\underline{A}_o - \underline{B}_o \underline{D}_o^{-1} \underline{C}_o) \frac{1}{2} (\vec{x}_g + \vec{x}_s) \quad (2.23)$$

$$\vec{p}'_s = -\vec{p}'_g = (-\underline{C}_o + \underline{D}_o \underline{B}_o^{-1} \underline{A}_o) \frac{1}{2} (\vec{x}_g - \vec{x}_s) \quad (2.24)$$

As equações 2.23 e 2.24 afirmam que dentro dos limites da aproximação usada, todos os arranjos com o mesmo ponto médio comum possuem o mesmo ponto de reflexão que é o mesmo fato enunciado pelo teorema NIP (Hubral e Krey, 1980). Nestes termos todos os arranjos com igual meio afastamento (*half offset*) possuem o mesmo ângulo de incidência e o mesmo azimute na superfície posterior. Isto é válido somente dentro da aproximação de primeira ordem na transformação dos raios que equivale a aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito.

### 2.3 O TEMPO DE TRÂNSITO PARA OS RAIOS REFLETIDOS

Baseado na equação característica de Hamilton, Bortfeld (1989) mostra que o tempo de trânsito de um raio paraxial refletido próximo ao raio central, pode ser calculado pela aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito, porém se elevarmos esta equação ao quadrado e tomarmos apenas os termos quadráticos, desprezando os termos maiores que 2, obteremos a aproximação hiperbólica dos tempos de trânsito que comparada com a aproximação anterior permite que os tempos de trânsito sejam calculados com maior precisão (Ursin, 1982; Schleicher et al 1993).

A equação principal de Hamilton (Herzberger, 1958) para eventos de refletidos é dada pelo diferencial  $dT$  dos tempos de trânsito  $T = T(\vec{x}_s, \vec{x}_g)$  dos raios que partem de  $\vec{x}_s$  at  $\vec{x}_g$  e é dado pela seguinte equação

$$dT = -\tilde{\vec{p}}_s \cdot d\tilde{\vec{x}}_s - \tilde{\vec{p}}_g \cdot d\tilde{\vec{x}}_g \quad (2.25)$$

onde o termo negativo na equação supõe que o sentido do raio refletido seja contrário ao do raio transmitido.

Aplicando (2.2) e (2.4) em (2.25) têm-se,

$$dT = \begin{pmatrix} \vec{p}_s \\ \nabla f \cdot \vec{p}_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\vec{x}_s \\ \nabla f \cdot d\vec{x}_s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \vec{p}_g \\ \nabla f \cdot \vec{p}_g \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d\vec{x}_g \\ \nabla f \cdot d\vec{x}_g \end{pmatrix}. \quad (2.26)$$

A função  $T = T(\vec{x}_s, \vec{x}_g)$  depende unicamente das variáveis  $x_s, y_s, x_g, y_g$  e  $dT$  é um diferencial total. Introduzindo-se uma aproximação de segunda ordem em  $T$ , onde  $T \approx T_o + T_1 + T_2$ , e desprezando as potências superiores a 1 em  $\vec{x}_g$  e  $\vec{x}_s$  têm-se,

$$dT \approx dT_1 + dT_2 = -\tilde{\vec{p}}_s \cdot d\tilde{\vec{x}}_s - \tilde{\vec{p}}_g \cdot d\tilde{\vec{x}}_g \quad (2.27)$$

O termo  $T_o$  é assumido como o vetor exato do tempo de trânsito ao longo do raio central. Considerando a soma e a subtração das equações (2.21) e (2.22) e substituindo em (2.27) têm-se,

$$\begin{aligned} dT \approx dT_1 + dT_2 &= -(d\vec{x}_g + d\vec{x}_s) + (d\vec{x}_g - d\vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \frac{1}{2} (\vec{x}_g - \vec{x}_s) \\ &+ (d\vec{x}_g + d\vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1} \underline{\underline{C}}_o \frac{1}{2} (\vec{x}_g + \vec{x}_s) \end{aligned} \quad (2.28)$$

### 2.3.1 A Equação dos Tempos de Trânsito Para os Raios Refletidos (Aproximação Parabólica)

Integrando a equação (2.19) e considerando a propriedade simplética das matrizes (Apêndice) têm-se,

$$\int_{\vec{x}_s}^{\vec{x}_g} dT(\vec{x}_s, \vec{x}_g) = \int_{\vec{x}_s}^{\vec{x}_g} T_1 \vec{x}_s d\vec{x}_s + \int_{\vec{x}_s}^{\vec{x}_g} T_2 \vec{x}_g d\vec{x}_g,$$

$$\begin{aligned} T &= T(\vec{x}_s, \vec{x}_g) \approx T_o + T_1 + T_2 \\ &= T_o - 2\vec{p}_o \cdot \frac{1}{2} (\vec{x}_g + \vec{x}_s) + \frac{1}{2} (\vec{x}_g - \vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \frac{1}{2} (\vec{x}_g - \vec{x}_s) \\ &+ \frac{1}{2} (\vec{x}_g + \vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1} \underline{\underline{C}}_o \frac{1}{2} (\vec{x}_g + \vec{x}_s) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Esta equação representa todos os tempos de trânsito refletidos para qualquer posição da fonte  $\vec{x}_s$  até o receptor  $\vec{x}_g$ .

Ao contrário da Ótica geométrica, na sísmica os pontos característicos são facilmente estabelecidos através de medidas obtidas em superfície, basta que conheçamos as coordenadas dos pontos das fontes e receptores, que o tempo entre eles poder ser determinado. Assumindo que as matrizes sejam simétricas haverá nove parâmetros a serem determinados na função, que são: 1 em  $T_o$ , dois em  $\vec{p}_o$  e respectivamente três em  $\underline{\underline{B}}_o^{-1}\underline{\underline{A}}_o$  e  $\underline{\underline{D}}_o^{-1}\underline{\underline{C}}_o$ .

### 2.3.2 A Aproximação Hiperbólica dos Tempos de Trânsito

Se tomarmos a equação 2.29, elevarmos ao quadrado e desprezarmos os termos com expoentes maiores que dois obteremos a aproximação hiperbólica dos tempos de trânsito, que é dada por:

$$\begin{aligned}
 T^2(\vec{x}_s, \vec{x}_g) &= (T_o - 2\vec{p}_o \cdot \frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s))^2 + 2T_o(\frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1}\underline{\underline{C}}_o \frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s)) \\
 &+ \frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s) \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1}\underline{\underline{A}}_o \frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s)
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Segundo Ursin (1982) e Schleicher et al (1993) a aproximação hiperbólica ajusta-se melhor aos tempos de trânsito das reflexões.

## 3 - A CORREÇÃO DINÂMICA

### 3.1 INTRODUÇÃO

Um dos estágios mais importantes no processamento de dados sísmicos é o empilhamento, onde o objetivo é reduzir o volume de dados a uma seção sísmica de afastamento nulo, aumentando a razão entre o sinal e o ruído.

Na técnica de empilhamento denominada de ponto médio comum (*common mid point*), cada família é transformada em um único traço, que é considerado como equivalente ao traço que seria obtido se a fonte e o receptor ocupassem o mesmo ponto médio da seção CMP, este procedimento resulta num conjunto de traços que formam uma seção sísmica com afastamento nulo, onde somente os eventos de reflexão correspondentes aos refletores horizontais (na escala de uma seção CMP) correspondem a um mesmo ponto de reflexão.

Uma importante etapa no processo de empilhamento é a correção de sobretempo normal (NMO), que objetiva corrigir a diferença entre os tempos de trânsito dos receptores com relação a um tempo de referência na posição do ponto médio comum entre as fontes e os receptores.

### 3.2 A CORREÇÃO DINÂMICA CONVENCIONAL

Para um refletor horizontal, dentro de um meio 2D, com velocidade constante  $v$  (Figura 3.1), a equação que representa a curva de tempos de trânsito de reflexão primária em função do afastamento nulo representada por uma hipérbole que corresponde a um ponto comum em subsuperfície (Yilmaz, 1983).

$$t^2(x) = t^2(0) + x^2/v^2 \quad (3.1)$$

O tempo de trânsito de uma reflexão primária dado em função do afastamento entre as fontes e os detetores. Para o caso onde o afastamento é nulo, isto é  $x = 0$ , têm-se  $t = t(0)$ . A diferença entre os tempos de trânsito referentes as reflexões primárias de um ponto comum em

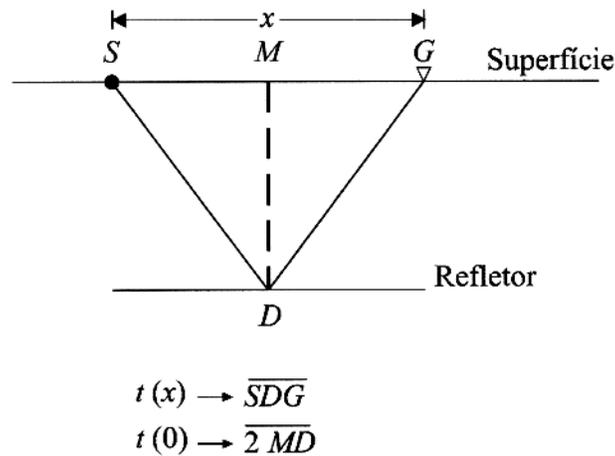


Figura 3.1 - Representação de um refletor horizontal com velocidade constante  $v$ .

relação ao tempo de trânsito do raio de incidência normal (que seria o raio cuja trajetória vai desde o ponto M até o ponto D e retorna ao ponto M) corresponde à correção de sobretempo normal (NMO) cujo procedimento numérico envolvido é ilustrado na Figura 3.2.

Uma família CDP (ponto em profundidade comum) equivale a uma família CMP (ponto médio comum) quando os refletores são horizontais e as velocidades são constantes, isto é, o ponto onde acontecem as reflexões é indiferente para ambas as configurações, porém quando os refletores são inclinados, o ponto refletor não é mais o mesmo considerado e as famílias não são mais equivalentes tornando o termo CDP impróprio (Figura 3.3).

Para um refletor com ângulo de mergulho diferente de zero a equação correspondente a curva de tempos de trânsito também é representada por uma hipérbole (Levin, 1971):

$$t^2(x) = t^2(0) + x^2 \cos^2 \phi / v^2 \quad (3.2)$$

Onde a velocidade de sobretempo normal (NMO) a velocidade do meio dividida pelo cosseno do ângulo de mergulho dada por

$$v_{nmo} = v / \cos \phi \quad (3.3)$$

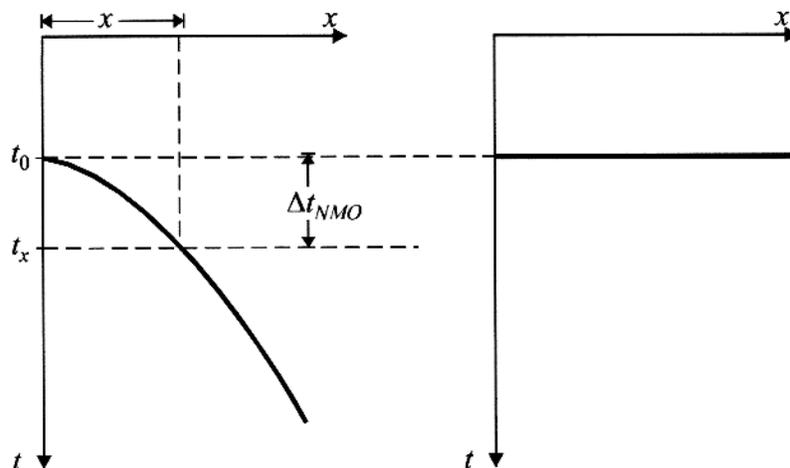


Figura 3.2 - Procedimento usado na correção de sobretempo normal. (a) Os tempos de trânsito de reflexão primária referentes a um ponto comum, são representados pela hipérbole dada pela equação 3.1 onde o termo  $\Delta t_{NMO}$  corresponde a correção dos tempos de trânsito das reflexões primárias com relação ao tempo de incidência do raio normal. (b) Os tempos corrigidos com relação a  $t_0$

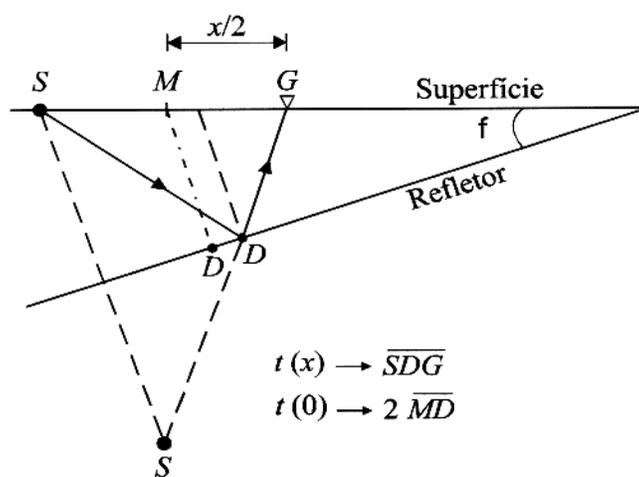


Figura 3.3 - Refletor inclinado onde a reflexão acontece fora do ponto  $D$ .

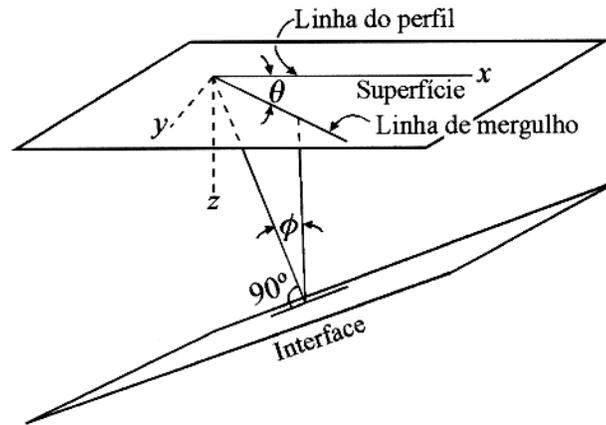


Figura 3.4 - Refletor representado em 3D, mostra a influência do azimute e do mergulho sobre a  $v_{nmo}$

Vê-se que a velocidade de sobretempo normal para o refletor inclinado diferencia-se da velocidade intervalar do refletor horizontal somente por  $\cos \phi$  (onde  $\phi$  é o ângulo de mergulho do refletor) e a correção de sobretempo normal (NMO) pode ser representada pela mesma diferença entre  $t$  e  $t(0)$ .

Segundo Levin (1971) para um refletor inclinado em 3D, (Figura 3.4) vê-se que não somente o ângulo de mergulho influencia na velocidade NMO (velocidade de sobretempo normal), mas também o azimute da fonte e receptor. Portanto neste caso a equação para a velocidade NMO é dada por:

$$v_{nmo} = v / (1 - \sin^2 \phi \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (3.4)$$

O azimute  $\theta$ , é o ângulo entre a direção do mergulho e a direção do perfil.

O ângulo de mergulho aparente é definido por

$$\sin\phi' = \sin\phi \cos\theta \quad (3.5)$$

Usando esta definição, a velocidade NMO dada pela equação 3.3 pode ser reescrita como:

$$v_{nmo} = v/\cos\phi' \quad (3.6)$$

As equações 3.3 e 3.6 são semelhantes com exceção do ângulo  $\phi'$ , onde na equação 3.6 representa o ângulo de mergulho aparente enquanto na equação 3.3  $\phi$  refere-se ao mergulho verdadeiro.

Levin (1971) mostrou a relação entre as velocidades  $v_{nmo}/v$  através da equação (3.4), em função do mergulho e do azimute (Figura 3.5).

No processamento convencional 2D, os traços são selecionados dentro de conjuntos que possuem o ponto médio comum enquanto no processamento 3D os traços são selecionados dentro do que se chama cela comum, onde todos os pontos médios coincidem com o centro da cela. Entretanto esta técnica pode resultar em uma grande variação azimutal de fontes e receptores provocando desvios nos tempos de trânsito.

Em razão da dependência que a velocidade NMO tem sobre o azimute da fonte-receptor (Levin, 1971), as reflexões oriundas de uma interface mergulhante não se alinham ao longo de uma simples curva hiperbólica de tempos de trânsito, onde a utilização de uma única velocidade é insuficiente na aplicação da correção dinâmica, no entanto os traços no CMP podem ser agrupados dentro de vários intervalos de azimutes e diferentes velocidades podem ser usadas para a correção do tempo de trânsito de cada conjunto de traços (Yilmaz, 1983).

Da mesma forma que no processamento em 2D (Figura 3.6), uma vez corrigidos os tempos de trânsito, aplica-se o procedimento da soma dos grupos onde cada grupo reduzido a um único traço aumentando a razão sinal/ruído (S/R).

