



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

GEOE33 – TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO II

MODELAGEM SÍSMICA DE CURVAS DE
TEMPOS DE TRÂNSITO PARA CAMPOS
DE VELOCIDADES COM PONTOS
DIFRATORES

JORGE ZAMILUTE PASSOS SANTOS

SALVADOR – BAHIA
JULHO – 2022

**Modelagem Sísmica de Curvas de Tempos de Trânsito para Campos de
Velocidades com Pontos Difratores**

por

JORGE ZAMILUTE PASSOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Wilson Mouzer Figueiró

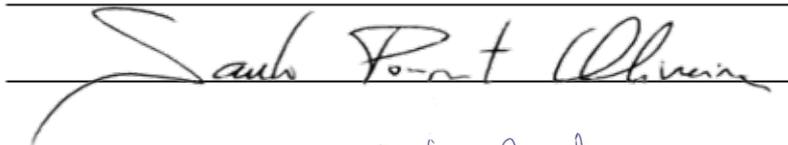
GEOE33 – TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO II

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA
DO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Wilson Mouzer Figueiró



Dr. Saulo Pomponet Oliveira



Dr. Juarez dos Santos Azevedo

DATA DA APROVAÇÃO: 11/07/2022

Dedico, especialmente, este trabalho
à minha esposa, aos meus filhos e a
meus pais; verdadeiros pilares desta
nobre obra.

*No mistério do sem-fim
equilibra-se um planeta.
E, no planeta, um jardim,
e, no jardim, um canteiro;
no canteiro uma violeta,
e, sobre ela, o dia inteiro,
entre o planeta e o sem-fim,
a asa de uma borboleta*

Cecília B. de Carvalho Meireles

Resumo

As falhas geológicas têm grande importância na geofísica do petróleo, uma vez que tais ocorrências podem estar associadas a armadilhas estruturais “traps”, responsáveis pelo aprisionamento do petróleo numa rocha reservatório. Elas apresentam, em suas bordas, pontos difratores que atuam como fontes secundárias, alterando a direção de propagação da onda, a partir da difusão radial de sua energia. A onda sísmica pode ser sintetizada em raios que se propagam perpendicularmente à frente de onda num meio isotrópico. Dessa forma, a presença de estruturas falhadas, em subsuperfície, alteram o vetor velocidade de propagação das ondas graças à ocorrência de difração. Este fenômeno é responsável pela geração de novas frentes de onda que são registradas em levantamentos sísmicos. O objetivo deste trabalho é verificar, através da modelagem direta, se existem padrões de eventos sísmicos associados aos fenômenos de reflexão, refração, transmissão e difração. Esta análise é feita em curvas de tempo de trânsito geradas para os modelos falhados propostos. A importância da modelagem é auxiliar na interpretação de dados reais de levantamentos sísmicos, a partir da comparação dos dados sintéticos de modelos geológicos pré-definidos com os valores reais obtidos nos sismogramas, assim como no processo de inversão geofísica, permitindo inferências de características geológicas reais de subsuperfície, assistido por dados sintéticos calculados. Para isto, foram propostas cinco estruturas falhadas de subsuperfície, compostas com duas camadas homogêneas e isotrópicas. Para cada um destes modelos foram consideradas três posições de fonte, relativas à localização do plano de falha, gerando um total de 15 gráficos. Adicionalmente, foi construído um gráfico de curvas de tempos de trânsito para um modelo de duas camadas sem falha, a fim de servir como referência em análises. Isto facilita a percepção do surgimento, nos modelos falhados, de eventos referentes às ondas difratadas, transmitidas e refratadas. Para o presente trabalho, não foi considerado o fenômeno de atenuação da energia das ondas, amplitudes, durante sua propagação, e nem a conversão das ondas sísmicas do tipo P em S e vice-versa. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar, no sismograma sintético, um padrão de curvas de tempo de trânsito com presença de hipérbolas de difração, surgimento de novas frentes de ondas refratadas e segmentação de curvas de reflexão.

Abstract

Geological faults are of great importance in petroleum geophysics, since such occurrences may be associated with structural “traps”, responsible for oil trapping in a reservoir rock. They present, on their edges, diffraction points that act as secondary sources, changing the wave propagation direction, from the radial diffusion of its energy. The seismic wave can be synthesized in rays that propagate perpendicularly to the wavefront in an isotropic medium. Thus, the presence of faulty structures, in the subsurface, alters the propagation velocity vector of the waves thanks to the occurrence of diffraction. This phenomenon is responsible for the generation of new wavefronts that are recorded in seismic surveys. The objective of this work is to verify, through direct modeling, if there are patterns of seismic events associated with the phenomena of reflection, refraction, transmission and diffraction. This analysis is done on transit time curves generated for the proposed failed models. The importance of modeling is to assist in the interpretation of real data from seismic surveys, from the comparison of synthetic data from pre-defined geological models with the real values obtained in the seismograms, as well as in the process of geophysical inversion, allowing inferences of real geological characteristics subsurface, assisted by calculated synthetic data. For this, five subsurface fault structures were proposed, composed with two homogeneous and isotropic layers. For each of these models, three source positions were considered, relative to the location of the fault plane, generating a total of 15 graphs. Additionally, a graph of transit time curves was constructed for a two-layer model without failure, in order to serve as a reference in analyses. This facilitates the perception of the emergence, in the failed models, of events referring to the diffracted, transmitted and refracted waves. For the present work, the phenomenon of attenuation of wave energy, amplitudes, during its propagation, nor the conversion of P-type seismic waves into S-type and vice-versa were not considered. From the results obtained, it was possible to identify, in the synthetic seismogram, a pattern of transit time curves with the presence of diffraction hyperbolas, emergence of new refracted wave fronts and segmentation of reflection curves.

Sumário

Resumo

Abstract

Introdução	15
1 Fundamentação teórica	17
1.1 Método Sísmico e Propriedades Físicas da Rocha	17
1.2 Difração	20
2 Metodologia	23
3 Resultados e Interpretação	28
3.1 Modelo M_0 : sem falha.	29
3.2 Modelo M_1 : Falha Reta, com duas quinas.	31
3.2.1 Fonte à esquerda das quinas	31
3.2.2 Fonte sobre as quinas	33
3.2.3 Fonte à direita das quinas	35
3.2.4 Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas	36
3.2.5 Comparação entre M_0 e M_1	37
3.3 Modelo M_2 : Falha Normal, com duas quinas.	37
3.3.1 Fonte à esquerda das quinas	38
3.3.2 Fonte entre as quinas	39
3.3.3 Fonte à direita das quinas	40
3.3.4 Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas	41
3.4 Modelo M_3 : Falha Inversa, com duas quinas.	42
3.4.1 Fonte à esquerda das quinas	42
3.4.2 Fonte entre as quinas	43
3.4.3 Fonte à direita das quinas	44
3.4.4 Comparação entre M_1 , M_2 e M_3	45

3.5	Modelo M_4 : Graben, com quatro quinas.	45
3.5.1	Fonte à esquerda das quinas	46
3.5.2	Fonte sobre a primeira quina	47
3.5.3	Fonte entre as quinas	48
3.6	Modelo M_5 : Horst, com quatro quinas.	50
3.6.1	Fonte à esquerda das quinas	50
3.6.2	Fonte entre as quinas	51
3.6.3	Fonte à direita das quinas	52
3.6.4	Comparação entre M_5 e M_4	53
4	Conclusões	56
	Agradecimentos	58
	Referências	59

Lista de Tabelas

1.1	Velocidade de ondas compressionais para diferentes rochas e materiais terrestres. (Kearey et al., 2009)	19
-----	---	----

Lista de Figuras

1.1	Módulos elásticos: (A) Modulo de Young E , (B) Modulo de volume K , (C) Modulo de rigidez μ , e (D) Modulo axial ψ . A variável A , que aparece nas expressões de E e ψ , é a área transversal inicial da barra deformada. (Kearey et al., 2009)	18
1.2	Curva hiperbólica de difração centrada no ponto difrator (Alsadi e Baban, 2020). O caminho do raio (“ray-path”) do ponto difrator (“point source”), que atua como fonte secundária, ocorre em todas as direções, independentemente da posição da fonte primária. Apresenta-se, no gráfico superior, a profundidade (“depth”) do meio versus a posição “ x ” na superfície, onde ocorre as chegadas de difrações (“diffraction arrivals”). No gráfico inferior, o tempo de trânsito (“time”) também está em função de “ x ”, onde estão instalados os receptores. Pode-se observar, neste último gráfico, a imagem sísmica (“seismic image”) da hipérbole de difração (“diffraction hyperbola”). (Kearey et al., 2009)	21
1.3	(A) Modelo estrutural da subsuperfície e (B) eventos de reflexão e difração resultantes, que seriam observados numa seção sísmica não migrada. (Adaptado de Kearey et al., 2009)	22
1.4	Falha estrutural atuando como armadilha do petróleo. O acúmulo de petróleo (“rock oil”) e gás natural na rocha porosa é possível, devido a um conveniente arranjo de falhas (“faults”) envolvendo rochas: selantes (folhelho impermeável, “impermeable shale clay”), reservatório porosas (“porous reservoir rock”), e geradoras (“source rock”). Aparece, ainda, esquema de poço de petróleo (“oil well”). (Alsadi e Baban, 2020)	22
2.1	Modelos geológicos de subsuperfície utilizados na modelagem direta de curvas de tempos de trânsito.	24
2.2	Modelo M_1 com o traçamento da onda sísmica que é emitida na fonte S , transmitida para o meio 2, através da interface I_1 , no ponto de incidência A , atingindo o ponto difrator D_2 , e retornando à superfície.	27

3.1	Modelo M_0 : sem falha. Apresenta duas camadas homogêneas e isotrópicas, sem falha e separadas por interface horizontal. Os eventos ondulatórios modelados foram: o direto (cinza), o refletido (verde), o refratado (preto) e os múltiplos com duas (rosa) e três (azul) reflexões. As curvas de tempo de trânsito são simétricas relativamente à posição S da fonte.	30
3.2	Modelo M_1 : Fonte à esquerda das quinas. No gráfico aparecem dois pontos difratores (“quinas”), D_1 e D_2 , responsáveis pela geração das curvas (hipérboles) de difração. Estas apresentam maior curvatura que a curva de reflexão. Observa-se, ainda, a segmentação de curvas, com exceção das ondas superficiais (curva “dir”) e da curva de difração (dif- D_1), devido à ausência de obstáculos interpostos entre D_1 e a superfície de observação. Percebe-se, em relação ao modelo M_0 , o aparecimento de ondas transmitidas (dif- D_2 -trans- I_1), devido aos raios que atravessam o meio 2, à esquerda da quina.	31
3.3	Modelo M_1 : Fonte sobre as quinas. Neste gráfico aparecem, à direita das quinas, outros dois segmentos de curvas de múltiplas com dupla reflexão (mult-rfl ₂ - I_3) e tripla reflexão (mult-rfl ₃ - I_3); além das já existentes mult-rfl ₂ - I_1 e mult-rfl ₃ - I_1 , com a fonte à esquerda das quinas. O padrão de curvas segmentadas, em torno da fonte e das duas quinas, reforça sua correlação com a presença de camada falhada em subsuperfície.	33
3.4	Modelo M_1 : Fonte à direita das quinas. A maior profundidade da camada no lado (à direita das quinas), onde está a fonte, ocasiona um maior afastamento vertical das curvas relativas aos diferentes eventos. Isto pode ser mais facilmente observado nas curvas de reflexão e múltiplas.	35
3.5	Modelos M_1 : Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas D_1 e D_2 . As hipórbolas de difração, incluindo os respectivos segmentos, associadas às curvas dif- D_1 , dif- D_2 e dif- D_2 -trans- I_1 , apresentam os tempos mínimos de trânsito sobre os pontos difratores (fontes secundárias), independentemente da posição da fonte S.	36
3.6	Comparação entre M_0 e M_1 . São evidenciados eventos sísmicos associados à descontinuidade lateral da interface (entre meios 1 e 2) e à ocorrência de pontos difratores, através de curvas de transmissão e difração (dif- D_2 -trans- I_1 , dif- D_1 -rfr- I_1 e dif- D_2 -rfr- I_3). As descontinuidades de curvas associadas ao salto, de altura $h_2 - h_1$, assim como os afastamentos dos segmentos de curvas, são consequências dessas estruturas de falhas em subsuperfície.	37

3.7	Modelo M_2 : Fonte à esquerda das quinas. Padrão de curvas similar às curvas dos modelos M_1 (Falha Reta) e M_3 (Falha Inversa), com a fonte à esquerda das quinas, visto que tais modelos tem apenas duas quinas e se diferenciam entre si pelo ângulo do plano da falha.	38
3.8	Modelo M_2 : Fonte entre as quinas. Na figura, é apresentada a curva de reflexão na interface inclinada I_2 , dado seu ângulo de inclinação, além das curvas de reflexão nas interfaces horizontais I_1 e I_3 . Neste modelo, além da segmentação das curvas de reflexão, é possível perceber o cruzamento das curvas rfl- I_2 e rfl- I_3 , a partir do qual o tempo de trânsito da onda refletiva em I_2 se torna maior.	39
3.9	Modelo M_2 : Fonte à direita das quinas. Neste gráfico, também é apresentada a curva refletida na interface inclinada I_2 . As curvas apresentam maior afastamento entre si, quando comparadas com as curvas do Modelo M_4 , para a fonte à esquerda das quinas. Isto ocorre, visto que à direita das quinas, onde a fonte S está localizada, a profundidade do meio 1 é maior.	40
3.10	Modelos M_1 : Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas D_1 e D_2 . As hipérbolas de difração, incluindo os respectivos segmentos, associadas às curvas dif- D_1 , dif- D_2 e dif- D_2 -trans- I_1 , apresentam os tempos mínimos de trânsito sobre os pontos difratores (fontes secundárias), independentemente da posição da fonte S.	41
3.11	Modelo M_3 : Fonte à esquerda das quinas. Nesta figura, é apresentada a curva do raio transmitido-refletido trans- I_2 -rfl- I_3 (azul escuro). Observa-se, ainda, um padrão de curvas muito similar com o Modelo M_1 com a fonte à esquerda das quinas.	42
3.12	Modelo M_3 : Fonte entre as quinas. Neste gráfico aparecem outros segmentos das curvas de múltiplas com dupla e tripla reflexão, à direita das quinas, devido à aproximação da fonte com a interface I_3 e, conseqüentemente, trazendo estes segmentos para dentro da faixa distância-tempo compreendida no gráfico. . .	43
3.13	Modelo M_3 : Fonte à direita da quinas. Tal como no Modelo M_1 com a fonte à direita das quinas, percebe-se, neste gráfico, um maior afastamento das curvas, quando comparadas às Figuras 3.11 e 3.12, devido à maior profundidade da camada onde está localizada a fonte.	44
3.14	Comparação entre M_1 , M_2 e M_3 : Fonte entre as quinas D_1 e D_2 . Os gráficos possibilitam uma análise qualitativa, visto que apresentam diferentes escalas para os eixos coordenados.	45

3.15	Modelo M ₄ : Fonte à esquerda das quinas. As curvas de difração, associadas às quinas D ₂ e D ₄ , são segmentadas, a saber: dif-D ₂ (segmento da curva de difração à direita de D ₁), dif-D ₂ -trans-I ₁ (difratada-transmitida, em I ₁ , à esquerda de D ₁), dif-D ₄ (segmento da curva de difração à esquerda de D ₃) e dif-D ₄ -trans-I ₅ (difratada-transmitida, em I ₅ , à direita de D ₃)	46
3.16	Modelo M ₄ : Fonte sobre a primeira quina. O aumento do número de interfaces horizontais (I ₁ , I ₃ e I ₅), gera uma maior segmentação das curvas de reflexão e refração. O alinhamento vertical da fonte com os pontos difratores D ₁ e D ₂ , ocasiona um pequena simetria de alguns segmentos de curvas em torno desse eixo (alinhamento vertical de S, D ₁ e D ₂).	47
3.17	Modelo M ₄ : Fonte entre as quinas. Nesta posição da fonte, há um padrão maior de simetria, em relação às demais posições da fonte. Os mínimos das curvas de difração, assim como as discontinuidades de curvas de difração associadas aos pontos difratores inferiores D ₂ e D ₄ , estão localizados acima das falhas.	48
3.18	Comparação entre M ₄ e M ₁ : Fonte sobre D ₁ e D ₂ . É observado um maior grau de simetria em torno da fonte S e das quinas D ₁ e D ₂ , quando estas estão alinhadas verticalmente.	49
3.19	Modelo M ₅ : Fonte à esquerda das quinas. Sobre o Horst aparecem segmentos de curvas de difração, dif-D ₁ -rfr-I ₃ e dif-D ₃ -rfr-I ₃ , referentes às ondas que saem dos pontos difratotres e que percorrem a interface I ₃ , retornando à superfície com ângulo crítico. As curvas de reflexão e múltiplas de dupla (mult-rfl ₂ -I ₁) e tripla (mult-rfl ₃ -I ₁) trajetória, aparecem segmentadas e no lado (sobre a I ₁) onde se encontra a fonte.	50
3.20	Modelo M ₅ : Fonte entre as quinas. O gráfico apresenta um maior grau de simetria em relação à posição da fonte, já que a mesma está localizada entre as quinas e estas são responsáveis pela ocorrências de novas frentes de onda de difração, refração, transmissão; além das quinas serem responsáveis pela segmentação de curvas de reflexão e das múltiplas. A onda direta auxilia na análise, como referencial das demais curvas, visto que ela está centrada sobre a fonte e não sofre influência das quinas, por ser oriunda das ondas que se propagam sobre a superfície.	51

3.21	Modelo M ₅ : Fonte à direita das quinas. Este gráfico tem um padrão de curvas muito similar ao Modelo M ₅ com a fonte à esquerda das quinas; porém, em lado oposto. Além disso, o gráfico apresenta maior afastamento das curvas, entre si, devido à maior profundidade da camada do meio 1, posição da fonte (sobre I ₅).	52
3.22	Comparação entre M ₅ e M ₄ : Fonte entre as quinas. Apesar de não serem modelos similares, apresentam maior grau de simetria das curvas em relação à fonte S, quando comparados com as demais posições da fonte em relação às quinas. No modelo M ₅ , as curvas de reflexão e múltiplas apresentam menor deslocamento vertical, entre si, visto que a profundidade da interface é menor na posição da fonte.	53
3.23	Modelo sísmico M, onde são apresentados duas cavernas, em P1 e P2, e quatro falhas reversas em F1, F2, F3 e F4; entre outros pontos difratores. (Hongyan et al, 2020)	54
3.24	Registros sísmicos originais do modelo M, onde são apresentadas as ondas difratadas causadas por afinamento (desbaste), cavernas, e falhas. Assim como no modelo M, a identificação do desbaste é A, as cavernas são P1 e P2, e as falhas são F1, F2, F3 e F4. O número total de geofones foi de 241, com espaçamento entre eles de 5 m. O espaçamento entre tiros foi de 10 m e seu número total de 121. A Figura mostra os registros sísmicos do 1º, 60º e 121º tiro. (Hongyan et al., 2020)	54

Introdução

O método sísmico é mais utilizado na exploração de petróleo, tanto em seu volume de aquisição quanto em seu amplo espectro de aplicações (Kearey et al., 2009), e consiste em medir tempos de trânsito (ou: amplitudes, atenuações, fases, e etc) de ondas mecânicas que se propagam no interior da Terra. Após serem geradas natural ou artificialmente, por uma fonte, essas ondas retornam à superfície, através de fenômenos ondulatórios, tais como: reflexão, transmissão, difração, e etc; sendo, então, captadas por receptores também chamados geofones. A velocidade de propagação da onda sísmica é determinada por módulos elásticos e pelas propriedades físicas do meio (rocha ou camada) no qual se propaga, como: composição, textura, porosidade e presença de fluidos nos poros (Kearey et al., 2009). Na interface das camadas, parte da energia é refletida, parte é transmitida (ou refratada) e outra parte pode, ainda, ser difratada. A difração ocorre quando a onda incide sobre um obstáculo, corpo ou zona geologicamente heterogênea, ou sobre uma quina de borda de falha, que tenha dimensão da ordem do comprimento de onda, ocasionando o espalhamento da energia.

