

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

MODELAMENTO SÍSMICO ANALÓGICO

Tese Apresentada por

PAULO AFONSO DA COSTA MONTEIRO

como requisito parcial à obtenção do grau em

MESTRE EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

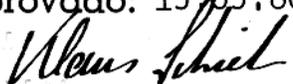
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

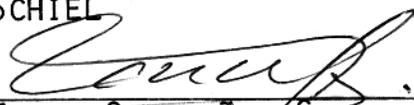
Geociências da

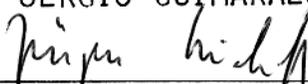
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 19.09.86

Comitê de Tese


KLAUS SCHIEL


LUIS SÉRGIO GUIMARÃES CANCELA


JÜRGEN H. BISCHOFF

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Dr. Klaus Schuel pela orientação neste trabalho.

Ao Dr. Jürsens Bischoff pela colaboração

Ao Dr. Francisco Guimarães Cancela pela participação na banda examinadora.

Ao Centro de Ciências Geofísicas e Geológicas da UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ pelo apoio.

Ao CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO (CNPq) e ao PROGRAMA NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (PRONUCLEAR) pelas bolsas de estudo concedidas no período de 82/85.

A minha família e aos colegas pelo apoio e incentivo.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

S U M Á R I O

Pag.

DEDICATÓRIA.....	
AGRADECIMENTOS.....	
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	
RESUMO.....	
ABSTRACT.....	
1. INTRODUÇÃO:.....	
2. TEORIA DAS ONDAS SÍSMICAS.....	
2.1 Tensão e Deformação.....	
2.2 A Relação entre Tensão e Deformação.....	
2.3 As Equações de Onda.....	
2.4 Aproximações Bi-dimensionais.....	
2.5 Tipos de Ondas Sísmicas.....	
2.5.1 Ondas de Volume.....	
2.5.1.1 Ondas Longitudinais ou P.....	
2.5.1.2 Ondas Transversais ou S.....	
2.5.1.3 Comparação entre as Velocidades das Ondas P e S.....	
2.5.2 Ondas de Superfície.....	
2.5.2.1 Ondas Rayleigh.....	
2.5.2.2 Ondas Love.....	
2.6 Efeitos do meio sobre a Propagação das Ondas	
2.6.1 Densidade de Energia.....	
2.6.2 Atenuação da Onda.....	
2.6.2.1 Espalhamento Geométrico.....	
2.6.2.2 Absorção da Onda.....	
2.6.3 Reflexão das Ondas.....	
2.6.4 Head Waves.....	
2.6.5 Difração.....	
2.7 Gráficos Tempo-Distância para as Ondas Sísmi cas.....	
3. TEORIA E PRÁTICA DO MODELAMENTO SÍSMICO.....	
3.1 Fatores de Escala.....	
3.2 Comparação entre o Modelamento 1, 2 e 3 Di	

mensional.....	
3.3 Tensão e Deformação nas Placas ou Modelos	
2-D.....	
3.4 Definições para o Modelamento.....	
3.5 Descrição dos Experimentos em Modelo 2-D.....	
3.5.1 Medidas dos Parâmetros Elásticos dos Mate-	
riais.....	
3.5.1.1 Características da Irradiação.....	
3.5.1.2 Velocidades das Ondas P e S	
3.5.1.3 Características da Atenuação.....	
3.5.2 Medidas em Modelos Clássicos.....	
3.5.2.1 Modelo de uma Camada com Interface Plana...	
3.5.2.2 Modelo de uma Camada com Interface Curva-	
da (Sinclinal).....	
3.5.2.3 Modelo de duas Camadas com Interface Pla-	
na.....	
3.5.2.4 Modelo de Duas Camadas com Interface Des-	
contínuas (Falha).....	
4. SISTEMA DE MEDIDA PARA O MODELAMENTO.....	
4.1 Sistema Eletrônico.....	
4.1.1 Sistema Gerador.....	
4.1.1.1 Instrumentos Usados.....	
4.1.1.2 Descrição do Funcionamento.....	
4.1.2 Sistema Receptor.....	
4.1.2.1 Instrumentos Usados.....	
4.1.2.2 Descrição do Funcionamento.....	
4.2 Fontes e Receptores Piezoelétricos.....	
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	
5.1 Medidas das Características da Irradiação.....	
5.2 Medidas das Velocidades das Ondas P e S.....	
5.3 Medidas da Atenuação das Ondas P e S.....	
5.4 Resposta do Modelo de Uma Camada com Interfa-	
ce Plana.....	
5.5 Resposta do Modelo de Uma Camada com Interfa-	
ce Curvada (Sinclinal).....	

5.6 Resposta do Modelo de Duas Camadas com Interface Plana.....

5.7 Resposta do Modelo de Duas Camadas com Interface Descontínuas (Falha).....

6. CONCLUSÃO.....

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

Apêndice I - Dimensões para os Modelos 2-D.

Apêndice II - Programas em Basic para HP-9825

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Pag.

FIGURAS

- | | |
|----|---|
| 1 | Sistema de Coordenadas cartesianas onde um corpo está sujeito a ação das componentes de tensão..... |
| 2 | Ondas longitudinais ou P..... |
| 3 | Ondas transversais ou S..... |
| 4 | Ondas Rayleigh..... |
| 5 | Ondas Love..... |
| 6 | a) Reflexão de uma onda plana numa interface plana |
| 7 | b) Diagrama de raios para as ondas refletidas |
| 8 | Head Waves..... |
| 9 | Curvas tempo-distância para as ondas difratadas, refletidas e refratadas (Head Wave)..... |
| 10 | Curva tempo-distância para onda difratada..... |
| 11 | Chapa modelo submetida a tensão σ_{xx} , τ_{xy} e τ_{zx} |
| 12 | Modelo de uma seção geológica de três camadas planas..... |
| 13 | Modelo de uma Camada..... |
| 14 | Diagrama de Irradiação para as ondas P e S, no plano..... |
| 15 | Diagrama de Irradiação para as ondas P e S em uma placa..... |

16	Configuração da placa para as medidas dos diagramas de irradiação das ondas P e S.....
17	Configuração da Placa para medidas das velocidades e coeficientes de atenuação para as ondas P e S.....
18	Modelo de uma Camada com Interface Plana.....
19	a) Modelo de uma camada para um Sinclinal com a fonte no centro da superfície..... b) Contornos para as ondas refletidas (cáusticas) da Fig. 19.a.....
20	a) Modelo para um Sinclinal com fonte superficial à direita de seu centro. b) Cáusticas para as ondas da Fig.20.a
21	Configuração para um modelo de duas camadas com interface plana.....
22	Modelo de duas camadas para uma falha.
23	Diagrama de Bloco do Sistema para o modelamento sísmico.....
24	Diagrama para sistema gerados.....
25	Diagrama para o sistema receptor.....
26	Filtro tipo BUTTERWORTH, passa-banda..
27	Circuitos equivalentes para um piezo-cristal, a) Circuito mecânico; b) Circuito elétrico.....
28	Fonte Piezoelétrica.....
29	Receptor, a) Vista de cima, b) Vista lateral.....

30	Piezocristal receptor.....
31	Posições do cristal para captar as ondas P e S.....
32	Diagrama de irradiação da onda P - Acrílico (2mm).....
33	Diagrama de irradiação da onda P - Acrílico (3mm).....
34	Diagrama de irradiação da onda P - PVC.....
35	Diagrama de irradiação da onda P - vidro.....
36	Diagrama de irradiação da onda P - alumínio.....
37	Diagrama de irradiação da onda S - Acrílico (2mm).....
38	Diagrama de irradiação da onda S - Acrílico (3mm).....
39	Diagrama de irradiação da onda S - VS - EY6.....
40	Diagrama de irradiação da onda S - vidro.....
41	Diagrama de irradiação da onda S - Alumínio.....
42	Sismogramas de diversas frequências para a onda P e onda S.....
43	Velocidade da onda P no Acrílico (2mm).....
44	Velocidade da onda P no Acrílico (3mm).....
45	Velocidade da onda P no PVC.....
46	Velocidade da onda P no vidro.....
47	Velocidade da onda P no alumínio.....
48	Velocidade da onda S no Acrílico (2mm).....

49	Velocidade da onda S no Acrílico (3mm)
50	Velocidade da onda S no PVC.....
51	Velocidade da onda S ao vidro.....
52	Velocidade da onda S no Alumínio.....
53	Curvas calculadas para a Atenuação da onda P.....
54	Curvas Medidas para a Atenuação da Onda P.....
55	Curvas calculadas para a Atenuação da Onda S.....
56	Curvas Medidas para a Atenuação da Onda S.....
57	Seção Sísmica para a Componente Horizôn tal do Modelo de uma Camada com Inter - face Plana.....
58	Seção Sísmica para a Componente Verti - cal do Modelo de uma Camada com Inter - face Plana
59	Curvas Teóricas para o Modelo de uma Camada com Interface Plana.....
60	Seção Sísmica para a Componente Hori - zontal do Modelo de uma Camada com In - terface Curvada.....
61	Seção Sísmica para a componente Vertical no Modelo de uma Camada com Interface Curvada.....
62	Curvas Teóricas para o Modelo de uma Camada com Interface Curvada.....
63	Modelo de Interface Curvada(Sinclinal). em escala reduzida.....
64	Seção Sísmica para a Componente Horizontal do modelo de duas Camadas com Interface

	plana (PVC- vidro).....
65	Seção Sísmica para a Componente Vertical do Modelo de duas Camadas com Interface Plana (PVC - vidro).....
66	Curvas Teóricas para o Modelo de duas Camadas com Interface Plana (PVC-Vidro).....
67	Seção Sísmica para a Componente Horizontal do Modelo de duas Camadas com Interface Plana (Acrílico-Alumínio).....
68	Seção Sísmica para a Componente Vertical no Modelo de duas Camadas com Interface Plana (Acrílico-Alumínio).....
69	Curvas Teóricas para o Modelo de duas Camadas com Interface Plana (Acrílico-Alumínio)
70	Seção Sísmica para a Componente Horizontal do Modelo de duas Camadas com Interface descontínua.....
71	Seção Sísmica para a Componente Vertical do Modelo de duas Camadas com Interface Descontínua.....
72	Curvas Teóricas para o Modelo de duas Camadas com Interface Descontínua.....

TABELAS

1	Quantidade e Dimensões em Sísmica.....
2	Valores Convencionais para os Principais Fatores de Escala.....
3	Materiais mais Utilizados no Modelamento e suas Características Elásticas.....
4	Valores para V_p , V_s , λ_p , λ_s , V_p/V_s
5	Valores para Q_p , Q_s , α_p , α_s

ABSTRACT

The aim of analog seismic modelling is to reproduce within certain laboratory restrictions seismic measurements in real media. The realization of such analog modelling depends on an measuring system and adequate reduces models.

The present thesis has objective to set up a measuring system for seismic analog modelling and to prove the feasibility of this system by carrying out a member of model studies.

For the realization of seismic modelling it is necessary to know the physical effects caused by application of mechanical energy to the model by artificial sources. These effects are described in chapter 2 and 3 of this thesis, which represent a summary of the theory published in the main publications about seismic waves and analog seismic modelling.

The construction of the measuring system was realized based on acquired instruments with predefined specifications. We can distinguish two parts of the system, the signal generator part consists of an wave generator, two power amplifiers and a piezoelectric transducer. The receiver part is made up of a piezoelectric sensor, a differential amplifier, an analog filter, an analog to digital converter and digital memory, diskettes and other data storages.

Based on this system were realized analog seismic model studies in two dimensions to test the applicability of the system. The analog models were made of the following materials : PVC, acrylic, glass and aluminium.

The tests consist of a quantitative determination of the material parameters of models, that are velocities and the attenuation coefficients. The characteristics of irradiation of the sources were also determined quantitatively.

The results of the qualitative tests made, i.e. the sections of seismograms of reflected and refracted waves for the models cited were known from examples in the literature which served for comparison.

In chapter 4 there is the instrumental part described and the mode of operation of the modelling system is explained. This part can be used as instruction of the system.

The results obtained with the diverse models showed the utility and the applicability of the system in realizing two dimensional analog seismic modelling. The results are shown in chapter 5.

RESUMO

No modelamento sísmico analógico procura-se simular, dentro de certas limitações de um laboratório, os métodos sísmicos empregados no campo. Para isso é necessária, a utilização de um sistema de medidas e de modelos reduzidos adequados.

O presente trabalho tem como objetivo: a montagem e a colocação em funcionamento de um sistema de medidas para o modelamento sísmico, e através de sua utilização em modelos simples e bastantes conhecidos mostrar a sua viabilidade para esse fim.

Para a realização do modelamento sísmico é necessário conhecer-se os efeitos físicos, decorrentes da aplicação da energia mecânica por fontes artificiais nos modelos. Estes efeitos são apresentados nos capítulos 2 e 3 deste trabalho, e representam um resumo da teoria encontrada em algumas das principais publicações sobre ondas e modelamento sísmico.

A montagem foi feita, a partir da aquisição de aparelhos eletrônicos, dotados de recursos necessários para se realizar o modelamento. Nesse sistema, uma parte dos aparelhos funciona na geração e a outra na recepção do sinal, ou seja, respectivamente o Sistema Gerador e o Sistema Receptor. O Sistema Gerador foi constituído de: um gerador de ondas, dois amplificadores de potência e uma fonte piezoelétrica. O Sistema Receptor foi constituído de: um sensor piezoelétrico, um amplificador diferencial, um filtro analógico, um osciloscópio (com conversor analógico-digital e memória), um microcomputador e um plotter.

Montado o sistema, foram feitos então alguns modelos bi-dimensionais, para testar a sua aplicação, os quais são apresentados no capítulo 3. Estes modelos foram construídos dos seguintes materiais: PVC, acrílico, vidro e alumínio. Os testes

consistiram numa avaliação quantitativa de parâmetros dos materiais, ou seja velocidade e coeficiente de atenuação, além da determinação das características de irradiação da fonte. Foram feitos também alguns testes qualitativos, isto é, registros através de sismogramas das ondas refletidas e refratadas nas interfaces dos modelos. Os resultados da maioria destes testes são conhecidos de trabalhos anteriores semelhantes, que serviram-nos como base de comparação.

A parte referente a instrumentação do sistema é descrita no capítulo 4, podendo servir como um manual de instruções de seu funcionamento.

Os resultados obtidos com a utilização dos diversos modelos, mostraram a viabilidade do sistema para se realizar o modelamento sísmico em duas dimensões. Tais resultados são apresentados no capítulo 5.

1. INTRODUÇÃO

1.1 O surgimento do modelamento sísmico, abriu a possibilidade de que realizar experiências, que simulassem algumas situações existentes no campo, diante de um trabalho de prospecção sísmica. A utilização para esse fim, de modelos reduzidos e de um sistema de medidas, apesar de não substituírem o trabalho de campo, podem de maneira simplificada; rápida; e econômica, servir para se estudar o comportamento das ondas sísmicas diante de uma determinada estrutura geológica.

O modelamento sísmico analógico, já vem sendo feito com bons resultados, a vários anos em alguns países. Para isso, foram utilizados desde sistemas simples, como o usado por Oliver, Press, Ewing (1954) até sistemas mais sofisticados, como os existentes hoje em dia, ver McDonald e Gardner, 1982. Os equipamentos utilizados por Oliver, Press, Ewing, constaram de um gerador de pulsos, um osciloscópio, um amplificador, uma fonte, e um receptor piezoelétrico. Os atuais laboratórios, por sua vez, incluem equipamentos similares, só que bem mais avançados, além de sistemas de computação, filtros e tanques para colocação de modelos, podendo-se ali efetuar medidas em vários arranjos e tratamento de dados automaticamente.

A montagem de um sistema para o modelamento sísmico e a execução de algumas medidas como teste, são assim, os objetivos deste trabalho. O sistema implementado consta de: Um gerador de ondas, um gerador de pulsos, três amplificadores, um osciloscópio digital com memória, um micro-computador, um plotter, uma fonte, e um receptor piezoelétrico. Estes instrumentos constituem os sistemas gerador e receptor. O sistema gerador envia um pulso ultra-sônico, 20-100kHz, uma fonte piezoelétrica, a qual em contacto com o modelo, transmite suas oscilações a ele. Por sua vez, o sistema receptor através do sensor piezoelétrico, capta o campo de ondas produzido pelo pulso no modelo, isto é, a ação recíproca da propagação das ondas sísmicas. Estes sinais são então tratados. Com base nisso, realizamos alguns experimentos com o sistema a fim de testar a sua aplicação.

A primeira parte dos testes consistiu em medir-se em placas de PVC, ACRÍLICO, ALUMÍNIO, VIDRO, as velocidades, os coeficientes da atenuação e características de irradiações das ondas P e S, em cada um destes materiais. A determinação destes parâmetros é importante para a classificação e escolha dos materiais para a segunda parte dos testes.

A segunda parte constou do registro e análise de sísmogramas para modelos de uma e duas camadas. Esses são modelos clássicos e foram baseados principalmente, naqueles realizados por Angona (1960): Modelos de 2 camadas com interface plana e com interface descontínua (falha) e por Temmer (1984): Modelo de uma camada com interface curvada (sinclinal). Os modelos de 2 camadas foram feitos de (PVC-VIDRO) e (ACRÍLICO-ALUMÍNIO). Os modelos de uma camada foram feitos de ACRÍLICO.

As medidas das velocidades para os materiais, apresentaram valores próximos daqueles tabelados em trabalhos anteriores. Estas medidas, mostraram valores de baixa velocidade para o vidro e o alumínio. Os diagramas de irradiação para as ondas P e S, mostram-se diferentes, tendo a forma circular para as ondas P e apresentando dois lóbulos simétricos para ondas S, em meios homogêneos e isotrópicos. De acordo com os resultados, o acrílico foi o material que apresentou-se como o mais homogêneo e isotrópico. Tendo também apresentando-se, como o de maior coeficiente de atenuação.

As seções sísmicas obtidas para cada modelo, mostraram características próprias de suas interfaces. Estas características aparecem nas trajetórias das ondas refletidas e refratadas, as quais apresentaram, concordância com as trajetórias calculadas para essas ondas.

A teoria para as ondas sísmicas apresentadas aqui, é um resumo daquela encontrada nas publicações de: Dorin (1976), Sheriff e Geldart (1982), Menahen e Sing (1980) e AKI e Richards (1980). Quanto a teoria sobre modelamento sísmico ela esta ba-

seado principalmente nos trabalhos de Oliver, Press, Ewing (1954) Betrens e Dresen (1982), McDonald e Gradner (1982).

1.2 Com relação aos trabalhos realizados em modelamento, citamos entre outros: Oliver, Press, Ewing (1954), os quais utilizaram modelos em forma de discos, constituídos por dois diferentes meios alumínio e plexiglass. Com a fonte posicionada à borda do disco, eles estudaram o comportamento das ondas Rayleigh, P e S, suas velocidades e dispersão. Como principal resultado, eles apresentaram curvas de dispersão para a onda de Rayleigh as quais poderiam ser usadas nos casos em que dois meios diferentes, tivessem a razão entre suas características elásticas igual a aquela do experimento.

Koefoed, Ewyk e Bakker (1958), utilizaram modelos em forma de tiras feitas de plexiglass, de 1.5, 3.7, 4.4cm, de largura; e 7.5cm de espessura, com a finalidade de estudarem o fenômeno da refração refletida, no qual uma onda percorre um caminho horizontal na interface entre 2 meios, e a seguir é refletida por um obstáculo, como um plano de falha, por exemplo. Eles utilizaram-se da teoria de Fresnel, para a explicação do evento.

Angona (1960), utilizou-se de modelos feitos de placas de alumínio; cobre e plexiglass de diversas formas, entre os quais, modelos simulando locais de descontinuidade, como falhas e dobras. Os resultados obtidos com o registro dos sinais destes modelos, mostraram semelhança com as ocorrências reais. Ele demonstrou também, a ocorrência de reflexão das ondas, quando ocorre variação na espessura de um meio, bem como, a possibilidade de se utilizar placas de diferentes materiais, a fim de comporem um meio com uma determinada velocidade média, dada em função das velocidades, espessuras e densidades dos materiais envolvidos.

Healy e Press (1960), estudaram o problema ligado a meios com a velocidade continuamente variável com a profundidade. Eles usaram para isso, modelos em forma de discos superpostos ,

constituídos de 2 meios, plexiglass e alumínio. Os resultados mostraram que a dispersão das ondas Rayleigh, aumentam com a es pessura e com a inhomogeneidade dos meios. Eles comprovaram ainda a adequação da expressão para simular-se um meio com uma determinada velocidade média.

Berckhemer e Ansorge (1963), estudaram o comportamento das ondas sísmicas, no interior de um corpo bi-dimensional, ba seados nas medidas das deformações laterais de uma placa. Utilizaram-se para isso, de modelos feitos de plexiglass e poliamida.

Hilterman (1970), foi o primeiro a realizar mediadas automáticas em grande escala, no modelamento sísmico.

Betrens e Waniek (1973), apresentaram uma compilação de muitos dos trabalhos realizados no modelamento até o ano de 1972.

White (1983), descreve trabalhos em modelos 2-d, em que são medidas as velocidades das ondas sísmicas, utilizando fon te e receptor na forma de pastilhas.

Neuman e Schiel (1977), trabalharam com modelos 2-D na investigação de meio inhomogêneos. Para os modelos, foram uti lizadas placas de Makrolon e plexiglass de 3mm. As inhomogêneida de foram simuladas, através da colocação de pequenos furos, espa lhados na parte central da placa. Através da análises dos resultados gráficos, eles concluíram que, as teorias empregadas no es tudo do problema de ondas, que se propagam em meios inhomogêneos, é válida somente para meios ligeiramente inhomogêneos. O método mostrou-se útil, na caracterização do tamanho das onhomogêneidades.

Behrens e Denzau (1977), investigaram através de mo delos 2-D, a propagação de ondas em meios com a estratificação cíclica. Eles utilizaram como modelos, placas de alumínio de 3mm de espessura. Os resultados mostraram que a investigação do tem

po de percurso das ondas em um modelo de camadas cíclicas, não oferece informações suficientes sobre a estrutura verdadeira do modelo, no entanto, o processamento do espectro de amplitude das ondas P, transmitidas e refletidas, melhoram o reconhecimento da estrutura de camadas cíclicas.

Além destes trabalhos com modelos bi dimensionais, os quais serviram nos como base, também os de McDonald e Gardner (1982), Behrens e Dresen (1984), foram de muita importância para nos. Os dois primeiros, apresentam o laboratório completo para o modelamento sísmico, fatores de escala entre o campo e o modelo, e tabelas com alguns dos principais materiais usados no modelamento, juntamente com seus parâmetros clásticos. Temme utilizou o modelamento digital, para estudar modelos com interface curvada. Ele apresentou os sismogramas característicos para esses modelos, e a técnica de migração usada para recuperar os sinais, delineando a forma da interface.

2. TEORIA DAS ONDAS SÍSMICAS

As ondas sísmicas são geralmente conhecidas como ondas elásticas, devido causarem a deformação do meio no qual elas se propagam, consequência de um estado de tensão do mesmo. A velocidade de propagação das ondas sísmicas é função das características do meio.

Tensão e deformação estão relacionadas entre si através de constantes elásticas características de cada material.

2.1 Tensão e Deformação

A tensão é definida como a força pelo elemento de área onde ela atua. Se a força é perpendicular à área, a tensão é dita normal, se a força atua tangencialmente à área a tensão é cizalhante. A Tensão é denotada por τ_{ij} , onde o primeiro índice (i) representa a direção da força e o segundo (j), a direção da normal à superfície.

Considere-se o sistema de coordenadas cartesianas na Fig. 1, no qual um sólido é sujeito a ação de todas as componentes da tensão.

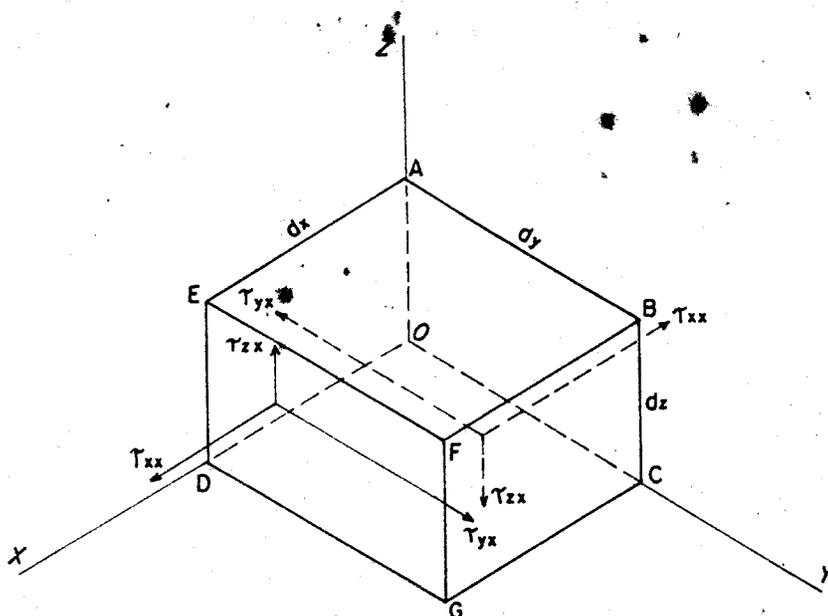


FIG. 1 - SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS ONDE UM CORPO ESTÁ SUJEITO À AÇÃO DAS COMPONENTES DA TENSÃO.

São 9 as componentes da tensão total atuando no sólido. A tensão total é representada pelo tensor:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Para uma tensão diádica (Menahen, 1980) as componentes τ_{ij} e τ_{ji} , são simétricas, logo as componentes independentes da tensão se reduzem a 6: τ_{xx} , τ_{yy} , τ_{zz} , τ_{xy} , τ_{zx} e τ_{zy} .

ϵ_{ij} são as componentes da deformação sofrida pelo corpo quando submetido à tensão. A deformação consiste na alteração da posição original das partículas que compõem o corpo. Essas alterações provocam mudanças na forma e dimensão do corpo, as quais podem ser temporárias desde que o mesmo seja ideal elástico.

Num corpo sólido sujeito a ação da tensão em todas as direções do sistema (x, y, z) , as componentes das deformações são dadas por:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \partial u / \partial x & \epsilon_{xy} &= \epsilon_{yx} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \\ \epsilon_{yy} &= \partial v / \partial y & \epsilon_{xz} &= \epsilon_{zx} = \partial w / \partial x + \partial u / \partial z \\ \epsilon_{zz} &= \partial w / \partial z & \epsilon_{yz} &= \epsilon_{zy} = \partial w / \partial y + \partial v / \partial z \end{aligned} \quad (2)$$

onde u , v e w são as componentes do deslocamento das partículas nas direções x , y e z , respectivamente.

2.2 A Relação entre Tensão e Deformação (Lei de Hooke)

A Lei de Hooke estabelece que a deformação é linearmente proporcional a tensão que a produziu, para pequenas deformações.

A deformação é igual a soma de todas as deformações produzidas por cada tensão, individualmente. Considerando-se que as tensões (trações e compressões) estão agindo ao longo dos 3 eixos coordenados ao mesmo tempo, têm-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \phi & \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \phi & \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

onde λ e μ são conhecidas como constantes de Lamé, e ϕ é por definição a dilatação cúbica do corpo, dada por:

$$\phi = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

As equações (3) podem ser generalizadas como:

$$\begin{aligned} \tau_{ii} &= 2\mu \epsilon_{ii} + \lambda \phi \\ \tau_{ij} &= \mu \epsilon_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

sendo $i, j = x, y, z; i \neq j$

Estas são as relações de Hooke para todas as componentes da tensão, em termos da deformação, para um corpo ideal/elástico (Do-
brin, 1976).

As constantes λ e μ podem ser relacionadas, ainda, a outras constantes que são, como elas, características elásticas de cada material:

$$Y = \mu (3\lambda + 2\mu)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

$$k = \frac{1}{3} (3\lambda + 2\mu) \quad (6)$$

ν , σ e k são respectivamente: módulo de Young, razão de Poisson e módulo de Bulk.

2.3 As Equações de Onda

A forma geral da equação de onda, que é mais aplicável a propagação de ondas sísmicas através de um sólido, assume deformações nas 3 direções, sendo cada componente da tensão associada com os componentes da deformação em mais de uma direção, conforme é indicado na eq. (3)

Pela segunda lei de Newton as equações do movimento são dadas por:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo-se as equações dadas em (3) nas equações dadas em (7), e derivando-se em seguida as três expressões resultantes com respeito a x , y e z , respectivamente e fazendo-se a adição das três expressões resultantes (Sheriff e Geldart, 1982), obtem-se:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= \frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \\ &= \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \end{aligned}$$

Analogamente para deformações cizalhantes, obtém-se:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \theta_i &= \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \\ &= \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (9)$$

onde, $i = x, y, z$ representa a direção da normal ao plano onde ocorrem as deformações θ . Assim θ_i :

$$\begin{aligned} \theta_x &= \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \\ \theta_y &= \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \\ \theta_z &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (10)$$

A forma clássica para a equação de onda é dada por:

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (11)$$

onde V é a velocidade de propagação da onda.

Então, por comparação das equações (8) e (3) com a equação (11) pode-se reconhecer as relações para as velocidades das ondas P e S .

$$\begin{aligned} \alpha = V_p &= \frac{\sqrt{(\lambda + 2\mu)}}{\rho} \\ \beta = V_s &= \frac{\sqrt{\mu}}{\rho} \end{aligned} \quad (12)$$

2.4 Aproximação Bi-Dimensional

Nos casos em que é necessária a aproximação bidimensional, pode-se reduzir o número de variáveis dependentes e independentes do campo de deformação, com certas restrições. Para isso, considera-se que as componentes do deslocamento são independentes de uma coordenada cartesiana. Considera-se esta a coordenada Z , assim:

$$\epsilon_{ij} = \begin{matrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_0 \end{matrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \frac{\partial w}{\partial x} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \frac{\partial w}{\partial y} \\ \tau_{zz} &= \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = (\tau_{xx} + \tau_{yy}) \end{aligned} \quad (14)$$

Substituindo-se estas equações (14) na equação geral para uma onda plana (Menahen e Sing, 1980), obtém - se:

$$\begin{aligned} (\lambda + 2\mu) \epsilon_{xx}^2 + (\lambda + \mu) \frac{\partial \epsilon_{yy}}{\partial x} + \mu \epsilon_{yy}^2 &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + 2\mu) \epsilon_{yy}^2 + (\lambda + \mu) \frac{\partial \epsilon_{xx}}{\partial y} + \mu \epsilon_{xx}^2 &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (15)$$

estas são as equações de onda de uma placa para deformações normais. Para a deformação cristalizante, tem-se:

$$\beta^2 \nabla^2 W = \frac{\partial w}{\partial t^2},$$

$$\text{onde, } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \text{ e } \beta^2 = \frac{u}{\rho}$$

Casos Particulares:

- Deformação Plana - Um corpo sujeito as condições de deformação plana, paralela a xy, apresenta as seguintes considerações:

$$U = U(x, y; t), V = V(x, y; t) \text{ e } W = 0$$

$$\begin{array}{ccccccc} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & 0 & \tau_{xx} & \tau_{yx} & 0 & \\ \epsilon_{ij} = & \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & 0 & \tau_{ij} = \tau_{yx} & \tau_{yy} & 0 & (17) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

- Tensão Plana - Um corpo está em estado de tensão plana, paralela a xy, se: $\tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{zz} = 0$

$$\begin{array}{ccccccc} \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & 0 & \tau_{xx} & \tau_{yx} & 0 & (18) \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 & \tau_{ij} = \tau_{xy} & \tau_{yy} & 0 & \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} & 0 & 0 & 0 & \end{array}$$

Se uma força é aplicada rapidamente, como por impacto, em um meio elástico homogêneo de tamanho infinito, a região de compressão irá deslocar-se do ponto de impacto, como uma esfera expandindo-se. O aumento do raio da esfera, tem uma taxa de V_p , sendo V_p a velocidade da onda P, a qual é dada pela expressão α em (12)

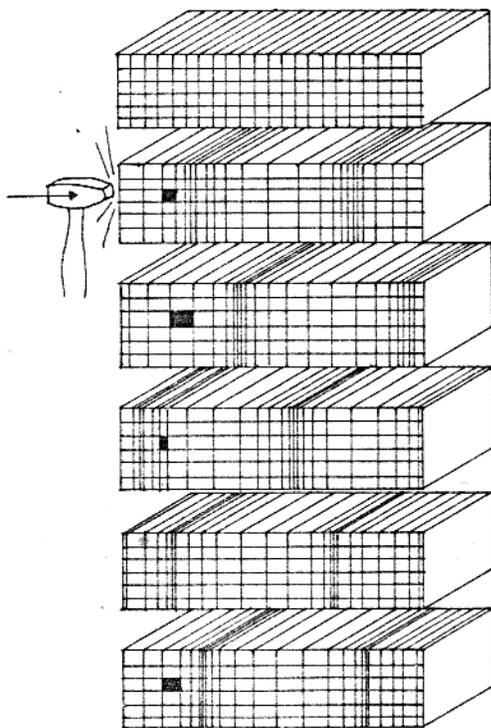


FIG. 2 - ONDAS LONGITUDINAIS OU P.

2.5.1.2 Ondas Transversais

Quando deformações cizalhantes propagam-se no sólido elástico, o movimento das partículas é sempre perpendicular a di-

reção de propagação da onda. Este tipo de onda, é chamada Transversal ou S. A velocidade de propagação para uma onda S é dada pela expressão β em (12):

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

A onda S pode-se desdobrar em duas componentes, uma com movimento das partículas perpendiculares ao plano horizontal e outra com movimentos das partículas paralelas a este plano. A primeira é chamada de onda S_V e a segunda de S_H . Devido a estas duas componentes serem independentes, elas podem aparecer individualmente, envolvendo movimentos em um plano horizontal ou em um plano vertical (onda S_H ou S_V).

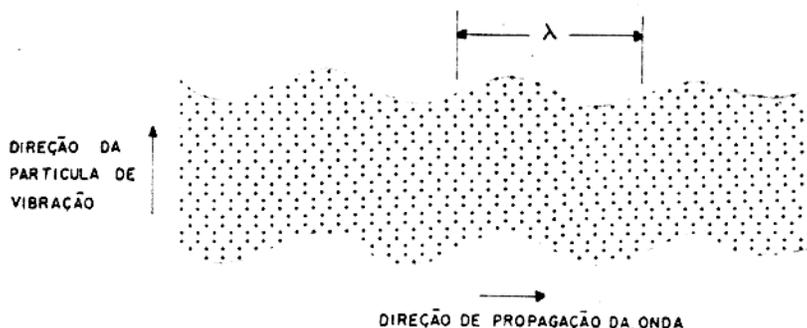


FIG. 3 - ONDAS TRANSVERSAIS OU S

As velocidades das ondas P e S podem ser dadas também em função de outras constantes que aquelas da fórmula original, isto é:

$$V_P = \frac{\sqrt{\lambda + 2\mu}}{\rho} = \frac{\sqrt{E(1 - \sigma)}}{\rho(1 - 2\sigma)(1 + \sigma)}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (20)$$

Assim, $\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1-\sigma}{\frac{1}{2}-\sigma}}$, $0 < \sigma < \frac{1}{2}$, e $\frac{V_P}{V_S}$ será sempre

maior que 1 já que σ não pode ser maior do que $1/2$.

As velocidades das ondas de volume nos meios reais dependem de muitos fatores, entre os quais, no caso das rochas, porosidade, cimentação, profundidade, flúidos intersticiais e etc.

2.5.2 Ondas de Superfície

Ondas de Superfície são ondas que se propagam ao longo da superfície livre de um sólido, isto é, nas imediações da interface com o ar. Estas ondas diminuem bastante com a profundidade. As principais ondas de superfície são as ondas Rayleigh e Love.

2.5.2.1 Ondas Rayleigh

É a mais importante onda de superfície nos trabalhos de exploração sísmica. O movimento das partículas nesta onda é sempre num plano vertical e retrógrado em relação a direção de propagação. A amplitude do movimento decresce exponencialmente com a profundidade, Fig. 4.

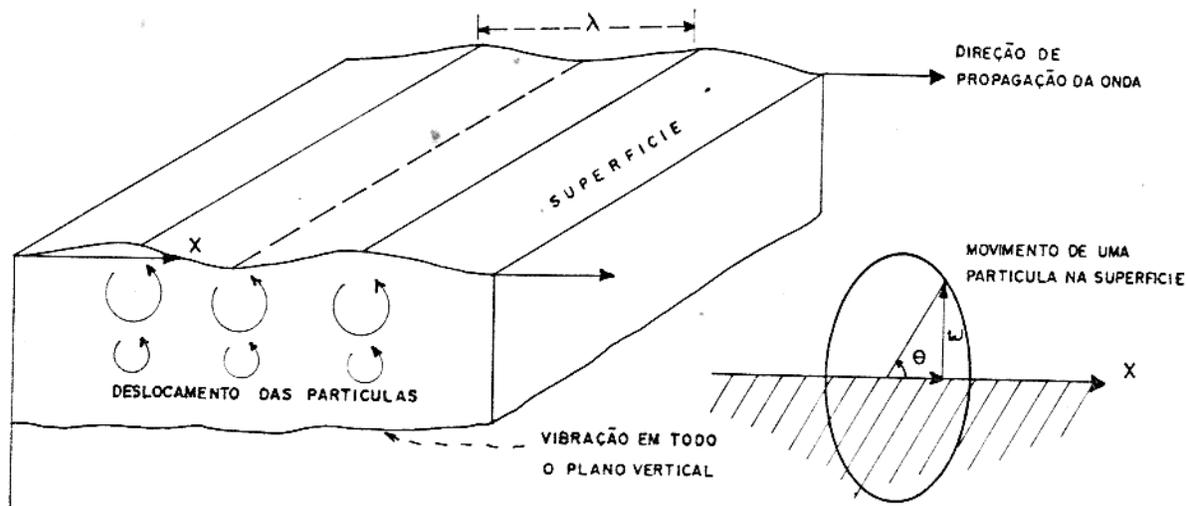


FIG. 4 - ONDAS RAYLEIGH

Em um dado ponto da superfície uma partícula descreve uma elipse no plano XZ, mostrado em destaque na Fig 4. As equações (21) dão os deslocamentos da partícula para um meio com $\sigma = \frac{1}{4}$ e $(\beta/\alpha)^2 = \frac{1}{3}$, in Sheniff e Geldart, 1982.

$$u = -0.423K A \text{ SEN } K(x - V_R t)$$

$$w = -0,620K A \text{ COS } K(x - V_R t) \quad [21]$$

$$\text{tg } \theta = - \frac{w}{u} = 1.465 \text{ Cot } K(x - V_R t),$$

onde A é a amplitude da função potencial de deslocamento, K é o módulo de Bulk e V_R a velocidade de onda Rayleigh.

Ondas Rayleigh apresentam velocidade menor que as ondas de Volume e são frequentemente chamadas de Ground Roll. A velocidade das ondas Rayleigh depende da frequência, isto é, são ondas dispersivas. Depende também, da espessura da camada superior.

Pela análise da dispersão das ondas Rayleigh, os geofísicos têm sido capazes de obter grandes detalhes acerca de informações sobre o acamamento na superfície da terra e no manto superior.

2.5.2.2 Ondas Love

Ondas Love são ondas que envolvem movimentos transversais (SH) das partículas paralelas à superfície da terra. Love, matemático que deu o nome a essas ondas, demonstrou que elas se propagam por múltiplas reflexões entre o topo e a base da camada superior.

As fontes normalmente usadas nos trabalhos sísmicos não geram ondas Love em grau significativa, pois elas produzem os cilações na direção vertical em relação ao plano de propaga-ção das ondas. Logo, essas ondas são tão importantes importantes na exploração sísmica.

Do mesmo modo, geofones designados para responder somente a movimentos verticais, não detectam essas ondas

Para pequenos comprimentos λ , da onda Love, sua velocidade aproxima-se da velocidade da onda SH no meio superior. Por outro lado, para longos comprimentos λ , a velocidade da onda Love aproxima-se da velocidade da onda SH no meio inferior. Ou seja, as ondas Love são também dispersivas.

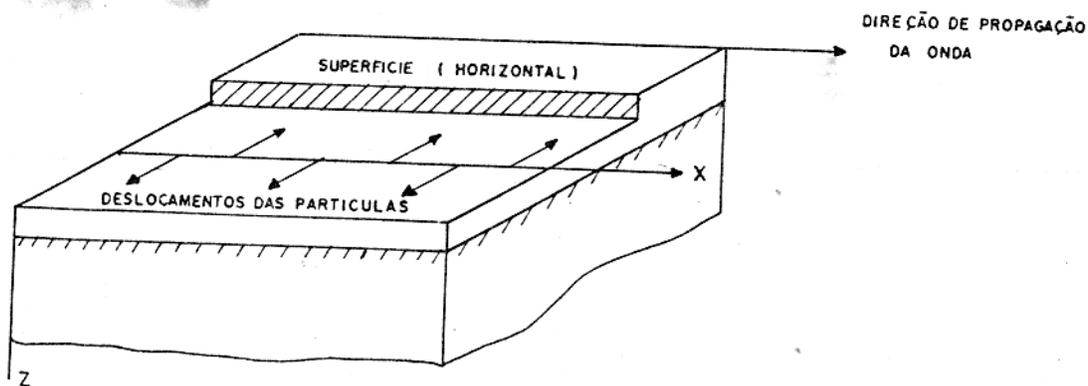


FIG. 5- ONDAS LOVE

2.6 Efeitos do Meio Sobre a Propagação das Ondas

2.6.1 Densidade de Energia

Em geral o objeto do estudo relacionado com a energia de uma onda, não é a sua energia total, mas, aquela existente na vizinhança de um ponto. Assim, densidade de energia é definida como a energia por unidade de volume na vizinhança do ponto.

Considere-se uma onda harmônica, cujo deslocamento é dado por U , então, cada elemento do meio em movimento tem uma velocidade dada por $U = \frac{du}{dt}$, associada a sua energia cinética.

A energia cinética contida em cada elemento é dada por:

$dE_k = \frac{1}{2} \rho dv U^2$. A densidade de energia cinética será então dada por:

$$\frac{dE_k}{dv} = \frac{1}{2} \rho U^2$$

A passagem da onda, também envolve energia potencial, resultante das deformações elásticas produzidas pelas ondas. Como o meio oscila entre compressão e dilatação, a energia oscila entre a forma cinética e a potencial, sendo a energia total, mantida constante, $E_t = E_p + E_c$. Visto que a energia total se equivale ao máximo valor da energia cinética, a densidade de energia para uma onda harmônica é:

$$E = \frac{1}{2} \rho W^2 A^2, \quad (22)$$

onde W é a frequência angular da onda e A é sua amplitude máxima.

Intensidade de energia é definida como a quantidade de energia que flui, através de uma unidade de área normal à direção de propagação da onda, na unidade de tempo. Em termos gerais, esta intensidade para uma onda harmônica é dada por:

$$I = E.V$$

$$= \frac{1}{2} \rho V W^2 A^2 \quad (23)$$

onde V é o volume do corpo.

2.6.2 Atenuação da Onda

2.6.2.1 Espalhamento Geométrico

Uma onda não plana, divergindo de seu centro de origem sofre um decréscimo na amplitude enquanto se propaga, devido ao espalhamento geométrico. Este espalhamento é calculado pela relação entre a intensidade de energia num determinado ponto e a intensidade de energia num ponto de referência.

Pode-se representar o espalhamento geométrico de uma onda, pela relação:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \quad (24)$$

onde r_1 e r_2 são respectivamente, a distância da onda no ponto de referência à origem e a distância da onda num ponto qualquer à origem; e n tem os seguintes valores: 0, 1 e 2 respectivamente para ondas planas, cilíndricas e esféricas.

Para ondas planas, os raios não convergem e nem divergem, assim, a intensidade de energia para elas é sempre constante em função do espalhamento, $n = 0$ e $\frac{I_2}{I_1} = 1$ (não divergência)

Para ondas cilíndricas ocorre a divergência, a qual produz um decréscimo na intensidade da energia com o inverso da distância à fonte, $n = 1$ e $\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1}{r_2}$ (divergência cilíndrica)

Para ondas esféricas, o espalhamento geométrico produz um decréscimo na intensidade da energia com o inverso do quadrado da distância à fonte, $n = 2$ e $\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$ (divergência esférica).

2.6.2 Absorção

Enquanto uma onda propaga-se através de um meio, a sua energia é gradualmente absorvida, reaparecendo sob a forma de calor.

Esta dissipação da energia da onda em calor é chamada absorção, e é responsável pelo eventual desaparecimento do movimento da onda.

As medidas da Absorção são difíceis de se executar , já que ele varia inclusive com a frequência e, na prática, todos meios envolvem diversos materiais de diferentes constantes elásticas.

Um volume de um material submetido à ação de uma força de tração (ou compressão) cíclica, de frequência W , apresenta uma medida de fricção interna (absorção) dada por (Aki e Richards, 1980):

$$\frac{1}{Q(W)} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (25)$$

onde $Q(W)$ é o fator de absorção, E é o valor de pico da energia aplicada no volume, ΔE é a energia perdida em cada ciclo devido às imperfeições inelásticas do material.

A absorção pode ser descrita de duas maneiras, no tempo ou no espaço, isto é:

- a) Um decaimento com o tempo da amplitude da onda estacionária em um número de ondas fixa
- b) Um decaimento espacial da onda propagando-se em uma frequência fixa.

Em ambos os casos, a) e b), para um meio com uma relação linear tensão-deformação, a amplitude da onda A é proporcional a $E^{1/2}$, por exemplo A pode representar a velocidade máxima de uma partícula ou uma componente da tensão na onda. Assim, a equação(25) pode ser escrita como:

$$\frac{1}{Q(W)} = \frac{\Delta A}{\pi A} \quad (26)$$

Desse modo, para o caso a) dado que inicialmente $A = A_0$, A decresce numa fração de $\frac{\pi}{Q}$ em sucessivos tempos

$$\frac{2\pi}{W}, \frac{4\pi}{W}, \dots, \frac{2n\pi}{W} \quad e,$$

$$A(t) = A_0 \left(1 - \frac{\pi}{a} \right)^n, \text{ para } t = \frac{2n\pi}{w}. \text{ Assim,}$$

$$A(t) = A_0 \left(1 - \frac{wt}{20n} \right)^n = A_0 \exp \left(- \frac{wt}{2Q} \right), \quad (27)$$

para n grande, isto é, t grande.

Para o caso b, decaimento espacial, assumindo-se que a direção da máxima atenuação é ao longo do eixo x , que é também a direção de propagação da onda, tem-se:

$$\Delta A = \frac{dA}{dx} \cdot \lambda, \quad (28)$$

onde $\lambda = \frac{2\pi}{w}$ é o comprimento de onda dado em termos de w e da ve

locidade de fase c . A equação (28) torna-se $\frac{dA}{dx} = - \left(\frac{w}{2cQ} \right) A$

e a solução para o decaimento espacial é dada por:

$$\begin{aligned} A(x) &= A_0 \cdot \exp \left(- \frac{wx}{2cQ} \right) \quad (29) \\ &= A_0 \cdot \exp \left(- \alpha(w) \cdot x \right), \end{aligned}$$

onde

onde $\alpha(w)$ é o coeficiente de absorção espacial, Q o fator de absorção e $A_0 \neq A_0$. Q pode ser medido através de ξ , sendo $Q = \frac{\pi}{\xi}$.

ξ é chamado de crescimento logarítmico da onda e é dado por:

$$\xi = L_n \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (30)$$

Tanto Q quanto ξ são medidas das características de atenuação dos materiais. Quanto maior o valor de Q para um material menor será a absorção deste material ou seja, maior é sua elasticidade. Q é também chamado fator de qualidade do material.

2.6.3 Reflexão e Refração das Ondas

Ondas originadas de uma fonte pontual, propagam-se

em um meio homogêneo expandindo - se como esferas. Estas ondas obedeceram ao princípio de Huygens, que estabelece que todo ponto de uma frente de onda é fonte para uma nova onda, que se propaga a partir deste ponto em frentes de ondas esféricas. Se a onda esférica tem raio bastante longo, ela pode ser tratada como plana. Assim, linhas perpendiculares a esta frente, isto é, raios paralelos podem ser usados para descrever a propagação convenientemente.

Considere-se a Fig. 6 onde uma onda P incide obliquamente numa superfície horizontal. Usando o princípio de Huygens, isto dará origem a uma onda P e uma onda S refletidas. Os raios incidentes e os raios refletidos serão sempre perpendiculares às suas respectivas frentes de onda. Então, por semelhança de triângulos chega-se a:

$$\frac{\text{Sen } r_s}{\text{Sen } i_p} = \frac{V_{s1}}{V_{p1}}, \text{ e, } i_p = r_p \quad (31)$$

onde i_p é o ângulo de incidência da onda P, r_p e r_s são respectivamente os ângulos de reflexão das ondas P e S; e V_{p1} e V_{s1} são as velocidades para as ondas P e S no meio 1.

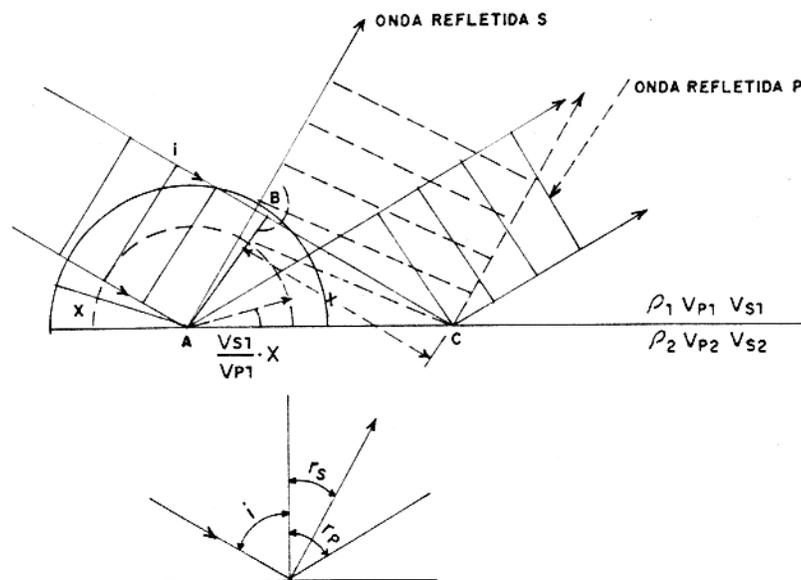


FIG. 6 - a) REFLEXÃO DE UMA ONDA PLANA NUMA INTERFACE PLANA.
b) DIAGRAMA DE RAIOS PARA AS ONDAS REFLETIDAS.

Considere-se agora a Fig. 7 para a refração de uma onda P incidente. Essa onda dará origem a uma onda refratada S e uma refratada P. Similarmente como na reflexão, tem-se:

$$\frac{\text{Sen } R_P}{\text{Sen } i_P} = \frac{V_{P2}}{V_{P1}} \quad \text{e,} \quad (32)$$

$$\frac{\text{Sen } R_S}{\text{Sen } i_P} = \frac{V_{S2}}{V_{P1}} \quad (\text{Lei de Snell})$$

onde R_P e R_S são respectivamente os ângulos de refração das ondas P e S com a vertical e V_{P2} são respectivamente as velocidades das ondas P e S no meio 2.

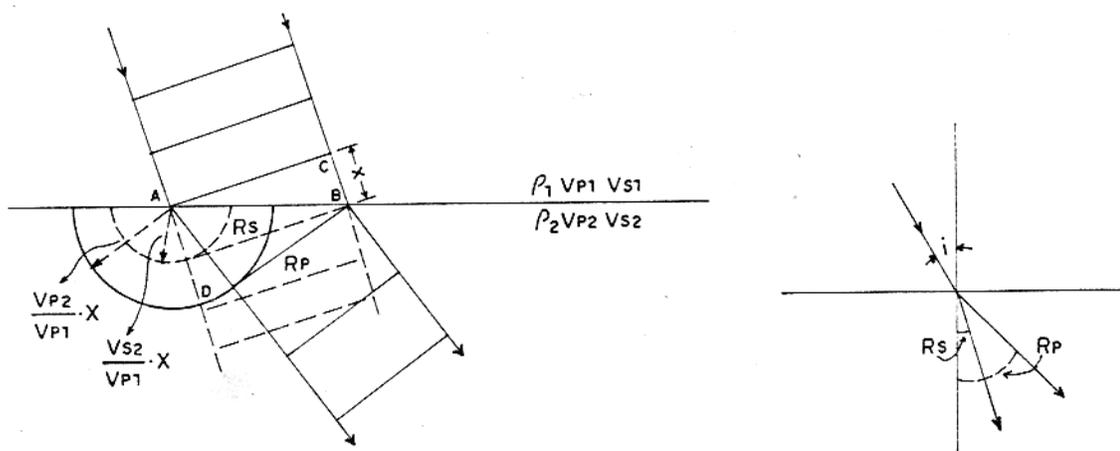


FIG. 7 - a) REFRAÇÃO DE UMA ONDA PLANA NUMA INTERFACE PLANA.
b) DIAGRAMA DE RAIOS PARA AS ONDAS REFRACTADAS.

Quando $R_P = 90^\circ$, a onda P refratada não penetra no meio 2 mas, viaja ao longo da interface entre os dois meios. O ângulo de incidência responsável por essa situação é chamado ângulo crítico. Para valores do ângulo de incidência acima do valor crítico não haverá refração. O ângulo crítico é dado por:

$$i_c = \text{Sen}^{-1} \frac{V_1}{V_2}, \quad \text{onde } V_1 \text{ e } V_2 \text{ são respectivamente as velocidades das ondas nos meios 1 e 2.}$$

Quando uma onda P atinge uma interface, dependendo do ângulo de incidência da onda e das características dos meios 1 e 2, podem ou não originar-se as seguintes ondas: P refratada, P refletida, S refratada e S refletida. A incidência com o ângulo crítico produzirá estes quatro tipos de ondas, neste caso há o aparecimento das chamadas Head Waves, que serão definidas no item 2.6.4. A quantidade de energia em relação a ondas incidente, para cada uma depende das características elásticas dos meios e do ângulo de incidência.

Em uma incidência normal, uma parte da onda é convertida em uma P refletida e outra parte em O refratada, não ocorrendo entretanto ondas S. O coeficiente de reflexão para esse caso é dado por:

$$C_r = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (34)$$

onde Z_i é conhecida como impedância acústica do meio i , e é igual ao produto da velocidade (V_i) pela densidade do meio (ρ_i).

O coeficiente de refração, considerando-se que não haja absorção, é igual a:

$$C_R = 1 - C_r \quad (35)$$

2.6.4 Head Waves

Head Waves são originadas de ondas refratadas em uma interface, na qual incidiram com o ângulo crítico, isto é, elas formam as frentes de ondas que retornaram ao meio 1, após a refração crítica.

Essa refração crítica produz uma onda paralela e imediatamente abaixo da interface. Visto que, o movimento relativo entre os dois meios não é possível, o meio superior é forçado a mover-se em fase com o meio inferior. O distúrbio no meio superior viaja ao longo da interface com a mesma velocidade V_2 da

onda refratada na interface.

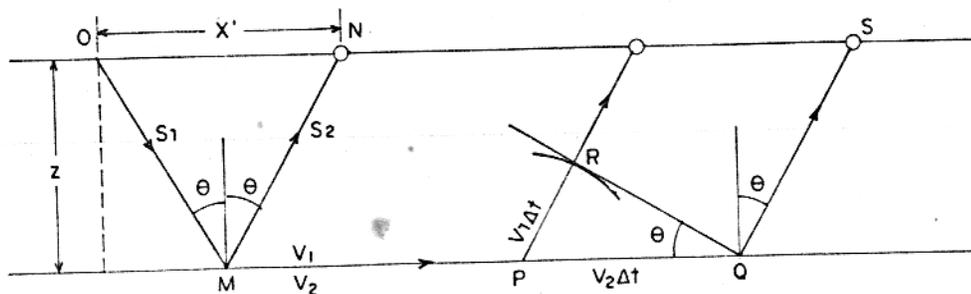


FIG. 8 - HEAD WAVES.

