



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM SÍSMICA DE TEMPOS DE
TRÂNSITO DE REFLEXÃO EM INTERFACE
PARABÓLICA

MARCOS ROGÉRIO LIMA TELES

SALVADOR – BAHIA

SETEMBRO - 2001

MODELAGEM SÍSMICA DE TEMPOS DE TRÂNSITO DE REFLEXÃO EM
INTERFACE PARABÓLICA

por

MARCOS ROGÉRIO LIMA TELES

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

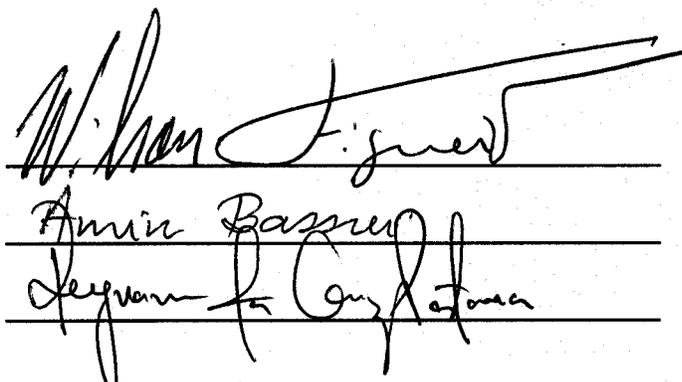
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



Comissão Examinadora

Dr. Wilson Mouzer Figueiró - Orientador

Dr. Amin Bassrei

Dr. Reynan da Cruz Pestana

Data da aprovação: 25 de setembro de 2001

“Está na moda enfatizar os horrores da guerra. Eu não a acho assim tão horrorosa. A guerra é tão horrível quanto coisas que acontecem ao nosso redor todos os dias, se ao menos temos olhos para vê-las.”

Ludwig Wittgenstein

RESUMO

O presente trabalho faz uma abordagem do problema direto na sísmica. O objetivo central é a geração de tempos de trânsitos de reflexão de raios sísmicos, isto é, que são originados na superfície de observação, propagam-se através de um meio isotrópico (homogêneo ou heterogêneo), são refletidos em interfaces parabólicas e retornam à superfície de observação sendo registrados em receptores. Em resumo, faz-se uma modelagem de tempos de trânsito de reflexão para meios bidimensionais isotrópicos com refletor parabólico.

No capítulo 1 é feito um desenvolvimento teórico para o traçado e cálculo dos tempos de trânsito de raios, através de uma estratégia geométrica em meio homogêneo. Para meios heterogêneos utiliza-se as equações do raio (Červený, 1887). Esse capítulo estabelece uma base teórica necessária para a construção de dois programas computacionais a serem empregados em capítulos posteriores.

No capítulo 2 apresentamos os procedimentos experimentais realizados, aborda-se a modelagem direta composta de duas fases: definição dos modelos de velocidades e simulação do experimento sísmico.

Finalmente nos capítulos 3 e 4 apresentamos os resultados numéricos, comentários adicionais e conclusões.

ABSTRACT

The present work makes an approach of the direct problem in seismic. The central objective is the generation of traveltimes of reflected rays, that are originated in sources positioned in the surface of observation, they an isotropic medium (homogeneous or heterogeneous), they are reflected by a parabolic interface and they come back to the observation surface. In brief, a reflection eraveltime modeling is done for bidimensional isotropic medium with parabolic reflector.

In the chapter 1, we make a brief theoretical development about wave propagation in a medium and it relationship with ray-tracing. Still, in this chapter it is made a theoretical development for the ray-tracing and calculation of traveltimes, using a geometric strategy in the homogeneous medium case. For heterogeneous medium it is used a system of ray equation (Červený, 1887). This chapter establishes a theoretical basis for the construction of two softwares, that are used in this work.

In the chapter 2, we present the accomplished experimental procedures, the direct modeling is composed of two phases: definition of velocity models with parabolic interface and simulation of the seismic experiments.

Finally, in the chapters 3 and 4 we present numeric results, additional comments and conclusions.

ÍNDICE

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Aspectos Teóricos	2
1.1 Traçamento de Raios Sísmicos e Cálculo dos Tempos de Trânsito	2
1.1.1 Meio Isotrópico Homogêneo	2
1.1.2 Meio Isotrópico Heterogêneo	5
CAPÍTULO 2 Procedimentos Experimentais	10
2.1 Modelagem Direta	10
2.1.1 Considerações Sobre os Modelos de Velocidades	10
2.1.2 Simulação do Experimento Sísmico	10
CAPÍTULO 3 Resultados	12
3.1 Resultados da seção 1.1.1	13
3.2 Resultados da seção 1.1.2	25
CAPÍTULO 4 Conclusões	49
AGRADECIMENTOS	50
Referências	51
ANEXO I Programas Desenvolvidos e Subrotinas Usadas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Trajectoria do raio no modelo isotrópico e homogêneo ($e = f = 0$), com interface parabólica.	2
1.2	Fluxograma simplificado do procedimento desenvolvido.	5
1.3	Trajectoria do raio no modelo isotrópico e heterogêneo com interface parabólica.	5
3.1	Modelo A: Possui velocidade sísmica no meio situado entre a superfície de observação e a interface refletora (meio 1) igual a 4500 m/s e parâmetros do refletor $h(x) = a + bx + cx^2$ iguais a; $a = 400$ m e $b = c = 0$	13
3.2	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo A. Para este modelo com velocidade constante e interface plana, as primeiras chegadas de reflexão apresentam similaridade, independente da posição para a qual é deslocado o conjunto fonte-receptores.	14
3.3	Comparação das curvas de tempo de trânsito de reflexão obtidas para as posições de fonte iguais a: -1000 m, 0 e 1000 m, no modelo A.	15
3.4	Modelo C. Velocidade no meio 1 igual a 4000 m/s e $a = 2000$ m, $b = 0$ e $c = 0.00008 m^{-1}$ são os parâmetros do refletor.	15
3.5	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro a no comportamento da curvas de tempo: (a) todos os valores de parâmetros do modelo C, (b) $a = 2050$ m e todos os demais parâmetros são mantidos, (c) $a = 2100$ m e os demais parâmetros são mantidos.	16
3.6	Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de a no caso do modelo C. Vermelho ($a = 2000$ m), azul ($a = 2050$ m) e verde ($a = 2100$ m). A fonte S está posicionada em 0 m.	17
3.7	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro b no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme valores originais de parâmetros do modelo C, (b) $b = 0.5$, (c) $b = -0.5$, (d) $b = -1.5$. Fonte S em 0 m. Nos casos (b), (c) e (d) todos os demais valores de parâmetros são conservados nos valores usados no caso (a).	18
3.8	Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de b no caso do modelo C. Vermelho ($b = 1.0$), azul ($b = 0.5$ m), verde ($b = -0.5$) m e marron ($b = -1.5$). A fonte está posicionada em 0 m.	19

3.9	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro c no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo C, (b) $c = 0.0008 \text{ m}^{-1}$, (c) $c = 0.08 \text{ m}^{-1}$. A fonte está posicionada em 0 m.	20
3.10	Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de c . Vermelho ($c = 0.08 \text{ m}^{-1}$), azul ($c = 0.008 \text{ m}^{-1}$) e marron ($c = 0.0008 \text{ m}^{-1}$). . . .	21
3.11	Modelo D. Velocidade no meio 1 igual a 1500 m/s e parâmetros do refletor igual a: $a = 2000 \text{ m}$, $b = 1$ (<i>adimensional</i>) e $c = 0.02 \text{ m}^{-1}$	21
3.12	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro a no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo D, (b) $a = 1500 \text{ m}$, (c) $a = 2500 \text{ m}$ e (d) $a = 3000 \text{ m}$	22
3.13	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro b no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros da Modelo D, (b) $b = 0$, (c) $b = -1$	23
3.14	Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro c no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo D, (b) $c = -0.02 \text{ m}^{-1}$, (c) $c = 0.01 \text{ m}^{-1}$ e (d) $c = -0.01 \text{ m}^{-1}$	24
3.15	Modelo E. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$ e $b = c = 0$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 5.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$	25
3.16	Modelo F. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 200 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	26
3.17	Modelo F1. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	27
3.18	Modelo F2. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 600 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 35° a 90°	28
3.19	Modelo F3. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 800 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 40° a 90°	29

3.20	Modelo G. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = -1.2$ e $c = 0.0016\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 35° a 90° .	30
3.21	Modelo G1. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = -1$ e $c = 0.0016\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .	31
3.22	Modelo G3. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = -0.05$ e $c = 0.0016\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 80° a 110° .	32
3.23	Modelo H. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00004\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .	33
3.24	Modelo H1. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.0004\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .	34
3.25	Modelo H2. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.004\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 65° a 90° .	35
3.26	Modelo I. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .	36
3.27	Modelo I1. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.50\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .	37

3.28	Modelo I2. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.75\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	38
3.29	Modelo I3. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 1\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	39
3.30	Modelo J. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 10^{-4}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	40
3.31	Modelo J1. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 10^{-5}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	41
3.32	Modelo J2. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 10^{-6}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	42
3.33	Modelo J3. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 10^{-7}\text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	43
3.34	Modelo L. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 10^{-4}\text{ s}^2.km^{-4}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	44
3.35	Modelo L1. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 10^{-3}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	45
3.36	Modelo L2. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500\text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002\text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25\text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ e $f = 10^{-2}\text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90°	46

3.37 Modelo L3. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 0$ $f = 10^{-1} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° 47

INTRODUÇÃO

A geofísica deve a sua importância à impossibilidade do homem maximizar a exploração da subsuperfície terrestre, seja por motivos tecnológico ou financeiro, utilizando métodos diretos de investigação. Esta Ciência aplicada fornece uma aproximação da realidade geológica de subsuperfície usando métodos indiretos, cada um deles explora uma das diferentes propriedades físicas dos constituintes do meio estudado. Desta forma, o principal objetivo da Geofísica consiste na produção de uma imagem de subsuperfície o mais próxima possível da realidade.

O método sísmico faz uso das propriedades elasto-acústicas para mapear a subsuperfície. Um procedimento básico da sísmica consiste em causar uma perturbação no meio, gerar uma onda elasto-acústica, e registrar os tempos de retorno desta onda à superfície, por reflexões, refrações ou difrações sofridas no interior do meio.

Através de informações “a priori”, constrói-se um modelo. Em seguida, faz-se a escolha de uma técnica, dentre as várias existentes, capaz de fornecer os parâmetros que definem o modelo proposto, usando-se os dados observados.

Por modelagem direta entendemos a resolução do problema direto, que significa a obtenção de dados sintéticos calculados para um determinado modelo. Para tanto, foram desenvolvidos dois programas em linguagem FORTRAN. A estratégia de modelagem adotada foi puramente geométrica e cinemática para modelos homogêneos, e de traçamento de raios para meios heterogêneos utilizando as equações do raio (Červený, 1987).

CAPÍTULO 1

Aspectos Teóricos

1.1 Traçamento de Raios Sísmicos e Cálculo dos Tempos de Trânsito

Apresentamos nesta seção a formulação teórica necessária aos cálculos de tempos de trânsito de ondas sísmicas, que se propagam em meios isotrópicos bidimensionais e são refletidas em interfaces. Tal realização depende do modelo geológico adotado, do sistema de aquisição e de técnicas de traçamento de raios.

Dois modelos são considerados: um homogêneo e outro heterogêneo. Ambos são isotrópicos e dotados de uma interface refletora parabólica, $h(x)$. No primeiro caso uma estratégia geométrica nos permite resolver o problema do traçamento de raio envolvendo uma reflexão em $h(x)$, que une dois pontos dados (uma fonte S e um receptor R). No segundo, utiliza-se as equações do raio (Červený, 1987) para realizar o traçamento, onde somente a posição da fonte e uma direção estão fixadas.

1.1.1 Meio Isotrópico Homogêneo

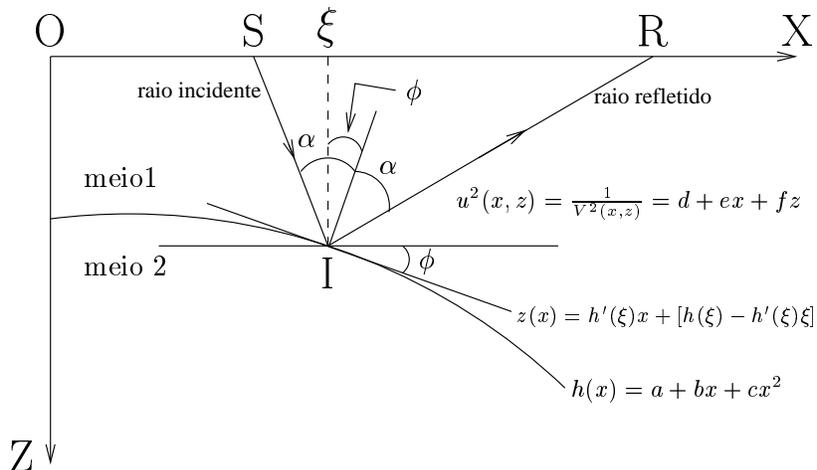


Figura 1.1: Trajetória do raio no modelo isotrópico e homogêneo ($e = f = 0$), com interface parabólica.

A função $h(x)$ descreve um refletor parabólico, representado no modelo mostrado na Figura (1.1), seus parâmetros a , b e c caracterizam a geometria da interface refletora e podem ser variados de modo a alterar a profundidade, o posicionamento horizontal, a suavidade, a curvatura e a concavidade da interface refletora. A função $u^2(x, z)$ representa o quadrado da vagarosidade no meio.

O modelo adotado é representado na Figura (1.1), na qual a interface refletora é parametrizada polinomialmente do seguinte modo:

$$h(x) = a + bx + cx^2. \quad (1.1)$$

Esta interface separa dois meios geológicos com propriedades físicas distintas, o campo de velocidade $V = V(x, z)$ situado acima da interface, meio 1, é parametrizado por:

$$\frac{1}{V^2} = d + ex + fz. \quad (1.2)$$

Temos por objetivo encontrar os tempos de trânsito de ondas que têm origem na superfície, numa fonte posicionada em S , propagam-se no meio 1, refletem na interface $h(x)$ e retornam à superfície, sendo detectadas em receptores previamente posicionados em R .

Seja $T(S, R)$ o tempo total de trânsito do raio. Como neste caso o meio é homogêneo e isotrópico, os parâmetros e e f em (1.2) são nulos, o que significa dizer que a velocidade é constante. Podemos expressar analiticamente $T(S, R)$ da seguinte forma: o tempo de trânsito do raio, como se pode observar na Figura (1.1), é a soma dos intervalos \overline{SI} e \overline{IR} dividido por V , isto é:

$$T(S, R) = \frac{\overline{SI}}{V} + \frac{\overline{IR}}{V}. \quad (1.3)$$

Podemos, com base na geometria do problema, escrever:

$$\cos(\alpha - \phi) = \frac{h(\xi)}{\overline{SI}} \quad (1.4)$$

e

$$\cos(\alpha + \phi) = \frac{h(\xi)}{\overline{IR}}, \quad (1.5)$$

onde ξ é a coordenada x do ponto de incidência I do raio na interface.