As falhas geológicas correspondem a descontinuidades na interface de camadas, provocadas por ruptura, fratura ou cisão da rocha, com o consequente deslocamento de suas partes. Elas podem gerar pontos difratores em suas bordas e, conseqüentemente, ocasionar alteração no vetor velocidade dos raios sísmicos que incidem sobre tais pontos. Estas falhas tem grande importância na prospecção de petróleo, visto que podem constituir armadilhas geológicas (“trapas”) necessárias para o aprisionamento de petróleo em rochas reservatório. De acordo com Hongyan et al. (2020), desde o início da década de 1950, pesquisadores reconheceram o potencial de ondas difratadas para identificar e rastrear zonas geológicas heterogêneas e pequenas falhas. No trabalho em questão, foram considerados modelos com camadas homogêneas e isotrópicas, sendo aplicadas leis de propagação da onda para cálculo do tempo de trânsito das ondas sísmicas. A partir das curvas obtidas de tempo de trânsito versus posição de chegada de raios sísmicos na superfície de observação, procurou-se verificar uma possível existência de padrão de comportamento que pudesse auxiliar na análise de dados reais, de forma a associar curvas do sismograma sintético a possíveis presenças de pontos difratores e, conseqüentemente, de falhas geológicas em subsuperfície.

A modelagem geofísica, utilizada para obtenção dos resultados sintéticos de tempo de trânsito da onda sísmica, consistiu na proposição de cinco modelos geológicos com falhas (“degraus”) e de três posições da fonte, com relação à quina (plano de falha), para cada modelo, estando a fonte: à esquerda, sobre, e à direita da quina. Para traçamento das trajetórias dos raios, nos modelos de campo de velocidades sísmicas, foram aplicadas noções elementares que regem o comportamento do raio sísmico; porém, não foi considerado o efeito de atenuação da onda sísmica (provocada pelo espalhamento geométrico da energia, em função de r^{-2} , e por outras formas de perda de energia) e nem a conversão de onda P em S e vice-versa. A construção das curvas de tempo de trânsito, por sua vez, levou em consideração o comprimento da trajetória do raio e a velocidade da onda sísmica no meio, sendo esta um dos parâmetros do modelo. Os registros sismográficos sintéticos, obtidos dos modelos propostos, apresentam aspectos em comum, quando comparados ao modelo de duas camadas sem falha. Entretanto, nos modelos com falhas, surgem novas curvas de ondas transmitidas, difratadas e refratadas nos pontos difratores, além de apresentar descontinuidades em curvas de ondas refletidas. Isto sugere uma correlação preliminar dos dados sintéticos com ocorrência de falha geológica, o que não significa que tais observações serão obtidas sem qualquer necessidade de processamento dos dados brutos, num levantamento real; mas, que estes padrões de comportamento podem surgir após realização de processamento de dados reais ou na interpretação dos dados já processados.

Para elaboração dos modelos e gráficos foram utilizados os softwares GNUPLOT, versão 5.2, e a linguagem de programação Fortran 95, sendo esta executada em ambiente Windows através do editor de texto VIM 8.1 e do emulador de terminal Cygwin64. Os modelos geológicos e as trajetórias, de subsuperfície, dos raios sísmicos foram traçados através das ligações manuais de pontos (x, z) do plano cartesiano, utilizando o utilitário gráfico GNUPLOT. Os tempos de trânsito foram obtidos, por sua vez, a partir da aplicação de fórmulas matemáticas em função dos parâmetros do modelo, utilizando para cálculo o Fortran 95. Estes dados foram plotados no GNUPLOT, para obtenção das curvas. Dessa forma, para cada tipo de raio sísmico considerado (de ondas: diretas, refletidas, refratadas, transmitidas, etc.), foi calculado o tempo de trânsito a partir da: trajetória do raio sísmico, do modelo (parâmetros) considerado, e das leis físicas de propagação da onda sísmica.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, através dos quais serão tratados, nesta sequência: (1) Considerações teóricas, onde serão abordadas os principais aspectos, definições e fenômenos físicos envolvidos no traçamento dos raios sísmicos; (2) Metodologia utilizada para o cálculo dos dados sintéticos, a partir dos campos de velocidades propostos; (3) Resultados e suas interpretações; e (4) Conclusões.

Capítulo 1

Fundamentação teórica

Uma revisão básica das principais teorias e conceitos utilizados será feita neste capítulo, a fim de auxiliar na compreensão do trabalho e de seus resultados.

1.1 Método Sísmico e Propriedades Físicas da Rocha

O Método Sísmico consiste na utilização de estudos e resultados relativos ao fenômeno da propagação de ondas sísmicas em meios rochosos, visando aplicações de caráter científico ou exploratório. Em termos gerais, o método utiliza uma onda sísmica gerada por uma fonte (natural ou artificial) que se propaga num meio rochoso, incidindo em interfaces litológicas, e atravessando camadas com diferentes impedâncias acústicas Z . A impedância é definida como sendo o produto da densidade ρ da rocha pela velocidade da onda acústica v que nela se propaga, conforme segue:

$$Z = \rho v. \quad (1.1)$$

Nos pontos de incidência do raio sísmico podem ocorrer fenômenos ondulatórios de reflexão, refração, difração ou, até mesmo, a conjunção deles, como: difração-refração, transmissão-difração, etc. O tempo de chegada da onda sísmica na superfície é registrada por receptores, enquanto que a velocidade de propagação da mesma é obtida através da relação entre distância percorrida e seu respectivo tempo de chegada. O objetivo do método é, portanto, mapear a velocidade de propagação para a obtenção de informações acerca da distribuição dos limites geológicos em profundidade. Para tanto, o método sísmico se utiliza de fontes artificiais controladas, ou até mesmo fontes naturais (tais como terremotos, deslizamentos de terra, erupções vulcânicas, etc), além de sistemas de registro chamados geofones, processamento de dados e técnicas de interpretação bastante específicos (Kearey et al., 2009).

O tempo de percurso da onda sísmica está relacionado às propriedades físicas da rocha,

tais como os módulos elásticos e densidade. As ondas sísmicas são divididas em ondas de *corpo* e ondas *superficiais*. As primeiras são subdivididas em ondas *longitudinais ou compressionais* (ou ondas P), que se propagam por deformação uniaxial (compressão e expansão) do corpo, com vibração dos pontos materiais do meio em torno de seus pontos fixos, na direção de propagação da onda; e em ondas de *cisalhamento ou transversais* (também chamadas de ondas S), cuja direção de oscilação dos pontos materiais do meio é perpendicular à direção de propagação da onda. A velocidade v_P de uma onda P é dada por:

$$v_P = \left[\frac{\psi}{\rho} \right]^{1/2}, \quad (1.2)$$

onde $\psi = K + \frac{4}{3}\mu$ é o módulo axial, dado pela relação entre tensão e deformação longitudinais, sendo K a incompressibilidade e μ o módulo de rigidez do material.

A velocidade v_S de uma onda S é:

$$v_S = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}, \quad (1.3)$$

dada pela relação entre a tensão e deformação de cisalhamento. As constantes elásticas são definidas, portanto, pela relação linear entre um tipo particular de tensão e de deformação no campo elástico. Na Figura 1.1 é citado o Módulo de Young (E).

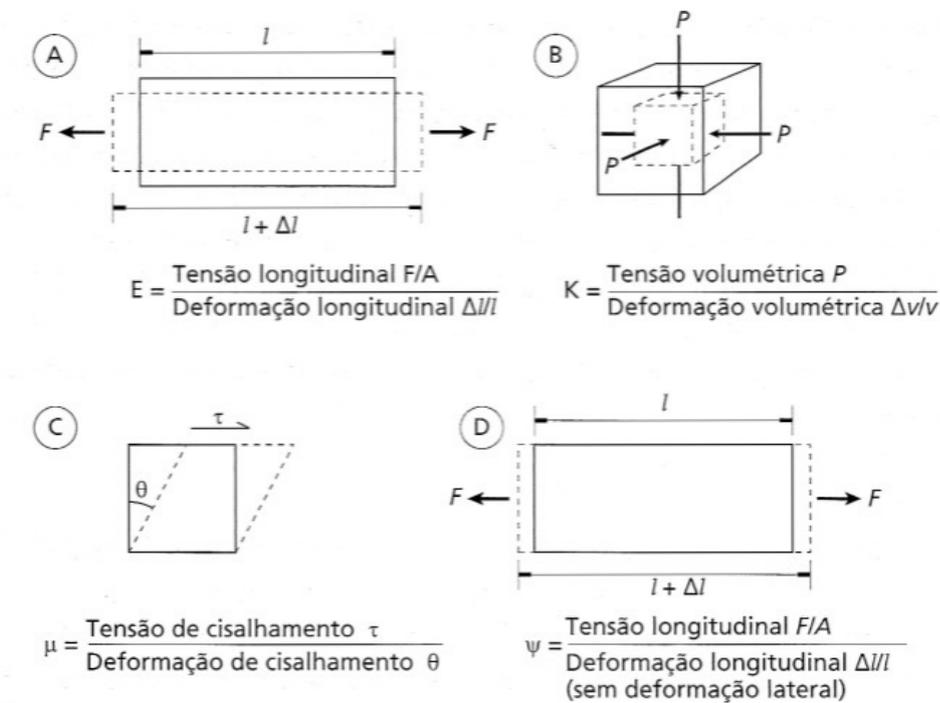


Figura 1.1: Módulos elásticos: (A) Módulo de Young E , (B) Módulo de volume K , (C) Módulo de rigidez μ , e (D) Módulo axial ψ . A variável A , que aparece nas expressões de E e ψ , é a área transversal inicial da barra deformada. (Kearey et al., 2009)

As ondas superficiais propagam-se ao longo da superfície ou ao longo de interface entre dois meios sólidos não similares (Kearey et al., 2009). Na Tabela 1.1 são apresentados os valores de velocidade de ondas compressoriais para diferentes rochas e materiais terrestres.

	v_p (km s ⁻¹)
Materiais inconsolidados	
Areia (seca)	0,2 – 1,0
Areia (saturada em água)	1,5 – 2,0
Argila	1,0 – 2,5
Till glacial (saturado em água)	1,5 – 2,5
Permafroste	3,5 – 4,0
Rochas sedimentares	
Arenitos	2,0 – 6,0
Arenito terciário	2,0 – 2,5
Arenito Pennant (Carbonífero)	4,0 – 4,5
Quartzito cambriano	5,5 – 6,0
Calcários	2,0 – 6,0
Greda cretácea	2,0 – 2,5
Óólitos jurássicos e calcários bioclásticos	3,0 – 4,0
Calcário carbonífero	5,0 – 5,5
Dolomitos	2,5 – 6,5
Sal	4,5 – 5,0
Anidrita	4,5 – 6,5
Gipso	2,0 – 3,5
Rochas ígneas/metamórficas	
Granito	5,5 – 6,0
Gabro	6,5 – 7,0
Rochas ultramáficas	7,5 – 8,5
Serpentinito	5,5 – 6,5
Fluidos dos poros	
Ar	0,3
Água	1,4 – 1,5
Gelo	3,4
Petróleo	1,3 – 1,4
Outros materiais	
Aço	6,1
Ferro	5,8
Alumínio	6,6
Concreto	3,6

Tabela 1.1: Velocidade de ondas compressoriais para diferentes rochas e materiais terrestres. (Kearey et al., 2009)

A velocidade de propagação da onda sísmica não depende, portanto, da sua frequência; mas, sim, das propriedades físicas da rocha. Num meio homogêneo, a velocidade de propagação da onda sísmica será a mesma em todos os pontos do meio (Kearey et al., 2009). Além disso, num meio isotrópico a velocidade é a mesma em qualquer direção e o raio é perpendicular à frente de onda em qualquer ponto. Dois princípios da teoria do raio sísmico

são fundamentais para a compreensão deste trabalho, a saber:

- Propagação retilínea da onda num meio homogêneo: explica-se pelo Princípio de Fermat, que estabelece: “*de todos os caminhos possíveis para ir de um ponto a outro, a onda segue aquele que é percorrido em um tempo mínimo*” (Nussenzveig, 1998);
- Os ângulos de incidência (θ_1) e os de reflexão, refração e transmissão, (θ_2), são regidos pela lei de Snell, que diz que: *a razão das velocidades da onda incidente (v_1) e da onda transmitida, refletida ou refratada, (v_2), é igual à razão entre os senos do ângulo de incidência e o de transmissão*. Isto conduz à seguinte expressão:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)}. \quad (1.4)$$

1.2 Difração

O fenômeno de difração é descrito pela teoria ondulatória e consiste na “deflexão” (desvio) da propagação retilínea da onda, quando esta incide sobre um pequeno obstáculo, em relação ao comprimento de onda, ou quando passa por um orifício muito pequeno (Nussenzveig, 1998). Num meio geológico, o “espalhamento” da onda sísmica ocorre em interfaces com contraste de impedância acústica e que apresentam descontinuidades abruptas, ou em estruturas cujo raio de curvatura é menor que o comprimento de onda das ondas incidentes, onde as leis de reflexão e refração não mais se aplicam (Kearey et al., 2009). Os pontos difratores atuam como fontes secundárias, que irradiam a energia sísmica incidente, e podem ocorrer em bordas de blocos rochosos falhados, em corpos geológicos irregulares ou em mudanças abruptas no tipo de rocha (zonas geológicas heterogêneas), tais como: pequenos objetos isolados como matacões, cavernas, *pinch-out*, etc. As curvas de difração geradas num meio de velocidade uniforme apresentam padrão hiperbólico de maior curvatura, quando comparadas com as curvas de reflexão (Kearey et al., 2009). A Figura 1.2 representa uma curva hiperbólica de difração, cujo ápice coincide com o ponto difrator.

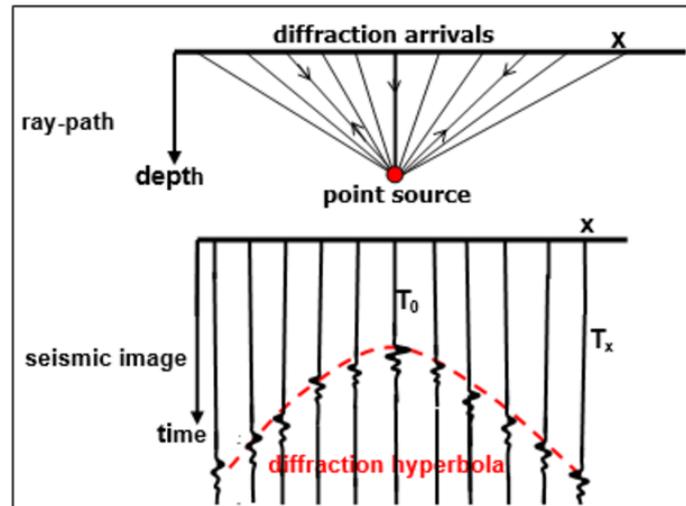


Figura 1.2: Curva hiperbólica de difração centrada no ponto difrator (Alsadi e Baban, 2020). O caminho do raio (“ray-path”) do ponto difrator (“point source”), que atua como fonte secundária, ocorre em todas as direções, independentemente da posição da fonte primária. Apresenta-se, no gráfico superior, a profundidade (“depth”) do meio versus a posição “x” na superfície, onde ocorre as chegadas de difrações (“diffraction arrivals”). No gráfico inferior, o tempo de trânsito (“time”) também está em função de “x”, onde estão instalados os receptores. Pode-se observar, neste último gráfico, a imagem sísmica (“seismic image”) da hipérbole de difração (“diffraction hyperbola”). (Kearey et al., 2009)

A Figura 1.3 (Adaptada de Kearey et al. (2009)) ilustra: (A) algumas estruturas geológicas com fontes difratoras; e (B) seção sísmica não migrada. Os círculos coloridos, inseridos na figura original, fazem a correlação entre os pontos difratoras das bordas dos blocos falhados, que agem como fontes pontuais, e as respectivas regiões que contemplam o tempo mínimo de trânsito das curvas hiperbólicas de difração. Os pontos difratoras estão localizados nas terminações de interfaces refletoras de uma falha geológica.

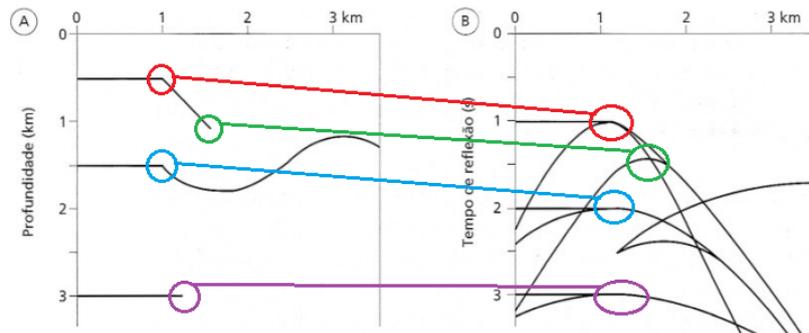


Figura 1.3: (A) Modelo estrutural da subsuperfície e (B) eventos de reflexão e difração resultantes, que seriam observados numa seção sísmica não migrada. (Adaptado de Kearey et al., 2009)

As falhas geológicas constituem um tipo de armadilha geológica e correspondem a estruturas resultantes da ruptura ou cisão de blocos rochosos, com o conseqüente deslocamento de suas partes. Isto se deve ao acúmulo e eventual liberação de energia, em função da pressão geralmente aplicada por placas tectônicas, com intensidade maior que a capacidade de resistência e plasticidade das camadas rochosas. Elas tem um papel fundamental para o aprisionamento do petróleo, ao colocar rochas reservatório em contato com rochas selantes (Thomas, 2001).

A Figura 1.4 ilustra o papel da falha na constituição de uma armadilha geológica estrutural, permitindo a acumulação de petróleo num reservatório.