Na fig. 8 os pontos P e Q são fontes de radiação para novas fontes de onda. Após um intervalo Δt , a onda com o centro em P tem um raio dado por $PR = V_1 \Delta t$, enquanto que a onda movendo-se ao longo da interface, chega em Q após percorrer a distância $PQ = V_2 \Delta t$. Assim, a passagem da onda refratada no meio 2 gera uma onda plana, dada na figura pela reta RQ, viajando para cima no meio 1, com um ângulo θ com a horizontal, sendo

$$\theta = i_c = \text{Sen}^{-1} \frac{V_1 \Delta t}{V_2 \Delta t} = \text{Sen}^{-1} \frac{V_1}{V_2}, \text{ de modo que os}$$

dois caminhos de raios inclinados S_1 e S_2 estão simetricamente dispostos com respeito à normal ao plano horizontal.

Head Waves são também chamadas ondas cônicas por que em um meio com velocidade constante elas têm a forma de um cone cujo eixo é perpendicular à interface, isto é, a superfície cônica é gerada por SO na fig. 8, quando SO é gerada em torno de OL.

2.6.5 Difração

Quando ondas sísmicas atingem qualquer irregularidade ao longo da superfície, tais como uma borda ou um ponto onde haja mudança brusca da curvatura, a irregularidade age como uma

fonte pontual irradiando em todas as direções, de acordo com o princípio de Huygens. Esse fenômeno é chamado de Difração.

Efeitos de difração podem ser reconhecidos, de uma maneira geral em uma seção sísmica, pela diminuição rápida da amplitude da onda e pelo aumento do Move - out normal (Dobrin 1976)

2.7 Gráficos Tempo-Distância

Para o caso de uma interface horizontal, ou seja, um meio de duas camadas com este tipo de interface, as fórmulas para os gráficos representativos do tempo de chegada versus distância, são facilmente expressos em termos da posição do Geofone, profundidades e velocidades dos meios.

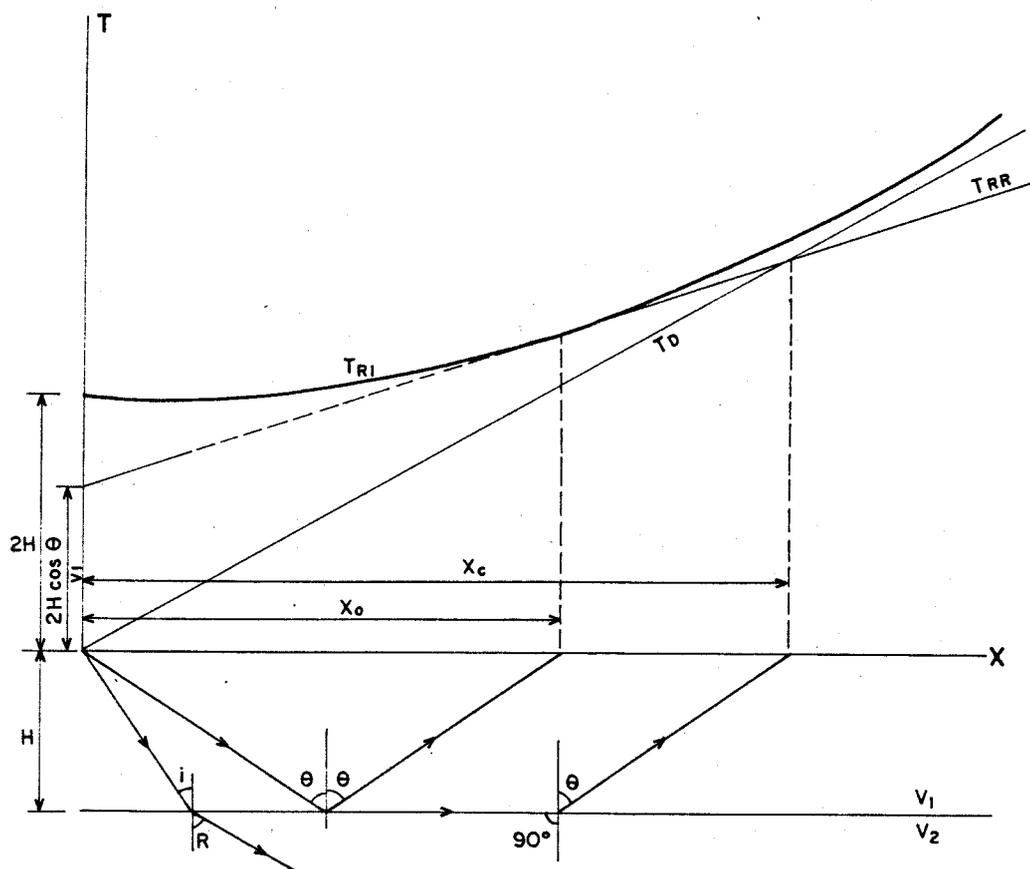


FIG. 9 - CURVAS TEMPO-DISTÂNCIA PARA AS ONDAS DIRETAS, REFLETIDA E REFRACTADA (HEAD WAVE)

Na figura 9, o ponto O representa a posição da fonte e a semi-reta X a superfície da camada superior, onde se posiciona o geofone. O eixo OT representa os tempos de propagação e H a profundidade da interface.

Para uma distância X uma onda direta chegará a um tempo:

$$T_0(x) = \frac{X}{V_1} \quad (36)$$

Esta expressão se apresenta no gráfico como uma reta com o coeficiente angular dado por: $\frac{1}{V_1}$.

Uma onda refletida, desde que V_1 se mantenha inalterada no meio (1), chegará ao fim de:

$$T_{RL}(X) = \frac{\sqrt{X^2 + 4H^2}}{V_1}$$

Esta expressão representa uma curva do 2º grau e, para qualquer valor de X, $T_{RL} > T_D$. Quando $X \rightarrow \infty$, T_{RL} tende a T_D , ou seja, T_{RL} é assintótica a T_D . Quando X é igual a zero,

$$T_{RL} = \frac{2H}{V_1}$$

Considerando-se agora a onda refratada do meio (1) para o (2). Isto pode ocorrer sob duas condições:

- a) $V_1 > V_2$, neste caso $i > R$, e a onda não retornará à superfície.
- b) $V_2 > V_1$, neste caso, $i < R$, e existirá um ângulo de incidência $i = \theta$ para o qual a refração dará-se a 90° no meio (2), ver (2.6.4) Head Waves. Este caso, incidência crítica, é o de interesse para efeito deste trabalho. Assim, $\text{Sen } \theta = \frac{V_1}{V_2}$, e o tempo dessa trajetória é dado para um geofone (receptor) a uma distância X, por:

3. TEORIA E PRÁTICA DO MODELAMENTO SÍSMICO

O modelamento sísmico analógico é baseado na teoria das ondas sísmicas e técnicas da sísmica aplicada, estendendo-se ambos, para modelos em escala reduzida, nesse caso bidimensionais. Dessa forma, estuda-se o comprimento das ondas sísmicas nos modelos.

Como já descrito na introdução do trabalho, as ondas sísmicas são produzidas artificialmente através de uma fonte piezoelétrica, transmitidas aos modelos e medidas através de um receptor piezoelétrico. O que se faz é tomar medidas das amplitudes e tempo de percurso das ondas em vários pontos dos modelos e, através do agrupamento desses dados em gráficos e sismógramas, analisar a resposta dos modelos. Os detalhes acerca da metodologia do trabalho são descritas neste, e nos capítulos seguintes.

O modelamento analógico apresenta as vantagens de se ter o conhecimento prévio das estruturas existentes nos modelos, bem como, o controle sobre a construção das mesmas. Isso significa, que se pode variar os modelos tanto na sua forma, quanto na sua natureza, de acordo com o que se pretende simular.

Neste capítulo procuramos descrever: Um resumo sobre a analogia entre a sísmica de campo e o modelamento sísmico, em termos de fatores de escala; a comparação entre o modelamento 1-, 2- e 3- dimensional; a teoria para o comportamento das ondas nos modelos; conceitos para modelamento e a descrição dos experimentos e modelos utilizados.

3.1 Fatores de Escala

A diferença em termos de escala, entre os trabalhos de campo e os experimentos realizados em laboratório é bastante grande. Uma redução da ordem de 10^3 das dimensões estruturais do campo para o modelo, requer um aumento na faixa de frequência de 5 a 100 hz, para 5 a 100khz. Isso mostra uma relação li-

near, entre as condições reais e as do modelamento, isso é:
 $f = k f'$, sendo f a frequência no campo e f' a correspondente frequência no modelo.

Toda a dimensão original no campo é diretamente proporcional a uma dimensão no modelo. Assim, para a distância x e o tempo t tem-se: $X = L.X'$ e $t = T.t'$, onde X e t são parâmetros no campo X' e t' são parâmetros no modelo. L e T são fatores de escala para a distância e o tempo, respectivamente. Para a massa m , um fator de escala pode também ser estabelecido, $m = M.m'$.

A seguir é dada a tabela 1 com as principais quantidades usadas na sismica e suas respectivas dimensões.

Tab. 1 - Quantidades e Dimensões na Sismica (Behrens e Dresen , 1982)

QUANTIDADE	SÍMBOLO	DIMENSÕES
Distância	X, Y, Z	L
Tempo	t	T
Massa	m	M
Velocidade	V	$L T^{-1}$
Tensão	τ_{ij}	$M L^{-1} T^{-2}$
Módulo Elástico	μ	$M L^{-1} T^{-2}$
Razão de Poisson	δ	-
Densidade	ρ	$M L^{-3}$
Comprimento	λ	L
Frequência	f	T^{-1}
Fator de Qualidade	Q	-

A tabela 2 abaixo, mostra os valores convencionais , para os fatores de escala das principais quantidades na sismica.

Tab. 2 - Valores Convencionais para os Principais Fatores de Escala [McDonald e Gardner , 1980]

QUANTIDADE	CAMPO	FATOR DE ESCALA	MODELO
Distância	300 m	12000	2.5cm
Tempo	0,5 ms	5000	0.1us
Velocidade	3600m/s	4.4	1500m/s
Frequência	50 hz	1/5000	250khz
Comprimento de onda	80 m	66.7	1.2cm

No modelamento, a redução em relação ao campo, da escala de tempo para a ocorrência e o registro dos eventos, provocada pela diminuição do comprimento de onda, requer o uso de técnicas e equipamentos eletrônicos diferentes dos empregados no campo. Assim, o trabalho efetuado a curtos intervalos entre as sucessivas chegadas dos eventos, e a pequena dimensão do comprimento da onda gerada, requerem a utilização de fontes e detectores de alto fator de damping ou baixo " Q " (McDonald e Gardner, 1981). Isso torna necessário o uso de transdutores piezoelétricos, os quais trabalham nessas condições.

De acordo com os critérios para o modelamento bidimensional e com os testes realizados, as faixas de trabalho para as dimensões utilizadas aqui são:

- 1) Frequência da Fonte: 10 a 100khz
- 2) Comprimento de onda: 1 a 20 cm
- 3) Tempo de Registro dos Eventos: 0,2 a 2ms
- 4) Modelos: Comprimento e largura: 0,5 a 2m
Espessura: 2 a 4 mm

* Materiais Utilizados: Chapas de acrílico, PVC, Alumínio e vidro.

3.2 Comparação entre o Modelamento 1, 2 e 3 Dimensional

O modelamento sísmico pode ser realizado no espaço em uma, duas ou três dimensões, a seguir:

- Um modelo de uma dimensão pode ser feita como uma vara plástica utilizada por Berryman e all, 1958, ou o tubo de som descrito por Woods, 1958. Estes modelos são voltados somente, para a incidência normal das ondas, assumindo que cada camada seja plana e horizontal. Ele é utilizado em geral, na medição das velocidades ds ondas nos materiais.
- O modelo bidimensional é construído a partir de chapas ou placas de materiais elásticos cortados nas diversas formas, de acordo com o que se deseja modelar. Placas de diferentes materiais podem ser unidas, para simular uma seção geológica estratificadas. Problemas de reflexão, refração e ondas de superfície; entre outros, podem ser estudados utilizando-se modelos 2-D. Em áreas onde a estratigrafia geológica não muda apreciavelmente na direção horizontal, os modelos 2-D podem ser aplicados para simular essa situação, sem perda séria da generalidade.
- Para modelos 3-D, somente um número limitado de materiais podem ser usados para sua construção, eles são mais difíceis de serem construídos, e são relativamente mais caros, Os modelos 3-D apresentam melhores resultados, nos problemas ligados aos processos básicos de reflexão, refração e difração, que aqueles ligados aos efeitos geométricos, ou onde a mudança da estratigrafia perpendicular ao arranjo não pode ser desprezada.
- O modelamento 2-D apresenta nítida vantagem em relação ao 1-D, tanto no tocante a quantidade de informações obtidas quanto a uma melhor representação geométrica do problema. Quanto à comparação com o modelamento 3-D, o modelamento 2-D pode substituí-lo na maioria dos casos possíveis. Entre as vantagens do modelamento 2-D sobre o 3-D realçamos: (1) os modelos 3-D são geralmente construídos de materiais que possam ser moldados tais

como cera, concreto, breu, borracha e cimentos químicos. Estes modelos apresentam-se no formato geral de blocos, os quais são difíceis de se construir de maneira a manter a homogeneidade através deles, principalmente quando se trata de simular meios estratégicos. Os modelos 2 - D, por sua vez, podem ser construídos da maioria dos materiais metálicos ou plásticos, existentes em placas ou chapas finas. Eles dispõem de menor quantidade de material, e apresentam maior homogeneidade. Além do que, são mais simples de construir e manusear. (2) A energia requerida para os trabalhos nos modelos 2-D é menor que a necessária para os modelos 3-D. No caso 2-D, a intensidade de energia para as ondas de volume atenua-se com $\frac{1}{X}$, enquanto que no caso 3-D ela atenua-se com $\frac{1}{X^2}$, onde X é a distância da fonte ao ponto de referência. Isso faz com que, pulsos com menos de 1000V de amplitude sejam necessários, para estimular a fonte nos modelos 2-D, enquanto para os modelos 3-D são necessários, em geral, de 5000 a 10000 V para isso (Oliver et al, 1958). (3) Para efeitos de comparação com as rochas, os materiais para 3-D, comercialmente disponíveis, não representam adequadamente aquelas, já que a razão de Poisson para os materiais é grande, geralmente cerca de 0.33, enquanto que para as rochas é cerca de 0.25. Nos modelos 2-D, a velocidade da onda P é alterada, de modo que, o que existe é uma pseudo-razão de Poisson na mesma faixa da razão de Poisson para as rochas (Oliver et al, 1954).

A tabela 3 mostra os materiais mais utilizados nos modelos, juntamente com seus parâmetros característicos principais.

Tab. 3 - Materiais mais utilizados no Modelamento e suas Características Elásticas (Behrens e Dresen, 1982).

MATERIAL	DENSIDADE (10^3 kg/m^3)	VELOCIDADE (m/s)					RAZÃO	
		ONDA			ONDA		ONDA	DE
		3-D	2-D	1-D	S	RAYLEIGT		
ALUMÍNIO	2.7	6400	5450	5150	3150	2450	0.34	
ARRAIDITE	1.2	2650	2200	2050	1250	1170	0.36	
COBRE	8.9	4700	3950	3700	2260	2150	0.35	
DURAL	2.8	6500	5400	5100	3150	2940	0.35	
CHUMBO	11.3	2300	1500	1650	900	850	0.41	
PERSPEX	1.2	2700	2300	2200	1350	1260	0.33	
POLISTIRENO	1.05	2350	2000	1850	1150	1070	0.35	
PVC	1.35	2300	1800	1700	1050	990	0.37	
PLEXIGLASS	1.18	2730	-	-	-	-	-	
AÇO	7.8	5900	5450	5250	3260	3000	0.28	
TUGSTÊNIO	19.3	5200	4750	4550	2850	2650	0.29	

3.3 Tensão e Deformação nas Placas ou Modelos 2D

O resumo a seguir é uma aproximação da teoria de propagação das ondas elásticas planas para chapas finas, ou seja, meios 2-D.

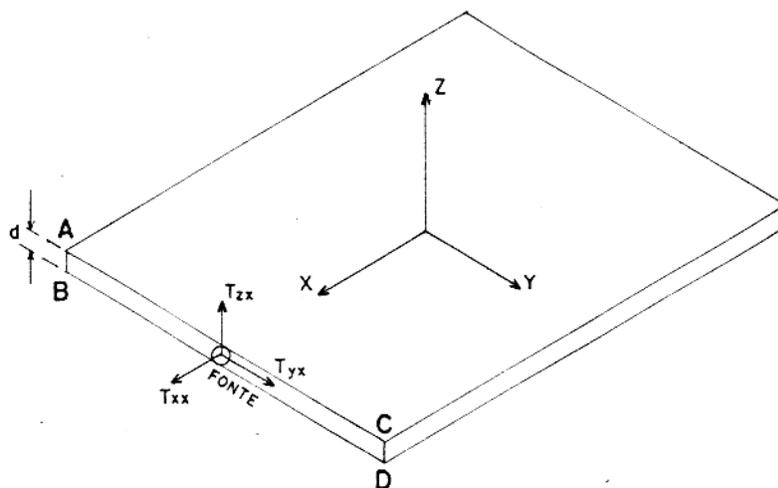


FIG. II - CHAPA MODELO SUBMETIDA A TENSÃO T_{xx} , T_{yy} E T_{zx} .

A propagação das ondas se processa ao longo do plano XY da placa, de acordo com a posição onde é colocada a fonte de excitação. Na figura 11, a fonte é colocada na face ACDB, assim, a onda se propaga ao longo da direção X.

Um estado de tensão no plano da placa, causaria não somente deformações neste plano, mas também deformações laterais, contudo, no nosso caso, devido a espessura da placa (d) ser muito pequena em relação as demais dimensões, desprezamos essas deformações laterais. Nesse caso só consideramos, ondas nas quais os movimentos das partículas são simétricos em relação ao plano médio das placas, sendo assim, são excluídos quaisquer tipos de movimentos de onda que envolvem inclinações de placa fina.

Os deslocamentos U e V , e as tensões τ_{xx} e τ_{yx} estudados aqui, são tomados como valores médios. De acordo com a lei de Hooke para a tensão plana, equação 18, consideramos:

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{zz} = 0$$

Como pode ser observado na Fig. 11 τ_{yy} também não existe, logo

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = \tau_{zz} = \tau_{yy} = 0$$

$$\begin{matrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & 0 \\ \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & 0 \end{matrix}$$

Assim:

$$\begin{matrix} \tau_{ij} = \tau_{xy} & 0 & 0 \\ \epsilon_{ij} = \epsilon_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Do capítulo II tem-se:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial U}{\partial x} & \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= \mu \frac{\partial V}{\partial x} & \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \end{aligned}$$

Substituindo τ_{xx} e τ_{xy} nas equações (7) obtemos:

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\rho}{(\lambda + 2\mu)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ e $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ são as relações para as velocidades

longitudinal e transversal respectivamente, as quais são as mesmas velocidades das ondas P e S para um sólido infinito.

O vetor deslocamento médio no plano XY isto é \bar{U} na direção x, e \bar{V} na direção Y, é dado segundo Love (Oliver et al - 1954), por:

$$\bar{U} = \frac{1}{d} \int_0^d U dx \quad \text{e} \quad \bar{V} = \frac{1}{d} \int_0^d V dz, \quad [40]$$

onde d é a espessura da placa.

Uma onda P harmônica plana se propagando na direção x , pode ser representada por:

$$U \neq U_0 \text{ Sen } \frac{2\pi}{\lambda} (x - V_p t) \quad (41)$$

Para uma onda S harmônica plana, o deslocamento pode ser representado por:

$$V = V_0 \text{ Sen } \frac{2\pi}{\lambda} (y - V_s t) \quad (42)$$

As ondas de Superfície não são analisadas aqui. As ondas Love e Rayleigh ocorrem com energia considerável, somente nas proximidades da superfície e, ainda assim, a onda Love não pode ser detectada pelo sensor piezoelétrico utilizado, o qual não é sensível ao movimento das partículas nesta onda. A onda Rayleigh por sua vez, não pode ser facilmente distinguida da onda S, pois suas velocidades são muito próximas, isto é

$$V_R \neq 0.93 V_S$$

3.4 Definições para o Modelamento

Com

Como visto nos itens 3.3 e 3.4, o modelamento em 2-D envolve a utilização de placas, ou chapas finas, de materiais elásticos. Para simular - se estruturas geológicas é necessário implementar-se nessas placas algumas modificações, dependendo do que se pretende estudar. Por exemplo: a união de 2 placas, de diferentes materiais, produzirá as reflexões das ondas sísmicas na interface entre os 2 meios. Dependendo da geometria da interface e, dos parâmetros elásticos de cada meio, os sinais refletidos detectados poderão apresentar diferentes características. Assim, situações reais, tais como : falhas, dobras, bacias,

e outras descontinuidades, podem ser representadas no plano e estudadas através do modelamento 2-D. Para isso, basta que se produza nas placas os arranjos correspondentes.

Portanto, para efeito de analogia com o campo dos modelos bidimensionais podem representar estruturalmente, de maneira bem simples uma seção geológica plana e vertical (Figura 12).

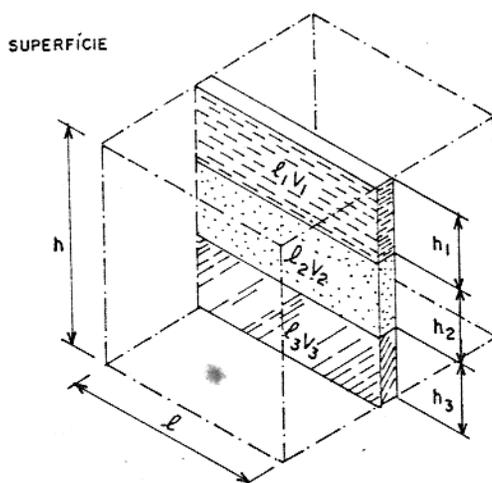


FIG. 12 - MODELO DE UMA SEÇÃO GEOLÓGICA DE TRÊS CAMADAS PLANAS; h_i, ρ_i, v_i SÃO RESPECTIVAMENTE PROFUNDIDADE, DENSIDADE E VELOCIDADE DA CAMADA i .

A figura 13, mostra um modelo de uma camada, de comprimento l e profundidade h e espessura d . Na placa estão representados a fonte e o receptor. A fonte é fixada em uma determinada face da placa, considerada como superfície do modelo. O receptor, por sua vez, é deslocado ao longo dos pontos de medidas, cujas distâncias são tomadas em relação à fonte. Os pontos representados de 1 a n são tomados na direção da profundidade x , enquanto que os pontos de 1 a m são tomados na linha de superfície do modelo. Consideremos como linha de superfície, uma linha imaginária localizada nas mediações da chamada superfície do modelo, ou seja, o lado onde está fixada a fonte.

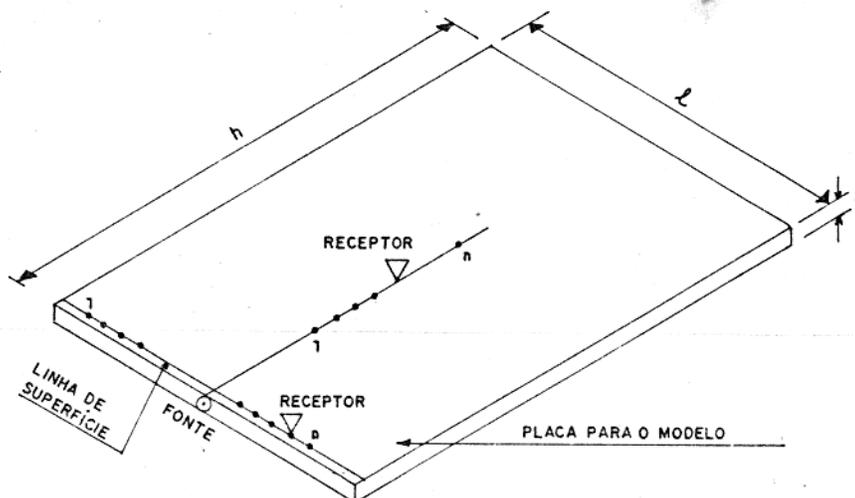


FIG. 13 - MODELO DE UMA CAMADA.

O receptor pode ser posicionado em qualquer ponto do plano da placa. As características do receptor e como utilizá-lo são descritos no Capítulo 4. A fonte, por sua vez, é fixada no modelo, através de uma cola rígida, não plástica a fim de garantir um bom contato mecânico entre eles.

Para que as placas sirvam como modelos é necessário, adotar certos critérios, os quais são:

1. A placa deve apresentar-se o mais homogênea possível, evitando - se aquelas que apresentam irregularidades como: rachaduras, trincamentos e alterações em sua espessura. Isto é devido ao fato, de que os comprimentos de onda nos modelos são da ordem de 1 a 20cm, e a existência de irregularidades dessa dimensão, representariam obstáculo à propagação das ondas, produzindo efeitos de reflexão e espalhamento indesejáveis.

2. As dimensões dos modelos devem ser de tal maneira, que o comprimento e a profundidade das placas, respectivamente l e h na fig. 13, sejam maiores que o comprimento das ondas. Um compromisso razoável é que h e l sejam maiores que cinco vezes o comprimento da onda ($h, l > 5 \lambda$).

3 - As espessuras d dos modelos devem ser muito menores que o menor comprimento da onda existente. Um valor razoável é $\lambda > 10d$.

O sinal medido em um ponto do modelo, aparece registrado na forma de sismogramas, isto é, sinais de amplitude versus tempo de chegada. O agrupamento de sismogramas de vários pontos, compõe uma seção sísmica para um modelo. A seção sísmica é utilizada na análise e na interpretação das ondas no modelo. A configuração da seção varia com: As características elásticas dos materiais, o formato das interfaces e as posições da fonte e do receptor.

3.5 Descrição dos Experimentos em Modelos 2 - D

Como foi dito na introdução deste trabalho implementamos alguns modelos, com o objetivo de se testar a utilização do sistema de medidas para o modelamento.

Neste ítem, são descritos os tipos de modelos e os experimentos realizados nos testes. Estes, foram divididos em duas partes: Medidas de Parâmetros elásticos dos materiais e medidas em modelos clássicos.

Os resultados obtidos são apresentados no cap.5, através de gráficos, seções, sismogramas e tabelas; juntamente com a análise destes resultados.

3.5.1 Medidas de Parâmetros Elásticos dos Materiais.

As medidas foram realizadas individualmente, para placas de PVC, acrílico, alumínio e vidro. Estes materiais, com exceção do vidro, são comumente usados para confecção de modelos 2-D. Os parâmetros determinados foram: Velocidades das ondas P e S, características de irradiação dessas ondas e coeficientes de atenuação para elas. As medidas destes parâmetros são importantes, pois representam características elásticas próprias de cada material, as quais são necessárias para a execução da segunda parte dos testes.

3.5.1.1 Características de Irradiação das Ondas P e S

Neste experimento, procuramos determinar as características de irradiação das ondas P e S, em placas de diferentes materiais, como resposta à excitação de uma fonte piezoelétrica. Isso foi obtido através de diagramas de irradiação. Estes diagramas mostram graficamente, a intensidade relativa da energia da onda, ao longo de uma circunferência de raio R, centrado na fonte.

A forma geral dos diagramas para as ondas P e S, irradiando-se a partir de uma fonte pontual, em um meio isotrópico é mostrada na figura 14. A onda S irradia-se com a maior energia que a onda P. As formas geométricas dos diagramas para as ondas P e S são dadas pelas equações:

$$U_P = \frac{\cos \theta}{4\pi\rho V_P^2 r} k \left(t - \frac{r}{V_P} \right) \quad (43)$$

$$U_S = \frac{\sin \theta}{4\pi\rho V_S^2 r} k \left(t - \frac{r}{V_S} \right)$$

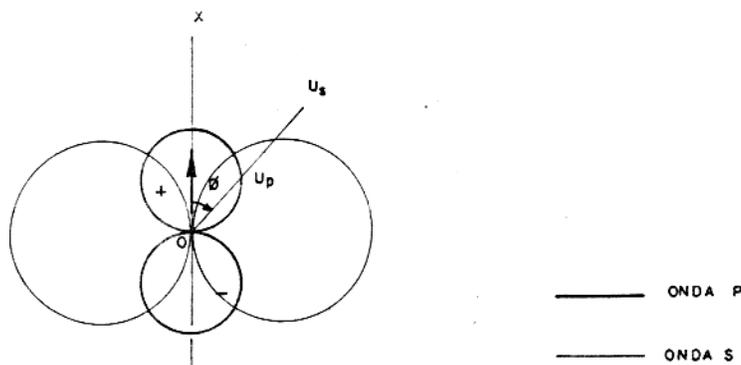


FIG. 14 - DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO PARA AS ONDAS P E S, NO PLANO.

Para o nosso caso, ou seja, modelos representados sob a forma de placas, o espaço para a irradiação das ondas P e S é equivalente ao de um semi-plano. Para essa situação, os diagramas de irradiação das ondas P e S são apresentados na Fig. 15. Estes diagramas são semelhantes a àqueles obtidos para a irradiação de uma antena dipolo. A forma do diagrama para a onda P é circular, enquanto que para a onda S apresenta, em um meio ideal dois lóbulos simétricos à direção (X) do pulso. As direções de maior irradiação (diretividade) são aproximadamente 90° e 55° , respectivamente para as ondas P e S, em relação à superfície.

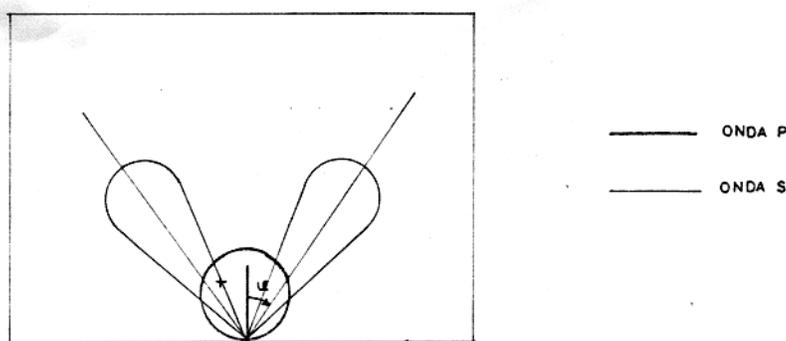


FIG. 15 - DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO PARA AS ONDAS P E S EM UMA PLACA.

Para a determinação dos diagramas, tomamos as placas e traçamos um semi-círculo, a partir da fonte, de raio igual a 15cm, e nele marcamos 46 pontos referentes a ângulos de 0° a 180° com a superfície do modelo, em intervalos de 4° entre os pontos, Fig. 16. O receptor é colocado sucessivamente nos pontos e regis-

tra os sinais sísmicos correspondentes a eles. Em cada um desses sinais é medido o valor de pico da onda. Esses valores são plotados, e compõem o diagrama para a onda. Para cada placa foram traçados diagramas em cinco diferentes frequências: 20, 40, 60 e 100 KHZ, para as ondas P e S.

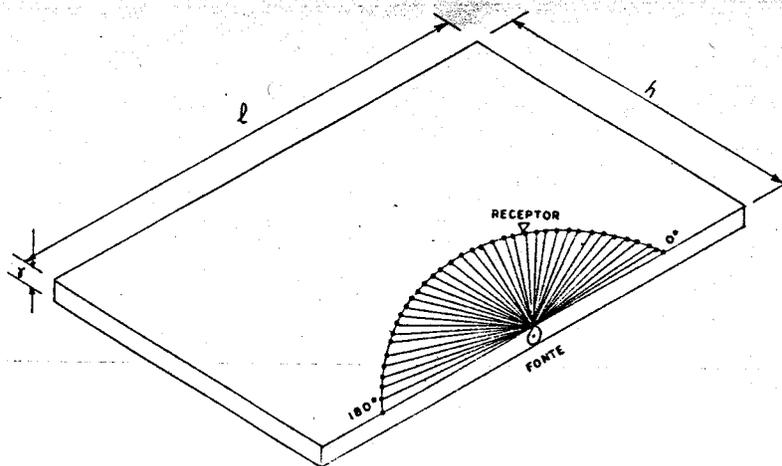


FIG. 16 - CONFIGURAÇÃO DA PLACA PARA AS MEDIDAS DOS DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO DAS ONDAS P E S.

3.5.1.2 Velocidades das Ondas P e S

Como foi visto no item 3.4, as velocidades teóricas para as ondas P e S, em uma placa sujeita a tensão produzida por fonte, nas condições da Fig. 11, são dadas respectivamente por

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{e} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

são utilizadas para um meio ideal, isto é, homogêneo e isotrópico, e desde que se conheça os valores para as constantes

do meio. Na prática, no entanto, quando não se tem um meio ideal, essas velocidades são determinadas graficamente, a partir de registros tempo-distância das ondas. No nosso caso as velocidades das ondas P e S, foram determinadas graficamente, através da razão

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

obtidas das seções sísmicas correspondentes.

As medidas para cada chapa, foram feitas em linhas, traçadas nas direções de máxima irradiação para ondas P e S, respectivamente 90° e 55° em relação à linha de superfície do modelo, de acordo com os resultados obtidos dos diagramas no cap. 5. Nas linhas P (90°) e S (55°) são marcados 20 pontos para as medidas dos sinais, a intervalos de 1cm. As distâncias do primeiro e último ponto à fonte (distância fonte-receptor) são respectivamente 15 e 34cm . A configuração para estas medidas é mostrada na Fig. 17

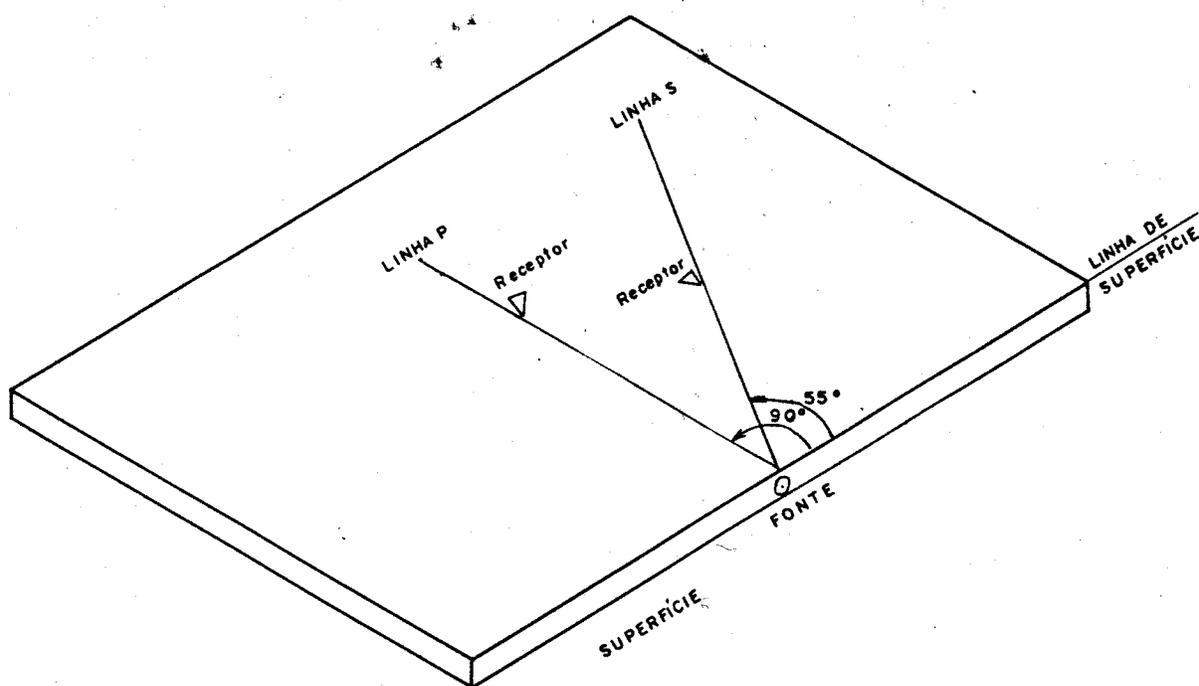


FIG. 17 - CONFIGURAÇÃO DA PLACA PARA MEDIDAS DAS VELOCIDADES E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO P/ ONDAS P E S.

Os sinais correspondentes a cada um dos pontos medidos (distância fonte-receptor), foram sucessivamente plotados, até comporem um seção com 20 sismogramas. Na seção sísmica foram marcados então, os pontos equivalentes aos picos máximos da onda (pontos de mesma face). Em seguida é traçada uma reta interceptando estes pontos, Fig. 43. Da reta obtida, tem-se a velocidade da onda, dada por: $V = \text{tang } \alpha = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, onde Δx é a diferença

entre as distâncias do primeiro ao último ponto de medida, neste caso 10cm; e Δt é a diferença entre os tempos de percurso da onda no primeiro e último ponto.

3.5.1.3 Características da Atenuação das Ondas P e S

Como foi dito em 2.6.2 as ondas sísmicas ao se propagarem em um meio, sofrem a atenuação de sua energia inicial. A atenuação ocorre por espalhamento geométrico e por dissipação da energia em calor (absorção). Como nosso interesse aqui é conhecer as características elásticas dos materiais em questão, não levamos em conta o espalhamento geométrico, ou seja, consideramos as ondas como sendo planas. Dessa forma, tomamos a atenuação como ocorrendo somente por absorção. Logo, $A = A_0 \exp(-\alpha(f).x)$ pela equação 28, onde A é a energia inicial, ou seja, em $x = 0$, e $\alpha(f)$ é o coeficiente de atenuação que queremos determinar para cada material. Da eq. (28), temos que $\alpha(f) = \frac{\pi \cdot f \cdot x}{V \cdot Q}$ sendo f a frequência de propagação da onda, V a sua velocidade e Q o fator de atenuação, também chamado fator de qualidade. O fator de qualidade Q é uma constante característica de cada material, e é uma medida adimensional de sua elasticidade. Q é dado por $Q = \frac{A_n}{\pi/Lm}$, equação (29).

A determinação dos coeficientes de atenuação dos materiais, foi feita através das medidas dos fatores Q , em suas placas correspondentes. Consideramos para isso, uma frequência constante e igual à frequência de ressonância do cristal, ou seja, 41khz. Assim sendo, medimos dois valores de Q para cada material, um para a onda P e outro para a onda S, obtivemos dessa forma, α_P e α_S levando em conta as suas respectivas velocidades V_P e V_S .

A configuração para as medidas de Q nas placas, é a mesma usada para medir-se as velocidades, Fig. 17. Com exceção do afastamento entre os pontos de medida. Como o decaimento das amplitudes das ondas P e S é pequeno para pontos próximos à fonte, tomamos o afastamento entre os pontos igual a 4cm.

Os valores de Q considerados, tanto para a onda P , quanto para a S , são calculados da média dos 20 valores medidos em cada linha. Após calcularmos \bar{Q} e σ para cada uma onda, traçamos as curvas, para o decaimento da amplitude (atenuação), e compararmos com as curvas reais para a atenuação.

3.5.2 Medidas em Modelos Clássicos

Para essas medidas, foram implementadas alguns modelos comumente usados no modelamento 2-D, ou seja, Modelo de uma camada com interface plana, Modelo de uma camada com interface curvada (sinclinal), Modelo de duas camadas com interface plana e Modelo de duas camadas com interface descontínua (falha). Essas experiências foram executadas, com o objetivo de se analisar qualitativamente, as seções sísmicas obtidas dos modelos. Basicamente essa análise foi feita, através da comparação entre as trajetórias das ondas sísmicas registradas nas seções e as trajetórias calculadas para essas ondas.

3.5.2.1 Modelo de uma Camada com Interface Plana

Este modelo, representado aqui por uma placa de acrílico de 3mm de espessura, é a forma mais simples de simular uma seção vertical de um meio homogêneo e isotrópico, de profundidade h .

A Fig. 18, mostra na placa modelo a posição da fonte, ou raios representativos das trajetórias das ondas diretas e refletidas, e o posicionamento do receptor na linha de superfície para os pontos de medidas.

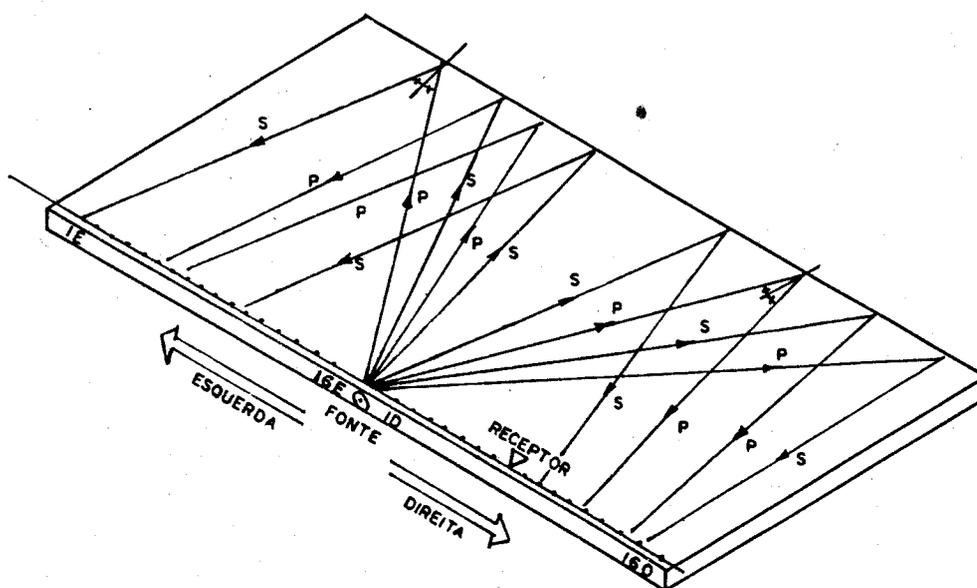


FIG. 18 - MODELO DE UMA CAMADA COM INTERFACE PLANA

A fonte é colocada em contato com a placa na posição central de sua superfície, de modo que as ondas P e S geradas pela fonte, alcançam a interface e retornam à superfície como as ondas refletidas. Por sua vez, ondas P e S partindo da fonte, à esquerda e à direita desta, e propagando-se paralelamente à superfície, são registradas antes de qualquer reflexão ou seja, como ondas diretas.

São quatro os tipos de ondas refletidas, possíveis, neste modelo: PP, SS, PS e SP. PP são ondas que incidem e refletem-se como P. SS são ondas que incidem e refletem-se como S. PS são ondas que incidem como P e refletem como S; enquanto SP é o tipo inverso da onda PS.

Os sinais sísmicos são registrados pelo receptor, em 32 pontos na linha de superfície do modelo, com espaçamento de 2cm entre os pontos. Os sinais medidos pelo receptor, são registrados na forma de sismogramas. Assim, tem-se 32 sismogramas, correspondentes aos pontos medidos, compondo uma seção sísmica. A seção sísmica mostra as ondas diretas e refletidas, as quais, formam trajetórias características para o modelo e a posição da fonte, ver Figs. 57, 58 e 59. Cap. 5.

3.5.2.2 Modelo de Interface Curvada (Sinclinal)

Este modelo é bastante utilizado, principalmente no modelo digital, como é o caso dos trabalhos de Korn, 1982; Ristow, 1982; Temme, 1984, por representar uma estrutura geológica, bastante comum que é o Sinclinal. O sinclinal tem um efeito nas ondas sísmicas, similar a um espelho côncavo, refletindo a energia para a superfície.

O modelo foi construído a partir de uma placa de acrílico, de 2mm de espessura, tendo como principal característica, a apresentação de uma interface com curvatura profunda. Isto causa o espalhamento das ondas refletidas, de modo que elas retornam a superfície bastante deslocadas, ver figura 63, cap. 5. Esse espalhamento é registrado nas seções sísmicas pelo aparecimento de cústicas. A configuração para este modelo é mostrado na Fig. 19.a, a seguir:

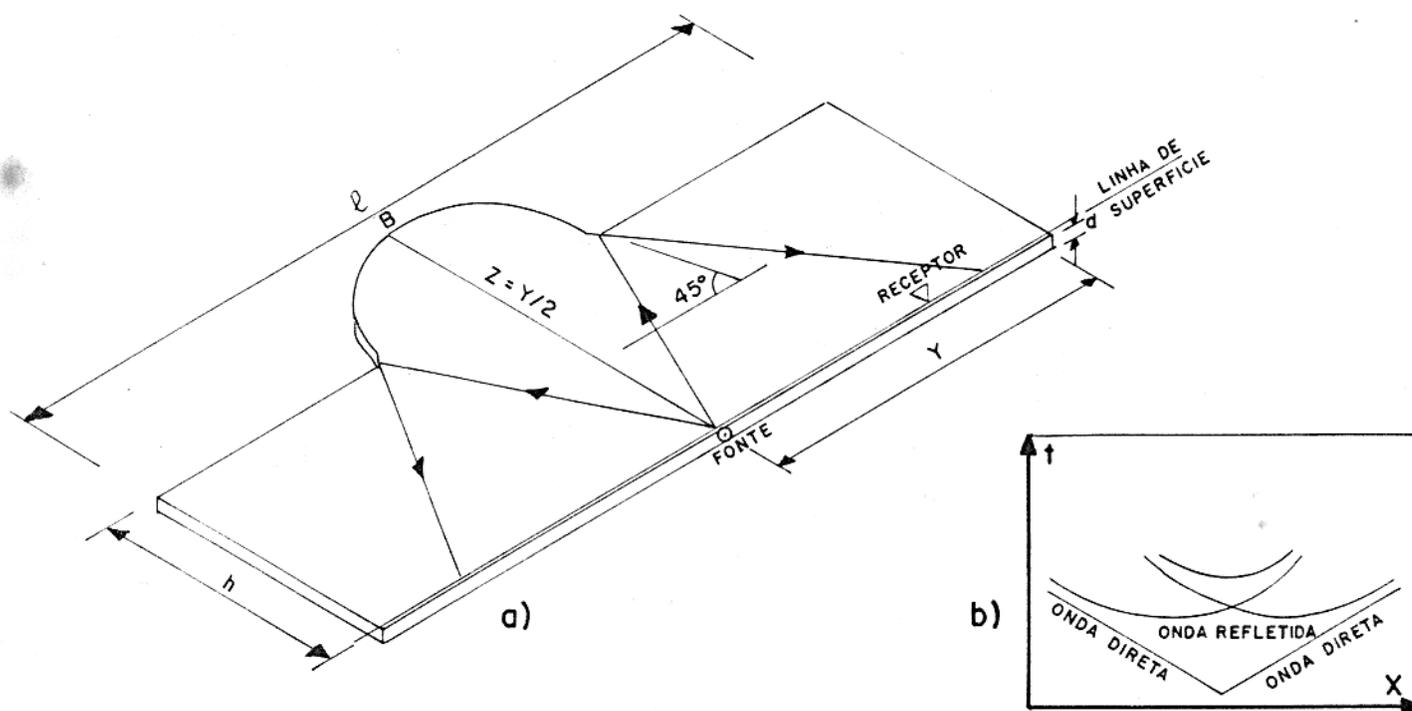


FIG. 19 - a) MODELO DE UMA CAMADA PARA UM SINCLINAL COM A FONTE NO CENTRO DA SUPERFÍCIE.

b) CONTORNOS PARA AS ONDAS REFLETIDAS (Cústicas) DA FIG. 19a.

As formas características das cáusticas que aparecem nas se oes para este modelo, dependem da posi o da fonte, em rela o ao ponto B de maior profundidade do modelo. Assim, para diversas posi oes da fonte na superfície, obt m-se, diferentes registros nas se oes sísmicas.

As figuras 19 e 20 mostram diferentes posi oes para a fonte em rela o ao ponto B, e como aparecem em suas correspondentes se oes sísmicas, as cáusticas para as ondas refletidas na interface do modelo, (Temme 1984).

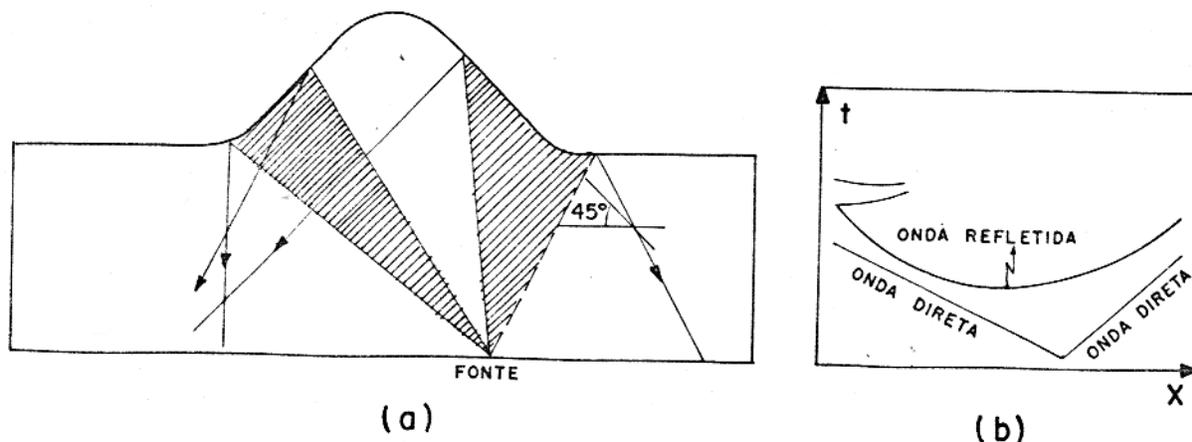


FIG. 20 - a) MODELO PARA UM SINCLINAL COM FONTE NA SUPERFÍCIE E   DIREITA DE SEU CENTRO.
b) CÁUSTICAS PARA AS ONDAS DA FIG. 20a

Os raios na Fig. 19.2 mostram a parte iluminada da interface, isto  , a porão curvada da interface, cujos raios refletidos podem ser registrados, na superfície finita do modelo. O restante da interface, representada pela sua porão plana, apresenta-se na região de sombra para o receptor, ou seja, os seus raios refletidos extrapolam   superfície finita do modelo. Dessa maneira, os raios incidentes e refletidos obedecem a equa o 31 no Cap.2.

Para a configura o utilizada neste trabalho, Fig.19. a, as dimensões do modelo obedecem os seguintes critérios: A distância x , da fonte ao ponto mais profundo da interface   de no máximo $y/2$, onde y   a máxima distância fonte - receptor; a

tangente à curva do modelo, deve ter uma inclinação de aproximadamente 45° com a superfície. As medidas neste modelo foram tomadas em 62 pontos na linha de superfície, sendo 31 pontos à esquerda da fonte e 31 à direita. Com um espaçamento de 2cm entre os pontos.

3.5.2.3 Modelos de Duas Camadas com Interfaces Planas

Os modelos construídos para este fim, foram compostos por duas placas diferentes materiais. O material da primeira camada tem uma velocidade menor que a segunda, $V_1 < V_2$. Para isso, utilizamos dois modelos: PVC - vidro ($d = 4\text{mm}$) e acrílico - alumínio ($d = 2\text{mm}$). O PVC e o acrílico são os materiais de baixa velocidade, o vidro e o alumínio, os de alta velocidade. A configuração para estes modelos é mostrada na fig. 21.

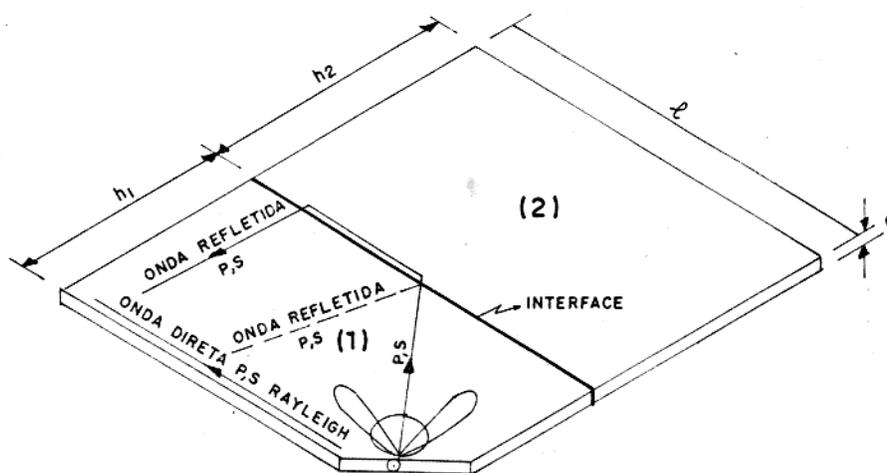


FIG. 21 - CONFIGURAÇÃO PARA UM MODELO DE DUAS CAMADAS COM INTERFACE PLANA.

No modelo foi feito um corte, em um dos vértices da primeira camada, para a colocação da fonte, de modo a formar ângulos de $\pm 45^{\circ}$ com as normais às faces do modelo. A fonte gera ondas P e S, de modo que os raios de máxima irradiação dessas ondas, atingem a interface, originando-se ali ondas refletidas e

refratadas, de acordo com a lei de Snell, equações (30) e (31). Assim, registramos na linha de superfície do modelo: ondas refletidas PP, SS, SP PS; e ondas refratadas P e S (refração crítica, ou seja, Head Waves).

O dimensionamento das placas para estes modelos, obedecem os critérios para h e l mínimos, apresentados em 3.4. As placas são colocadas através de uma fina camada de araldite, conforme mostra a fig.21. As medidas foram executadas num total de 63 pontos, marcados na linha de superfície do modelo, à esquerda da fonte, o afastamento entre os pontos é de 1 cm. As seções sísmicas para estes modelos são compostos então de 63 sismogramas.

3.5.2.4 Modelo de Duas Camadas com uma Descontinuidade (Falhas)

O modelo simulando uma falha, que é também uma estrutura geológica bastante comum, é semelhante ao utilizado por Angona, 1960. Ele foi implementado a partir do modelo de duas camadas, PVC-vidro, utilizado no item anterior, modificando-se a interface entre estes dois meios. Na interface foi feito um ponto de descontinuidade, eliminando-se parte de ambas as camadas. A configuração para este modelo é mostrada na Fig. 22.

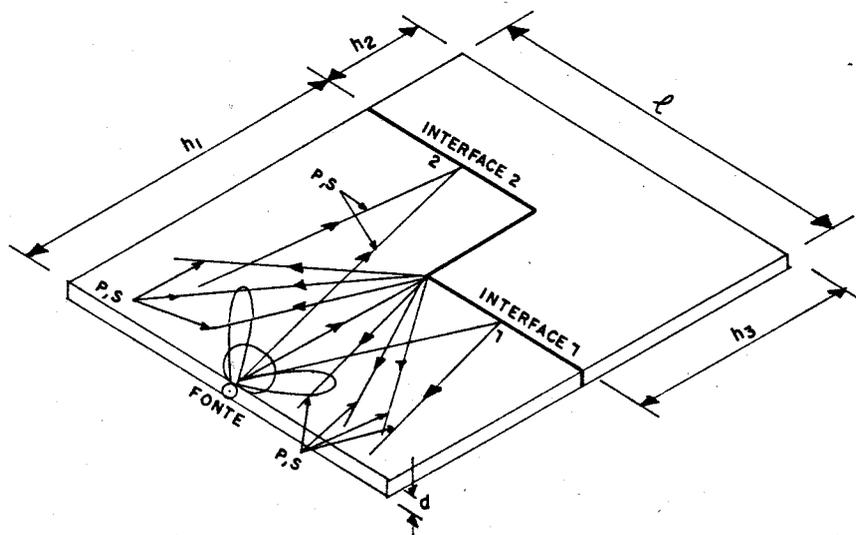


FIG. 22 - MODELO DE DUAS CAMADAS PARA UMA FALHA.

Nosso interesse neste modelo, foi registrar os efeitos produzidos pelo ponto de descontinuidade B, nas ondas P e S, bem como, as diferenças entre os tempos de chegada das ondas refletidas nas interfaces 1 e 2.

Assim, a fonte foi fixada na posição central da superfície, de modo a ficar diretamente oposta ao ponto B. Pelo diagrama de irradiação esboçado na Fig 22, nota-se que o ponto B é estimulado, quase que exclusivamente, por ondas P. Portanto, o efeito da difração em B é mais acentuado nas ondas P. Este efeito é registrado nas seções sísmicas do modelo, pelo aparecimento de cáusticas neste caso, semelhantes a parábolas.

As ondas P e S, atingem também, as interfaces 1 e 2 refletindo-se nelas. Essas ondas retornam à superfície como PP, SS, PS, e SP. As reflexões na interface 1 são registradas na superfície, em pontos à direita da fonte, e as reflexões na interface 2 à esquerda da fonte. Como a interface 1 está mais próxima da superfície que a interface 2, suas reflexões retornam ali antes das reflexões da interface 2.

4. SISTEMA DE MEDIDA PARA O MODELAMENTO

Como descrito anteriormente, no modelamento sísmico analógico faz-se medições das amplitudes e tempos de chegada das ondas sísmicas nos modelos. Para isso, é necessária a utilização de um sistema eletrônico adequado. O sistema completo é mostrado em diagramas de blocos na Fig. 23.