### 3.3 A CORREÇÃO DINÂMICA ATRAVÉS DA TEORIA DO RAIOS PARAXIAL

Vimos que a idéia de amostrar várias vezes um mesmo ponto de reflexão não é mais eficiente para o caso de refletores que apresentam mergulhos diferente de zero, visto que a partir de um determinado ângulo de mergulho a correção NMO perde resolução para

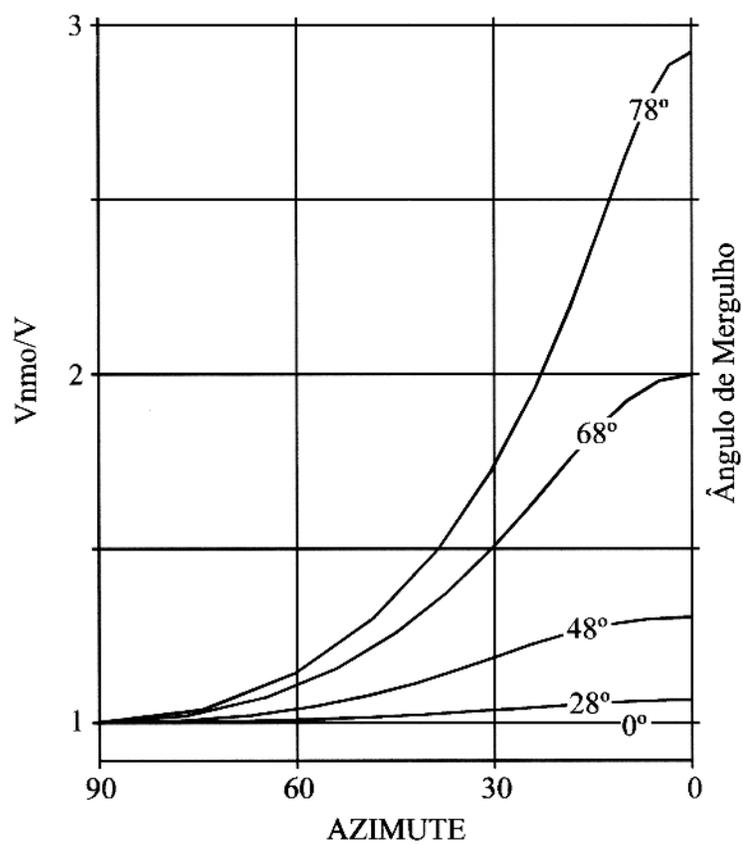


Figura 3.5 - Relação do  $v/v_{nmo}$  com o ângulo de mergulho e o azimute.

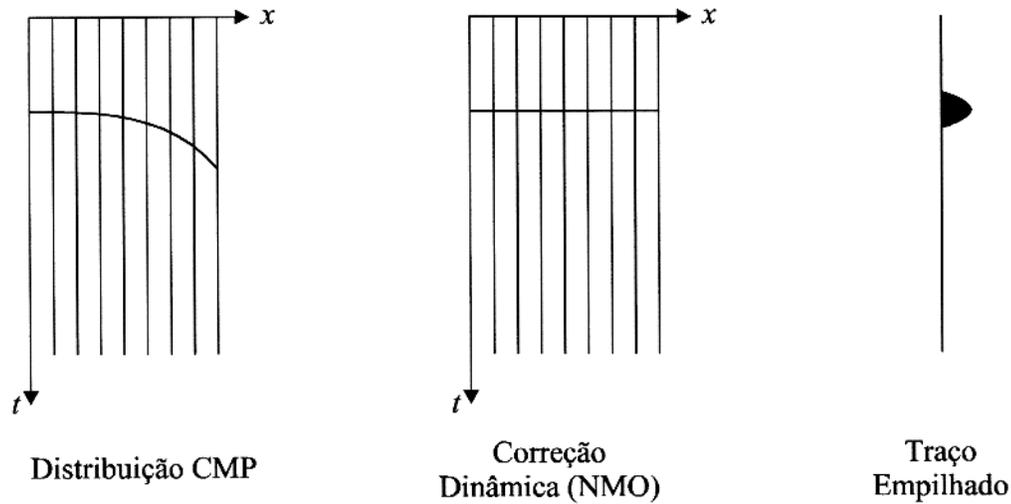


Figura 3.6 - O Empilhamento CMP

meios com a presença desses refletores, o que tem sido estudado sob um outro título de DMO, no entanto uma generalização da correção dinâmica para meios heterogêneos com interfaces apresentando curvaturas suaves e mergulhos arbitrários (sistema sísmico) pode ser obtida através de um formalismo matemático baseado na Teoria do Raio Paraxial usando a aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito.

Pelo conceito do raio paraxial apresentado no capítulo 2 verifica-se que a correção dinâmica, baseada neste método, possibilita o cálculo de seções de afastamento nulo (*zero offset*) para refletores em 3D através da aproximação de segunda ordem dos tempos de trânsito.

Considerando a aproximação parabólica da função de tempos de trânsito, a Equação 2.29 apresenta-se nas coordenadas dos vetores ponto médio e meio afastamento na seguinte forma:

$$T = T_0 - 2\vec{p}_0 \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_d \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \vec{x}_d + \vec{x}_m \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1} \underline{\underline{C}}_o \vec{x}_m$$

Onde os vetores  $\vec{x}_m$  e  $\vec{x}_d$  representam respectivamente o vetor ponto médio e o vetor meio afastamento, dados da seguinte forma:

$$\vec{x}_m = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(x_g + x_s) \\ \frac{1}{2}(y_g + y_s) \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

e

$$\vec{x}_d = \begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(x_g - x_s) \\ \frac{1}{2}(y_g - y_s) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Ao considerarmos o vetor  $\vec{x}_d = 0$ , isto é, fonte e receptor ocupando a mesma posição teremos:

$$T(\vec{x}_d = 0) \approx T_o - 2\vec{p}_o \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_m \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1} \underline{\underline{C}}_o \vec{x}_m \quad (3.9)$$

Esta equação representa o tempo de afastamento nulo no ponto  $xm$ , deste modo, podemos concluir que subtraindo a correção NMO da equação 2.29, o tempo  $T_{zd}$  ser dado por

$$T_{zd} = T - \Delta_{nmo} \quad (3.10)$$

Onde

$$\Delta_{nmo} = \vec{x}_d \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \vec{x}_d \quad (3.11)$$

Pela equação 3.9 observa-se que a correção dinâmica de sobretempo normal (NMO) depende sobretudo da magnitude do vetor afastamento médio  $\frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s)$  e do seu azimuth. Logo, pode-se dizer que qualquer arranjo de afastamento médio comum (onde  $\frac{1}{2}(\vec{x}_g - \vec{x}_s)$  é constante em ambas direções e magnitudes) pode ser transformado num arranjo afastamento nulo pela mesma constante de correção.

A mesma equação pode ser representada usando a aproximação hiperbólica na seguinte forma:

$$T_{ZD} = T(\vec{x}_d = 0) = \sqrt{(T_o - 2\vec{p}_o \cdot \vec{x}_m)^2 + 2T_o(\vec{x}_m \cdot \underline{\underline{D}}_o^{-1} \underline{\underline{C}}_o \vec{x}_m)} \quad (3.12)$$

e

$$T_{ZD} = \sqrt{T^2 - \Delta_{NMO}} \quad (3.13)$$

onde

$$\Delta_{NMO} = 2T_o \vec{x}_d \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \vec{x}_d \quad (3.14)$$

A correção dinâmica para meios heterogêneos conforme descrito é válida apenas para pequenas magnitudes do vetor  $\vec{x}_d$ .

Embora a equação 2.29 forneça todos os parâmetros que determinam a função característica, o seu uso a partir de uma única configuração de dados, não é suficiente para determinar todos os seus parâmetros. No entanto através da combinação de duas de suas possíveis configurações, pode-se calcular todos os parâmetros da função em duas etapas separadamente.

Na primeira parte do cálculo usando-se a configuração CMP e em seguida subtraindo-se o termo  $\Delta_{NMO} = 2T_o(\vec{x}_d \cdot \underline{\underline{B}}_o^{-1} \underline{\underline{A}}_o \vec{x}_d)$  da equação 2.29 afim de gerar-se uma seção de afastamento nulo onde calcula-se o restante dos parâmetros.

## 4 - A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E A FUNÇÃO CARACTERÍSTICA

Obtidos os tempos de trânsito, a etapa seguinte consiste em calcular os parâmetros que determinam a função característica para cada refletor do modelo. Esta função (2.29) como vimos no capítulo 2 fornece os tempos de trânsito para todas as possíveis configurações de dados e para determiná-la é necessário no mínimo nove medidas de tempos de trânsito em configurações adequadas no levantamento sísmico.

### 4.1 AS CONFIGURAÇÕES DE DADOS TÍPICAMENTE USADAS

#### 4.1.1 A Configuração de Fonte Comum

Segundo a equação

$$T = T_o - 2\vec{p}_o \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_d \cdot \underline{U}_o \vec{x}_d + \vec{x}_m \cdot \underline{V}_o \vec{x}_m \quad (4.1)$$

onde as matrizes  $\underline{U}_o$  e  $\underline{V}_o$  representam respectivamente,

$$\underline{B}_o^{-1} \underline{A}_o = \underline{U}_o = \begin{pmatrix} \underline{U}_{11} & \underline{U}_{12} \\ \underline{U}_{21} & \underline{U}_{22} \end{pmatrix}$$

e

$$\underline{D}_o^{-1} \underline{C}_o = \underline{V}_o = \begin{pmatrix} \underline{V}_{11} & \underline{V}_{12} \\ \underline{V}_{21} & \underline{V}_{22} \end{pmatrix}$$

a configuração de fonte comum apresenta nove parâmetros a serem determinados.

Considerando que a fonte esteja posicionada na origem, onde  $\vec{x}_s = \vec{y}_s = 0$ , após as operações entre os vetores e as matrizes, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$T$	$T_o$	$p_o$	$q_o$	$\frac{1}{4}U_{11}$	$\frac{1}{2}U_{12}$	$\frac{1}{4}U_{22}$	$\frac{1}{4}V_{11}$	$\frac{1}{2}V_{12}$	$\frac{1}{4}V_{22}$
$t_1$	1	$-x_{g1}$	$-y_{g1}$	$x_{g1}^2$	$x_{g1}y_{g1}$	$y_{g1}^2$	$x_{g1}^2$	$x_{g1}y_{g1}$	$y_{g1}^2$
$t_2$	1	$-x_{g2}$	$-y_{g2}$	$x_{g2}^2$	$x_{g2}y_{g2}$	$y_{g2}^2$	$x_{g2}^2$	$x_{g2}y_{g2}$	$y_{g2}^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t_9$	1	$-x_{g9}$	$-y_{g9}$	$x_{g9}^2$	$x_{g9}y_{g9}$	$y_{g9}^2$	$x_{g9}^2$	$x_{g9}y_{g9}$	$y_{g9}^2$

Das nove colunas da matriz, as três últimas são linearmente dependentes o que torna a matriz singular, para solucionarmos este problema é necessário um número maior de fontes comuns que torne possível a sua solução.

#### 4.1.2 A Configuração de Ponto Médio Comum

O uso da configuração de ponto médio comum possibilita-nos calcular somente uma parte dos parâmetros da função característica. Segundo a equação 4.1, considerando que  $\vec{x}_m$ , o vetor ponto médio comum, esteja localizado na origem do sistema de coordenadas onde  $\frac{1}{2}(\vec{x}_g + \vec{x}_s) = 0$ , temos a seguinte equação:

$$T = T_o + \vec{x}_d \cdot \underline{\underline{U}}_o \vec{x}_d \quad (4.2)$$

Os parâmetros para tal função são: 1 em  $T_o$  e três em  $\underline{\underline{U}}_o$ .

Após as operações entre os vetores  $\vec{x}_d$  e a matriz  $\underline{\underline{U}}_o$  obtém-se o seguinte sistema de equações:

$T$	$T_o$	$\frac{1}{4}U_{11}$	$\frac{1}{2}U_{12}$	$\frac{1}{4}U_{22}$
$t_1$	1	$x_{d1}^2$	$x_{d1}y_{d1}$	$y_{d1}^2$
$t_2$	1	$x_{d2}^2$	$x_{d2}y_{d2}$	$y_{d2}^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t_4$	1	$x_{d4}^2$	$x_{d4}y_{d4}$	$y_{d4}^2$

Conforme o sistema de equações acima observa-se que para calcularmos os parâmetros da equação é necessário tomarmos no mínimo quatro medidas adequadas de tempos de trânsito.

### 4.1.3 A Configuração de Afastamento Nulo

Para simularmos o arranjo de afastamento nulo, onde por hipótese fonte e detetor ocupam a mesma posição, é necessário o uso da equação 2.29 subtraída do termo referente à correção de sobretempo normal.

$$T = T_o - 2\vec{p}_o \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_m \cdot \underline{\underline{V}}_o \vec{x}_m \quad (4.3)$$

Os parâmetros para tal função são: 1 em  $T_o$ , 2 em  $p_o$  e 3 em  $\underline{\underline{V}}_o$  e o sistema de equações pode ser representado por:

$T$	$T_o$	$p_o$	$q_o$	$\frac{1}{4}V_{11}$	$\frac{1}{2}V_{12}$	$\frac{1}{4}V_{22}$
$t_1$	1	$-x_{m1}$	$-y_{m1}$	$x_{m1}^2$	$x_{m1}y_{m1}$	$y_{m1}^2$
$t_2$	1	$-x_{m2}$	$-y_{m2}$	$x_{m2}^2$	$x_{m2}y_{m2}$	$y_{m2}^2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t_6$	1	$-x_{m6}$	$-y_{m6}$	$x_{m6}^2$	$x_{m6}y_{m6}$	$y_{m6}^2$

Este conjunto de equações composto por 6 colunas linearmente independentes, mostram que seis medidas diferentes de tempos de trânsito são suficientes para determinarmos o restante dos parâmetros que compõem a função característica.

Portanto observa-se que as configurações de dados apresentadas acima, quando aplicadas isoladamente, não são suficientes para obter-se todos os parâmetros que determinam a função característica, logo seria apropriado o uso de diferentes configurações de dados em arranjos de cobertura múltipla afim de eliminar do sistema de equações, a dependência linear entre as colunas da matriz. No entanto o procedimento para calcular os parâmetros torna-se mais prático quando é aplicado através das configurações de dados CMP e afastamento nulo, este procedimento pode ser feito em duas partes: A primeira parte consiste no cálculo dos parâmetros através da configuração CMP, que fornece  $T_o$  e os três elementos da matriz  $\underline{\underline{V}}_o$  e a segunda parte que seria a aplicação da correção dinâmica gerando a seção de afastamento nulo que fornece o restante dos parâmetros, que são:  $T_o$ ,  $p_o$ ,  $q_o$  e os elementos de  $\underline{\underline{V}}_o$ .

## 4.2 A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FUNÇÃO CARACTERÍSTICA

A determinação dos parâmetros consiste em resolver um sistema de equações, onde o número de equações é maior que o número de incógnitas, dado pela equação:

$$\underline{A}_{N \times 9} \vec{x}_{9 \times 1} = \underline{B}_{N \times 1}. \quad (4.4)$$

Onde:

$\underline{A}_{N \times 9}$  é a matriz que contém todas as posições entre as fontes e os receptores.

$\underline{B}_{N \times 1}$  é a matriz dos tempos de trânsito observados.

$\vec{x}_{9 \times 1}$  é um vetor de parâmetros com nove elementos a serem calculados.

O cálculo dos parâmetros é feito com base na inversão dos mínimos quadrados (Menke, 1984), para este problema cabe a seguinte solução:

$$\vec{x}_{9 \times 1} = [\underline{A}_{9 \times N}^T \underline{A}_{N \times 9}]^{-1} \underline{A}_{9 \times N}^T \underline{B}_{N \times 1}; \quad (4.5)$$

### 4.3 A DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS NA PRESENÇA DE RUIDO

Nesta seção faremos um breve estudo acerca do comportamento dos parâmetros da função característica na presença de ruído.

Neste caso o procedimento de contaminação é feito introduzindo um ruído aleatório nos dados a partir de uma distribuição gaussiana cujo desvio padrão assume, em cada caso, os valores de 10%, 20% e 30% do valor médio da distribuição.

Dentro desta abordagem far-se-á uma comparação entre as curvas de tempos de trânsito observados e a curva obtida pela perturbação dos parâmetros.

As figuras 4.1a e 4.1b ilustram o comportamento das curvas características calculadas em relação a curva de tempos observados quando se utiliza diferentes valores na perturbação nas configurações de ponto médio comum e afastamento nulo.