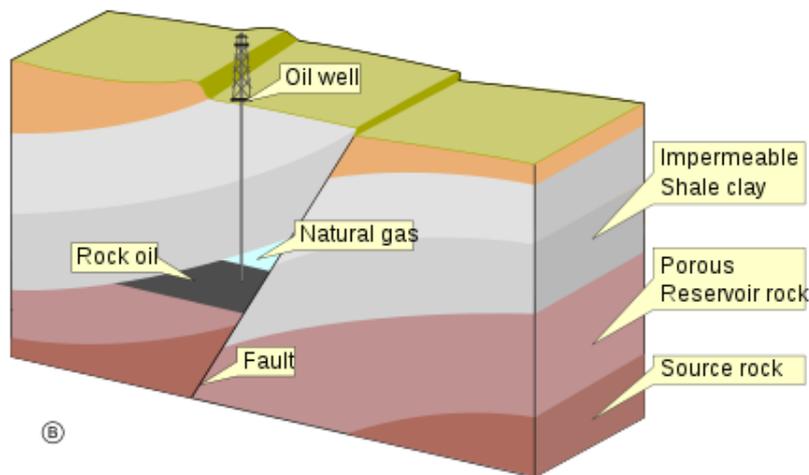


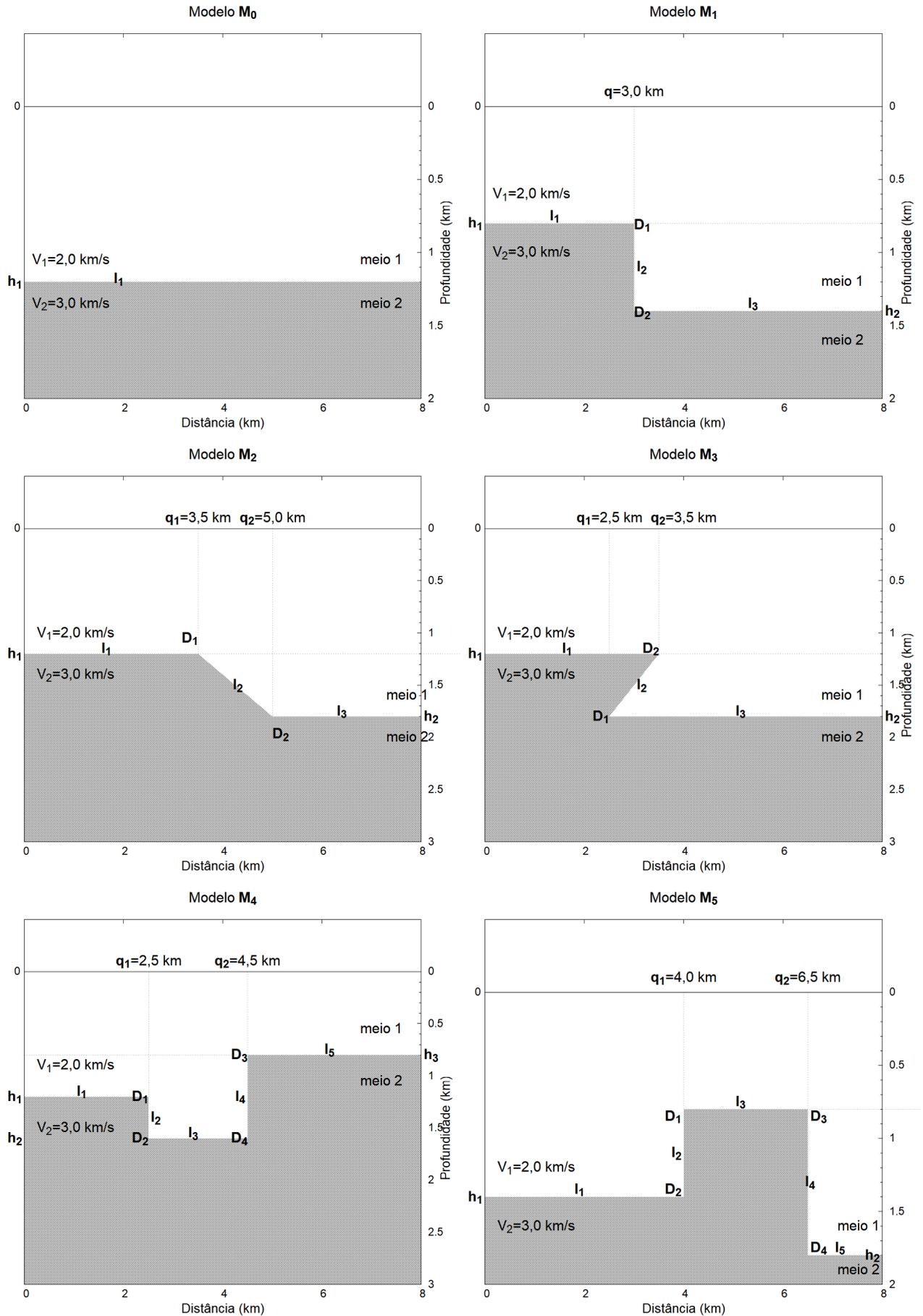
Figura 1.4: Falha estrutural atuando como armadilha do petróleo. O acúmulo de petróleo (“rock oil”) e gás natural na rocha porosa é possível, devido a um conveniente arranjo de falhas (“faults”) envolvendo rochas: selantes (folhelho impermeável, “impermeable shale clay”), reservatório porosas (“porous reservoir rock”), e geradoras (“source rock”). Aparece, ainda, esquema de poço de petróleo (“oil well”). (Alsadi e Baban, 2020)

Capítulo 2

Metodologia

Foi utilizada a modelagem sísmica para geração de dados sintéticos de tempo de trânsito de ondas sísmicas que se propagam em estruturas geológicas falhadas de subsuperfície, comparando os modelos entre si e com um modelo sem falha. Foram construídos cinco modelos diferentes de falha e, para cada um, foram gerados três gráficos com diferentes posições da fonte em relação à “quina” (plano de falha). A mudança da posição da fonte, em relação aos pontos difratores dos modelos propostos, tem como objetivo a análise da dinâmica das curvas de tempos de trânsito, ou análise do rearranjo das mesmas, ao movimentar a fonte sobre a superfície; além de viabilizar uma análise mais abrangente do comportamento das curvas quando comparadas com dados reais de sismogramas, visto que num levantamento real não se sabe se a fonte está localizada antes, sobre ou após a(s) quina(s). Esta etapa consiste na geração e análise qualitativa de quinze gráficos com dados sintéticos de tempo de trânsito, a fim de avaliar se existe um padrão de comportamento de curvas que possa auxiliar na identificação de falhas geológicas ("trapas") em levantamentos sísmicos reais. Na modelagem direta, foram utilizados o Fortran 95, para obtenção dos dados calculados, além do gerador de gráficos GNUPLOT. Os modelos simularam uma geologia de subsuperfície com duas camadas homogêneas e isotrópicas, com características de velocidade de propagação de onda iguais a 2,0 e 3,0 km/s para os meios 1 e 2, respectivamente, conforme apresentado da Figura 2.1. Neste trabalho, não foram considerados os efeitos de atenuação da onda sísmica durante sua propagação pelas camadas geológicas, assim como foram considerados meios homogêneos e isotrópicos, valendo-se da teoria do raio sísmico para geração dos tempos de trânsito.

Figura 2.1: Modelos geológicos de subsuperfície utilizados na modelagem direta de curvas de tempos de trânsito.



O ponto “zero”, 0, de referência no eixo X localiza-se na extremidade esquerda horizontal do modelo, e x é a posição do receptor relativamente à tal referência fixa e S é a posição da fonte.

O tempo de trânsito foi calculado com base na teoria do raio sísmico. Para as ondas diretas, refletidas, refratadas e difratadas, foram obtidas as seguintes expressões:

- Onda Direta: se propaga na superfície do meio 1, e seu tempo de trânsito é dado por:

$$T_{\text{dir}}(x) = \frac{|x - S|}{v_1}, \quad (2.1)$$

onde v_1 é a velocidade da onda no meio 1.

- Onda Refletida: se propaga no meio 1 e é refletida na base (interface) da camada, e seu tempo de trânsito é dado por:

$$T_{\text{ref}}(x) = \frac{\sqrt{4h_i^2 + |x - S|^2}}{v_1}, \quad (2.2)$$

onde h_i é a profundidade no ponto de incidência da interface.

- Onda Refratada: a onda atinge a base da camada com ângulo crítico, se propaga na interface (entre os meios 1 e 2) horizontal, retornando à superfície com ângulo crítico. Seu tempo de trânsito é dado por:

$$T_{\text{refr}}(x) = \frac{2h_i}{v_1 \cos(\theta_c)} + \frac{|x - S| - 2h_i \tan(\theta_c)}{v_2}, \quad (2.3)$$

onde θ_c é o ângulo crítico que é dado por:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.4)$$

A expressão 2.3 equivale à seguinte expressão:

$$T_{\text{refr}}(x) = \frac{|x - S|}{v_2} + \frac{2h_i \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_2 v_1}, \quad (2.5)$$

onde v_2 é a velocidade da onda no meio 2. Para que a refração seja possível, faz-se necessário que: $v_1 < v_2$.

- Onda Difrata: a difusão radial da energia em todas as direções, sendo de interesse da sismica aqueles raios que retornam para a superfície. Para uma camada homogênea, o tempo de trânsito da onda que se propaga no meio 1, da quina até a superfície, é calculado por:

$$T_{\text{dif}}(x) = \frac{\sqrt{h_1^2 + (x - q)^2}}{v_1}, \quad (2.6)$$

onde h_1 e q são, respectivamente, a profundidade e a coordenada x do ponto difrator; e v_1 é a velocidade da onda no meio 1, situado entre tal ponto e a superfície de observação.

Outros trajetos de raios sísmicos compreendem uma conjugação desses fenômenos e foram traçados de acordo com cada modelo geológico de superfície, sendo apresentados no capítulo 3, como os relacionados às ondas: difratada-transmitida, difratada-refratada, transmitida-refletida, etc. O cálculo do tempo de cada evento foi programado no Fortran 95 utilizando o traçamento de raios, em analogia à óptica geométrica, e a velocidade de propagação da onda no meio. As discontinuidades das interfaces refletoras, geradas pelas falhas, limitam a propagação das ondas refletidas e refratadas, entre outras, gerando discontinuidades nas curvas de tempo de trânsito. Além disso, estas terminações criam condições para a geração de novas frentes de ondas, tais como as difratadas e transmitidas.

Na Figura 2.2 tem-se: $a + b + c = q$, e ela apresenta o trajeto da onda emitida na fonte S , transmitida no ponto A (base da camada 1) e com incidência no ponto difrator D_2 . O valor da abscissa de A é dado por:

$$x_A = S + h_1 \tan(\theta_1), \quad (2.7)$$

onde:

$$\text{sen}(\theta_1) = \frac{v_1 \text{sen}(\theta_2)}{v_2}, \quad (2.8)$$

e $\text{sen}(\theta_2)$ satisfaz a seguinte equação:

$$S - q + \frac{h_1 v_1 \text{sen}(\theta_2)}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2 \text{sen}(\theta_2)^2}} + \frac{(h_2 - h_1) \text{sen}(\theta_2)}{\sqrt{1 - \text{sen}(\theta_2)^2}} = 0, \quad (2.9)$$

onde h_1 é a profundidade da interface 1 na região da fonte S (à esquerda das quinas D_1 e D_2), v_1 é a velocidade da onda sísmica no meio 1, v_2 é a velocidade da onda sísmica no meio 2, e θ_1 , θ_2 são os ângulos de incidência e transmissão no ponto A , respectivamente.

A Eq. (2.9) pode ser resolvida utilizando-se o método numérico da bissecção. Logo, o tempo de trânsito da onda transmitida na interface I_1 e difratada na quina D_2 é dada por:

$$T_{\text{dif}}(x) = \frac{\overline{SA}}{v_1} + \frac{\overline{AD_2}}{v_2} + \frac{\overline{D_2R}}{v_1} = \frac{\sqrt{(x_A - S)^2 + h_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(x - q)^2 + h_2^2}}{v_2} + \frac{\sqrt{(q - x_A)^2 + (h_2 - h_1)^2}}{v_1}, \quad (2.10)$$

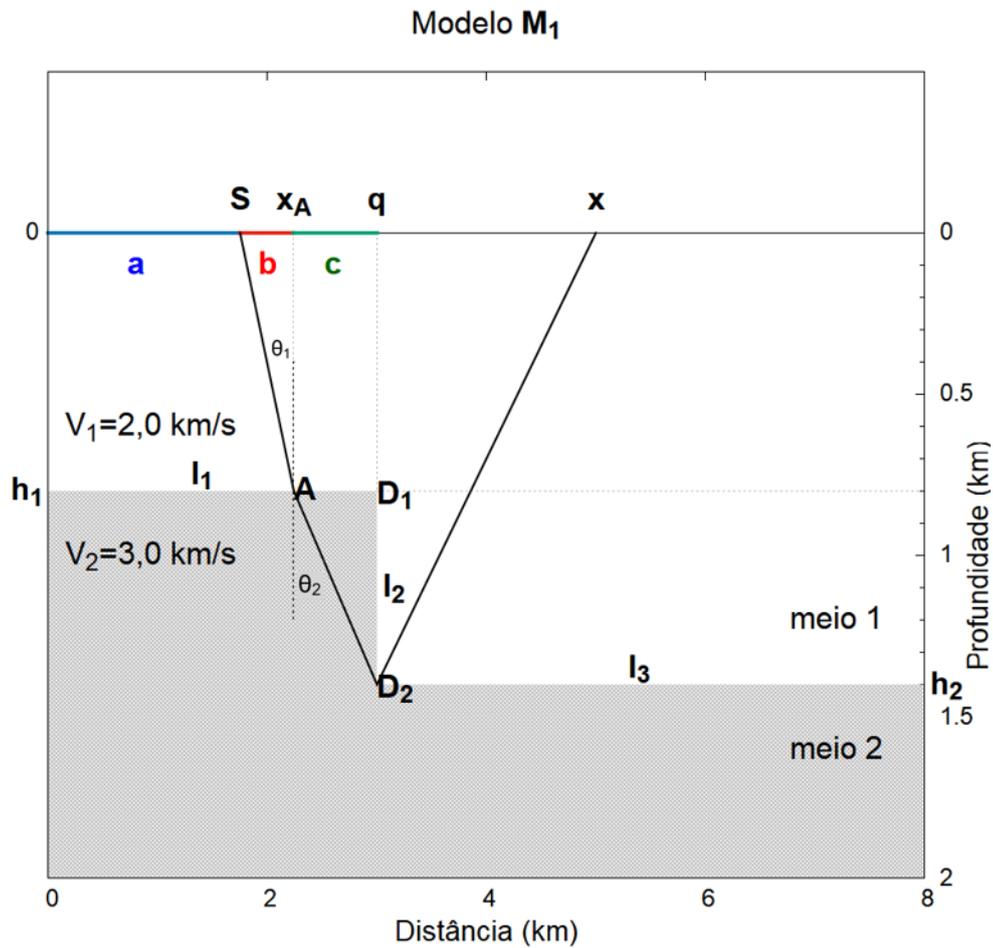


Figura 2.2: Modelo M₁ com o traçamento da onda sísmica que é emitida na fonte S , transmitida para o meio 2, através da interface I_1 , no ponto de incidência A , atingindo o ponto difrator D_2 , e retornando à superfície.

Capítulo 3

Resultados e Interpretação

Neste capítulo serão apresentados os resultados sintéticos e suas interpretações, por meio de análise qualitativa. Para tanto, serão apresentados 15 gráficos, referentes a cinco modelos sísmicos de subsuperfície falhada, com duas camadas homogêneas e isotrópicas. Cada modelo será apresentado com seus resultados sintéticos e suas respectivas considerações. Adicionalmente, e preliminarmente, será apresentado um modelo sísmico sem falha, a fim de contribuir para a interpretação dos resultados. Os parâmetros dos modelos e seus elementos são:

- v_1 : velocidade da onda no meio 1, com módulo de 2,0 km/s ;
- v_2 : velocidade da onda no meio 2, com módulo de 3,0 km/s ;
- h : profundidade de interface, que varia com a abcissa “x”;
- S : posição da fonte sobre a superfície de observação;
- q : abcissa da posição do ponto difrator, “quina”;
- x : posição do receptor (geofone).

As curvas do gráfico foram identificadas por legenda de cores, conforme segue:

- Onda Direta (cinza): onda de superfície;
- Onda Refletida (verde): onda que incide sobre a interface (base da camada) e retorna à superfície de origem, com ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão;
- Onda Refratada (preto): corresponde ao raio que incide sobre a interface, com ângulo crítico, percorre a interface horizontalmente até retornar à superfície com ângulo crítico;

-
- Onda Difrata (vermelho): corresponde ao raio que incide numa quina, onde ocorre a difusão radial da energia em todas as direções;
 - Onda Transmitida (laranja): corresponde ao raio que passa de um meio para outro;
 - Múltipla com dupla reflexão (rosa): corresponde ao raio que sai da fonte, na superfície, reflete duas vezes na base da camada e retorna à superfície;
 - Onda Múltipla com tripla reflexão (azul claro): corresponde ao raio que sai da fonte, na superfície, reflete três vezes base da camada e retorna à superfície;
 - Onda Transmitida-Refletida (azul escuro): corresponde ao raio que passa de um meio para outro e, em sequência, é refletido.
 - Onda Difrata-Refratada (violeta): corresponde ao raio que é difratado com ângulo crítico.

Nas próximas seções serão apresentados os modelos com suas respectivas considerações.

3.1 Modelo M_0 : sem falha.

O modelo apresentado na Figura 3.1 não apresenta falha geológica e, por isso, não possui hipérbolas de difração, nem discontinuidades nas curvas e nem ondas transmitidas. Adicionalmente, pode-se observar a existência de um eixo de simetria, em relação à fonte, das curvas de ondas: diretas, refletidas, múltiplas e refratadas.

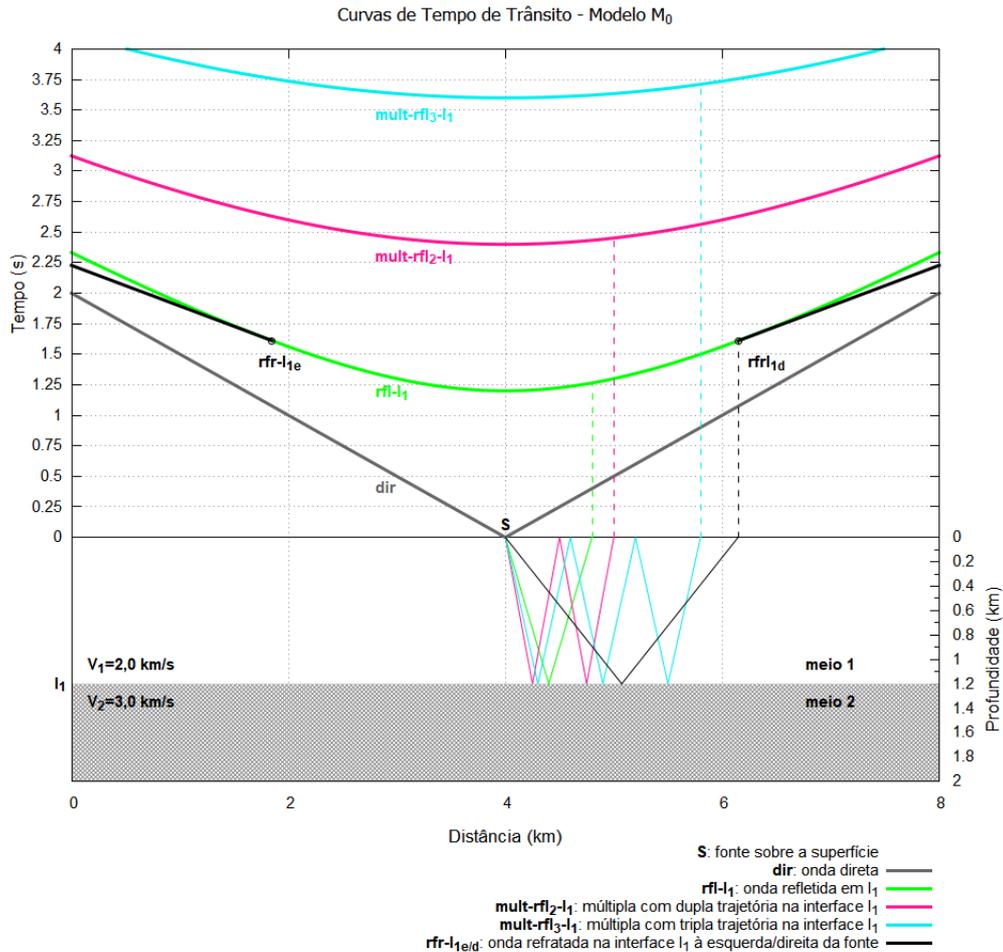


Figura 3.1: Modelo M_0 : sem falha. Apresenta duas camadas homogêneas e isotrópicas, sem falha e separadas por interface horizontal. Os eventos ondulatórios modelados foram: o direto (cinza), o refletido (verde), o refratado (preto) e os múltiplos com duas (rosa) e três (azul) reflexões. As curvas de tempo de trânsito são simétricas relativamente à posição S da fonte.

Os modelos falhados apresentam, em seus gráficos de tempos de trânsito, hipérbolas de difração (vermelho), de maior curvatura que as curvas de reflexão (verde), que são geradas por pontos difratores (“quinas”) presentes nas falhas. Os raios difratados são emitidos em todas as direções, sendo de utilidade para a sismica somente aqueles que retornam à superfície. Quando comparados ao modelo sem falha, observa-se também a geração de novas curvas de transmissão e de refração. Além disso, são observadas discontinuidades em curvas de reflexão, múltiplas e de refração. Esta comparação é ilustrada na Figura 3.6. A limitação, no gráfico, da faixa dos eixos de abscissa (distância) e ordenada (tempo de trânsito), restringem os eventos à janela de apresentação considerada.