Substituindo (1.4) e (1.5) em (1.3), temos:

$$T(S, R) = \frac{h(\xi)}{V} \left[\frac{1}{\cos(\alpha - \phi)} + \frac{1}{\cos(\alpha + \phi)} \right]. \quad (1.6)$$

Conforme a geometria podemos também escrever:

$$tg(\alpha - \phi) = \frac{\xi - S}{h(\xi)} \quad (1.7)$$

e

$$tg(\alpha + \phi) = \frac{R - \xi}{h(\xi)}. \quad (1.8)$$

Logo,

$$\alpha - \phi = arctg \left[\frac{\xi - S}{h(\xi)} \right] \quad (1.9)$$

e

$$\alpha + \phi = arctg \left[\frac{R - \xi}{h(\xi)} \right]. \quad (1.10)$$

Então,

$$2\phi = arctg \left[\frac{R - \xi}{h(\xi)} \right] - arctg \left[\frac{\xi - S}{h(\xi)} \right]. \quad (1.11)$$

Ainda, pela geometria mostrada na Figura (1.1), temos:

$$tg(\phi) = h'(\xi). \quad (1.12)$$

Logo,

$$\phi = arctg(h'(\xi)) = arctg(b + 2c\xi). \quad (1.13)$$

Substituindo a equação (1.13) na equação (1.11), obtemos:

$$2arctg(b + 2c\xi) = arctg \left[\frac{R - \xi}{h(\xi)} \right] - arctg \left[\frac{\xi - S}{h(\xi)} \right], \quad (1.14)$$

que é uma equação cuja única variável é ξ .

A solução da equação (1.14) é obtida numericamente do seguinte modo:

- Constrói-se a função

$$F(\xi) = 2arctg(b + 2c\xi) - arctg \left[\frac{R - \xi}{h(\xi)} \right] + arctg \left[\frac{\xi - S}{h(\xi)} \right]; \quad (1.15)$$

- Considera-se a equação $F(\xi) = 0$; isto é, sua raiz nos fornece a coordenada x do ponto de incidência I no refletor, dados S e R .
- Utiliza-se o método da Bisseção para resolver (1.15).
- Uma vez obtido ξ , o ângulo ϕ é obtido diretamente através da equação (1.13);
- De posse do valor de ϕ podemos calcular o valor de α através da equação (1.9) ou (1.10);
- Então, o cálculo de $T(S, R)$ pode ser feito através de (1.6).

Podemos ilustrar todo o procedimento de forma simplificada no seguinte fluxograma:

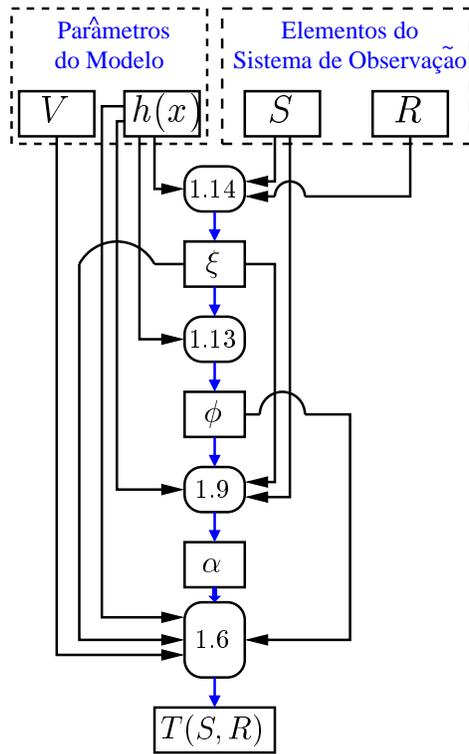


Figura 1.2: Fluxograma simplificado do procedimento desenvolvido.

Esse procedimento é repetido para diversos pares fonte-receptor.

1.1.2 Meio Isotrópico Heterogêneo

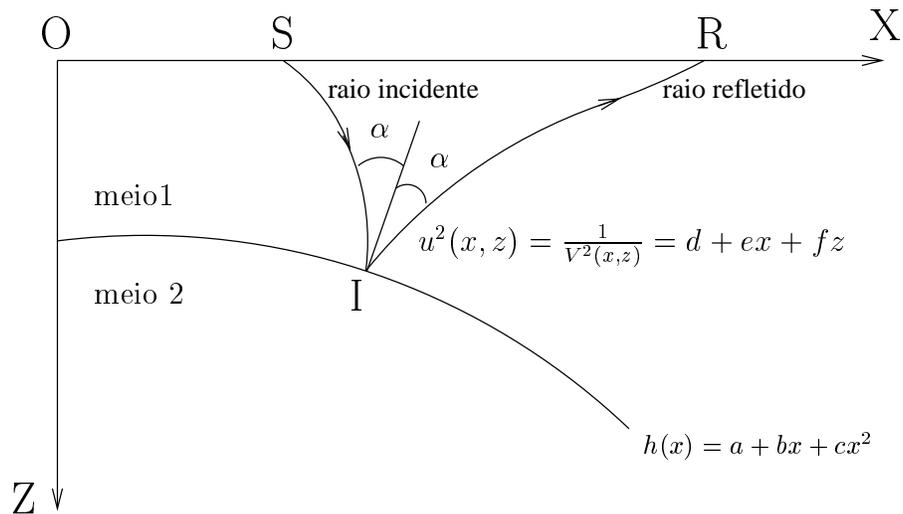


Figura 1.3: Trajetória do raio no modelo isotrópico e heterogêneo com interface parabólica.

Vamos agora analisar um modelo geológico que se distingue do anterior devido a presença

de heterogeneidade no campo de velocidade, que é descrita matematicamente pela equação (1.2) com os parâmetros e e f não simultaneamente nulos.

O problema do traçamento de raio unindo dois pontos fixos do meio pode ser extremamente complexo. Portanto, no presente trabalho apenas as fontes estarão fixadas e só serão consideradas as chegadas dentro de um intervalo limitado da superfície de observação.

A obtenção dos caminhos percorridos pelos raios é feita resolvendo as seguintes sistema de equações (Červený, 1987):

$$\frac{dX_i}{d\tau} = P_i \quad (1.16)$$

$$\frac{dP_i}{d\tau} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} \left[\frac{1}{V^2} \right], i = 1, 2; \quad (1.17)$$

onde $x_1 = x$, $x_2 = z$, τ é um parâmetro do caminho seguido pelo raio e $P(\tau) = (P_1(\tau), P_2(\tau))$ é o vetor tangente a esse caminho em cada um de seus pontos $(x(\tau), z(\tau))$, chamado de vetor vagarosidade. Além disso:

$$\|P(\tau)\| = \frac{1}{V(x(\tau), z(\tau))} \quad (1.18)$$

e

$$\tau = \int_0^l V(l) dl, \quad (1.19)$$

onde l é o comprimento do arco da curva definida pelo raio (Thomson e Chapman, 1985).

Derivando-se a equação (1.16) e usando-se a equação (1.17) temos:

$$\frac{d^2 X_i}{d\tau^2} = \frac{dP_i}{d\tau} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} \left[\frac{1}{V^2} \right]. \quad (1.20)$$

Substituindo a equação (1.2) em (1.20) e calculando o gradiente no segundo membro temos:

$$\frac{d^2 X_i}{d\tau^2} = \frac{dP_i}{d\tau} = \frac{1}{2} \vec{\nabla} [d + ex + fz] = \begin{cases} \frac{e}{2}, & \text{se } i = 1 \\ \frac{f}{2}, & \text{se } i = 2. \end{cases} \quad (1.21)$$

Logo podemos encontrar uma solução para $x(\tau)$ através de:

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = \frac{e}{2}. \quad (1.22)$$

Integrando-se duas vezes os dois membros da igualdade temos:

$$x(\tau) = \frac{e}{4} \tau^2 + C_1 \tau + C_2. \quad (1.23)$$

Procedendo-se de modo análogo para $i = 2$, temos:

$$z(\tau) = \frac{f}{4}\tau^2 + C_3\tau + C_4. \quad (1.24)$$

Aplicando-se as condições de contorno na fonte $S = (x_s, z_s)$, isto é, $x(0) = x_s$ e $z(0) = z_s$, temos: $C_2 = x_s$ e $C_4 = z_s$.

Podemos, então, escrever

$$x(\tau) = \frac{e}{4}\tau^2 + C_1\tau + x_s \quad (1.25)$$

e

$$z(\tau) = \frac{f}{4}\tau^2 + C_3\tau + z_s. \quad (1.26)$$

Através da equação (1.16) chegamos as seguintes igualdades:

$$\frac{e}{2}\tau + C_1 = P_{I1}, \quad (1.27)$$

e

$$\frac{f}{2}\tau + C_3 = P_{I2}. \quad (1.28)$$

Fazendo $\tau = 0$, temos que: $C_1 = P_{I1}(0)$ e $C_3 = P_{I2}(0)$. Logo, podemos finalmente escrever as soluções:

$$x_I(\tau) = \frac{e}{4}\tau^2 + P_{I1}(0)\tau + x_s \quad (1.29)$$

e

$$z_I(\tau) = \frac{f}{4}\tau^2 + P_{I2}(0)\tau + z_s. \quad (1.30)$$

As constantes x_s e z_s são coordenadas da fonte, enquanto $P_{I1}(0)$ e $P_{I2}(0)$ são as coordenadas do vetor vagarosidade na fonte, que indicam a direção do vetor tangente à trajetória no início do caminho e devem obedecer à equação eikonal na fonte, isto é:

$$P_{I1}^2(0) + P_{I2}^2(0) = \frac{1}{V^2(S)}. \quad (1.31)$$

Fazendo-se a interseção do raio incidente com a interface refletora, determina-se o valor de $\tau (= \tau_I)$ no ponto de incidência. Pode-se, então, conhecer as coordenadas (x_I, z_I) deste ponto. Além disso, obtêm-se o ângulo de incidência na interface $h(x)$, necessário na aplicação do princípio de Snell e na obtenção do vetor vagarosidade, $\vec{P}_R(\tau_I) = (P_{R1}(\tau_I), P_{R2}(\tau_I))$, do raio refletido no ponto I . O conhecimento do valor de τ , tanto no ponto I como no ponto $R = (x_R, 0)$ é necessário para o cálculo do tempo de trânsito.

A obtenção dos tempos de trânsito neste trabalho será feita analiticamente. A equação (1.19) nos fornece uma relação entre a velocidade $V(l)$ e o parâmetro τ e a equação

$$t = \int_c \frac{1}{V(l)} dl. \quad (1.32)$$

nos fornece uma relação entre a velocidade e o tempo gasto pelo raio para percorrer o caminho “c” obtido pela concatenação dos caminhos percorridos pelos raios incidente e refletido,

Vamos admitir por hipótese a existência de uma função W tal que

$$\frac{dW}{dl} = V(l), \quad (1.33)$$

então pela equação (1.19), temos:

$$\tau = \int_0^l dW = W(l) - W(0). \quad (1.34)$$

Logo,

$$\frac{d\tau}{dl} = \frac{dW(l)}{dl} = V(l), \quad (1.35)$$

ou seja,

$$dl = \frac{d\tau}{V(l)}. \quad (1.36)$$

Substituindo (1.36) em (1.32), temos:

$$t = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{V^2} d\tau, \quad (1.37)$$

que juntamente com (1.2), (1.29) e (1.30) nos permite escrever:

$$t = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[d + e\left(\frac{e}{4}\tau^2 + P_{I1}(0)\tau + x_s\right) + f\left(\frac{f}{4}\tau^2 + P_{I2}(0)\tau + z_s\right) \right] d\tau. \quad (1.38)$$

A expressão (1.38) é calculada em duas etapas: na primeira calcula-se o tempo t_1 gasto pelo raio incidente para atingir a interface partindo da fonte S (neste caso, a integral será calculada entre os limites $\tau_1 = 0$, na fonte, e $\tau_2 = \tau_I$, correspondente ao ponto de incidência na interface $h(x)$) e na segunda o tempo t_2 , gasto pelo raio refletido que parte do ponto de incidência I rumo a superfície $Z = 0$, neste caso os limites de integração são $\tau_1 = \tau_I$ (na interface) e $\tau_2 = \tau_R$ (na superfície). Neste último caso deve-se ter claro que o ponto de partida do raio é $I = (x_I, z_I)$ e o vetor vagarosidade em I é $P_R(\tau_I) = (P_{R1}(\tau_I), P_{R2}(\tau_I))$.

O tempo total t , obviamente, é dado por:

$$t = t_1 + t_2, \quad (1.39)$$

onde;

$$t_1 = \frac{e^2 + f^2}{12} \tau_I^3 + \frac{eP_{I1}(0) + fP_{I2}(0)}{2} \tau_I^2 + (d + ex_s + fz_s) \tau_I \quad (1.40)$$

e

$$t_2 = \frac{e^2 + f^2}{12} (\tau_R - \tau_I)^3 + \frac{eP_{R1}(\tau_I) + fP_{R2}(\tau_I)}{2} (\tau_R - \tau_I)^2 + (d + ex_I + fz_I) (\tau_R - \tau_I) \quad (1.41)$$

A implementação de um programa FORTRAN, para o cálculo dos tempos de trânsito segue basicamente a rotina descrita abaixo:

- Definição do ângulo de saída do raio; este nos permite calcular $P_{I1}(0)$ e $P_{I2}(0)$, com o auxílio da expressão (1.31);
- Interseção do raio $(x_I(\tau), z_I(\tau))$ com a interface refletora $h(x)$, isto é:

$$G(\tau) = h(x_I(\tau)) - z_I(\tau) \quad (1.42)$$

nos permite obter τ_I , empregando o método da bisseção para encontrar o *zero* do polinômio $G(\tau)$ num intervalo pré-determinado (τ_1, τ_2) com $\tau_1 < \tau < \tau_2$.

- Para o cálculo do ângulo de incidência do raio no ponto $I = (x_I, z_I)$, determinamos o vetor tangente ao raio incidente em I , \vec{u}_t , rotacionamos esse vetor de π *radianos* e, neste mesmo ponto, determinamos o vetor normal, \vec{u}_n , à interface. O valor do ângulo α é obtido através da seguinte expressão:

$$\cos(\alpha) = \frac{-\vec{u}_t \cdot \vec{u}_n}{|-\vec{u}_t| |\vec{u}_n|}, \quad (1.43)$$

onde; $\vec{u}_t = [\frac{dx}{d\tau}(\tau_I), \frac{dz}{d\tau}(\tau_I)]$ e $\vec{u}_n = [-\frac{dh}{dx}(x_I), 1]$.

- Para a determinação do ângulo de saída do raio refletido, utilizamos a lei de Snell e, então, rotacionamos o vetor \vec{u}_n de um ângulo α no sentido horário. A equação (1.31), é reescrita como segue:

$$P_{R1}^2(I) + P_{I2}^2(I) = \frac{1}{V^2(I)} \quad (1.44)$$

juntamente com o ângulo α , nos fornece as condições para encontrarmos $P_{R1}(\tau_I)$ e $P_{R2}(\tau_I)$.

- Para a determinação do valor de τ na interseção do raio refletido com a superfície de observação, fazemos $z_R(\tau) = 0$ em

$$z_R(\tau) = \frac{f}{4} (\tau - \tau_I)^2 + P_{R2}(\tau_I) (\tau - \tau_I) + z_I, \quad (1.45)$$

que resolvida nos fornece $\tau = \tau_R$.

- O tempo total de trânsito do raio é obtido com o emprego das expressões (1.39), (1.40) e (1.41).

CAPÍTULO 2

Procedimentos Experimentais

Este trabalho não tem a pretensão de buscar inovações teóricas ou práticas para os procedimentos de traçamento de raios e cálculo de tempos de trânsito de ondas sísmicas. O projeto é desenvolvido basicamente nas seguintes fases: abordagem teórica do problema, definição de modelos de subsuperfície, obtenção de registros sintéticos, discussão e interpretação dos resultados.