Um pulso elétrico de uma determinada frequência e forma, é amplificado e excita um transdutor (eletro-mecânico). As oscilações deste transdutor são transmitidas ao modelo, pelo contato entre eles (modelo e fonte). As ondas geradas propagam-se em todas as direções ao longo do material, podendo ser detectadas através de um outro transdutor, funcionando em sentido oposto ao da fonte (mecano-elétrico). Como transdutores foram usados cristais piezoelétricos.

O sinal detectado pelo receptor em uma determinada distância da fonte, é filtrado, amplificado e amostrado no osciloscópio digital. Esse sinal pode também ser gravado digitalmente em disketes ou fitas, ou plotado no papel. A transferência dos dados do osciloscópio para o papel, ou para a fita magnética é feita com a utilização de um micro-computador. Além disso, o micro-computador é usado no tratamento digital desses sinais, como: Amplificação, truncamento e filtragem.

Os modelos são colocados sobre uma mesa de madeira, revestida com uma camada de espuma. A espuma tem a finalidade de absorver vibrações externas, provenientes dos aparelhos de ar condicionados e de movimentos do solo.

4.1 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico pode ser dividido em 2 partes :

- 1) Sistema Gerador, composto pelo gerador de ondas, pré-amplificador, amplificador de saída, trigger e a fonte piezoelétrica.
- 2) Sistema Receptor, composto pelo amplificador diferencial, recep -

S I S T E M A P A R A
O M O D E L A M E N T O 2 - D

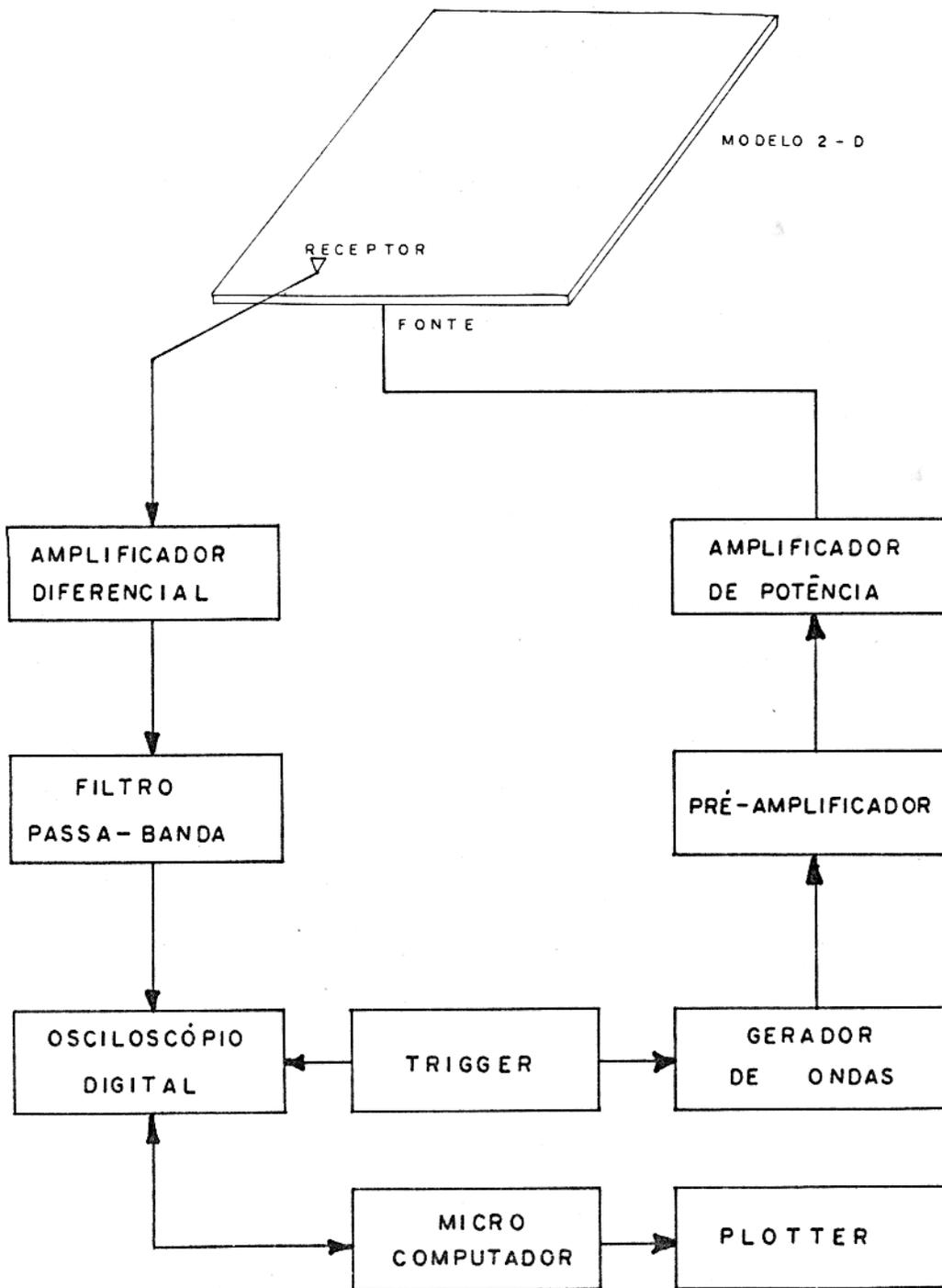


FIG. 23 - DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA PARA
O MODELAMENTO SÍSMICO

tor piezoelétrico, filtro, osciloscópio, trigger e micro-computador .

4.1.1 Sistema Gerador

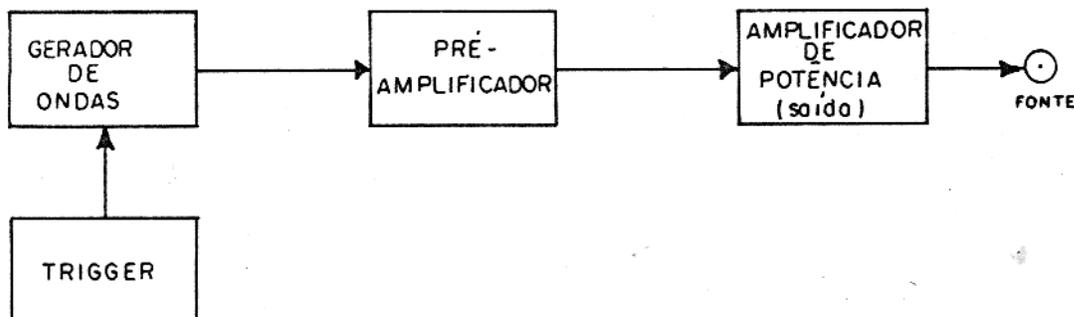


FIG. 24 - DIAGRAMA PARA SISTEMA GERADOR .

4.1.1.1 Instrumentos Usados

Como gerador de ondas, foi usado o FG 501-A da Tektronix, que é um gerador de função de baixa distorção e capacidade de gerar ondas quadradas, senoidais, triangulares, rampas e pulso, sobre uma faixa de frequência de 0.002 hz de 2Mhz. Para o nosso caso, ele foi utilizado para gerar ondas senoidais na faixa de 10 a 100 khz, com amplitudes máximas de 12 volts pico - pico, trigado externamente por um gerador de pulso (trigger).

Como gerador de pulso, foi usado o HB 8011A, um gerador de pulsos de grandes precisões, com ajustes para formas e larguras dos pulsos. Ele foi usado no sistema como um trigger, a fim de monitorar o gerador de ondas e o osciloscópio. As especificações para seu uso, foram: período 1 a 5 ms, largura de pulso 25m a 1 us e a amplitude de 0.25 a 1 V.

Como pré-amplificador usamos o AM 501 da Tektrônix, um amplificador operacional com larga faixa de voltagem de saída centrada em zero, e altas faixas de modo comum e slew rate. Nós, o utilizamos como um amplificador não inversor, com um ganho fixo de aproximadamente 4 vezes, com a finalidade de pré-amplificar o sinal de saída, do gerador de onda. Portanto, com uma voltagem de saída máxima igual a 48V p-p.

Como amplificador de saída, usamos o DIK-10R da Krohn-Hite, um amplificador de potência de banda larga e baixa distorção. Ele fornece uma potência de 20 volt-ampere de pico, para uma impedância resistiva de 1.000 ou uma impedância reativa sobre uma faixa de frequência de dc à 500 khz e, 20w de pico na faixa de 1hz à 1 mhz, para uma carga de 600 OHMS resistiva. Este amplificador foi usado como estágio final de amplificação do sinal para a fonte, sendo o seu ganho de voltagem neste trabalho, variado de 2 a 5 vezes, o que dá uma voltagem de saída máxima de 240V p-p.

4.1.1.2 Descrição do Funcionamento

Um pulso senoidal é selecionado por uma chave no gerador de ondas. Esta forma de onda é escolhida, por ser a que produz a melhor resposta da fonte piezoelétrica. A amplitude do pico de saída, nesse trabalho, esteve sempre na faixa de 10 a 12 v p.p. O gerador FG 501A é tringado externamente, junto com o osciloscópio, pelo gerador HP 8011A. O pulso senoidal gerado é transmitido aos estágios de amplificação, durante o tempo de gatilhamento. A frequência de trabalho, 41 khz, do FG 501A foi escolhida de acordo com as respostas obtidas nos testes, para a fonte e modelos dados no Cap. 5.

A fim de se evitar ruídos, o sinal que sai do gerador é levado através de um coaxial, até o pré-amplificador AM-501. Este fornece um ganho relativo ao divisor de tensão, feito entre os resistores Z_i e Z_f na entrada do AM 501. $A = \frac{Z_i + Z_f}{Z_i}$

$Z_i = 10 \text{ K OHMS}$ e $Z_f = 39 \text{ K OHMS}$. Assim, o ganho de tensão obtido é de aproximadamente 4 vezes. Para um sinal de 10V p.p na saída do gerador de onda, teremos uma amplitude de aproximadamente 40v p.p na saída do AM - 501.

Estê sinal do AM-501 é enviado ao amplificador de potência DCA 10 (R). O ganho é selecionado, no seu painel, por uma chave seletora, a qual é colocada na posição POT e, por um potenciômetro de ganho contínuo. Isso permite-nos variar a voltagem de 1 a 10 vezes o seu valor de entrada. Neste trabalho a voltagem variou de 2 a 5 vezes o valor de entrada. Assim, o sinal na saída deste amplificador teve valores, da ordem de 80 a 240 V p-p para a corrente.

O sinal da saída deste último estágio é enviado a fonte piezoelétrica, a qual é colada ao modelo em estudo, transmitindo-lhe suas oscilações, isto dá origem à propagação de ondas elásticas no modelo.

4.1.2.1 Sistema Receptor

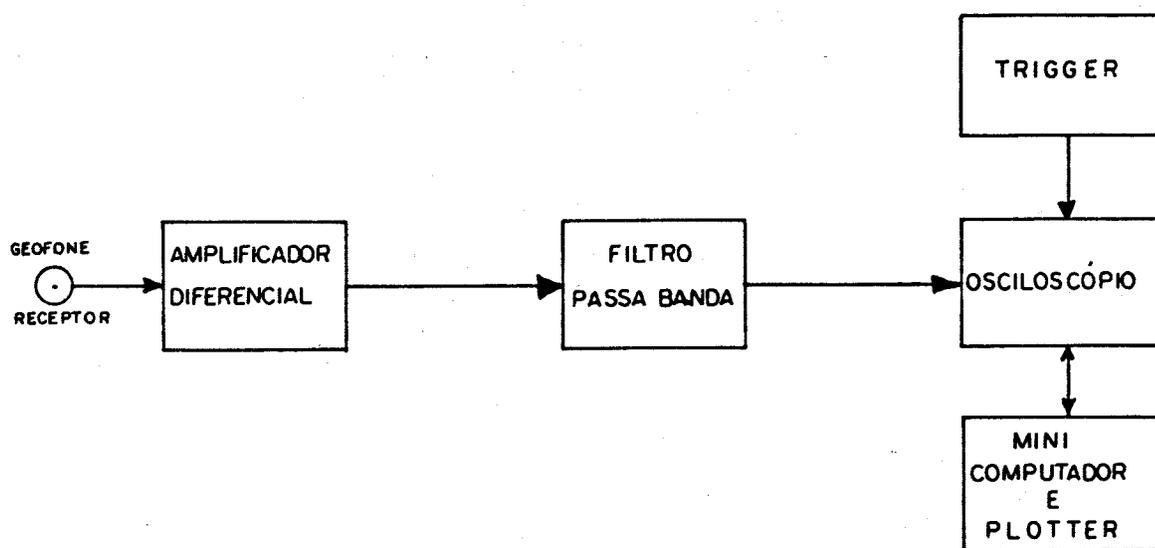


FIG. 25 - DIAGRAMA PARA O SISTEMA RECEPTOR .

4.1.2.1 Instrumentos Utilizados

Como amplificador para o sistema receptor, utilizamos o AM-502 da Hewlett Packard. Ele é um amplificador de alto ganho de voltagem, ganho este variado diretamente, por meio de uma chave seletora, desde 100 até 100K vezes. Utilizamos o Am-502, para amplificar o pequeno sinal proveniente do receptor através de um ganho de 100 a 1000 vezes, fornecendo assim, um si na sísmico com amplitudes da ordem de 50 a 500mv.

Como filtro, utilizamos o 3202 da Krohn-Hite. Este é um filtro eletrônico que pode funcionar como passa-baixa, passa-alta, passa-banda, rejeita.banda, dependendo da finalidade e ajustes no filtro. Ele pode funcionar no modo "BUTTERWORTH", adequado para separar o sinal, de ruído (domínio da frequência) ou como "SIMPLES POSIÇÃO RC", para formas de ondas tipo pulso e filtragem de livre transiente(domínio do tempo). Usamos o 3202 como um passa-banda, na faixa de 10 a 100 khz.

O osciloscópio utilizado, foi o Nicolet 2090. Ele é um osciloscópio digital, apresentando características de um osciloscópio analógico, aliados as vantagens dos aparelhos digitais. O 2090, apresenta dois canais de entrada com seletores de voltagem independentes, O sinal amostrado em sua tela é digitalizado em 12bits, e sua imagem pode ser ampliada, vertical e horizontalmente, de 2 a 64 vezes. Através de uma chave de função, no painel de 2090 podem ser feitas operações de soma, subtração e transferência dos dados para um plotter XY. Os dados do sinal registrado no 2090, podem ainda, serem gravados em disketes inseridos no mesmo. A capacidade de memória dos disketes do 2090 é: 32 sinais de 1024 pontos cada chave em Q1), ou 16 sinais de 2048 pontos (chave em H1), ou 8 sinais de 4096 pontos (chave em "ALL"). O 2090 tem ainda, uma interface que possibilita a transferência dos dados digitais para um micro-computador.

Acoplado ao 2090 através de sua interface, utilizamos o micro-computador HP-9825 é um micro de 16 K bytes de memória Ram, e memória Rom estendida através da utilização de cartu -

chos. O HP-9825, funciona neste sistema acoplado a um plotter HP-9872. O uso do micro-computador constitui a parte mais importante do registro de sinais sísmicos, pois excute a transferência destes dados do osciloscópio para sua memória, permitindo assim, o tratamento, plotagem e gravação dos dados já tratados.

4.1.2.2 Funcionamento

O sinal detectado pelo cristal receptor é da ordem de 50 a 5000uv, assim, ele é enviado ao amplificador diferencial AM-502, para ter o seu valor aumentado de pelo menos 1k vezes. O AM-502 é usado como não inversor, com o acoplamento AC. O ganho como já visto, é determinado por uma chave seletora, aqui na posição 1k ou 2k, e um botão de ajuste contínuo.

O filtro AM-502 é ajustado, posicionando-se a chave LF-3db para 1khz e, a chave HF-3 db para 300khz. Isto garante uma amplificação plana na faixa de frequência para o trabalho (20 a 100 khz). O sinal na saída do amplificador é o equivalente elétrico, das vibrações das partículas do modelo. Estas vibrações são captadas pelo receptor, numa determinada distância X, em função do tempo t, em resposta a excitação da fonte. O sinal é constituído de vários componentes de frequência das ondas sísmicas, no modelo. As amplitudes máximas dessas componentes, na saída do AM-502, são da ordem de 50 a 500mV.

O sinal na saída do AM-502, apresenta ruído, ou seja, componentes com frequência fora da faixa de trabalho (20 a 100 khz). Devido a isso, é necessário utilizar-se o filtro passa-banda, a fim de eliminar esses ruídos e dar maior estabilidade ao sinal sísmico. A banda de passagem utilizada durante o experimento foi de 10 a 120 khz. As frequências de corte do passa-banda, são ajustadas no filtro, através de uma chave seletora e um botão de ajuste contínuo.

O filtro é utilizado como um BUTTER WORTH.

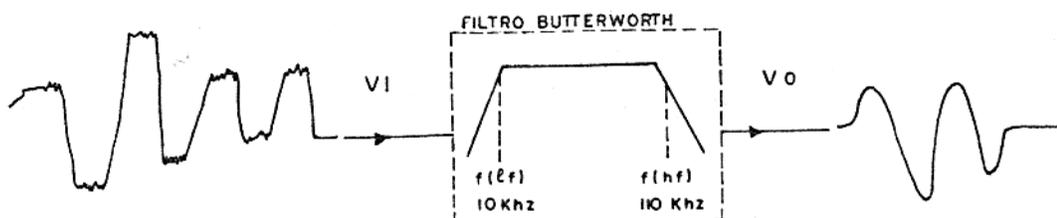


FIG. 26 - FILTRO BUTTER WORTH, PASSA-BANDA.

O sinal na saída do filtro é enviado ao osciloscópio 2090, e amostrado em sua tela por 1024 pontos, estando para isso, a chave de amostragem na posição Q_i , $i = 1, 2, 3, 4$. Quando o sinal é gravado, a ampliação é feita no seletor de aumento vertical, no painel central do 2090. Os seletores das escalas de amplitude e de tempo, ficaram em 1 volt e 500 μs (para experimentos somente com onda direta) e 1000 μs (para trabalhos envolvendo ondas refletidas e refratadas). O sinal pode ser gravado nos disketes do 2090, pelo acionamento da tecla "Hold Last" , estando as chaves seletoras de memória na posição Q_i , $i = 1, 2.. .. 8$. Cada diskete tem a capacidade de armazenar, 32 sinais sísmicos de 1024 pontos cada. Os sinais gravados no diskete, pedem ser chamados sucessivamente pelo acionamento da tecla "Recall". A leitura dos valores de amplitude e tempo em um determinado ponto, é feita diretamente na tela, pelo deslocamento do traço vertical para o ponto onde se pretende fazer a leitura. Esse deslocamento é comandado por uma tecla localizada abaixo da tela.

O sinal sísmico é observado no osciloscópio, pode também ser transferido ao micro-computador. Neste, o sinal após ser tratado, pode ser gravado em fita cassete, num total de 32 sinais por fita e plotados como sismograma. Os programas executa -

dos na HP-9825, para o tratamento e plotagem dos sinais são apresentados no Apêndice II.

4.2 Fontes e Receptores Piezoelétricos

Alguns tipos de cristais, naturais e artificiais, apresentam propriedades de eletrostrição e piezoeletricidade.

Quando se submete esses cristais a uma diferença potencial eles irão comprimir-se ou expandir-se na direção de seu eixo polar. Esse fenômeno é chamado eletrostrição. Por outro lado, quando se comprime ou expande o cristal na direção de seu eixo, varia-se a carga dos seus extremos, em um sentido e outro. A diferença de potencial gerada dessa maneira no cristal, é chamada piezoeletricidade.

Assim, eletrostrição é a geração de energia mecânica a partir da elétrica, e piezoeletricidade é o inverso. Ambos os efeitos, normalmente são considerados como piezoeletrícós, sendo a piezoeletricidade o efeito direto e a eletrostrição o efeito inverso.

Quando o cristal piezoeletrico é submetido a uma tensão alternada, a oscilação elástica do cristal é maior na frequência de ressonância do mesmo, também chamada de frequência de trabalho.

Um piezocristal pode ser representado simplificada - mente por um sistema mecânico não amortecido, no qual uma mola sustenta uma massa M que é livre para movimentar-se na vertical, Fig. 4.a. Seu análogo elétrico, pode ser representado pelo circuito paralelo ressonante, Fig. 4.b. As fórmulas para as frequências naturais não amortecidas, para ambos os circuitos são mostradas também na Fig. 4.

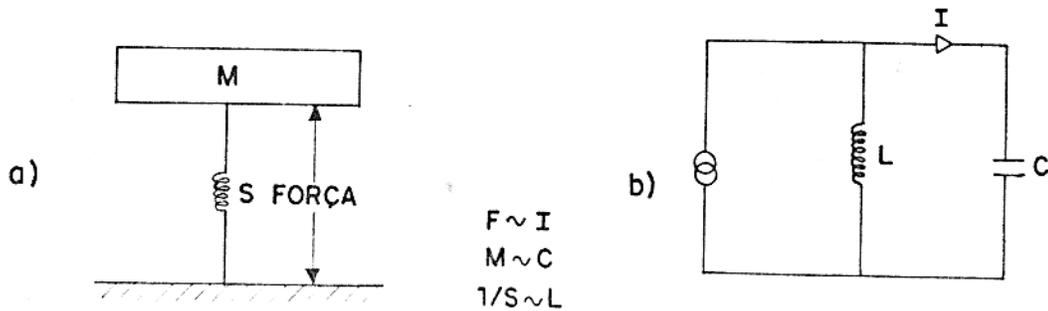


FIG. 27 - CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA UM PIEZOCRISTAL, a) Circuito Mecânico; b) Circuito Elétrico.

A frequência natural da oscilação de um piezocrystal depende de sua espessura e do Módulo de Young e é determinada através da fórmula (45), onde Y é o módulo de Young, l é a densidade do cristal e d é a espessura do mesmo.

$$f = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (45)$$

Teoricamente, como mostra a fórmula (45), através da escolha apropriada da espessura do cristal, as oscilações mecânicas podem ser feitas, ter qualquer frequência desejada sobre uma larfa faixa, de modo que, quanto menor a espessura do cristal maior é a sua frequência de ressonância. Na prática no entanto, as frequências exatas de ressonância são determinadas experimentalmente para cada cristal em particular.

4.2.1 Fonte

O piezocrystal utilizado como fonte nesse trabalho, é constituído de barium-titanite e tem suas faces revestidas por uma película de prata. A fonte tem uma forma circular, com 2.5cm de diâmetro por 5mm de espessura e é mostrada na fig. 28.

A frequência de ressonância para o cristal fonte , foi determinada experimentalmente, sendo de aproximadamente 41 khz.

As oscilações de maior energia para o cristal, ocorrem na direção de seu eixo longitudinal, mostrado na Fig. 28 abaixo.

f

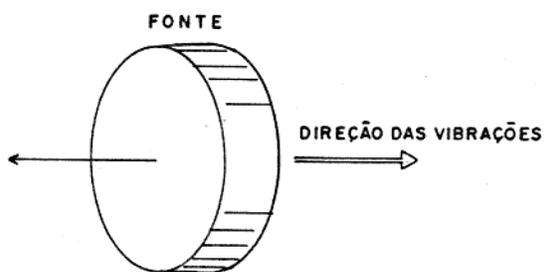


FIG. 28 - FONTE PIEZOELÉTRICA.

4.2.2 Receptor

O receptor (geofonê) consiste em um suporte de metal (latão) em forma de T, com a altura ajustada através de 2 parafusos. O suporte sustenta um cilindro também de latão, com a extremidade afinada e na qual está encaixado o cristal piezoelétrico. A fig. 29 mostra o receptor completo (suporte e piezocristal).

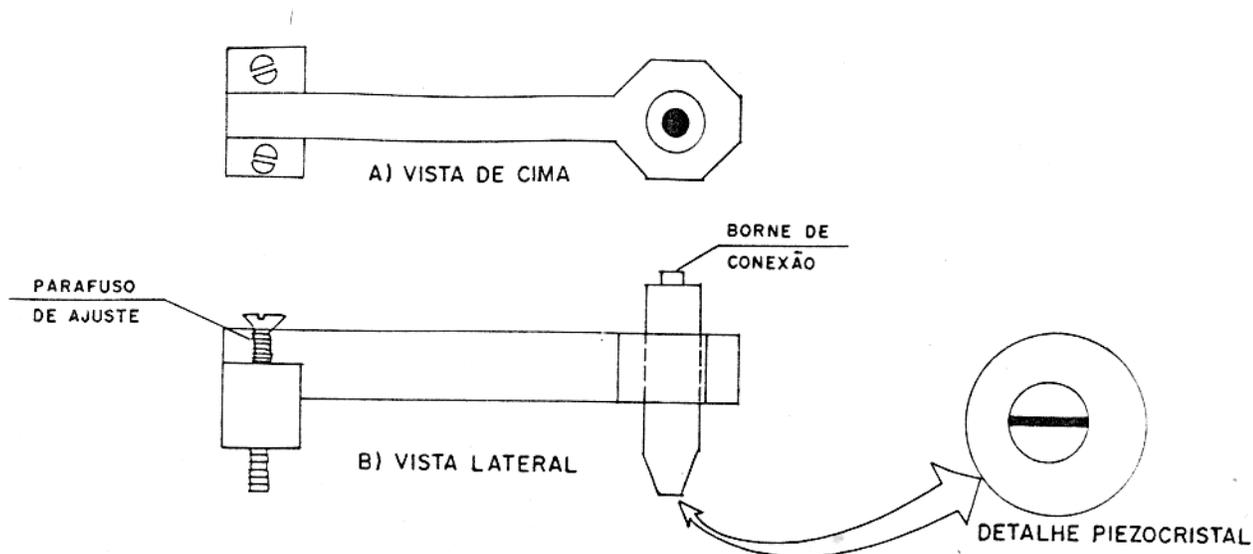


FIG. 29 - RECEPTOR. a) Vista de cima, b) Vista lateral.

O receptor é colocado sobre o modelo e deslocado ponto a ponto ao longo de trajetórias previamente marcadas. O piezocristal é sensível a deslocamentos transversais horizontais (ondas S) e, a deslocamentos longitudinais (ondas P), das partículas em relação a direção de propagação das ondas.

Ao sofrer as deformações em suas faces L_1 , L_2 , como indicado na figura 30, o piezocristal tem criado uma diferença de potencial entre elas. As variações do potencial são enviadas ao

sistema receptor, e são o equivalente elétrico do sinal sísmico.

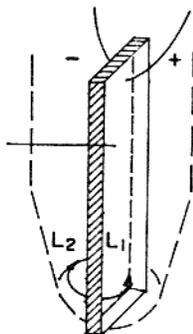


FIG. 30 - PIEZOCRISTAL RECEPTOR.

A sensibilidade desse cristal para um tipo ou outro de onda, P ou S, é ligado à posição de suas faces (L_i), $i = 1, 2$ em relação a direção de vibração das partículas. Assim, o receptor captará preferencialmente, os deslocamentos das partículas, que atuem perpendicularmente a esta face. Dessa forma, se L_i estiver voltada para a direção de propagação da onda, captará os sinais da onda longitudinal (P). Por outro lado, se L_i estiver paralela a direção de propagação captará os sinais da onda transversal (S). A Fig. 30 abaixo esboça esses posicionamentos.

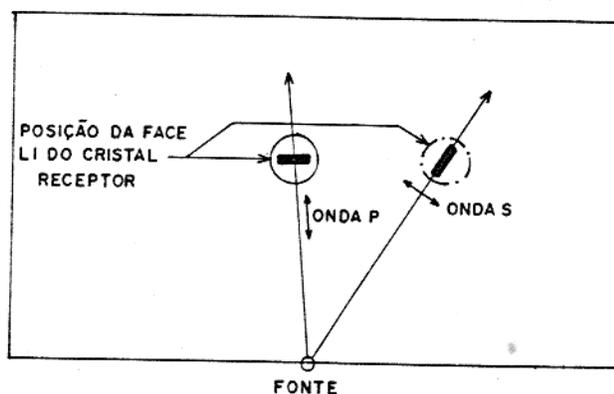


FIG. 31 - POSIÇÃO DO CRISTAL PARA CAPTAR AS ONDAS P e S.

Uma rotação da face do cristal de 180° , inverte a fase do sinal captado.

Tanto a fonte quanto o receptor são ligados aos sistemas transmissor e receptor, respectivamente, através de cabos coaxiais, a fim de se evitar ruídos na transmissão dos sinais.

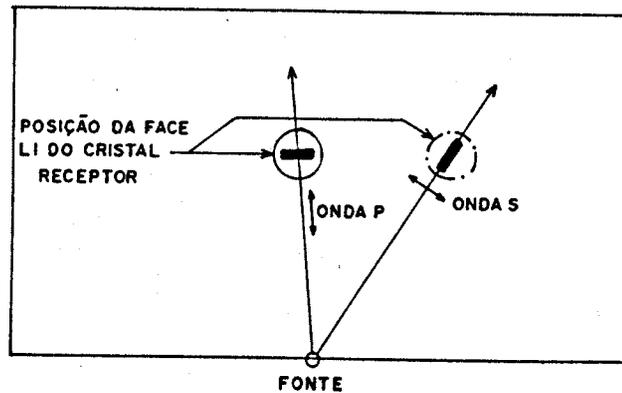


FIG. 31 - POSIÇÃO DO CRISTAL PARA CAPTAR AS ONDAS P e S.

de onda, P ou S, e ligado a posição de suas faces (Li), em relação a direção de vibração das partículas. Assim, o receptor captará preferencialmente, os deslocamentos das partículas, que atuem perpendicularmente a esta face. Dessa forma, se Li estiver voltada para a direção de propagação da onda, captará os sinais da onda longitudinal (P). Por outro lado, se Li estiver paralela a direção de propagação captará os sinais da onda transversal (S). A Fig. 30 abaixo esboça esses posicionamentos.

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das medidas dos parâmetros e modelos , descritos em 3.5 são apresentados através de gráficos e de suas interpretações. As respostas aos modelos de uma e duas camadas , através de suas seções sísmicas características. Para cada um desses modelos foram determinadas duas seções, uma para componente vertical e outra para componente horizontal. A seção para componente vertical é obtida com o cristal receptor perpendicular à superfície. E a seção para componente horizontal, com o cristal receptor paralelo à superfície. A primeira , registra melhor as reflexões e refrações das ondas S e a segunda, as reflexões e refrações das ondas P. A realização das medidas e o plotamento dos dados foram feitas com o auxílio do micro-computador. Os programas para esses fins são apresentados no apêndice 2. O apêndice 1 apresenta as dimensões para os modelos. As definições para os tipos de ondas encontradas, tais como: PP, SP e etc., são dadas em 3.5.2 . O uso do receptor para medir-se as ondas P ou S, é explicado em 4.2.2.

5.1 Medidas das Características de Irradiação das Ondas P e S

A irradiação das ondas P e S e sua determinação, nas placas dos materiais foram descritas em 3.5.1.1. Como foi dito ali, os resultados são apresentados através de diagramas de irradiação dessas ondas, determinados para cada material. Para a execução dessas medidas em 20, 40, 60, 80 e 100khz, utilizamos o programa 1 do Apêndice II. Terminadas as medidas em uma placa, , seus diagramas correspondentes são traçados pela utilização do programa 2 do Apêndice II. As dimensões para as placas são dadas no modelo 1 do Apêndice I.

Os diagramas de irradiação para a onda P, determinados para os materiais são apresentados nas figuras 32 e 36. Esses diagramas, mostram formas irregulares e assimétricas, em relação a norma à fonte, diferente portanto, do diagrama previsto para uma onda P da fig. 15. Exceção é feita ao acrílico (2mm) ,

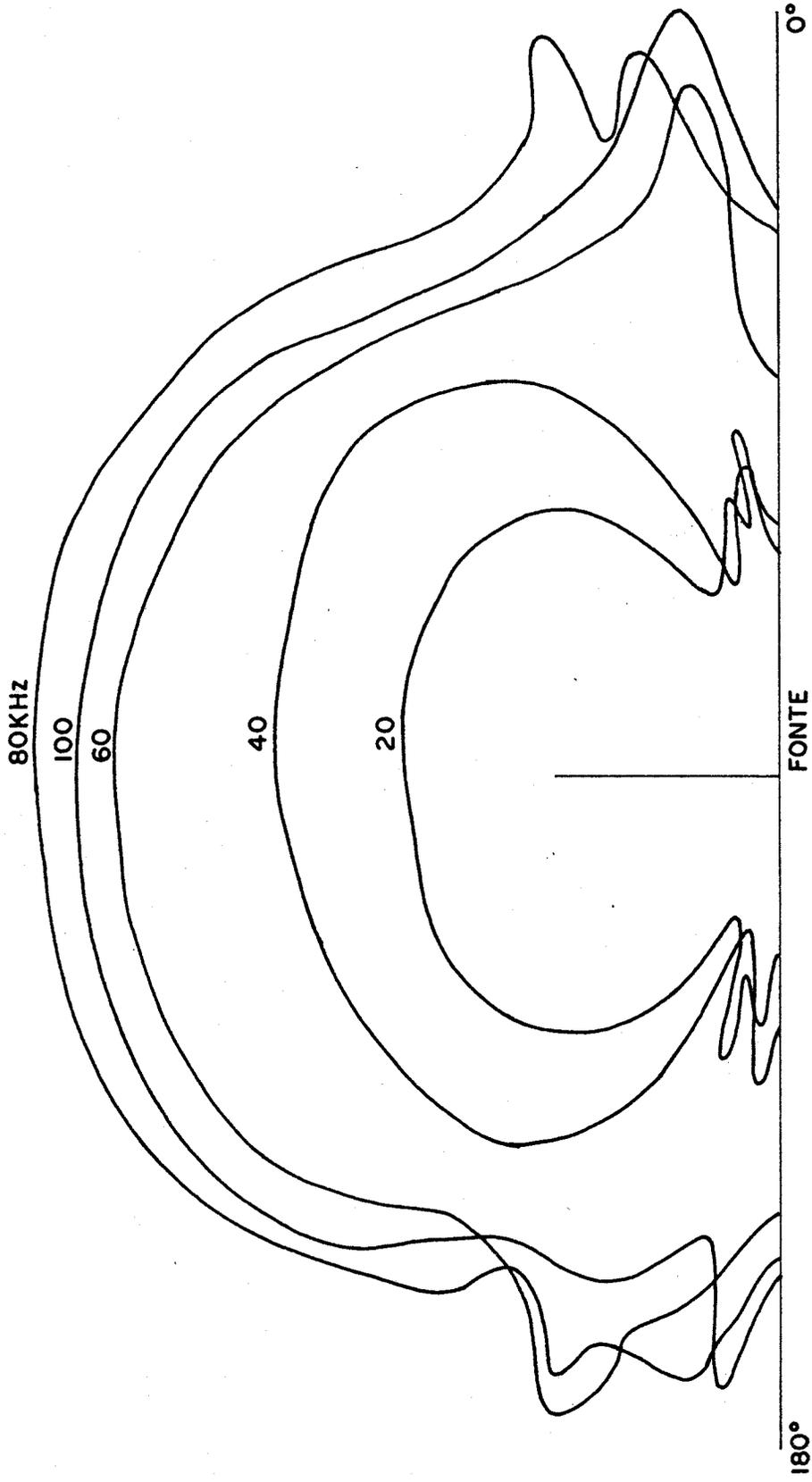


FIG. 32 - DIAGRAMAS PARA ONDA P, NO ACRÍLICO 2 mm.

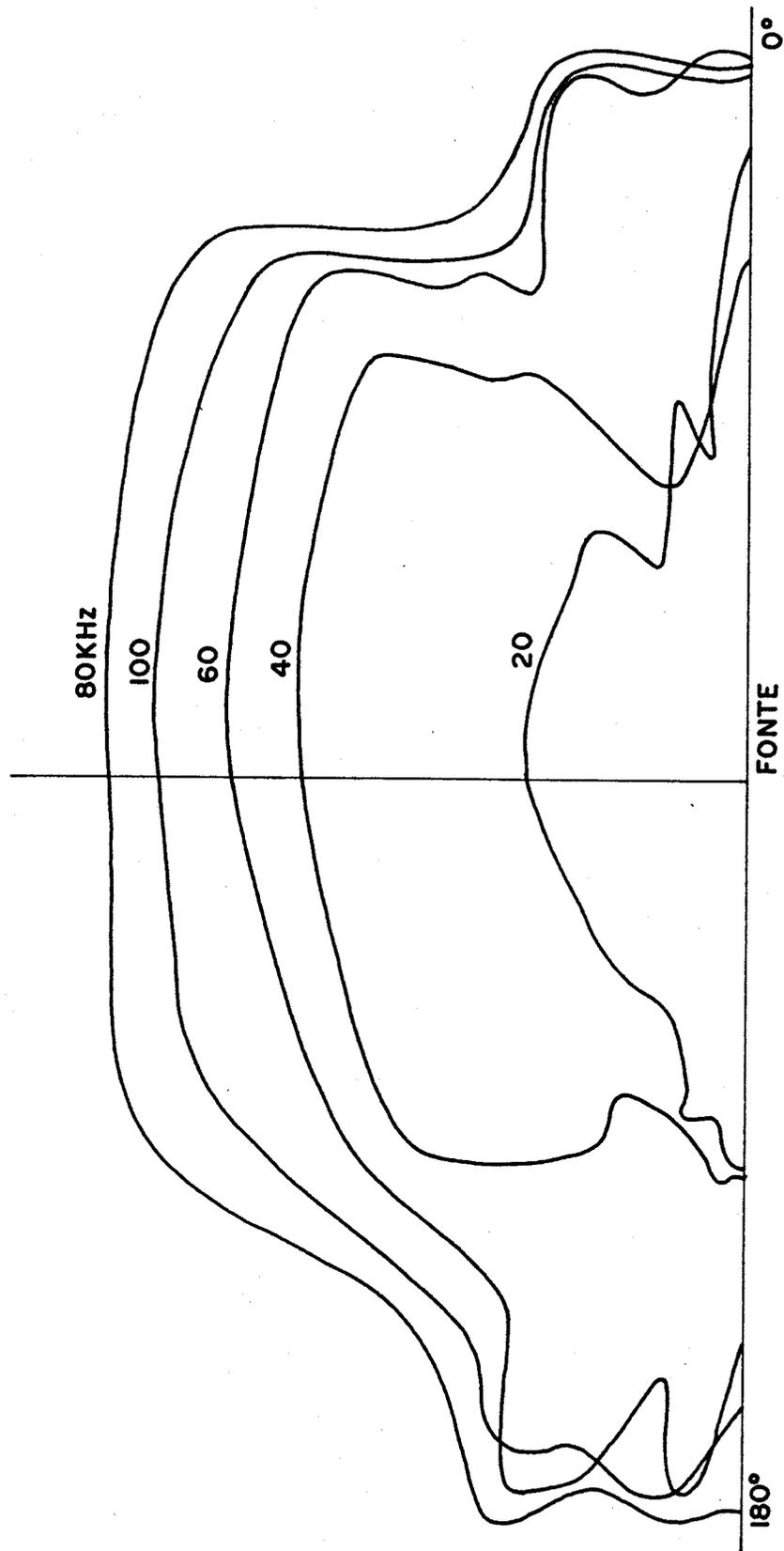


FIG. 33 - DIAGRAMA PARA A ONDA P NO ACRÍLICO 3mm.

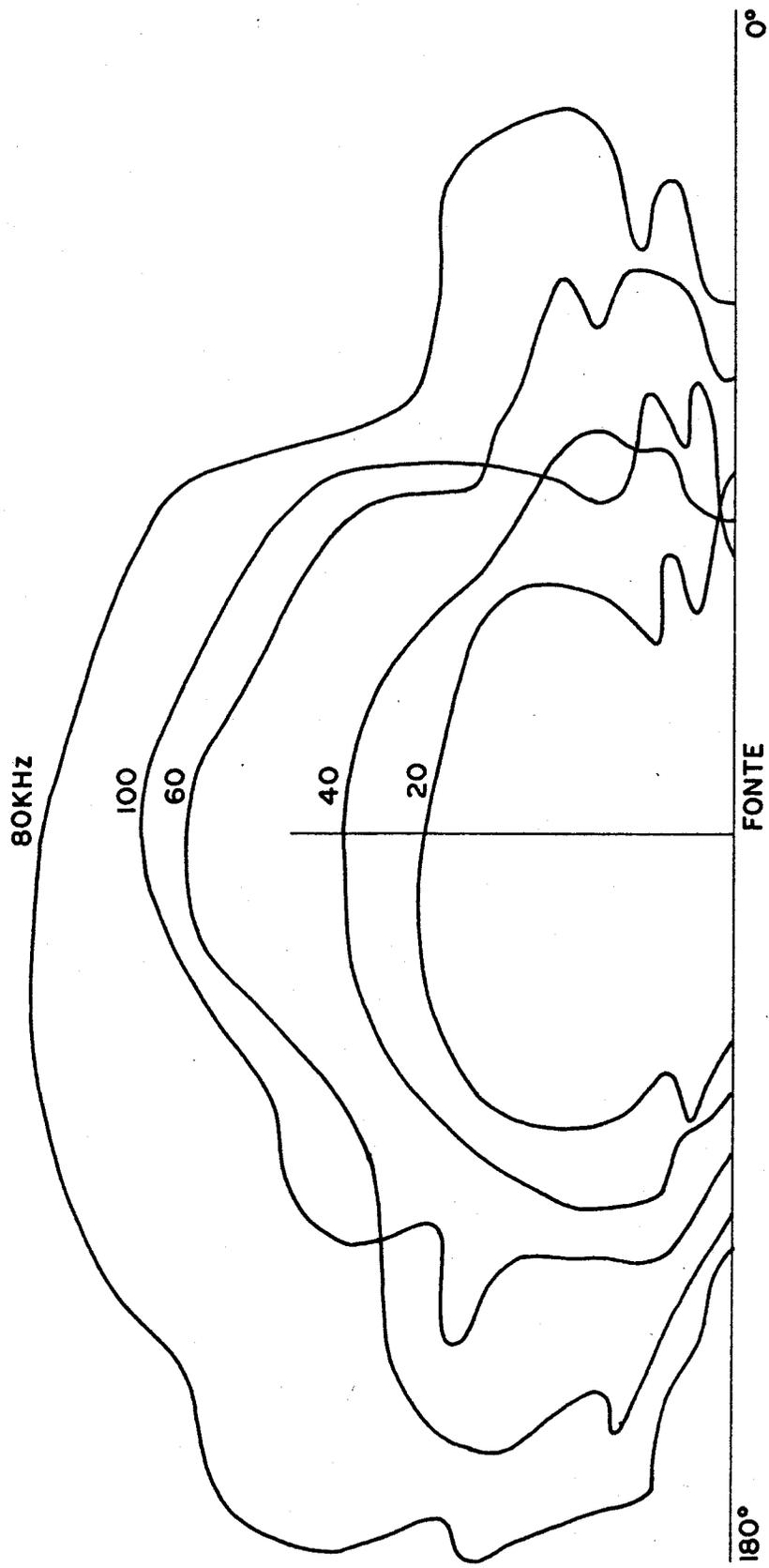


FIG. 34 - DIAGRAMA PARA A ONDA P NO PVC.

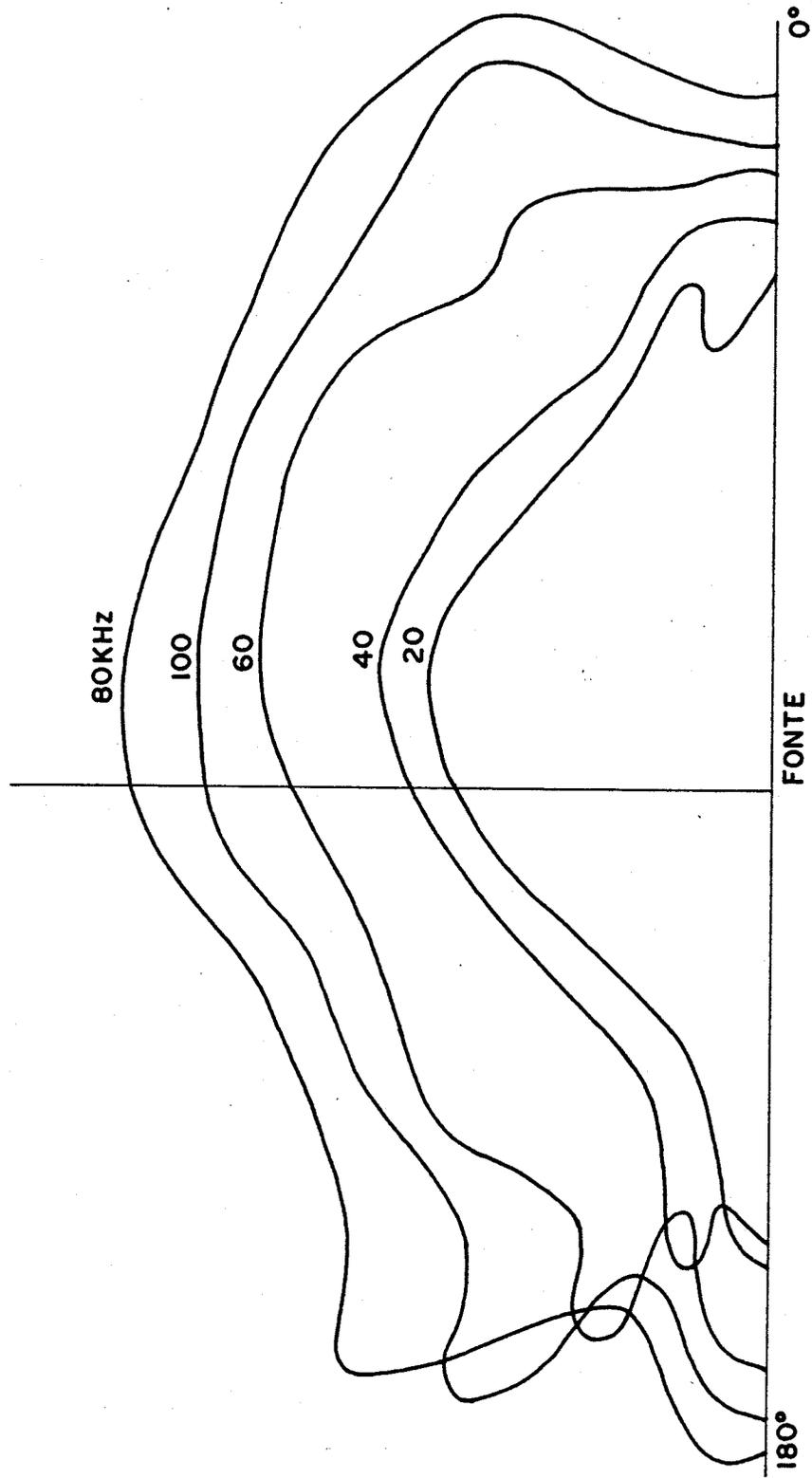


FIG. 35 - DIAGRAMAS PARA A ONDA P NO VIDRO.

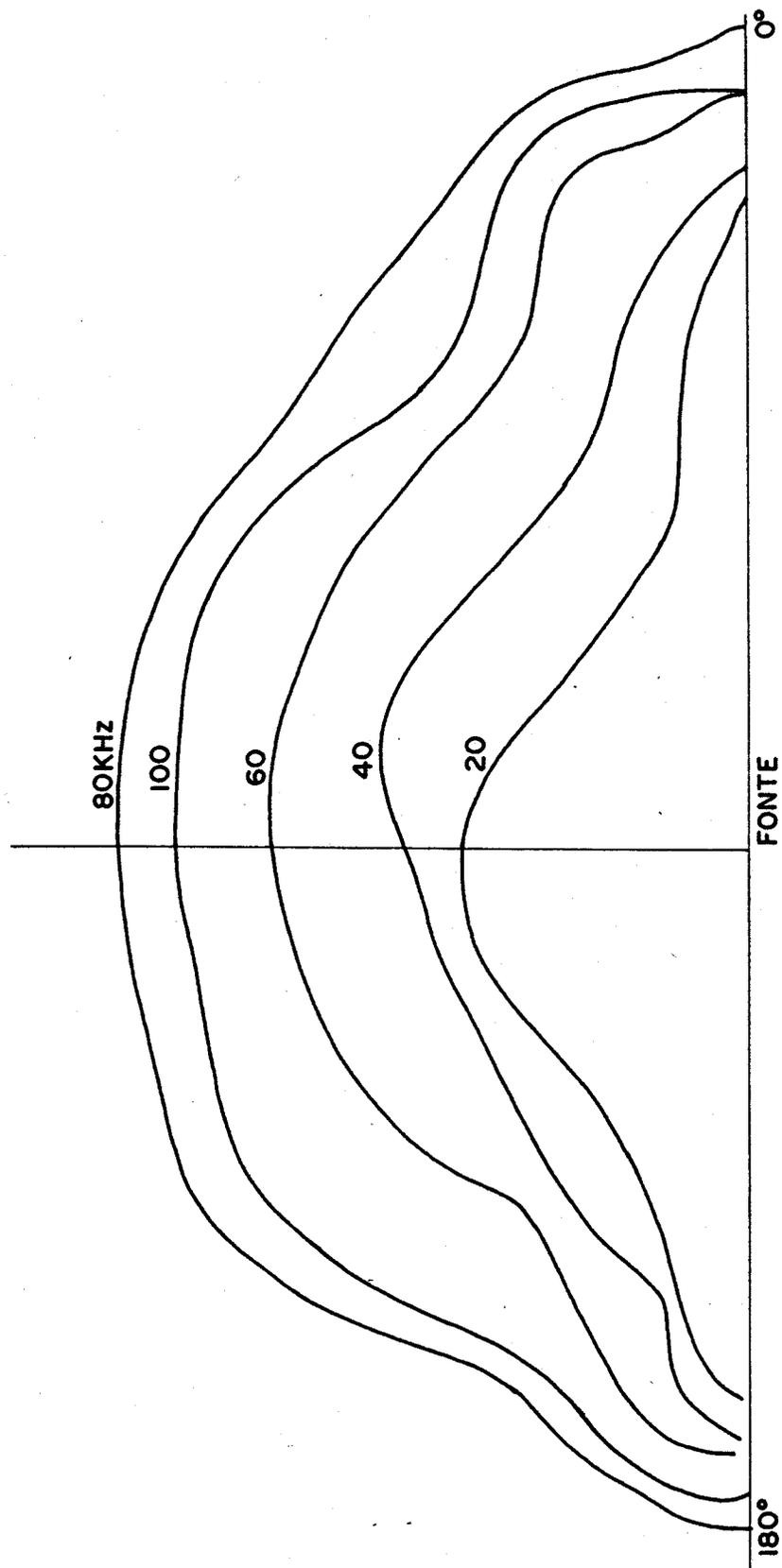


FIG. 36 - DIAGRAMAS PARA A ONDA P NO ALUMÍNIO.

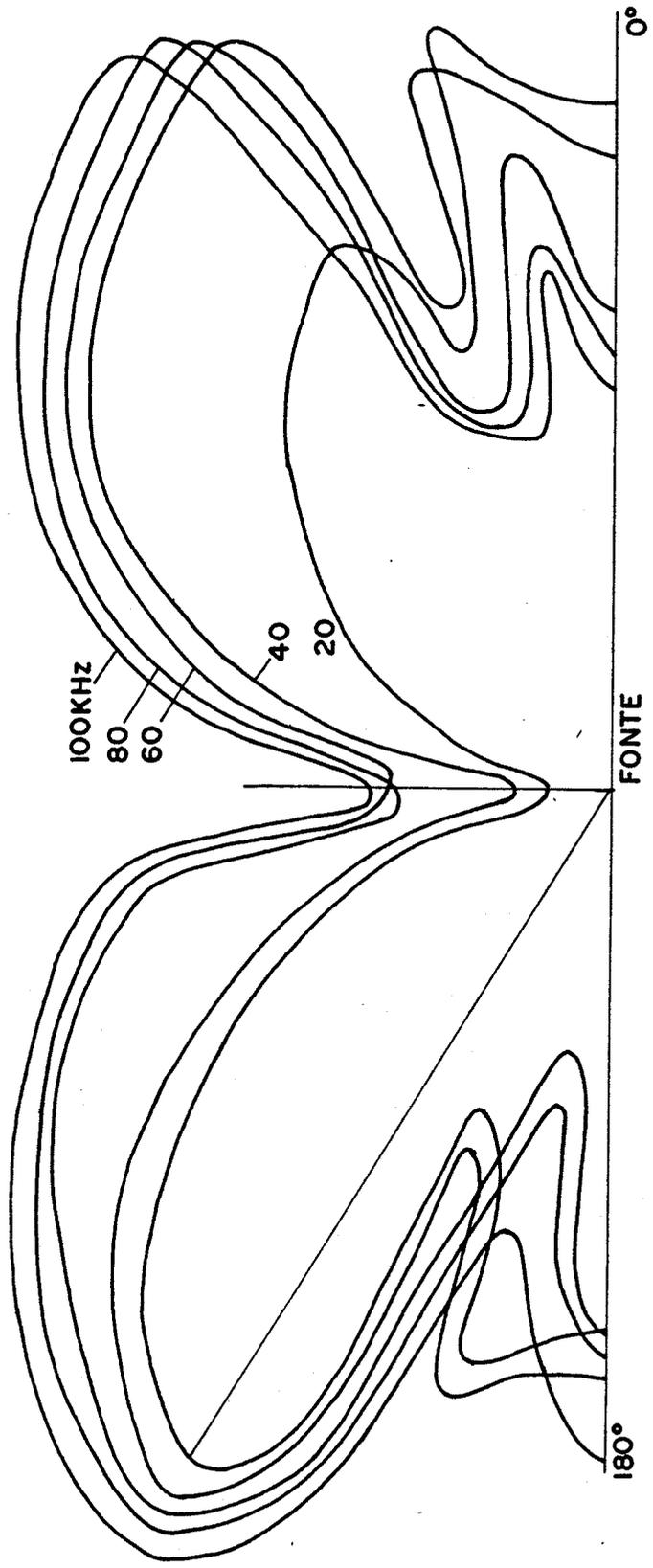


FIG. 37 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ACRÍLICO 2 mm.

Fig.31, que mostrou uma razoável semelhança com a forma circular prevista. As irregularidades dos diagramas são indícios da inhomogeneidade dos meios que eles representam. As direções de maior irradiação da energia, como mostradas nessas figuras para a onda P, estão entre 70° e 110° com a superfície.

Os diagramas para a onda S são apresentados nas figs. 37 e 41. O diagrama para o acrílico (2mm), Fig. 37, mostrou maior semelhança com aquele previsto para onda S, Fig. 15. Para o P.V.C e o acrílico (3mm), Fig. 38 e 39, verificou-se também alguma semelhança com a fig. 15, mostrando-se no entretanto, assimétricos em relação a normal à fonte. Para o vidro e o alumínio, Fig. 40 e 41 respectivamente, os diagramas mostraram-se bastante irregulares em relação a Fig. 15, para a onda S. Portanto, o vidro e o alumínio, dentre os 5 materiais utilizados, mostraram-se menos ideais (homogeneos e isotrópicos). A Assimetria apresentada pelos diagramas, pode também ter sofrido influência de alguma falha na fixação (colagem) da fonte. As direções de maior irradiação da energia para a onda S, estão entre 30° e 60° para o lóbulo direito e, entre 120° e 150° para o lóbulo esquerdo dos diagramas.

Os diagramas para a onda S, assim como para a onda P mostraram alguns contornos bastante irregulares, entre 10° e 30° no lado direito e entre 150° e 170° no lado esquerdo. Estas irregularidades foram causadas provavelmente, por interferência das ondas de superfície (Rayleigh). Visto que estas têm maior influência na superfície, e as irregularidades diminuem justamente, com a profundidade.