O comportamento assumido pelas curvas características calculadas nos mostra que o nível de ruído nos dados afeta diretamente o cálculo dos parâmetros que determinam a curva de tempos de trânsito. Os valores dos parâmetros estimados em cada caso é mostrado na tabela 4.1.

De acordo com os resultados na tabela 1 pode-se dizer que dentro de uma faixa aceitável de ruído (neste caso até 20% do desvio padrão), a aproximação é satisfatória sendo possível obter um resultado confiável.

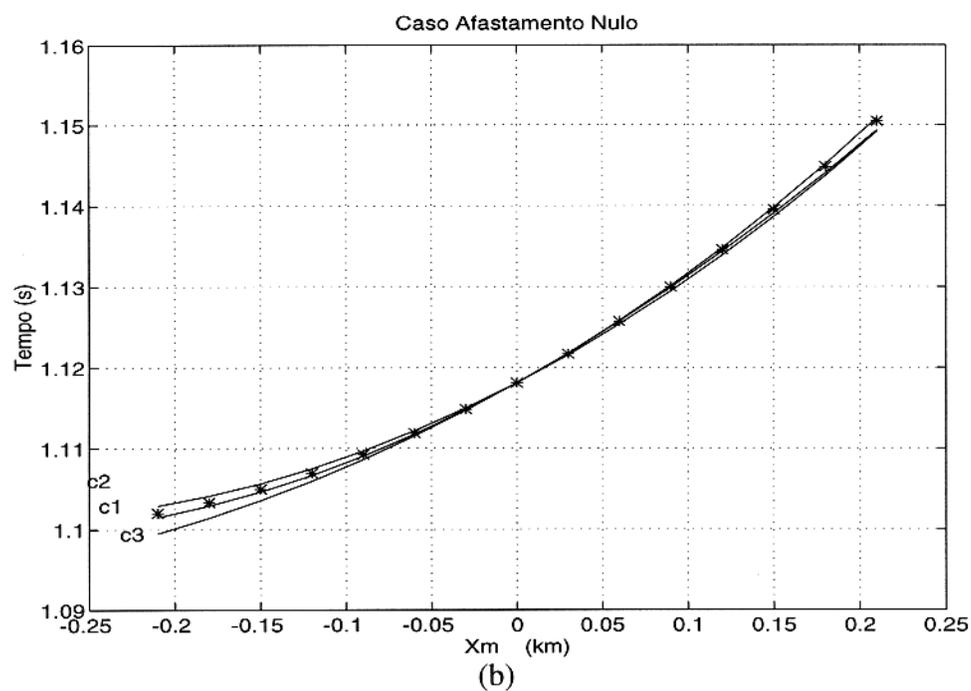
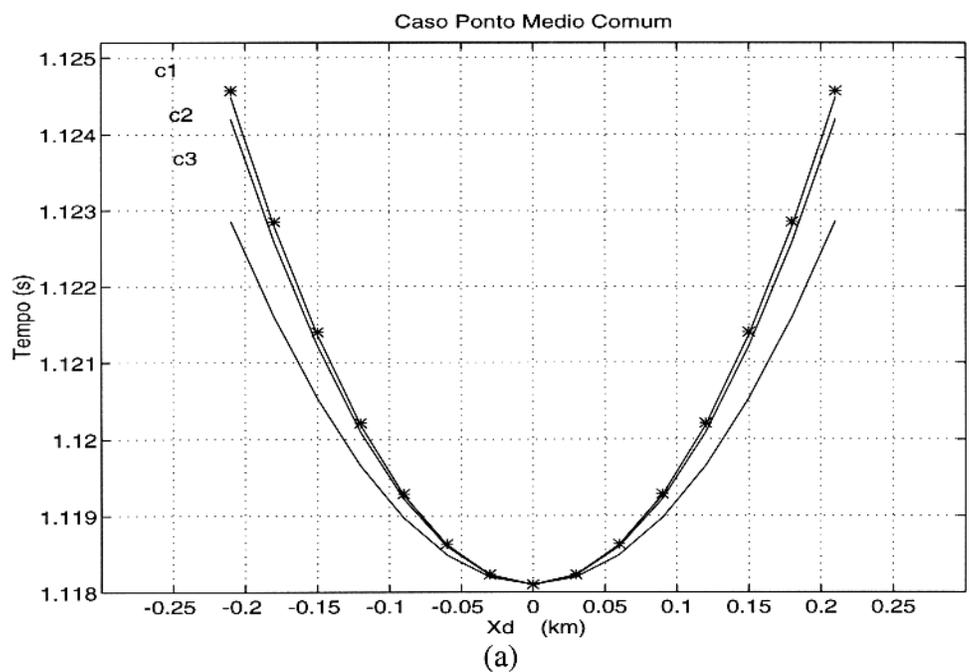


Figura 4.1 - A função de tempos de trânsito é apresentada, para os casos em que o desvio padrão assume os valores de 10%(c1), 20%(c2) e 30%(c3) do valor médio da distribuição. (a) Para o caso ponto médio comum e (b) Para o caso afastamento nulo, onde os pontos representados por (\*) correspondem aos tempos de trânsito observados.

A tabela mostra os valores que os parâmetros assumem nas configurações ponto médio comum e afastamento nulo quando o desvio padrão assume os valores de 10%, 20% e 30% do valor médio da distribuição.

<i>Ponto Médio Comum</i>				
<i>P</i>	<i>P</i> <sub>0%</sub>	<i>P</i> <sub>10%</sub>	<i>P</i> <sub>20%</sub>	<i>P</i> <sub>30%</sub>
<i>U</i> <sub>11</sub>	0.1466	0.1324	0.1151	0.1265
<i>U</i> <sub>21</sub>	0.0450	0.0445	0.0395	0.0516
<i>U</i> <sub>22</sub>	0.2925	0.2917	0.3203	0.2895
<i>Afastamento Nulo</i>				
<i>p</i> <sub>0</sub>	0.0259	0.0262	0.0247	0.0243
<i>q</i> <sub>0</sub>	-0.0577	-0.0571	-0.0571	-0.0602
<i>V</i> <sub>11</sub>	0.1347	0.1143	0.1455	0.09680
<i>V</i> <sub>21</sub>	-0.0029	-0.0031	-0.0333	-0.058
<i>V</i> <sub>22</sub>	0.1841	0.1967	0.1838	0.1881

De acordo com os resultados na tabela pode-se dizer que dentro de uma faixa aceitável de ruído (neste caso até 20% do desvio padrão), a aproximação é satisfatória sendo possível obter um resultado confiável.

#### 4.4 O COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS QUE DETERMINAM A FUNÇÃO CARACTERÍSTICA

Nesta seção estudaremos a influência que cada parâmetro exerce isoladamente sobre a função característica nas configurações de ponto médio comum e afastamento nulo.

Através do procedimento de cortes em seções horizontais de tempo, faremos uma comparação entre a curva perturbada pela variação de um dado parâmetro e a curva dos tempos de trânsito observados.

##### 4.4.1 Os Cortes em Seções Horizontais de Tempos de Trânsito

Após a migração 3D, o volume de dados 3D está pronto para a dedução do modelo geológico tridimensional da subsuperfície. Devido a densidade de traços no levantamento 3D, o interprete trabalha com um número maior de informação do que teria em um conjunto de dados 2D. Embora este número nos conduza a uma dedução mais precisa do modelo

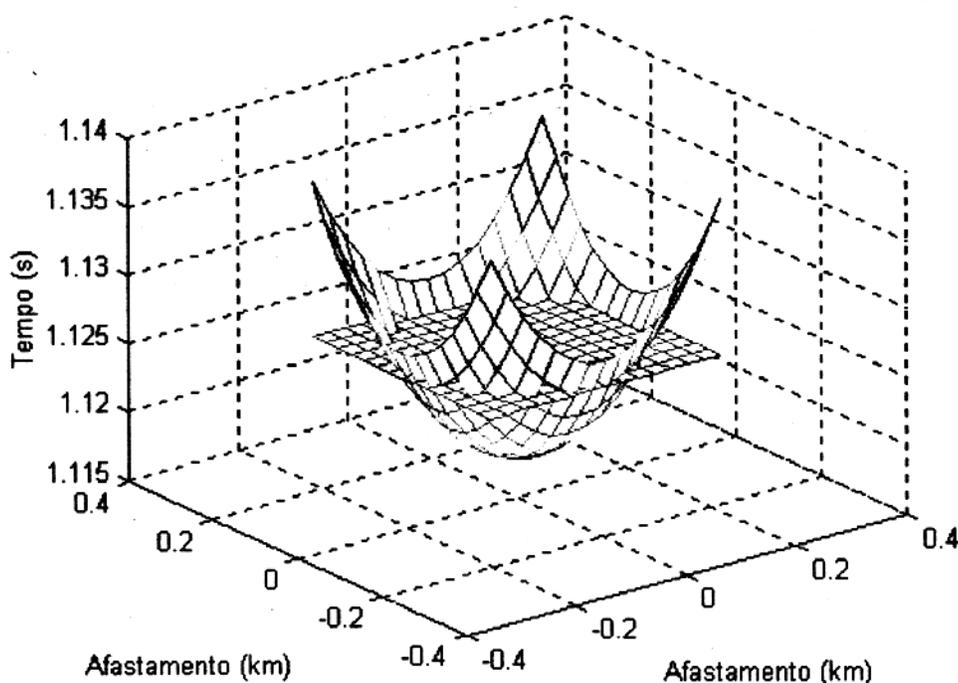


Figura 4.2 - Representação de um corte horizontal dado a uma seção de tempos de trânsito para o tempo  $T = T_c$

geológico, a sua interpretação gráfica pode ser exaustiva. No entanto este tipo de arquivo nos permite o exame de seções tanto verticais (em qualquer direção) quanto nas seções horizontais denominadas de cortes horizontais no tempo (time slices) (Yilmaz, 1983).

Uma fatia de tempo contém eventos de mais de um horizonte de reflexão em um mesmo nível de tempo, e são usadas para a geração de mapas de contorno estrutural.

Bone et al(1975) e Brown et al(1982) oferecem uma discussão extensiva do uso de cortes horizontais no tempo na interpretação de dados 3D.

Considere um corte horizontal numa seção de tempos de trânsito (Figura 4.2). A curva mostrada na Figura 4.3, será a representação da função

$$T_c = T_o - 2\vec{p}_o \cdot \vec{x}_m + \vec{x}_d \cdot \underline{U}_o \vec{x}_d + \vec{x}_m \cdot \underline{V}_o \vec{x}_m, \quad (4.6)$$

para um tempo de trânsito  $T = T_c$  constante.

Considerando que esta função apresenta todas as configurações de dados como casos particulares (Bortfeld, 1989) então podemos estudar o comportamento desta função para cada configuração escolhida quando variam-se os parâmetros associados a estas.

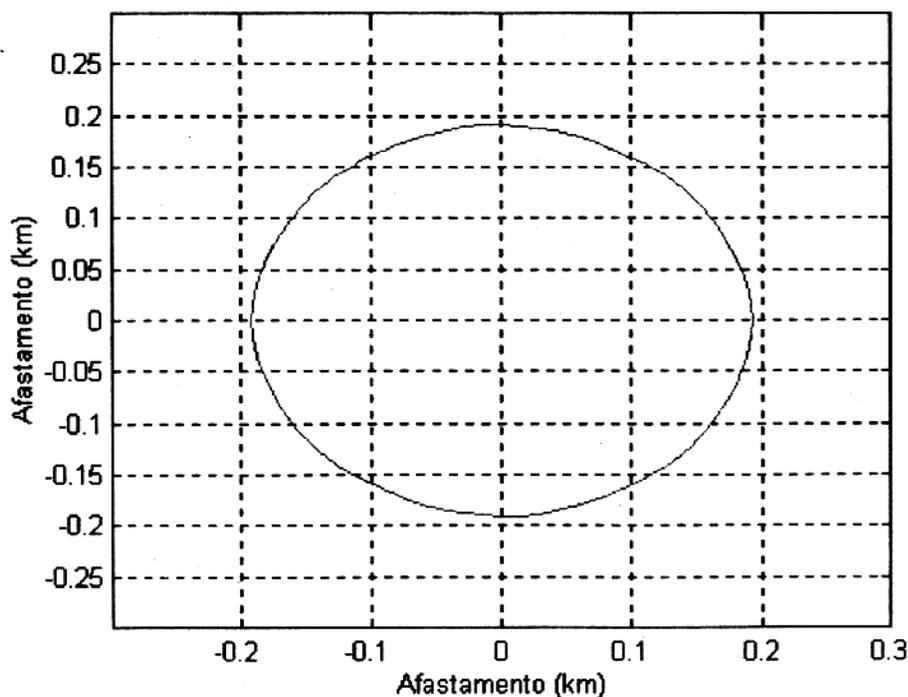


Figura 4.3 - Representação de um corte dado a uma seção de tempos de trânsito visto no plano  $xy$

#### 4.4.2 O Comportamento dos Parâmetros $U_{11}$ , $U_{12}$ e $U_{22}$ na Configuração CMP

Para estudarmos o comportamento dos parâmetros da função característica na configuração de ponto médio comum faremos inicialmente a consideração de que o tempo no raio central pode ser estabelecido diretamente a partir da aplicação de alguns cortes horizontais na seção de tempos até o ápice onde se verifica o menor tempo de reflexão.

Tomando-se como referência a equação 4.2, após a multiplicação entre os vetores  $\vec{x}_d$  e a matriz  $\underline{U}_o$  para um determinado  $T = T_c$  têm-se,

$$T_c = T_o + \frac{1}{4}U_{11}x_d^2 + \frac{1}{2}U_{12}x_d y_d + \frac{1}{4}U_{22}y_d^2 \quad (4.7)$$

Esta equação corresponde a um corte horizontal no tempo  $T = T_c$ , dado em uma seção de tempos de trânsito 3D na configuração de ponto médio comum.

A metodologia que será aplicada consiste em variar um único parâmetro dentro da função 4.2 enquanto os outros permanecem fixos. O objetivo é estudar a influência que cada parâmetro exerce nesta função a partir de um corte horizontal na superfície de tempos de

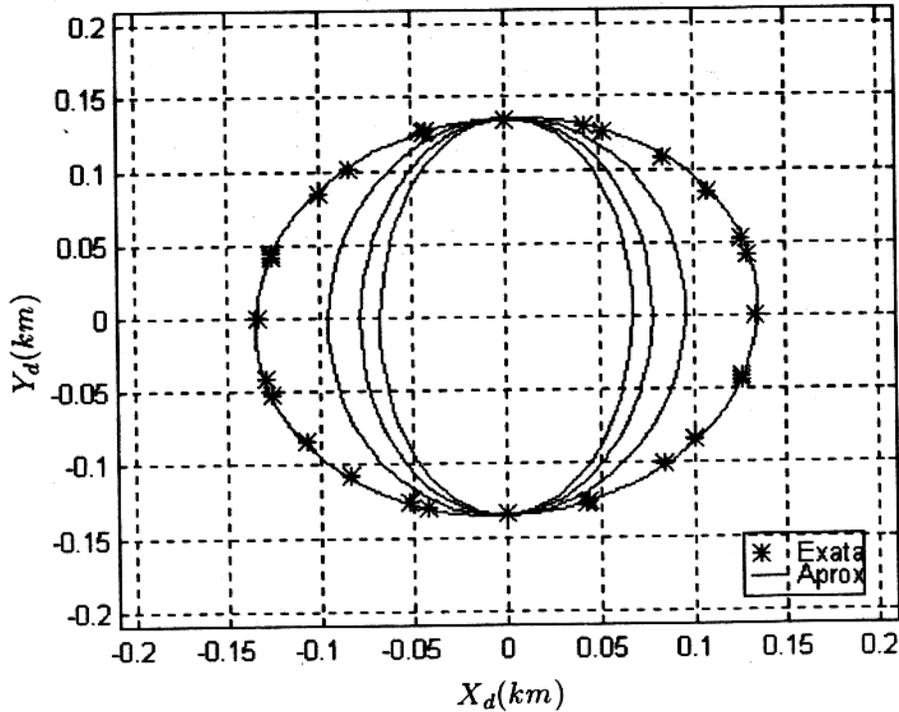


Figura 4.4 - A Figura mostra o comportamento da função 4.2 quando varia o parâmetro  $U_{11}$  para um tempo constante  $T = T_c$

trânsito representada pela equação 4.7 quando comparada com aqueles pontos que representam o tempo de trânsito observado em diferentes posições.

Os itens abaixo comentam cada caso.