2.1 Modelagem Direta

Por modelagem direta entendemos a resolução do problema direto, que significa a obtenção de dados sintéticos para um determinado modelo. Para esta etapa, algumas pequenas subrotinas foram utilizadas (ver anexo) em complementação aos programas FORTRAN desenvolvidos durante esta monografia. A estratégia de modelagem adotada foi puramente geométrica e cinemática para modelos homogêneos e para meios heterogêneos foram utilizadas as equações do raio (Červený, 1987).

2.1.1 Considerações Sobre os Modelos de Velocidades

O modelo é caracterizado pelos seus parâmetros, equações (1.1) e (1.2), dessa forma, escolhamos: as velocidades, os gradientes verticais e laterais da velocidade no meio e as características da interface refletora (concavidade, curvatura, suavidade, deslocamento horizontal), atributos que caracterizam o modelo considerado nos programas. A técnica empregada no traçamento de raios, exige a inexistência de pontos difratores no modelo. Isto ocorre porque este estudo não considera difrações ou refrações, interessando-se apenas as reflexões na interface.

2.1.2 Simulação do Experimento Sísmico

Os programas desenvolvidos (ver seções 1.1.1 e 1.1.2) realizam o traçamento de raios e o cálculo dos tempos de trânsito para cada par fonte-receptor no caso homogêneo e para cada

par (S, θ) , onde S representa a posição da fonte e θ a direção de saída do raio, no caso heterogêneo. Sucessivos conjuntos de dados podem ser adquiridos através do deslocamento de todo o arranjo de fontes e receptores, preservando-se as distâncias relativas.

CAPÍTULO 3

Resultados

Os experimentos realizados seguiram basicamente as seguintes linhas de raciocínio:

- Estabelecer fundamentos teóricos rigorosos para a modelagem de tempos de trânsito de reflexão produzidos em modelos representativos de meios isotrópicos homogêneos e heterogêneos dotados de uma interface refletora parabólica;
- Observar a influência dos parâmetros do modelo nos tempos de viagem calculados; e
- Criar um espaço de modelos, que admita uma modelagem analítica, para ser usado como base sólida fornecedora de modelos de referência para procedimentos de inversão.

Esta postura de apresentar uma análise matemática rigorosa têm como principal objetivo estabelecer “guias” para a correta interpretação dos resultados, além de verificar os limites de validade ou aceitabilidade destes resultados.

3.1 Resultados da seção 1.1.1

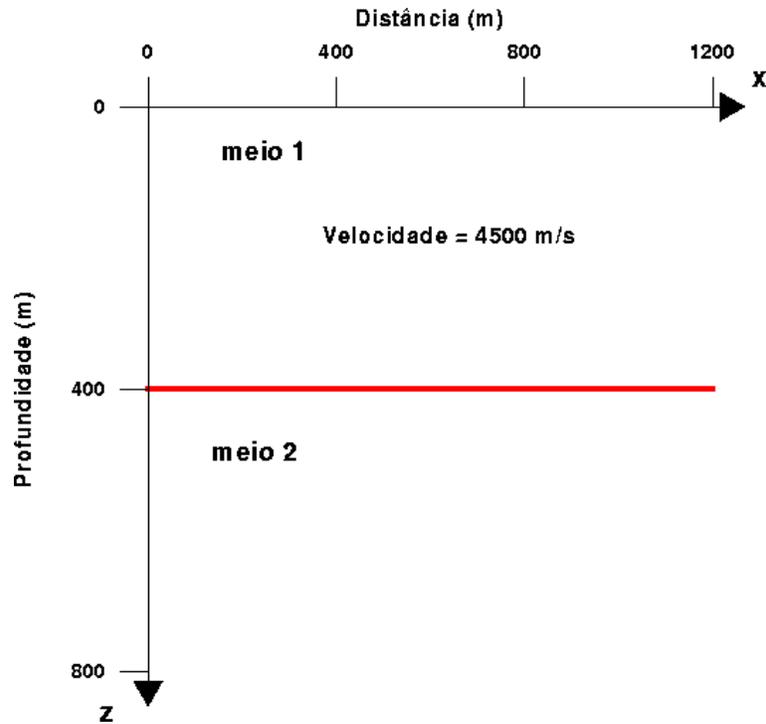


Figura 3.1: Modelo A: Possui velocidade sísmica no meio situado entre a superfície de observação e a interface refletora (meio 1) igual a 4500 m/s e parâmetros do refletor $h(x) = a + bx + cx^2$ iguais a; $a = 400$ m e $b = c = 0$.

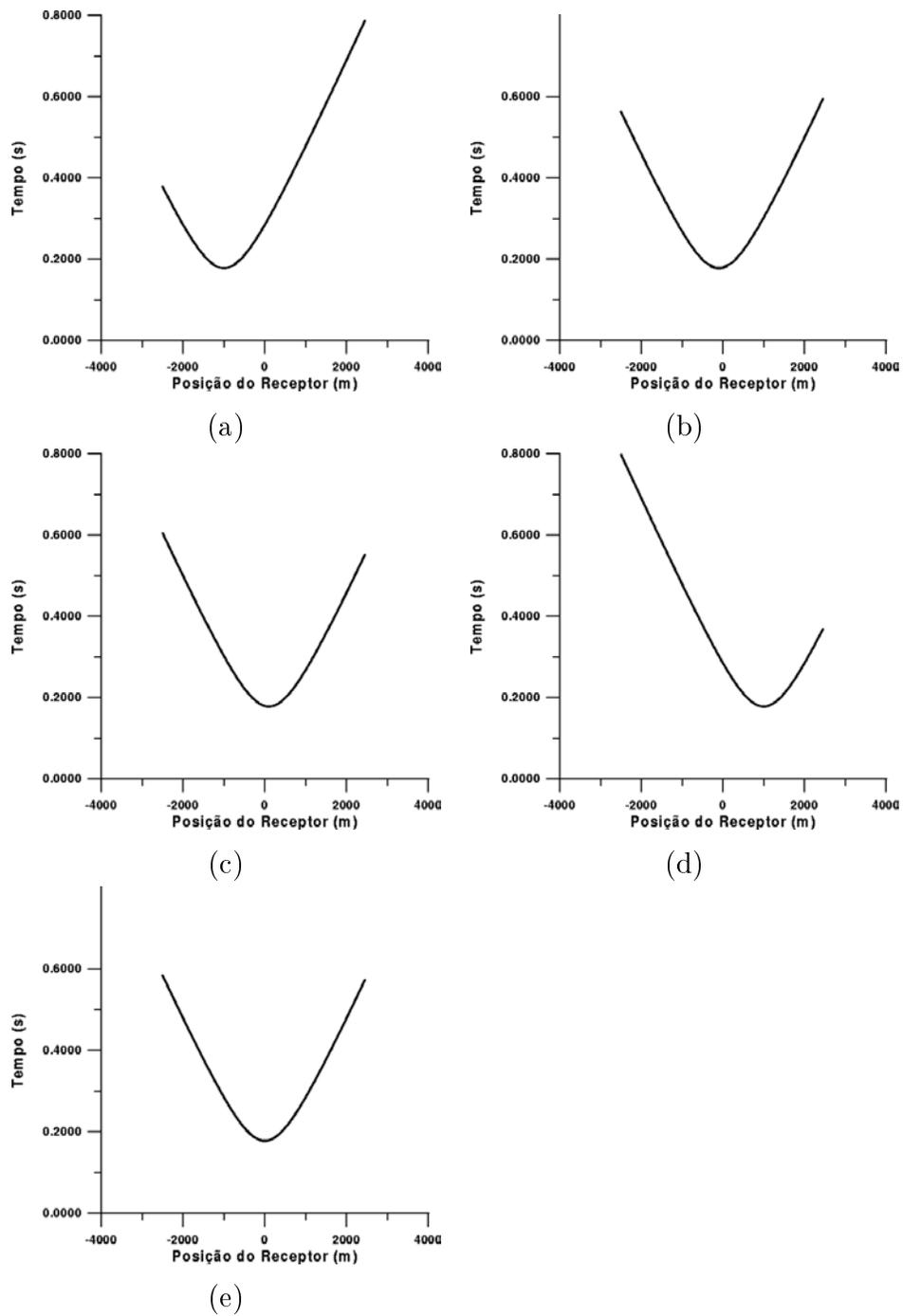


Figura 3.2: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo A. Para este modelo com velocidade constante e interface plana, as primeiras chegadas de reflexão apresentam similaridade, independente da posição para a qual é deslocado o conjunto fonte-receptores.

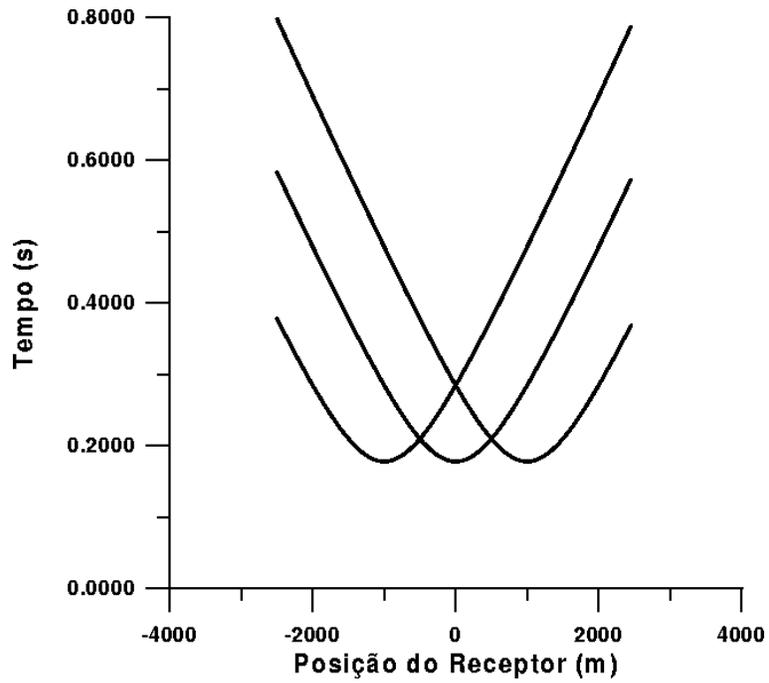


Figura 3.3: Comparação das curvas de tempo de trânsito de reflexão obtidas para as posições de fonte iguais a: -1000 m, 0 e 1000 m, no modelo A.

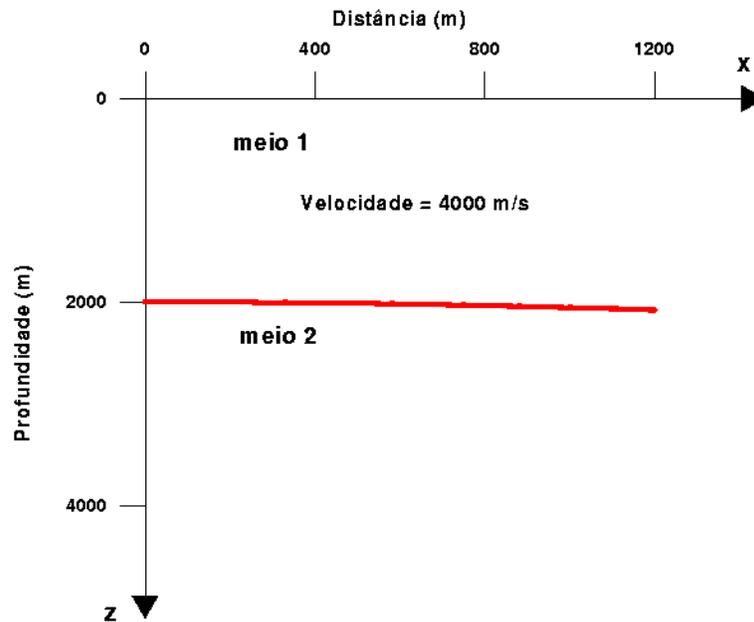
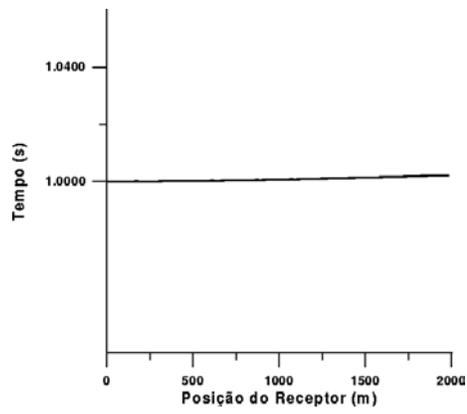
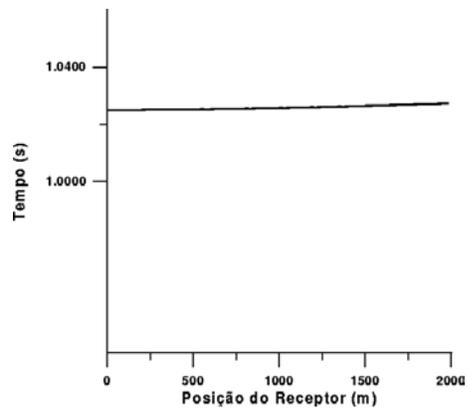


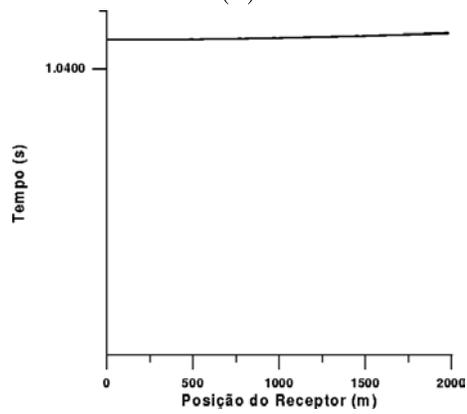
Figura 3.4: Modelo C. Velocidade no meio 1 igual a 4000 m/s e $a = 2000$ m, $b = 0$ e $c = 0.00008 \text{ m}^{-1}$ são os parâmetros do refletor.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.5: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro a no comportamento da curvas de tempo: (a) todos os valores de parâmetros do modelo C, (b) $a = 2050$ m e todos os demais parâmetros são mantidos, (c) $a = 2100$ m e os demais parâmetros são mantidos.