Quanto a influência da frequência da fonte na irradiação das ondas sísmicas, notamos que tanto na onda P quanto na S, a intensidade da energia aumenta com a frequência, na faixa de 20 a 80khz e, diminui a partir de 80khz. Os sinais sísmicos para as cinco frequências (20, 40, 60, 80 e 100khz), para as ondas P e S são apresentadas na Fig. 42. Esses sismogramas foram tomados na placa de acrílico (3mm), modelo 1 do Apêndice I, a 15cm da fonte, nos pontos correspondentes a 90° para a onda P e 85° para a

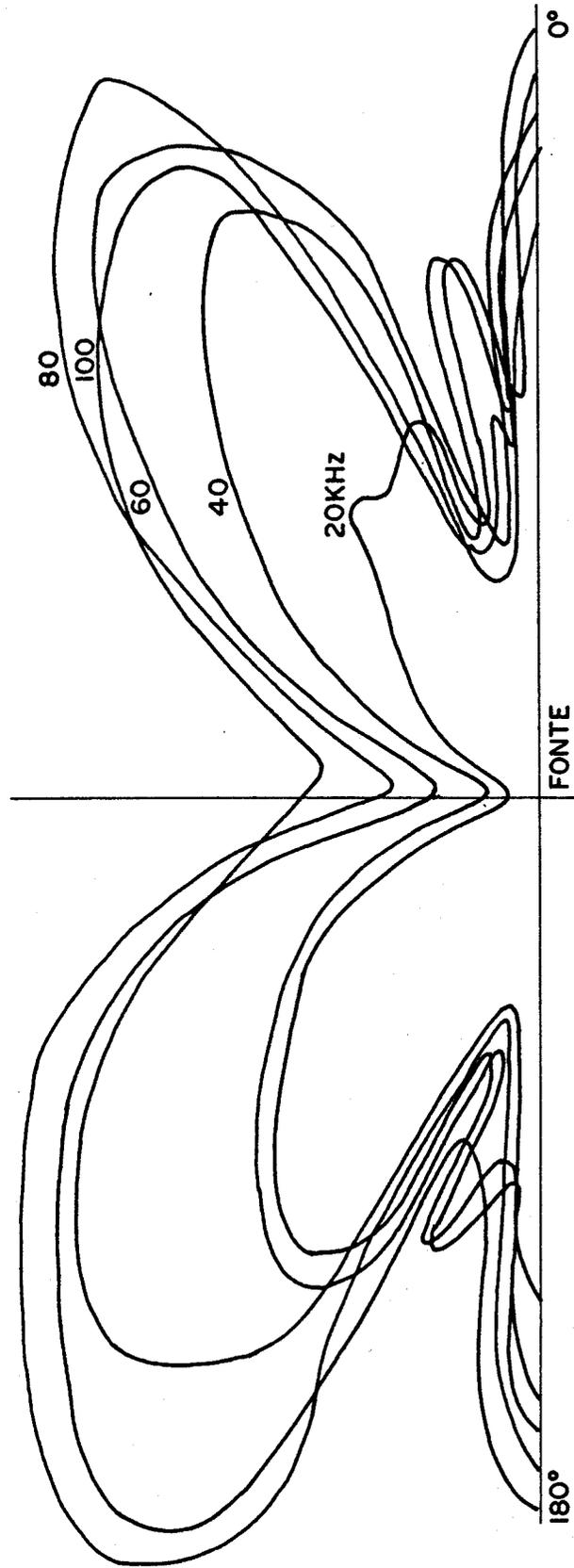


FIG. 38 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ACRÍLICO 3mm.

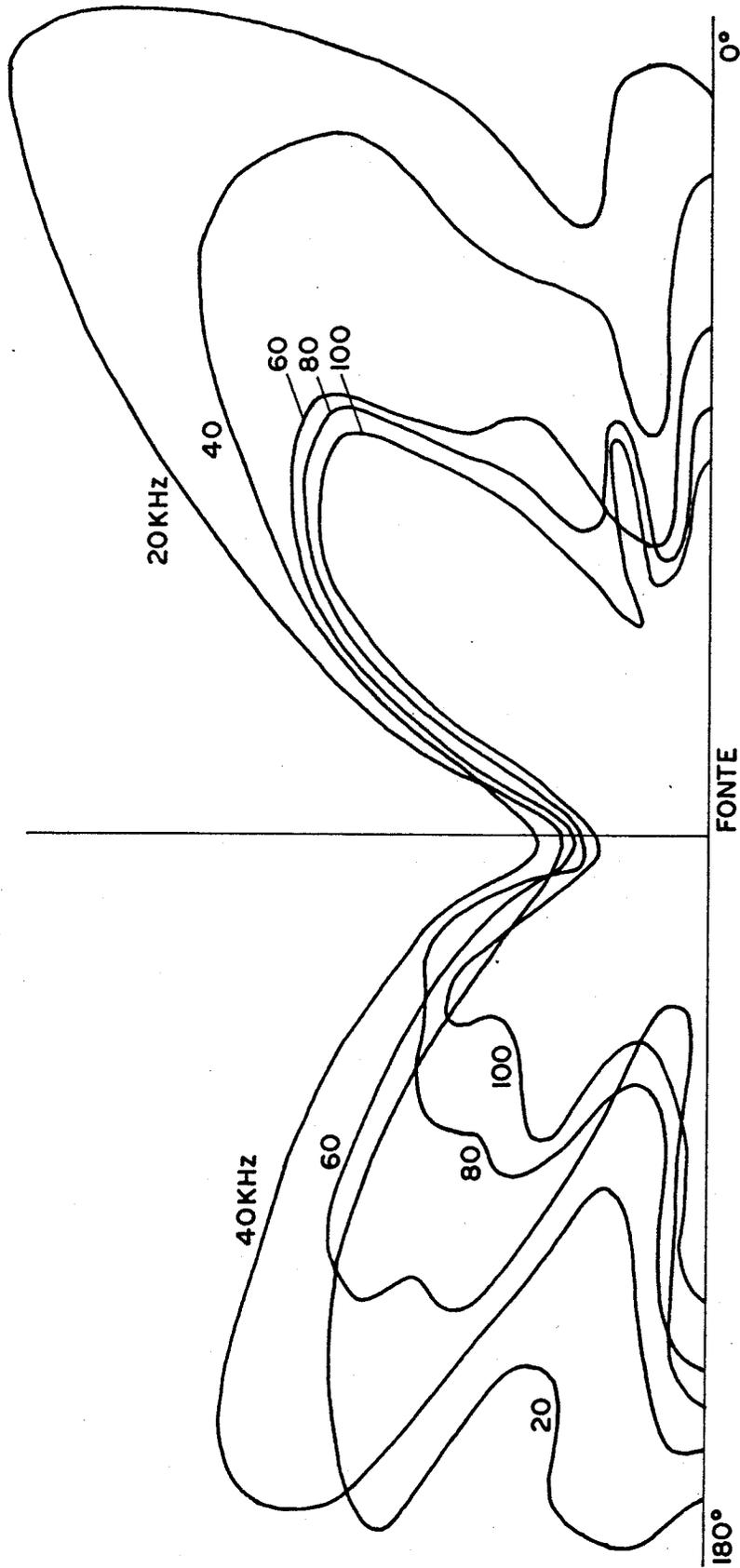


FIG. 39 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO PVC.

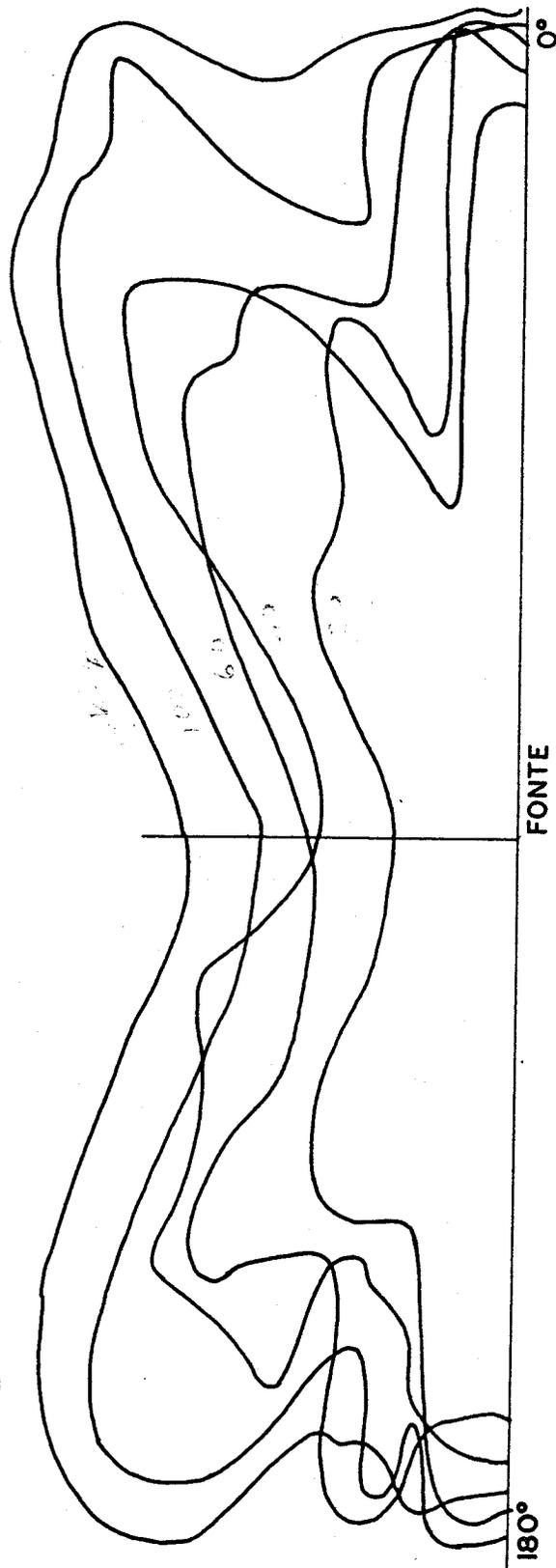


FIG. 40 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO VIDRO.

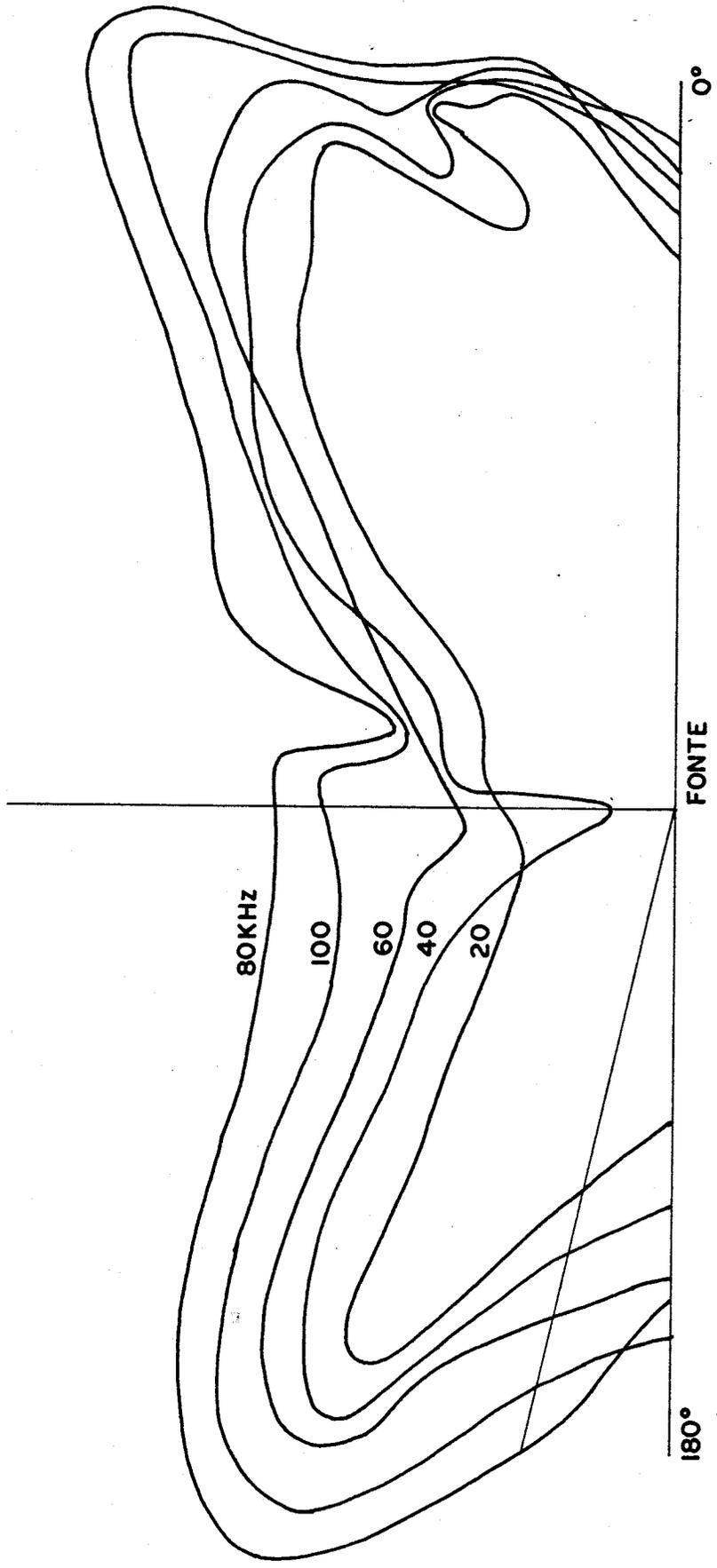


FIG. 41 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ALUMÍNIO.

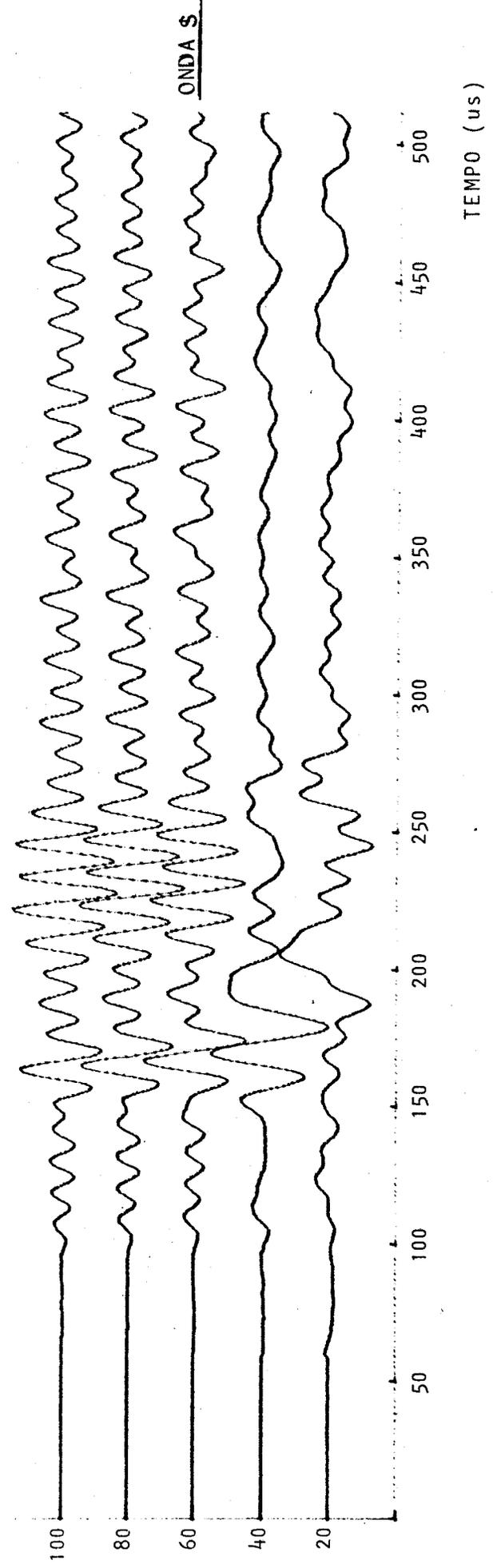
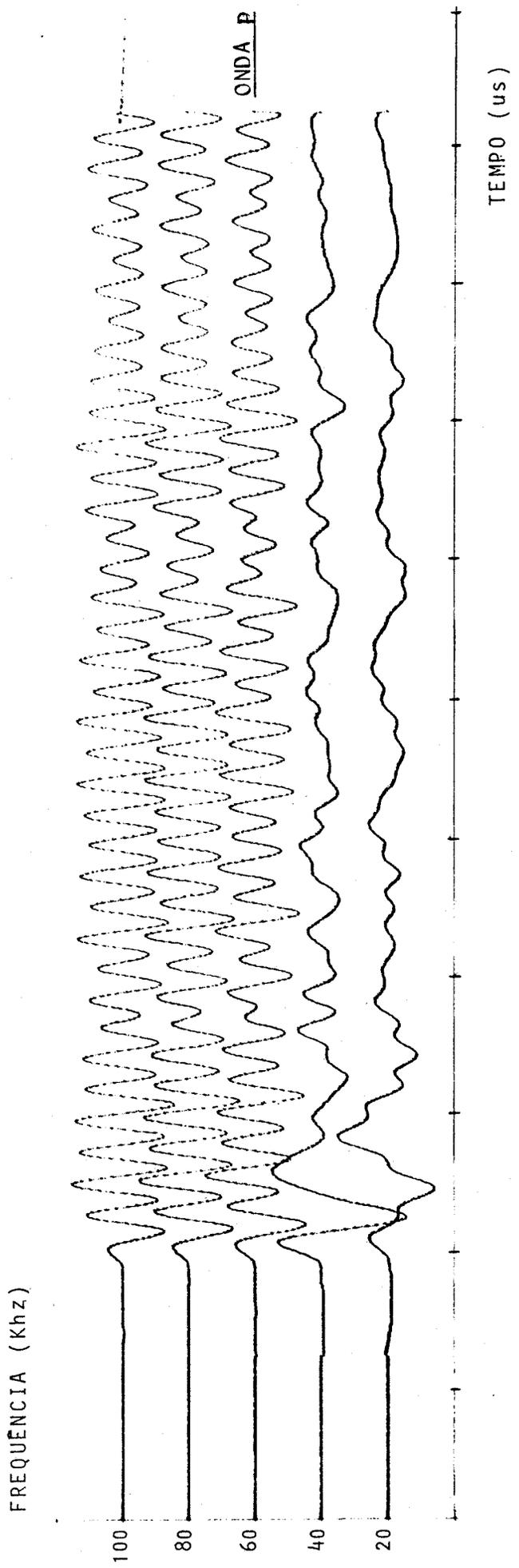


Fig. 42 - Resposta para diversas frequências (acrílico 3mm)

onda S. Os sismogramas para a frequência de 40khz reproduzem o melhor sinal, ou seja, com menos ruído, entre as cinco frequências utilizadas para a fonte. Os sinais obtidos para os demais materiais além do acrílico (3mm) apresentaram a mesma informação, ou seja, $f = 40$ khz para a melhor resposta. Ajustes posteriores, no entanto, demonstraram que a real frequência de ressonância para a fonte piezoelétrica estava em 41 khz.

5.2 Medidas das Velocidades das Ondas P e S

Como foi descrito em 3.5.1.2 as velocidades das ondas P e S foram obtidas graficamente, através das seções sísmicas, isto é, dos gráficos tempo-distância para uma placa. As dimensões das placas de cada material são dadas no modelo 1 do Apêndice I. As medidas das velocidades nas placas foram feitas, utilizando-se o programa 3 do Apêndice II, o qual faz a plotagem dos sismogramas e calcula as velocidades das ondas $P(V_p)$ e $S(V_s)$ de cada placa.

As seções para a onda P são mostradas nas Figs 43 a 47 e para a onda S nas Figs 48 a 52. As ondas P e S formam em suas respectivas seções, uma trajetória reta na direção de sua propagação. Elas apresentam-se nestas trajetórias com a mesma amplitude, isto é, não decaem com a distância, por terem sido normalizadas durante o plotamento pelo seu valor de pico. As seções para o acrílico (2m m), Figs 43 e 48, mostram praticamente a ausência de ruídos. Por outro lado, as seções para o vidro, Figs 46 e 51, e o alumínio, Figs 47 e 52, mostram a presença de bastante ruído, provavelmente em consequência das inhomogeneidades dos meios, que provocam um espalhamento das ondas. As seções para o acrílico (3mm), Figs. 44 e 49, e o P.V.C, figs. 45 e 50, mostram uma situação intermediária, com a presença de alguns ruídos para as ondas P e S.

Nas seções para as ondas P e S, Figs 43 a 52, como descrevemos em 3.5.2.2, foram traçadas retas, que interceptam os pontos de mesma fase dos sismogramas. As inclinações das retas,

DISTANCIA
A FONTE (cm)

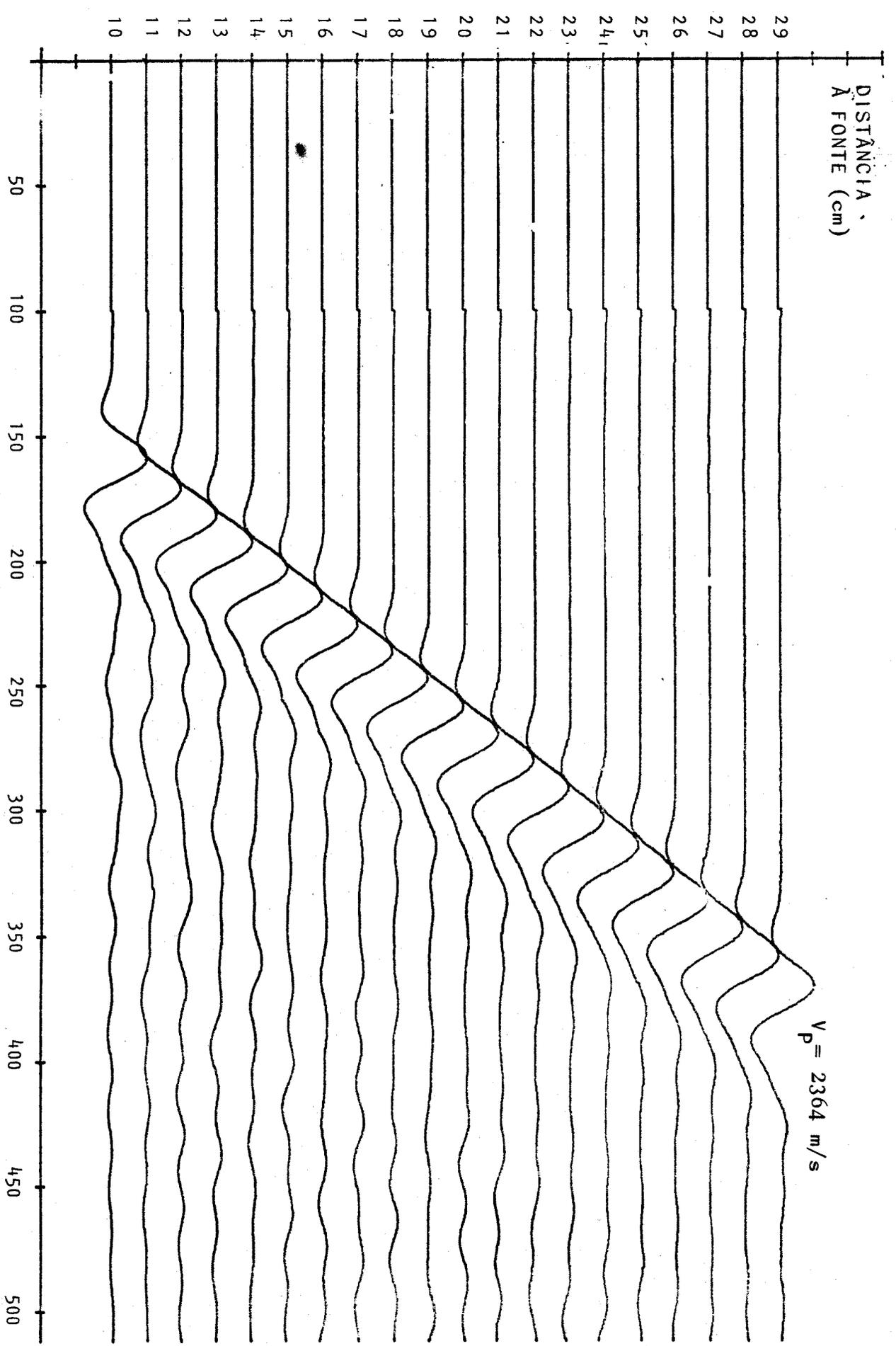


Fig. 43-- Velocidade da onda P: Acrílico 2mm.

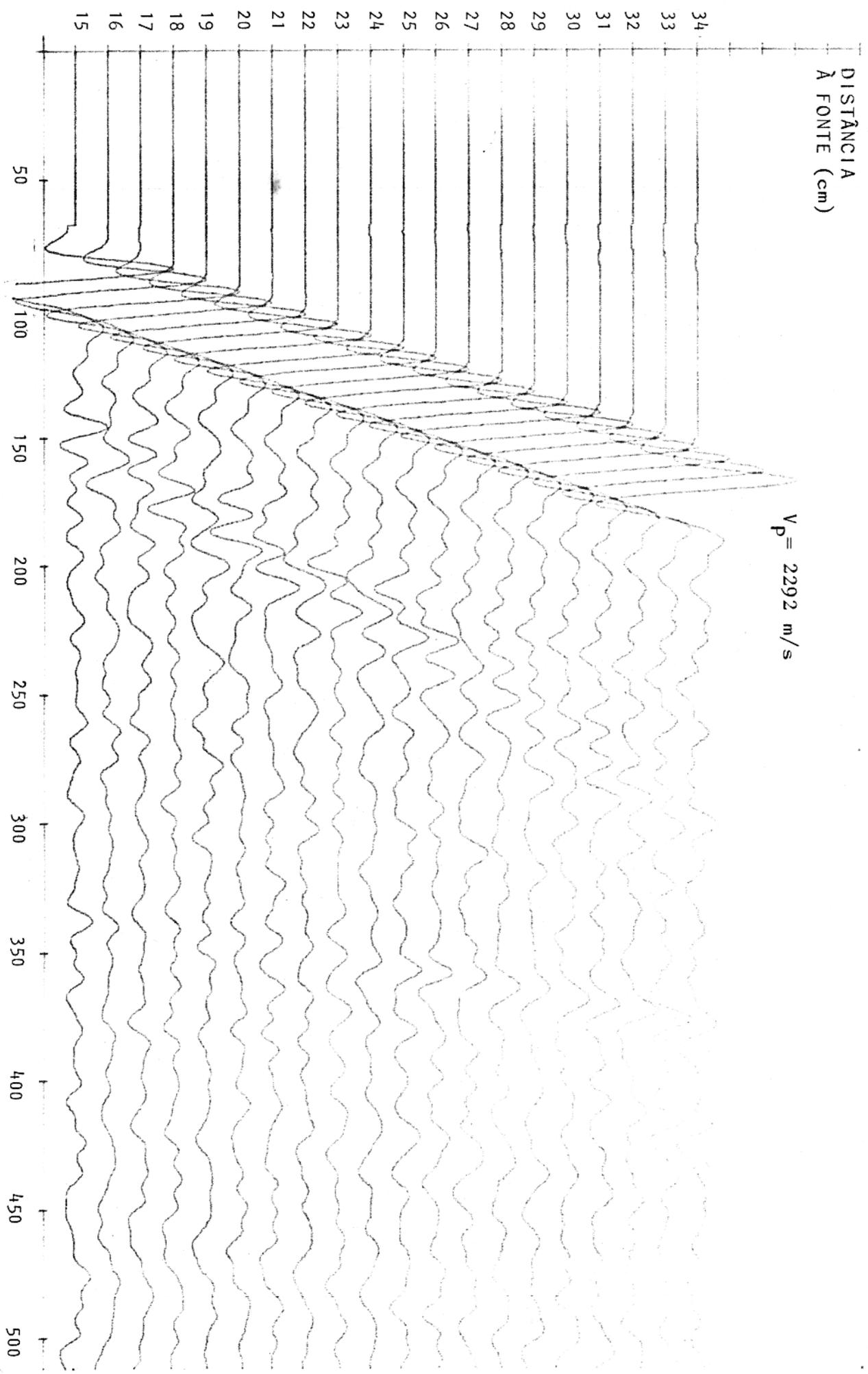


Fig. 4.4 - Velocidade da onda P: acrílico 3mm.

DISTÂNCIA
A FONTE (cm)

$V_p = 2020 \text{ m/s}$

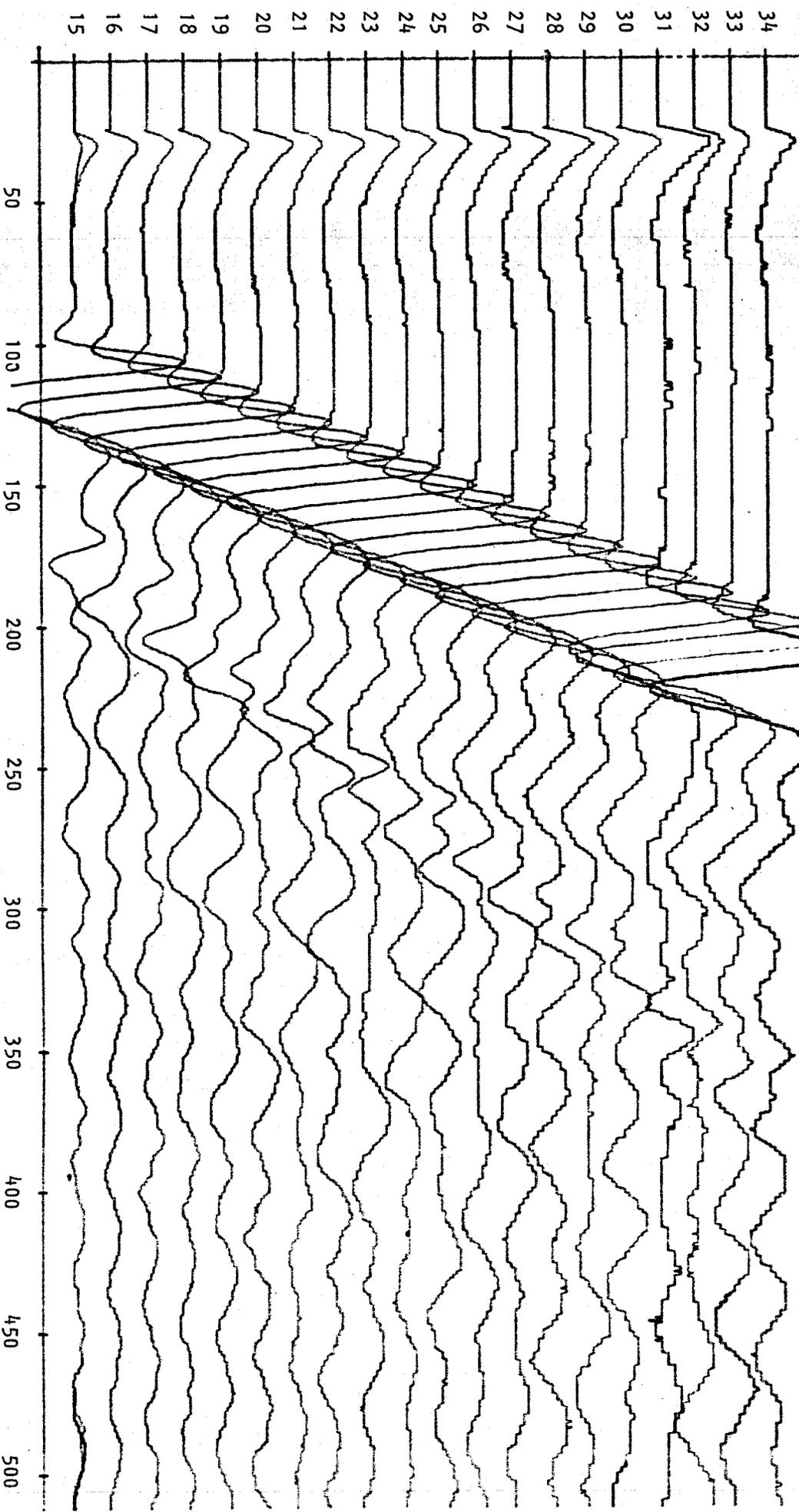


Fig. 45 - Velocidade da onda P: PVC:

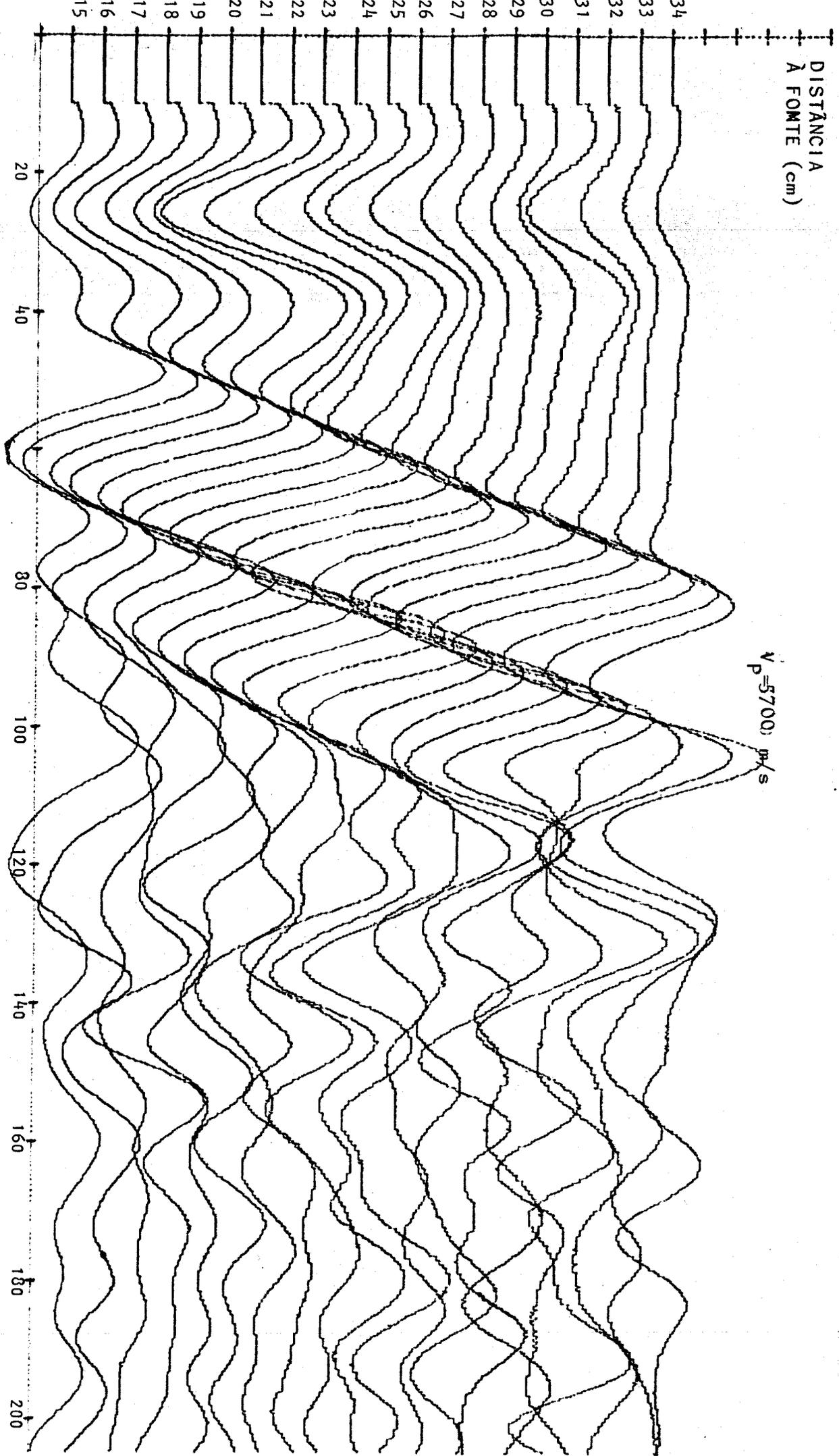


Fig. 46 - Velocidade da onda P: Vidro

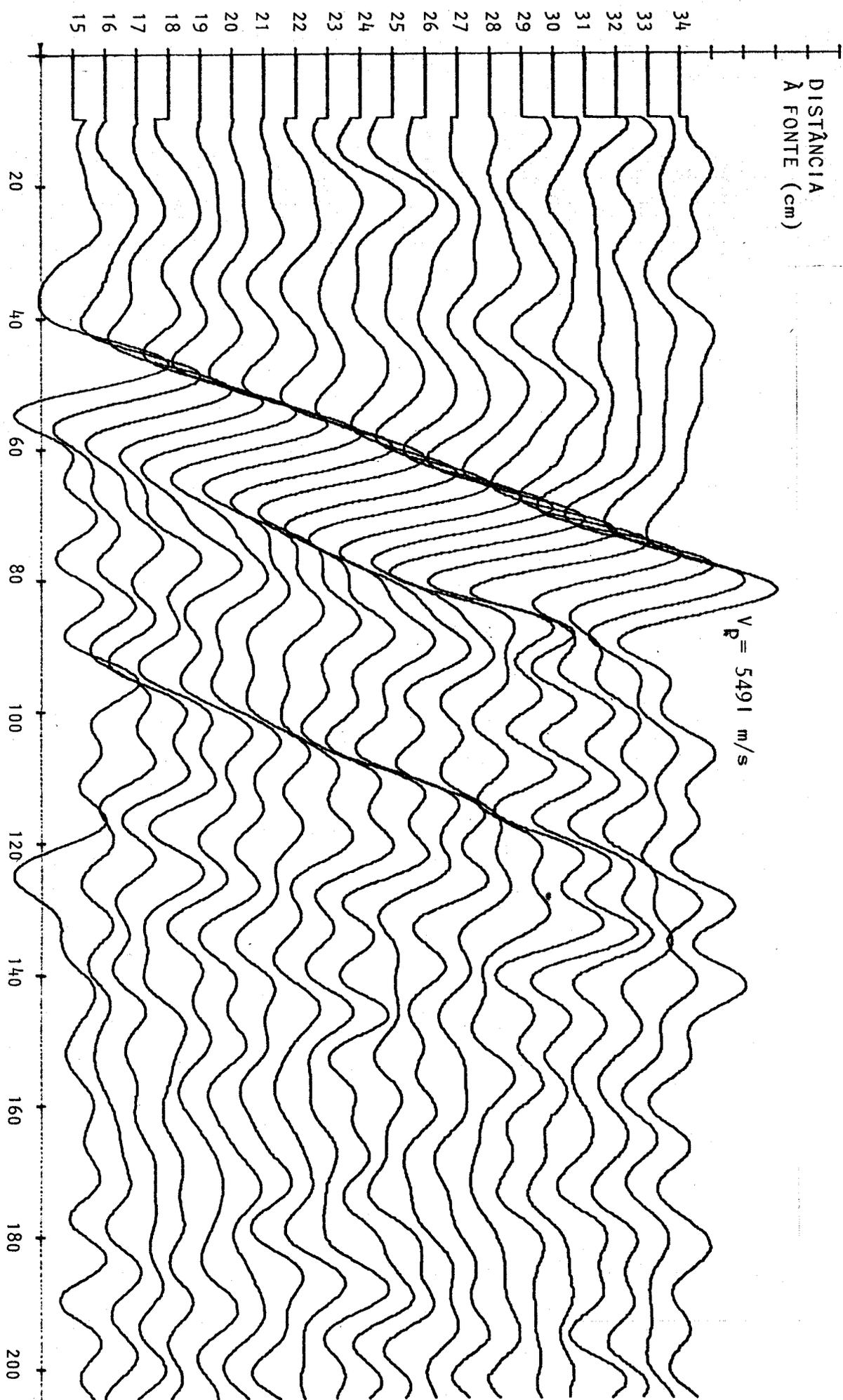


Fig.47 - Velocidade da onda P: Alumínio

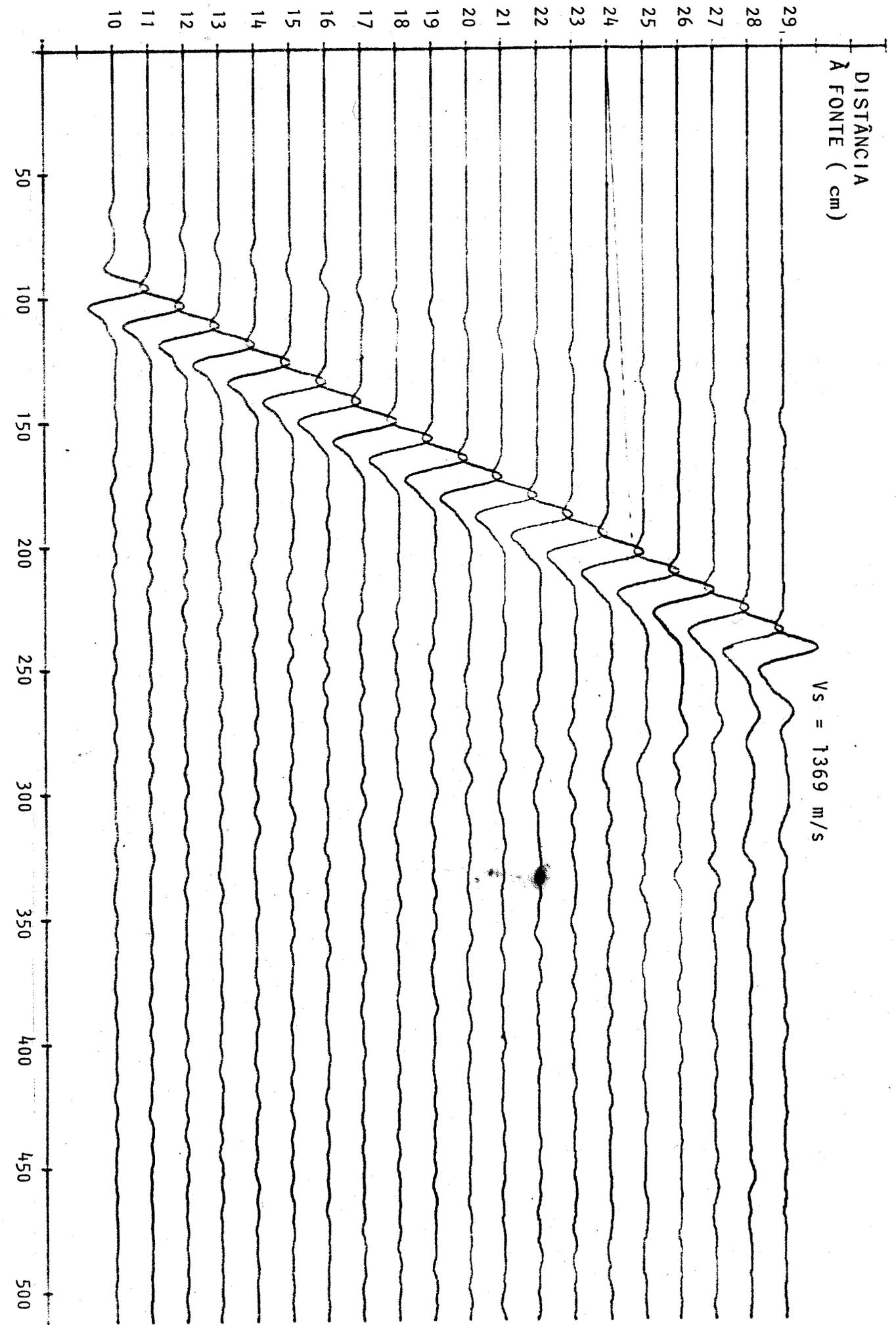


Fig. 48 - Velocidade da onda S: Acrílico 2mm

DISTÂNCIA
λ FONTE (cm)

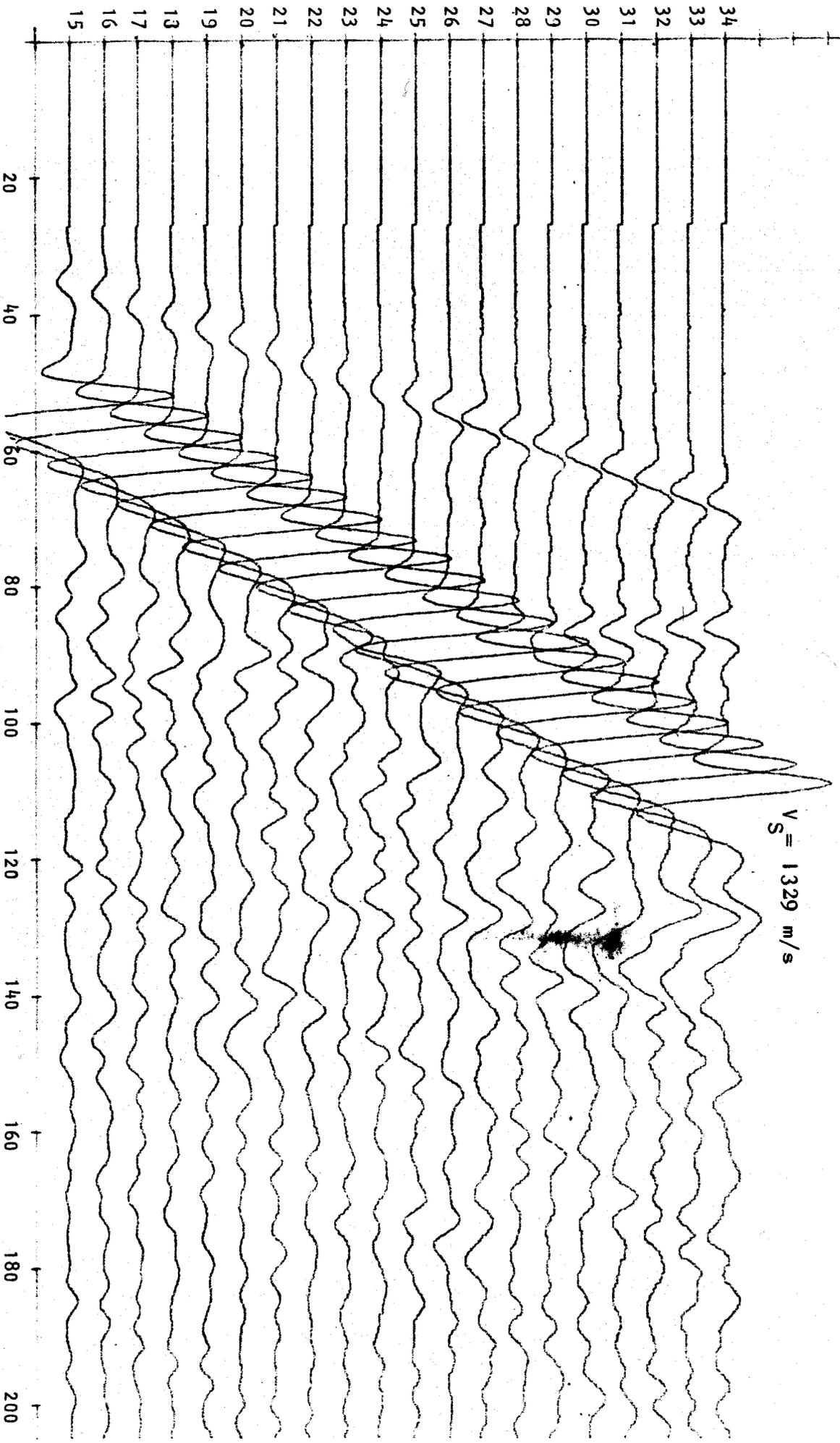


Fig. 49- Velocidade da onda S: Acrílico 3mm.

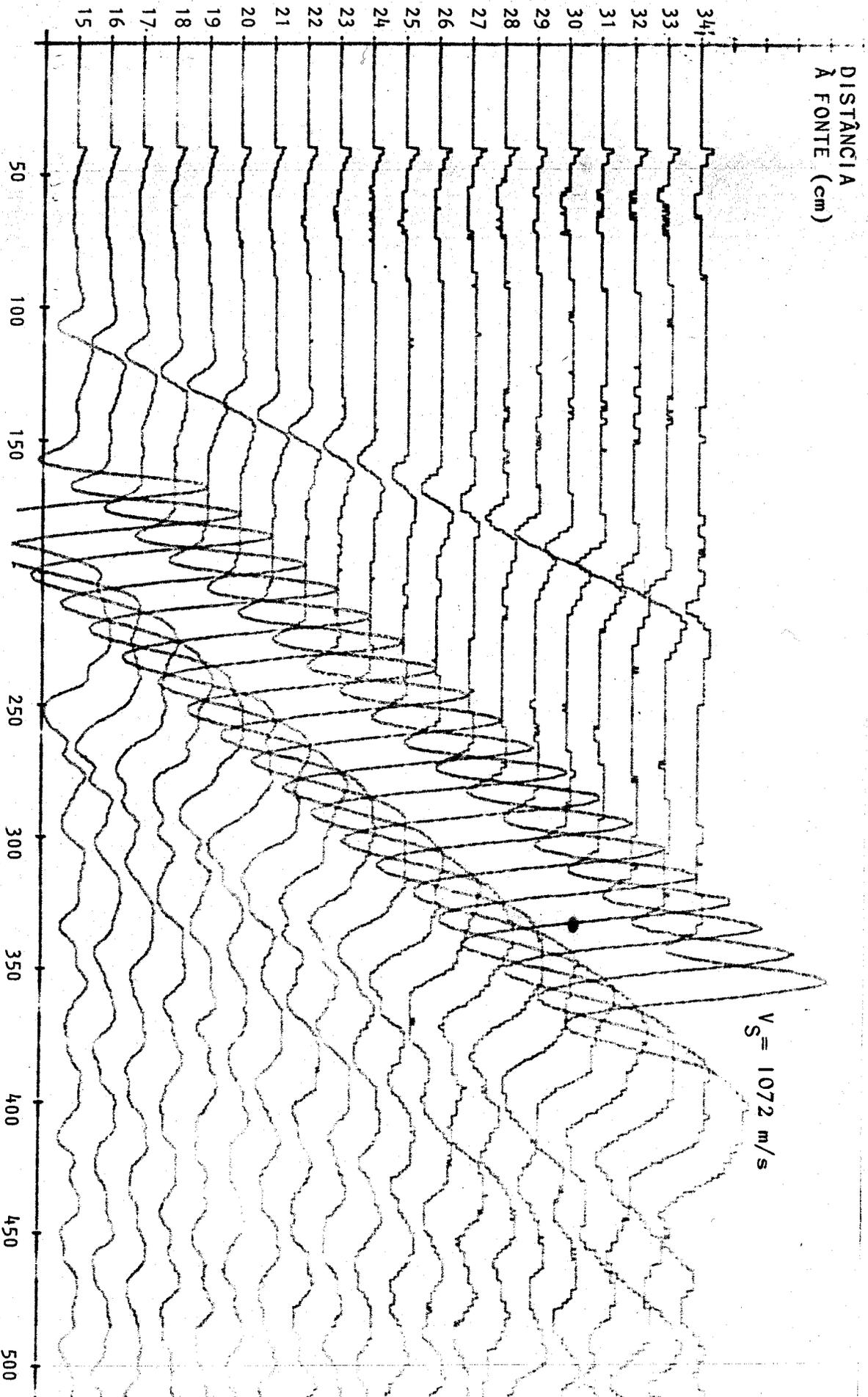


Fig. 50 - Velocidade da onda S: PVC.

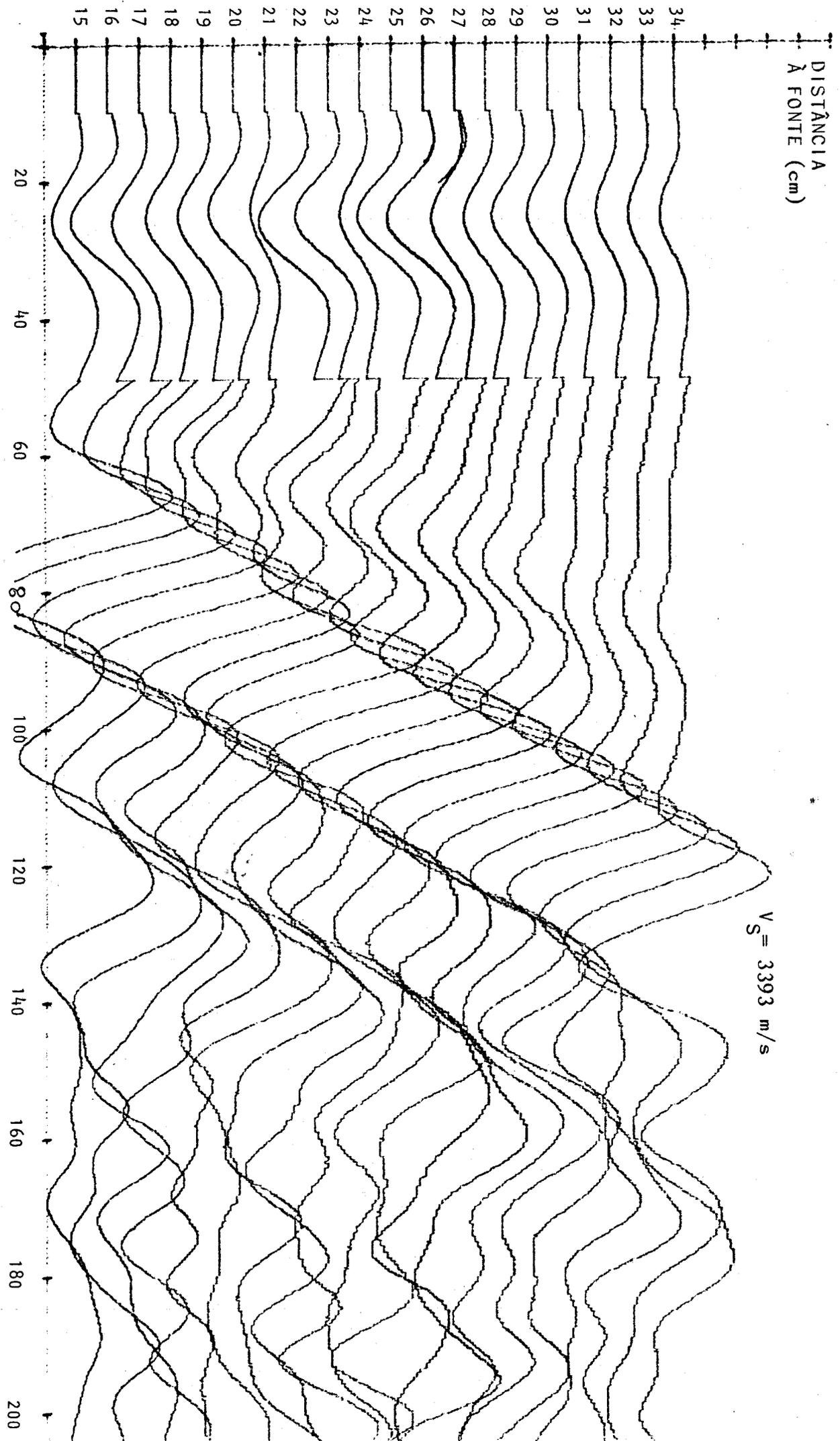


Fig. 51- Velocidade da onda S: Vidro.

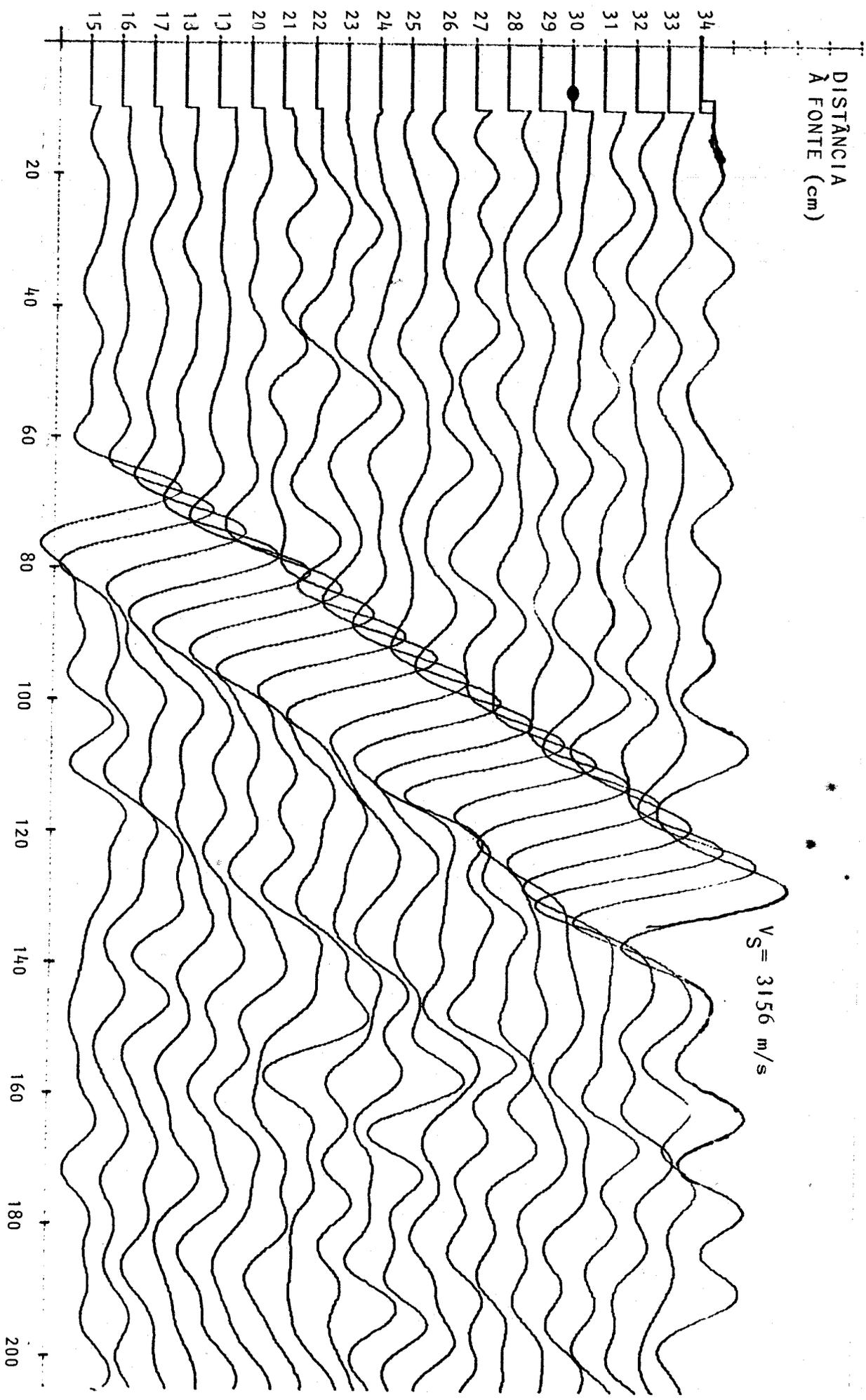


Fig. 52- Velocidade da onda S : Alumínio.