#### a - A variação do parâmetro $U_{11}$

De acordo com a Figura 4.4 observa-se que conforme o valor de  $U_{11}$  é alterado na função 4.2, os pontos na direção do eixo  $y$  permanecem fixos enquanto a curva vai aproximando-se dos pontos que representam os tempos de trânsito observados na direção do eixo  $x$ .

Este comportamento pode ser observado derivando 4.2 em relação a  $U_{11}$ , ou seja,

$$\frac{\partial T(x_d, y_d)}{\partial U_{11}} = \frac{1}{4} x_d^2 \quad (4.8)$$

nesta função qualquer variação dada ao parâmetro  $U_{11}$  implica em dizer que as propriedades nas demais direções variam com exceção da direção  $y$  os pontos permanecem fixos.

No plano  $xt$  a mesma superfície (Figura 4.5) mostra que as curvas assumem várias posições na direção  $x$  para qualquer variação de  $U_{11}$ , mantendo o seu ápice na mesma posição, porém com diferentes curvaturas.

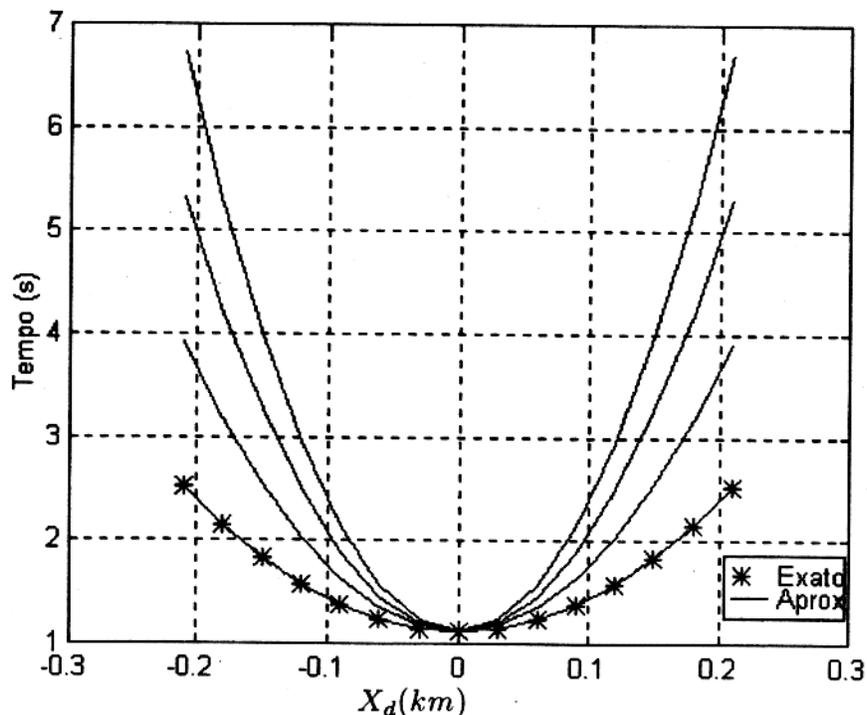


Figura 4.5 - O comportamento da função 4.2 quando o parâmetro  $U_{11}$  varia, visto num corte vertical dado na superfície de tempos de trânsito no plano  $xt$

#### b - A variação do parâmetro $U_{22}$

Conforme a Figura 4.6 pode-se observar que quando varia-se o parâmetro  $U_{22}$ , os pontos que estão localizados na direção do eixo  $x$  mantêm-se fixos enquanto nas demais direções a função ajusta-se até coincidir com os pontos que representam os tempos observados.

Este comportamento pode ser observado derivando (4.2) em relação a  $U_{22}$ , ou seja,

$$\frac{\partial T(x_d, y_d)}{\partial U_{22}} = \frac{1}{4} y_d^2 \quad (4.9)$$

qualquer variação dada ao parâmetro  $U_{22}$  na variação da função em toda as direções com exceção da direção  $x$  onde os pontos permanecem fixos.

Da mesma forma a Figura 4.7 mostra que a curva mantém-se com o ápice na mesma posição enquanto suas curvaturas variam.

#### c - A variação do parâmetro $U_{12}$

Para o caso em que  $U_{12}$  varia, os pontos sobre os eixos  $x$  e  $y$  permanecem fixos enquanto a curva move-se nas demais direções até ajustar-se completamente aos pontos observados (Figura 4.8).

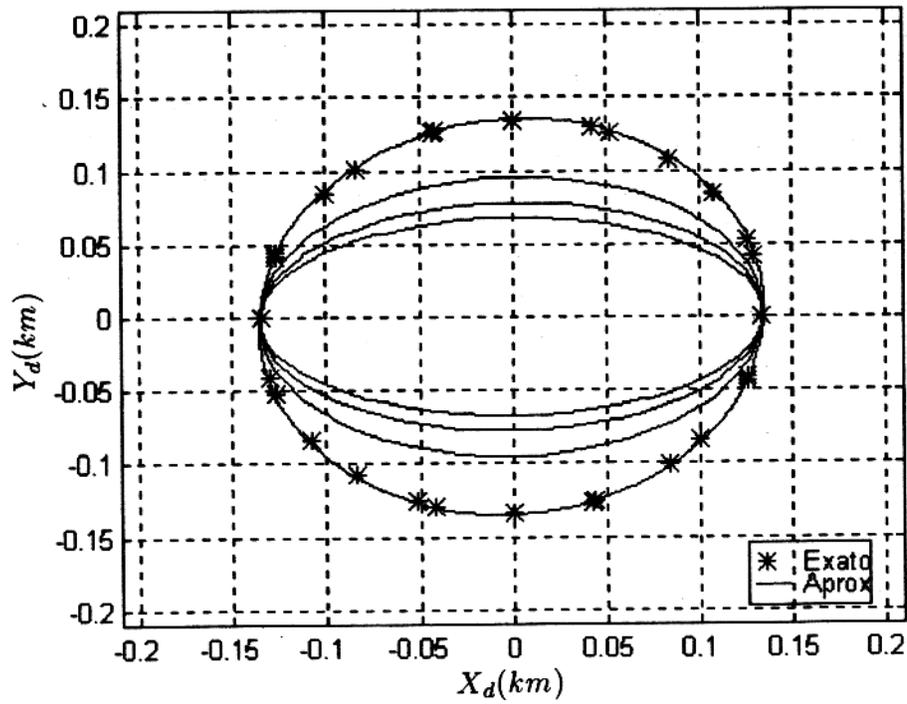


Figura 4.6 - A figura mostra o comportamento da função 4.2 quando o varia-se o parâmetro  $U_{22}$  para um tempo de trânsito constante  $T = T_c$

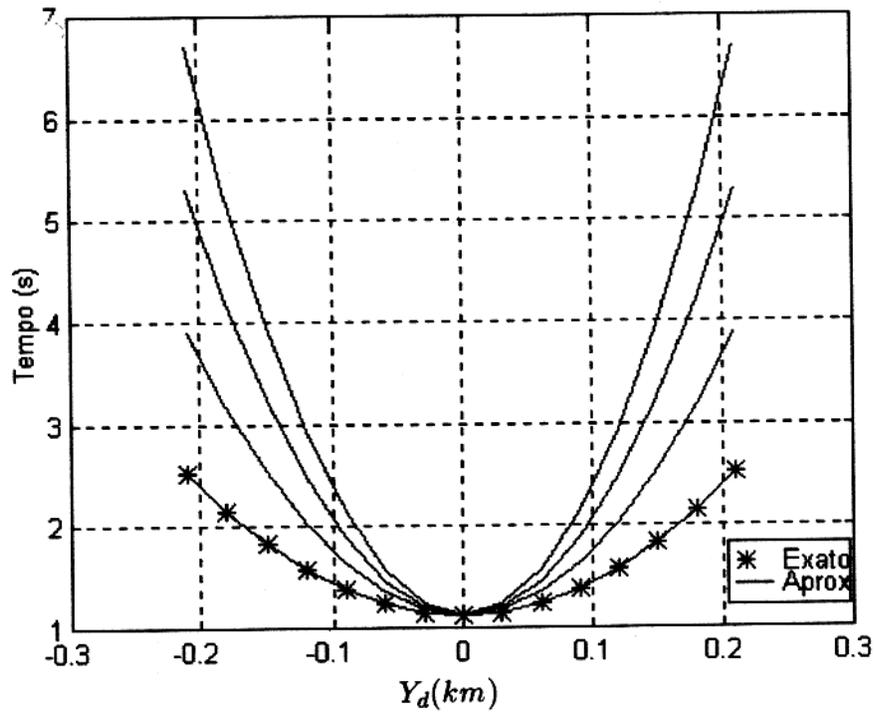


Figura 4.7 - A figura mostra o comportamento da função 4.2 quando varia-se o parâmetro  $U_{22}$  visto num corte vertical dado na superfície de tempos de trânsito no plano  $yt$

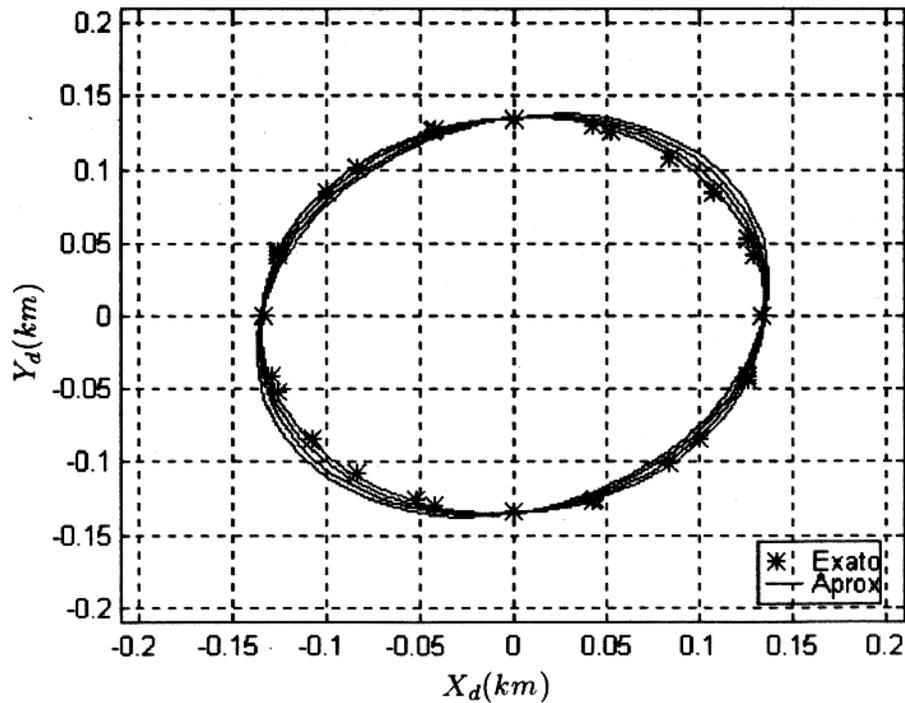


Figura 4.8 - A Figura mostra o comportamento da função 4.2 quando varia-se o parâmetro  $U_{12}$  para um tempo constante  $T = T_C$

Da mesma forma, derivando a função 4.2 com relação a  $U_{12}$  tem-se,

$$\frac{\partial T(x_d, y_d)}{\partial U_{12}} = \frac{1}{2} x_d y_d \quad (4.10)$$

que implica dizer que a variação da curva é influenciada nas duas direções  $x$  e  $y$ .

#### 4.4.3 O Comportamento dos Parâmetros $p_0$ , $q_0$ , $V_{11}$ , $V_{12}$ e $V_{22}$ na Configuração de Afastamento Nulo

##### 4.4.3.1 Considerações Iniciais

Dada a equação 4.3, considere as operações entre os vetores  $\vec{x}_m$  e a matriz  $\underline{V}_0$ . Para um dado tempo de trânsito  $T = T_c$  tem-se:

$$T_c = T_o - 2p_0 x_m - 2q_0 y_m + \frac{1}{4} V_{11} x_m^2 + \frac{1}{2} V_{12} x_m y_m + \frac{1}{4} V_{22} y_m^2 \quad (4.11)$$

apartir da equação 4.11 verifica-se que seis parâmetros podem ser avaliados, estes são:  $T_0$ ,  $p_0$ ,  $q_0$  e os elementos da matriz  $\underline{V}_0$ . No entanto para estudarmos o comportamento destes elementos individualmente usando a mesma metodologia do caso CMP, a análise desses parâmetros

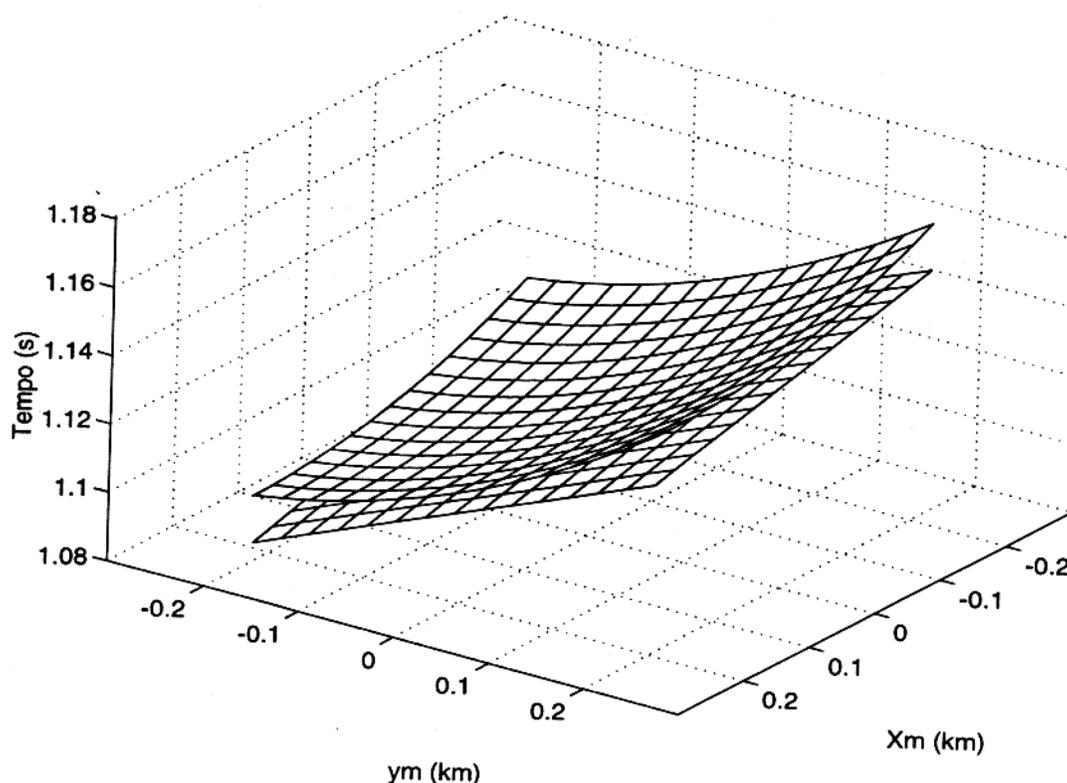


Figura 4.9 - A Figura mostra a posição das superfícies de tempos trânsito correspondentes ao refletor curvo e ao refletor cuja curvatura é nula

não nos conduziria a resultados diretos devido a relação entre os elementos  $p_0$  e  $q_0$  com os elementos da matriz  $\underline{V}_0$  através de  $x_m$  e  $y_m$ .

Considere a função 4.3, e assumirmos que o refletor possui curvatura zero, estaremos desprezando todos os elementos  $V_{11}$ ,  $V_{12}$  e  $V_{22}$  e a função depender apenas de  $x_m$  e  $y_m$  e ser dada por:

$$T = T_o - 2p_o x_m - 2q_o y_m \quad (4.12)$$

isto significa dizer que o plano tangencia a primeira quádrlica da superfície no ponto em que se verifica o ápice. Esta representação é dada pela Figura 4.9.

Se considerarmos dois cortes na superfície formada pelos tempos de trânsito de afastamento nulo dados pelos planos  $xt$  e  $yt$  teremos a seguinte representação, (Figuras 4.10 e 4.11).

Deste modo os valores de  $p_o$  e  $q_o$  podem ser extraídos diretamente das curvas de tempos de trânsito que relacionam seus respectivos valores.

O comportamento de  $p_o$  e  $q_o$  é mostrado nas Figuras 4.12 e 4.13 quando seus valores variam na função 4.12.