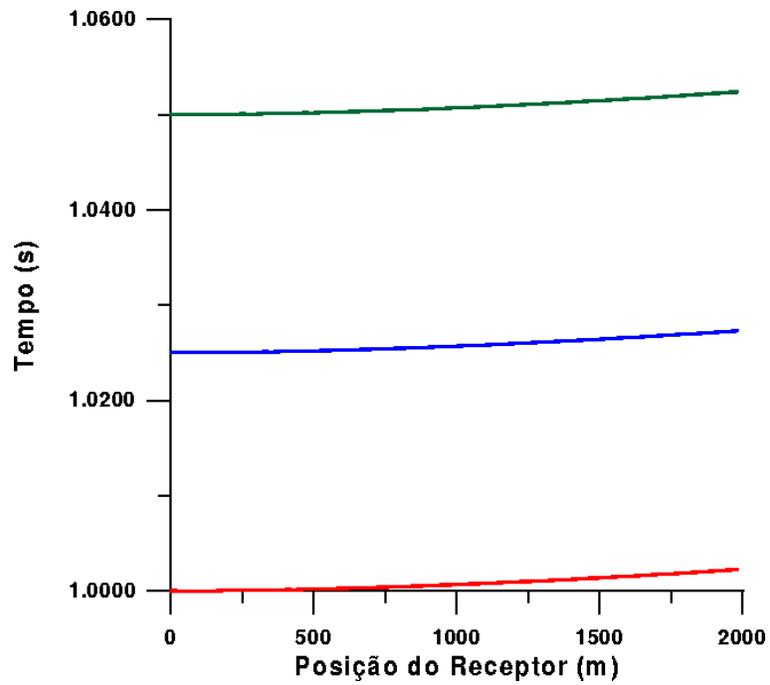
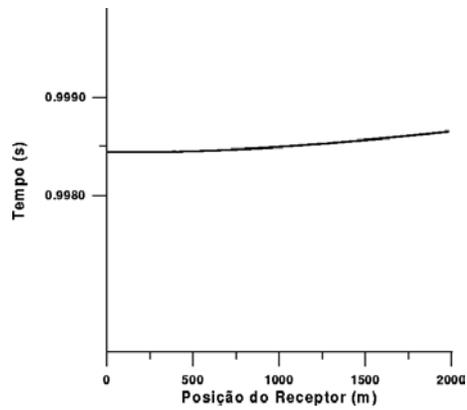
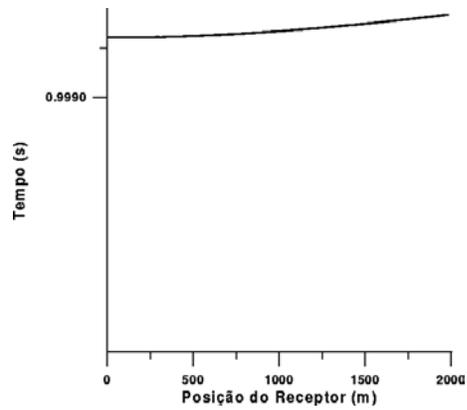


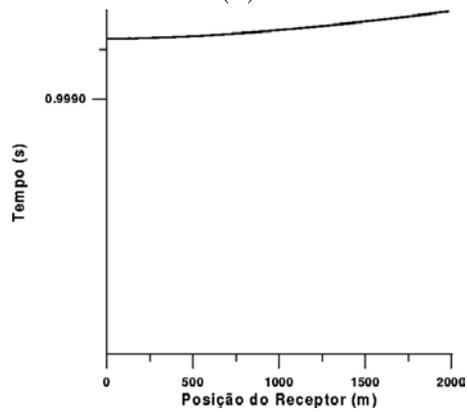
Figura 3.6: Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de a no caso do modelo C. Vermelho ($a = 2000$ m), azul ($a = 2050$ m) e verde ($a = 2100$ m). A fonte S está posicionada em 0 m.



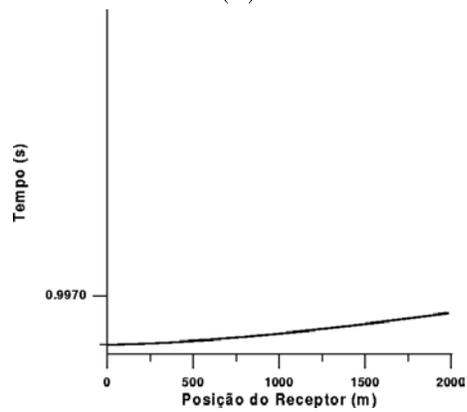
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro b no comportamento das curvas de tempo: (a) curva obtida conforme valores originais de parâmetros do modelo C, (b) $b = 0.5$, (c) $b = -0.5$, (d) $b = -1.5$. Fonte S em 0 m. Nos casos (b), (c) e (d) todos os demais valores de parâmetros são conservados nos valores usados no caso (a).

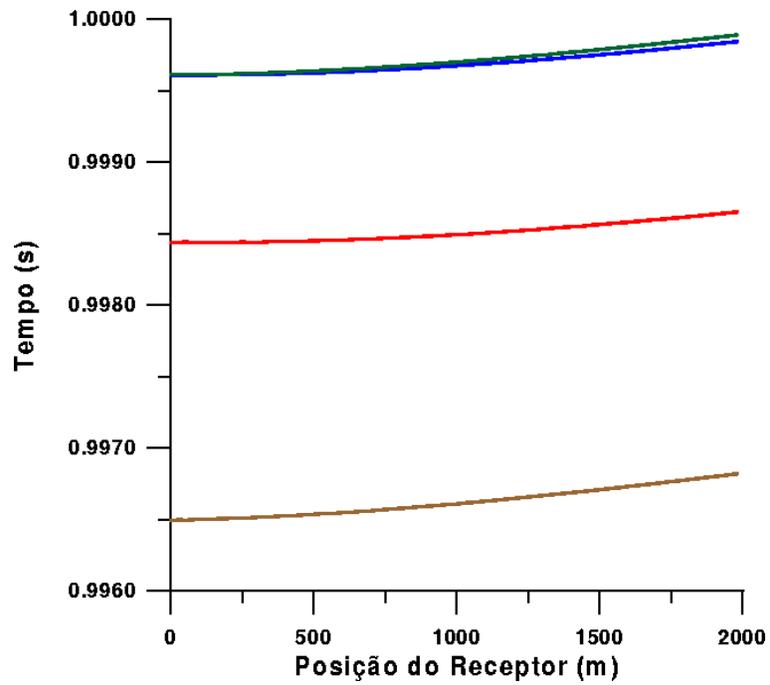
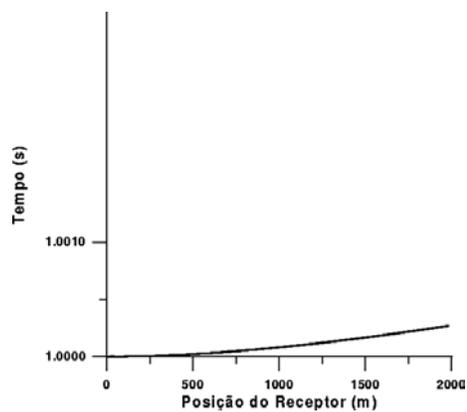
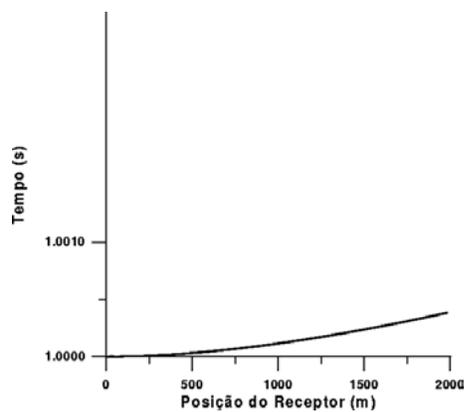


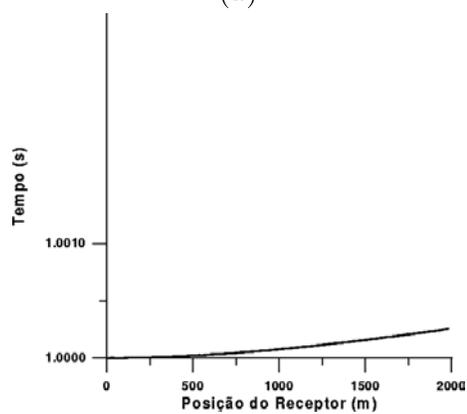
Figura 3.8: Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de b no caso do modelo C. Vermelho ($b = 1.0$), azul ($b = 0.5$ m), verde ($b = -0.5$ m) e marron ($b = -1.5$). A fonte está posicionada em 0 m.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo C. Teste de influência do parâmetro c no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo C, (b) $c = 0.0008 \text{ m}^{-1}$, (c) $c = 0.08 \text{ m}^{-1}$. A fonte está posicionada em 0 m.

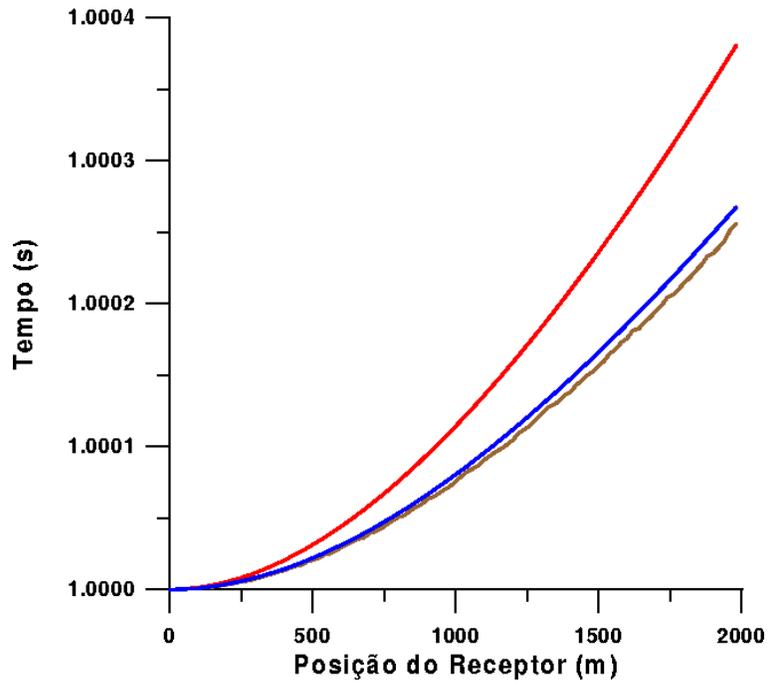


Figura 3.10: Comparação das curvas de tempo obtidas com os diversos valores de c . Vermelho ($c = 0.08 \text{ m}^{-1}$), azul ($c = 0.008 \text{ m}^{-1}$) e marron ($c = 0.0008 \text{ m}^{-1}$).

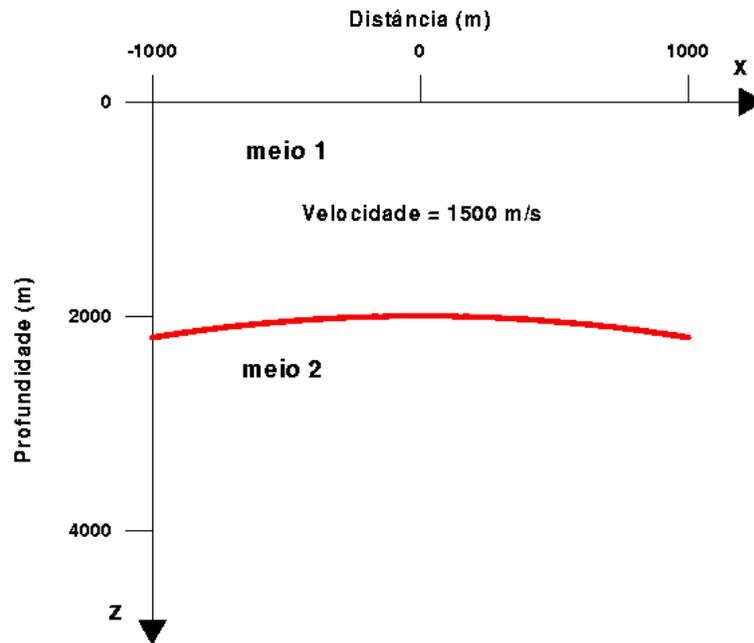


Figura 3.11: Modelo D. Velocidade no meio 1 igual a 1500 m/s e parâmetros do refletor igual a: $a = 2000 \text{ m}$, $b = 1$ (adimensional) e $c = 0.02 \text{ m}^{-1}$.

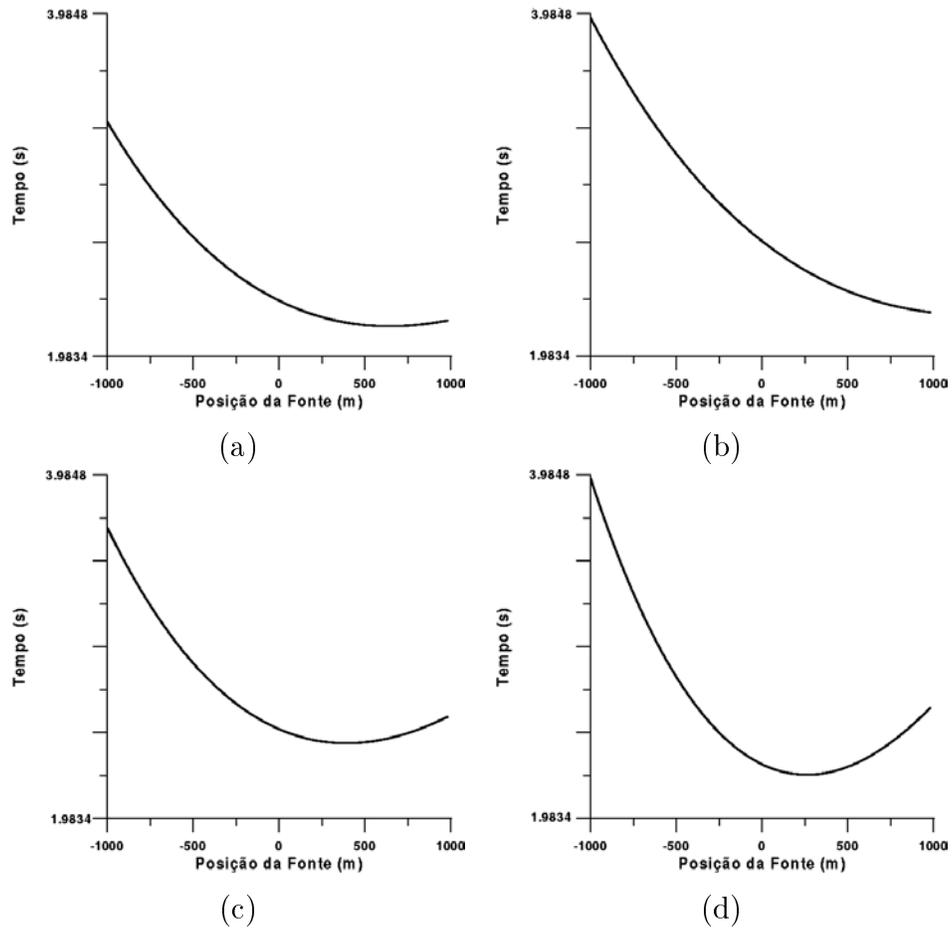
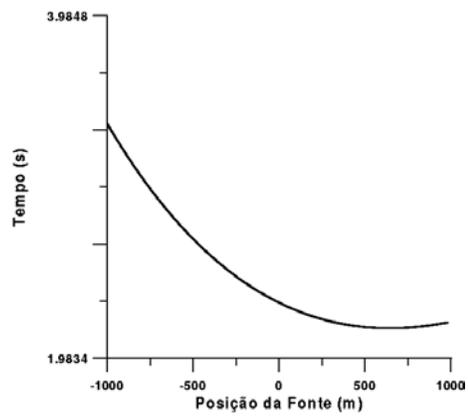
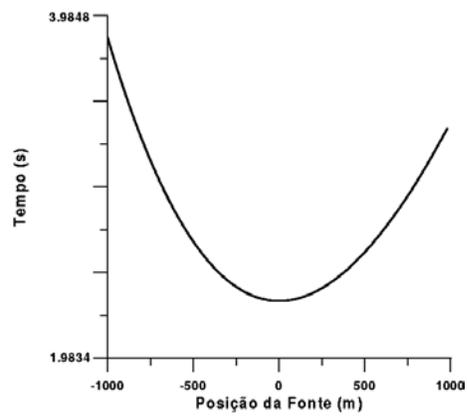


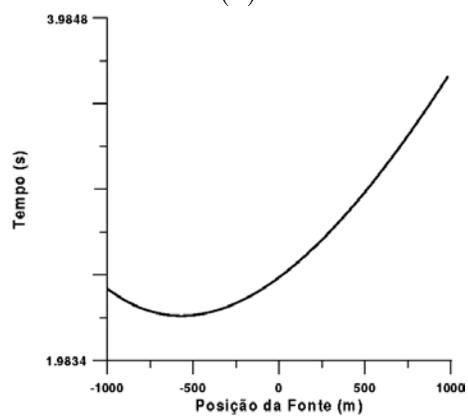
Figura 3.12: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro a no comportamento das curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo D, (b) $a = 1500$ m, (c) $a = 2500$ m e (d) $a = 3000$ m.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro b no comportamento das curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros da Modelo D, (b) $b = 0$, (c) $b = -1$.