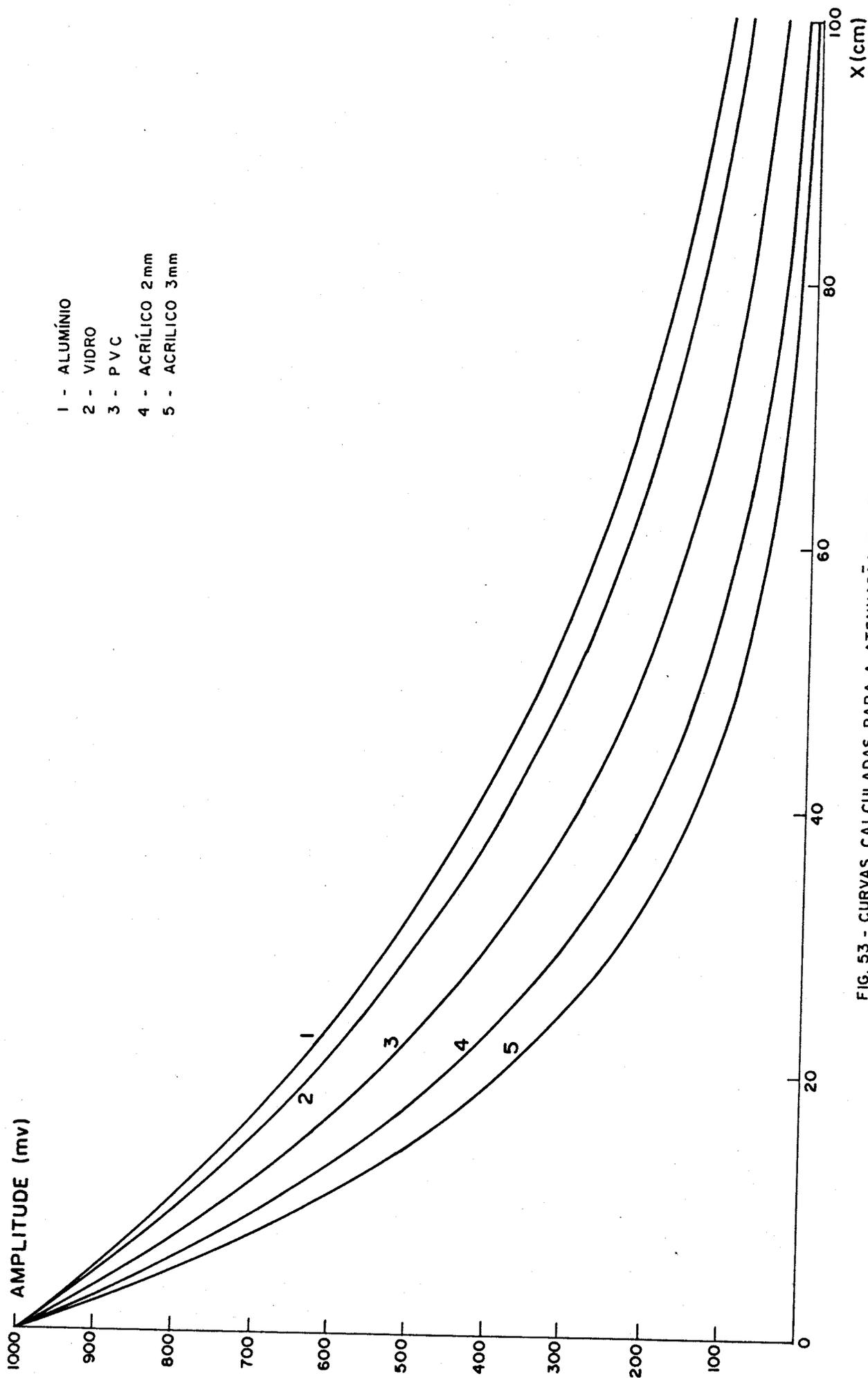


FIG. 53 - CURVAS CALCULADAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA P.

com respeito ao eixo do tempo t , dadas por \dots , determinam os valores para as velocidades das ondas. Portanto, a maior inclinação das retas VP com relação as retas VS, indicam a maior rapidez para as ondas P, isto é $VP > VS$. Os valores para essas velocidades são mostrados em suas respectivas seções, e, apresentadas também na tab. 4 juntamente com os valores para os seus comprimentos de onda (λ). Os valores para λ são obtidos da relação $\lambda = \frac{V}{f}$, onde $f = 41\text{kHz}$ e V é a velocidade da onda. Na tabela 4 são apresentadas também as razões entre V_p e V_s .

MATERIAL	P		S		V_p/V_s
	V_p (m/s)	λ (cm)	V_s (m/s)	λ (cm)	
Acrílico 2mm	2364	5.8	1361	3.3	1.74
Acrílico 3mm	2292	5.6	1329	3.2	1.72
Alumínio 2mm	5491	13.4	3156	7.7	1.74
P V C 4mm	2020	5	1072	3	1.88
Vidro 4mm	5700	14	3393	9.3	1.68

Tab. 4 - Valores para V_p , V_s , λ_p , λ_s e V_p/V_s

Comparando os valores obtidos aqui para V_p e V_s , Tab. 4, com aqueles dados na Tab. 3 (sendo $V_p = V_{p2-D}$), podemos observar: Para PVC, as velocidades V_s nas duas tabelas apresentam valores bastante próximos entre si, enquanto que para V_p alguns valores entre elas mostram-se bem diferentes; possivelmente devido a erros na medida de V_p executadas neste trabalho. O alumínio, mostra valores muito próximos, tanto para V_p quanto para V_s , entre as tabelas. O acrílico é apresentado na tab. 3 como plexi-glass, e tem ali registrado somente o valor para V_p (3-d), não sendo possível assim, fazermos a comparação com os valores obtidos aqui. O vidro não apresenta-se registrado na tab. 3, não sendo possível também, a comparação de nossos resultados com outros

anteriores. Os valores obtidos para a razão VP/VS, foram de aproximadamente $\sqrt{3}$ próximos portanto, daquele citado em Dobrin, 1976 e dos valores obtidos na tab. 3. $\sqrt{3}$ é também o valor do número de Poisson para meios ideal-elásticos; excessão é feita, para PVC, cuja razão VP/VS foi de 1.88, o que pode ter sido causada por erro nas medidas de VP.

Aa diferenças de velocidade entre os acrílicos de 2mm e 3mm, mostram a influência da espessura nas impedâncias acústicas dos meios, $Z = \rho V$ (34); como descrito por Angona, 1960. O acrílico (2mm) mostrou as velocidades VP e VS, 3.1% e 2.4% respectivamente, maiores que suas correspondentes velocidades no acrílico (3mm).

De acordo com os resultados, podemos classificar relativamente os materiais como: de baixa velocidade os acrílicos de 2mm e 3mm e o PVC, e de alta velocidade o alumínio e o vidro.

Como as espessuras dos meios influem em suas velocidades, uma comparação nesse aspecto entre todos os cinco materiais aqui utilizados, não é razoável, visto que estes são de espessuras diferentes. Comparamos assim, somente aqueles de mesma espessura.

5.3 Medidas da Atenuação das Ondas P e S

As medidas da atenuação das ondas P e S nos materiais, como descrito em 3.5.1.3, foram feitas determinando-se os valores para o fator de atenuação Q e o coeficiente de atenuação, das placas. As dimensões destas são dadas no modelo 1 do Apêndice I. Para a execução das medidas foi utilizado o programa 4 do Apêndice II

Os valores para Q foram calculados através da equação fonte. As eq. 37 dão as trajetórias para as ondas refletidas PP e SS, ou seja, para ângulos de incidência igual ao ângulo de reflexão ($i = r$). Estas equações, por sua vez, não dão as tra-

jetórias para as ondas PS e SP, visto que, os ângulos de incidência e de reflexão para elas não são iguais. As equações para essas ondas são mais complexas, e dependem do valor do ângulo de incidência ou de reflexão, assim, as equações para elas não são usadas aqui.

Na seção horizontal, Fig. 57, a trajetória para a onda P aparece com maior clareza que na seção vertical. Para a onda S no entanto, sua trajetória é vista perfeitamente em ambas as seções, devido ao fato dela possuir grande energia na superfície e apresentar-se aí superposta à onda Rayleigh. As ondas P aparecem registradas anteriormente às ondas S, visto que $V_P < V_S$.

As ondas diretas P e S são registradas, antes de suas correspondentes ondas refletidas, devido às ondas diretas propagarem-se diretamente da fonte ao receptor na linha de superfície, enquanto que, as ondas refletidas propagam-se na direção da interface e refletem-se de volta.

As trajetórias para as ondas diretas (P e S) e refletidas (RP e SS), em suas respectivas seções, mostraram coincidência com as curvas teóricas da Fig. 59. Isto confirma, portanto, a existência dessas ondas no modelo.

A Fig. 58, componente vertical, apresenta a trajetória de uma onda chegando mais ou menos entre 700 e 800 s. Pela posição vertical do cristal receptor (ver item 4.2), esta onda deve ter características de uma onda transversal chegando à superfície: Como a onda SS aparece um pouco acima, mais ou menos, em 900 s, a onda em questão pode ser uma onda PS. Considerando-se que o ângulo de incidência tem um valor próximo ao ângulo de reflexão, traçamos a curva para uma onda PS utilizando o programa 4 para esta condição, $i = r$. Comparando-se esta curva com a sua suposta trajetória na Fig. 59, verificou-se uma relativa 30. Após calculados Q_p e Q_s , correspondentes as ondas P e S para cada material, determinamos α_p e α_s da eq. 29. Posteriormente, esses valores foram utilizados, para traçar os gráficos do decaí

mento das amplitudes das ondas com a distância. Os valores obtidos para esses parâmetros são apresentados na Tab. 5. As curvas para o decaimento das amplitudes para P e S são dados pela eq. 29, e são mostrados respectivamente nas Figs. 53 e 55. As Figs. 54 e 56 são as curvas para o decaimento real, medido nas placas, para as duas ondas, respectivamente P e S. A amplitude inicial, (E_0) tem o mesmo valor: 1 volt para todas as curvas.

MATERIAL		ONDA P		ONDA S	
		Q_p (dB ⁻¹)	α_p (dB/m)	Q_s (dB ⁻¹)	α_s (dB/m)
Acrílico	2 mm	13.7	4.0	13.7	7.0
Acrílico	3 mm	11.6	4.8	10.8	8.9
Alumínio	2 mm	9.8	2.4	18.3	2.2
P V C	4 mm	20.7	3.1	17.0	7.1
Vidro	4 mm	10.5	2.2	14.8	2.6

Tab. 5 - Valores para Q_p , Q_s , α_p e α_s .

Notamos que para os materiais de baixa velocidade, acrílico e PVC, o coeficiente de atenuação para a onda S é de quase o dobro do coeficiente para a onda P. Enquanto que α_p é aproximadamente igual a α_s , para o vidro e o alumínio. Isso mostra que as velocidades das ondas, influenciam bastante nos valores dos coeficientes de atenuação, visto que, para Q_p aproximadamente igual a Q_s , $\alpha_s \approx 2 \alpha_p$.

De uma maneira geral, classificamos como materiais de grande atenuação os acrílicos (2m e 3m) e o PVC, e de média atenuação o vidro e o alumínio.

Comparando-se as curvas teóricas, Figs 53 a 55 , com as curvas medidas, Figs. 54 a 56, notamos que para a onda P os valores para as amplitudes entre estas duas curvas mostraram diferenças de até 20%. Para as ondas S, estas curvas mostraram , diferenças menores. Estas diferenças nos valores entre as curvas teóricas e reais, podem ter sido causadas por erros nas tomadas de medida e pelo espalhamento das ondas, já que isso não foi levado em conta no cálculo das curvas teóricas.

5.4 Respostas ao Modelo de uma Camada com Interface Plana

Para este modelo, descrito em 3.5.2.1 e para os demais, registramos as trajetórias de suas ondas sísmicas em duas seções, uma para a componente vertical e outra para a componente horizontal, definidas no início deste capítulo. As dimensões para o modelo cuja configuração é mostrada na Fig. 18, são as mesmas dadas no modelo 1 do Apêndice I para o acrílico (3mm). As medidas foram tomadas na linha de superfície, iniciadas no ponto 1E à esquerda da fonte, e terminadas no ponto 16D à direita da fonte, Fig. 18. Para a execução dessas medidas e o traçamento das seções, utilizamos o programa 4 do Apêndice II.

As seções para as componentes horizontal e vertical são mostradas nas Figs. 57 e 58, respectivamente. Estas duas seções mostram as trajetórias para as ondas diretas e refletidas , que chegam na superfície do modelo. Elas são registradas nas seções, para diversas distâncias fonte-receptor, e em função dos seus tempos de chegada.

A Fig. 59 representa as curvas tempo-distância, calculadas para as trajetórias das ondas P e S. Essas curvas são dadas pelas eqs. 36 e 37, baseadas nas velocidades das ondas P e S no modelo e, na distância fonte-receptor. As curvas para as ondas diretas são retas, com inclinação dada por $V = x/t$, isto é, afastam-se do eixo do tempo à medida que se distanciam da coincidência entre ambos. Assim, a onda registrada pode realmente ser uma onda PS, na condição de $i = r$.

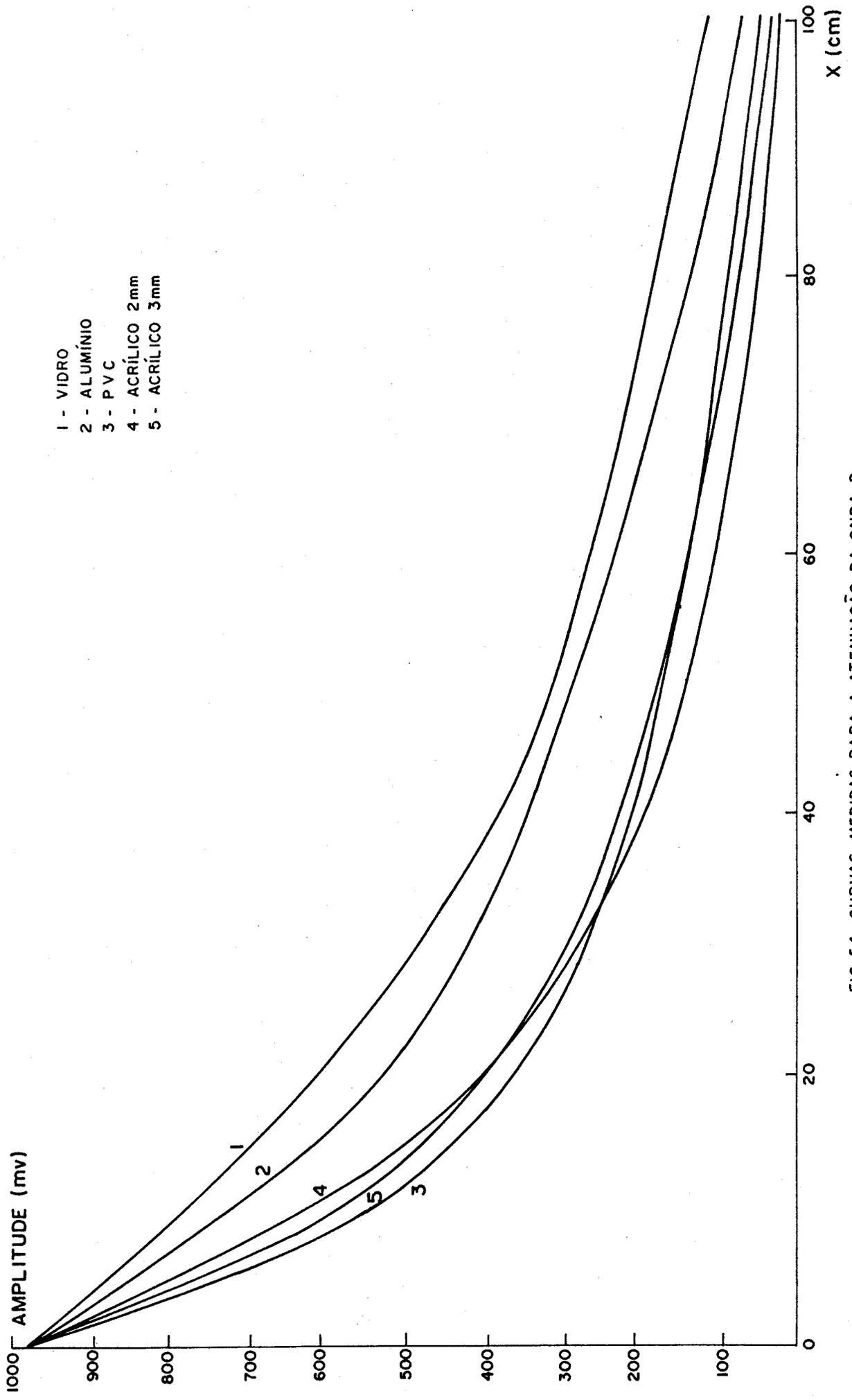


FIG. 54 - CURVAS MEDIDAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA P.

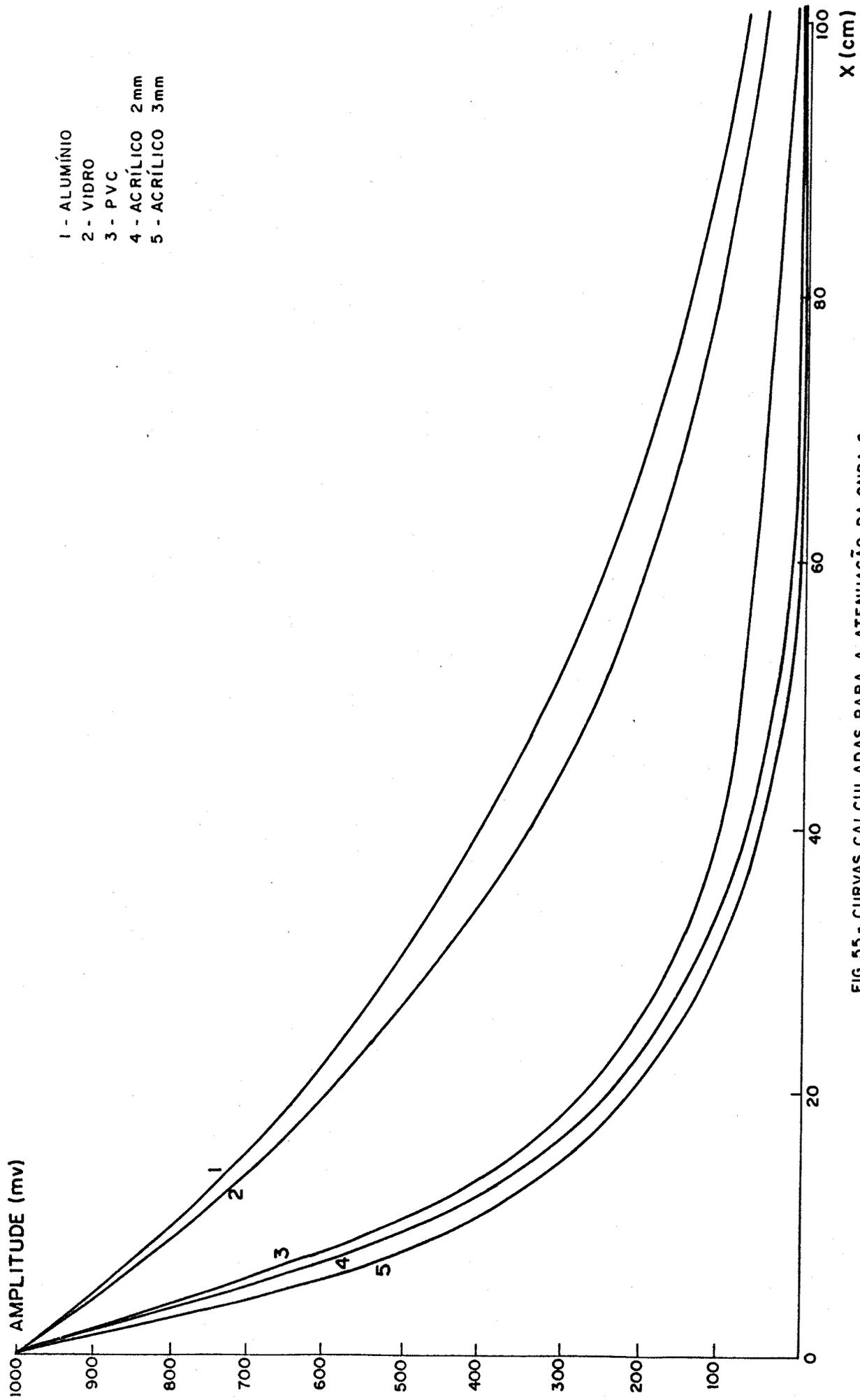


FIG. 55 - CURVAS CALCULADAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA S.

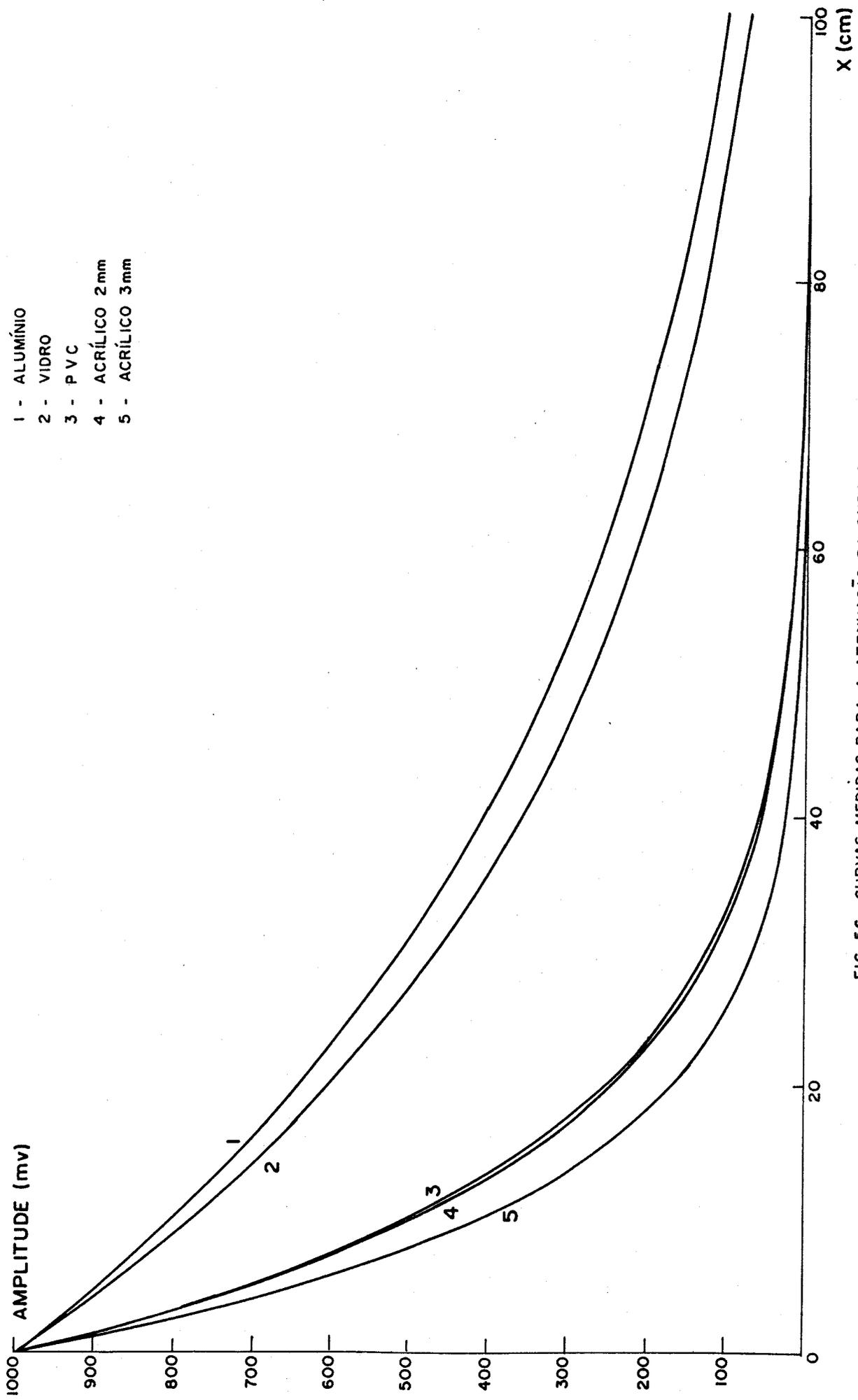


FIG. 56 - CURVAS MEDIDAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA S.

TEMPO (us)

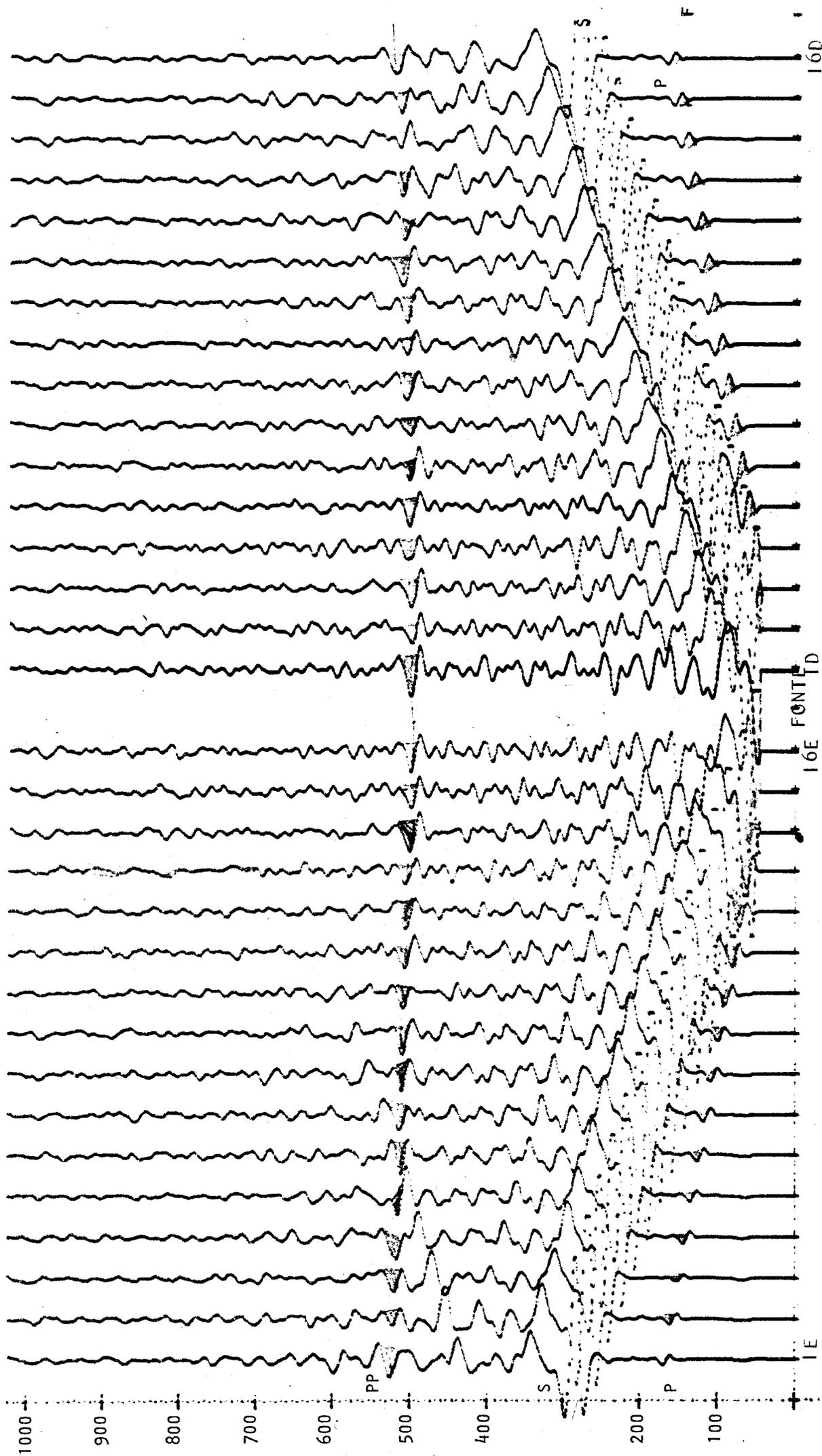


Fig.57 - Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface plana - componente horizontal.

DISTANCIA A FONTE

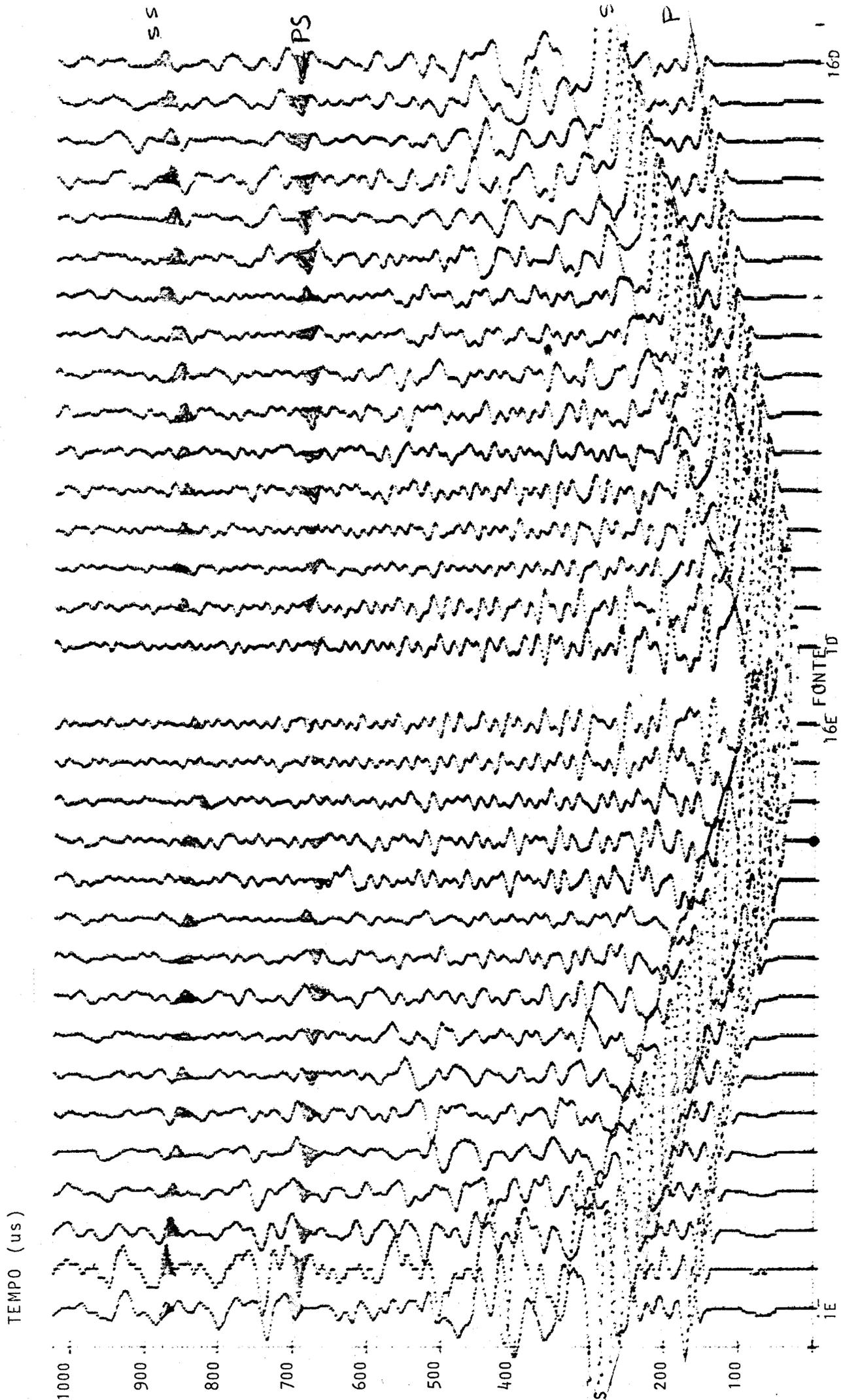


Fig. 58 - Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface plana - componente vertical.

DISTÂNCIA A FONTE

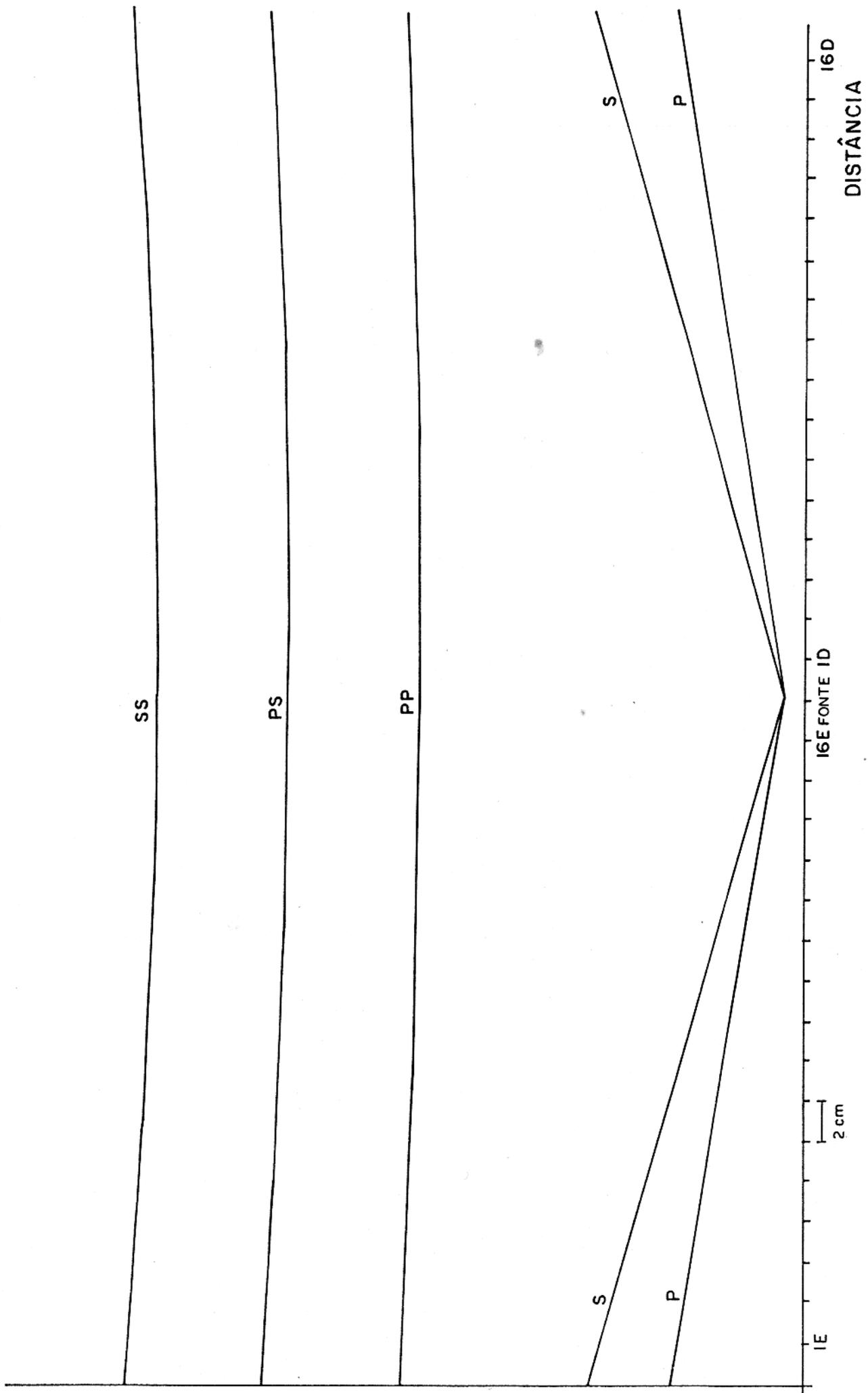


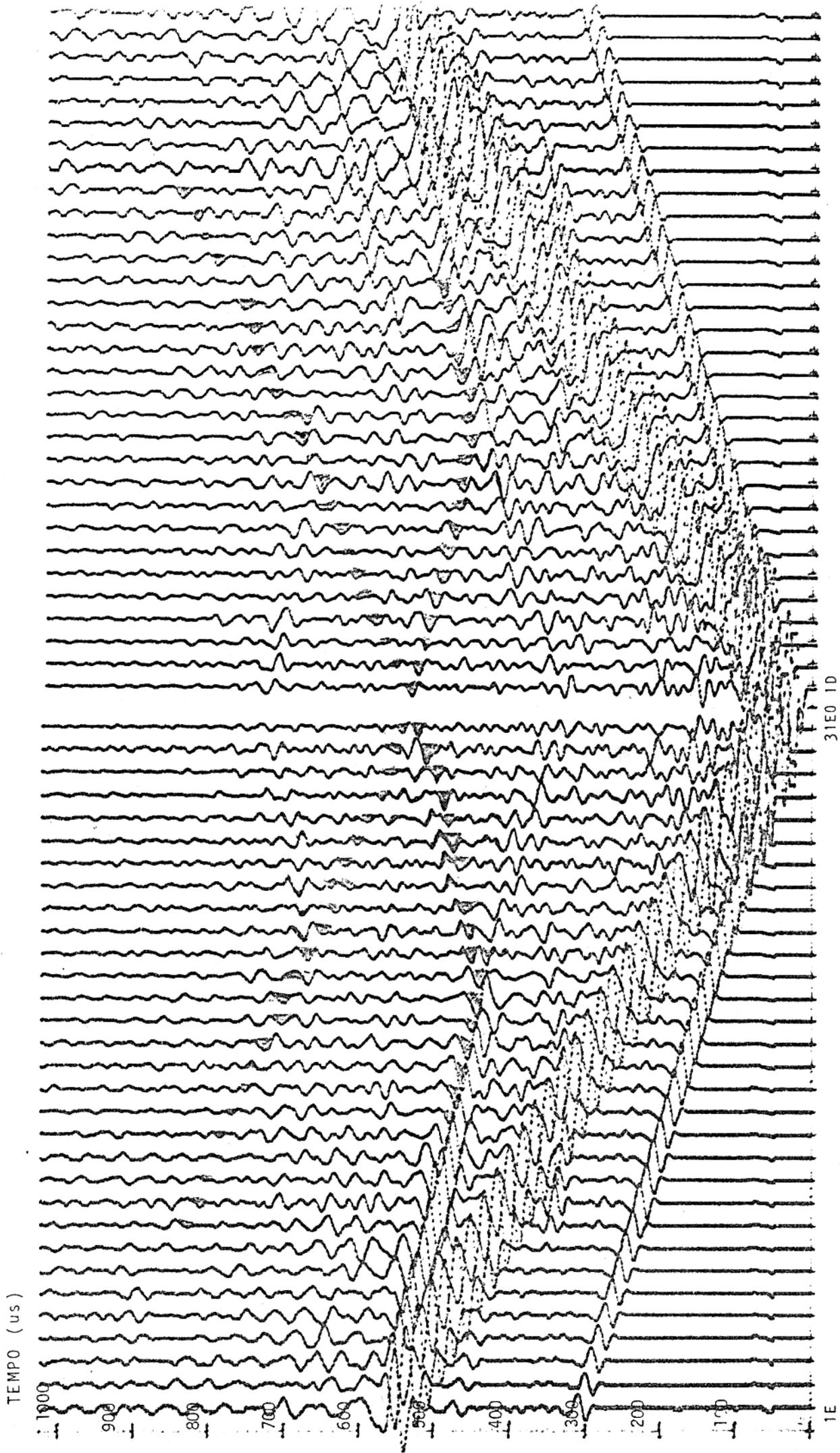
FIG. 59 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE UMA CAMADA, INTERFACE PLANA.

5.5 Modelo de uma Camada com Interface Curvada

Este modelo, descrito em 3.5.2.2, é o de uma estrutura sinclinal. As seções vertical e horizontal determinadas para ele, mostram as trajetórias para as ondas diretas e, as refletidas em sua interface. A configuração para o modelo é mostrada na Fig. 19, e suas dimensões são dadas no modelo 2 do apêndice I. Essas medidas foram tomadas, na linha de superfície do modelo, iniciando-se no ponto 1E e terminando no ponto 31D, como mostrado na fig. 19. Para isso, e para o traçamento das seções utilizamos o programa 6 do Apêndice II.

As seções para as componentes horizontal e vertical, são mostradas, respectivamente nas figs. 60 e 61. A Fig. 62, mostra as curvas tempo-distância, calculadas para as trajetórias das ondas refletidas, PP e SS neste modelo. O cálculo das curvas foi realizado para 15 pontos de interface côncava do Sinclinal, mostrada em escala reduzida na Fig. 63. Para cada um desses pontos, determinamos os comprimentos dos raios incidente e refletido. Os tempos de chegada da onda refletida na superfície, são dadas então, por $t = \frac{(X_i + X_r)}{V}$, onde X_i e X_r são os comprimentos dos raios incidentes e refletido, respectivamente, e V é a velocidade da onda P ou S. Como a estrutura é simétrica em relação a normal à fonte, os resultados para os pontos tomados a esquerda daquela normal, são válidos também para os seus pontos correspondentes à direita, Fig. 63. As curvas tempo-distância obtidas, Fig. 62, destacam três contornos (cáusticas) para cada onda: PP (PP1, PP2, e PP3) e SS (SS1, SS2 e SS3). Estas cáusticas assemelham-se àquelas mostradas na Fig. 19b, para o mesmo modelo. As cáusticas PP1 e SS1, representam as reflexões na parte correspondente à AB na interface; PP2 e SS2 representam as reflexões em CD; e PP3 e SS3 representam as reflexões na parte central da interface,

Comparando as curvas teóricas na Fig. 62, com a



DISTANCIA A FONTE

Fig.60 - Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface curvada - componente vertical.

31E0 1D

1E

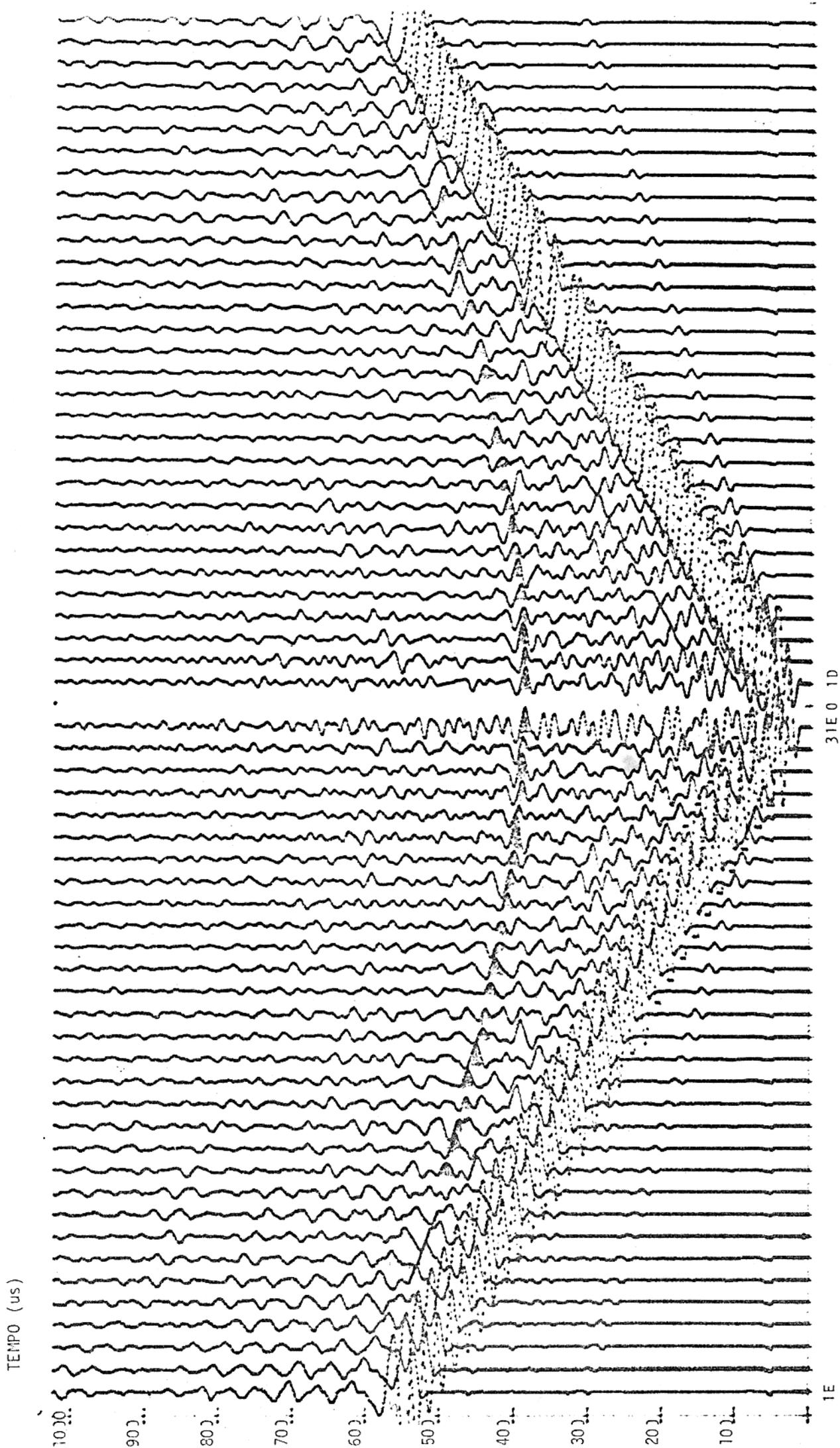


Fig. 61- Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface curvada
Componente horizontal.

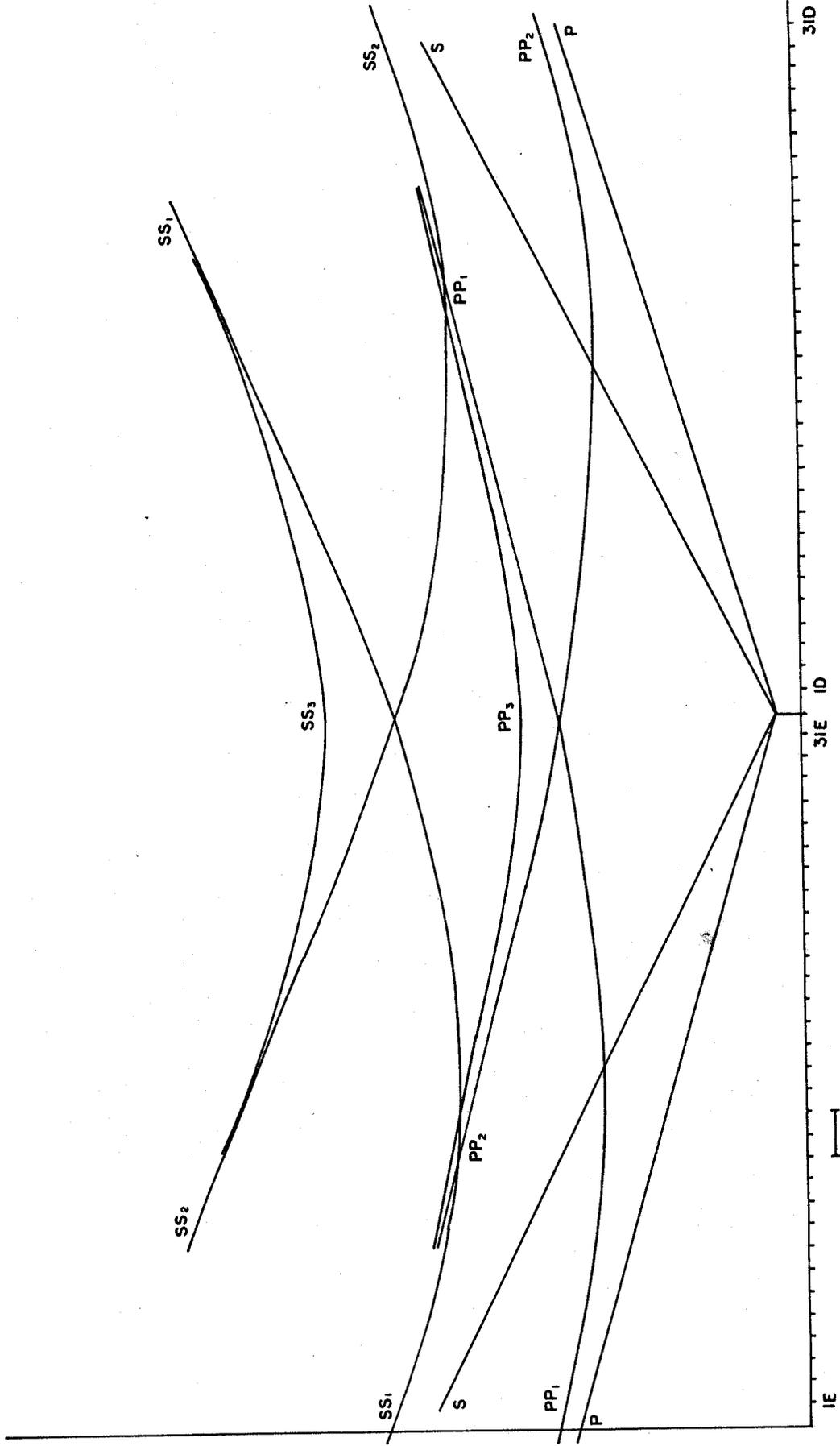


FIG. 62 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE UMA CAMADA , INTERFACE CURVADA.

seção horizontal, Fig. 60, notamos nesta, a existência da curva PP3; quanto aos registros para PP1 e PP2, não se consegue verificar suas ocorrências na seção. Para a seção vertical, Fig. 61, verifica-se para a onda SS, o inverso, ou seja, as cáusticas SS1 e SS2 são percebidas razoavelmente, enquanto que os registros para SS3 não são visíveis. A provável explicação para isso, está relacionada à irradiação das ondas P e S no modelo. Como mostrado, em 3.5.1 e 5.1, para a posição central da fonte no modelo, as ondas P irradiam-se com maior energia justamente na direção da parte mais central da concavidade, ou seja, BC na Fig. 63. As reflexões em BC como visto aqui, são representadas para onda P por PP3. As ondas S por sua vez, irradiam-se com maior energia nas direções entre $\pm 30^\circ$ e 60° , atingindo dessa forma as partes da interface denotadas por AB, e CD, na Fig. 63. As reflexões nessas partes são representadas, para a onda S por SS1 e SS2. Assim, PP3, SS1 e SS2 são mais visíveis que as demais curvas (PP1, PP2 e SS3). Estas representam portanto, as partes da interface fracamente atingidas pelas ondas, e cujas reflexões, atenuam-se durante seus percursos.

As trajetórias PP3, SS1 e SS2, coincidiram razoavelmente com as curvas calculadas na Fig. 62, ratificando portanto, a semelhança com as curvas previstas na Fig. 19b.

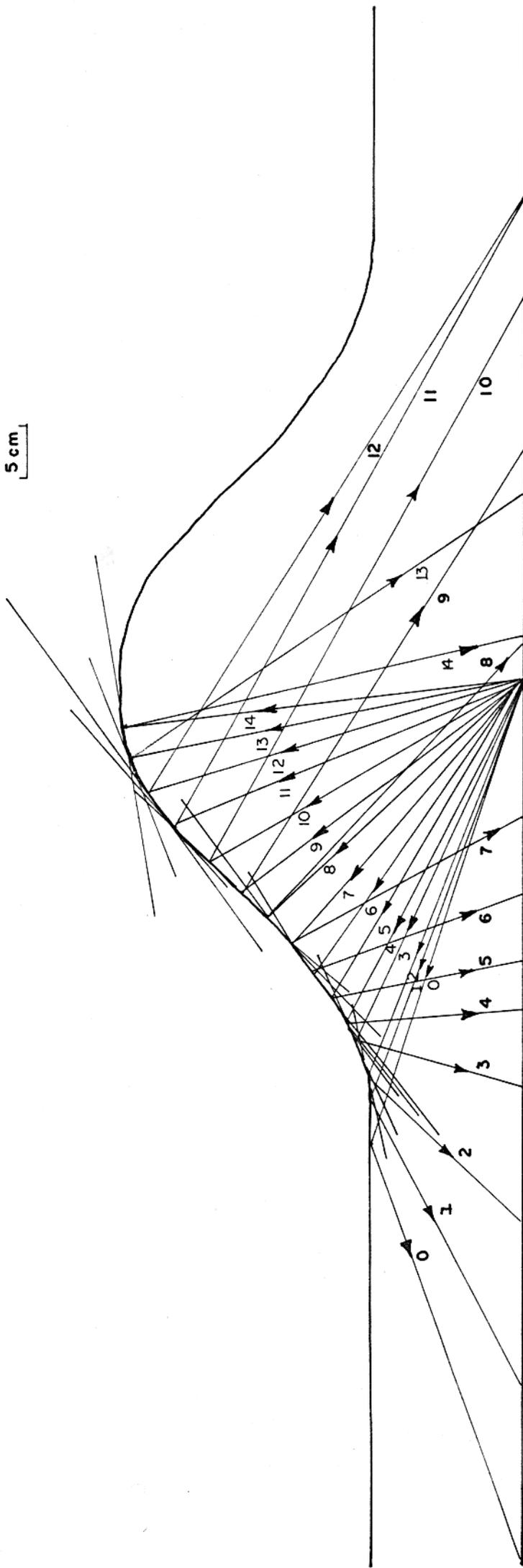
5.6 Modelo de 2 camadas com Interface Plana.

Como descrito em 3.5.2.3 este modelo representa uma seção vertical de duas camadas (diferentes). Para isso foram testados, dois modelos com materiais diferentes, PVC-vidro e acrílico-alumínio. Através da determinação de suas seções sísmicas, identificamos as trajetórias para as ondas P e S, refletidas e refratadas na interface dos modelos. A configuração para os modelos é mostrada na Fig. 21, e suas dimensões são dadas no modelo 3 do Apêndice I. As medidas tomadas tem início no ponto 1 e término no ponto 63, Fig. 21.