Apartir deste ponto podemos retomar a mesma metologia usada para o caso da configuração de ponto médio comum, onde variou-se cada parâmetro individualmente afim de

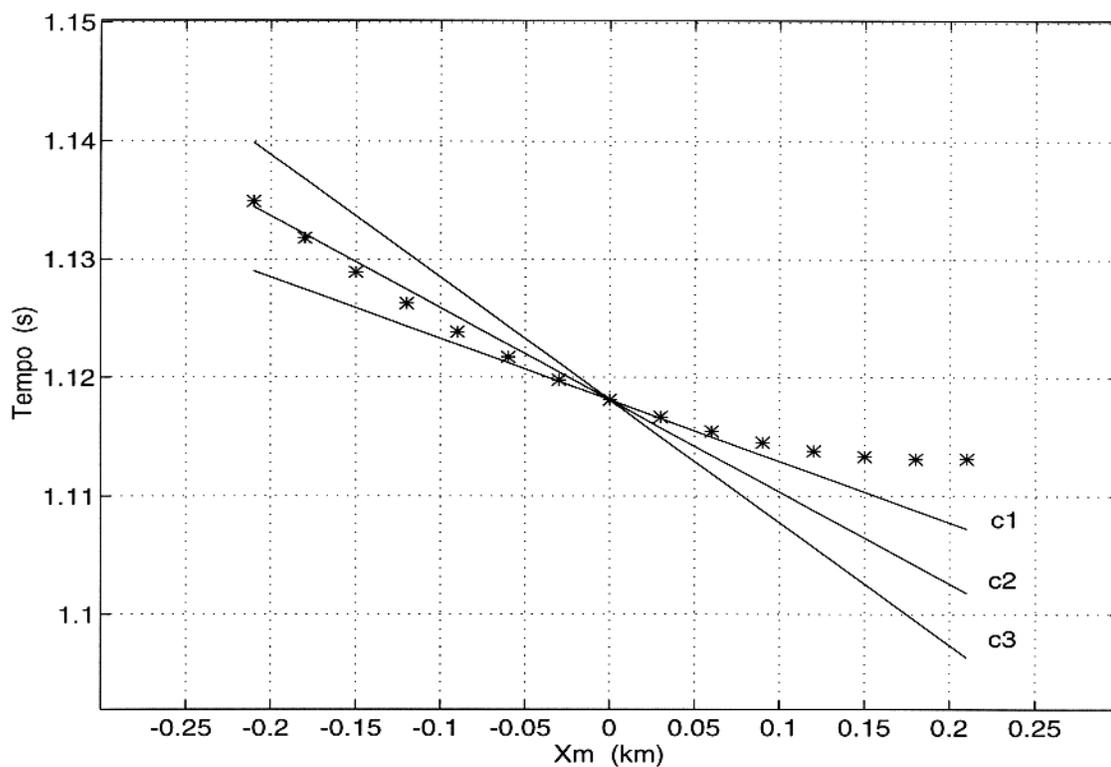


Figura 4.10 - A Figura mostra a posição das duas superfícies no plano  $xt$ .

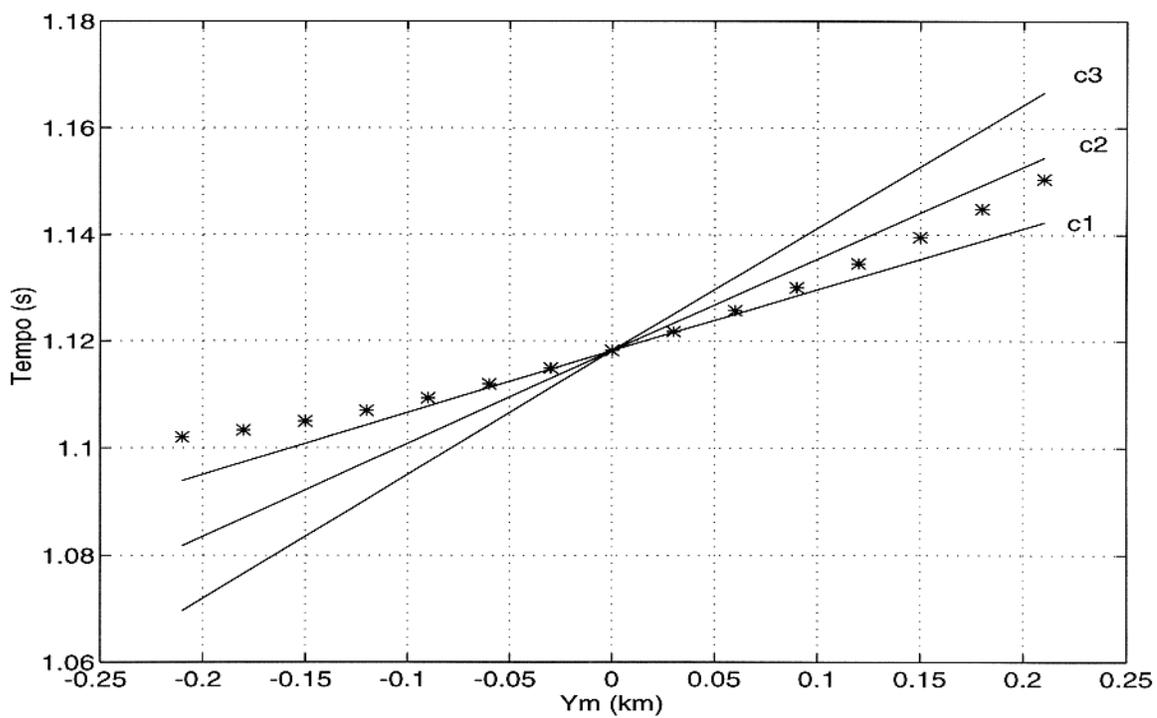


Figura 4.11 - A Figura mostra a posição das duas superfícies no plano  $yt$ .

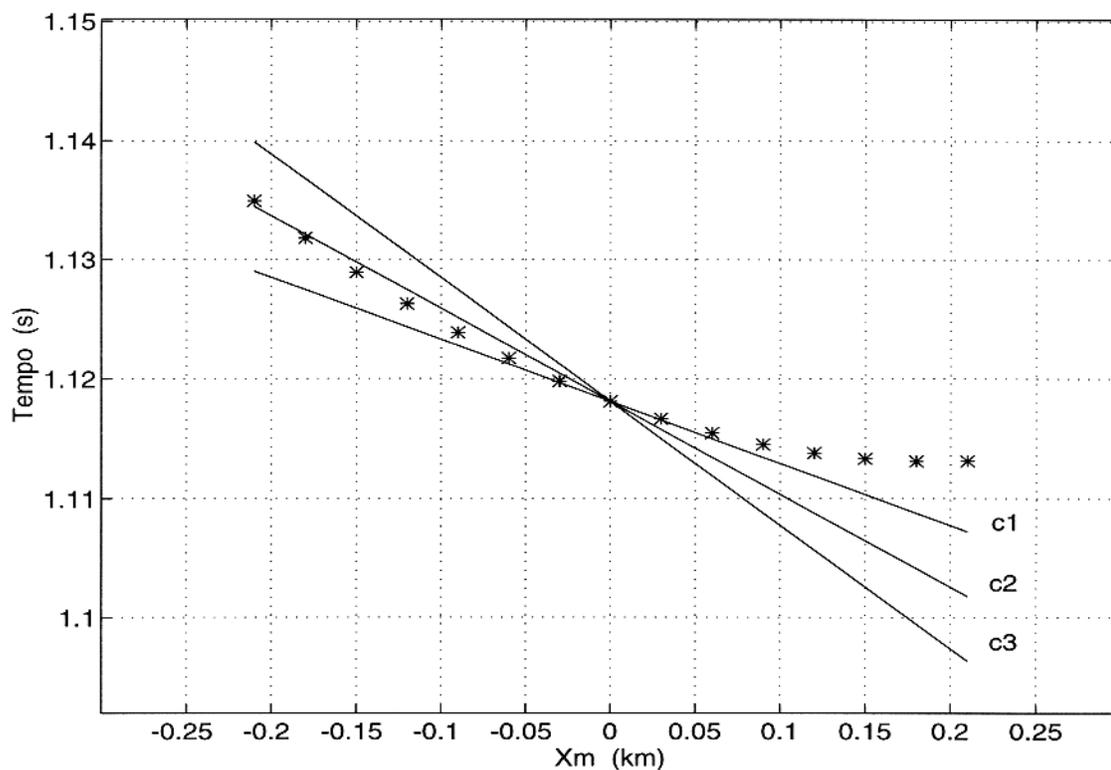


Figura 4.12 - A Figura mostra a variação da equação 4.12 quando varia-se o elemento  $p_0$ .

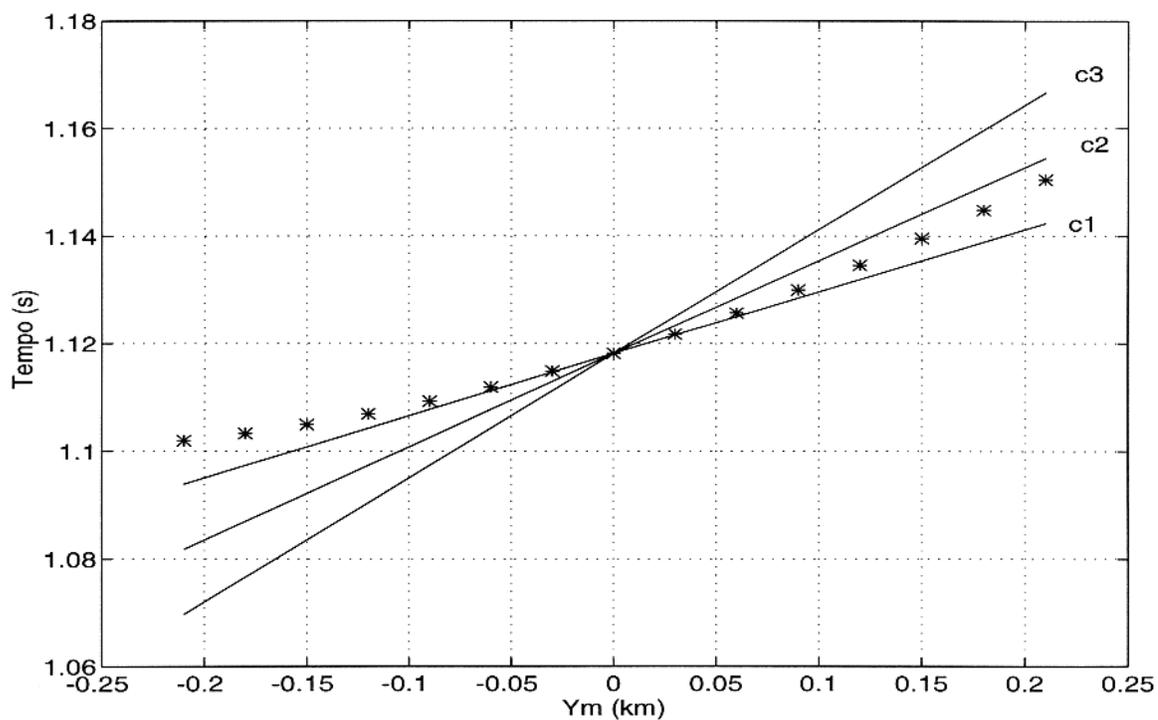


Figura 4.13 - A Figura mostra variação da equação 4.12 quando varia-se o elemento  $q_0$ .

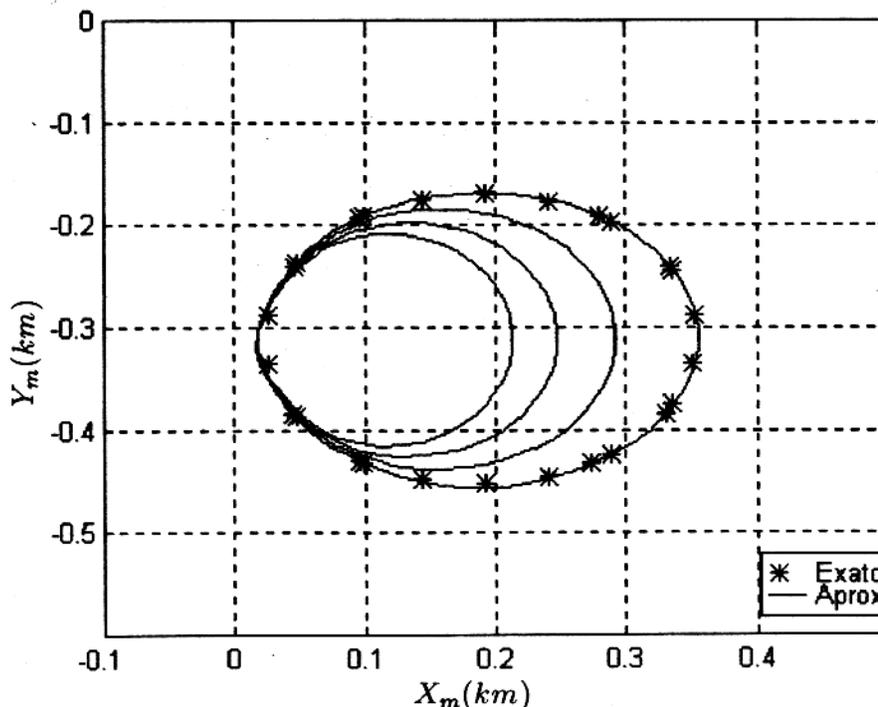


Figura 4.14 - A Figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se o parâmetro  $V_{11}$  para um tempo constante  $T = T_c$

observar o seu comportamento.

#### a - A variação do parâmetro $V_{11}$

Tomando como referência a curva central ilustrada na Figura 4.14 para um  $T = T_c$  vemos que conforme o valor de  $V_{11}$  é alterado, as curvas assumem diferentes posições na direção do eixo  $x$  até atingir os pontos que representam os tempos de trânsito observados.

Este comportamento é visto aplicando-se a derivada na função 4.3 com relação a  $V_{11}$  onde

$$\frac{\partial T(x_m, y_m)}{\partial V_{11}} = \frac{1}{4} x_m^2 \quad (4.13)$$

ou seja, a variação ocorre exclusivamente na direção  $x$ .

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram, a partir dos cortes  $xt$  e  $yt$ , o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{11}$ .

#### b - A variação do parâmetro $V_{22}$

De acordo com a Figura 4.17 nota-se que quando fazemos variar o parâmetro  $V_{22}$  a curva se move na mesma direção  $y$  para qualquer valor de  $V_{22}$  até atingir os pontos que representam os tempos de trânsito observados.