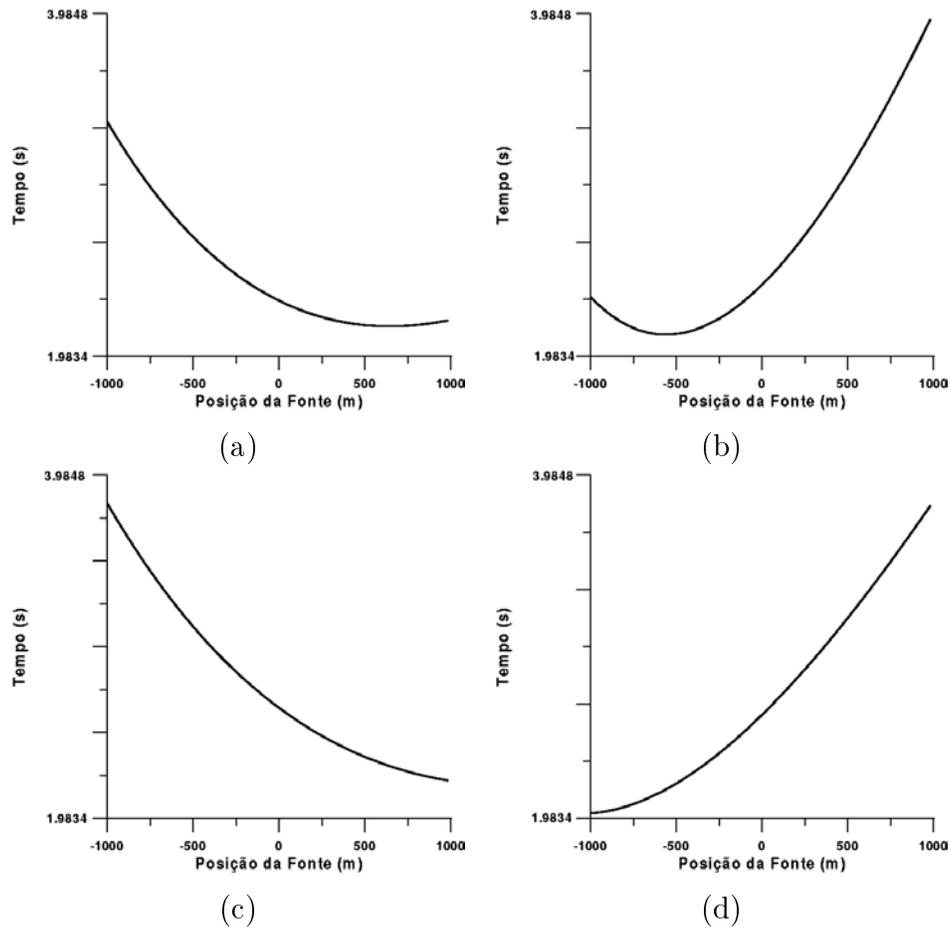


Figura 3.14: Primeiras chegadas de reflexão calculadas para o modelo D. Teste de influência do parâmetro c no comportamento da curvas de tempo: (a) curva obtida conforme com os parâmetros do modelo D, (b) $c = -0.02 \text{ m}^{-1}$, (c) $c = 0.01 \text{ m}^{-1}$ e (d) $c = -0.01 \text{ m}^{-1}$.

3.2 Resultados da seção 1.1.2

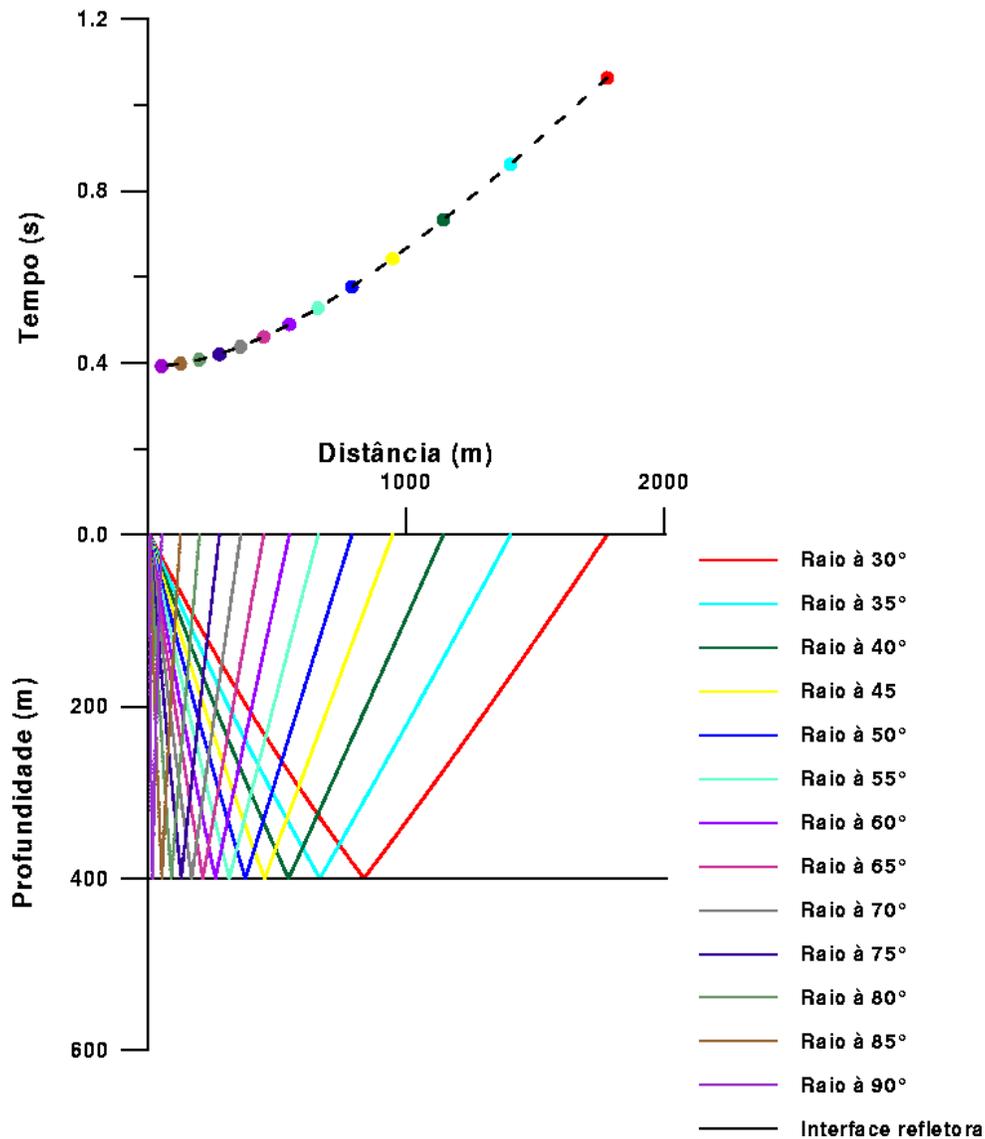


Figura 3.15: Modelo E. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$ e $b = c = 0$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 5.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$.

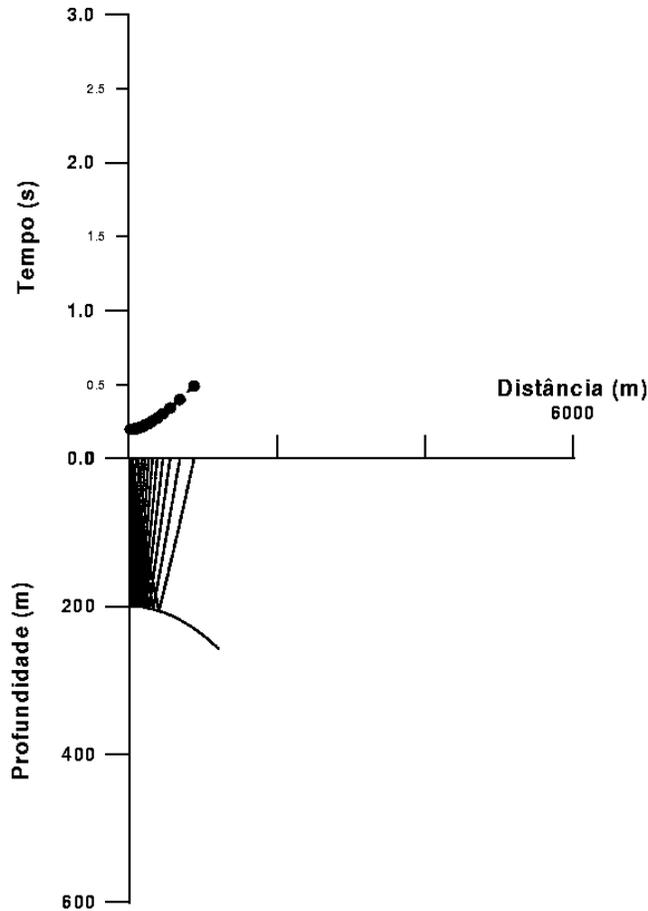


Figura 3.16: Modelo F. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 200 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

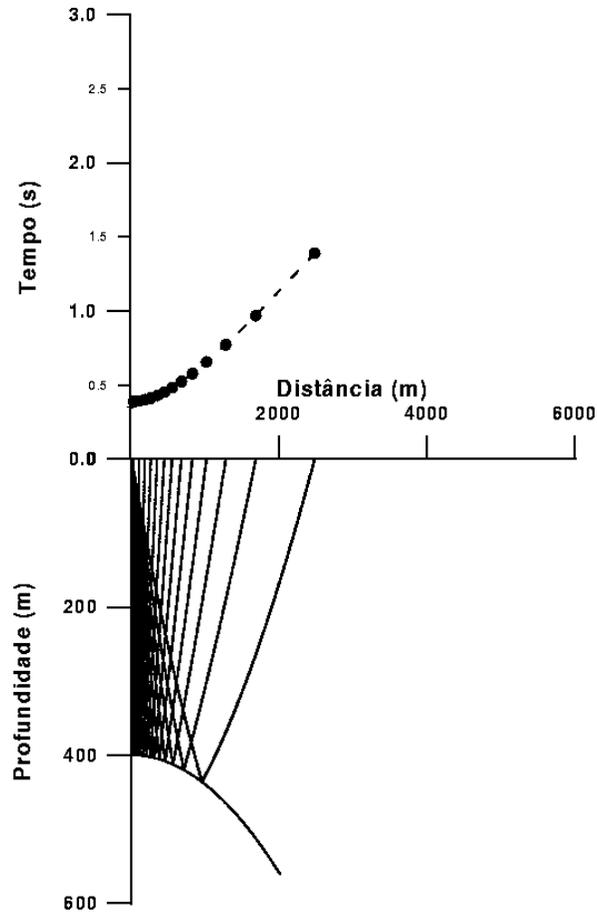


Figura 3.17: Modelo F1. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

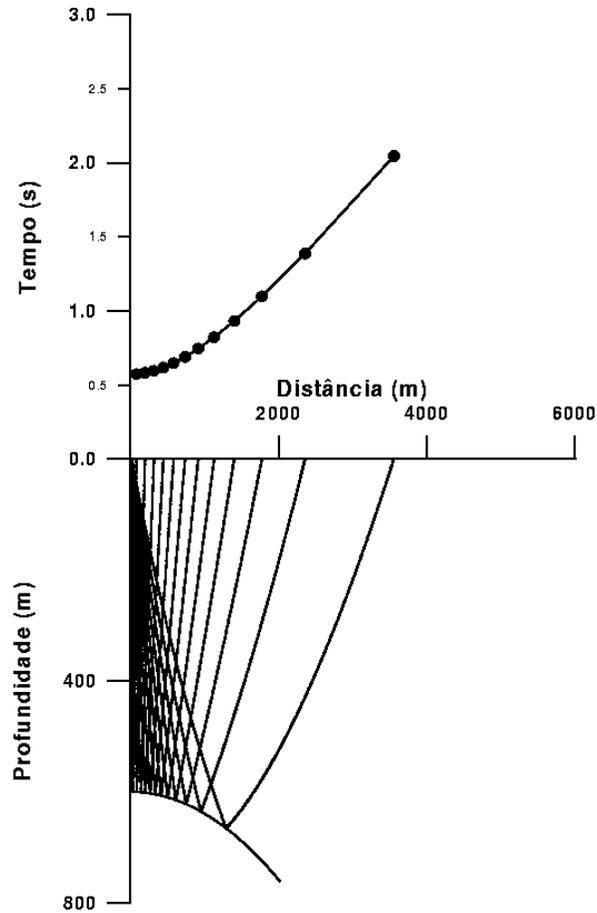


Figura 3.18: Modelo F2. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 600 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 35° a 90° .

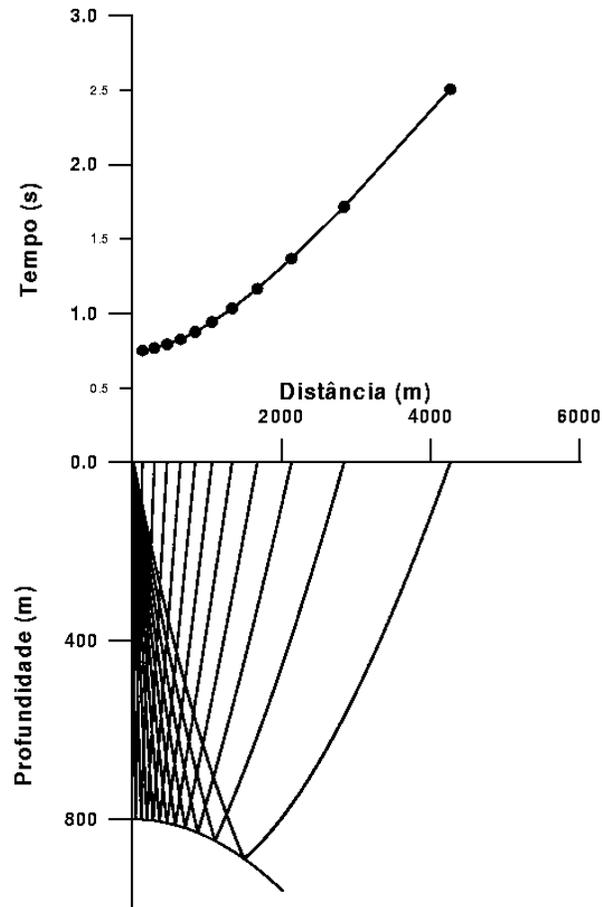


Figura 3.19: Modelo F3. Testando a influência do parâmetro a nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 800 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 4.10^{-5} \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 4.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = -8.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 40° a 90° .