As seções para as componentes horizontal e vertical,

FIG. 63 - MODELO DE INTERFACE CURVADA EM ESCALA REDUZIDA 1:5

5 cm



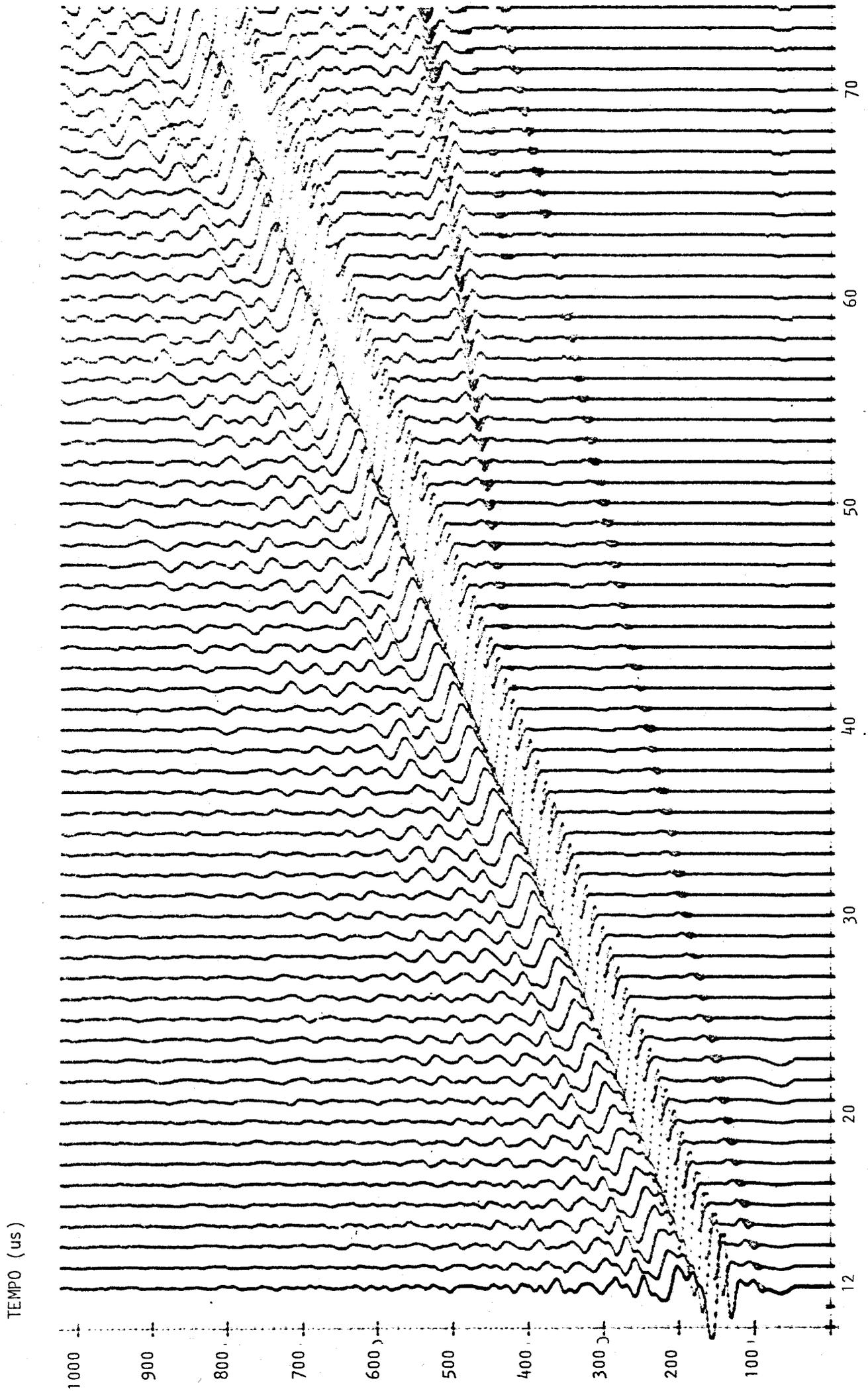


Fig. 64 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (PVC- vidro)
componente horizontal com interface plana.

são mostradas respectivamente nas Figs. 64 e 65 para o PVC vidro. Para o acrílico-alumínio, as seções são mostradas nas Figs 67 e 68. As medidas e os traçados para essas seções foram feitos através do programa 6, Apêndice II.

As Figs. 66 e 69 mostram as curvas t-d calculadas, para as ondas no PVC-vidro e acrílico-alumínio, respectivamente. Essas curvas foram determinadas através do programa 8, Apêndice II. Elas são baseadas na equação 37 para as ondas refletidas, e na equação 38 para as ondas refratadas respectivamente (Head Waves).

As trajetórias para as ondas diretas P e S, com a fonte na extremidade do modelo, como mostrado na Fig. 21, apresentam-se como uma reta inclinada, ao invés de duas retas simétricas, como é o caso para a fonte colocada no centro do modelo.

No modelo PVC-vidro, comparando-se suas seções horizontal e vertical, Fig. 64 e 65, com a curva teórica, Fig. 66, podemos reconhecer as seguintes trajetórias nas seções: A onda refletida PP, em ambas as seções, e as ondas Ps e SS fracamente registrada na seção vertical. A onda refratada P é registrada na seção horizontal.

No acrílico-alumínio comparando-se suas seções Figs 67 e 68 com a curva teórica Fig. 69, podemos reconhecer o seguinte: A onda refletida PP em ambas as seções, e as ondas PS e SS apenas na seção vertical. A onda refratada P em ambas as seções, e a onda refratada S na seção vertical.

As seções nas Figs. 67 e 68 apresentam ainda uma onda situada entre a onda PP e a onda S refratada, a qual foi identificada como sendo possivelmente a onda P1S2P1, isto é, uma onda P no meio 1 que incide na interface, refrata-se no meio 2 como onda S, e retorna ao meio 1 como onda P. A seção horizontal, apresenta também sinais de grande amplitude, paralelos a onda S que encobrem grande parte da seção. Esses ruídos são causados pela reverberação da fonte.

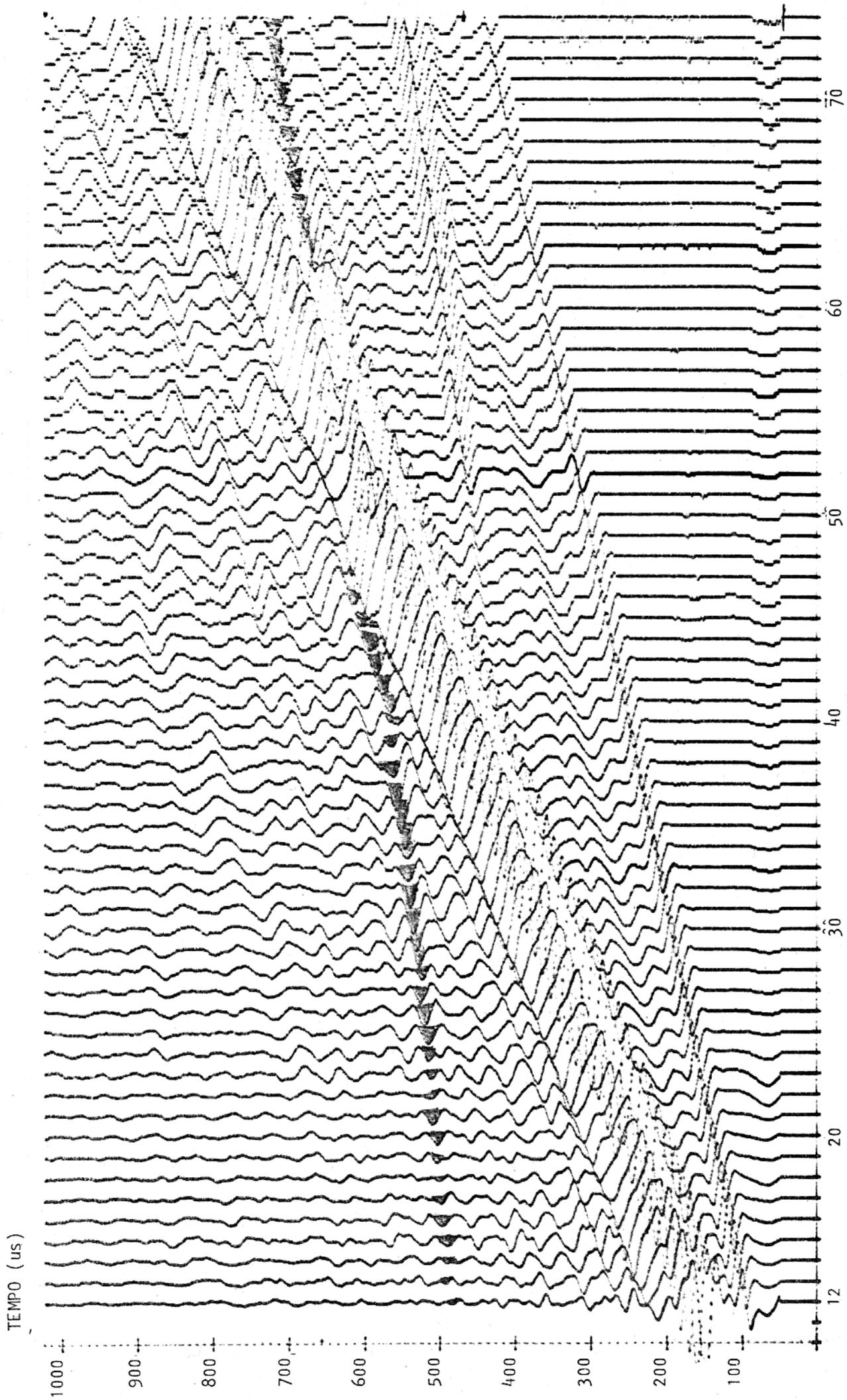


Fig. 65 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (PVC-vidro) com interface plana - componente vertical

DISTÂNCIA A FONTE (cm)

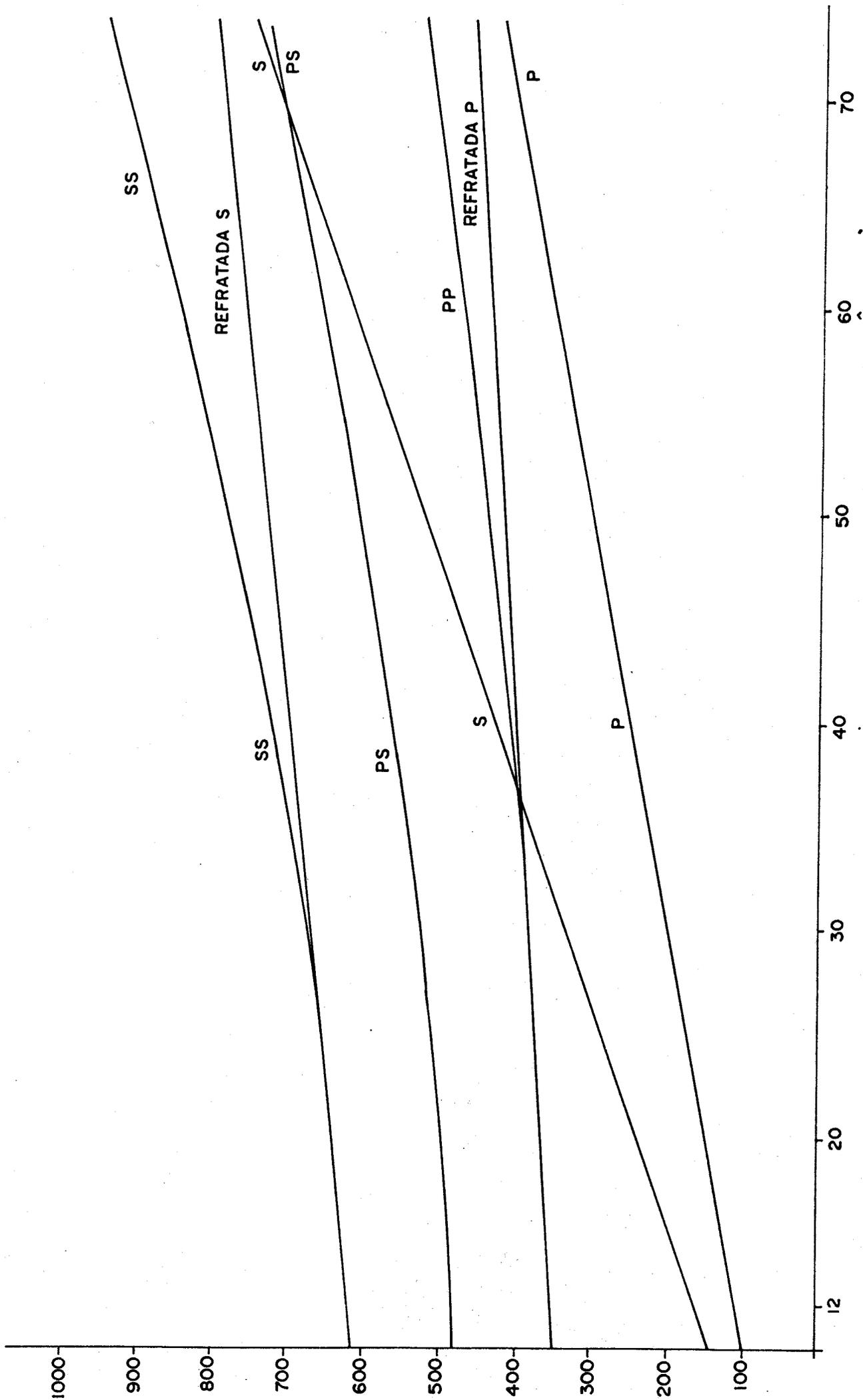


FIG. 66 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE PLANA (PVC - VIDRO).

TEMPO (us)

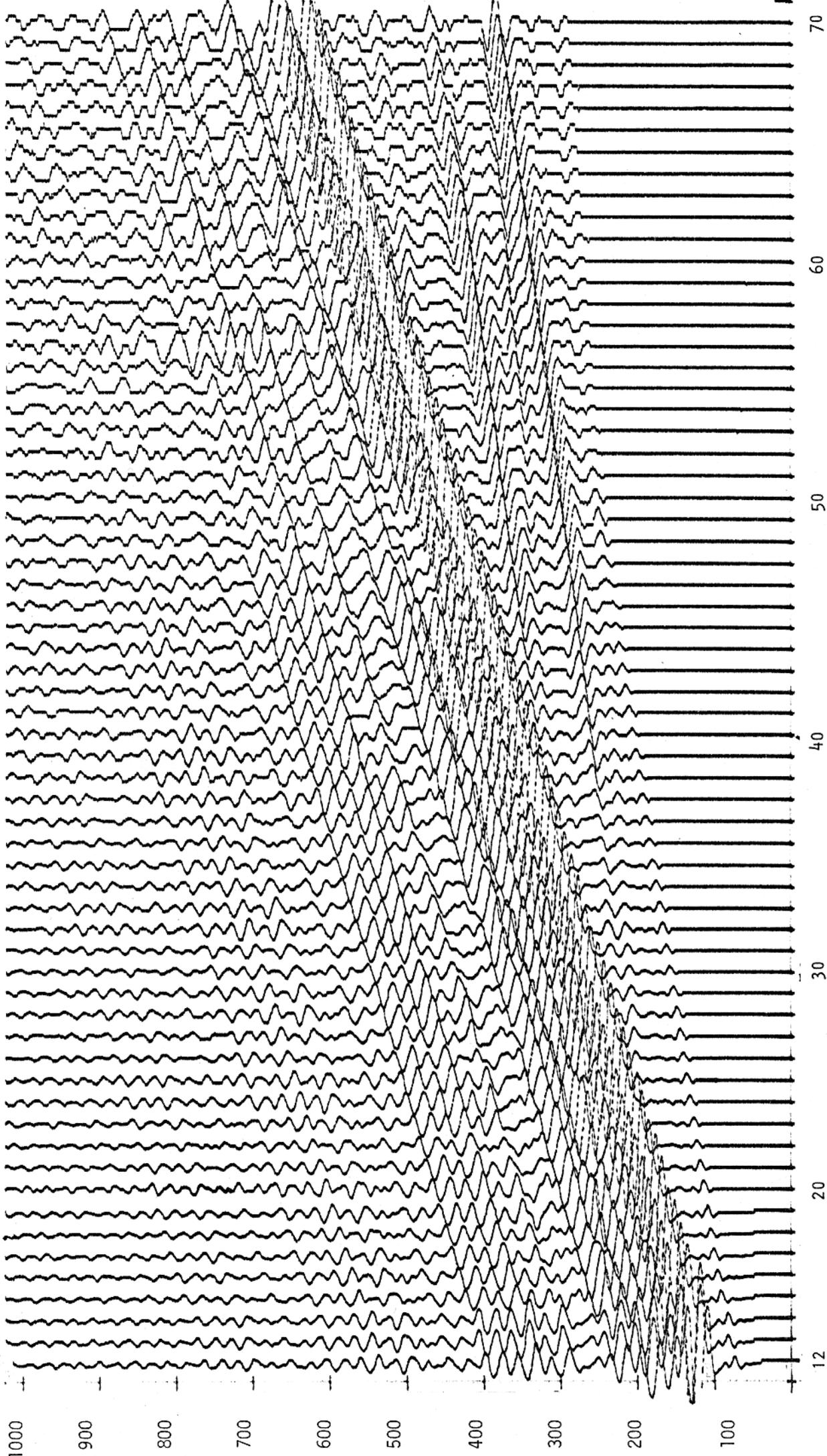


Fig. 67- Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (acrílico-alumínio)
Componente horizontal com interface plana.

DISTÂNCIA A FONTE (cm)

TEMPO (us)

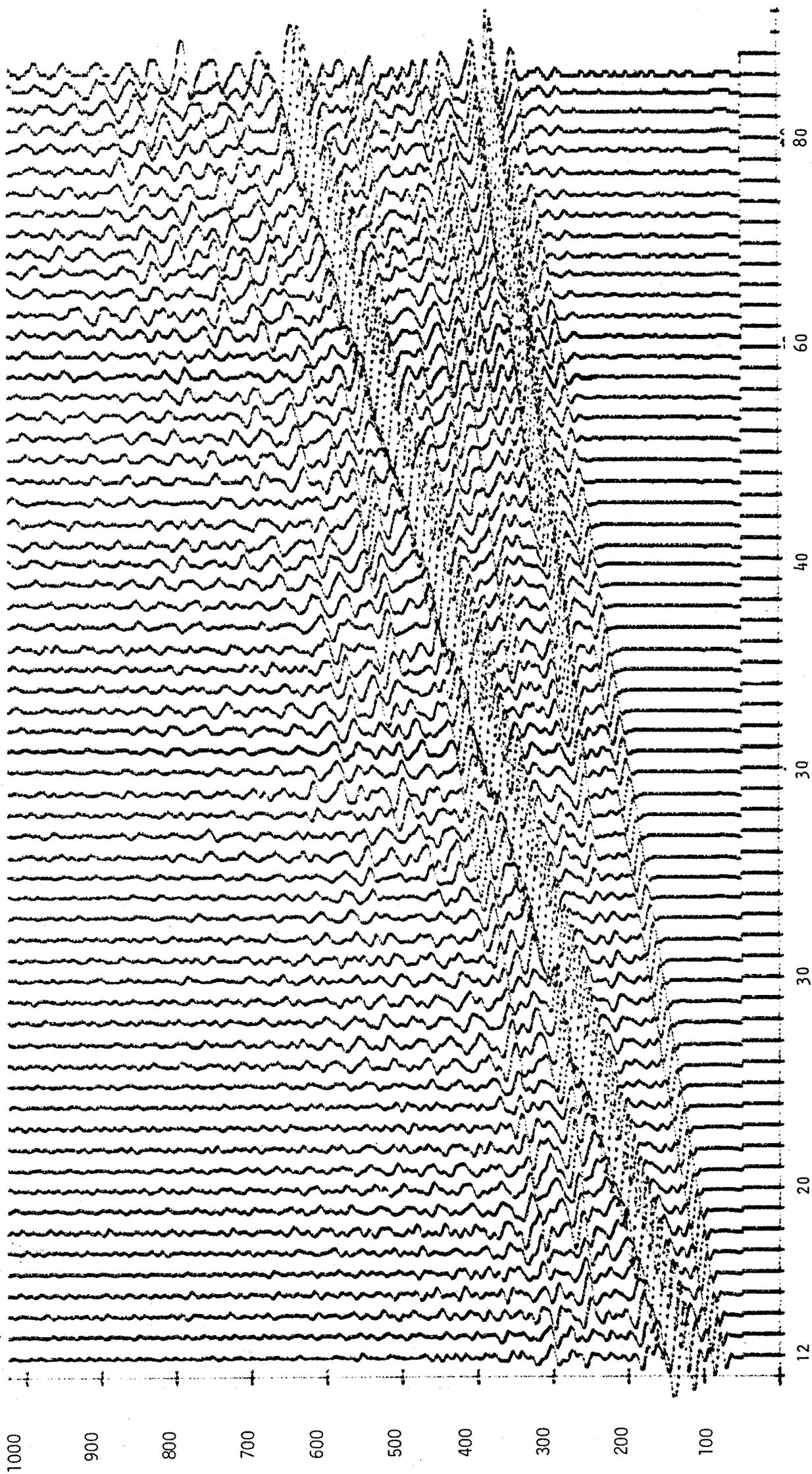


Fig. 68 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (acrílico-alumínio) componente vertical com interface plana.

DISTÂNCIA À FONTE (cm)

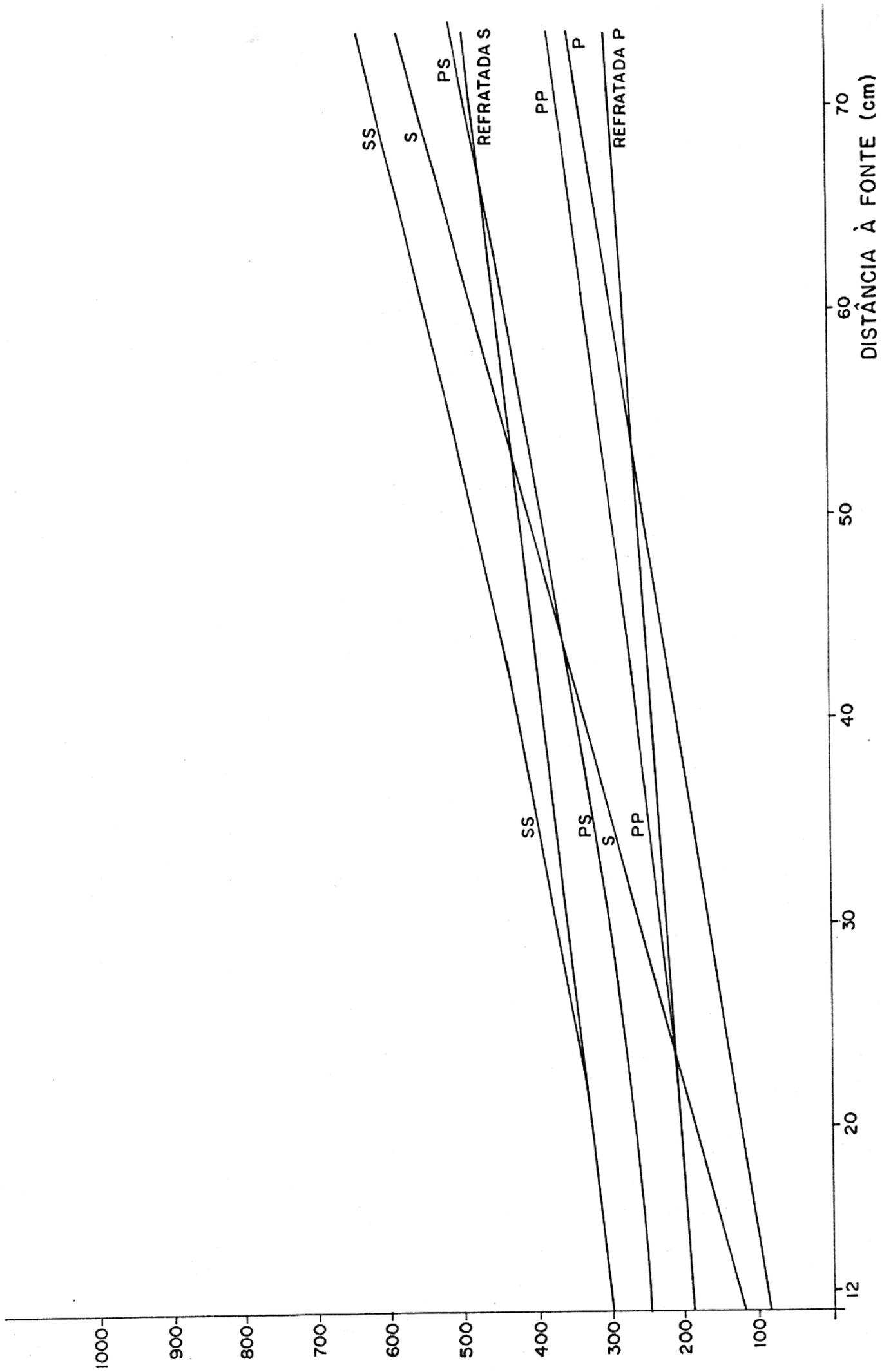


FIG. 69 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE PLANA (ACRÍLICO-ALUMÍNIO).

2.7 Modelo de 2 Camadas com Interface Descontínua (Falha)

Este modelo de duas camadas, simulando um plano de falha foi descrito em 3.5.2.4. Os materiais utilizados para isso foram PVC e o vidro, sendo o PVC o meio (1) e o vidro o meio (2). Pela determinação e o reconhecimento das seções para este modelo, Fig. 23, identificamos os efeitos produzidos pelo ponto de descontinuidade B, nas ondas P e S, bem como, as reflexões das interfaces 1 e 2. A configuração para o modelo e para as tomadas das medidas, é mostrada na Fig. 23. Suas dimensões, são dadas na tabela 4, Apêndice I. As medidas tiveram início no ponto 1E e término no ponto 31D. As seções foram determinadas, pelo programa 6, Apêndice II.

As seções para as componentes horizontal e vertical, são mostradas na Fig 70 e 71, respectivamente. A Fig. 72 mostra as curvas teóricas para as trajetórias das ondas refletidas nas interfaces 1 e 2, e para as ondas difratada pelo ponto B. Para determinação dessas curvas, foi utilizado o programa 9, Apêndice II, baseado nas equações 37 e 39.

Comparando-se as seções obtidas, Figs. 70 e 71, com as curvas teóricas para esse modelo, Fig. 72, observamos: Para efeitos de ponto de descontinuidade B, as ondas difratadas S, na seção vertical, e as ondas difratadas P, presente em ambas as seções. As ondas refletidas são provenientes de duas interfaces de mesma natureza, mas a diferentes distância da superfície. Como o efeito de interface 1, podemos observar as ondas refletidas PP, SS e PS em ambas as seções. A interface 2, encontra-se mais afastada da superfície que a anterior; assim, os sinais de suas reflexões são mais fracos. Dessa forma, a onda SS' e PS', aparecem somente na seção vertical e a onda PP' é fracamente registrada na seção horizontal.

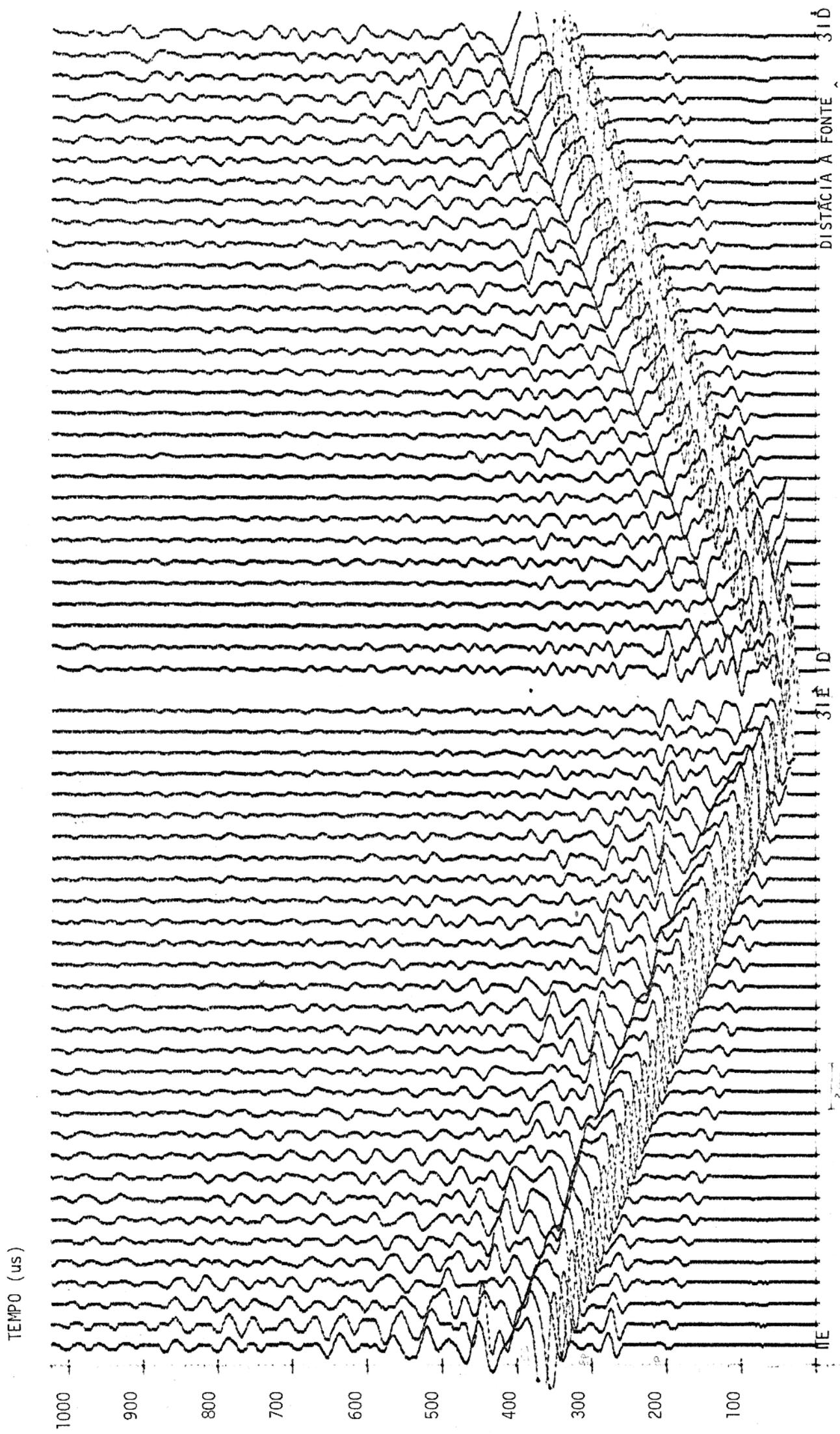


Fig. 70 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas com interface descontinua componente horizontal.

2cm

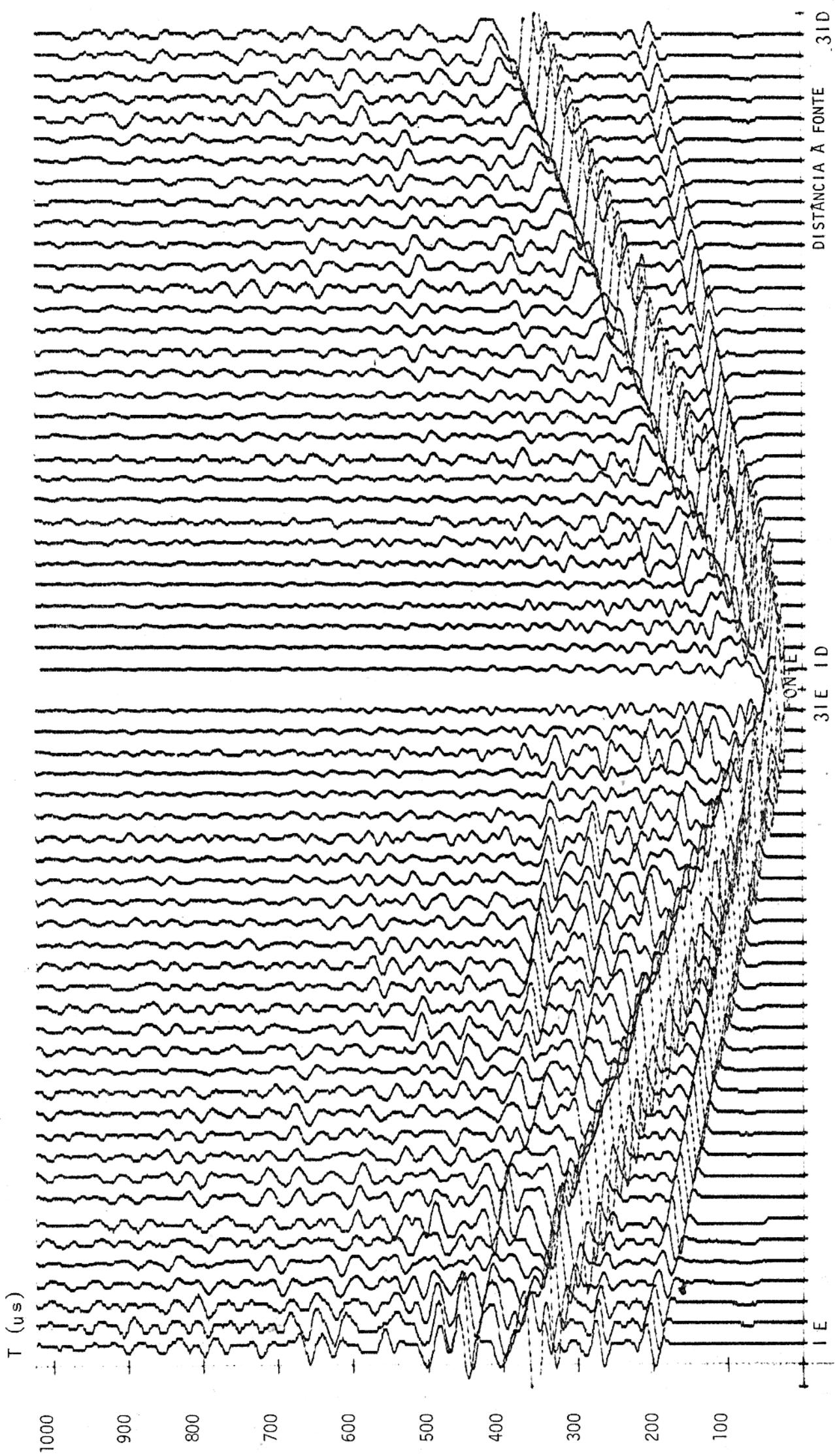


Fig. 71- Seção sísmica para o modelo de 2 camadas com interface descontinua

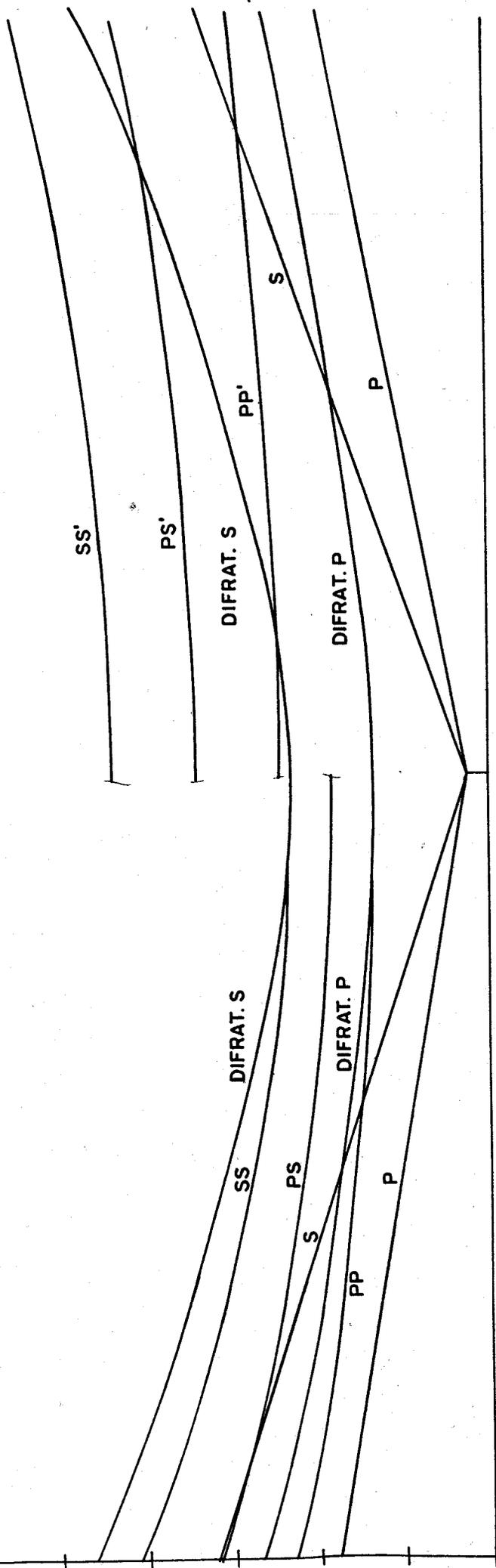


FIG. 72 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE DESCONTÍNUA.

6. CONCLUSÃO

As etapas fundamentais do funcionamento do sistema de medidas para o Modelamento Sísmico, foram divididas em cinco partes: 1º Geração do Pulso, 2º Amplificação do Pulso, 3º Recepção do Sinal Sísmico, 4º Amplificação e Filtragem do Sinal, 5º Registro e Tratamento de Dados. Dentro dessas etapas da da aparelho individualmente, funcionou a contento, de acordo com suas limitações e com suas funções no sistema. Entretanto, a análise da eficiência do Sistema como um todo é feita aqui levando-se em conta os resultados obtidos durante os testes para os modelos 2-D.

As experiências feitas com as medições dos Parâmetros Elásticos mostram-se eficientes para a determinação das Velocidades e Características de Irradiação das Ondas P e S nos materiais, o que foi comprovado na execução da segunda parte dos testes. As curvas de decaimento para essas ondas, porém, mostraram que: para modelos inhomogêneos e anisotrópicos, os coeficientes de atenuação determinados experimentalmente não devem ser generalizados para uma placa, visto que, seu fator de qualidade, (Q) apresenta diferentes valores ao longo de sua extensão.

As experiências realizadas para obtenção das seções sísmicas características de alguns modelos, mostraram a adequação do sistema para esse fim, uma vez que, o registro para as ondas P e S e suas variantes (refletidas e refratadas), mostraram concordâncias com resultados previstos para estes modelos.

Desse modo, os testes de funcionamento do sistema de medidas, apresentaram resultados que justificaram a possibilidade de sua utilização para modelos mais complexos e de maior interesse prático. Entre os trabalhos possíveis, podemos citar as medidas em modelos de mais de duas camadas, que apresentam contrastes de velocidades, densidade, espessura, etc., da mesma ordem, dos encontrados no campo. E modelos que simulem ainda, diver-

sas estruturas geológicas. Assim, poderá ser elaborado um conjunto de respostas a estes modelos, que possam servir de analogia aos trabalhos de prospecção sísmica.

Para o objetivo a que se propôs o trabalho, ou seja, a montagem do sistema e o teste de seu funcionamento em modelos simples, podemos dizer que isso foi cumprido. No entanto, melhoramentos podem ser adicionados, e entre eles citamos:

1. A substituição do micro.- computador HP-9825 por outro com maior capacidade de memória, maior rapidez no processamento, e que possua um terminal de vídeo que permita a amostragem, do sinal.
- 2.
2. A construção de um sistema eletro-mecânico que possibilite o deslocamento do receptor para um ponto determinado do modelo, sem a interferência manual. Estes melhoramentos podem agilizar sobremaneira, a execução das medidas e a obtenção das respostas no vídeo ou no papel gráfico. Além disso, o uso de um micro-computador com uma memória mais extensa, pode permitir, tratamentos tais como: Migração e Filtragem Digital.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKI, K. e RICHARD, P. - 1980 - Quantitative Seismology. Theory and Methods. San Francisco, W.H. Freeman, V. 1 e 2, 557p.
- ANGONA, F. - 1960 - Two Dimensional Modeling and its applications to Seismic Problems. Geophysics, V. 25, p. 468-482.
- BEHRENS, J. e ANSORGE, J. - 1963 - Wavefront Investigations in Model Seismology. Geophysical Prospections, V. 2, p. 459-470.
- BEHRENS, J. e DENZAU, H. - 1977 - Model Seismic Investigations of Wave Propagations in a Medium with Cyclic Layers. Publ.Inst. Geophys. Pol. Acad. SC., A-6 (117), p. 159-172.
- BEHRENS, J. e DRESEN, L. - 1982 - Zwei-Dreidimensionale Analoge Modellseismische Untersuchungen - Interpretationshilfe bei der Erkundung von Lagerstättenstrukturen. Modellverfahren bei der Interpretation Seismischer Daten (2. Mintrop-Seminar), p. 295-342.
- BEHRENS, J. e WANIEK, L. - 1972 - Modellseismik. 2. Geophys., V. 38, p. 1-44.
- BEN-MENAHEN, A e SING, S. - 1980 - Seismic Waves and Sources, Springer-Verlag, 1108p.
- BERCKHEMER, H. e ANSORGE, J. - 1963 - Wavefront Investigations in Model Seismology. Geophysical Prospections, V. 2, p. 459 - 470.
- BERCKHEMER, H. e WANIEK, L. - 1968, 1970 - Bibliography on Seismic Modelling. Prague. European Seismological Commission, Working Group for Model Work.
- BERKHOUT, A. - 1980 - Seismic Migration. Amsterdã. Elsevier Publishing Company, 339p.
- BERRYMAN, L., GOUPILLAND, P. e WATERS, K. - 1958 - Reflections from Multiple Transition Layers. Geophysics, V. 23, p. 223-252
- DOBRI, M. - 1976 - Introduction Geophysical Prospecting. New York, McGraw Hill, 630 p.
- FERNANDES, C. - 1984 - Fundamentos de Prospecção Geofísica. Rio de Janeiro, Interciência, 190 p.

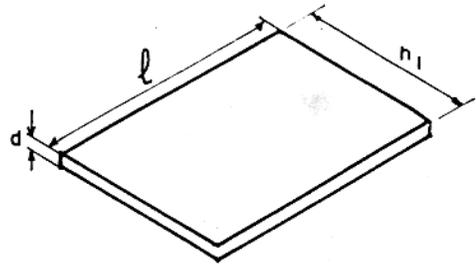
- GUTDEUTSCH, R e KONIG, M. - 1966 - Component Registration in TwoDimensional Model Seismology. *Studia Geoph. et. Geod.*, V. 3, 314-322.
- HEALY, J. e PRESS, F. - 1960 - Two-Dimensional Seismic Models with Continuously Variable Velocity Depth and Density Functions. *Geophysics*, V. 5, p. 987-997.
- HILTERMAN, F. - 1970 - Three Dimensional Seismic Modelling. *Geophysics* V. 35, p. 1029-1037.
- KOEFOED, O.; EWYK, J. e BAKKER, W. - 1958 - Seismic Model Experiments Concerning Reflected Refractions. *Geophysical Prospections*. V. 6, p. 382-393.
- KORN, M. - 1982 - Modellierung von Blockstrukturen mit der Methode der Finiten Differenzen (FD-Methode). *Modellverfahren bei der Interpretation Seismischer Daten (2 Mintrop)*, p. 243-258.
- Mc DONALD, J. e GARDNER, G. - 1982 - Physical Modelling at the Seismic Laboratory, *Seismic Studies in Physical Modeling*. Boston, International Human Resources Development Corporation, 250 p.
- NEWMANN, S. e SCHIEL, K. - 1977 - Model Investigations on Inhomogeneous Media. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. SC. A-4 (115)*, p. 216-226.
- Q'BRIEN, P e SYMES, M. - 1971 - Model Seismology, *Rep. on Progress in Physics*, V. 34, 697-764.
- OLIVER, J. ; PRESS, F. e EWING, M. - 1954 - Two-Dimensional Model Seismology. *Geophysics*, V. 19, p. 302-219.
- PRESS, F.; OLIVER, J. e EWING, M. - 1954 - Seismic Model Study from a Layer of Finite Thickness. *Geophysics*, V. 19 p. 333-401
- RISTOW, D. - 1982 - Zweidimensionale und Dreidimensionale Modellierung und Migration mit Hilfe der Einweg-Wellengleichung. *Modellverfahren bei der Interpretation Seismischer Daten (2 Mintrop)*. p. 259-294.
- SHERIF, R. e GELDART, L. - 1982 - *Exploration Seismology, History. Theory and Data Acquisition*, Cambridge, University Press, 237 p.

- TEMME, P. - 1984 - Comparasion of Common Midpoint Single Shot and Plane Wave Depth Migration. Geophysics. V. 49, p. 1896-1907.
- WANIEK, L. - 1972, 1974, 1976, 1978 - Bibiography on Seismic Modelling. Prague, European Seismological Comission, Working Group for Model Work, Sub-Comission for Theory and interpretation.
- WHITE, J. - 1983 - Underground Sond, Aplications of Seismic Waves. Explorations Geophysicist, 245 p.
- WOODS, J. - 1956 - Composition of Reflections. Geophysics, V.21, p. 261-276.

APENDICE I - DIMENSÕES PARA OS MÓDELOS 2 - D

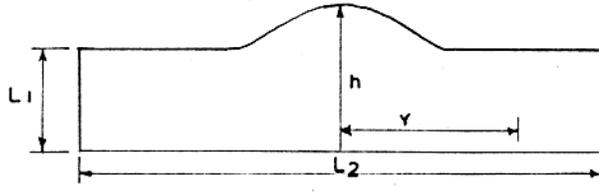
MODÉLO 1

MATERIAL	h (m)	ℓ (m)	d (mm)
Acrílico 2	0,55	0,8	2
Acrílico 3	0,55	0,8	3
Alumínio	0,75	1,0	2
PVC	0,50	1,0	4
Vidro	0,40	1,0	4



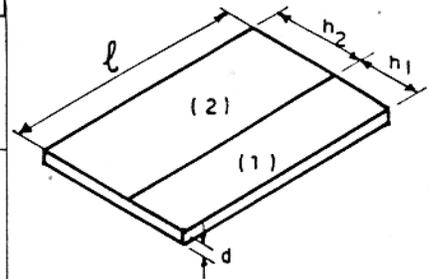
MODÉLO 2

MATERIAL	Y (m)	h (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	d (mm)
Acrílico	0,62	0,45	0,15	1,8	2



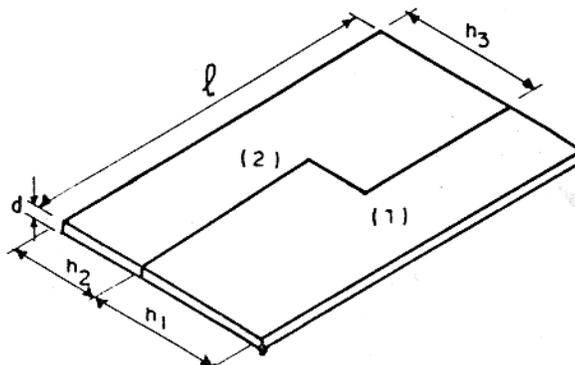
MODÉLO 3

	h _f (meio1) (cm)	h (meio2) (cm)	espessura d (mm)	ℓ (m)
MODELO A ACRÍLICO (1) + ALUMÍNIO (2)	17,0	55,0	2,0	1,0
MODELO B PVC (1) + VIDRO (2)	30,0	40,0	4,0	1,0



MODÉLO 4

MATERIAL	ℓ (m)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	h ₃ (m)	d (mm)
PVC (1)	1,0	0,3			4,0
VIDRO (2)	1,0		0,25	0,4	4,0



- 1) O Programa 1 transfere o sinal de 1024 pontos do osciloscópio para o array A (1024), encontra o valor de A max de cada sinal e grava esses valores de A max para os 46 pontos numa fita cassete. O array D(0:180) armazena os valores de A max. O programa é rodado para cada uma das cinco frequências utilizadas.

```

0: dim A[1024],
  D[0:180]
1: for H=0 to
  180 by 4
2: wtc 4,33
3: wtc 4,32
4: wtc 4,34
5: for N=1 to
  1024
6: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)→A[N]

```

Programa 1

```

7: next N
8: wtc 4,0
9: max(A[*])→D[H]
]
10: prt D[H]
11: stp
12: next H
13: ent L
14: rcf L,D[*]
15: end
*18771

```

- 2) O programa 2 lê os 46 pontos do array F (0:180), arquivados na fita cassete e plota seus valores correspondentes. O programa é rodado novamente, para a próxima frequência das cinco utilizadas.

```

0: dim F[0:180]
1: scl 500,9000,
  -10,200
2: axe 4500,0
3: ent L
4: ldf L,F[*]
5: for H=0 to
  180 by 4

```

Programa 2

```

6: plt 4500,0,1
7: csiz 2,1.7,
  10/7,H
8: cplt F[H]/
  180,0
9: lbl ". "
10: next Hipen
11: eto 3
12: end

```

- 3) O programa 3 transfere o sinal do osciloscópio para A (1024), plota o sismograma correspondente e transfere o valor de A máx para o array H (0:30). O programa é rodado para cada um dos 20 pontos medidos. Ao final, quando a seção está completa a Velocidade da onda é impressa no papel.

```

0: dim A[1024],
  H[0:30]
1: scl -10,1024,
  -1,25
2: axe 0,0,100,1
3: for X=0 to 20
4: wtc 4,33
5: wtc 4,32
6: wtc 4,34
7: for I=1 to
  1024
8: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)+A[I]
9: next I
10: max(A[*])→K
11: for I=1 to
  1024

```

Programa 3

```

12: if A[I]=K;
  I→H[X]
13: wtc 4,0
14: ofs 0,1
15: for J=1 to
  1024
16: plt J,3*(A[J]
  I/K)
17: next J
18: pen
19: stp
20: next X
21: (H[20]-H[0])
  *5+I
22: prt 20/T*
  500000
23: end

```

- 4) O programa 4 transfere o sinal do osciloscópio para o array A (1024), encontra A máx e calcula os valores de $\bar{\xi}$ e \bar{Q} . O array F (30) armazena os valores de A máx e o array Y (30) os valores para o logaritmo do decaimento ξ .

```

0: dim A[1024],
  F[30],Y[30]
1: for H=1 to 20
2: wtc 4,33
3: wtc 4,32
4: wtc 4,34
5: for I=1 to
  1024
6: shf(shf(rdb(4-
  ),3),-4)+A[I]
7: next I
8: wtc 4,0
9: max(A[*])→F[H]
]

```

Programa 4

```

10: stp
11: next H
12: 0→Y
13: fxd 3
14: for H=1 to
  19
15: ln(F[H]/F[H+
  1])→Y[H]
16: Y[H]+Y→Y
17: prt Y[H]
18: next H
19: Y/19→Y
20: π/Y+0;prt Q
21: end

```

- 5) O programa 5 entra com a frequência (F), o logaritmo do decaimento da amplitude (Y), a velocidade da onda (V) e a amplitude inicial (E); e calcula e traça as curvas para o decaimento da amplitude da onda. O array E (0:100) armazena os valores de $\exp(-\alpha.x)$, e A (0:100), os valores para as amplitudes da onda na distância x.

```

0: fxd 4
1: dim E[0:100],
  X[0:100],A[0:100]
2: ent F,Y,V,E
3: F*Y/V→G
4: for I=0 to 50
5: if I=0;0→X[I]
  isto 7
6: X[I-1]+.02→X[I]
7: X[I]*G→K
8: exp(-K)→E[I]
9: E[I]*E→A[I]
10: 10*log(A[I]/
  E)→E[I]

```

Programa 5

```

11: 10*log(A[I]/
  E)→E[I];prt
  E[I]
12: next I
13: stp
14: scl 0,1,0,
  1000
15: axe 0,0,.04,
  100
16: for I=0 to
  50
17: plt X[I],
  A[I]
18: next I;pen
19: end

```

- 6) O programa 6 entra com o número de pontos medidos (N), transfere o sinal do osciloscópio para A (1024) e plota seu sismograma correspondente. O programa é repetido da linha 2 a 16, para cada um dos n pontos, até completar-se a seção sísmica.

```

0: dim A[1024]
1: ent N
2: scl -2,2N,-
  50,1024
3: axe 0,0,2,100
4: wtc 4,33
5: wtc 4,32
6: wtc 4,34
7: for I=1 to
  1023
8: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)+A[I]

```

Programa 6

```

9: next I
10: max(A[*])÷K
11: wtc 4,0
12: ofs 2,0
13: for J=1 to
  1024
14: plt 5*(A[J]/
  K),J
15: next J
16: pen
17: end

```

- 7) O programa 7 entra com os valores da profundidade H do meio 1, com as distâncias do primeiro e do último ponto à fonte; N e M, as velocidades das ondas P e S nos meios 1 e 2; P (1, 2) e S (1, 2). Calcula e traça as curvas para as ondas P e S diretas e refletidas, para a fonte posicionada no centro da superfície.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],M[0:80]
  ,P[2],S[2]
1: ent H,N,M
2: scl N-2,M+2,-
  50,1023
3: axe N-1,0,2,
  100
4: for I=1 to 2
5: ent P[I],S[I]
  ;next I
6: M/2÷Z
7: 1÷I;P[I]÷V
8: for X=N to Z
9: X/V*10000÷A[X]
  ]
10: r(X↑2+4*H↑2)
  /V*10000÷R[X]
11: next X
12: for X=N to Z
13: plt X,A[Z-
  X];next X;pen
14: for X=N to Z
15: plt X+Z,A[X]
  ;next X;pen

```

Programa 7

```

16: plt X+Z,A[X]
  ;next X;pen
17: for X=N to Z
18: plt X,R[Z-
  X];next X;pen
19: for X=0 to Z
20: plt X+Z,R[X]
  ;next X;pen
21: S[1]÷V;I+1÷I
22: if I=2;eto 9
23: P[1]÷P;S[1]÷
  S
24: for X=N to M
25: r(X↑2/4+H↑2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0÷M[X]
26: next X
27: for X=N to Z
28: plt X,M[Z-
  X];next X;pen
29: for X=0 to Z
30: plt X+Z,M[X]
  ;next X;pen
31: end

```

- 8) O programa 8 entra com os valores de H do meio 1, distância do primeiro e do último ponto à fonte; N e M, as velocidades das ondas P e S, P (1, 2) e S (1, 2). Calcula e traça as curvas para ondas

diretas, refletidas e refratadas, para a fonte posicionada na extremidade da superfície do modelo.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],H[0:80]
  ,M[0:80],P[2],
  S[2]
1: ent H,N,M
2: for I=1 to 2
3: ent P[I],S[I]
  inext I
4: scl N-2,M+2,-
  50,1023
5: axe N-1,0,1,
  100
6: 1+I
7: P[I]+V
8: for X=N to M
9: X/V*10000+A[X]
  1
10: r(X^2+4*H^2)
  /V*10000+R[X]
11: next X
12: for X=N to M
13: plt X,A[X];
  next X;pen
14: for X=N to M
15: plt X,R[X];
  next X;pen
16: S[I]+V;I+1+I
17: if I=2;sto 8

```

Programa 8

```

18: 1+I;P[1]+U;
  P[2]+V
19: 2*H/r(V^2/
  U^2-1)+C
20: prt C
21: for X=C to M
22: (X/V+2*H/U*
  r(1-(U/V)^2))*
  1000+H[X]
23: next X
24: for X=C to M
25: plt X,H[X];
  next X;pen
26: S[1]+U;S[2]+
  V;I+1+I
27: if I=2;sto
  19
28: P[1]+P;S[1]+
  S
29: for X=N to M
30: r(X^2/4+H^2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0+M[X]
31: next X
32: for X=N to M
33: plt X,M[X];
  next X;pen
34: end

```

- 9) O programa 9 entra com H do meio 1, distâncias do primeiro e último ponto à fonte; N e M, as velocidades de P e S; P (1, 2) e S (1, 2). Calcula e traça as curvas para as ondas diretas, refletidas e difratadas, para a fonte posicionada no centro da Superfície do modelo.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],D[0:80]
  ,M[0:80],P[2],
  S[2]
1: ent H,N,M
2: scl N-2,M+2,-
  50,1023
3: axe N-1,0,2,
  100
4: for I=1 to 2
5: ent P[I],S[I]
  inext I
6: M/2+Z
7: 1+I;P[I]+V
8: for X=N to Z
9: X/V*10000+A[X]
  1
10: r(X^2+4*H^2)
  /V*10000+R[X]
11: (2*H/V+X^2/
  2*V*H)10000+D[X]
  1
12: next X
13: for X=N to Z
14: plt X,A[Z-
  X];next X;pen
15: for X=N to Z
16: plt X+Z,A[X]
  inext X;pen

```

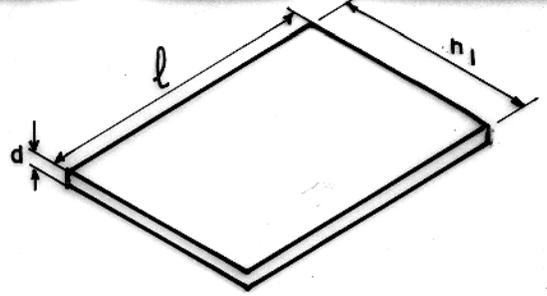
Program 9