Derivando a função 4.3,

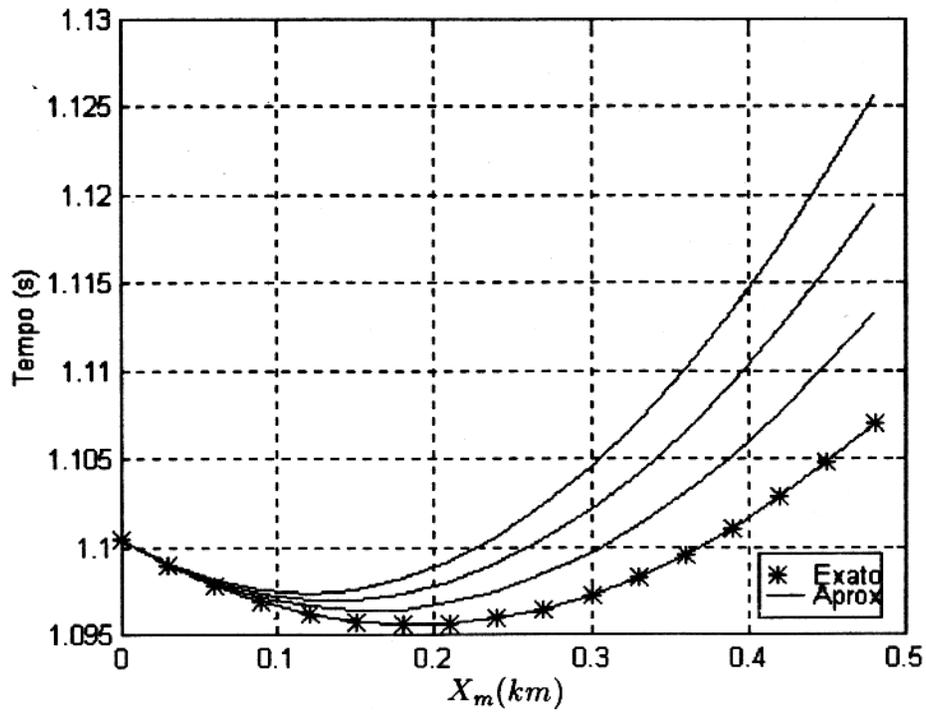


Figura 4.15 - A figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{11}$  visto num corte vertical dado na superfície de tempos de trânsito no plano  $xt$

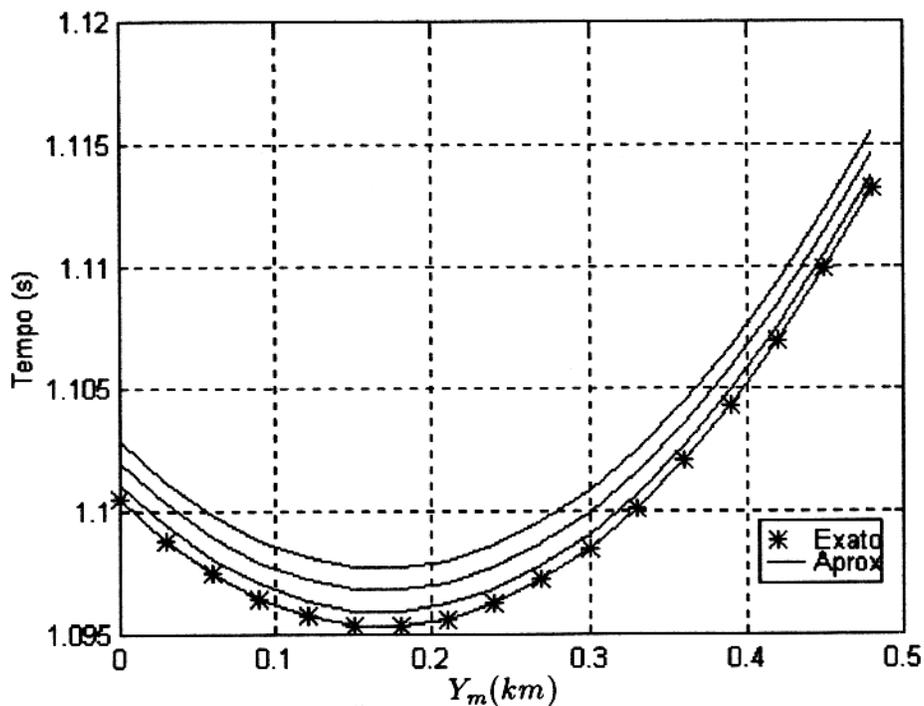


Figura 4.16 - A figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{11}$  visto num corte vertical dado na superfície de tempos de trânsito no plano  $yt$

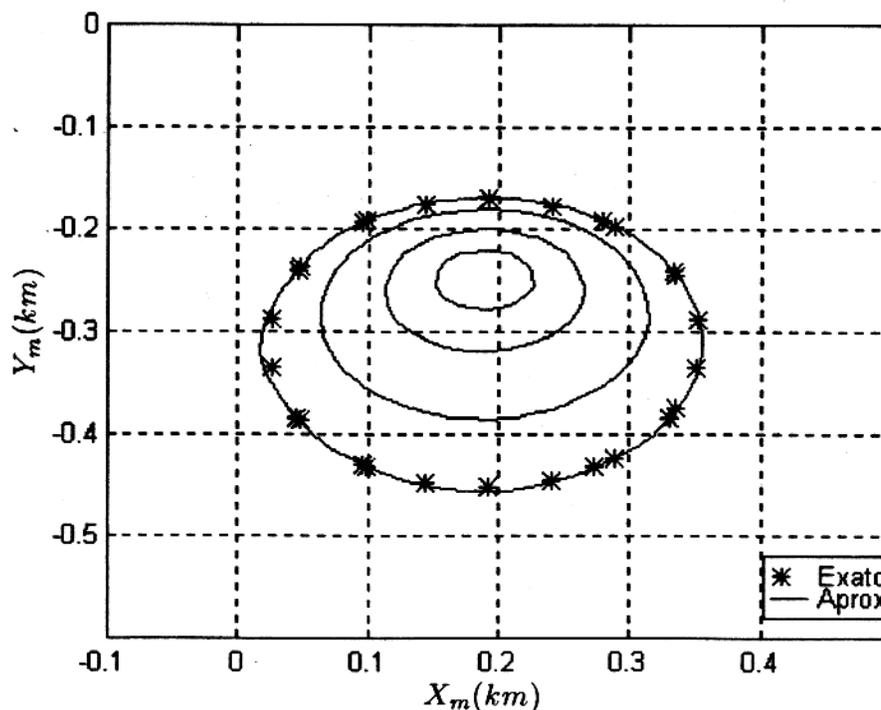


Figura 4.17 - A figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se o parâmetro  $V_{22}$  para um tempo  $T$  constante

vê-se que a variação ocorre somente na direção  $y$ .

As figuras 4.18 e 4.19 mostram, a partir dos cortes  $xt$  e  $yt$ , o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{22}$ .

#### c - A variação do parâmetro $V_{12}$

Para o caso em que  $V_{12}$ , a curva sofre ao mesmo tempo, influência nas direções  $x_m$  e  $y_m$  até atingir os pontos que representam os tempos de trânsito observados (Figura 4.20).

Derivando a função 4.3, onde

$$\frac{\partial T(x_m, y_m)}{\partial V_{12}} = \frac{1}{2} x_m y_m \quad (4.15)$$

vê-se que a variação ocorre nas direções  $x$  e  $y$ .

Devido o valor de  $V_{12}$  ser muito menor que os outros parâmetros, a título de ilustração assumimos valores numa dada ordem afim de verificarmos seu comportamento dentro a função mesmo conhecendo sua mínima influência para este caso.

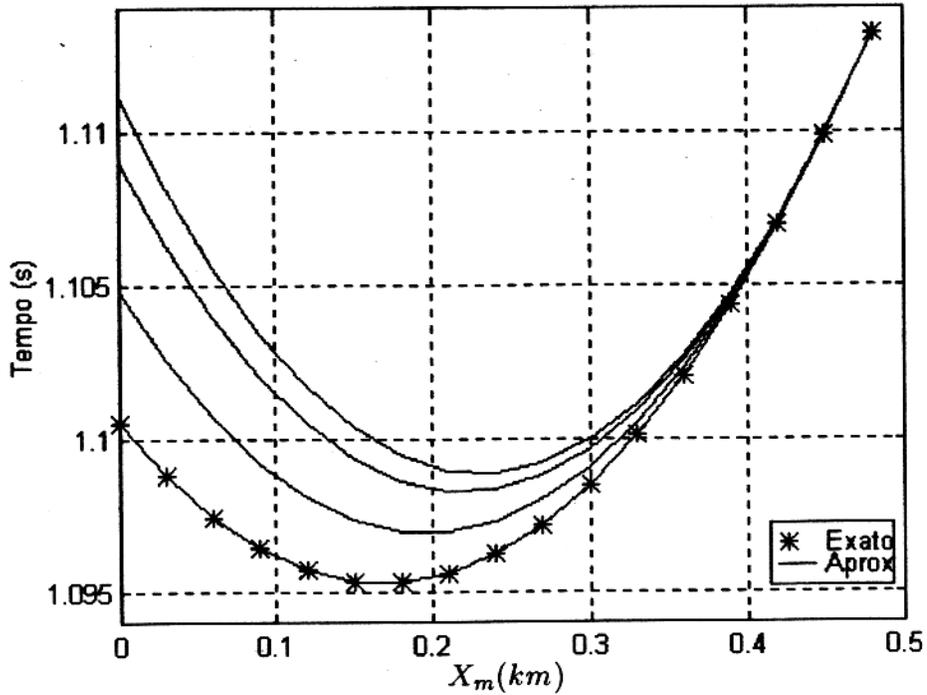


Figura 4.18 - Através de um corte vertical, a figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{22}$  no plano  $xt$

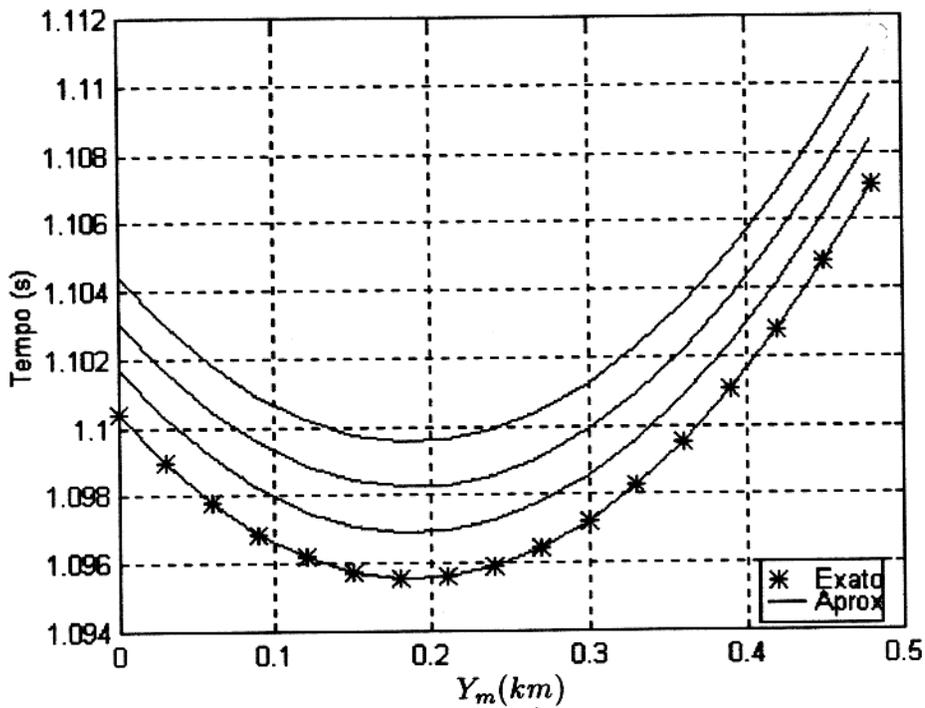


Figura 4.19 - Através de um corte vertical dado na superfície na superfície de tempos de trânsito, a figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se  $V_{22}$  no plano  $yt$

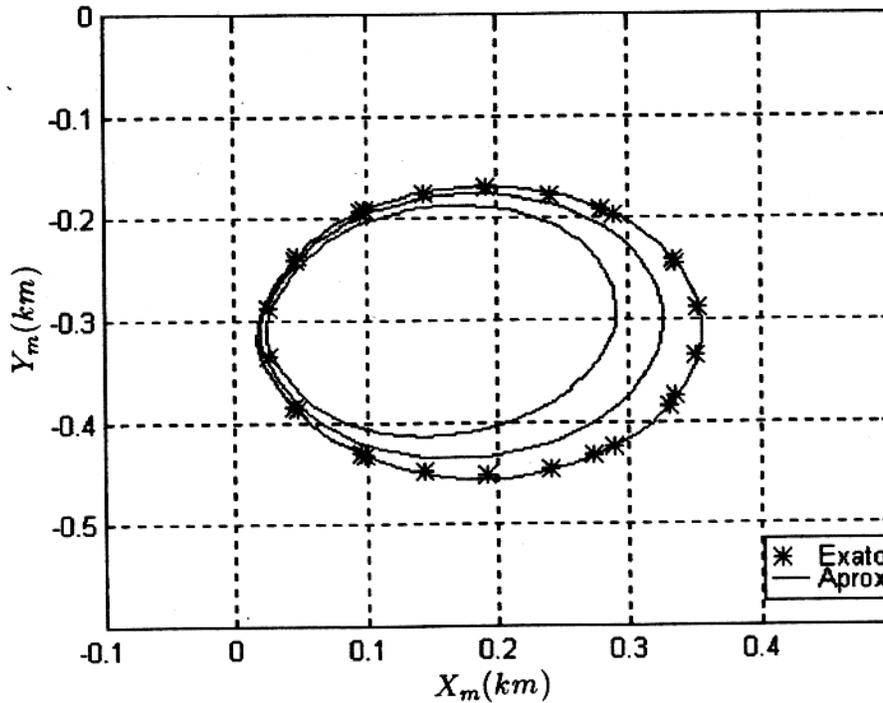


Figura 4.20 - A figura mostra o comportamento da função 4.3 quando varia-se o parâmetro  $V_{12}$  para um tempo  $T$  constante

#### 4.5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO A UM MODELO SINTÉTICO

A seção atual é reservada à aplicação da teoria apresentada neste trabalho tomando como exemplo a recuperação da função característica partindo de um corte horizontal num determinado tempo de trânsito.

Nesta seção estarão compreendidas as seguintes etapas: Descrição do modelo, geração e tratamento de dados e os resultados obtidos apartir do exemplo.

##### 4.5.1 Considerações Iniciais

O modelo testado representa um exemplo de sistema sísmico composto de uma camada homogênea e isotrópica, onde a interface do modelo, suavemente curva, mergulha em direção arbitrária.

O modelo está definido numa área de  $36km^2$  (Figura 4.21).

A geração de dados foi feita através do programa para traçamento de raios em meios 3D (Costa, 1993), tal programa calcula os tempos de trânsito a partir dos raios refletidos que percorrem os sistema sísmico desde a posição da fonte até o receptor.

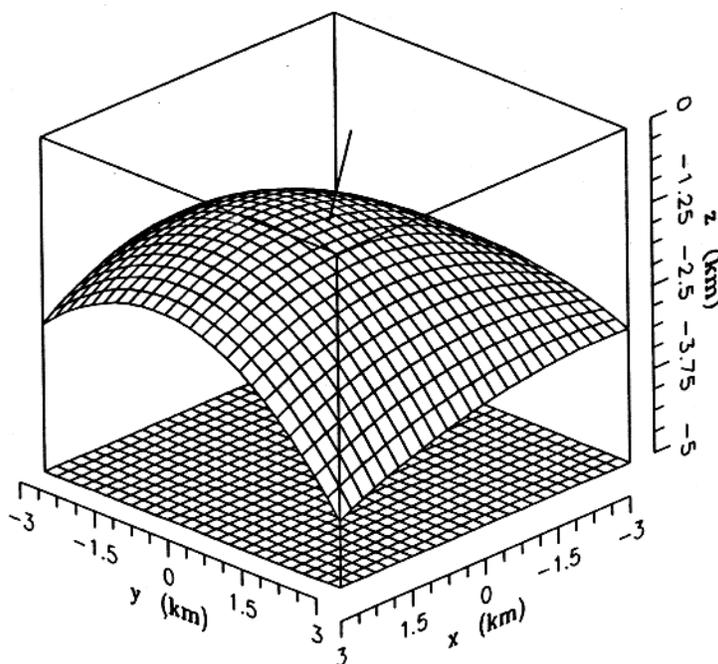


Figura 4.21 - A representação do modelo tridimensional com interface suavemente curva

O programa é baseado no traçamento dinâmico dos raios.

O registro de dados foi executado obedecendo os critérios do método de levantamento em cobertura múltipla numa área plana de  $2x2\text{km}$ . A Figura 4.22 mostra a disposição entre as fontes e os geofonos.

As fontes situam-se ao longo das linhas de disparo com a distância de 25m entre si, cada linha contém 17 receptores totalizando 17 linhas paralelas entre si.

Este procedimento resulta num conjunto de registros tempos de trânsito para cada refletor em suas respectivas posições que estão dispostos numa matriz de dados.

Para solucionar o sistema de equações usou-se o método mencionado na seção 4.2.

#### 4.5.2 A Recuperação da Função Característica Através de Cortes Horizontais no Tempo

Esta seção objetiva recuperar a função característica do refletor através do ajuste de parâmetros nas respectivas configurações de dados ponto médio comum e afastamento nulo usando cortes horizontais nas seções de tempos de trânsito.

Na seção anterior, observou-se o comportamento que cada parâmetro apresentou quando

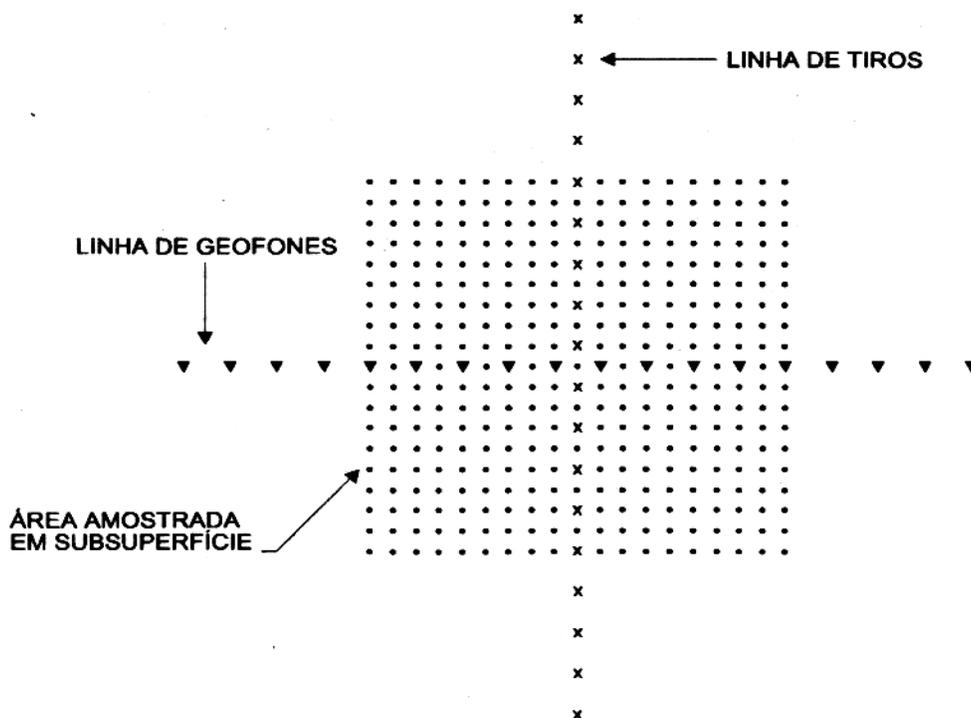


Figura 4.22 - Configuração de dados em cobertura múltipla 3D (Johann, 1992)

os submetemos a uma determinada variação.