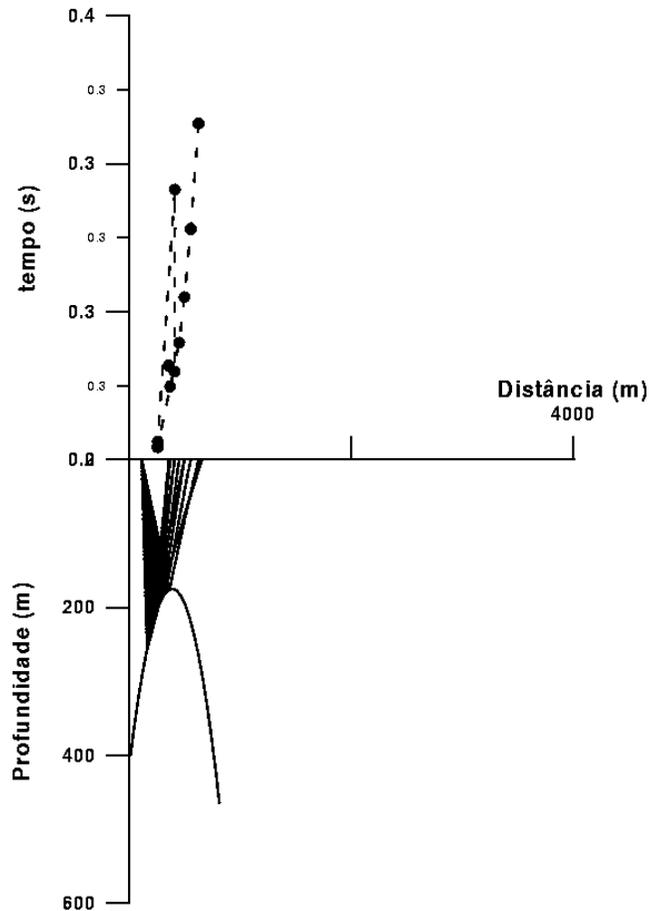


Figura 3.20: Modelo G. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = -1.2$ e $c = 0.0016 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 35° a 90° .

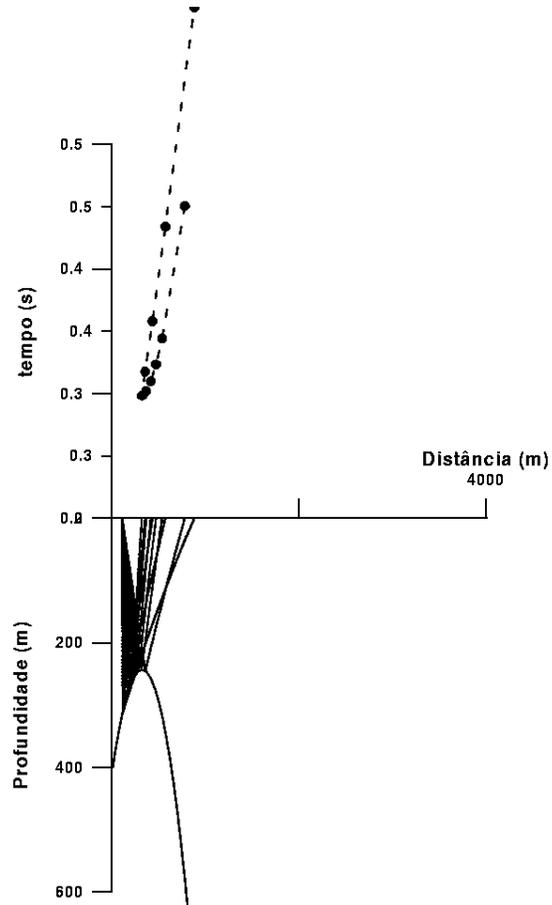


Figura 3.21: Modelo G1. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = -1$ e $c = 0.0016 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

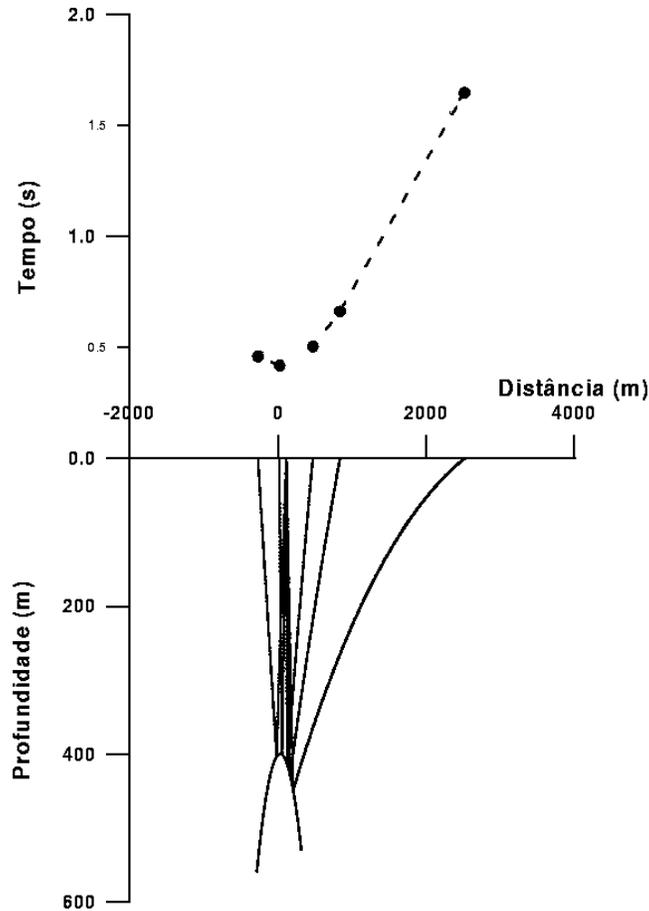


Figura 3.22: Modelo G3. Testando a influência do parâmetro b nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = -0.05$ e $c = 0.0016 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.km^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.km^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 80° a 110° .

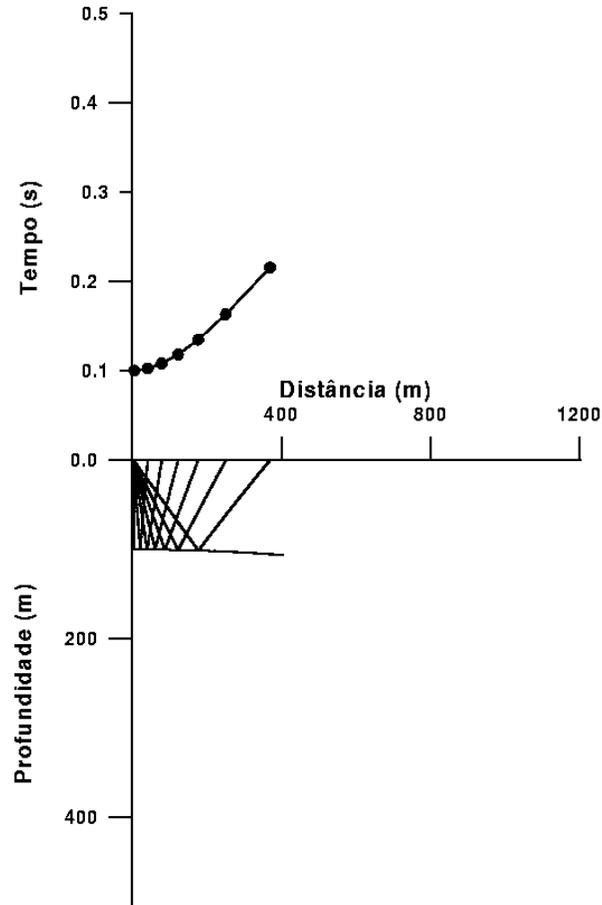


Figura 3.23: Modelo H. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00004 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

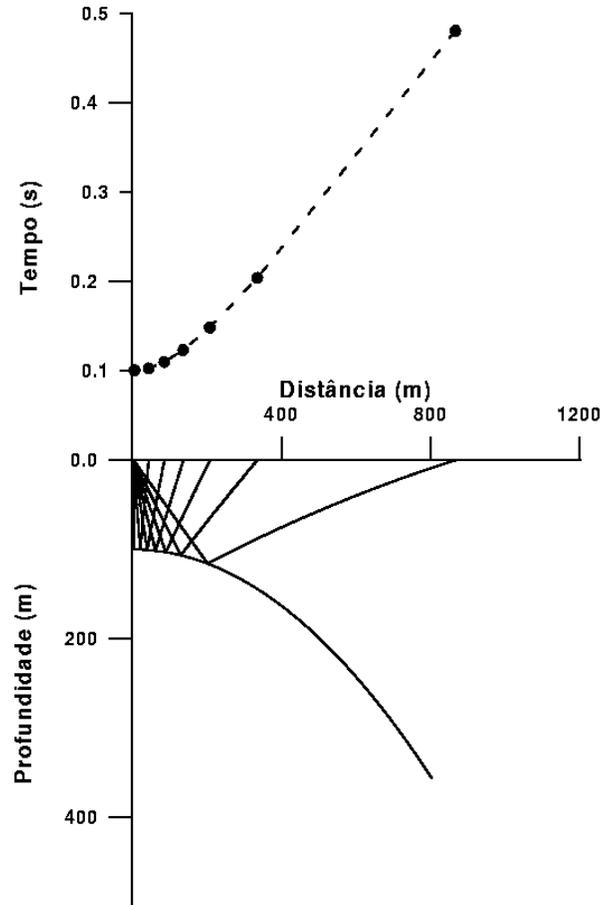


Figura 3.24: Modelo H1. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.0004 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

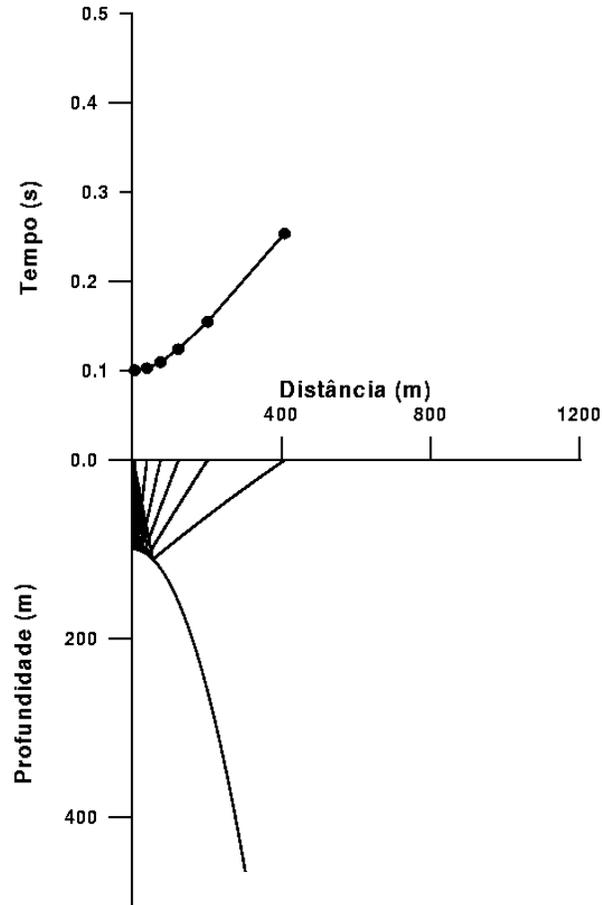


Figura 3.25: Modelo H2. Testando a influência do parâmetro c nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 400 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.004 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 7.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 6.10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 65° a 90° .

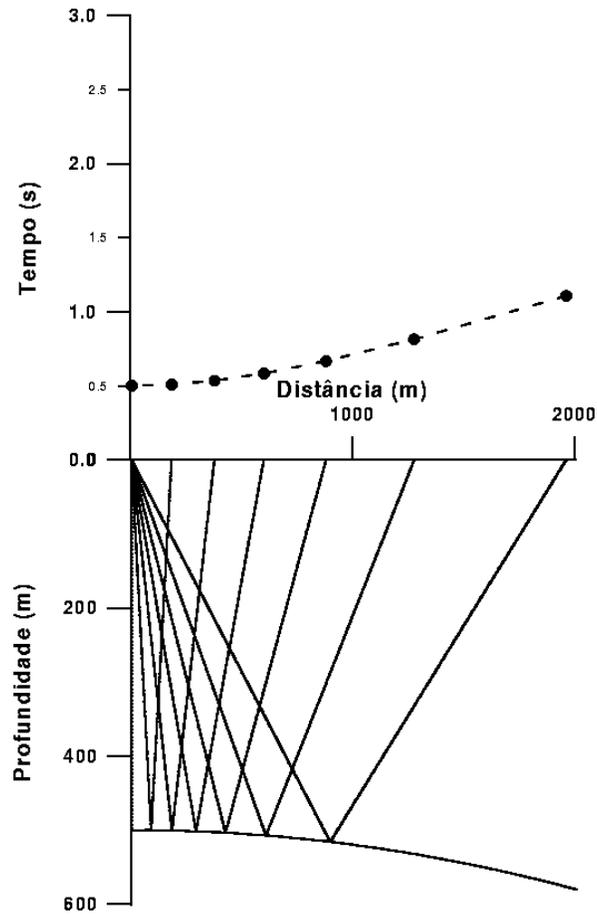


Figura 3.26: Modelo I. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

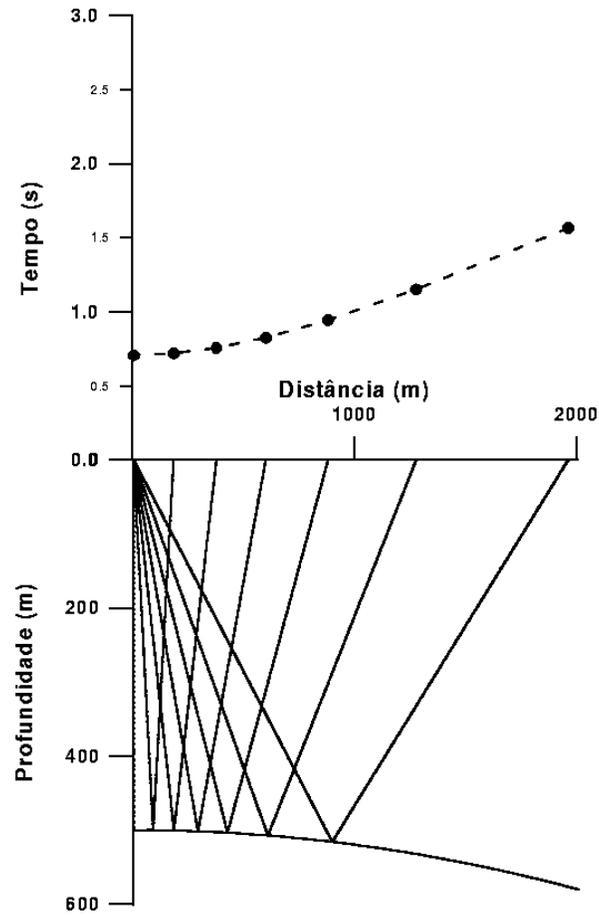


Figura 3.27: Modelo I1. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.50 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

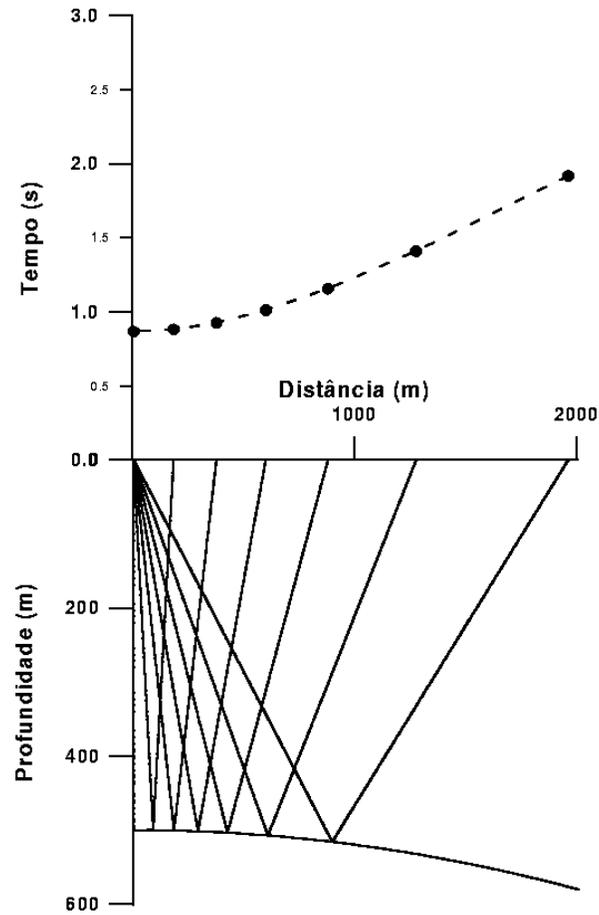


Figura 3.28: Modelo I2. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.75 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