```

17: for X=N to Z
18: plt X,R[Z-
  X];next X;pen
19: for X=0 to Z
20: plt X+Z,R[X]
  next X;pen
21: for X=N to M
22: plt X,D[Z-
  X];next X;pen
23: for X=N to M
24: plt X+Z,D[X]
  next X;pen
25: S[1]+V;I+1+I
26: if I=2;sto 9
27: P[1]+P;S[1]+
  S
28: for X=N to M
29: r(X^2/4+H^2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0+M[X]
30: next X
31: for X=N to Z
32: plt X,M[Z-
  X];next X;pen
33: for X=0 to Z
34: plt X+Z,M[X]
  inext X;pen
35: end

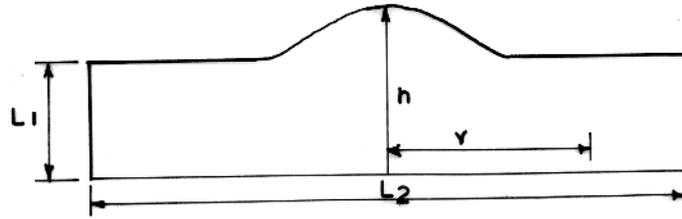
```

MATERIAL	h (m)	z (m)	d (mm)
Acrílico 2	0,55	0,8	2
Acrílico 3	0,55	0,8	3
Alumínio	0,75	1,0	2
PVC	0,50	1,0	4
Vidro	0,40	1,0	4



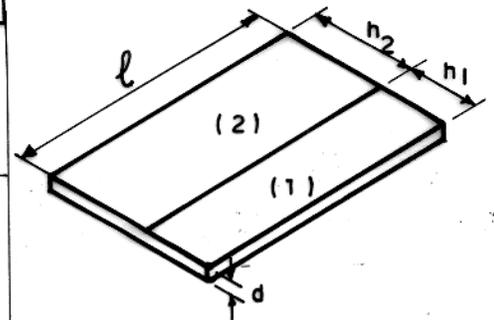
MODELO 2

MATERIAL	Y (m)	h (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	d (mm)
Acrílico	0,62	0,45	0,15	1,8	2



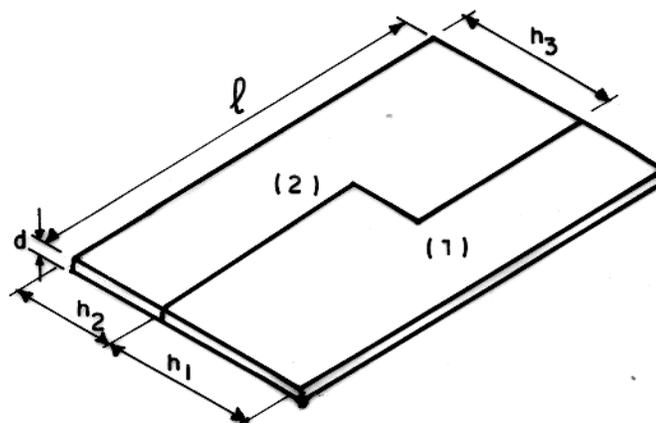
MODELO 3

	h_f (meio1) (cm)	h (meio2) (cm)	espessura d (mm)	l (m)
MODELO A ACRÍLICO (1) + ALUMÍNIO (2)	17,0	55,0	2,0	1,0
MODELO B PVC (1) + VIDRO (2)	30,0	40,0	4,0	1,0



MODELO 4

MATERIAL	l (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_3 (m)	d (mm)
PVC (1)	1,0	0,3			4,0
VIDRO (2)	1,0		0,25	0,4	4,0



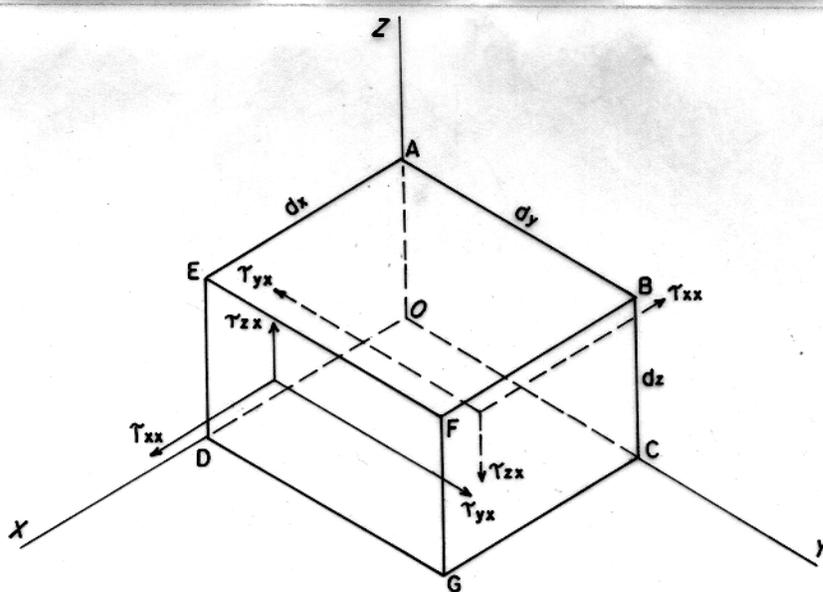


FIG. 1 - SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS ONDE UM CORPO ESTÁ SUJEITO À AÇÃO DAS COMPONENTES DA TENSÃO.

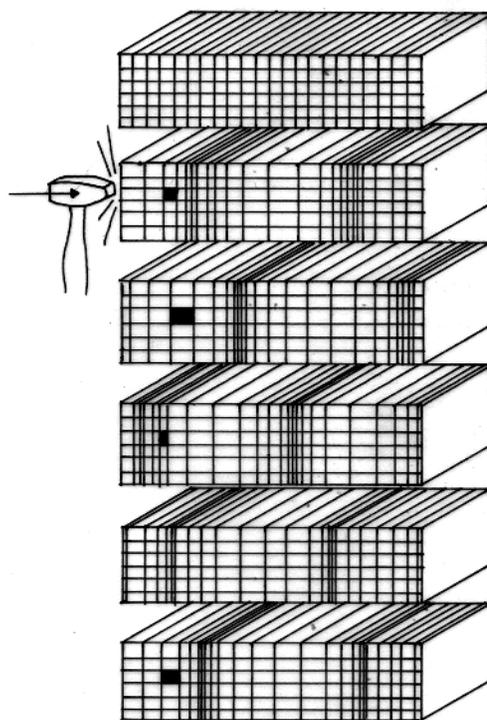


FIG. 2 - ONDAS LONGITUDINAIS OU P.

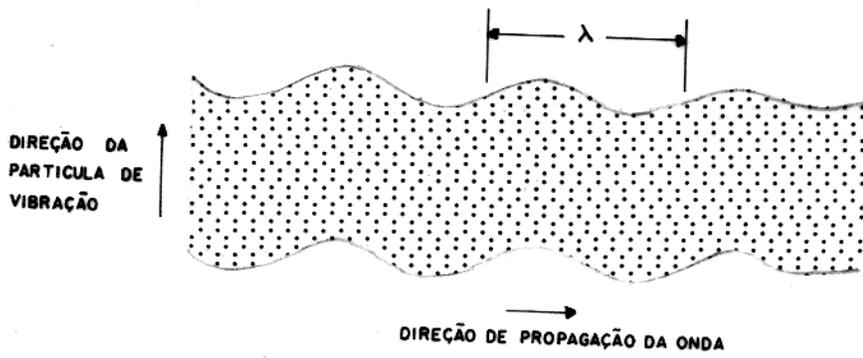


FIG. 3 - ONDAS TRANSVERSAIS OU S

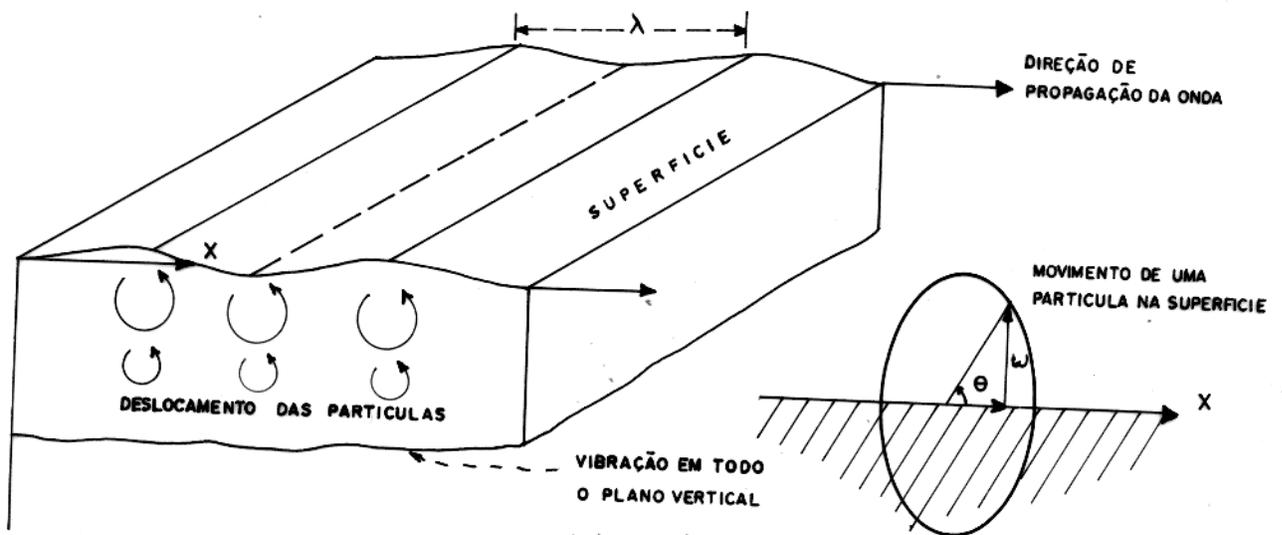


FIG. 4 - ONDAS RAYLEIGH

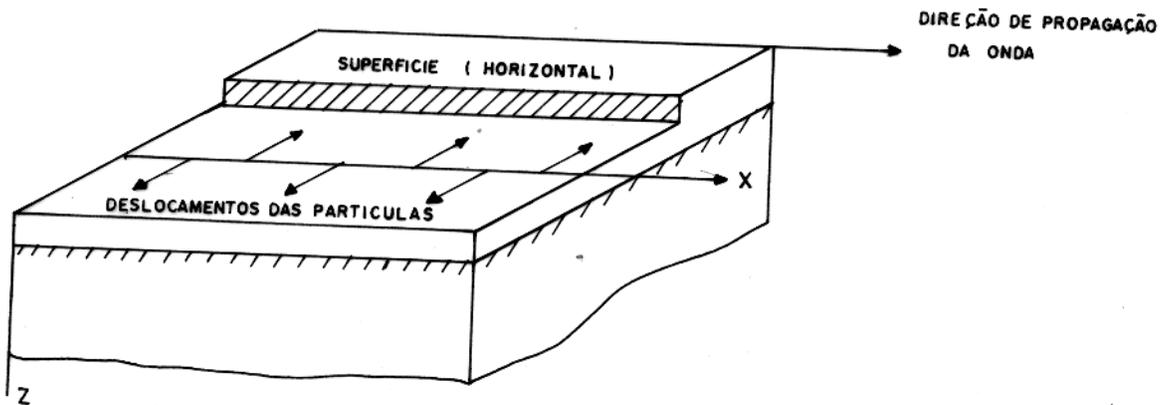


FIG. 5 - ONDAS LOVE

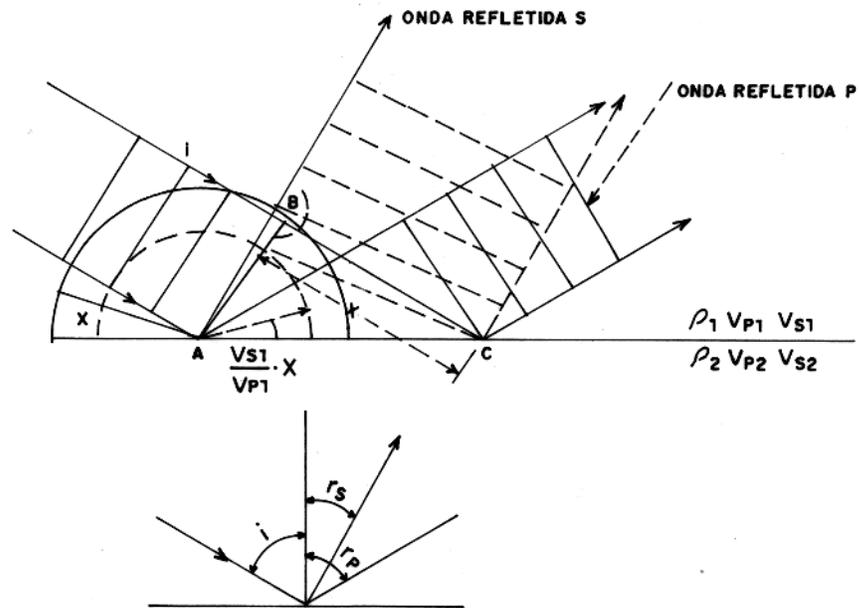


FIG. 6 - a) REFLEXÃO DE UMA ONDA PLANA NUMA INTERFACE PLANA.
 b) DIAGRAMA DE RAIOS PARA AS ONDAS REFLETIDAS.

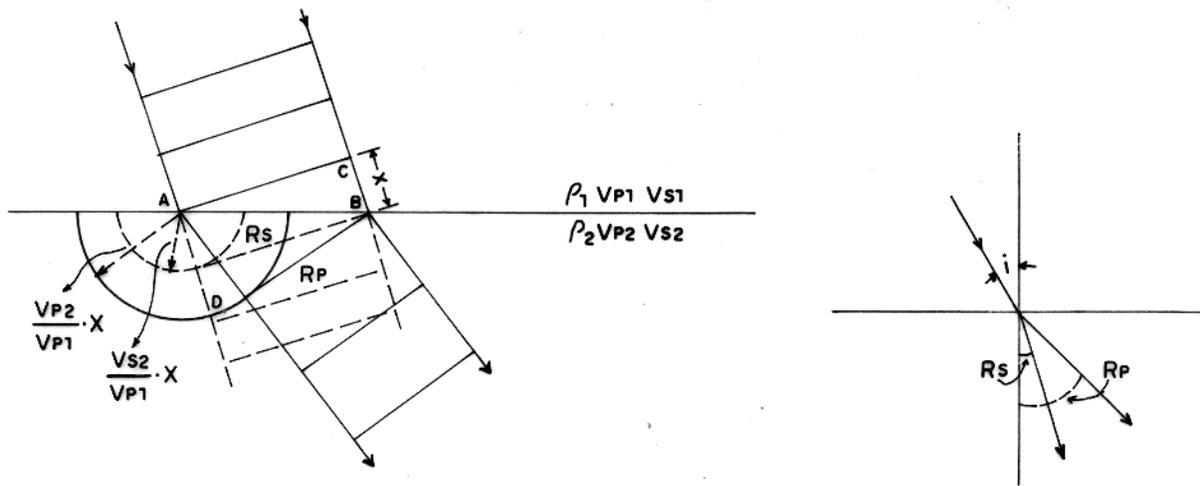
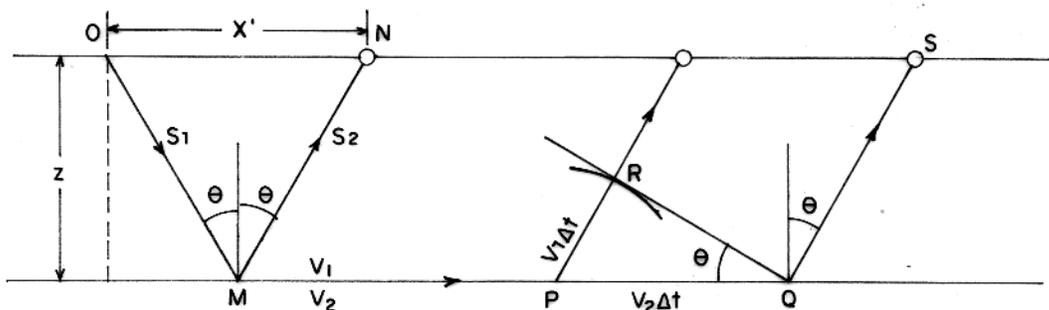


FIG. 7 - a) REFRAÇÃO DE UMA ONDA PLANA NUMA INTERFACE PLANA.
 b) DIAGRAMA DE RAIOS PARA AS ONDAS REFRACTADAS.



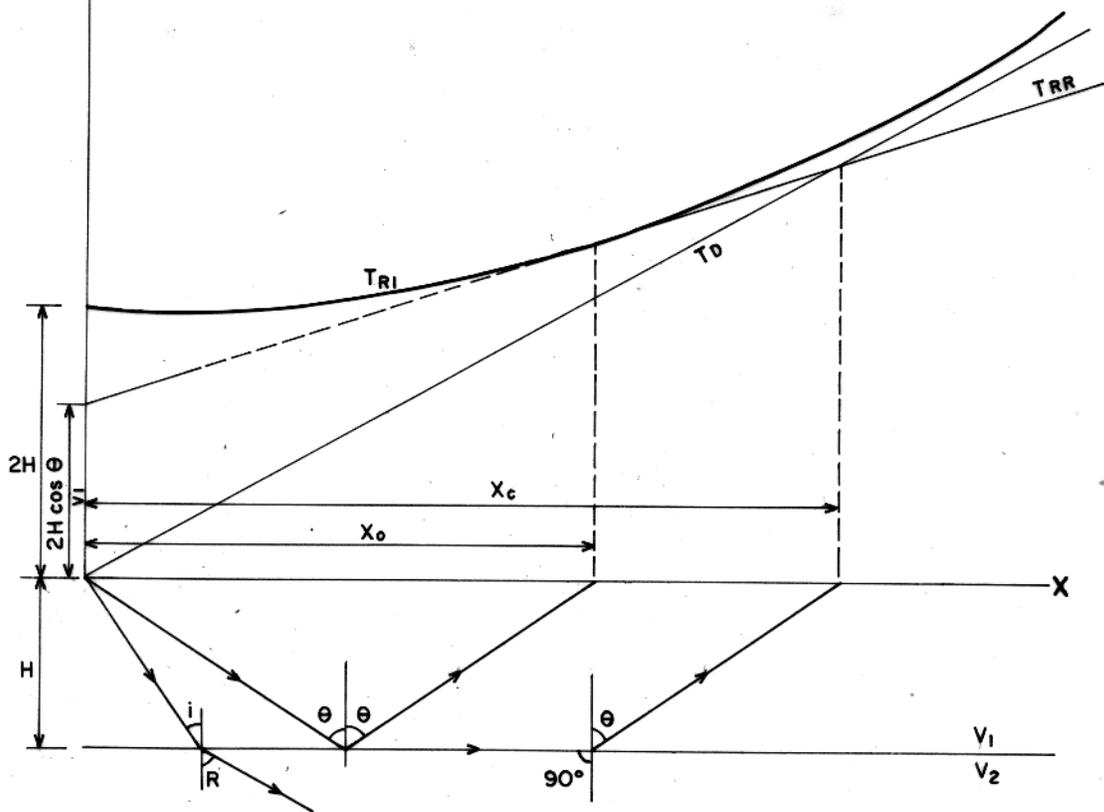


FIG. 9 - CURVAS TEMPO-DISTÂNCIA PARA AS ONDAS DIRETAS, REFLETIDA E REFRACTADA (HEAD WAVE)

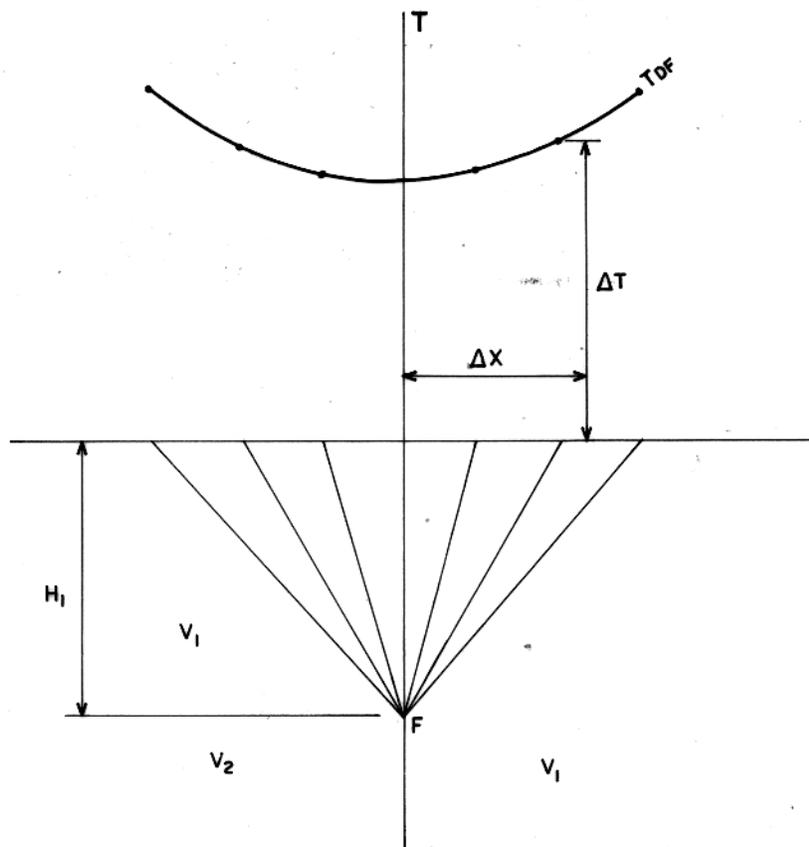


FIG. 10 - CURVA TEMPO-DISTÂNCIA PARA ONDA DIFRATADA..

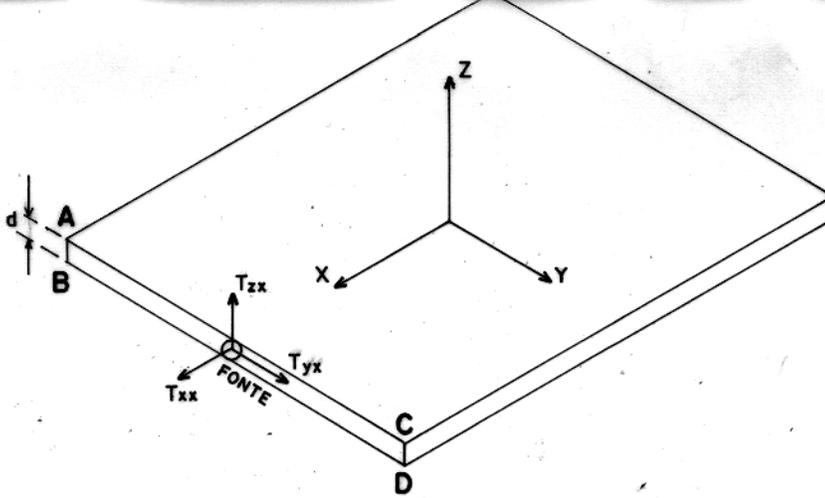


FIG. II - CHAPA MODELO SUBMETIDA A TENSÃO T_{xx} , T_{xy} E T_{zx} .

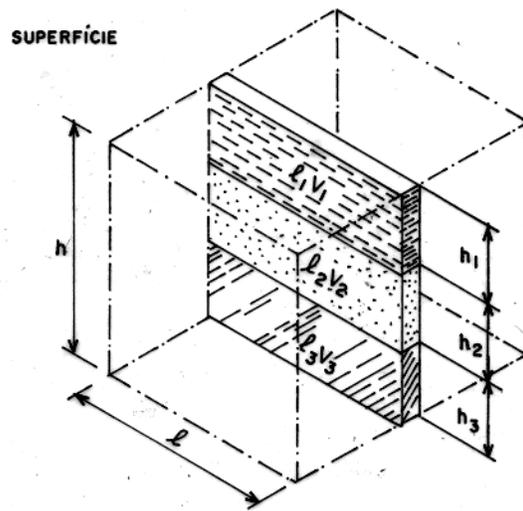


FIG. 12 - MODELO DE UMA SEÇÃO GEOLÓGICA DE TRÊS CAMADAS PLANAS; h_i , ρ_i , v_i SÃO RESPECTIVAMENTE PROFUNDIDADE, DENSIDADE E VELOCIDADE DA CAMADA i .

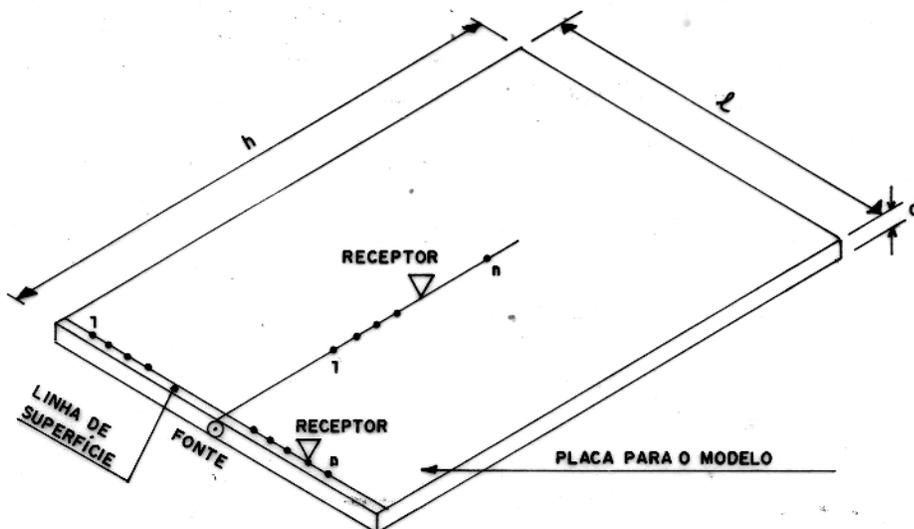


FIG. 13 - MODELO DE UMA CAMADA.

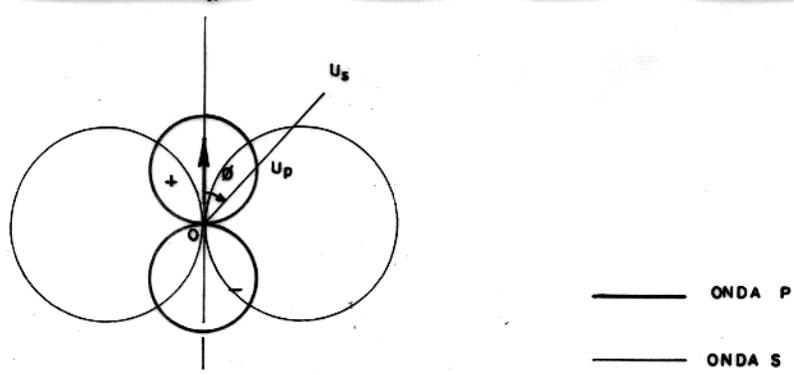


FIG. 14 - DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO PARA AS ONDAS P E S, NO PLANO.

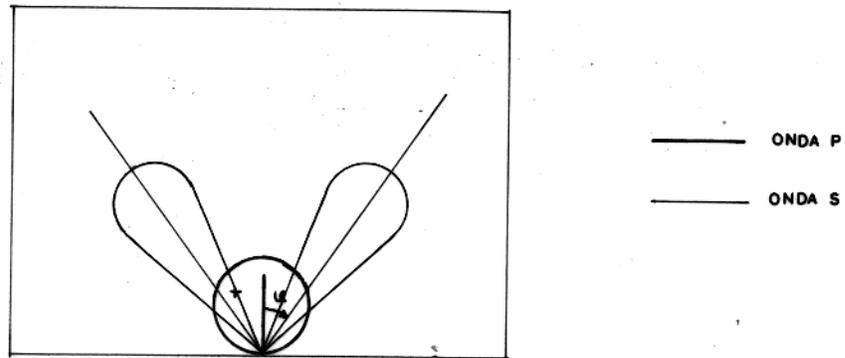


FIG. 15 - DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO PARA AS ONDAS P E S EM UMA PLACA.

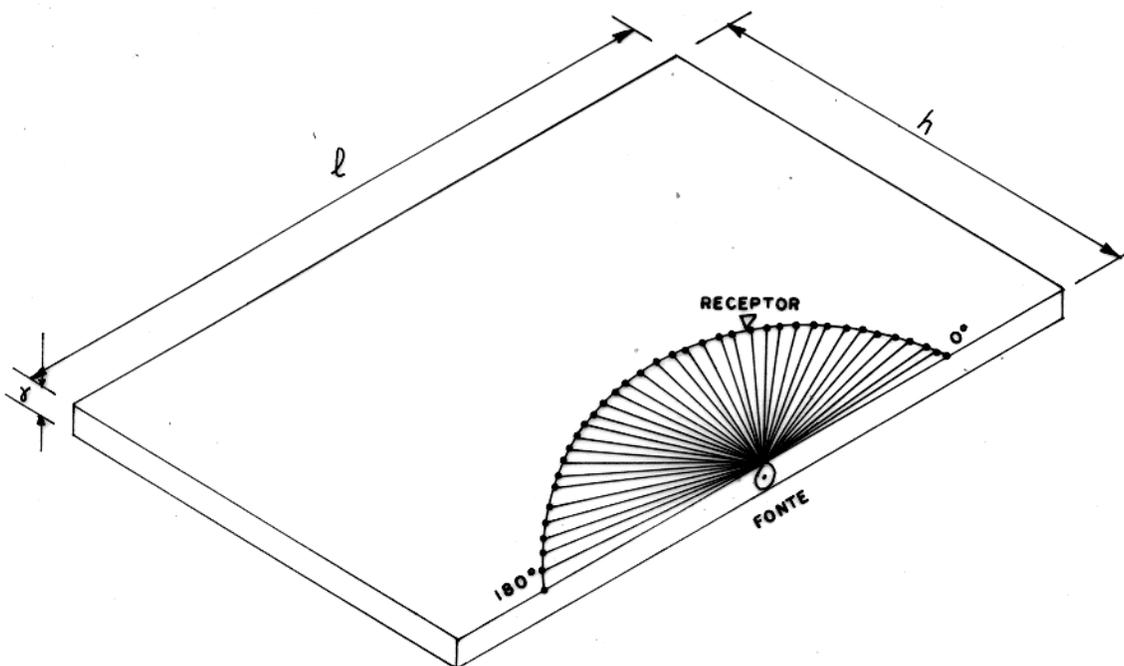


FIG. 16 - CONFIGURAÇÃO DA PLACA PARA AS MEDIDAS DOS DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO DAS ONDAS P E S.

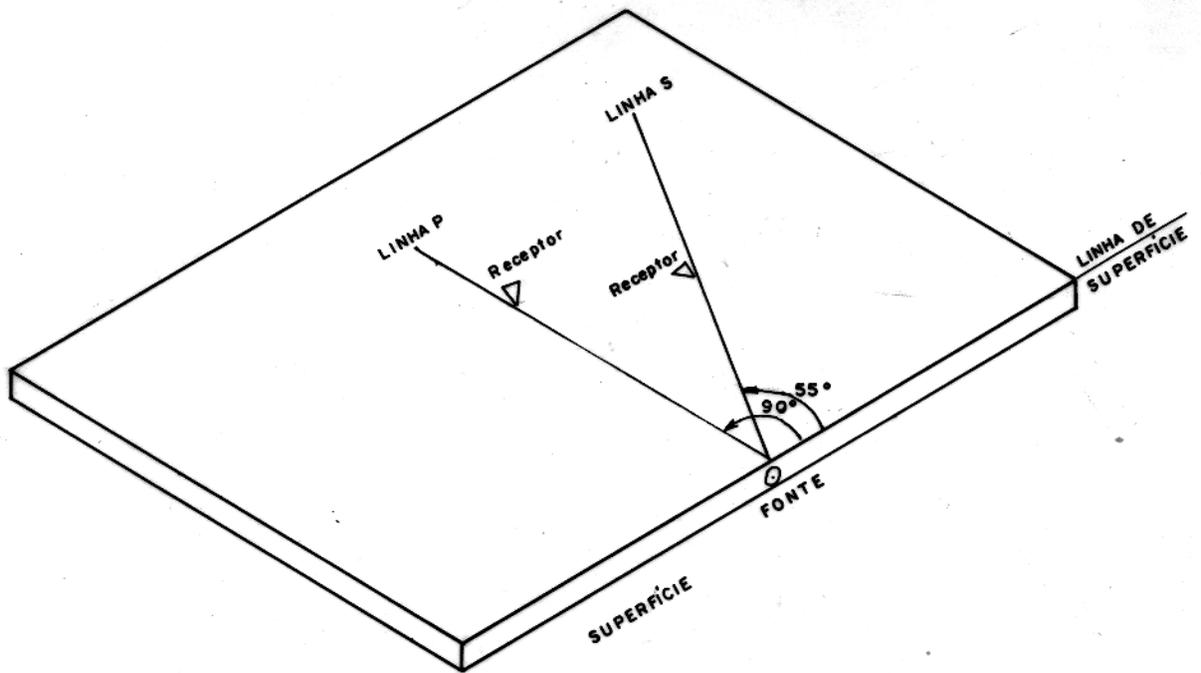


FIG. 17 - CONFIGURAÇÃO DA PLACA PARA MEDIDAS DAS VELOCIDADES E COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO P/ ONDAS P E S.

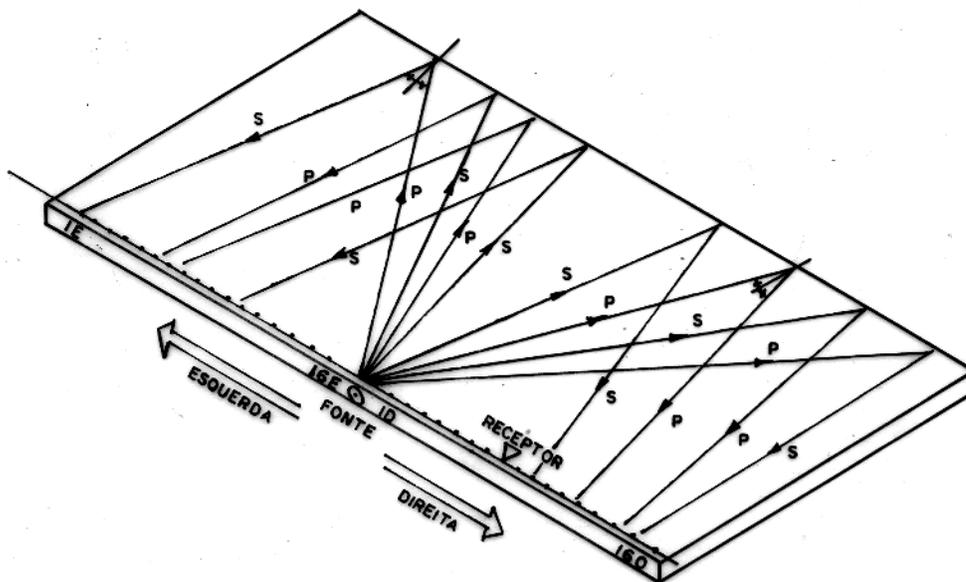