3.2 Modelo M_1 : Falha Reta, com duas quinas.

3.2.1 Fonte à esquerda das quinas

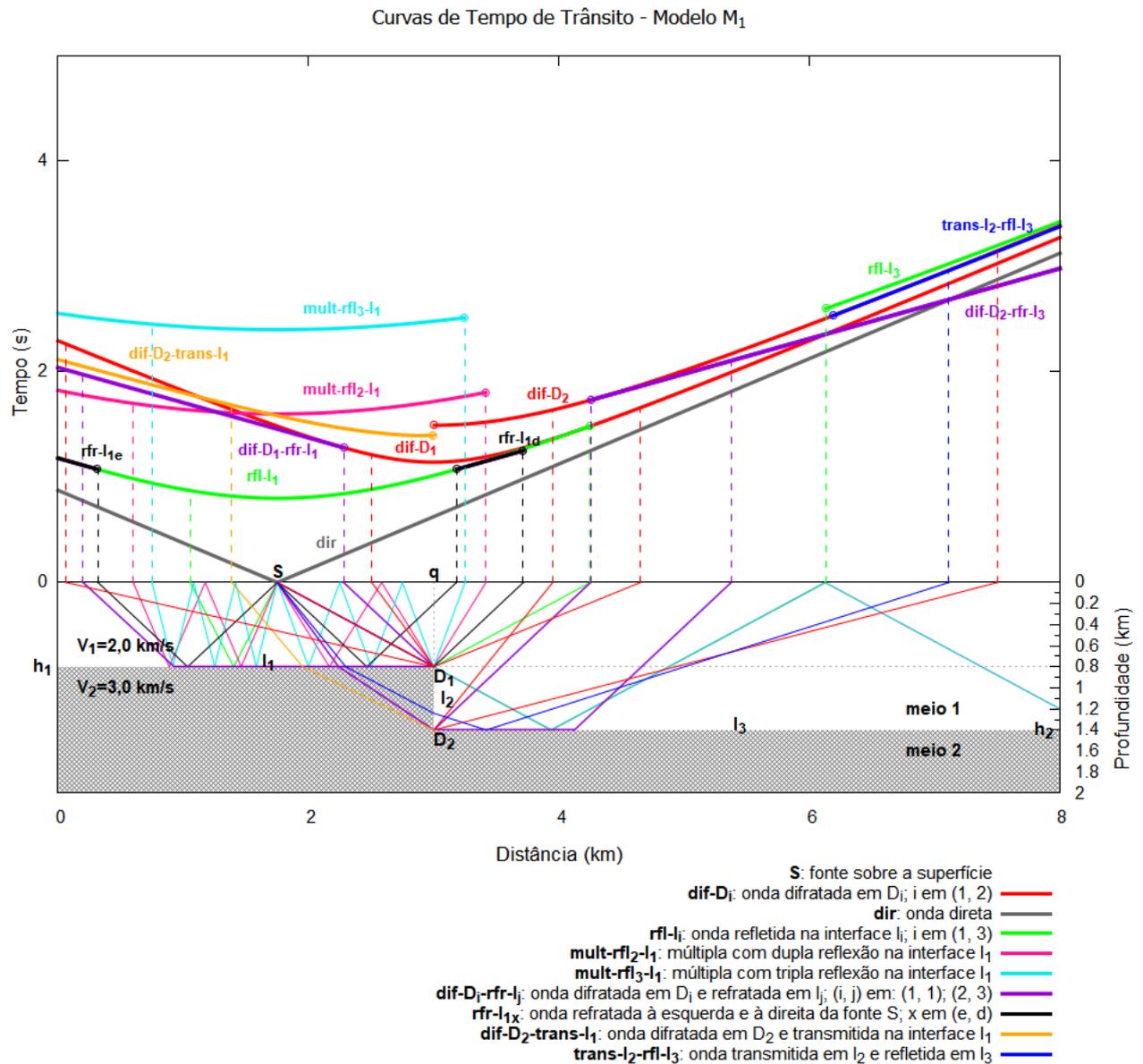


Figura 3.2: Modelo M_1 : Fonte à esquerda das quinas. No gráfico aparecem dois pontos difratores (“quinas”), D_1 e D_2 , responsáveis pela geração das curvas (hipérbolas) de difração. Estas apresentam maior curvatura que a curva de reflexão. Observa-se, ainda, a segmentação de curvas, com exceção das ondas superficiais (curva “dir”) e da curva de difração (dif- D_1), devido à ausência de obstáculos interpostos entre D_1 e a superfície de observação. Percebe-se, em relação ao modelo M_0 , o aparecimento de ondas transmitidas (dif- D_2 -trans- l_1), devido aos raios que atravessam o meio 2, à esquerda da quina.

Os pontos difratores atuam como “fontes secundárias” de ondas acústicas, de onde são geradas novas frentes de ondas refratadas que se propagam sobre a interface horizontal, entre camadas, e que retornam à superfície com ângulo crítico, obedecendo à lei de Snell. Daí, surgem novas curvas de difração (dif-D₁-rfr-I₁ e dif-D₂-rfr-I₃). Em termos qualitativos, as curvas obtidas revelam algumas características relativas ao modelo de estrutura falhada de sub-superfície, por exemplo: a interrupção da curva rfl-I₁ demonstra a presença de uma descontinuidade (d) abrupta na primeira interface refletora. A continuação da curva da onda refletida, através de rfl-I₃, revela a existência de um salto em d, de altura $h_2 - h_1$. A descontinuidade entre dif-D1 e dif-D2 diz que os pontos difratores estão numa mesma vertical e, também, onde d ocorre (no caso, em q).

3.2.2 Fonte sobre as quinas

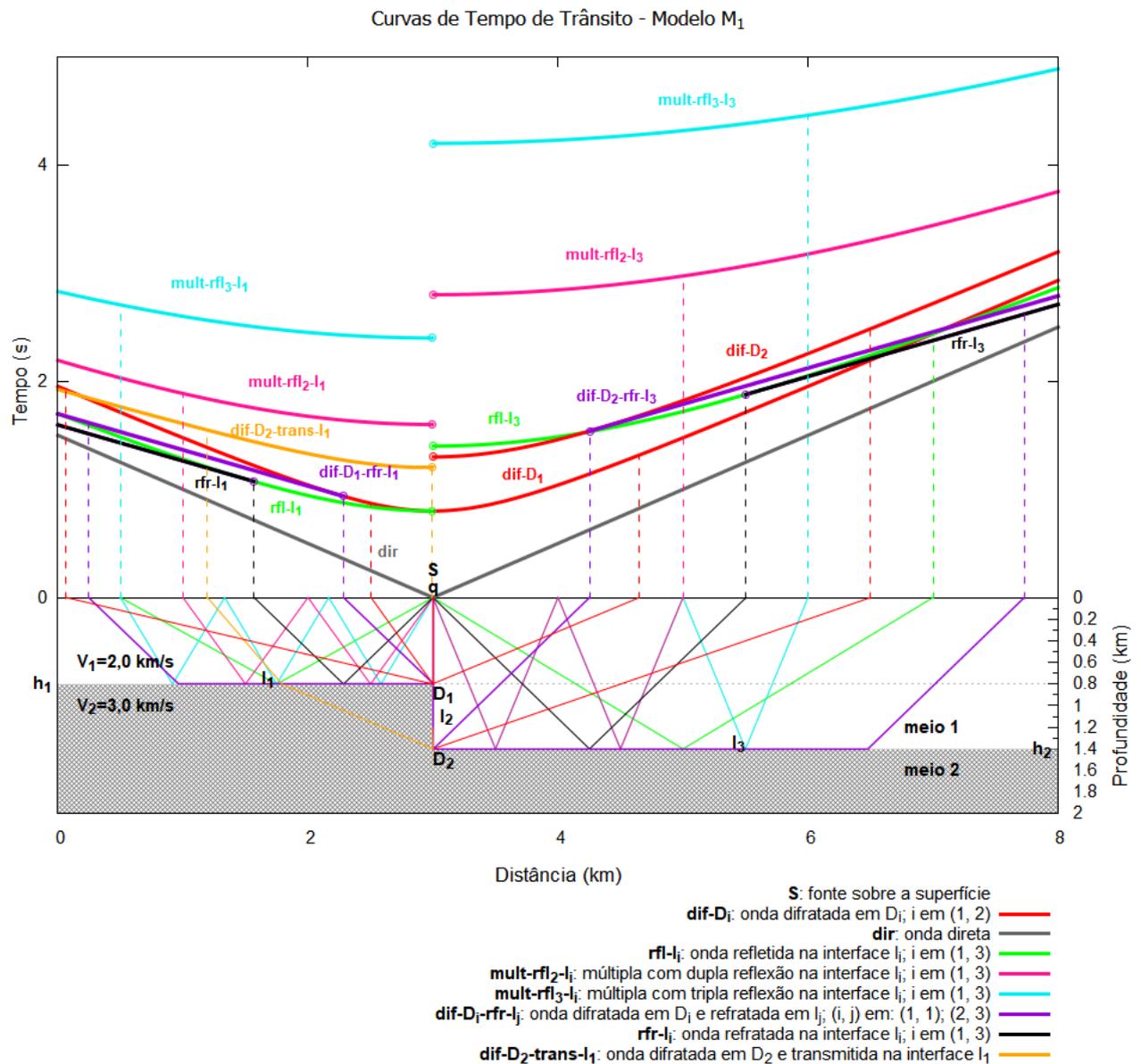


Figura 3.3: Modelo M_1 : Fonte sobre as quinas. Neste gráfico aparecem, à direita das quinas, outros dois segmentos de curvas de múltiplas com dupla reflexão (mult-rfl $_2$ - I_3) e tripla reflexão (mult-rfl $_3$ - I_3); além das já existentes mult-rfl $_2$ - I_1 e mult-rfl $_3$ - I_1 , com a fonte à esquerda das quinas. O padrão de curvas segmentadas, em torno da fonte e das duas quinas, reforça sua correlação com a presença de camada falhada em subsuperfície.

A Figura 3.3 apresenta o modelo M_1 , com a fonte sobre as quinas. Analogamente ao dito à Figura 3.2, algumas feições estruturais do modelo já são reveladas pelas curvas de tempo de trânsito. Por exemplo, a descontinuidade das curvas rfl- I_1 e rfl- I_3 revela: a existência de uma descontinuidade (d) na primeira interface refletora (I_1) do modelo, o caráter vertical

do salto em d , sua localização em q , na superfície de observação, e a horizontalidade de I à esquerda e à direita de q . O alinhamento vertical da fonte primária S com as fontes secundárias (pontos difratores D_1 e D_2) ocasiona um maior grau de simetria das curvas, em torno de S , assim como um menor deslocamento horizontal das curvas (descontinuidades) relacionadas ao mesmo evento.

3.2.3 Fonte à direita das quinas

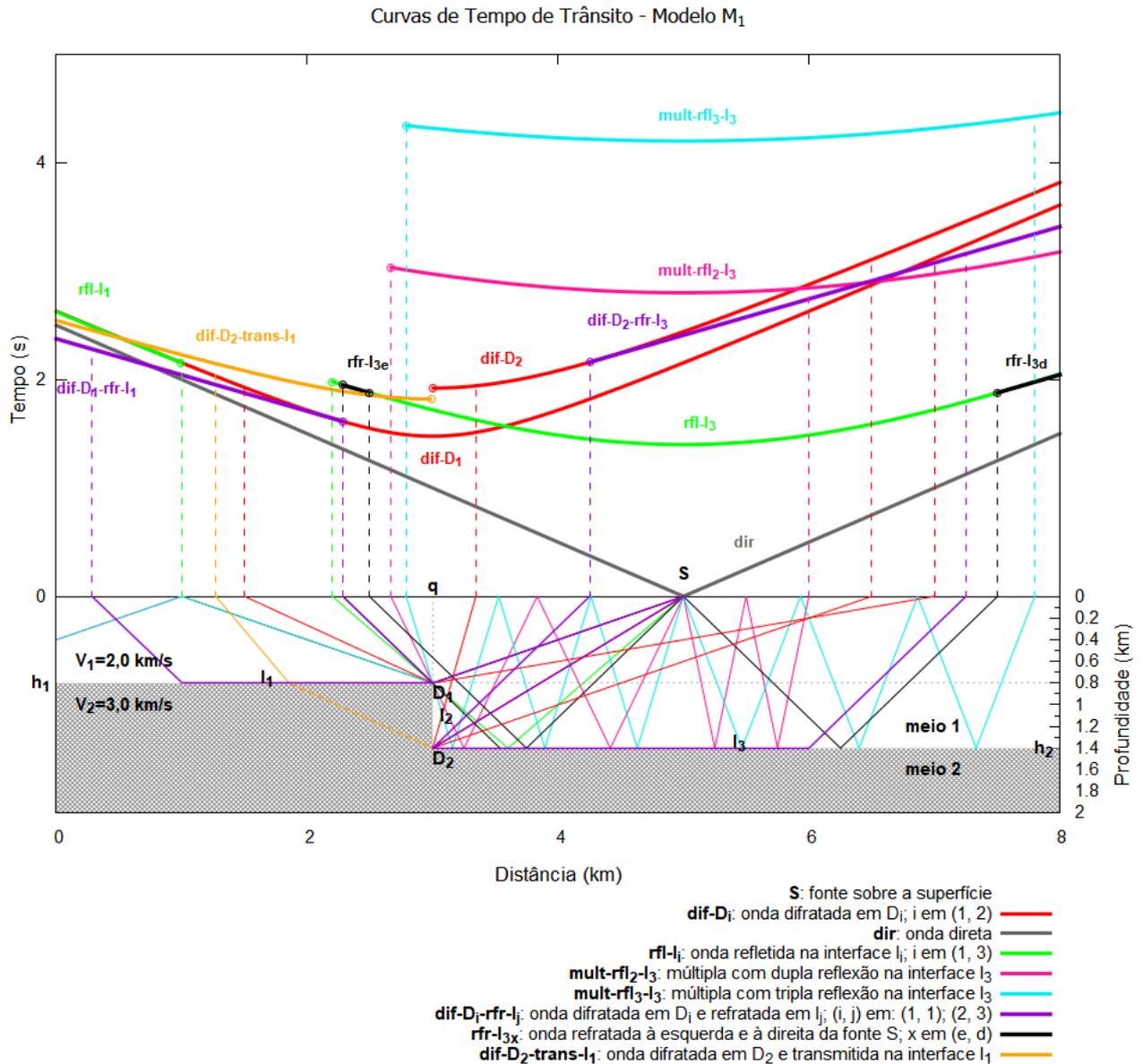


Figura 3.4: Modelo M_1 : Fonte à direita das quinas. A maior profundidade da camada no lado (à direita das quinas), onde está a fonte, ocasiona um maior afastamento vertical das curvas relativas aos diferentes eventos. Isto pode ser mais facilmente observado nas curvas de reflexão e múltiplas.

Na Figura 3.4, a fonte está localizada à direita das quinas. Este caso tem grande similaridade com o modelo onde a fonte está localizada à esquerda das quinas; porém, com maior afastamento entre as curvas, devido à maior profundidade do meio onde se encontra a fonte.

A análise dos três gráficos referentes ao modelo M_1 pode ser feita a partir da Figura 3.5, observando o rearranjo das curvas variando-se apenas a posição da fonte. A onda direta

auxilia na análise, como referencial das demais curvas, visto que ela está centrada sobre a fonte e não sofre influência das quinas.

3.2.4 Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas

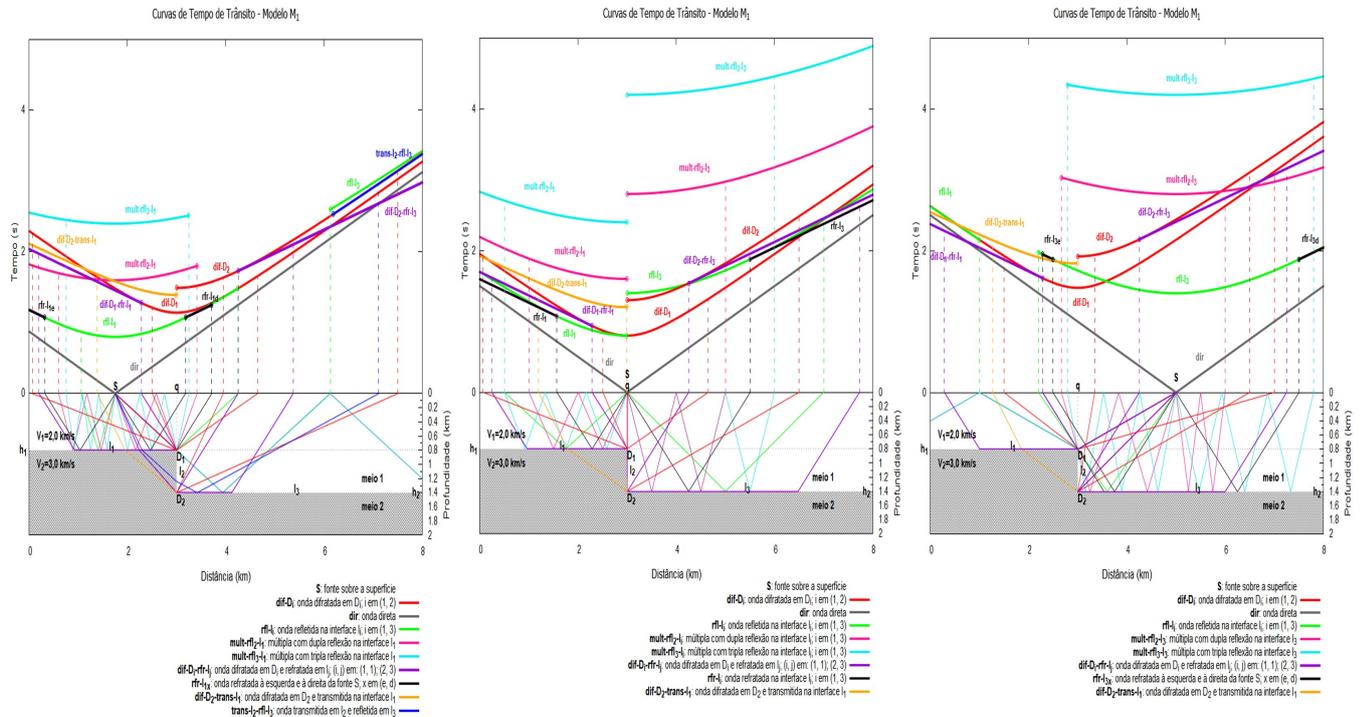


Figura 3.5: Modelos M_1 : Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas D_1 e D_2 . As hipérboles de difração, incluindo os respectivos segmentos, associadas às curvas dif-D₁, dif-D₂ e dif-D₂-trans-I₁, apresentam os tempos mínimos de trânsito sobre os pontos difratores (fontes secundárias), independentemente da posição da fonte S.

A comparação de M_1 com o modelo M_0 está apresentada na Figura 3.6, a fim de ilustrar o surgimento de novos eventos sísmicos associados às estruturas falhadas.