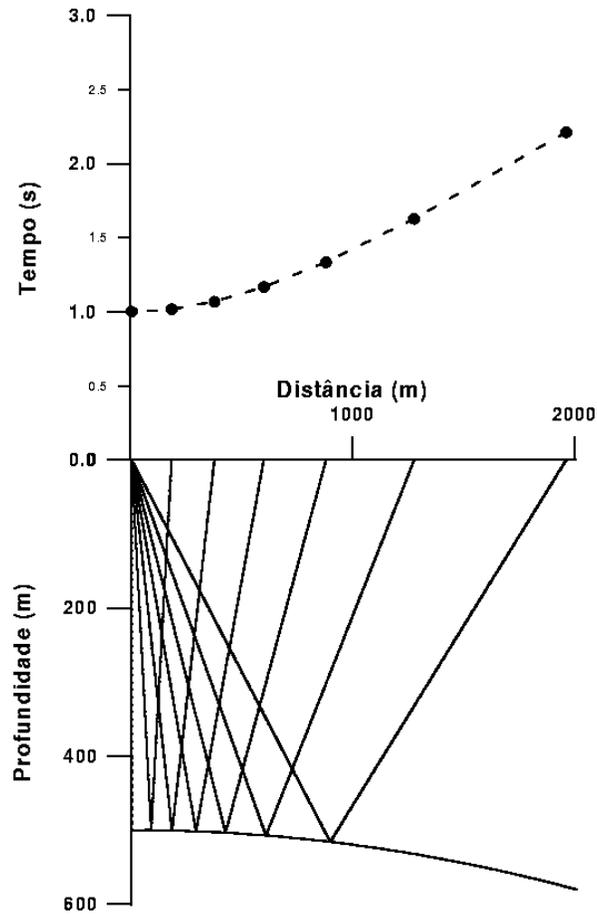


Figura 3.29: Modelo I3. Testando a influência do parâmetro d nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 1 \text{ s}^2 \cdot \text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

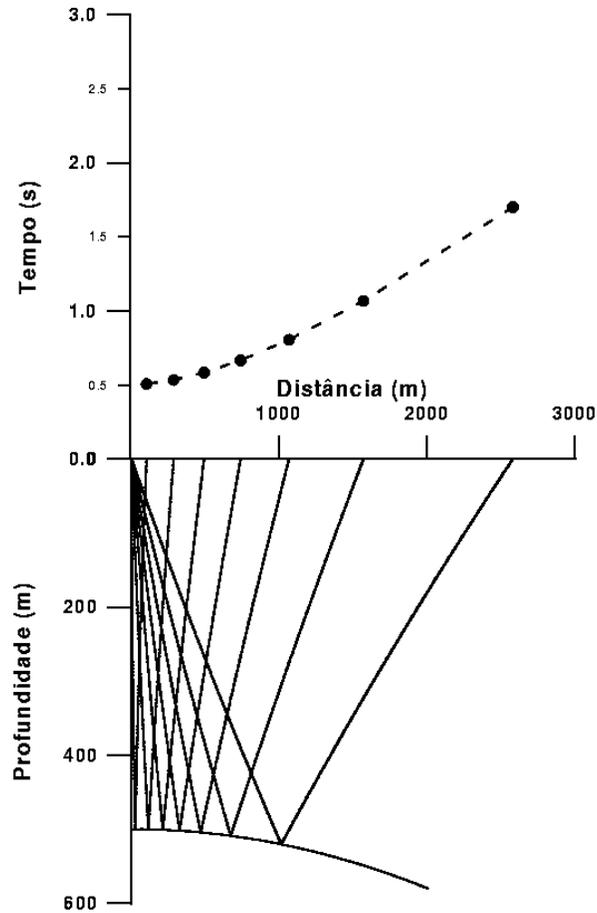


Figura 3.30: Modelo J. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 10^{-4} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

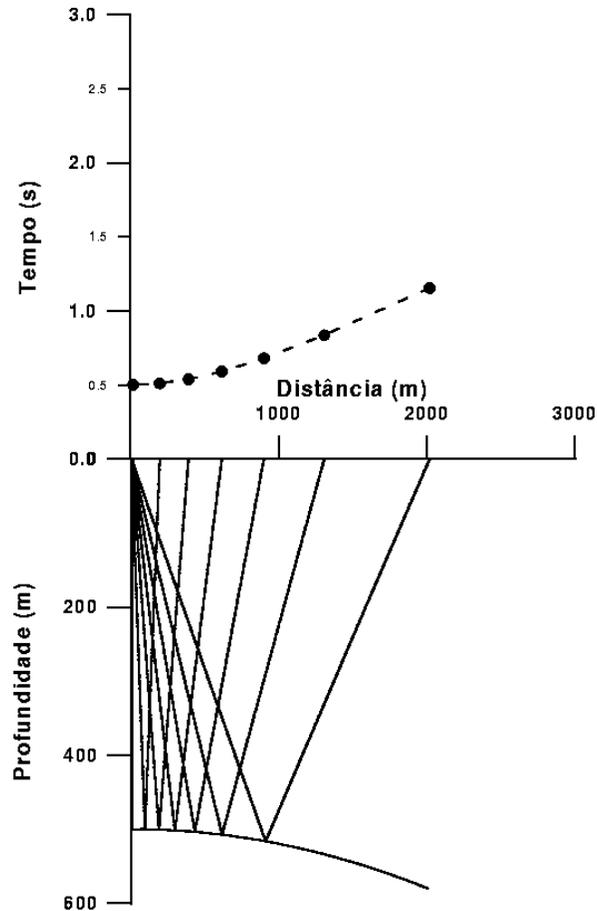


Figura 3.31: Modelo J1. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 10^{-5} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

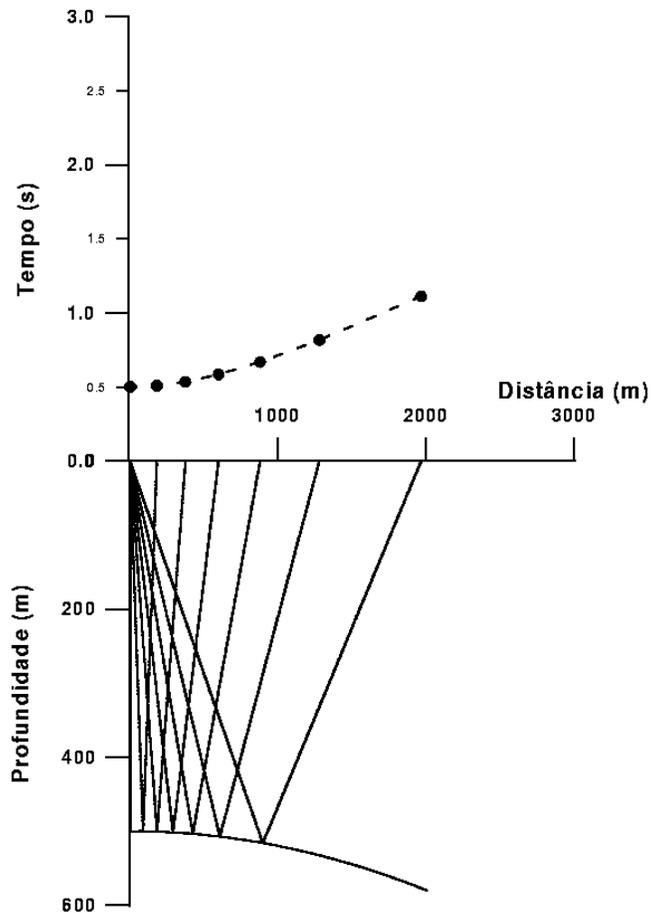


Figura 3.32: Modelo J2. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 10^{-6} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

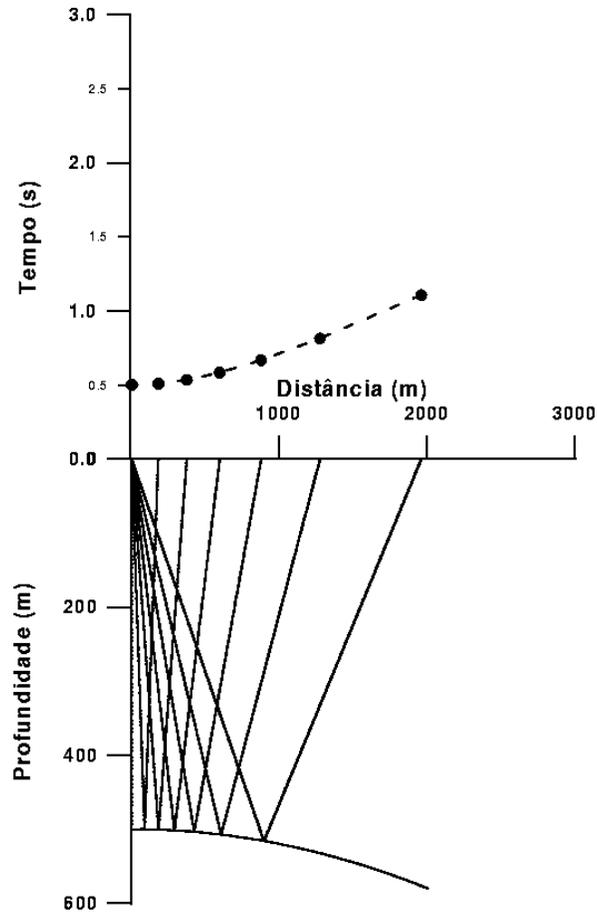


Figura 3.33: Modelo J3. Testando a influência do parâmetro e nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 10^{-7} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ e $f = 0$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

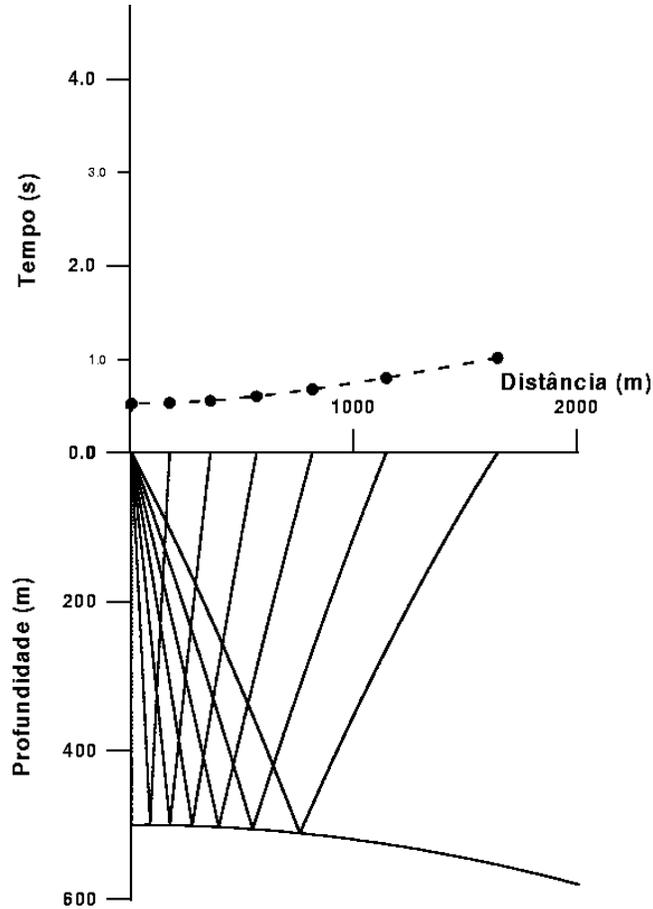


Figura 3.34: Modelo L. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 10^{-4} \text{ s}^2.\text{km}^{-4}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

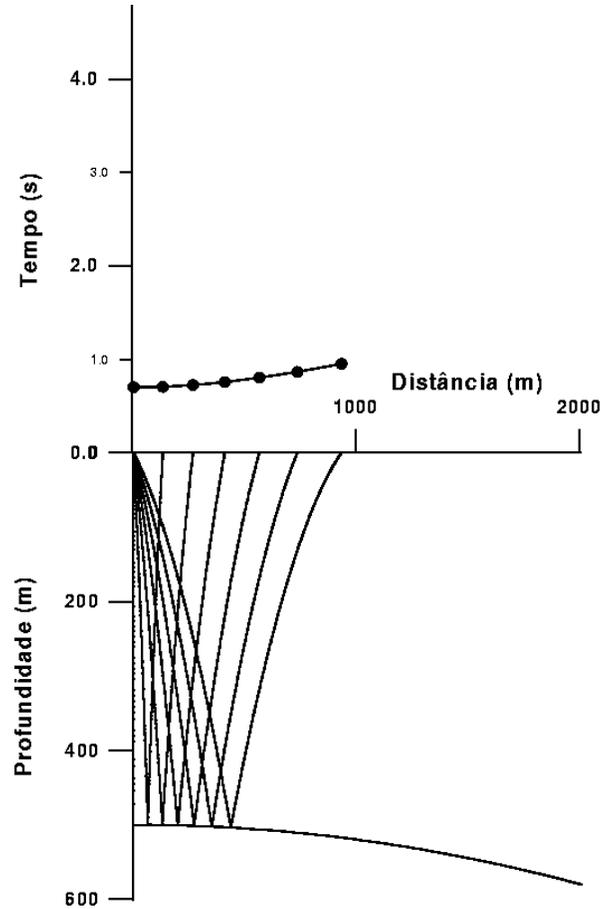


Figura 3.35: Modelo L1. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2 \cdot \text{km}^{-2}$, $e = 0$ e $f = 10^{-3} \text{ s}^2 \cdot \text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

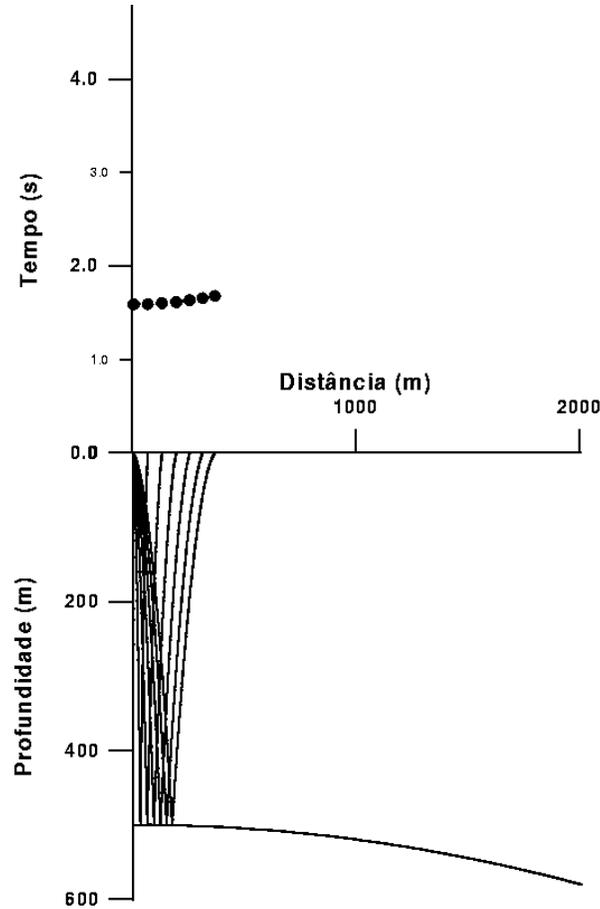


Figura 3.36: Modelo L2. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2 \cdot \text{km}^{-2}$, $e = 0$ $f = 10^{-2} \text{ s}^2 \cdot \text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