Neste exemplo, considerando o comportamento que cada parâmetro mostrou anteriormente em suas devidas configurações de dados, partiremos de um corte horizontal numa seção de tempos de trânsito num tempo  $T = T_c$  (nas configurações de ponto médio comum e afastamento nulo) a fim de estabelecermos um ajuste entre o corte horizontal e os pontos que representam o tempo de trânsito observado nas diferentes posições a partir da variação individual de cada parâmetro nas devidas configurações de dados.

Este procedimento resume-se:

Conhecendo-se o tempo de trânsito no raio central e partindo-se de um corte horizontal na superfície dos tempos de trânsito onde todos os parâmetros da função, que define tal superfície, encontram-se alterados, tenta-se ajustar cada parâmetro sobre o corte nas diferentes configurações CMP e afastamento nulo. O parâmetro já ajustado é mantido fixo enquanto repete-se o mesmo procedimento para o próximo parâmetro até que todo o corte esteja ajustado sobre os pontos (tempos observados).

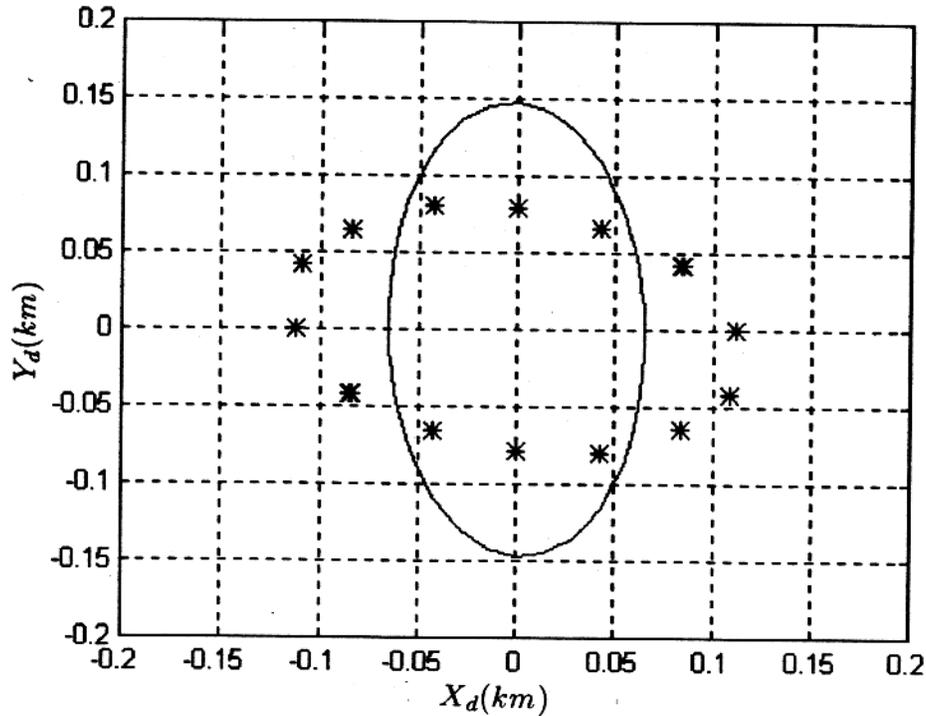


Figura 4.23 - Corte horizontal dado a uma superfície de tempos de trânsito numa configuração CMP é comparado com os pontos que representam o tempo de trânsito observado nas diferentes posições  $x_d$  e  $y_d$ .

#### 4.5.2.1 A Recuperação dos Parâmetros na Configuração CMP

Conforme a equação 4.7

$$T_c = T_o - U_{11}x_d^2 + 2U_{12}x_dy_d + U_{22}y_d^2 \quad (4.16)$$

partiremos de um corte, dado a uma seção CMP cujos parâmetros que determinam a função característica foram completamente alterados. A forma deste corte é ilustrada pela Figura 4.23 quando comparada aos pontos que representam o tempo de trânsito observado naquelas posições.

Seja  $T_0$  conhecido, os elementos que desejamos ajustar são:  $U_{11}$ ,  $U_{12}$  e  $U_{22}$ . Esses ajustes são discutidos para cada caso nos itens abaixo.

##### a - O ajuste do parâmetro $U_{11}$

Variando-se apenas o parâmetro  $U_{11}$  a Figura mostra que a curva desloca-se na direção do eixo  $x$  at tocar os pontos nesta direção, isto significa que podemos fixar este valor enquanto variam-se os próximos (Figura 4.24).

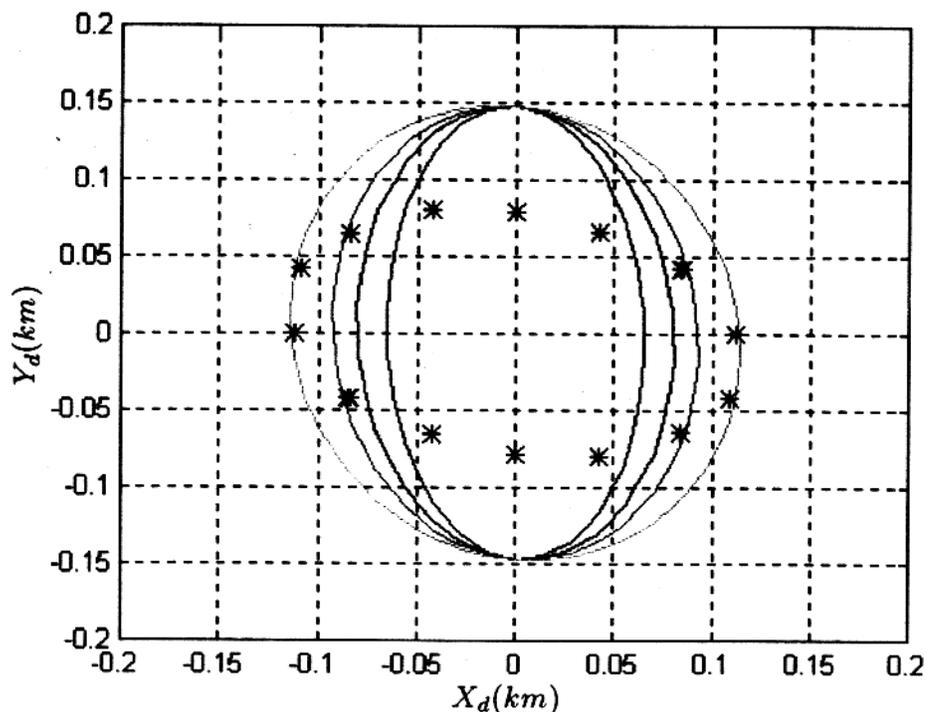


Figura 4.24 - O ajuste do parâmetro  $U_{11}$  é feito sobre os pontos que definem o corte na seção de tempos de trânsito num tempo  $T = T_c$

#### b - O ajuste do parâmetro $U_{22}$

Partindo da posição assumida pela curva quando do último ajuste, o parâmetro a ser variado é agora  $U_{22}$ .

Usando a mesma metodologia anterior, conforme varia-se o valor de  $U_{22}$  a curva desloca-se na direção do eixo  $y$  até atingir os pontos representados pelo tempo de trânsito observado naquelas posições (Figura 4.25).

#### c - O ajuste do parâmetro $U_{12}$

Referenciando-se a última posição assumida pela curva, observa-se agora o ajuste sobre o parâmetro  $U_{12}$  quando variam-se os seus valores até o ajuste total com o tempo observado naquelas posições (Figura 4.26).

#### 4.5.2.2 A Recuperação dos Parâmetros na Configuração de Afastamento Nulo

Partindo do fato que  $T_o$ ,  $p_o$  e  $q_o$  já são conhecidos, o ajuste da curva ser baseado somente na variação dos elementos  $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_{22}$  na função

$$T_c = T_o - 2p_o x_m - 2q_o y_m + \frac{1}{4}V_{11}x_m^2 + \frac{1}{2}V_{12}x_my_m + \frac{1}{4}V_{22}y_m^2.$$

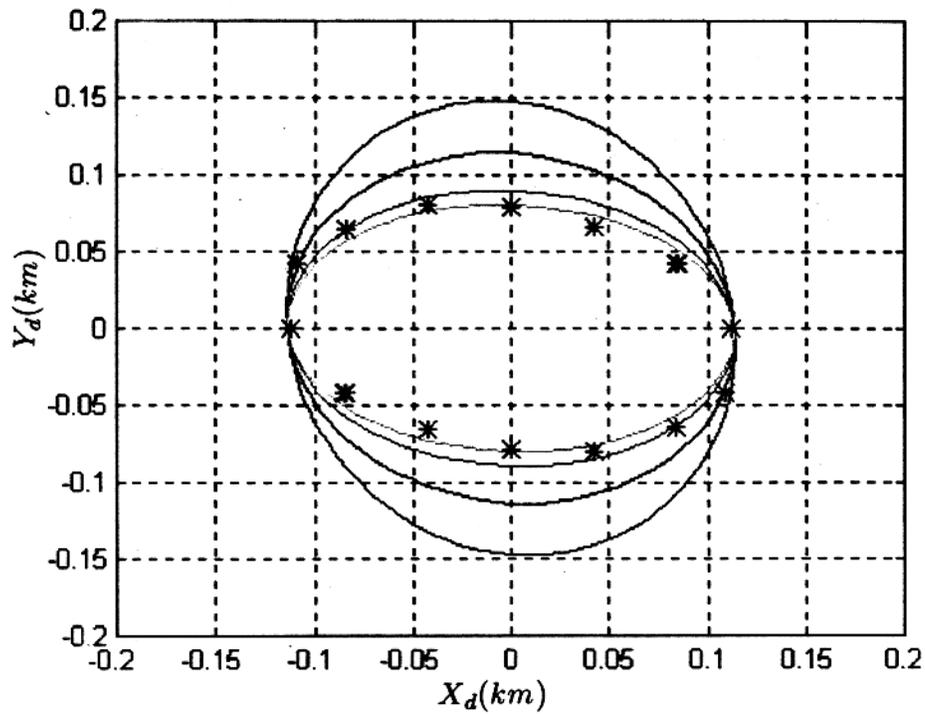


Figura 4.25 - A figura mostra o ajuste do parâmetro  $U_{22}$  sobre os pontos que definem o corte na seção de tempos de trânsito num tempo  $T = T_c$ .

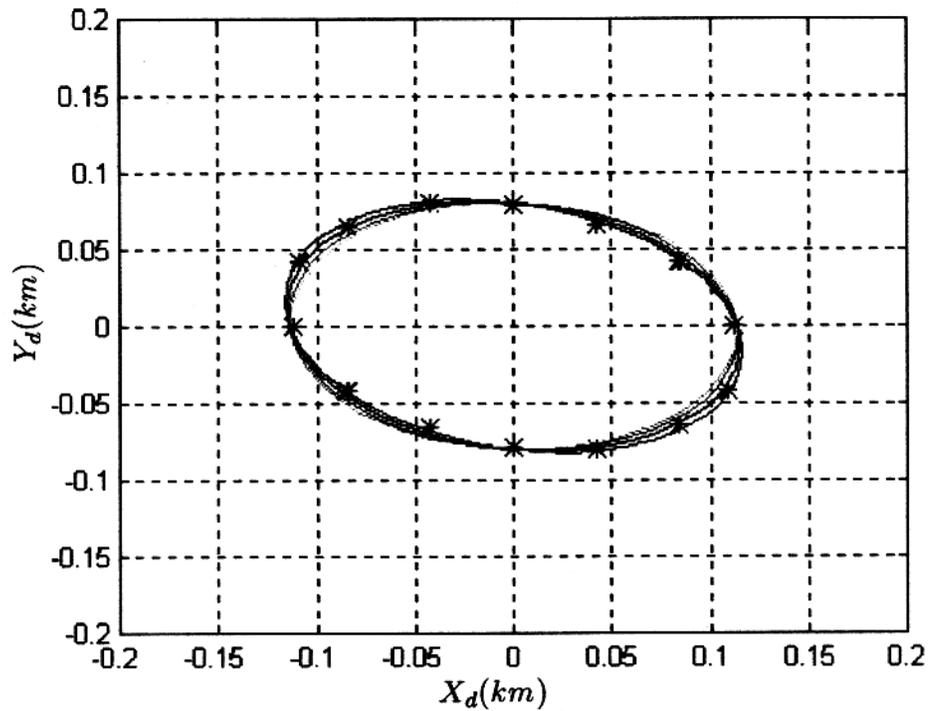


Figura 4.26 - A figura mostra o ajuste do parâmetro  $U_{12}$  sobre os pontos do corte horizontal na seção de tempos de trânsito num tempo  $T = T_c$ .

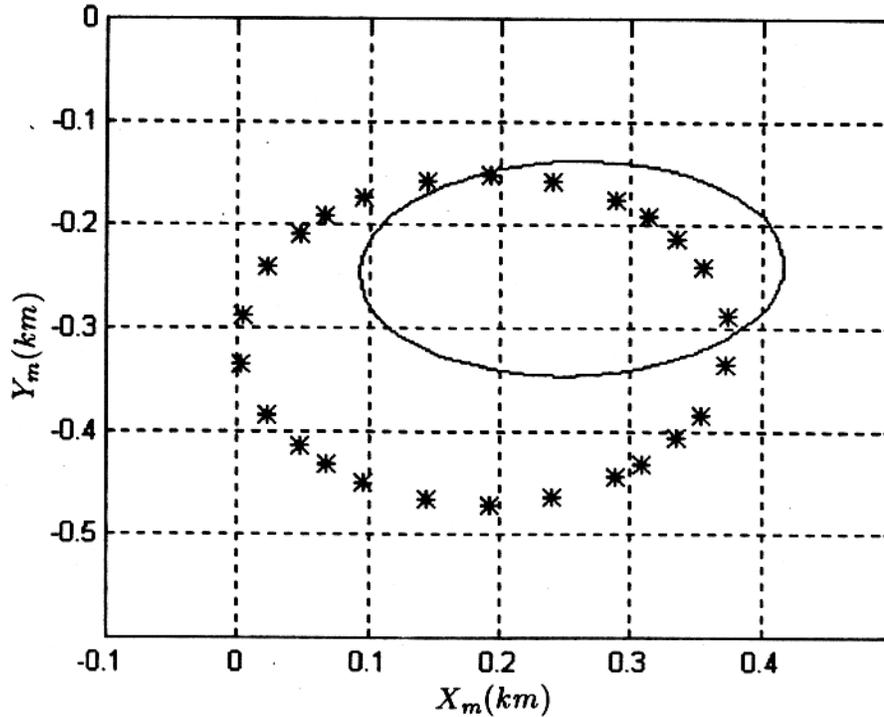


Figura 4.27 - Corte horizontal dado a uma superfície de tempos de trânsito numa configuração de afastamento nulo é comparado com os pontos que representam o tempo de trânsito observado nas diferentes posições  $x_m$  e  $y_m$ .

Usando a mesma metodologia que foi aplicada na recuperação dos parâmetros para o caso da configuração de ponto médio comum, partiremos de um corte horizontal dado a uma seção de afastamento nulo, cujos parâmetros que determinam a função de tempos de trânsito encontram-se alterados (Figura 4.27).

Os ajuste são discutidos para cada caso nos itens abaixo.

**a - O ajuste do parâmetro  $V_{11}$**

Variando os valores do parâmetro  $V_{11}$ , a curva resultante destas variações percorre várias posições até que seu eixo  $y$  coincida com o eixo  $y$  da curva que representa corte horizontal no tempo  $T = T_c$  (Figura 4.28).

Apartir daqui podemos fixar o primeiro elemento  $V_{11}$  e adiante variar os parâmetros  $V_{22}$  e  $V_{12}$ .