3.2.5 Comparação entre M_0 e M_1

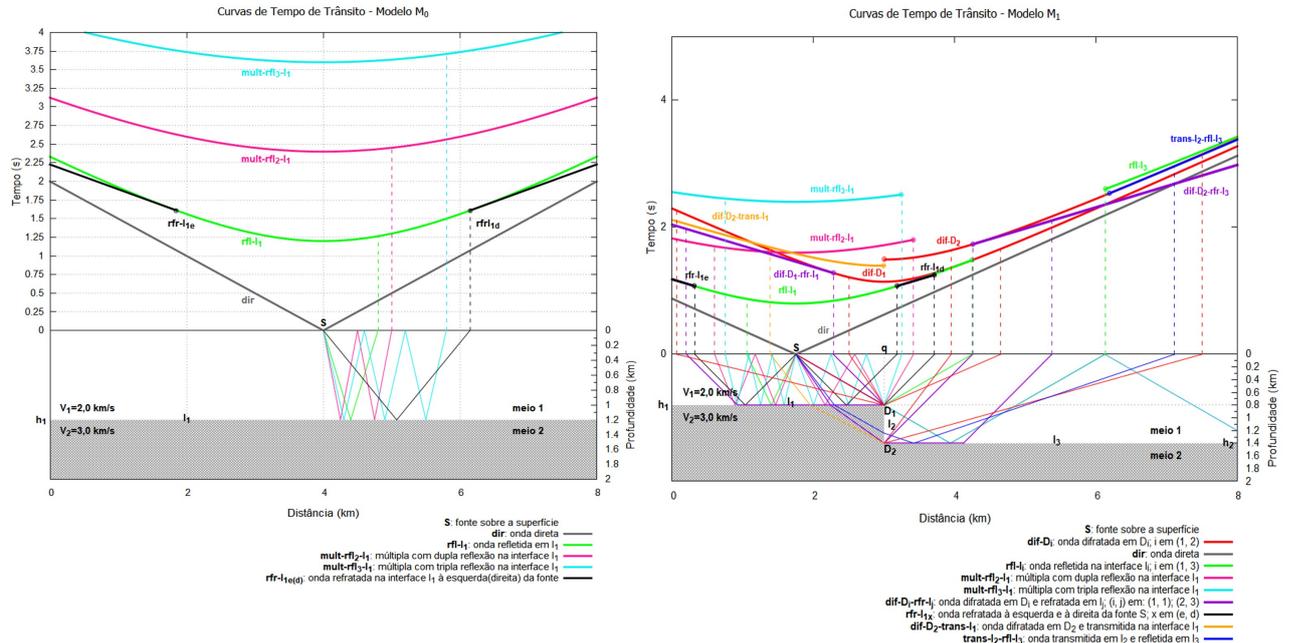


Figura 3.6: Comparação entre M_0 e M_1 . São evidenciados eventos sísmicos associados à descontinuidade lateral da interface (entre meios 1 e 2) e à ocorrência de pontos difratores, através de curvas de transmissão e difração ($\text{dif-D}_2\text{-trans-I}_1$, $\text{dif-D}_1\text{-rfr-I}_1$ e $\text{dif-D}_2\text{-rfr-I}_3$). As descontinuidades de curvas associadas ao salto, de altura $h_2 - h_1$, assim como os afastamentos dos segmentos de curvas, são consequências dessas estruturas de falhas em subsuperfície.

Outras análises foram realizadas considerando modelos diferentes para mesma posição da fonte, por exemplo. Contudo, as análises em questão não esgotam as possibilidades de interpretação dos modelos.

3.3 Modelo M_2 : Falha Normal, com duas quinas.

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam a falha tipo Normal (ou “distensiva”), que ocorre quando o bloco desloca-se para abaixo do plano da falha, ou seja, ocorre quando um dos blocos “desce” em relação à superfície da falha.

3.3.1 Fonte à esquerda das quinas

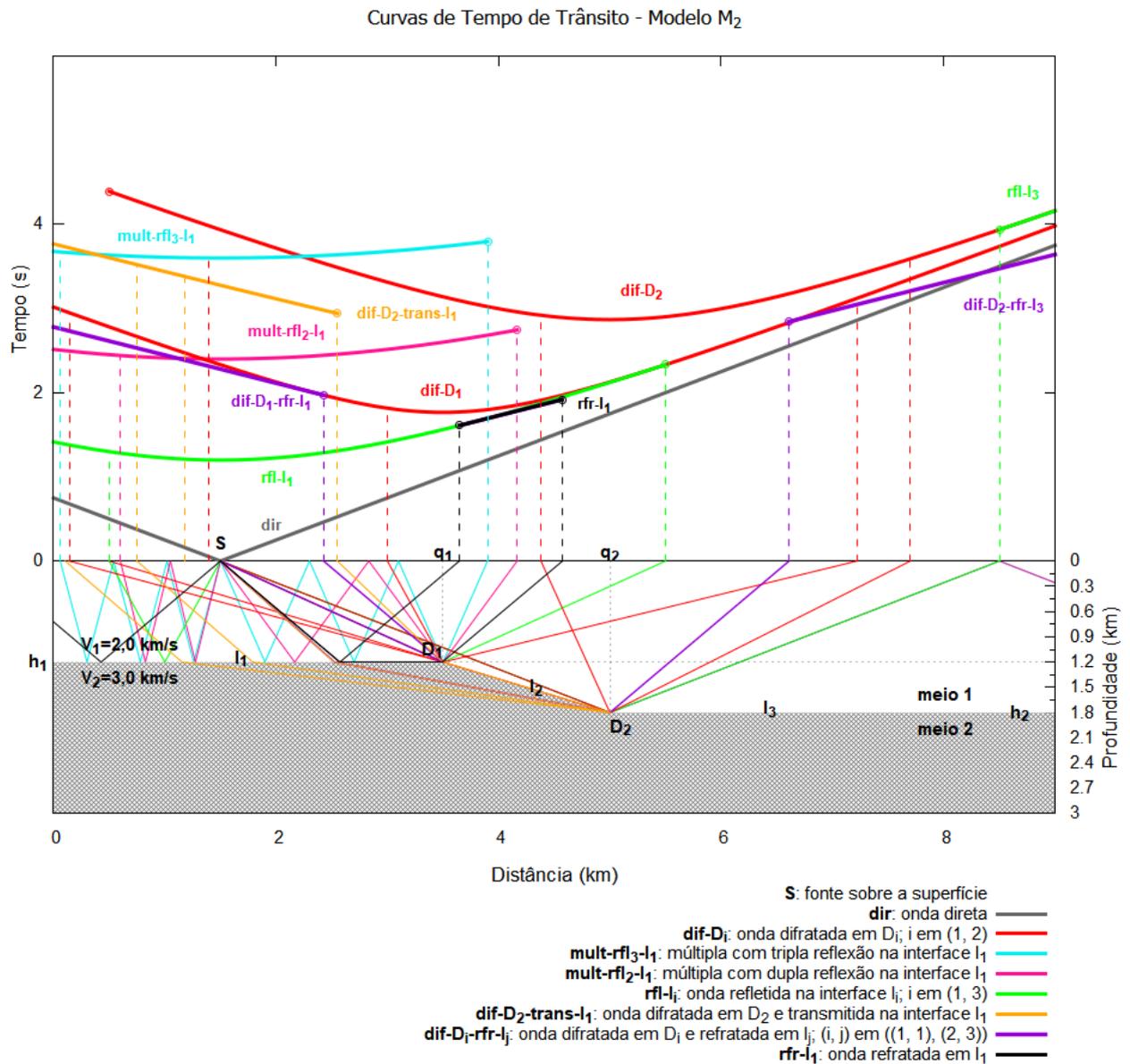


Figura 3.7: Modelo M_2 : Fonte à esquerda das quinas. Padrão de curvas similar às curvas dos modelos M_1 (Falha Reta) e M_3 (Falha Inversa), com a fonte à esquerda das quinas, visto que tais modelos tem apenas duas quinas e se diferenciam entre si pelo ângulo do plano da falha.

3.3.2 Fonte entre as quinas

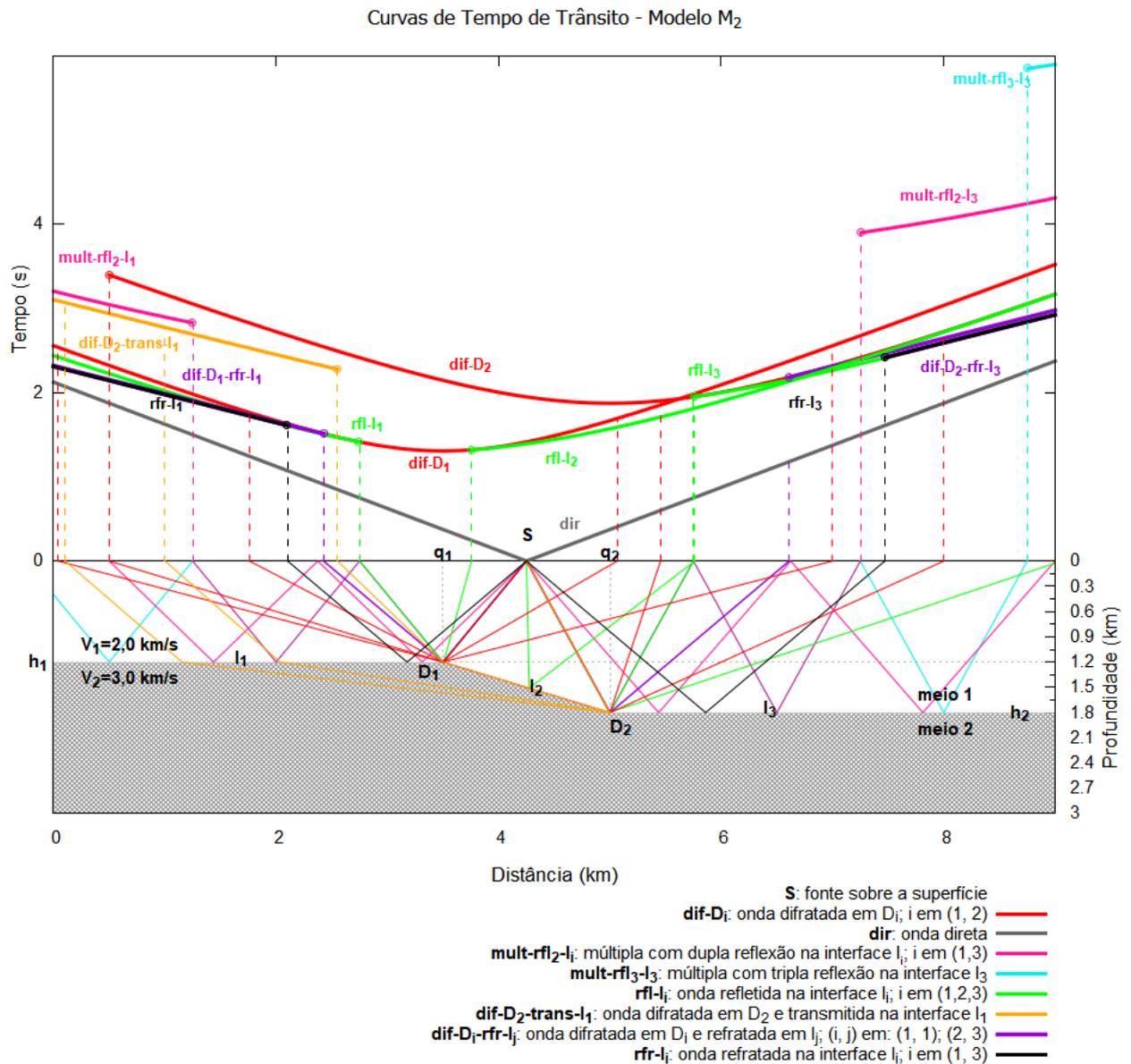


Figura 3.8: Modelo M_2 : Fonte entre as quinas. Na figura, é apresentada a curva de reflexão na interface inclinada I_2 , dado seu ângulo de inclinação, além das curvas de reflexão nas interfaces horizontais I_1 e I_3 . Neste modelo, além da segmentação das curvas de reflexão, é possível perceber o cruzamento das curvas $rfl-I_2$ e $rfl-I_3$, a partir do qual o tempo de trânsito da onda refletiva em I_2 se torna maior.

3.3.3 Fonte à direita das quinas

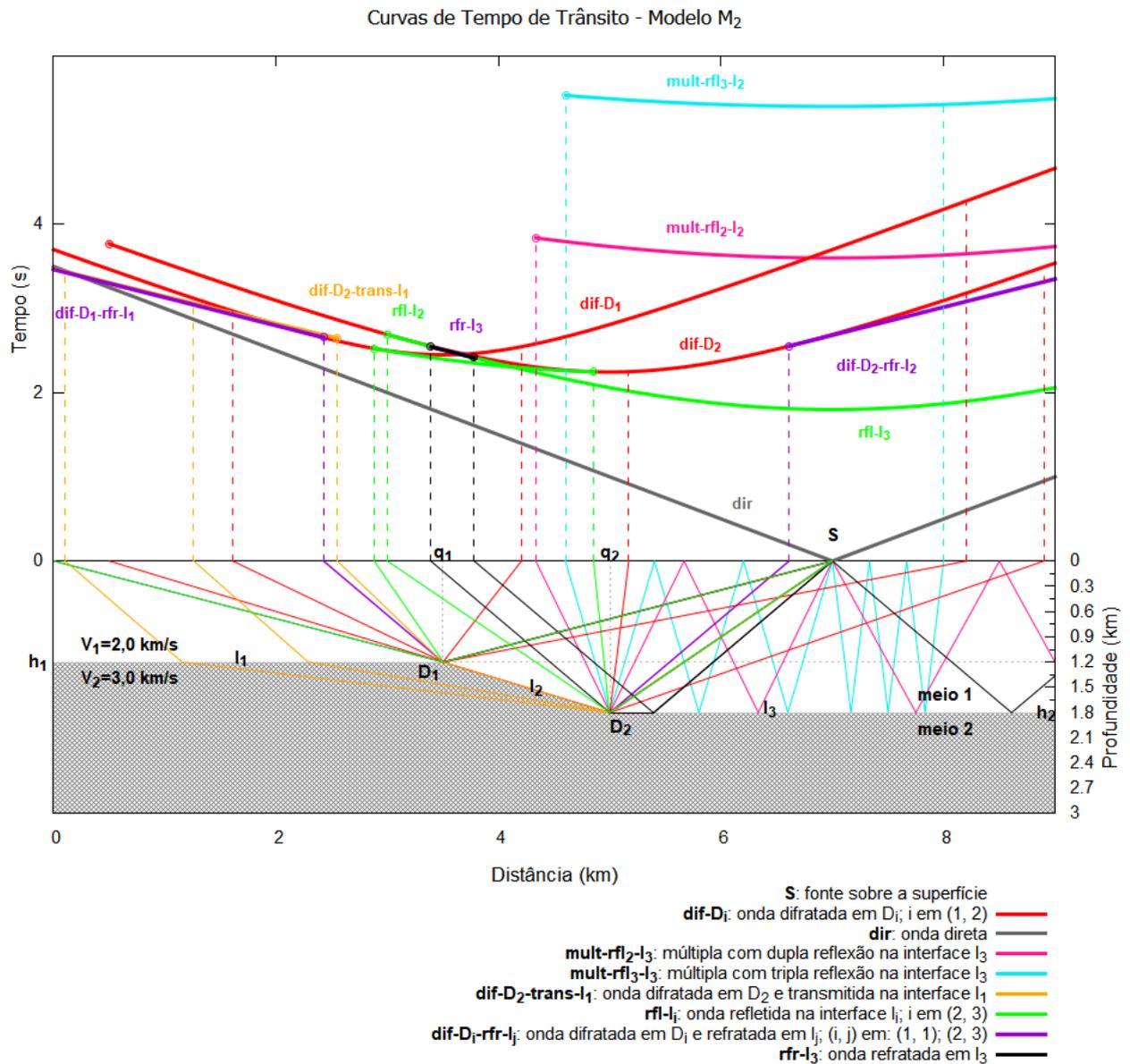


Figura 3.9: Modelo M_2 : Fonte à direita das quinas. Neste gráfico, também é apresentada a curva refletida na interface inclinada I_2 . As curvas apresentam maior afastamento entre si, quando comparadas com as curvas do Modelo M_4 , para a fonte à esquerda das quinas. Isto ocorre, visto que à direita das quinas, onde a fonte S está localizada, a profundidade do meio 1 é maior.

A Figura 3.10 apresenta os três gráficos de M_2 , variando-se a posição da fonte S. Percebe-se, nesta figura, um maior o deslocamento horizontal dos segmentos de curvas quando comparado com o modelo M_1 , tendo em vista a inclinação do plano de falha.

3.3.4 Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas

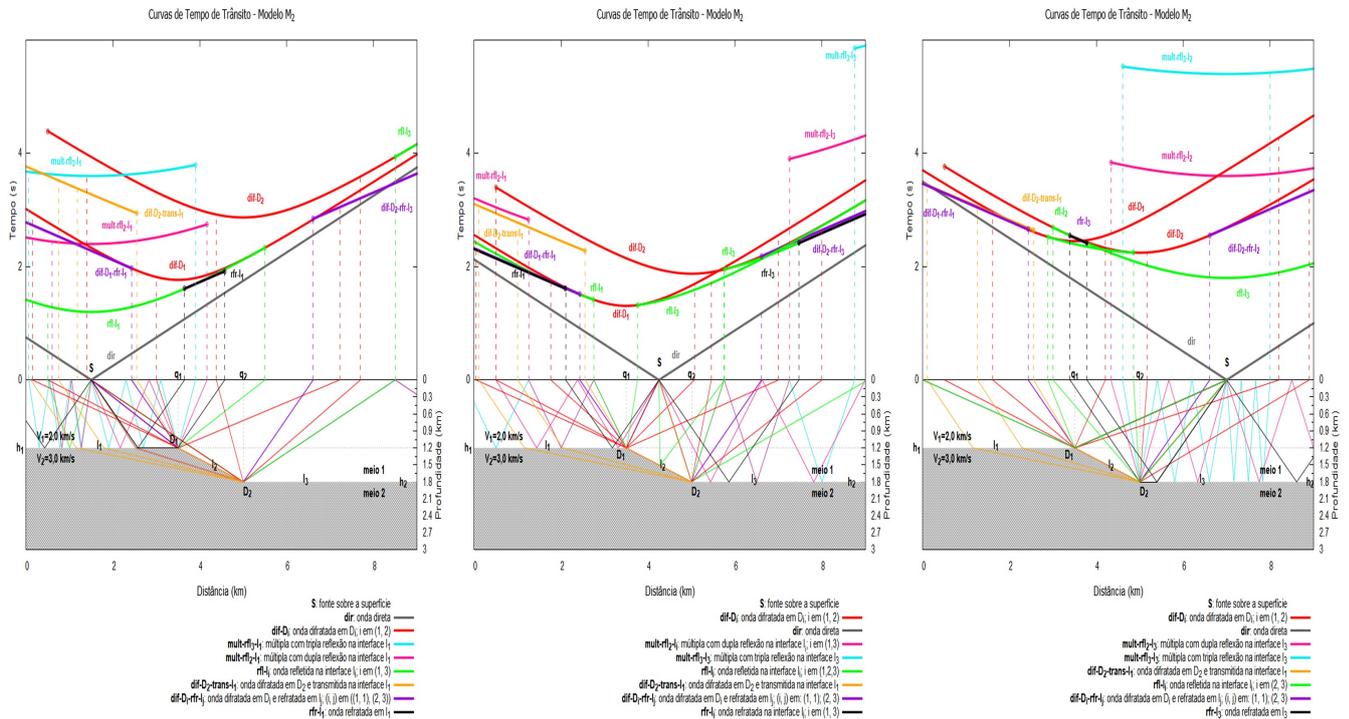


Figura 3.10: Modelos M_1 : Fontes à esquerda, sobre e à direita das quinas D_1 e D_2 . As hipérboles de difração, incluindo os respectivos segmentos, associadas às curvas dif- D_1 , dif- D_2 e dif- D_2 -trans- I_1 , apresentam os tempos mínimos de trânsito sobre os pontos difratores (fontes secundárias), independentemente da posição da fonte S .

O modelo M_3 apresenta a Falha Inversa. Neste modelo são traçadas, entre outras, as curvas de tempos de trânsito das ondas transmitida-refletida (azul escuro) e difratada-transmitida (laranja). A inclinação do plano de falha provoca um deslocamento horizontal, para a direita, das descontinuidades das curvas dif- D_1 e dif- D_1 -trans- I_1 .