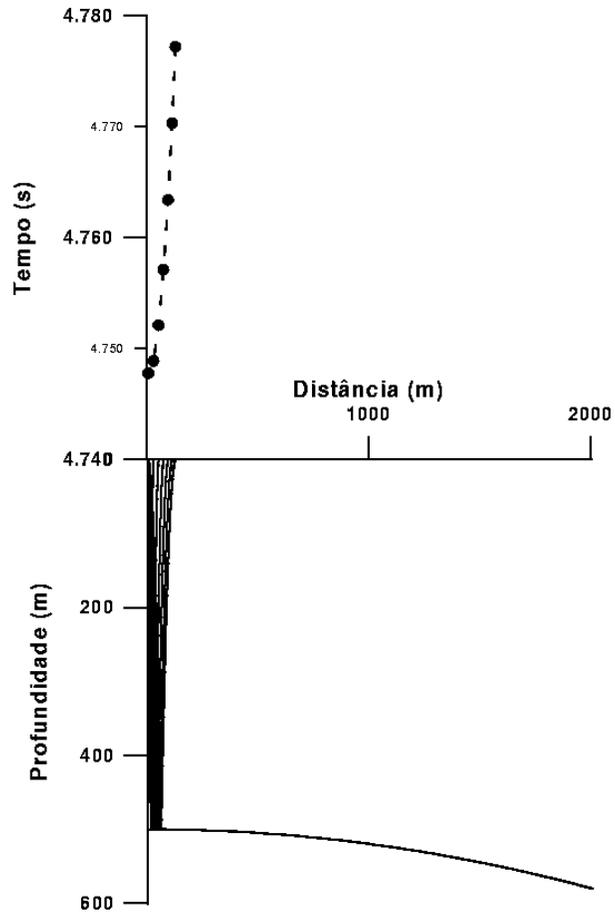


Figura 3.37: Modelo L3. Testando a influência do parâmetro f nas curvas de tempo. Os parâmetros do refletor são; $a = 500 \text{ m}$, $b = 0$ e $c = 0.00002 \text{ m}^{-1}$; e os parâmetros do quadrado da vagarosidade são; $d = 0.25 \text{ s}^2.\text{km}^{-2}$, $e = 0$ $f = 10^{-1} \text{ s}^2.\text{km}^{-3}$ os ângulos de saída dos raios variam de 30° a 90° .

As Figuras (3.2), (3.3) e (3.15) mostram a eficiência do algoritmo desenvolvido para simular o experimento sísmico. Observamos a simetria das curvas independente da posição da fonte e a localização do ponto de mínimo (menor tempo) exatamente na posição em que se encontra a fonte (tempo de zero offset).

Nas Figuras (3.5) e (3.6) podemos observar o deslocamento vertical nas curvas devido unicamente a influência do parâmetro a , quanto maior o valor de a maior o tempo de trânsito do raio. Na Figura (3.12) é notável o fato de que maiores valores de a facilitam o mapeamento de refletores. O parâmetro a refere-se a profundidade do refletor.

Nas Figuras (3.7), (3.8) e (3.13) observamos a influência do parâmetro b , esse possui a capacidade de modificar abruptamente os valores de tempo e aspecto da curva, a depender do valor que venha a ser adotado. Esse parâmetro está associado ao deslocamento do vértice da parábola.

O parâmetro c altera a curvatura do refletor, como se pode notar nas Figuras (3.9), (3.10) e (3.14).

Nas Figuras (3.16), (3.17), (3.18) e (3.19) podemos observar a relação direta entre o parâmetro a e os tempos de trânsito.

Nas Figuras (3.20), (3.21) e (3.22) observamos a contribuição do parâmetro b no comportamento das curvas. Notamos fortes variações no especto das curvas.

Nas Figuras (3.23), (3.24) e (3.25), comprovamos o aumento dos tempo de trânsito provocado pelo aumento da curvatura.

Nas Figuras (3.26) a (3.29) comprovamos a relação direta do parâmetro d com o tempo.

Nas Figuras (3.30) a (3.33) notamos que maiores valores de e tendem a acentuar a taxa de crescimento curvatura nas curvas de tempo.

Fortes gradientes verticais são responsáveis por elevações abruptas nas curvas de tempo, Figuras (3.34) a (3.37).

CAPÍTULO 4

Conclusões

A rigorosa análise matemática adotada para a modelagem de tempos de trânsito de reflexão produzidos em modelos representativos de meios isotrópicos homogêneos e heterogêneos dotados de uma interface refletora, se mostra extremamente vantajosa, no que se refere à implementação computacional e na própria apresentação das curvas de tempo, em outras palavras, tal análise permite que a influência dos parâmetros que regem o modelo se mostrem mais expressivamente, permitindo observações mais apuradas a respeito da influência que cada um destes exerce sobre as curvas de tempo.

Da observação das curvas de tempo geradas e representadas em escalas padronizadas, podemos distinguir a influência que cada um dos parâmetros utilizados exercem sobre tais curvas. Alguns modelos gerados, Figuras de 3.16 à 3.37, descrevem de forma eficiente, tanto o campo de velocidade do meio, em termos de seus parâmetros físicos, como o aspecto geométrico. Esses modelos servem de referência para procedimentos de inversão de dados sísmicos.

O algoritmo desenvolvido pode prover uma base para o desenvolvimento de um programa de migração de dados sísmicos, que utilize o traçado de raios. Para tanto, teríamos que incluir modelos com multicamadas e fazer o traçado de raio a partir de dois pontos na superfície o que implica em algumas modificações neste algoritmo.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao professor *Wilson Mouzer Figueiró* pela paciência e dedicação no meu acompanhamento.

Agradeço a Agência Nacional do Petróleo (ANP), que durante os dois últimos anos concedeu-me bolsa de estudos.

Agradeço ao CPGG por liberar o laboratório de informática e a infraestrutura indispensável para o desenvolvimento dos trabalhos.

Agradeço aos membros da banca examinadora pelas críticas e correções sugeridas no texto.

Por fim, agradeço aos colegas da graduação e pós-graduação em geofísica, aqueles que são meus amigos, e ao Doutorando *Gustavo Rocha Gomes* pela sua valiosa contribuição neste trabalho.

Referências

- Červený, V., 1987 Ray Methods for Three-dimensional Seismic Modeling, The Norwegian Institute of Technology.
- Figueiró, W. M., 1994 Tomografia de Reflexão no Caso de Refletor Curvo, Tese de Doutorado, PPPG-UFBA, Salvador.
- Thomson, C. J. e Chapman, C. H., 1985. An Introduction to Maslov's Asymptotic Method, Geophys J. R. Soc., 61, 729-746.

ANEXO I

Programas Desenvolvidos e Subrotinas Usadas

PROGRAMA DESENVOLVIDO NA SEÇÃO 1.1.1

Autores: Marcos Rogério Lima Teles e Gustavo R. Gomes

program raiz

```
external daco
common/polinomio/ x1,x2,x3
common/posicao/ pos1,pos2
dimension pol(3)
real tvalor,posf,posr,dx
real phi,hdeqsi,alfa,tempo
integer i,j,niter
data pol/2000,1.0,-0.01/ !a,b,c y=a+b*x+c*x^2
open (10,file='../modelo5/f0c3.dat')
x1=pol(1)
x2=pol(2)
x3=pol(3)
i=0.
    vel=1500                !velocidade da onda no meio acima do refletor
    posf=i                  !posicao da fonte
    niter=1000              !numero de iteracoes para encontrar o zero
    dr=20                   !distancia entre os receptores
    r0=-1000                !posicao do primeiro receptor
    nreceptores=100        !número de receptores
    do j=1,nreceptores
        posr=(j-1)*dr+r0
        xacc=0.0001
        pos1=posf-10000
        pos2=posr+10000
        qsi=rtbis(daco,pos1,pos2,xacc)
        phi=atan(pol(2)+2*pol(3)*qsi)
```

```

hdeqsi=pol(1)+pol(2)*qsi+pol(3)*qsi*qsi
alfa=phi+atan((qsi-posf)/hdeqsi)
tempo=(hdeqsi/vel)*(1/cos(alfa-phi)+1/cos(alfa+phi))
deltax=posr-posf
write(10,*)posr,tempo
write(20,*)posf,0
write(20,*)qsi,hdeqsi
write(20,*)posr,0
end do
stop
end

```

```

-----c-----
function daco(qsi)
common/polinomio/ x1,x2,x3
common/posicao/ pos1,pos2
real daco,qsi,term1,term2,pos1,pos2
term1=x2+2*x3*qsi
term2=x1+x2*qsi+x3*qsi*qsi
daco=2*atan(term1)-atan((pos1-qsi)/term2)+atan((qsi-pos2)/term2)
return
end

```

PROGRAMA DESENVOLVIDO NA SEÇÃO 1.1.2

Autores: Marcos Rogério Lima Teles e Gustavo R. Gomes

```

program traca_raio
external pol
external pol1
real tau,dtau
integer ntau
real xs,zs
real p,px,pz
real teta
real d,e,f
real a,b,c
real k1,k2
real modim,modia,alfa

```

```

-----c-----
common/curva/ a,b,c
common/fonte/ xs,zs
common/velocidade/ e,f

```

```
common/eikonal/ px,pz
```

```
c-----
```

```
common/neco/ pz1,zi1
```

```
c-----
```

```
parameter (pi=3.14159)
```

```
namelist /curva/a,b,c
```

```
namelist /velocidade/d,e,f
```

```
open(20,file="curva.dat")
```

```
open(30,file="velocidade.dat")
```

```
read(20,curva)
```

```
read(30,velocidade)
```

```
write(*,*)a,b,c
```

```
write(*,*)d,e,f
```

```
write(*,*)"Digite o angulo saida do raio"
```

```
read(*,*)teta
```

```
write(*,*)"Digite a posicao da fonte (xs e zs)"
```

```
read(*,*)xs,zs
```

```
x=xs
```

```
z=zs
```

```
p=sqrt(d)
```

```
px=p*cos(teta*pi/180.)
```

```
pz=p*sin(teta*pi/180.)
```

```
dtau=0.1
```

```
face=9999.
```

```
i=0
```

```
do while (z.lt.face)
```

```
  i=i+1
```

```
  face=a+b*x+c*x*x
```

```

write(10,*)x,z

tau=(i-1)*dtau

x=0.25*e*tau*tau+px*tau+xs
z=0.25*f*tau*tau+pz*tau+zs
end do

tau1=(i-2)*dtau
tau2=(i-1)*dtau
c-----
c caso em que o pol(tau2)=0. ou pol(tau1)=0. Neste caso deve-se
c aumentar o intervalo de tau.
if (pol(tau2).eq.0.) then
tau2=i*dtau
endif
if (pol(tau1).eq.0.) then
tau1=(i-3)*dtau
endif

xacc=0.0001
taui=rtbis(pol,tau1,tau2,xacc)
xi=0.25*e*taui*taui+px*taui+xs
zi=0.25*f*taui*taui+pz*taui+zs
tempo1=((e**2+f**2)/12.)*taui**3+((e*px+f*pz)/2.)*taui**2
$ +(d+e*xs+f*zs)*taui !tempo de transito de S (fonte) a I (refletor)
c
c-----
c Raio refletido
c-----
hlx=2*c*xi+b !derivada da funcao refletora h'(x)
xlinha=0.5*e*taui+px !derivada de x em tau=taui
zlinha=0.5*f*taui+pz

produto1=-xlinha*hlx+zlinha
produto2=sqrt(xlinha*xlinha+zlinha*zlinha)*sqrt(hlx*hlx+1*1)
alfa=acos(produto1/produto2)
phi=abs(atan(hlx))
if (teta.le.90.)then

```

```

    tetar=-pi/2.+phi+alfa
else
    tetar=-(pi/2+phi+alfa)
endif

p=sqrt(d+e*xi+f*zi)
px=p*cos(tetar)
pz=p*sin(tetar)
dtau=0.1
c    write(*,*)p*p-px*px-pz*pz, 1/p
i=0
do while (z.gt.0.)
    i=i+1

    tau=(i-1)*dtau

    x=0.25*e*tau*tau+px*tau+xi
    z=0.25*f*tau*tau+pz*tau+zi

    write(10,*)x,z          !imprime os os potos do raio refletido

end do

tau1=(i-2)*dtau
tau2=(i-1)*dtau
c-----
c    caso em que o pol1(tau2)=0. ou pol1(tau1)=0. Neste caso deve-se
c    aumentar o intervalo de tau.

if (pol1(tau2).eq.0.) then
    tau2=i*dtau
endif
if (pol1(tau1).eq.0.) then
    tau1=(i-3)*dtau
endif

pz1=pz          !necessarios para o calculo de pol1
zi1=zi

```

```

xacc=0.0001
taur=rtbis(pol1,tau1,tau2,xacc)

xir=0.25*e*taur*taur+px*taur+xi
zir=0.25*f*taur*taur+pz*taur+zi

tempo2=((e**2+f**2)/12.)*taur**3+((e*px+f*pz)/2.)*taur**2
$      +(d+e*xi+f*zi)*taur  !tempo de transito de I(refletor) a R(receptor)

tempot=tempo1+tempo2

write(*,*)xir,tempot*1e-3 !1e-3 e um fator para transformar o tempo
                                !de milisegundos em segundos.
write(40,*)xir,tempot*1e-3

end
c-----
function pol(t)
common/curva/ a,b,c
common/fonte/ xs,zs
common/velocidade/ e,f
common/eikonal/ px,pz
pol=a+b*(0.25*e*t*t+px*t+xs)+c*(0.25*e*t*t+px*t+xs)*
$      (0.25*f*t*t+pz*t+zs)
end
c-----

function pol1(t)
common/velocidade/ e,f
common/neco/ pz1,zi1
pol1=0.25*f*t*t+pz1*t+zi1
end
c-----

c=====
FUNCTION RTBIS(FUNC,X1,X2,XACC)
c-----definicoes
cproposito : Using bisection, find the root of a function FUNC known to
c            lie between X1 and X2. The root, returned as RTBIS, will be
c            refined until its accuracy is + - XACC.

```

```

c
centrada : func  r**4 vector of the input fuction
c           x1,x2 r**4 intervals of the function
c           xacc  r**4 accuracy
c
csaida :  rtbis r**4 roots of the function
c
csubrotinas requeridas :
c
cfonte : Press,W.H.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T.;
c        Numerical Recipes; First Edition; Cambridge University Press;
c        818 pages.
c
c-----dimensionamento
c=====
c**final-header
c
      PARAMETER (JMAX=40)
      FMID=FUNC(X2)
      F=FUNC(X1)
      IF(F*FMID.GE.0.) PAUSE 'Root must be bracketed for bisection.'
      IF(F.LT.0.)THEN
        RTBIS=X1
        DX=X2-X1
      ELSE
        RTBIS=X2
        DX=X1-X2
      ENDIF
      DO 11 J=1,JMAX
        DX=DX*.5
        XMID=RTBIS+DX
        FMID=FUNC(XMID)
        IF(FMID.LE.0.)RTBIS=XMID
        IF(ABS(DX).LT.XACC .OR. FMID.EQ.0.) RETURN
11  CONTINUE
      PAUSE 'too many bisections'
      END

```