**b - O ajuste do parâmetro  $V_{22}$**

Seguindo o procedimento de recuperação dos parâmetros vamos ajustar agora o elemento  $V_{22}$ . Na Figura 4.29 observa-se que quando varia-se  $V_{22}$  a curva desloca-se em direção ao eixo  $y$  até atingir os pontos do corte horizontal nesta direção.

**c - O ajuste do parâmetro  $V_{12}$**

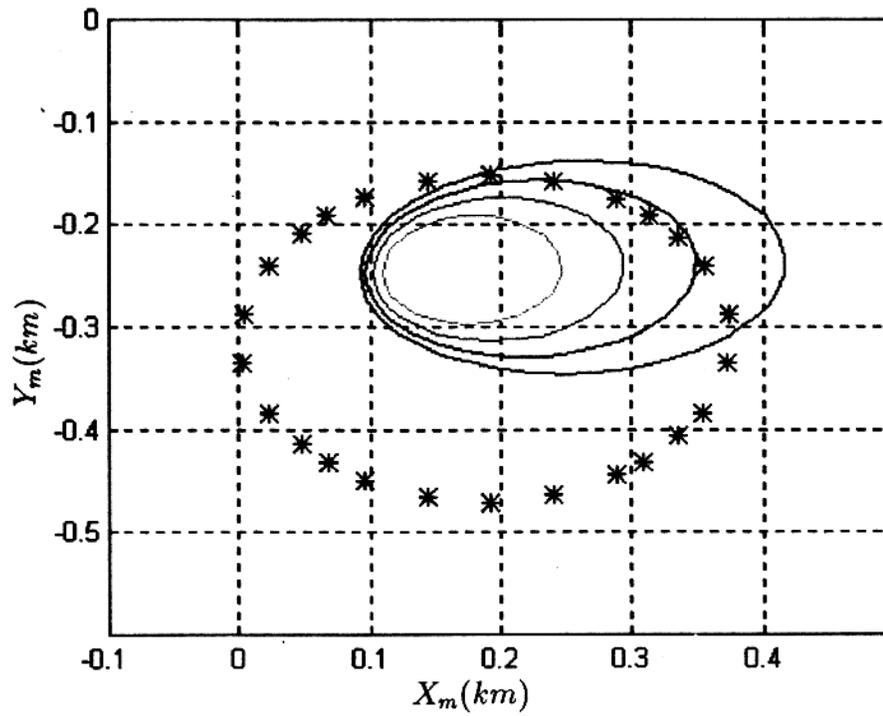


Figura 4.28 - A figura mostra o ajuste do parâmetro  $V_{11}$  sobre os pontos que definem o corte num tempo  $T = T_c$

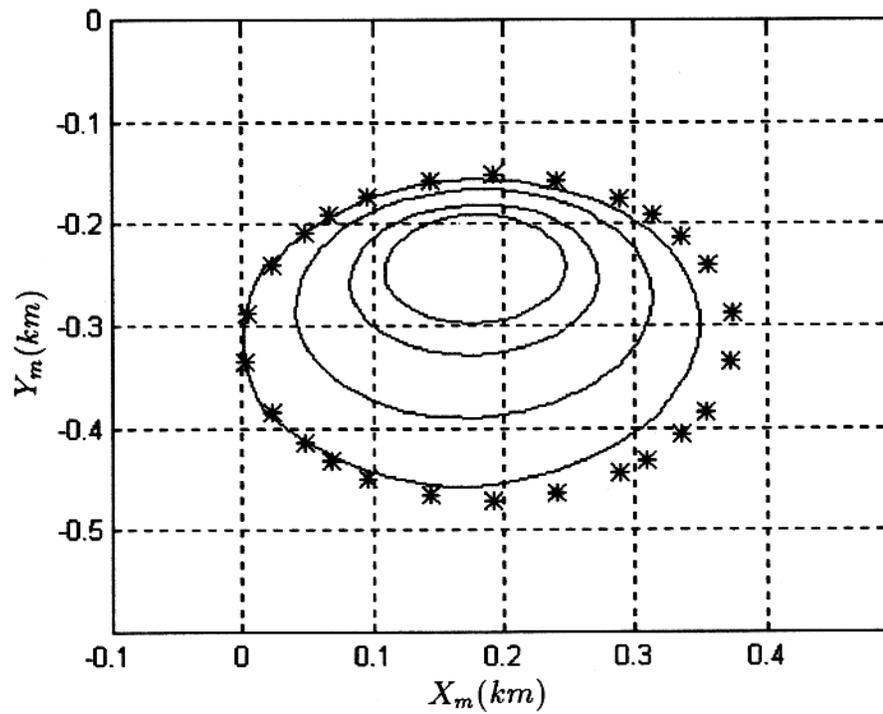


Figura 4.29 - A figura mostra o ajuste do parâmetro  $V_{22}$  sobre os pontos que definem o corte num tempo  $T = T_c$

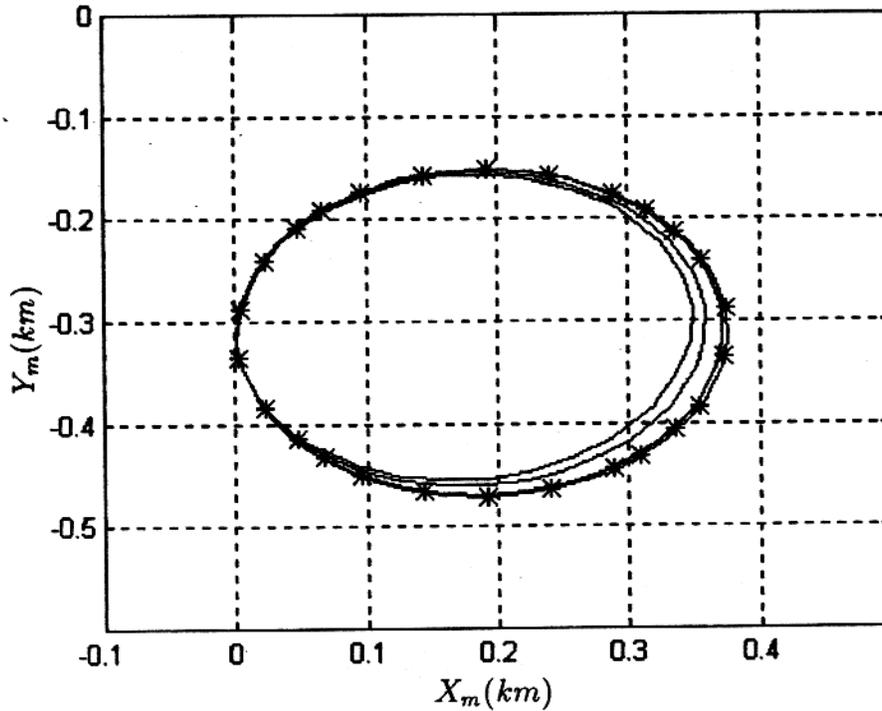


Figura 4.30 - A figura mostra o ajuste do parâmetro  $V_{12}$  sobre os pontos que definem o corte num tempo  $T = T_c$

Por último a variação de  $V_{12}$  deve ajustar completamente a curva variante ao corte horizontal (Figura 4.30).

O exemplo mostrado nesta seção partiu de um critério visual para estimar os parâmetros da função característica, através de cortes horizontais numa seção 3D. Baseado no comportamento individual de cada parâmetro nas configurações ponto médio comum e afastamento nulo permitiu um ajuste completo entre a curva dos tempos observados e aquela que seria dada pela determinação desses parâmetros. Este procedimento é válido quando aplicado em duas etapas através das configurações de ponto médio comum e afastamento nulo e pode ser considerado como um critério na determinação dos nove parâmetros que constituem a função característica para um meio 3D.

## 5 - CONCLUSÃO

Usando as aproximações de segunda ordem de tempos de trânsito, estimou-se os parâmetros que determinam a função característica de tempos de trânsito para os eventos refletidos a partir das configurações de ponto médio comum e afastamento nulo.

O método usado para determinar a função característica basea-se na Teoria do Raio Paraxial e é válido para o caso em que os modelos geológicos satisfazem as propriedades que caracterizam um sistema sísmico.

Esta função que corresponde a função característica de Hamilton é independente da configuração de dados entre as fontes e os receptores na superfície de levantamento e pode ser determinada a partir de pelo menos nove pontos de medidas devidamente escolhidos.

De posse da função característica para um meio 3D, com o auxílio de cortes horizontais nas seções de tempos de trânsito observou-se a influência que cada parâmetro (numa configuração particular de dados) exercia na função característica quando da variação dos mesmos.

Partindo dessas observações estabeleceu-se um critério para estimar os parâmetros da função característica a partir de cortes horizontais numa seção de tempos de trânsito (time slices). Este mesmo critério foi utilizado num exemplo onde a partir de um corte horizontal qualquer no tempo (supondo conhecer o tempo na posição do raio central) estimou-se os parâmetros da função característica, quando do ajuste entre a função calculada e a função de tempos observados.

Apartir desta análise, verificou-se que os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios na determinação da função característica, permitindo a sua aplicação como uma ferramenta no processamento de dados sísmicos, mais especificamente no que se refere a etapa de análise de velocidades bem como no processo da migração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONE, M. R., GILES, B. F., TEGLAND, E.R. 1975. Analisis of seismic data using horizontal cross-sections. In: ANN. INT. SOC. EXPLOR. GEOPHYS. MTG.,45.,Oklahoma,1975,**Expanded Abstract**, p.120-125.
- BORTFELD, R. 1989. Geometrical rays theory: rays and traveltimes in seismic systems (second order approximation).**Geophysics**, 54:342-349.
- BORTFELD, R., KEMPER, M. 1991. Line foci and foci in the anterior surface of seismic systems (second order approximation of the traveltimes), **Geophysics**,56:806-811.
- BROWN, A. R., GRAEBNER, R. J., DAHN, C.G. 1982.**Use of horizontal seismic sections to identify subtle traps, in the Deliberat Search for the Subtle Trap.** Am. Assoc. Petr. Geol., p.47-56,(Memoir 32).
- BRÜHL, M. 1988. **Strahlenabbildung und eikonal in der seismik (Naherugen dritter Ordnung für die Lauzeiten)**, Clausthall, Tech. Univ. Clausthall.70p.Dissertation (Diplom Arbeitet), Tech. Univ. Clausthall,1988.
- BUCHDAHL, H. A. 1970. **An introduction to Hamilton optics.** Cambridge Univ. press.
- CERVENY, V. 1985. The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wavefields in complex structures. In HELBIG, K., & TREITEL, S., Eds., **Shear Waves.** : Geophysical Press,p.1-124.(**Handbook of Geophysical Exploration**, 15).
- COSTA,J., SCHOENBERG, M., URBAN, J. 1993. 3D Raytracing throught no-flat homogeneous anisotropic layers. In INT. CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. 3.,Rio de Janeiro,1993. **Expanded Abstract**, V1: p.47-52.
- DESCHAMPS, G. A. 1972. Ray techniques in eletromagnetics. **Proceedings of the IEEE**, 60(9): 1022-1035.
- DIEBOLD, J. B. 1987. Three-dimensional traveltime equation for dipping layers. **Geophysics**, 52: 1492-1500.
- DIX, C. H. 1955. Seismic velocities from surface measurements. **Geophysics**,20:68-86.

- HERZBERGER, M. 1958. **Modern Geometrical Optics**. Interscience Publ. Inc.
- HUBRAL, P. 1980. Wavefront curvatures in the three-dimensional laterally inhomogeneous media with curved interfaces , **Geophysics**, 45:905-913.
- HUBRAL, P. 1983. Computing true amplitudes reflections in a laterally inhomogeneous earth., **Geophysics**, 48:1051-1062.
- HUBRAL, P., KREY, T. 1980. **Intervalar velocities from seismic reflection time measurements**. Soc. Explor. Geophys.
- HUBRAL, P., SCHLEICHER, J., TIGEL, M. 1993. Three-dimensional primary zero offset reflections. **Geophysics**, 57(6):692-702.
- JOHANN P., 1992. **Curso de sísmica tridimensional**. PETROBRAS.
- KHAN, S. U., 1987. **Die aufdeckung der mehrdeutigkeiten in der reflexionsseismik**; Dissertation, Tech. Univ. Clausthal.
- LEVIN, F. K., 1971. Apparent velocity from dipping interface reflections; **Geophysics**, 36(3):510-516.
- MENKE, W., 1989. **Geophysical Data Analysis: Discrete inverse theory** Ac. Press.
- SCHLEICHER, J., TYGEL, M., HUBRAL, P. 1993. Parabolic and hiperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media; **Geophysical Prospecting**, 41:495-513.
- SHAH, P. M. 1973. Ray tracing in the three dimensions; **Geophysics**, 38(3):600-604.
- URSIN, B. 1982. Quadratic wavefront and the travelttime approximations in inhomogeneous layered media with curved intefaces; **Geophysics**, 47(7):1012-1021.
- VIDES, L.M., HUBRAL, P., SÖLLNER, W. Intervalar Velocity Determination by Time Migration Decoposition: A Synthetic Data Aplication. In INT. CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. 5., São Paulo, 1997. **Expanded Abstract**, V1: p.184-186.
- YILMAZ, Ö. 1983. **Seismic data processing**; Tulsa, SEG

## APÊNDICE

## A - A PROPRIEDADE SIMPLÉTICA

Dada a matriz de propagação

$$T = \begin{pmatrix} \underline{A}_o & \underline{B}_o \\ \underline{C}_o & \underline{D}_o \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Por definição diz-se que uma matriz simplética se satisfaz a seguinte equação:

$$\begin{pmatrix} \underline{D}_o^T & -\underline{B}_o^T \\ -\underline{C}_o^T & \underline{A}_o^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{A}_o & \underline{B}_o \\ \underline{C}_o & \underline{D}_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{I} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{I} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

O que implica dizer que as condições abaixo são satisfeitas.

$$\underline{A}_o^T \underline{C}_o = \underline{C}_o^T \underline{A}_o \quad (\text{A.3})$$

$$\underline{B}_o^T \underline{D}_o = \underline{D}_o^T \underline{B}_o \quad (\text{A.4})$$

$$\underline{C}_o^T \underline{B}_o = \underline{A}_o^T \underline{D}_o - \underline{I} \quad (\text{A.5})$$

$$\underline{D}_o^T \underline{A}_o = \underline{I} - \underline{B}_o \underline{C}_o^T \quad (\text{A.6})$$

Tomando as equações de transferência do raio

$$\vec{x}' = \underline{A}_o \vec{x} + \underline{B}_o [\vec{p} - \vec{p}_0] \quad (\text{A.7})$$

$$\vec{p}' = \underline{C}_o \vec{x} + \underline{D}_o [\vec{p} - \vec{p}_0] \quad (\text{A.8})$$

onde  $d\vec{x}' = \underline{A}_o d\vec{x} + \underline{B}_o d\vec{p}$ . A Substituição deste resultado na equação de Hamilton dada por  $dt = \vec{p}' \cdot d\vec{x}' - \vec{p} \cdot d\vec{x}$  nos fornece o seguinte resultado:

$$dt = [\underline{C}_o \vec{x} + \underline{D}_o (\vec{p} - \vec{p}_0)] [\underline{A}_o d\vec{x} + \underline{B}_o d\vec{p}] - \vec{p} d\vec{x} \quad (\text{A.9})$$

Calculando as segundas derivadas em A.8 têm-se,

$$T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \underline{\underline{A}}^T \underline{\underline{C}}. \quad (\text{A.10})$$

$$T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 t}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 t}{\partial p \partial q} \\ \frac{\partial^2 t}{\partial p \partial q} & \frac{\partial^2 t}{\partial q^2} \end{pmatrix} = \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{D}}. \quad (\text{A.11})$$

$$T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial p} & \frac{\partial^2 t}{\partial x \partial q} \\ \frac{\partial^2 t}{\partial y \partial p} & \frac{\partial^2 t}{\partial y \partial q} \end{pmatrix} = \underline{\underline{A}}^T \underline{\underline{D}} - \underline{\underline{I}} \quad (\text{A.12})$$

$$T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 t}{\partial p \partial x} & \frac{\partial^2 t}{\partial p \partial y} \\ \frac{\partial^2 t}{\partial q \partial x} & \frac{\partial^2 t}{\partial q \partial y} \end{pmatrix} = \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{C}}. \quad (\text{A.13})$$

As matrizes acima são simétricas e obedecem as propriedades comutativas da derivada satisfazendo as condições A.3 até A.6, logo fica garantida a propriedade de simpleticidade para a matriz de transferência do raio.

O produto de duas matrizes simpléticas assim como suas inversas, transpostas e conjugadas complexas também são simpléticas (Deschamps, 1972)