3.4 Modelo M₃: Falha Inversa, com duas quinas.

3.4.1 Fonte à esquerda das quinas

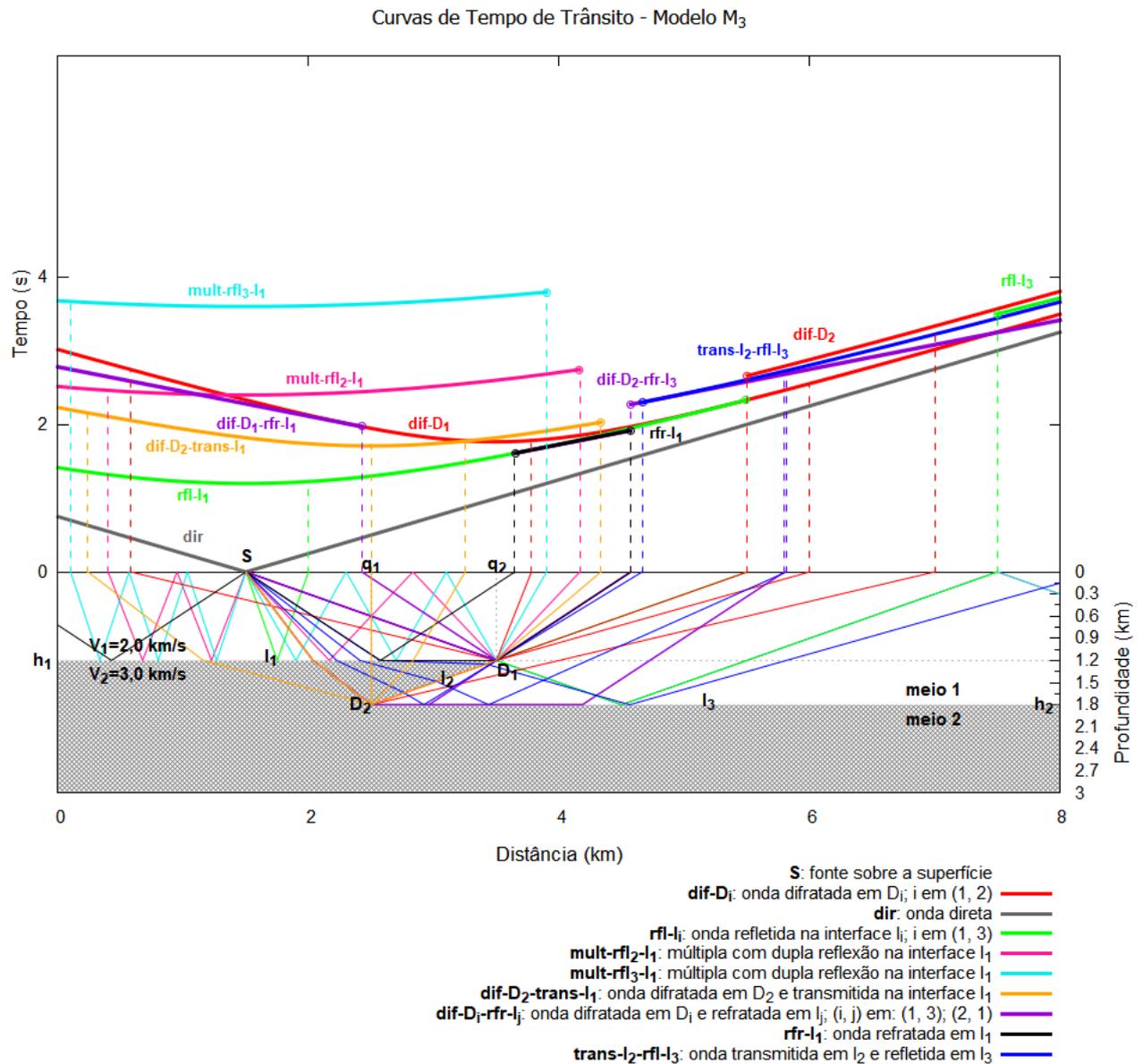


Figura 3.11: Modelo M₃: Fonte à esquerda das quinas. Nesta figura, é apresentada a curva do raio transmitido-refletido trans-I₂-rfl-I₃ (azul escuro). Observa-se, ainda, um padrão de curvas muito similar com o Modelo M₁ com a fonte à esquerda das quinas.

3.4.2 Fonte entre as quinas

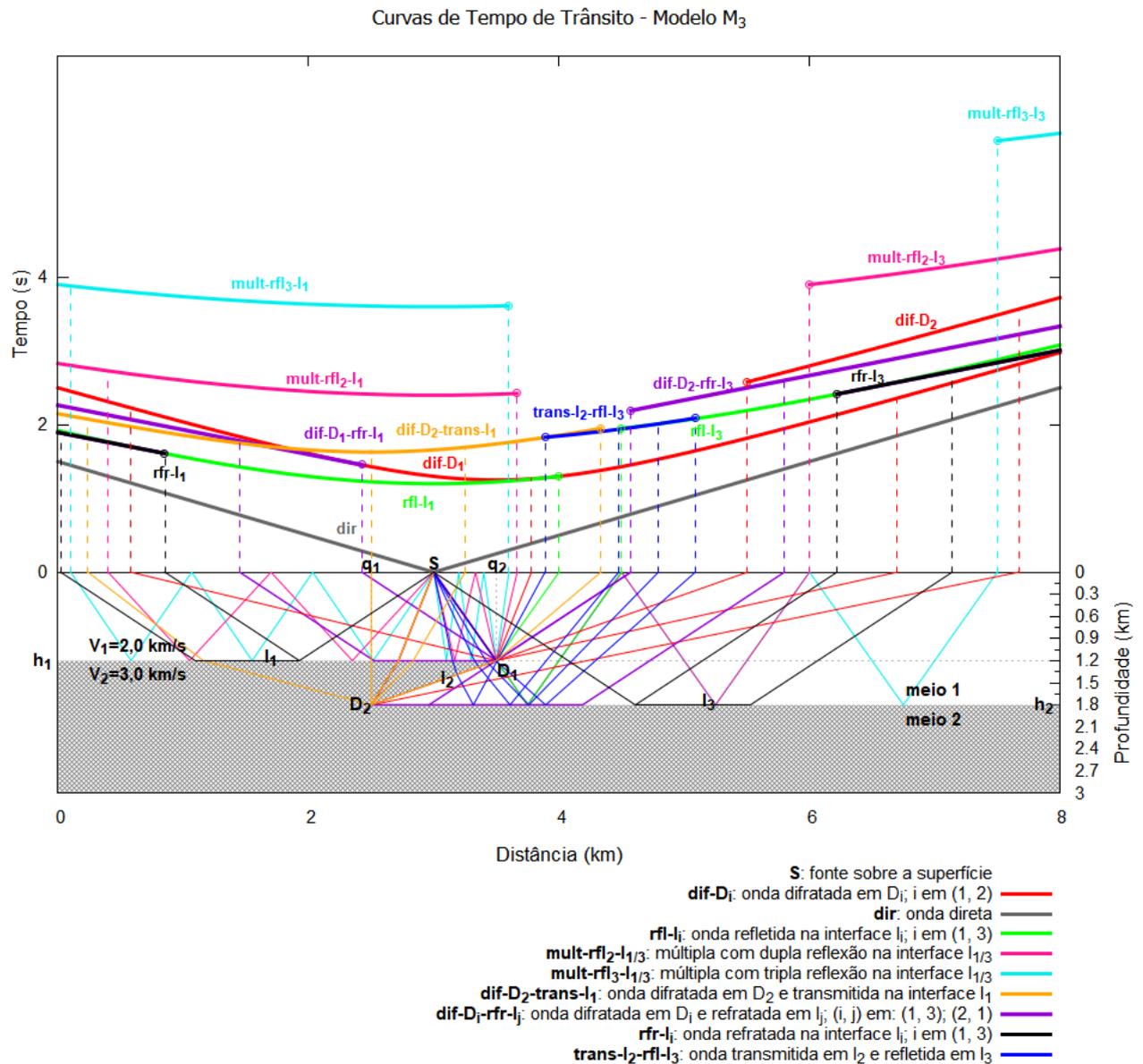


Figura 3.12: Modelo M_3 : Fonte entre as quinas. Neste gráfico aparecem outros segmentos das curvas de múltiplas com dupla e tripla reflexão, à direita das quinas, devido à aproximação da fonte com a interface I_3 e, conseqüentemente, trazendo estes segmentos para dentro da faixa distância-tempo compreendida no gráfico.

3.4.3 Fonte à direita das quinas

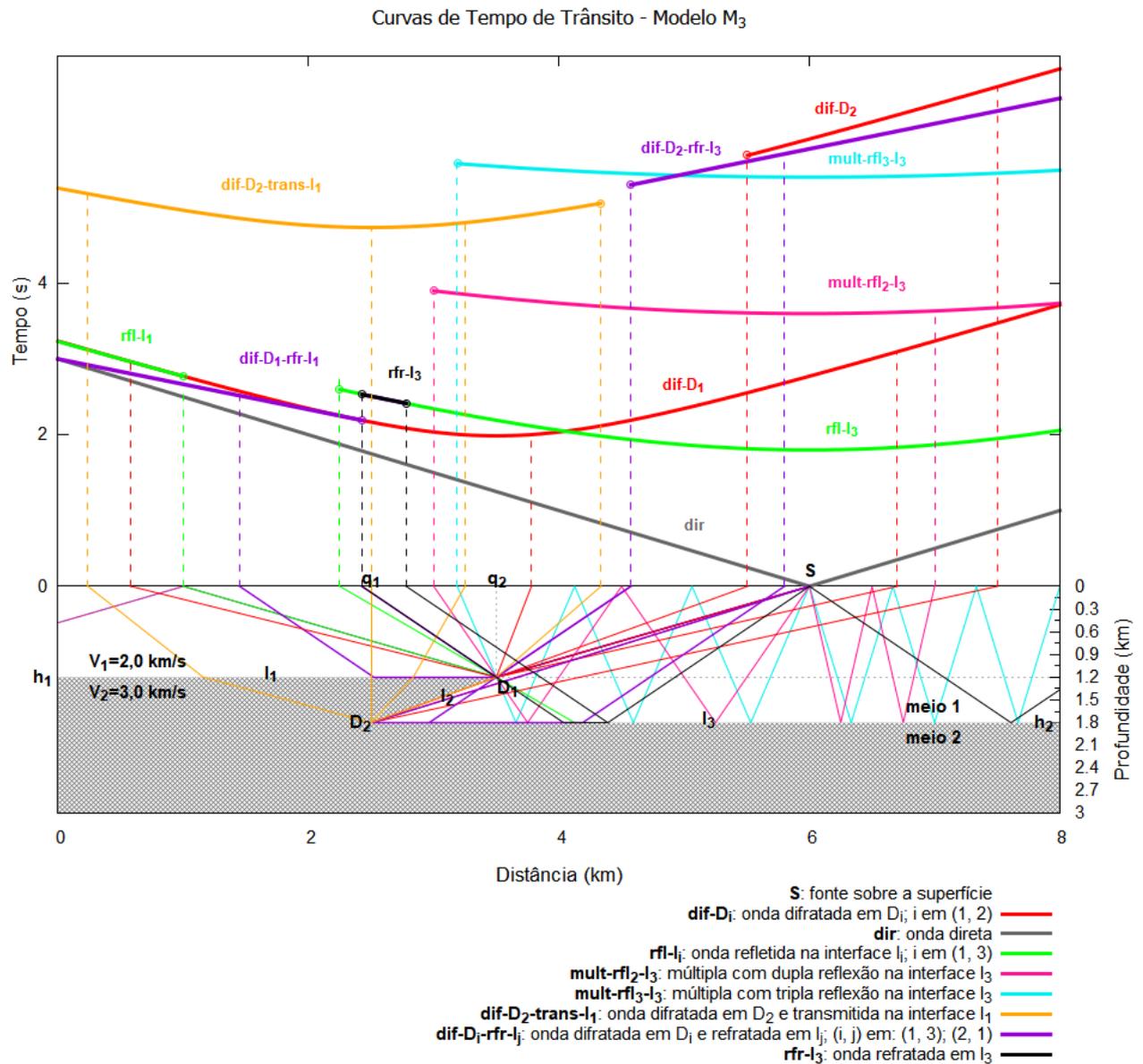


Figura 3.13: Modelo M_3 : Fonte à direita das quinas. Tal como no Modelo M_1 com a fonte à direita das quinas, percebe-se, neste gráfico, um maior afastamento das curvas, quando comparadas às Figuras 3.11 e 3.12, devido à maior profundidade da camada onde está localizada a fonte.

Na Figura 3.14 é apresentado um comparativo entre os gráficos dos modelos M_1 , M_2 e M_3 , tendo em vista que tais modelos se diferenciam entre si pelo ângulo do plano de falha. O arranjo das curvas dif- D_1 , dif- D_2 e dif- D_2 -trans- l_1 , relacionadas aos eventos de difração, auxiliam nesta análise, considerando o afastamento lateral para os diferentes ângulos de plano de falha. Neste caso, o modelo M_1 apresenta um menor afastamento lateral, visto que

os pontos difratores estão localizados na mesma posição da abscissa.

3.4.4 Comparação entre M_1 , M_2 e M_3 .

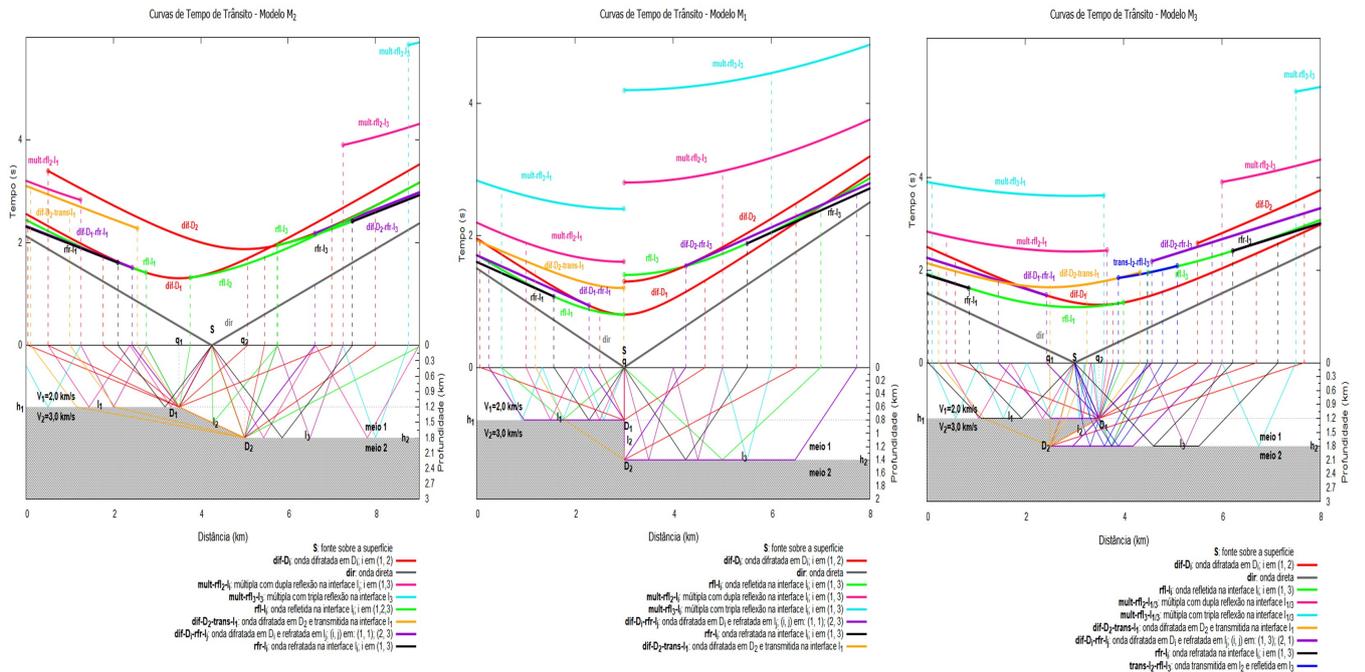


Figura 3.14: Comparação entre M_1 , M_2 e M_3 : Fonte entre as quinas D_1 e D_2 . Os gráficos possibilitam uma análise qualitativa, visto que apresentam diferentes escalas para os eixos coordenados.

3.5 Modelo M_4 : Graben, com quatro quinas.

Observa-se, neste modelo, um aumento da quantidade de curvas, principalmente hipérbolas de difração, devido ao aumento da quantidade de quinas. Estas curvas são bons sinalizadores da presença de falhas.

3.5.1 Fonte à esquerda das quinas

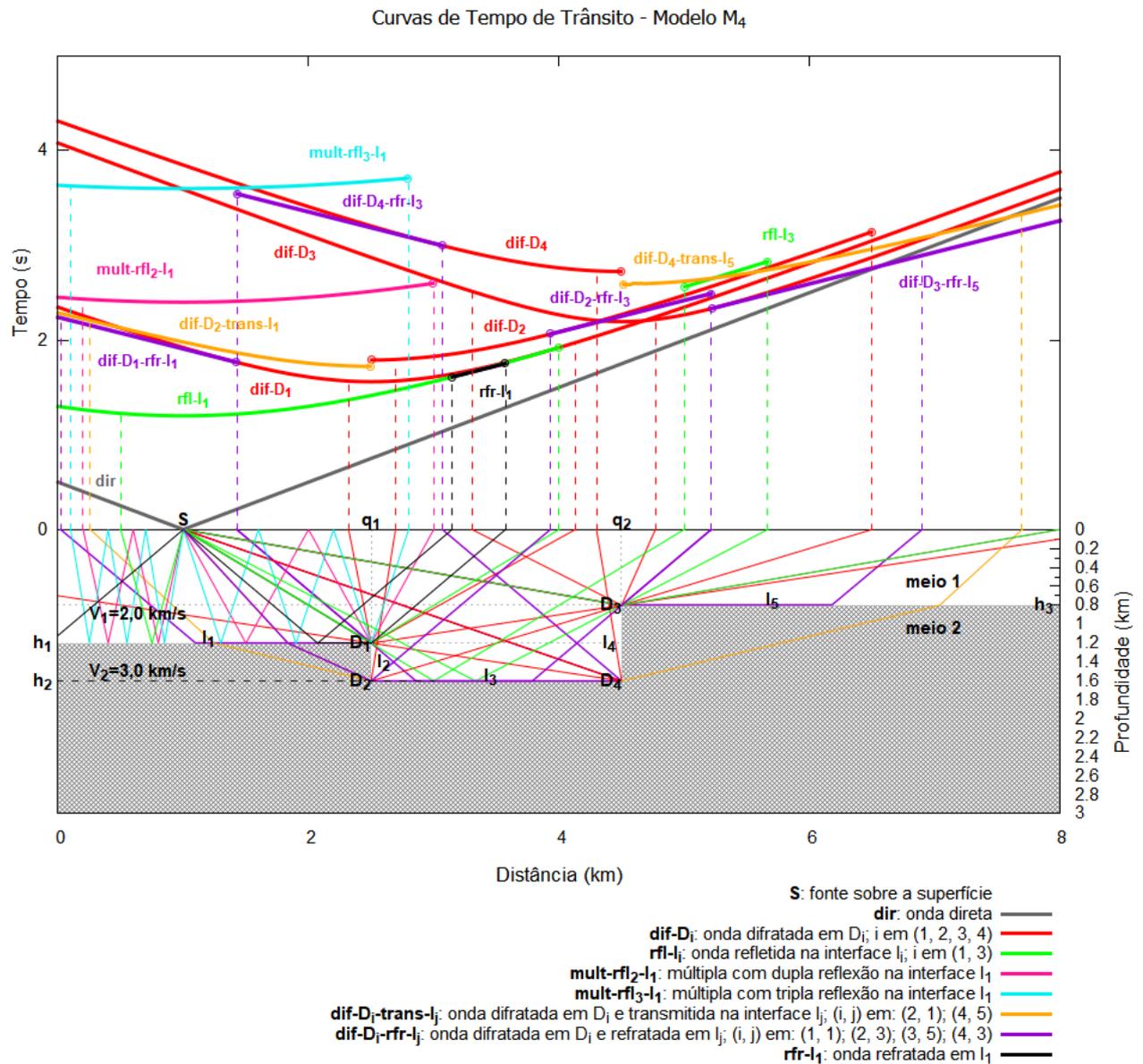


Figura 3.15: Modelo M_4 : Fonte à esquerda das quinas. As curvas de difração, associadas às quinas D_2 e D_4 , são segmentadas, a saber: dif- D_2 (segmento da curva de difração à direita de D_1), dif- D_2 -trans- I_1 (difratada-transmitida, em I_1 , à esquerda de D_1), dif- D_4 (segmento da curva de difração à esquerda de D_3) e dif- D_4 -trans- I_5 (difratada-transmitida, em I_5 , à direita de D_3)

3.5.2 Fonte sobre a primeira quina

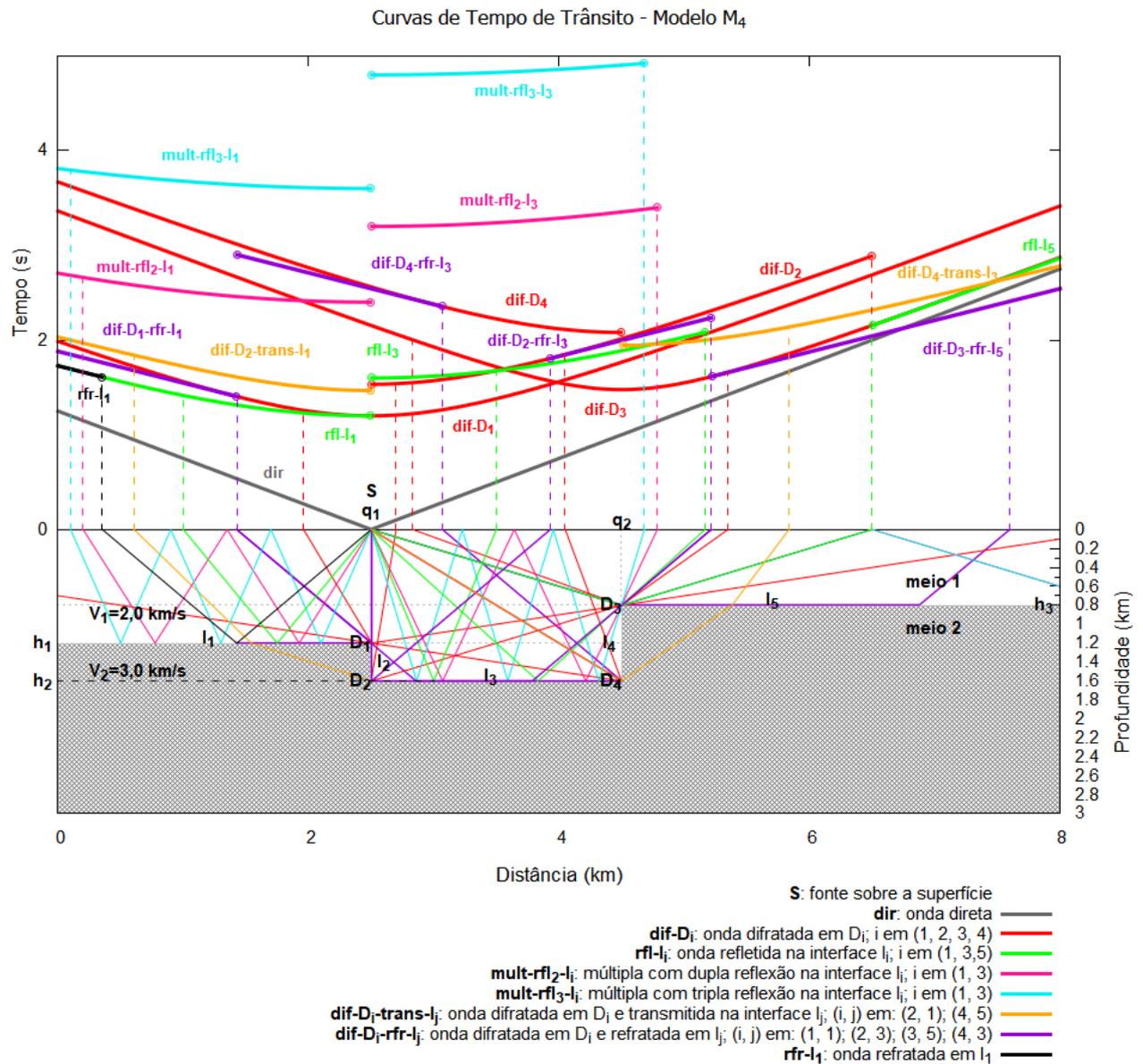


Figura 3.16: Modelo M_4 : Fonte sobre a primeira quina. O aumento do número de interfaces horizontais (I_1 , I_3 e I_5), gera uma maior segmentação das curvas de reflexão e refração. O alinhamento vertical da fonte com os pontos difratores D_1 e D_2 , ocasiona um pequena simetria de alguns segmentos de curvas em torno desse eixo (alinhamento vertical de S , D_1 e D_2).

3.5.3 Fonte entre as quinas

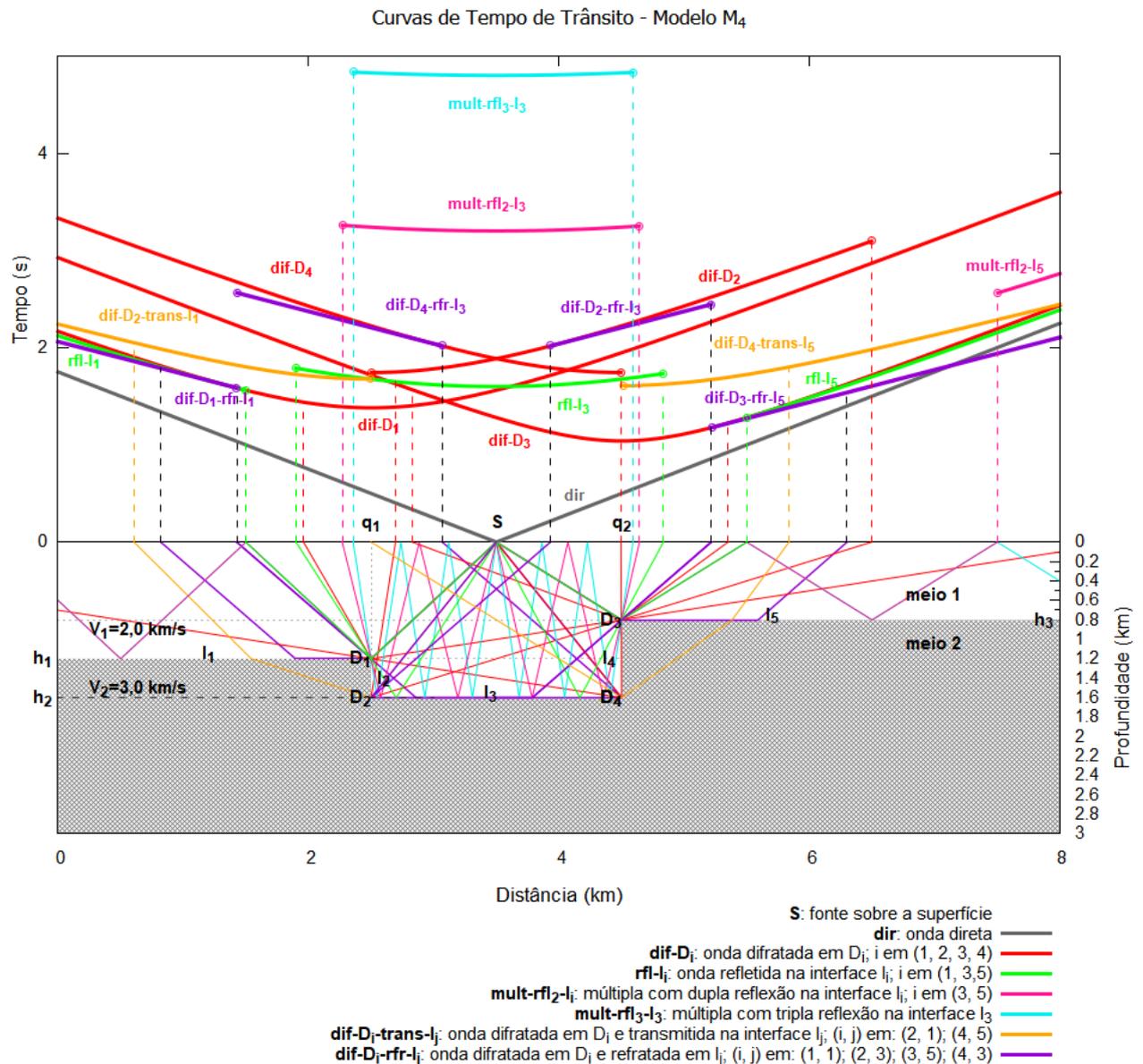


Figura 3.17: Modelo M₄: Fonte entre as quinas. Nesta posição da fonte, há um padrão maior de simetria, em relação às demais posições da fonte. Os mínimos das curvas de difração, assim como as discontinuidades de curvas de difração associadas aos pontos difratores inferiores D₂ e D₄, estão localizados acima das falhas.

O modelo M₄ é comparado com M₁, na Figura 3.18, considerando a similaridade, parcial, do modelos em torno dos pontos difratores D₁ e D₂.

subsectionComparação entre M₄ e M₁

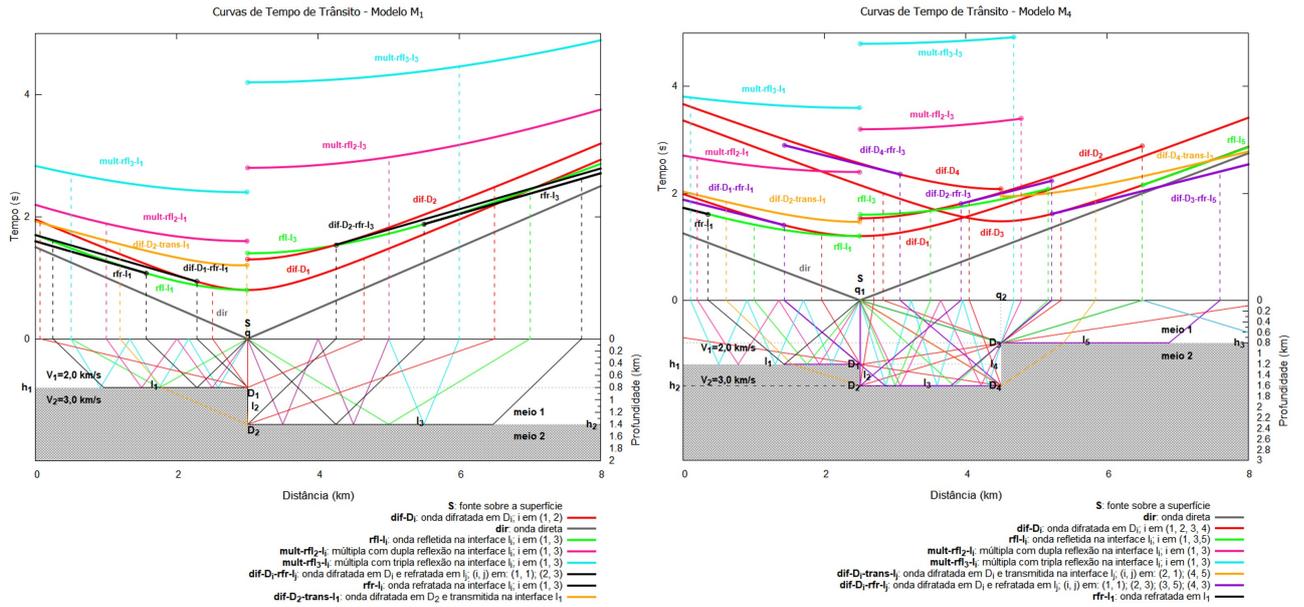


Figura 3.18: Comparação entre M_4 e M_1 : Fonte sobre D_1 e D_2 . É observado um maior grau de simetria em torno da fonte S e das quinas D_1 e D_2 , quando estas estão alinhadas verticalmente.

As Figuras 3.19, 3.20 e 3.21 apresentam o Horst, com o bloco soerguido entre falhas paralelas e normais.

3.6 Modelo M₅: Horst, com quatro quinas.

3.6.1 Fonte à esquerda das quinas

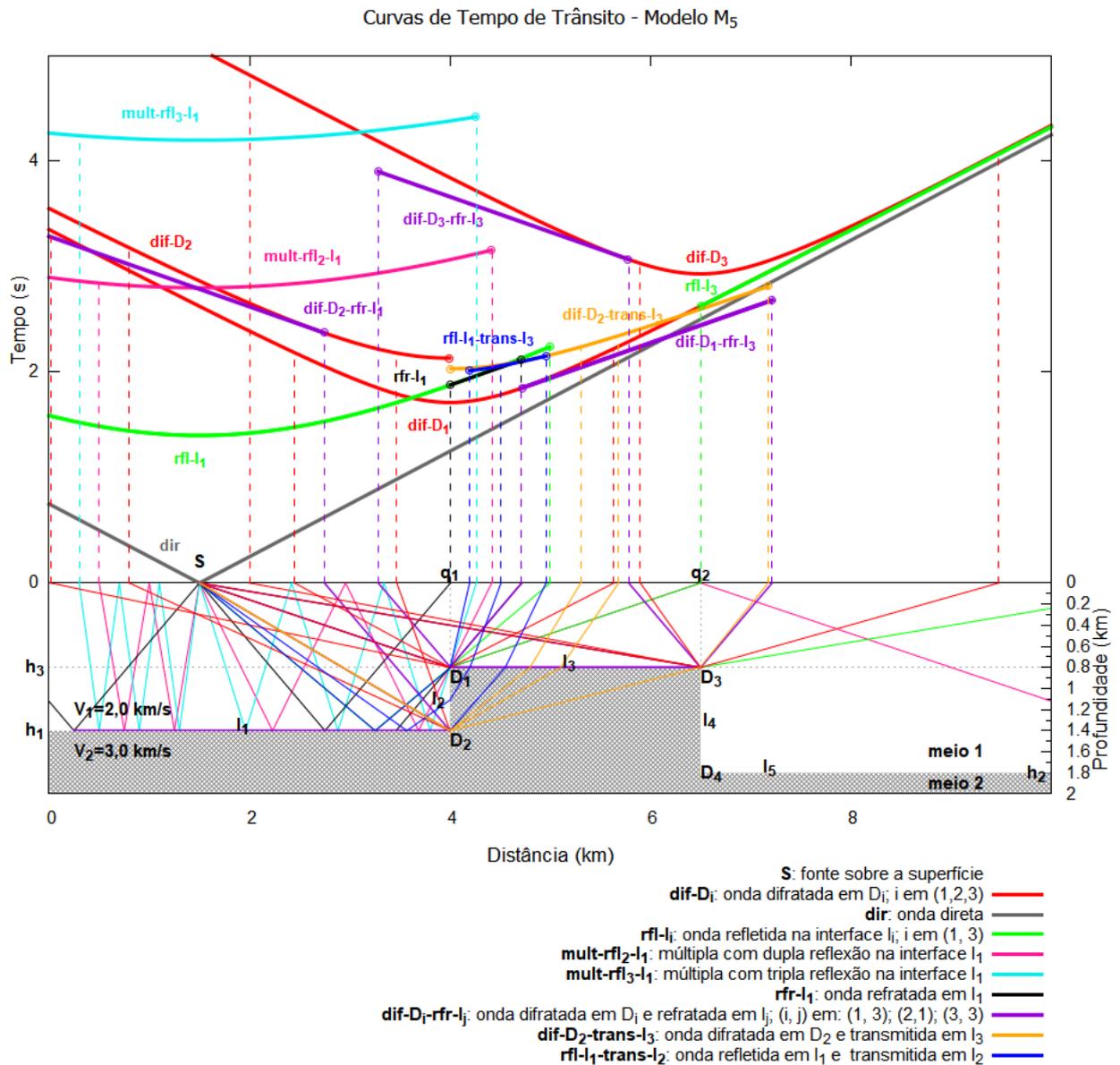


Figura 3.19: Modelo M₅: Fonte à esquerda das quinas. Sobre o Horst aparecem segmentos de curvas de difração, dif-D₁-rfr-I₃ e dif-D₃-rfr-I₃, referentes às ondas que saem dos pontos difratotes e que percorrem a interface I₃, retornando à superfície com ângulo crítico. As curvas de reflexão e múltiplas de dupla (mult-rfl₂-I₁) e tripla (mult-rfl₃-I₁) trajetória, aparecem segmentadas e no lado (sobre a I₁) onde se encontra a fonte.

3.6.2 Fonte entre as quinas

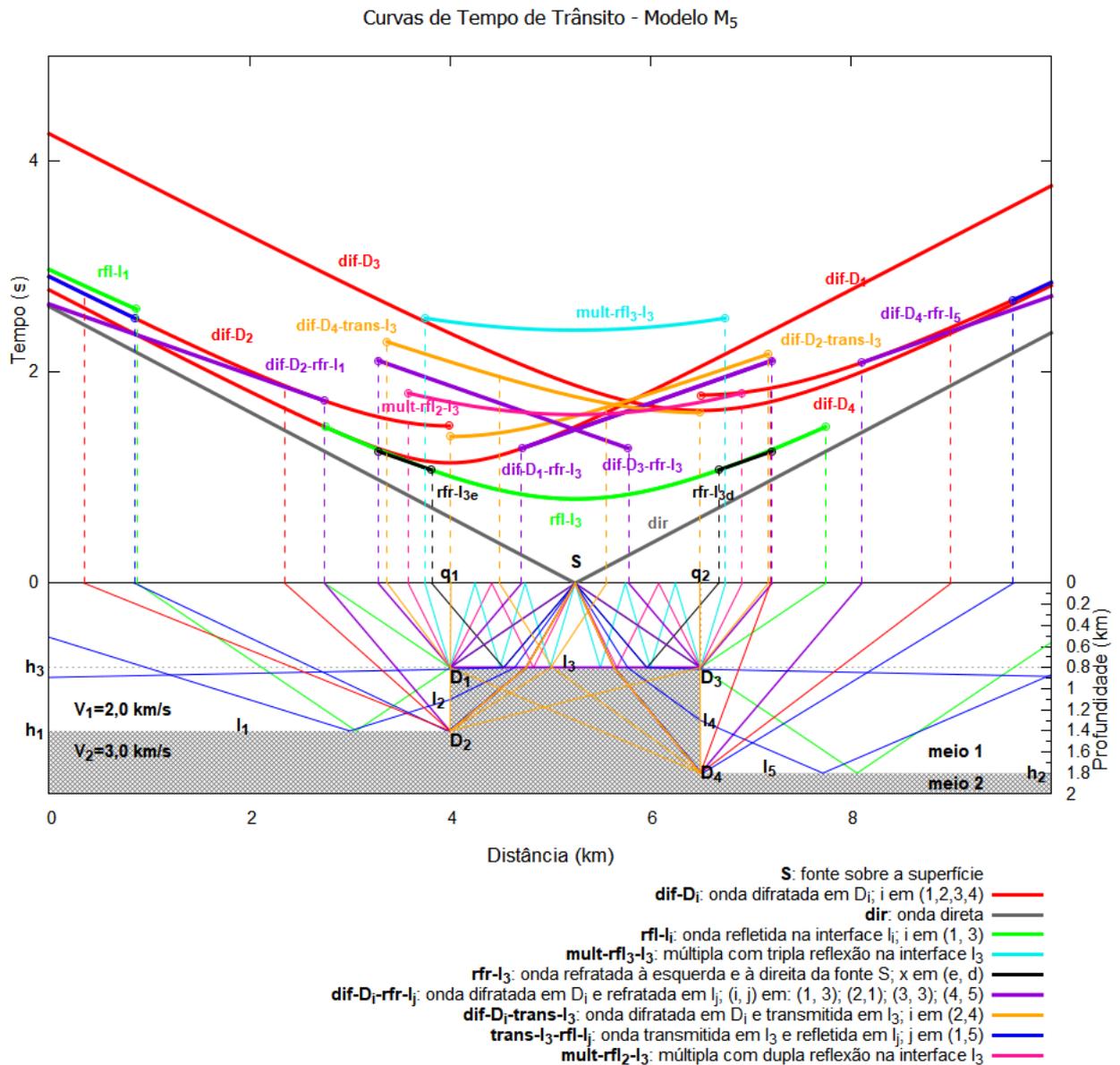


Figura 3.20: Modelo M₅: Fonte entre as quinas. O gráfico apresenta um maior grau de simetria em relação à posição da fonte, já que a mesma está localizada entre as quinas e estas são responsáveis pela ocorrência de novas frentes de onda de difração, refração, transmissão; além das quinas serem responsáveis pela segmentação de curvas de reflexão e das múltiplas. A onda direta auxilia na análise, como referencial das demais curvas, visto que ela está centrada sobre a fonte e não sofre influência das quinas, por ser oriunda das ondas que se propagam sobre a superfície.

3.6.3 Fonte à direita das quinas

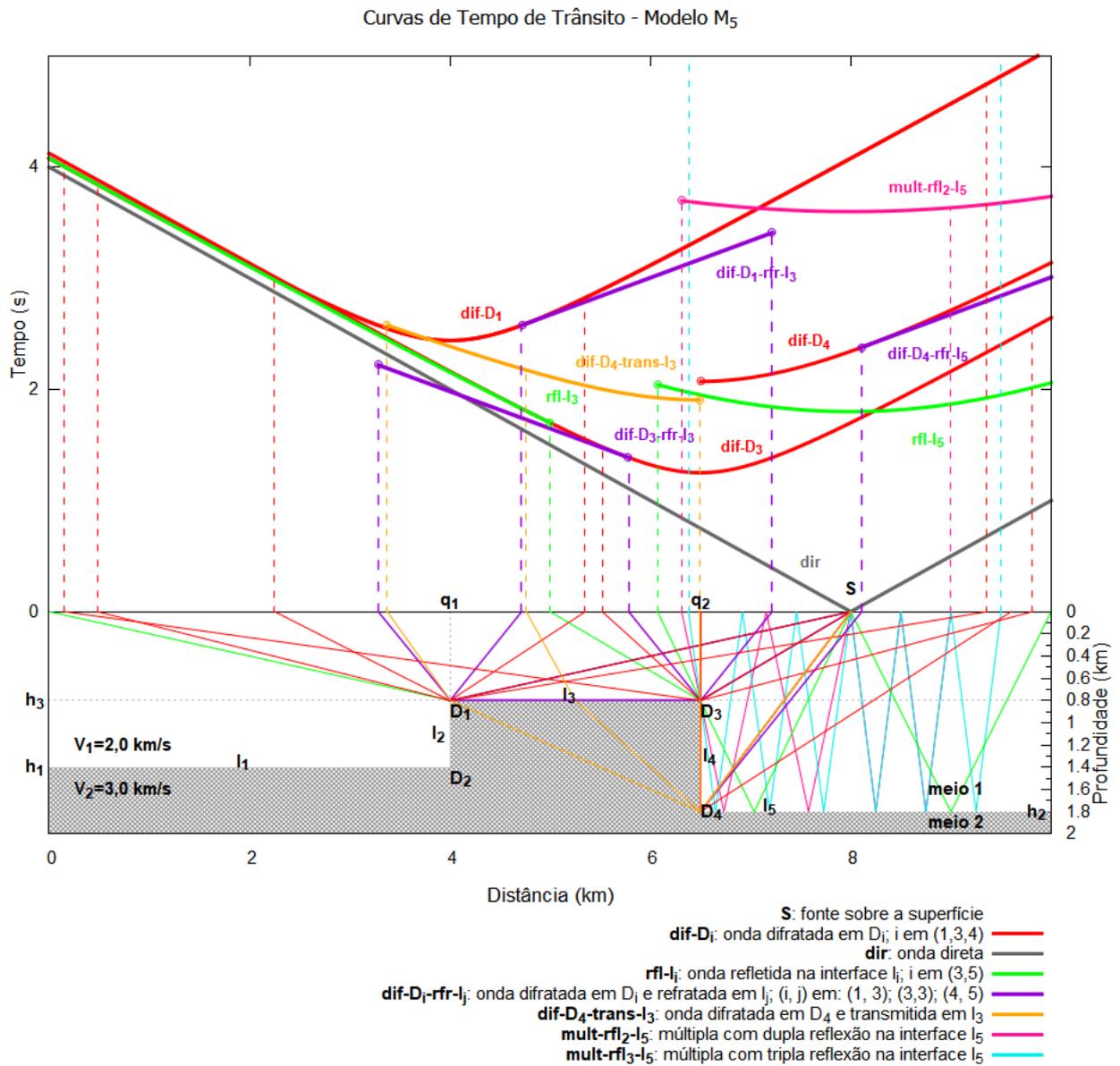


Figura 3.21: Modelo M₅: Fonte à direita das quinas. Este gráfico tem um padrão de curvas muito similar ao Modelo M₅ com a fonte à esquerda das quinas; porém, em lado oposto. Além disso, o gráfico apresenta maior afastamento das curvas, entre si, devido à maior profundidade da camada do meio 1, posição da fonte (sobre I₅).

3.6.4 Comparação entre M_5 e M_4

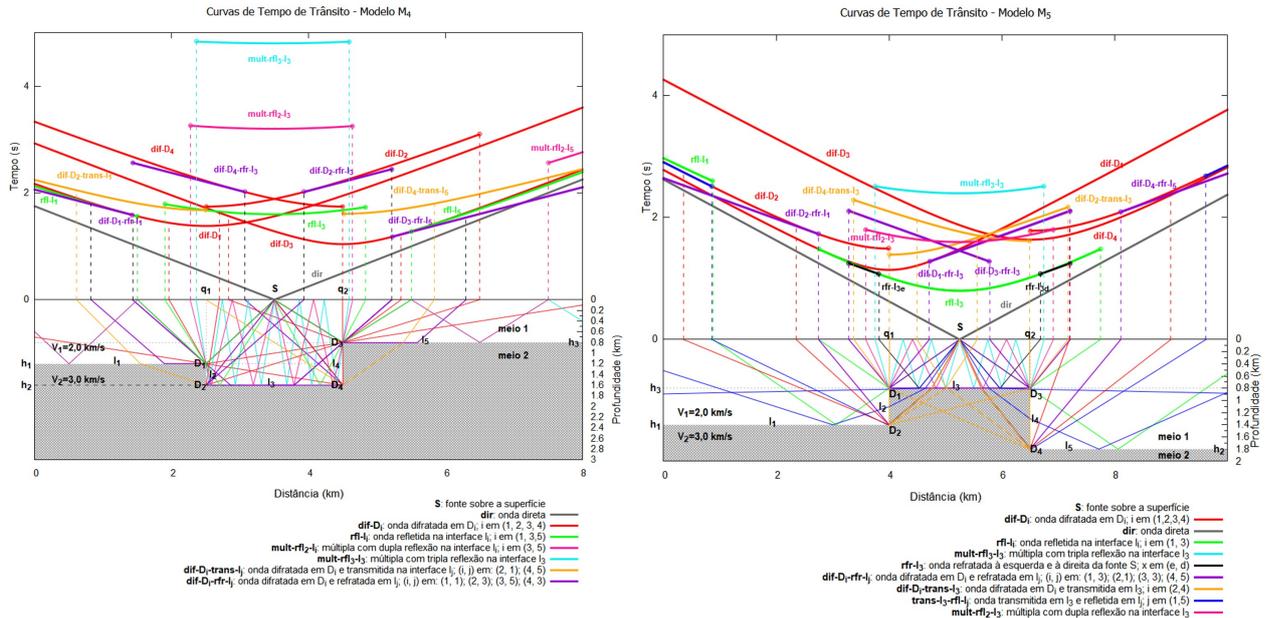


Figura 3.22: Comparação entre M_5 e M_4 : Fonte entre as quinas. Apesar de não serem modelos similares, apresentam maior grau de simetria das curvas em relação à fonte S , quando comparados com as demais posições da fonte em relação às quinas. No modelo M_5 , as curvas de reflexão e múltiplas apresentam menor deslocamento vertical, entre si, visto que a profundidade da interface é menor na posição da fonte.

Os gráficos não levaram em consideração todas as possibilidades de trajetórias e fenômenos envolvidos numa condição real, além de não considerar, ainda, a atenuação e conversão das ondas do tipo P para S e vice-versa. Porém, foram traçados alguns raios considerados importantes para obtenção de um padrão mínimo de comportamento das curvas de tempo de trânsito, para campos de velocidade com pontos difratores.

No artigo de Hongyan et al. (2020), é apresentado um modelo sísmico constituído falhas reversas e cavernas, entre outros pontos difratores, conforme Figura 3.17. A partir dessa modelagem direta, foram obtidos os sismogramas apresentados na Figura 3.18, reforçando a existência das hipérbolas de difração (referentes às falhas reversas em F_1 , F_2 , F_3 e F_4), ainda que as ondas difratadas apresentem baixa energia, devido à atenuação das mesmas, quando comparadas com as ondas refletidas.

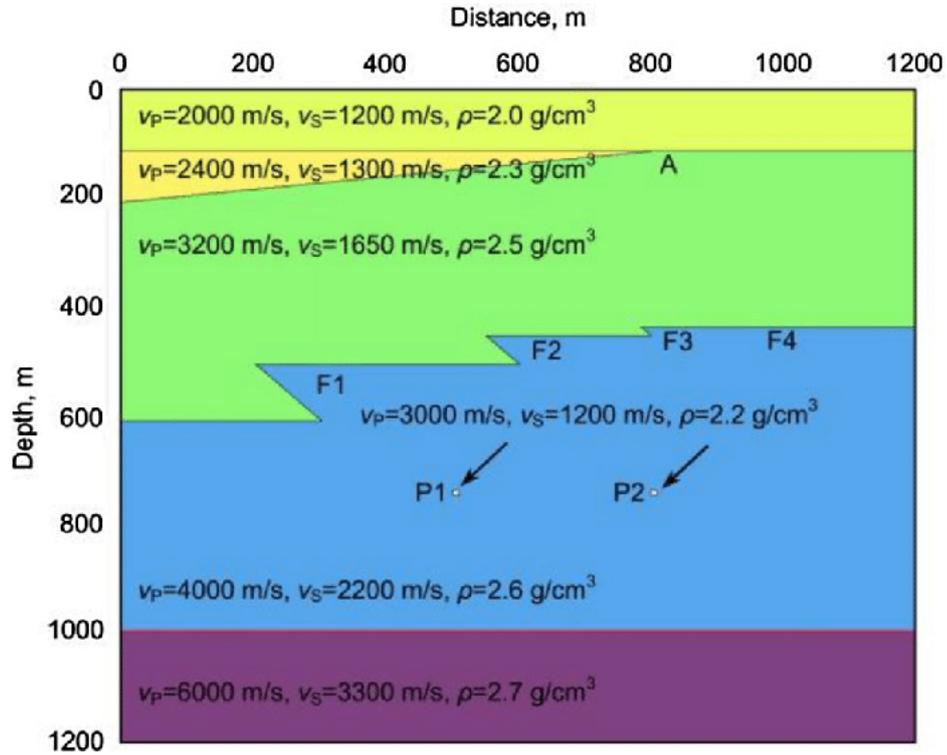


Figura 3.23: Modelo sísmico M, onde são apresentados duas cavernas, em P1 e P2, e quatro falhas reversas em F1, F2, F3 e F4; entre outros pontos difratores. (Hongyan et al, 2020)

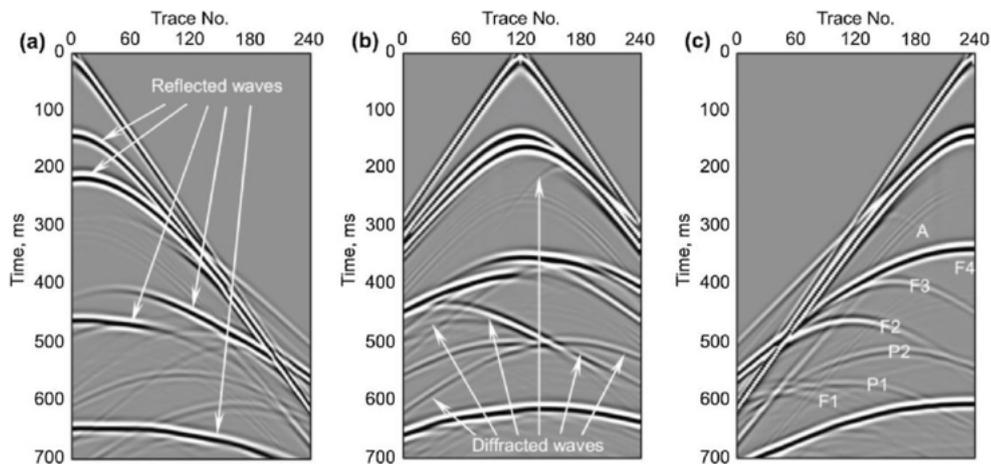


Figura 3.24: Registros sísmicos originais do modelo M, onde são apresentadas as ondas difratadas causadas por afinamento (desbaste), cavernas, e falhas. Assim como no modelo M, a identificação do desbaste é A, as cavernas são P1 e P2, e as falhas são F1, F2, F3 e F4. O número total de geofones foi de 241, com espaçamento entre eles de 5 m. O espaçamento entre tiros foi de 10 m e seu número total de 121. A Figura mostra os registros sísmicos do 1º, 60º e 121º tiro. (Hongyan et al., 2020)

Com base nos modelos construídos neste trabalho, considerando para cada um deles o

deslocamento relativo da fonte, em relação ao plano de falha, serão apresentadas, no próximo capítulo, as conclusões obtidas, sem, com isto, limitar as possibilidades de interpretação e conclusão das análises.

Capítulo 4

Conclusões

A importância de identificar ou rastrear pequenos corpos, zonas geologicamente heterogêneas ou pequenas falhas, que atuam como pontos difratores quando incididos por ondas acústicas, teve relevância central na definição do tema da pesquisa. A modelagem sísmica de curvas de tempo trânsito para campos de velocidade com pontos difratores, foi a metodologia aplicada para avaliar o comportamento das ondas sísmicas, em resposta a modelos geológicos falhados. A busca de um padrão na constituição e distribuição das curvas, a fim de servir de referência em análise de dados reais e auxiliar no processo de inversão geofísica através de inferências de características geológicas, norteou o desenvolvimento desse trabalho. Para tanto, foram propostos cinco modelos diferentes, variando, para cada um deles, a posição da fonte em relação ao plano de falha. A análise de quinze gráficos associados a cinco modelos geologicamente falhados, com três posições diferentes da fonte em relação ao plano de falha, e somado a estes o gráfico de modelo sem falha, conduziu a resultados bastante coerentes e satisfatórios. Foram observados, em relação aos parâmetros dos modelos, aspectos como tipos de eventos sísmicos, comportamento e arranjo de curvas. A partir dos dados sintéticos calculados de tempos de trânsito de ondas diretas, refletidas, refratadas, transmitidas e, especialmente, de ondas difratadas, foi possível verificar um padrão de comportamento, sem esgotar as possibilidades de interpretação, a partir de: (a) presença de hipérboles de difração associadas a pontos difratores; (b) segmentação de curvas associada a falhas (descontinuidades) das interfaces; (c) surgimento de novos eventos sísmicos, como os relacionados às ondas transmitidas e refratadas; (d) maior grau de simetria das curvas, em torno da fonte, quando ocorre um alinhamento vertical da fonte primária S com os pontos difratores; (e) aumento da quantidade de eventos com o aumento do número de quinas, visto que cada ponto difrator atua como fonte secundária de novas frentes de ondas acústicas; (f) maior curvatura das curvas de ondas difratadas, quando comparadas com as curvas de reflexão; e (g) valor mínimo das hipérboles de difração localizado sobre o ponto difrator; ainda que só foram con-

sideradas, nos modelos, pequenas possibilidades de trajetos e fenômenos dos raios sísmicos. Além disso, vale ressaltar que não foi considerado o efeito de atenuação da energia e nem a conversão das ondas P em S , e vice-versa. O deslocamento da posição fonte, em relação ao plano de falha, para cada modelo construído, com a fonte: à esquerda das quinas, sobre ou entre as quinas, e após quinas; também permitiu uma maior compreensão da dinâmica das curvas, considerando seus deslocamentos (rearranjo) em função do deslocamento da fonte. A mudança da posição da fonte também é importante, já que num levantamento real, não se sabe qual a posição da fonte em relação às quinas da falha. Dessa forma, a quantidade dos modelos apresentados pareceu razoável e conclusivo, segundo o objetivo proposto. Com relação ao desenvolvimento do trabalho, os programas utilizados proporcionaram uma maior compreensão das ferramentas e de suas potencialidades, em estudos acadêmicos. Isto permitiu a construção de gráficos didáticos, a partir da correlação, por cores, das curvas de tempo de trânsito, do traçado das trajetórias dos raios e da ligação entre eles (linhas tracejadas), a fim de facilitar a análise e, conseqüentemente, a compreensão dos resultados. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes e representativos, a partir dos quais foi possível verificar a existência de um padrão de curvas de tempo de trânsito, associado à presença de pontos difratores em geologia de subsuperfície. Porém, em pesquisas futuras, sugere-se o estudo dos efeitos de atenuação das ondas difratadas, visto que estas são importantes marcadores de pontos difratores, em levantamentos sísmicos, assim como aperfeiçoar o estudo do rearranjo dinâmico das curvas com o movimento da fonte.

Agradecimentos

Agradeço, glorifico e adoro ao meu Deus pela Sua Graça! Graça esta que me permitiu chegar até aqui, me dando a oportunidade de honrar e agradecer a generosidade dos que contribuíram de maneira especial pra este nobre feito. À minha amada esposa Julia e aos meus queridos filhos João Pedro e Bernardo, pela aliança. Aos meus amados pais, Henrique e Virgínia, pelo amor. À minha amada sogra Amélia, pelo afeto. Aos meus amigos Lourival e Amélia, pelo acolhimento. Agradeço aos meus pastores Bp. De Paula e Bpa. Cleudia, pelo cuidado de sempre. À amizade de Dr. Clovis, in memoriam. Aos meus irmãos Alexsandro, Junior e Andrea, aos meus cunhados e sobrinhos, pela torcida. Agradeço aos colegas Igor Soledade, Diego de Almeida e André Mousinho, pelo grande apoio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Wilson Figueiró, pela dedicação, confiança e excelência na orientação. Levarei os aprendizados obtidos, em nossos encontros, para a vida.

Agradeço à Universidade Federal da Bahia, a seu qualificado corpo docente, à coordenação e administração; pelo valioso trabalho.

Referências

- Alsadi, H. e Baban, E. (2020) Introduction to the Seismic Exploration, Sulaimani University, Kurdistan Region, Iraq.
- Hongyan, S.; Li, Q.; Yan, Y.-Y.; Li, X.-X.; Zhao, J. e Science, P. (2020) Separation of diffracted waves via svd filter, Petroleum Science, **17**:1259–1271.
- Kearey, P.; Brooks, M. e Hill, I. (2009) Geofísica de Exploração, Oficina de Textos.
- Nussenzveig, H. M. (1998) Curso de Física Básica, vol. 4, Blucher.
- Thomas, J. E. (2001) Fundamentos de engenharia de petróleo, Interciência.