FIG. 18 - MODELO DE UMA CAMADA COM INTERFACE PLANA

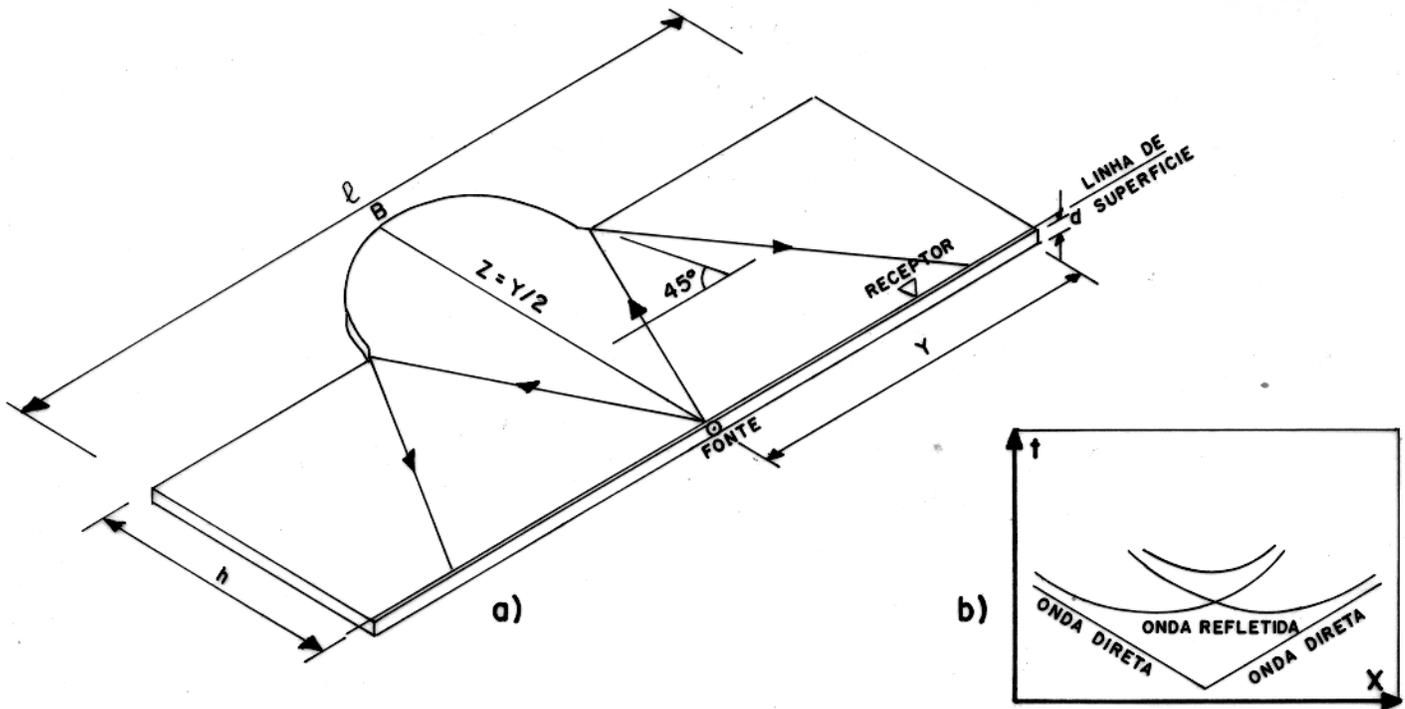


FIG. 19 - a) MODELO DE UMA CAMADA PARA UM SINCLINAL COM A FONTE NO CENTRO DA SUPERFÍCIE.

b) CONTORNOS PARA AS ONDAS REFLETIDAS (Cáusticas) DA FIG. 19a.

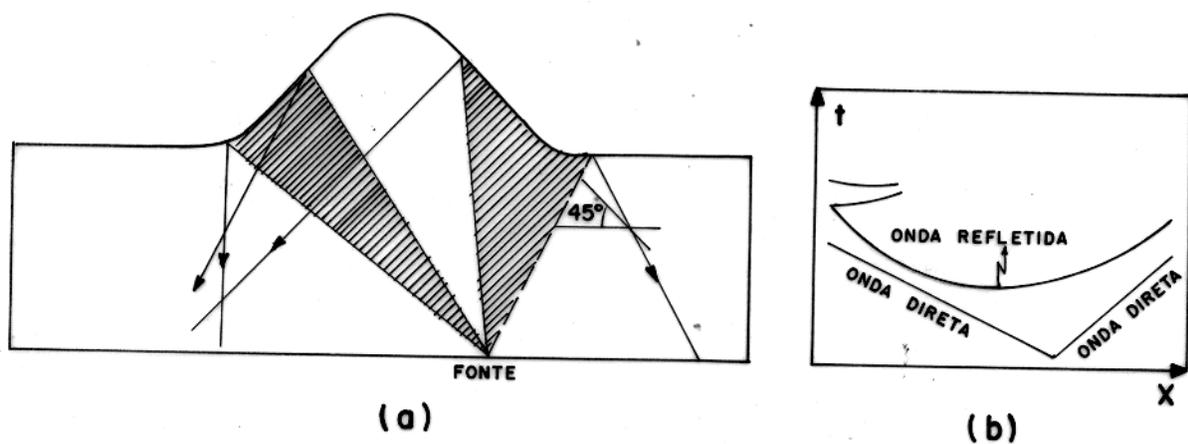


FIG. 20 - a) MODELO PARA UM SINCLINAL COM FONTE NA SUPERFÍCIE E À DIREITA DE SEU CENTRO.

b) CÁUSTICAS PARA AS ONDAS DA FIG. 20a

S I S T E M A P A R A
O M O D E L A M E N T O 2 - D

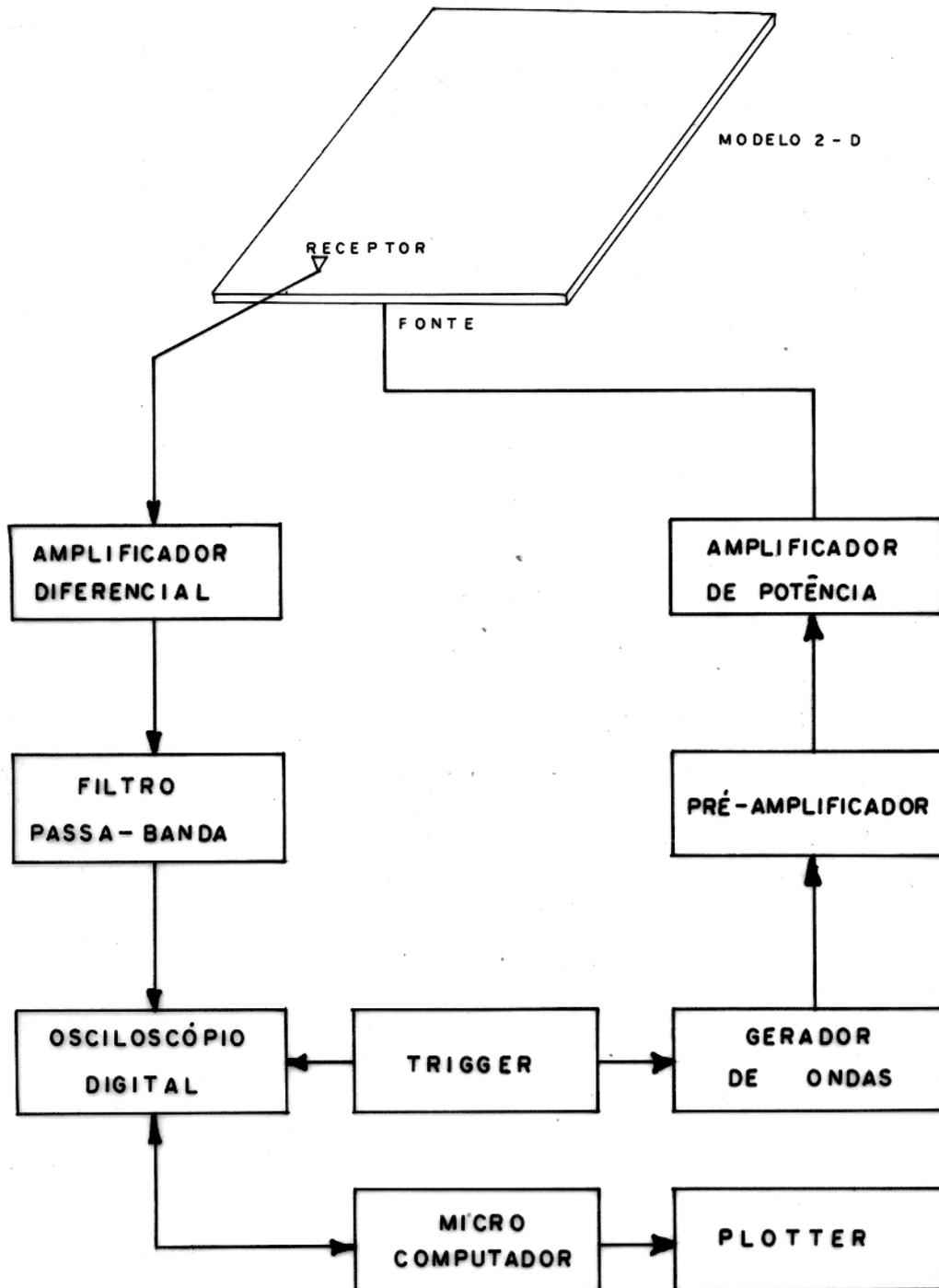


FIG. 23 - DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA PARA
O MODELAMENTO SÍSMICO

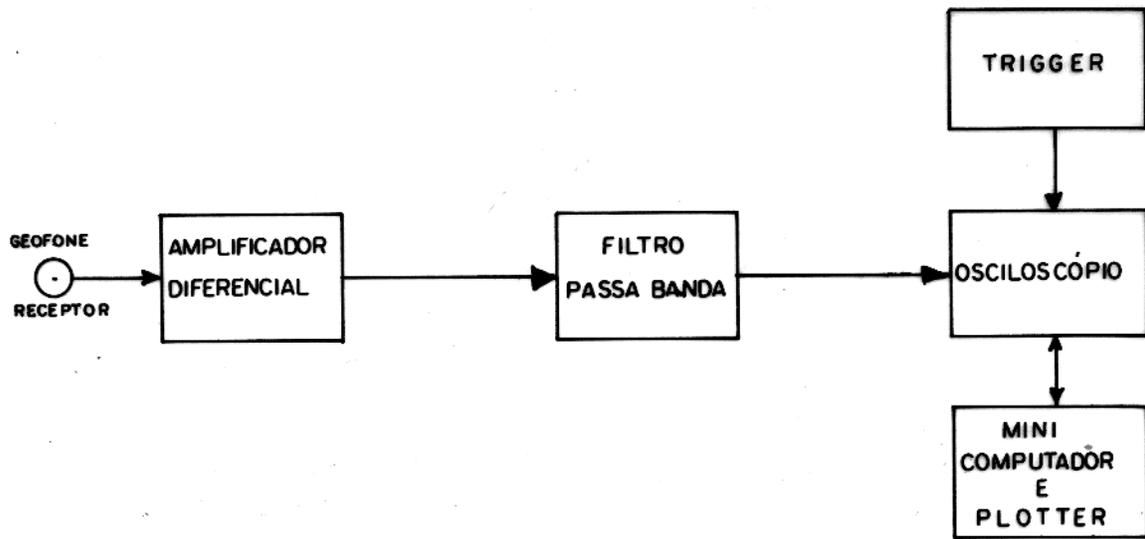


FIG. 25 - DIAGRAMA PARA O SISTEMA RECEPTOR .

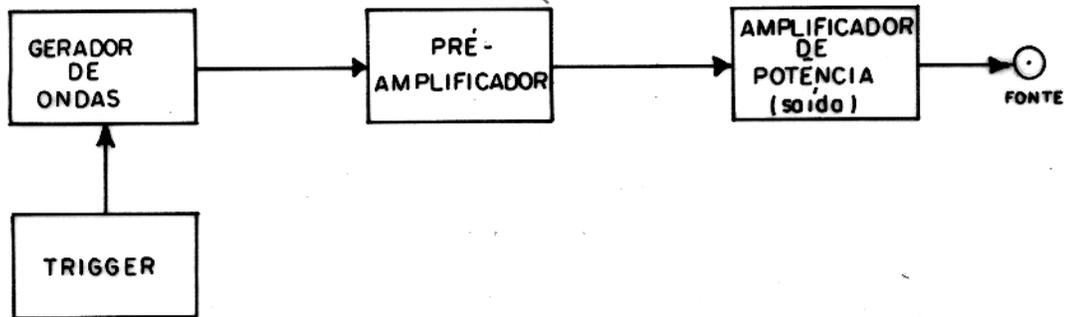


FIG. 24 - DIAGRAMA PARA SISTEMA GERADOR .

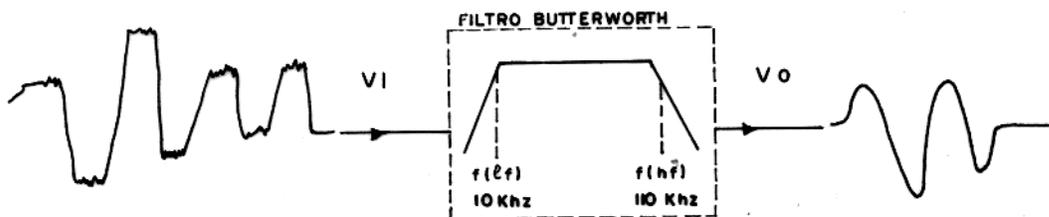


FIG. 26 - FILTRO BUTTER WORTH, PASSA-BANDA.

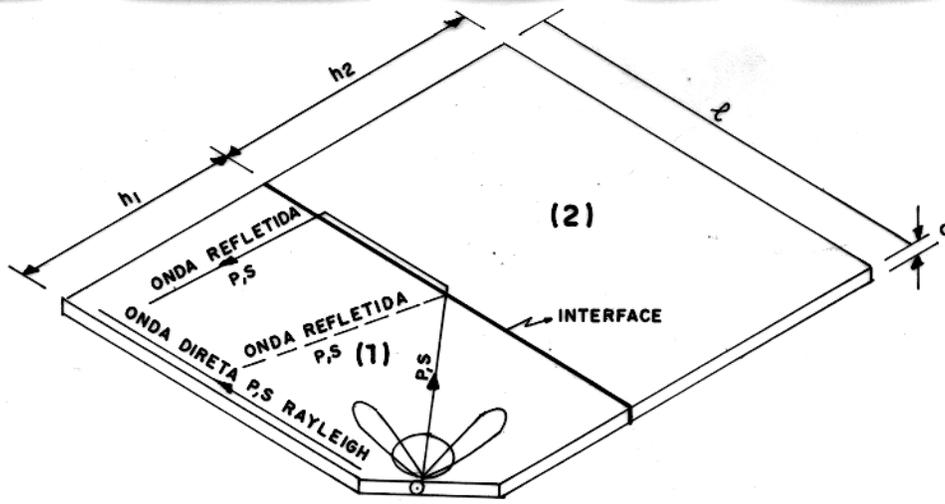


FIG. 21 - CONFIGURAÇÃO PARA UM MODELO DE DUAS CAMADAS COM INTERFACE PLANA.

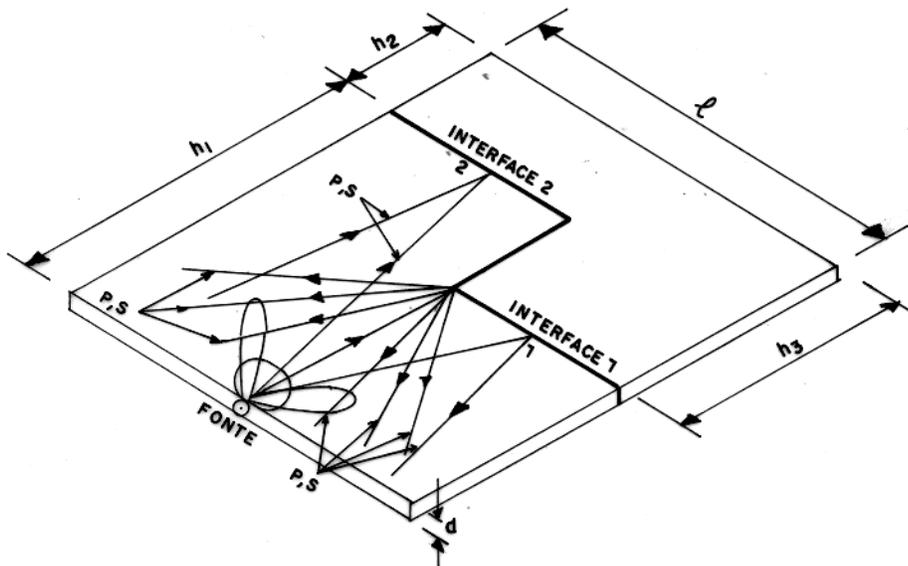


FIG. 22 - MODELO DE DUAS CAMADAS PARA UMA FALHA.

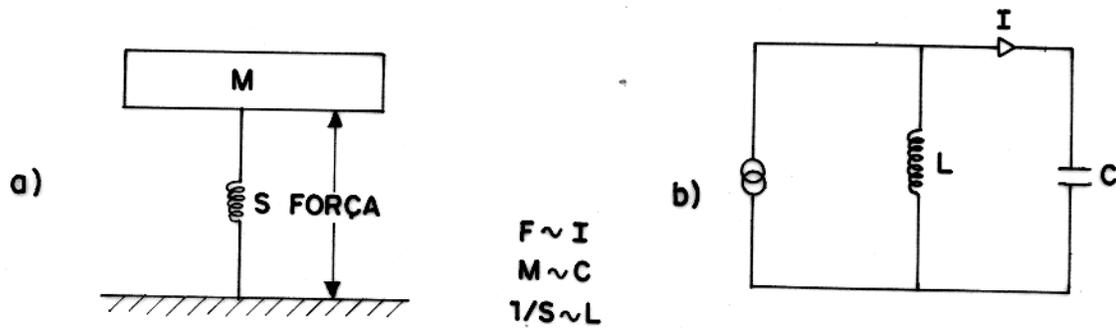


FIG. 27 - CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA UM PIEZOCRISTAL, a) Circuito Mecânico; b) Circuito Elétrico.

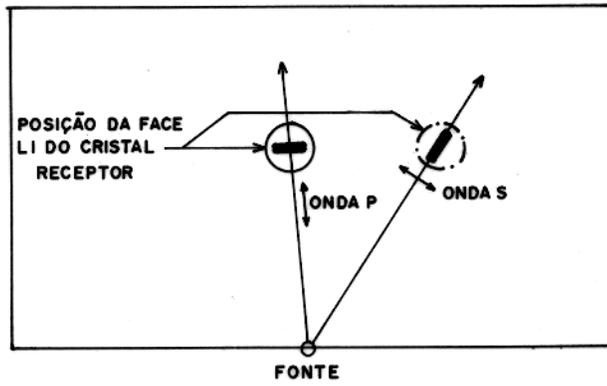


FIG. 31 - POSIÇÃO DO CRISTAL PARA CAPTAR AS ONDAS P e S.

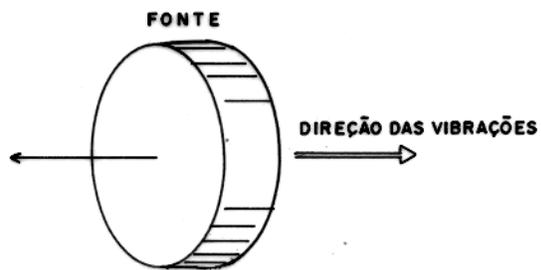


FIG. 28 - FONTE PIEZOELÉTRICA.

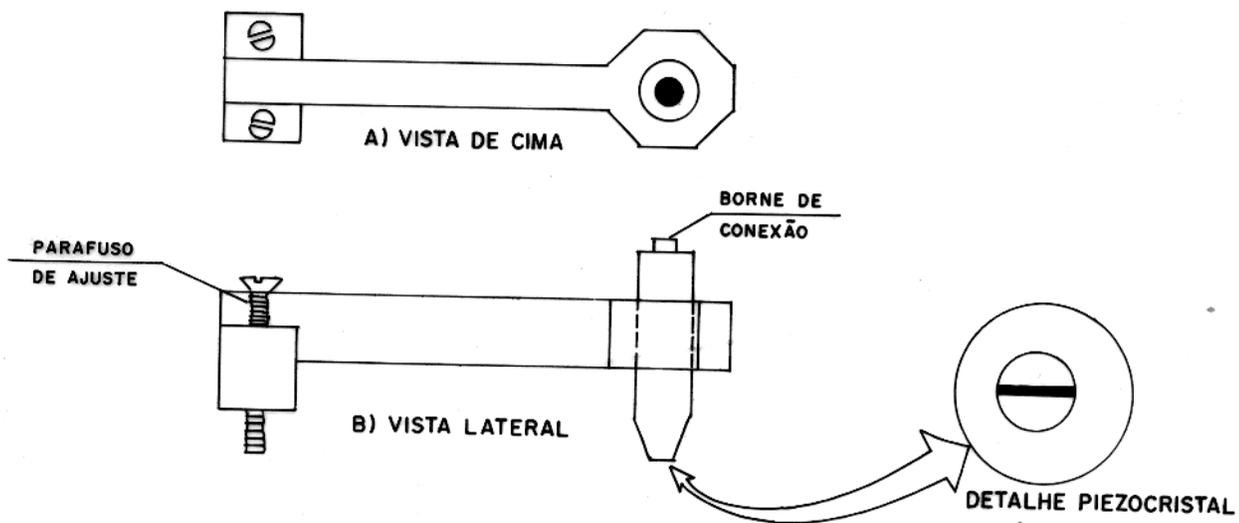


FIG. 29 - RECEPTOR. a) Vista de cima, b) Vista lateral.

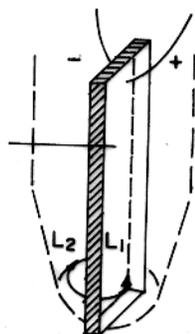


FIG. 30 - PIEZOCRISTAL RECEPTOR.

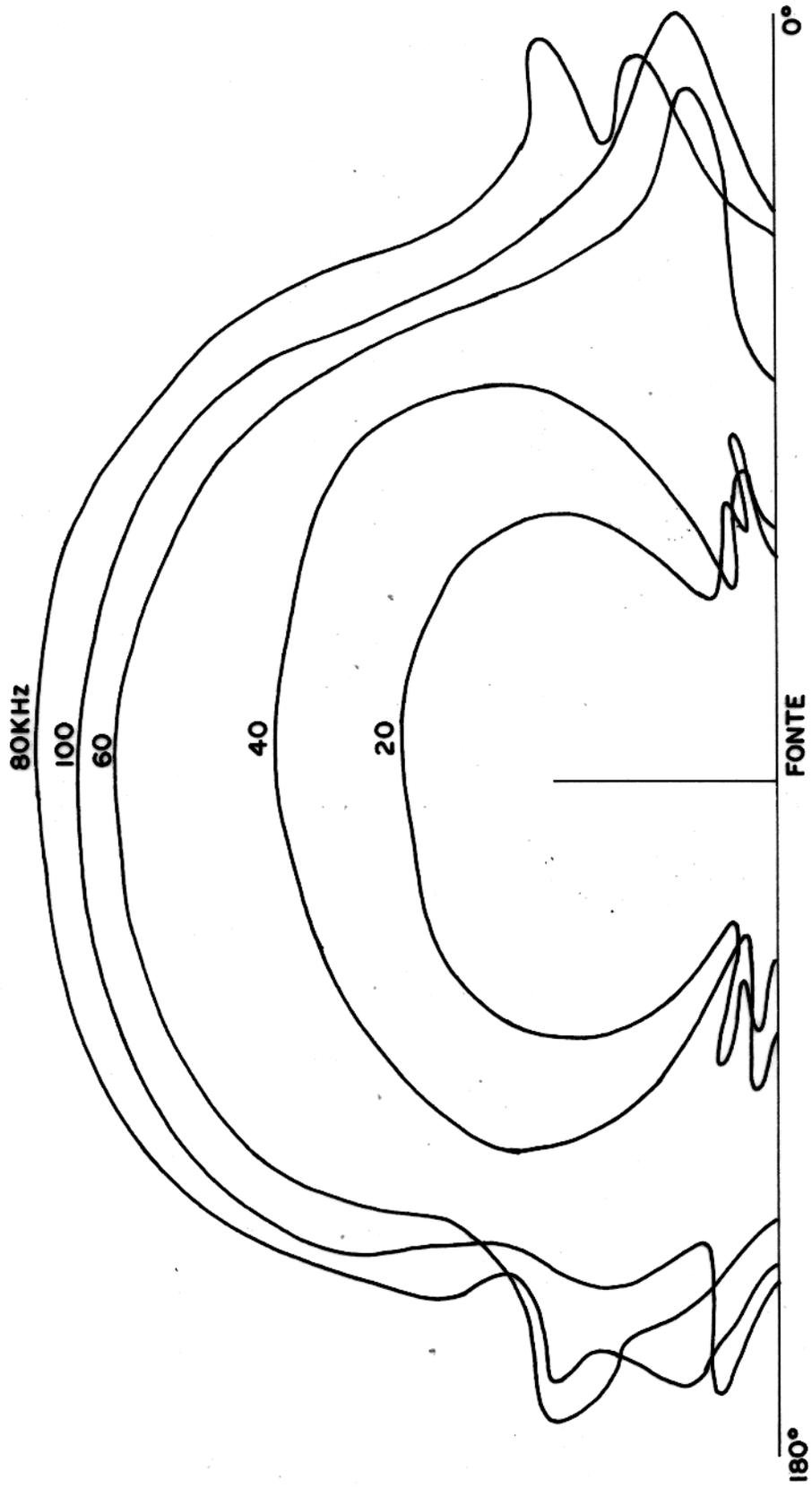


FIG. 32 - DIAGRAMAS PARA ONDA P, NO ACRÍLICO 2 mm.

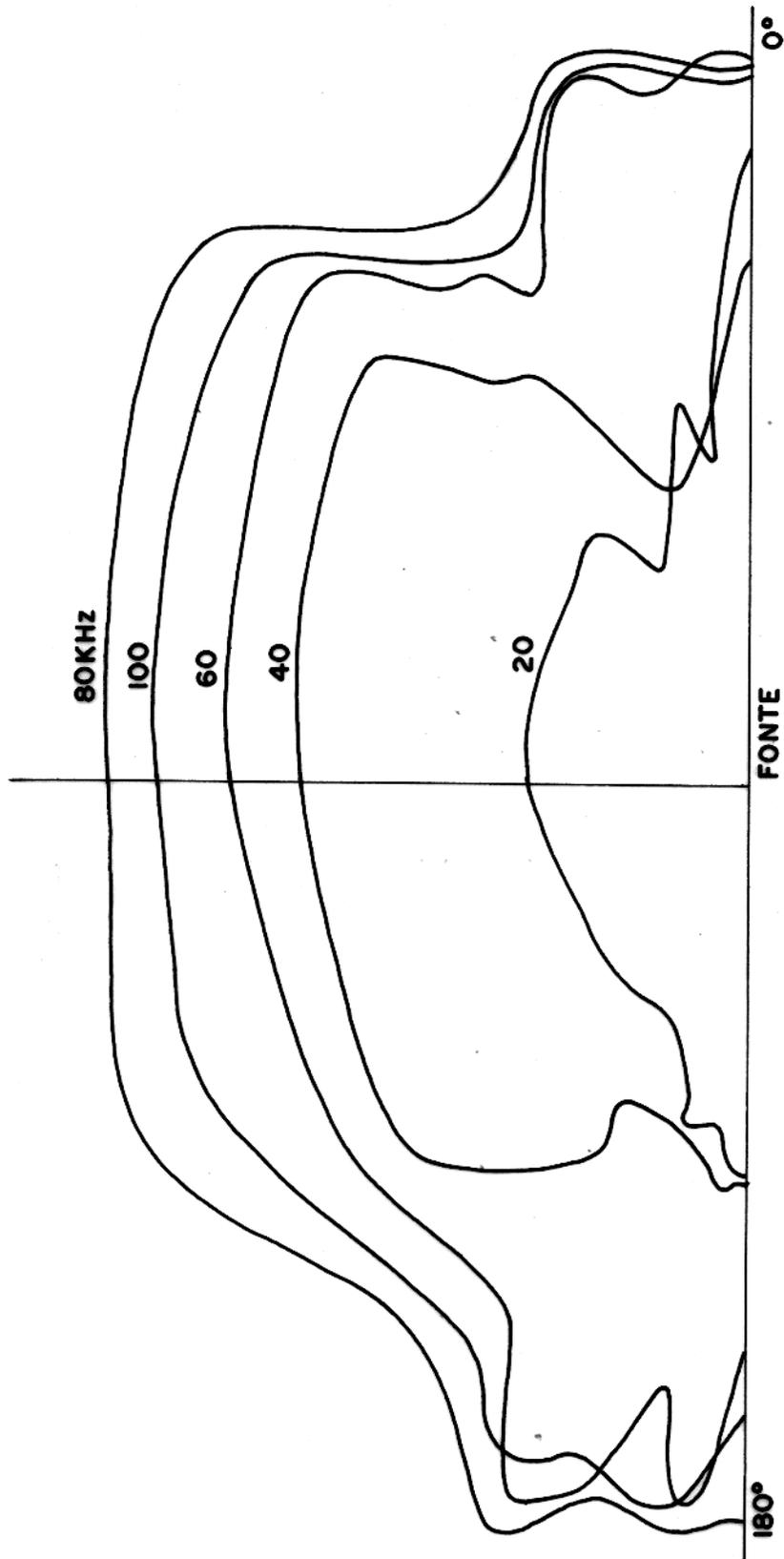


FIG. 33 - DIAGRAMA PARA A ONDA P NO ACRÍLICO 3mm.

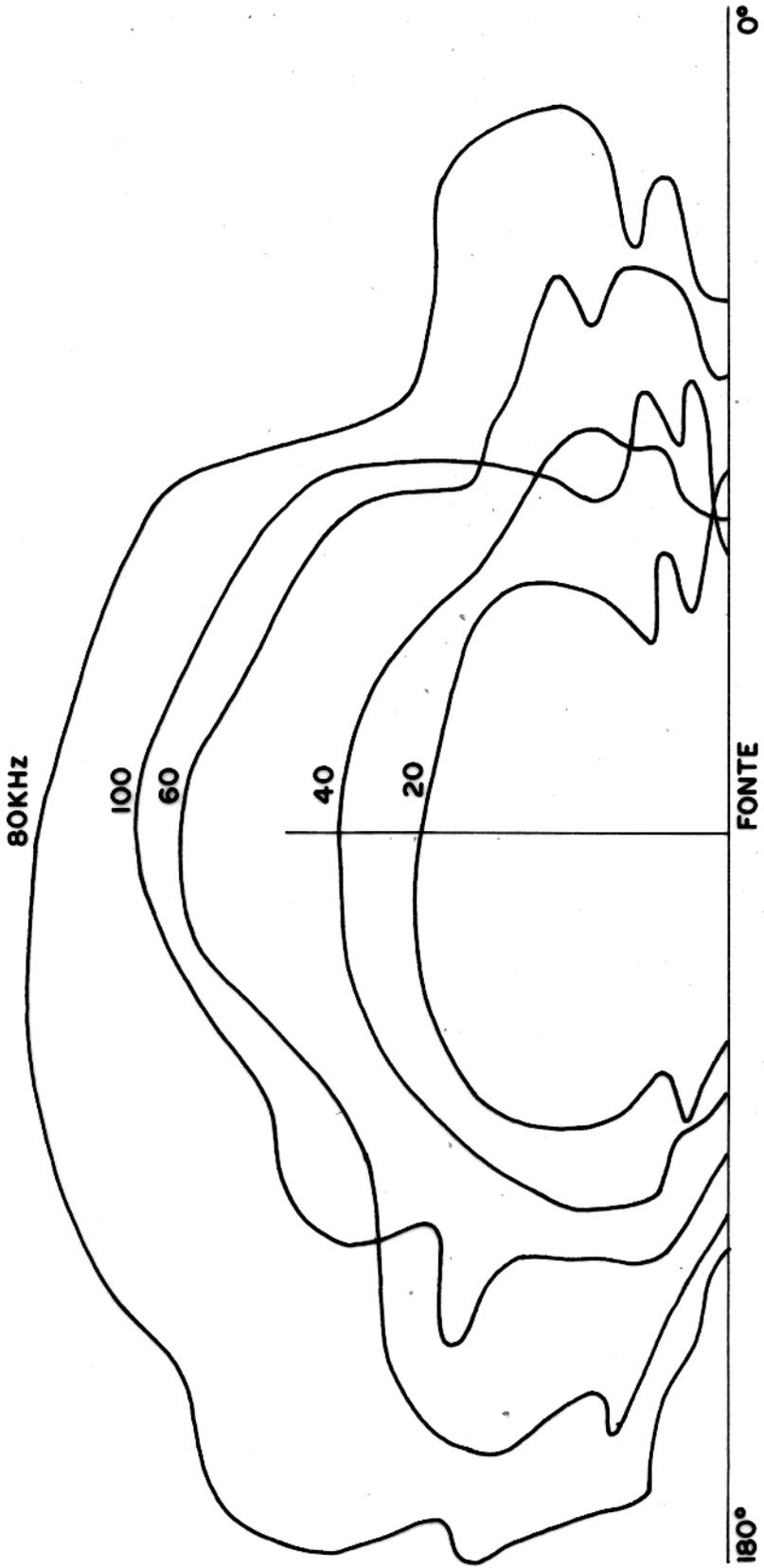


FIG. 34 - DIAGRAMA PARA A ONDA P NO PVC.

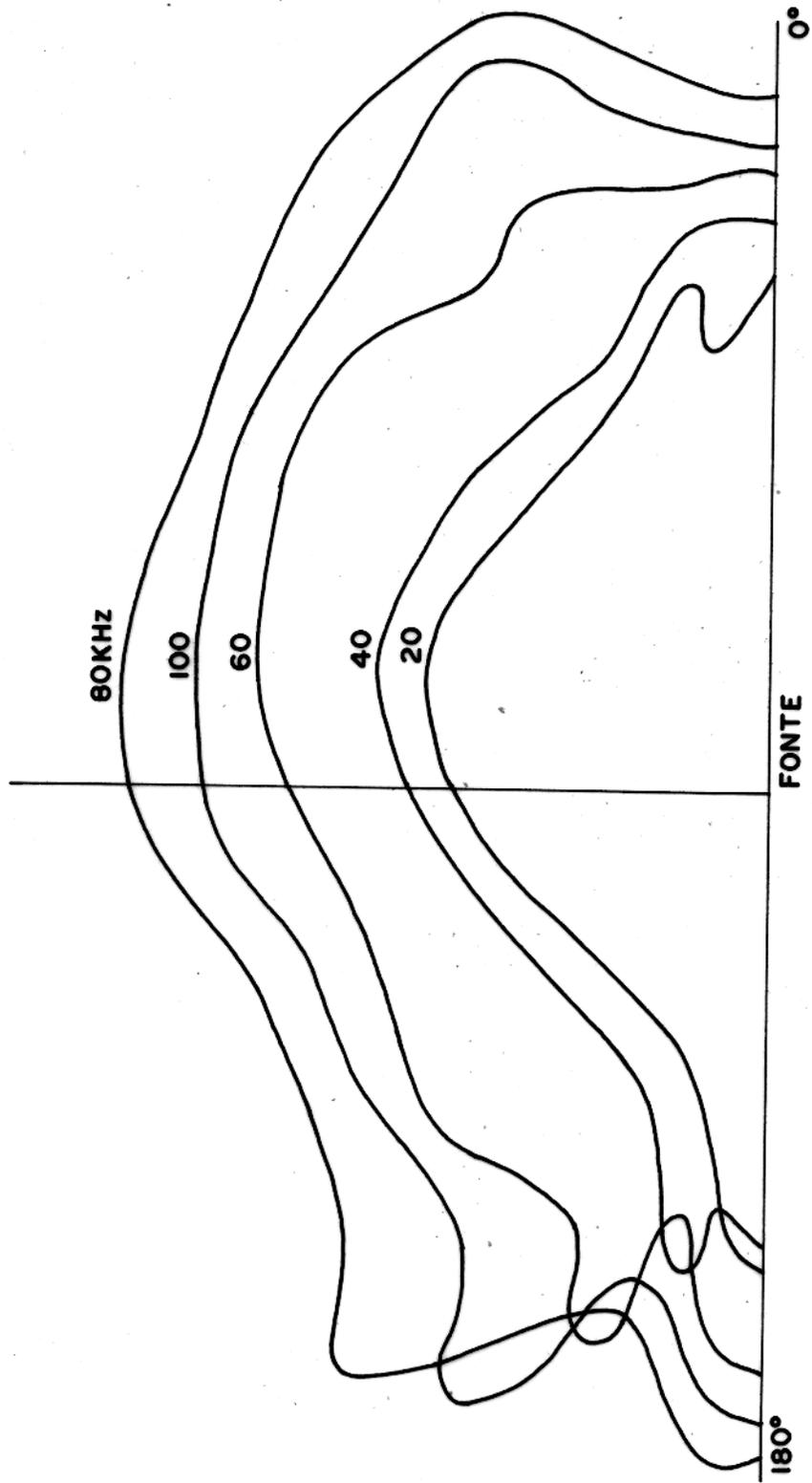


FIG. 35 - DIAGRAMAS PARA A ONDA P NO VIDRO.

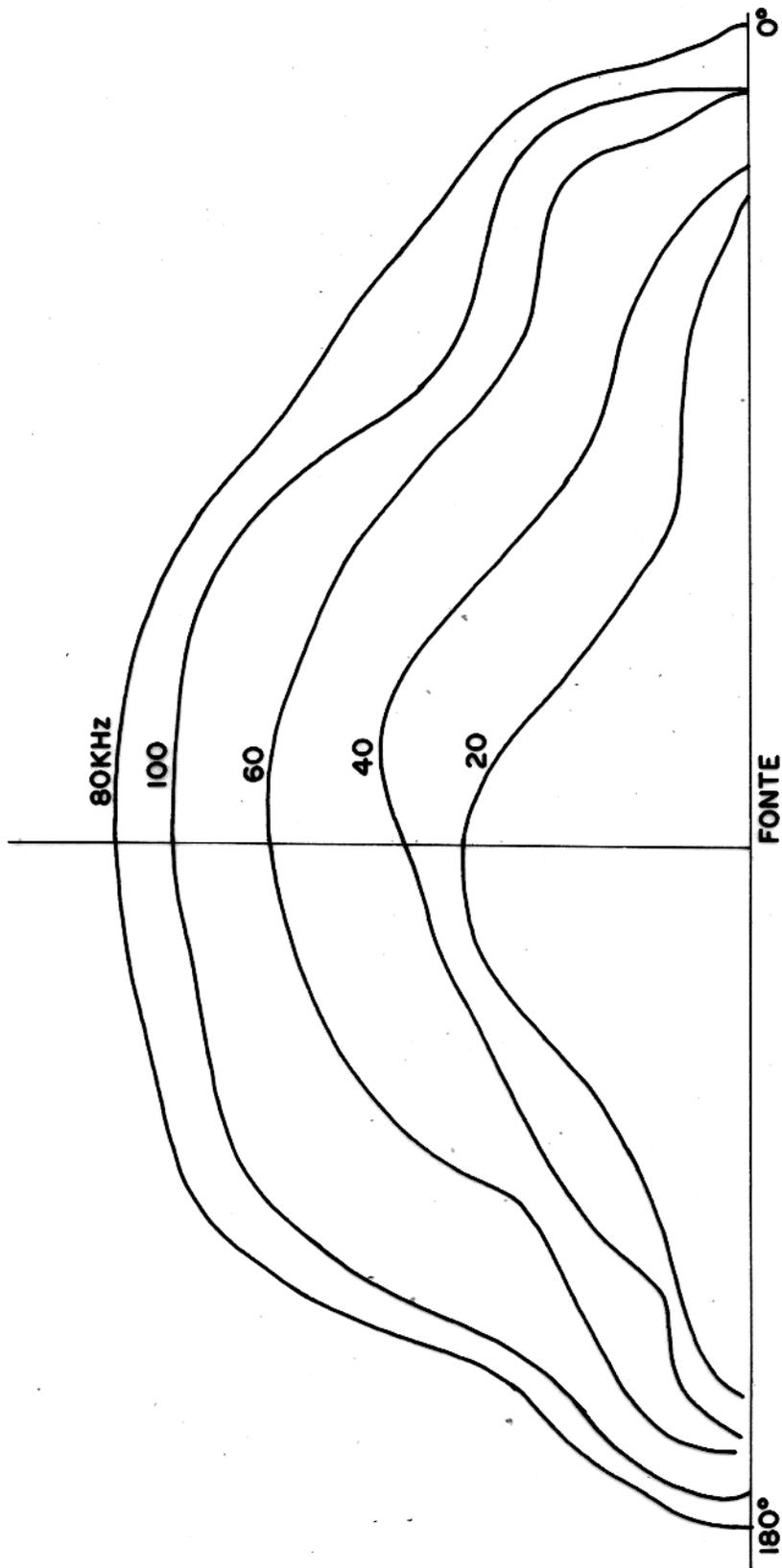


FIG. 36 - DIAGRAMAS PARA A ONDA P NO ALUMÍNIO.

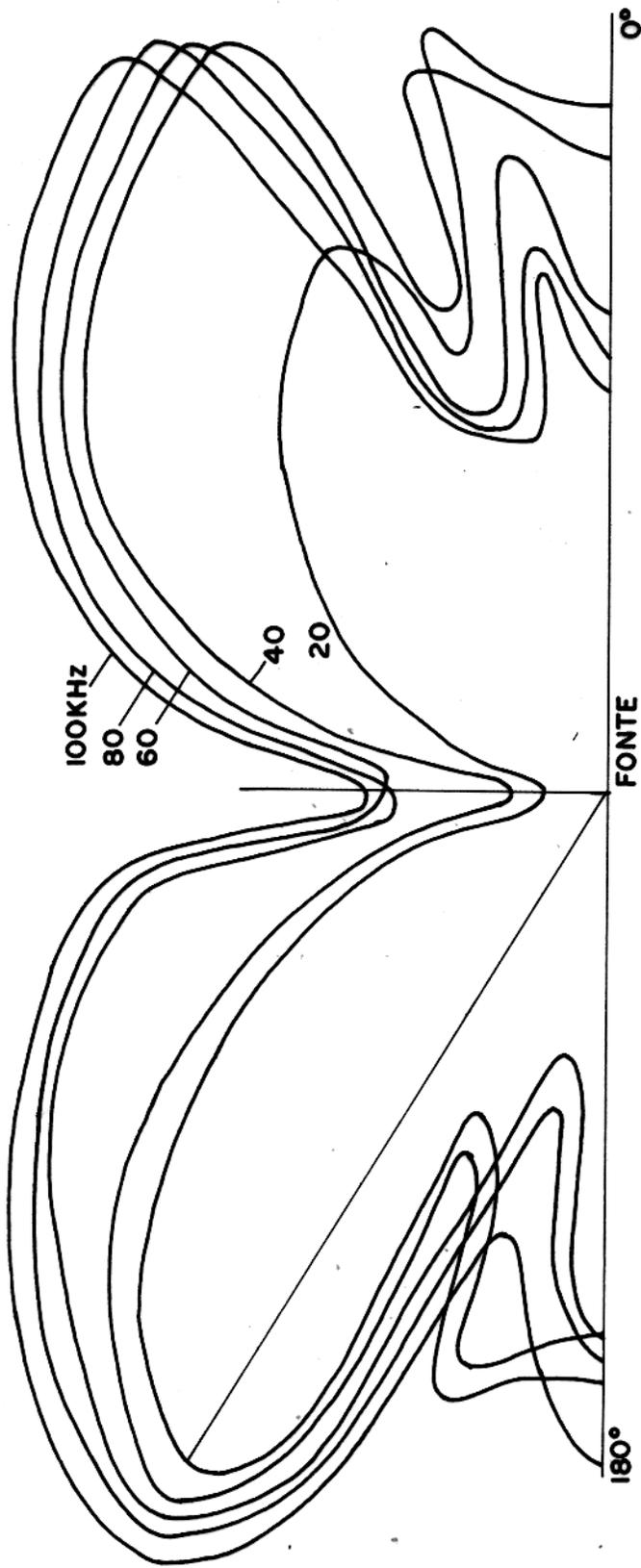


FIG. 37 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ACRÍLICO 2mm.

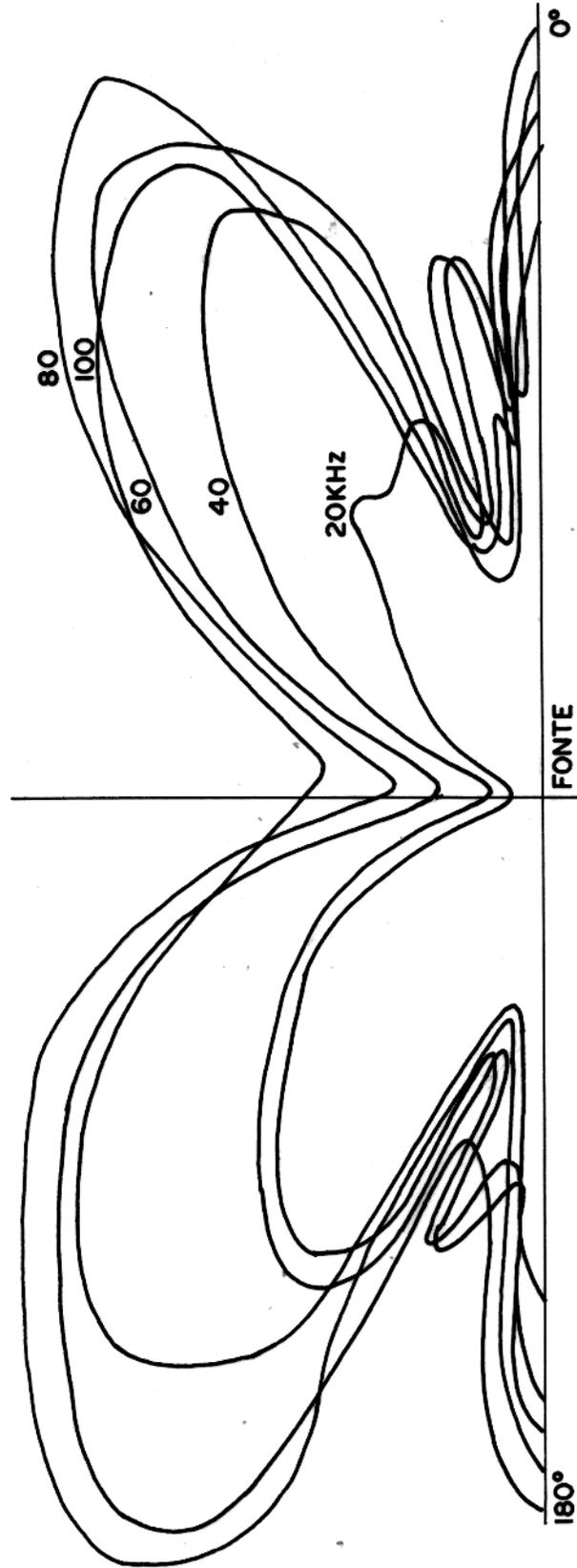


FIG. 38 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ACRÍLICO 3mm.

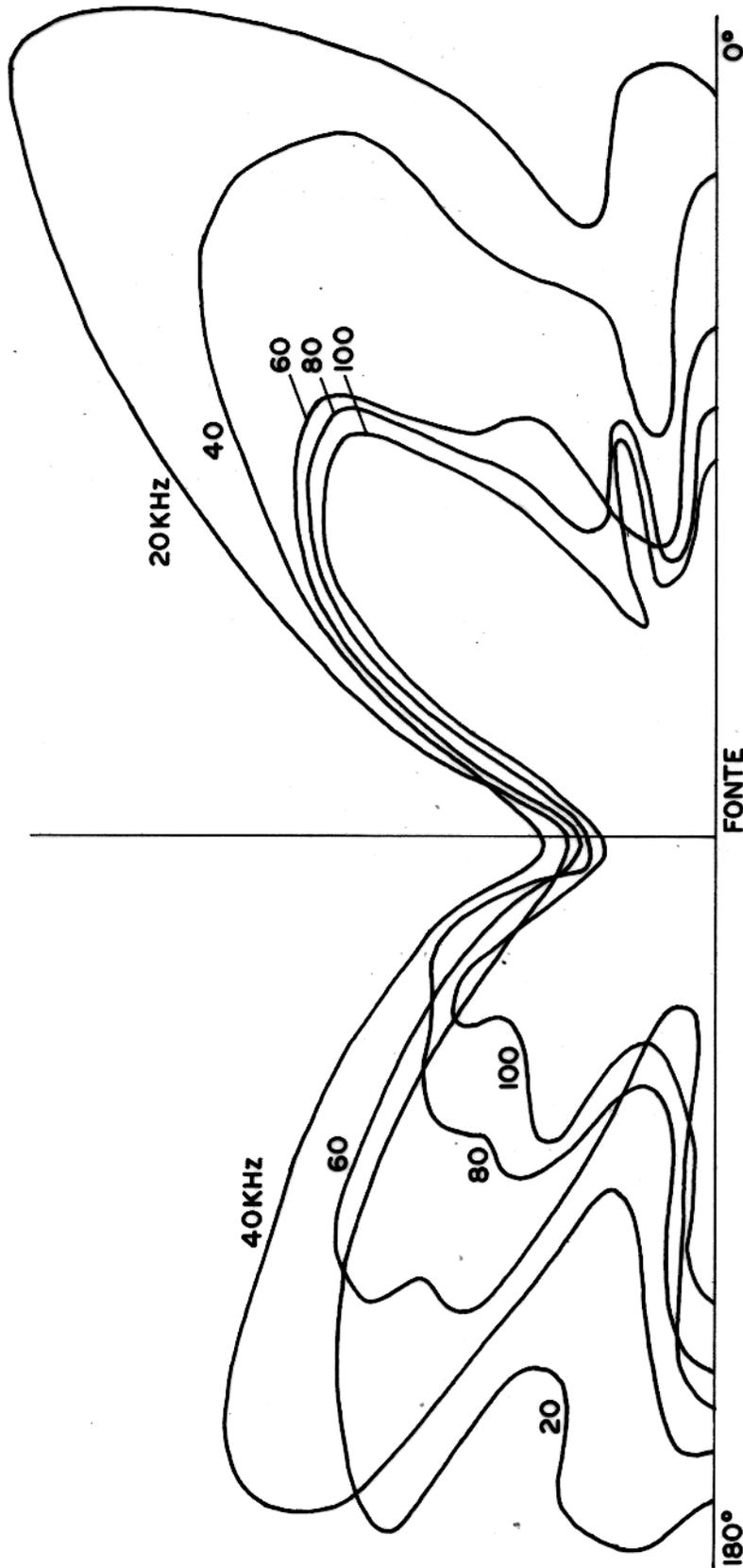


FIG. 39 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO PVC.

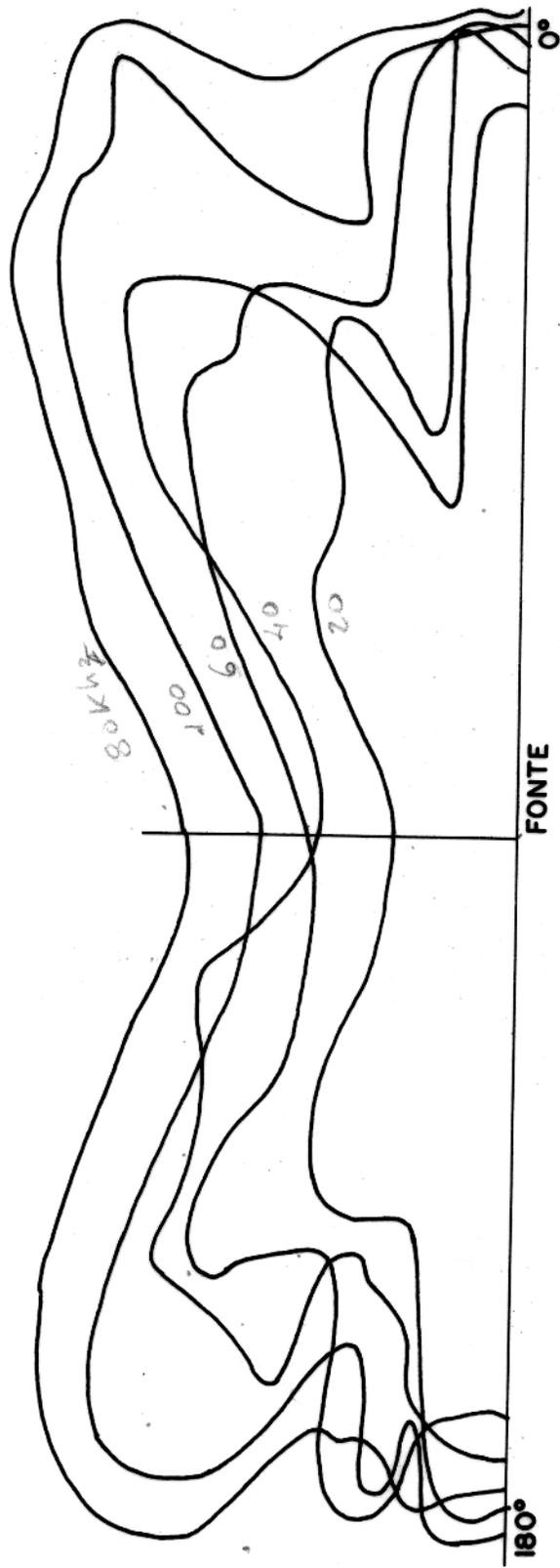


FIG. 40 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO VIDRO.

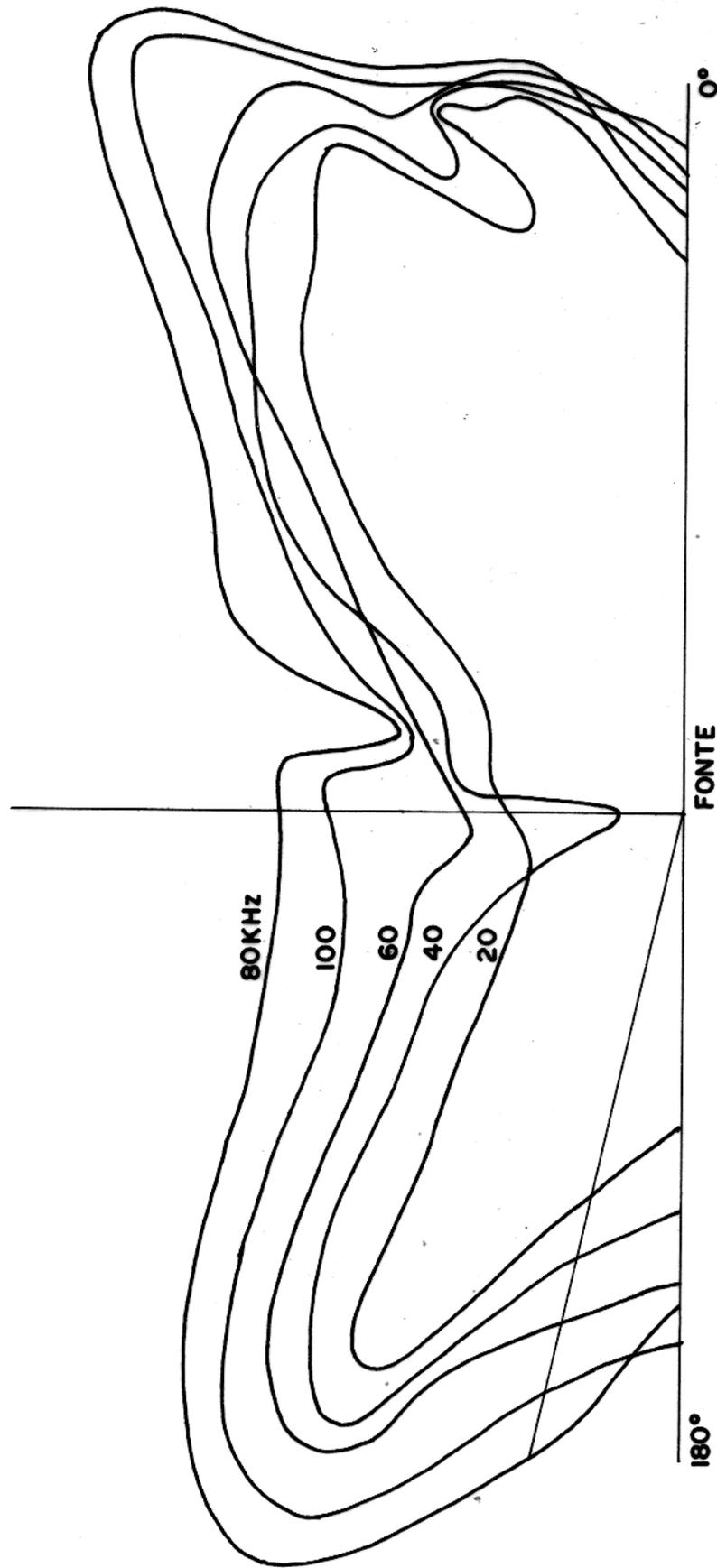


FIG. 41 - DIAGRAMAS PARA A ONDA S NO ALUMÍNIO.

FREQUÊNCIA (Khz)

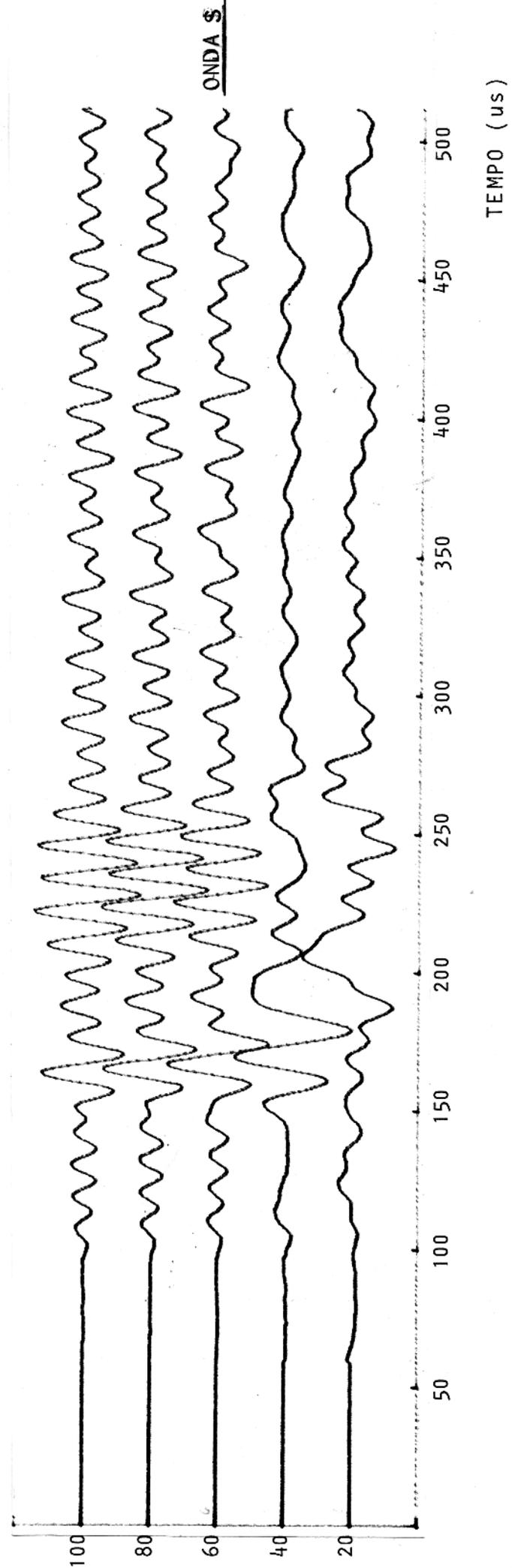
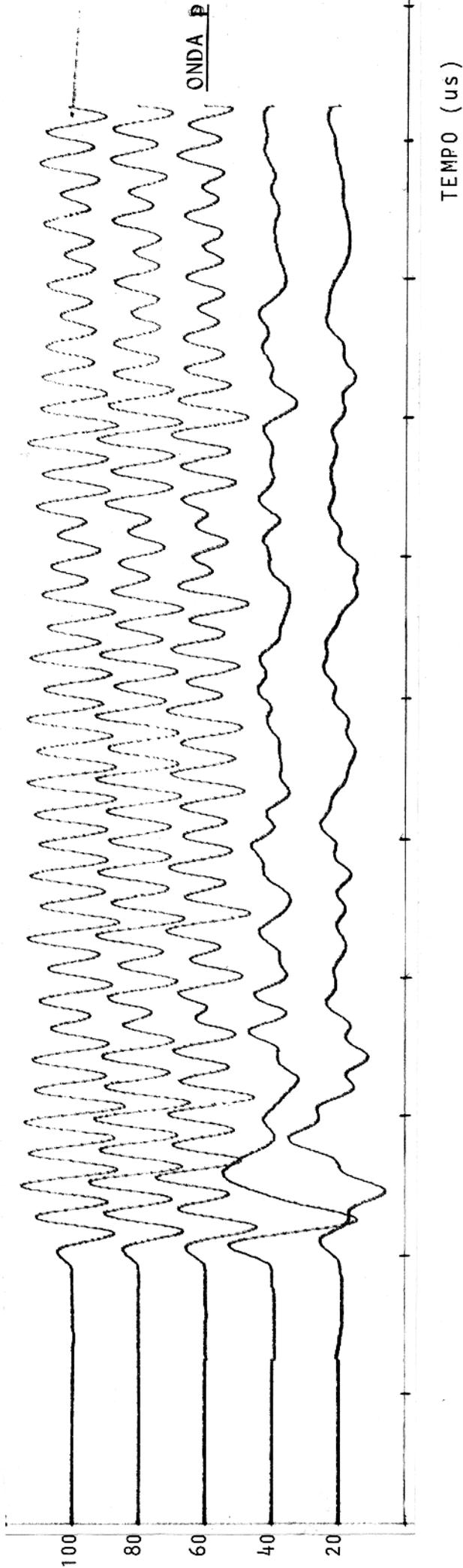


Fig. 42 - Resposta para diversas frequências (acrílico 3mm)

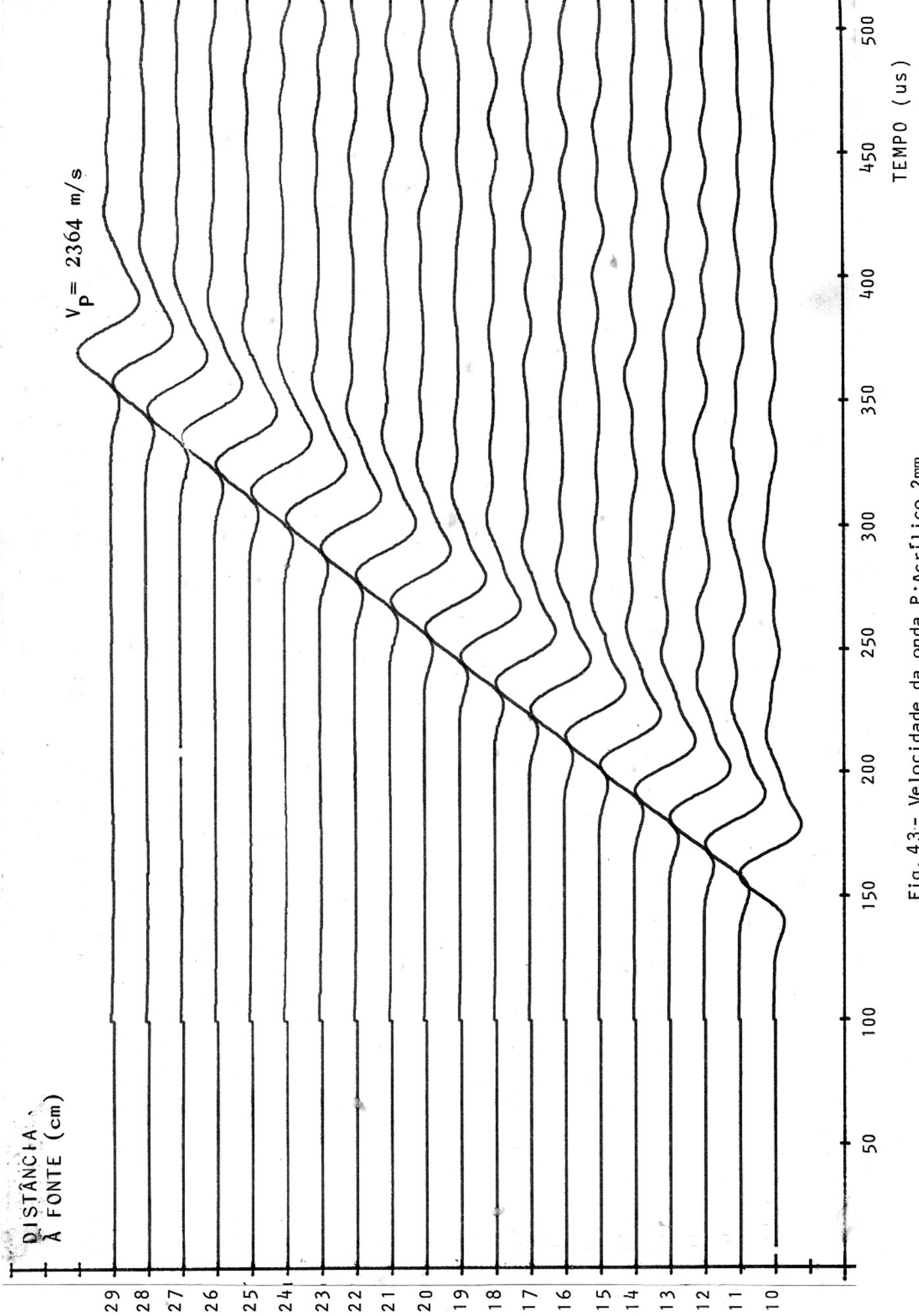


Fig. 43- Velocidade da onda P: Acrílico 2mm.

DISTÂNCIA
À FONTE (cm)

$V_p = 2292 \text{ m/s}$

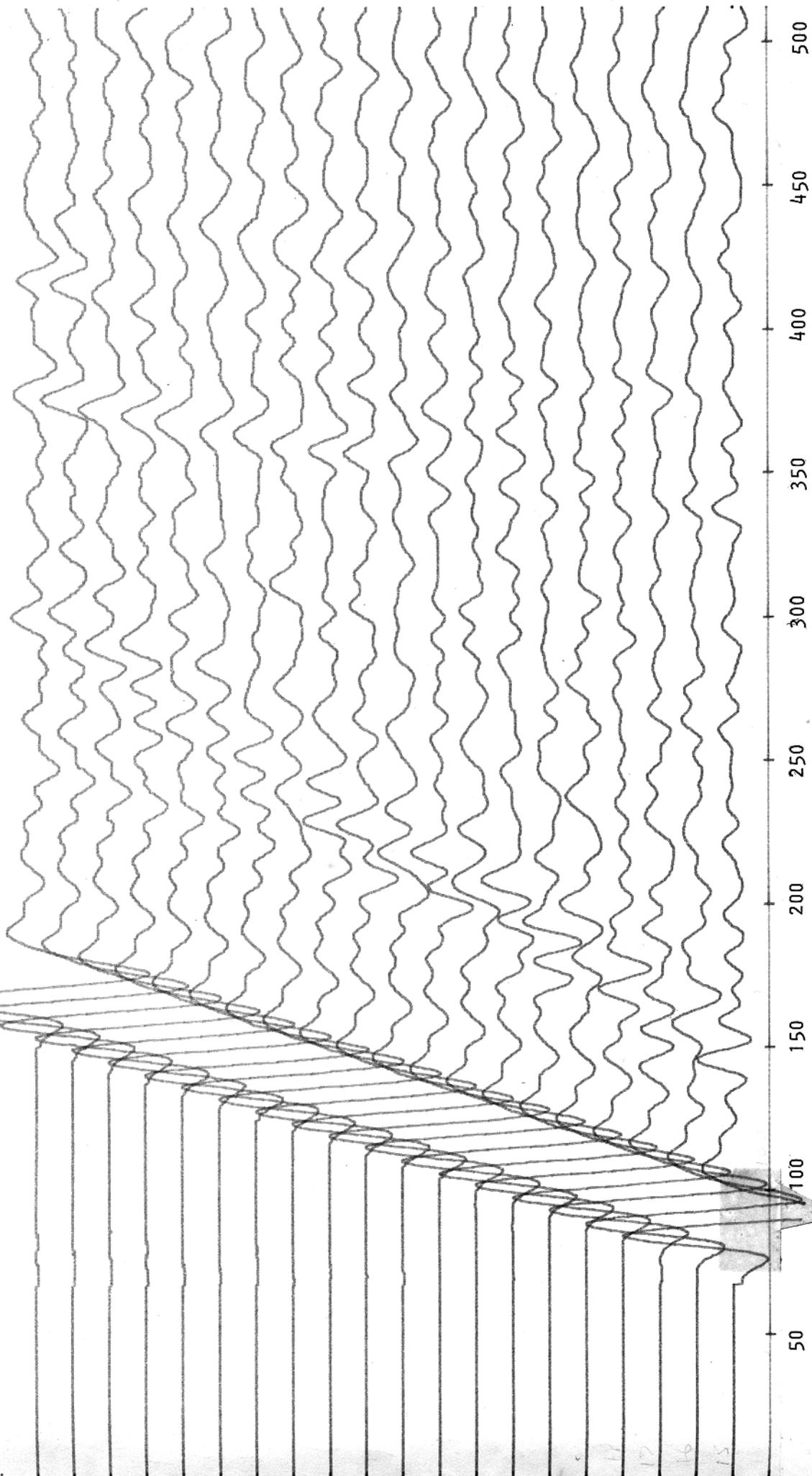


Fig.44 - Velocidade da onda P: acrílico 3mm.

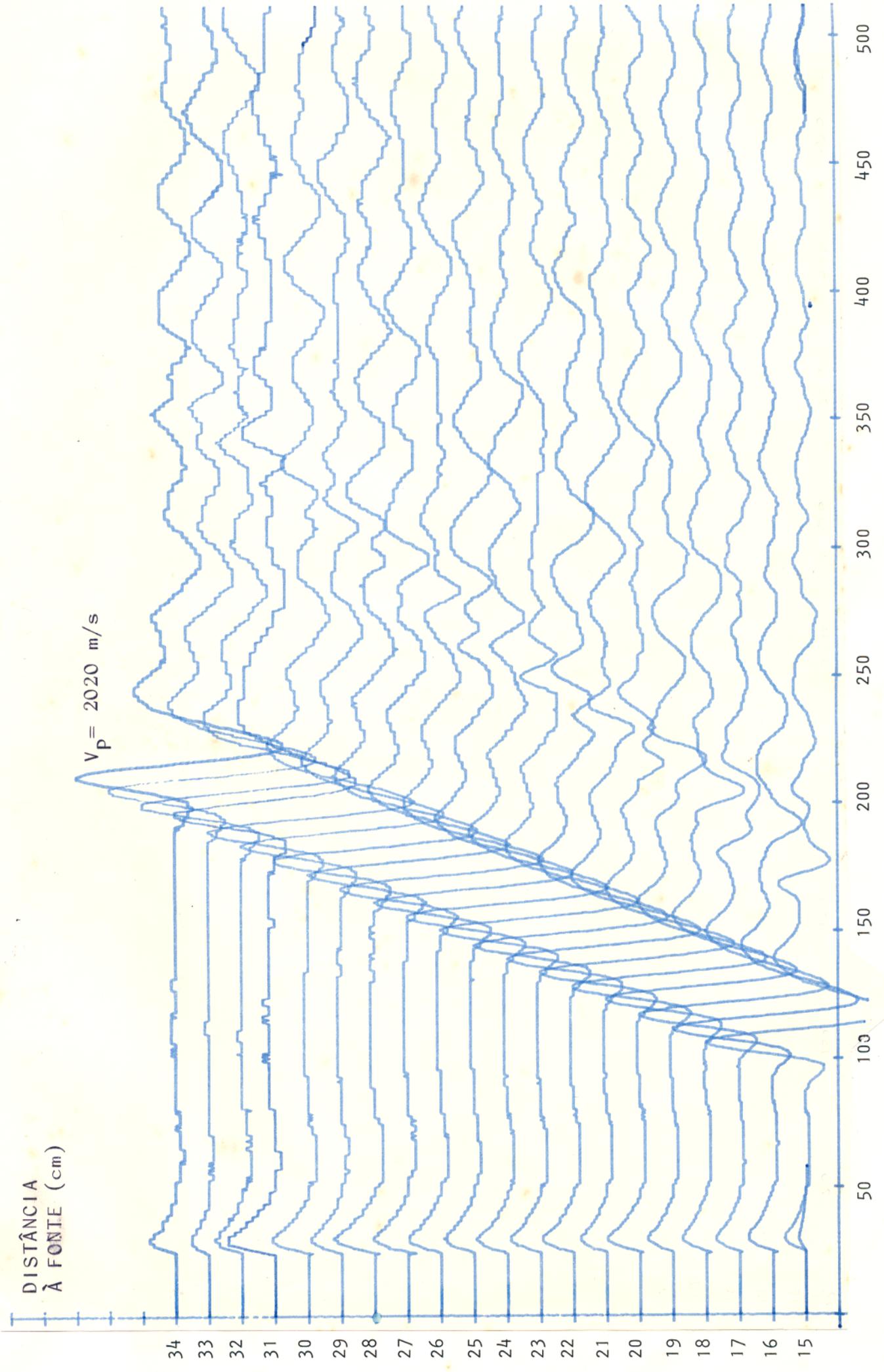


Fig.45 - Velocidade da onda P: PVC:

DISTÂNCIA
À FONTE (cm)

$v_p = 5700 \text{ m/s}$

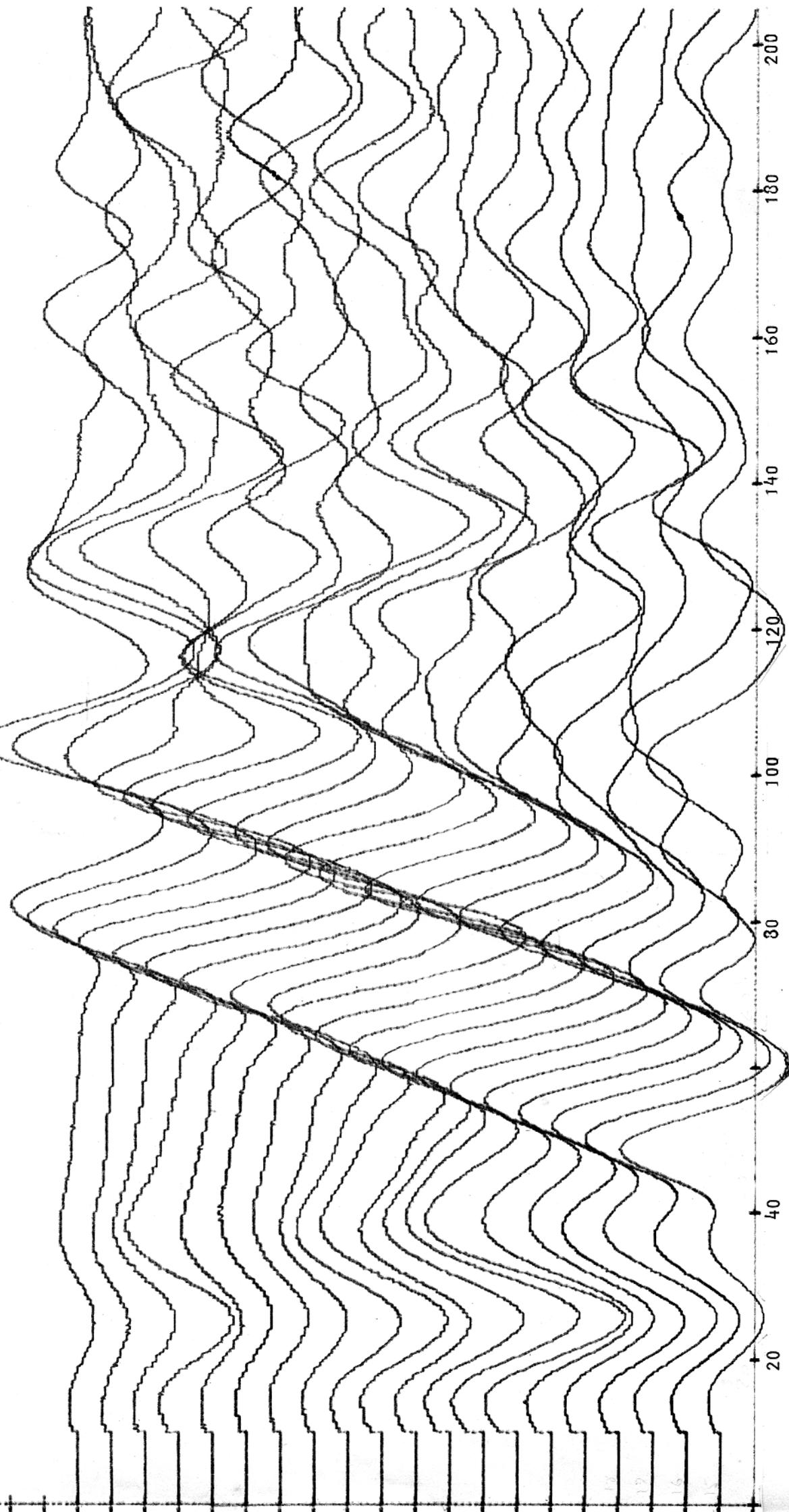


Fig.46 - Velocidade da onda P: Vidro

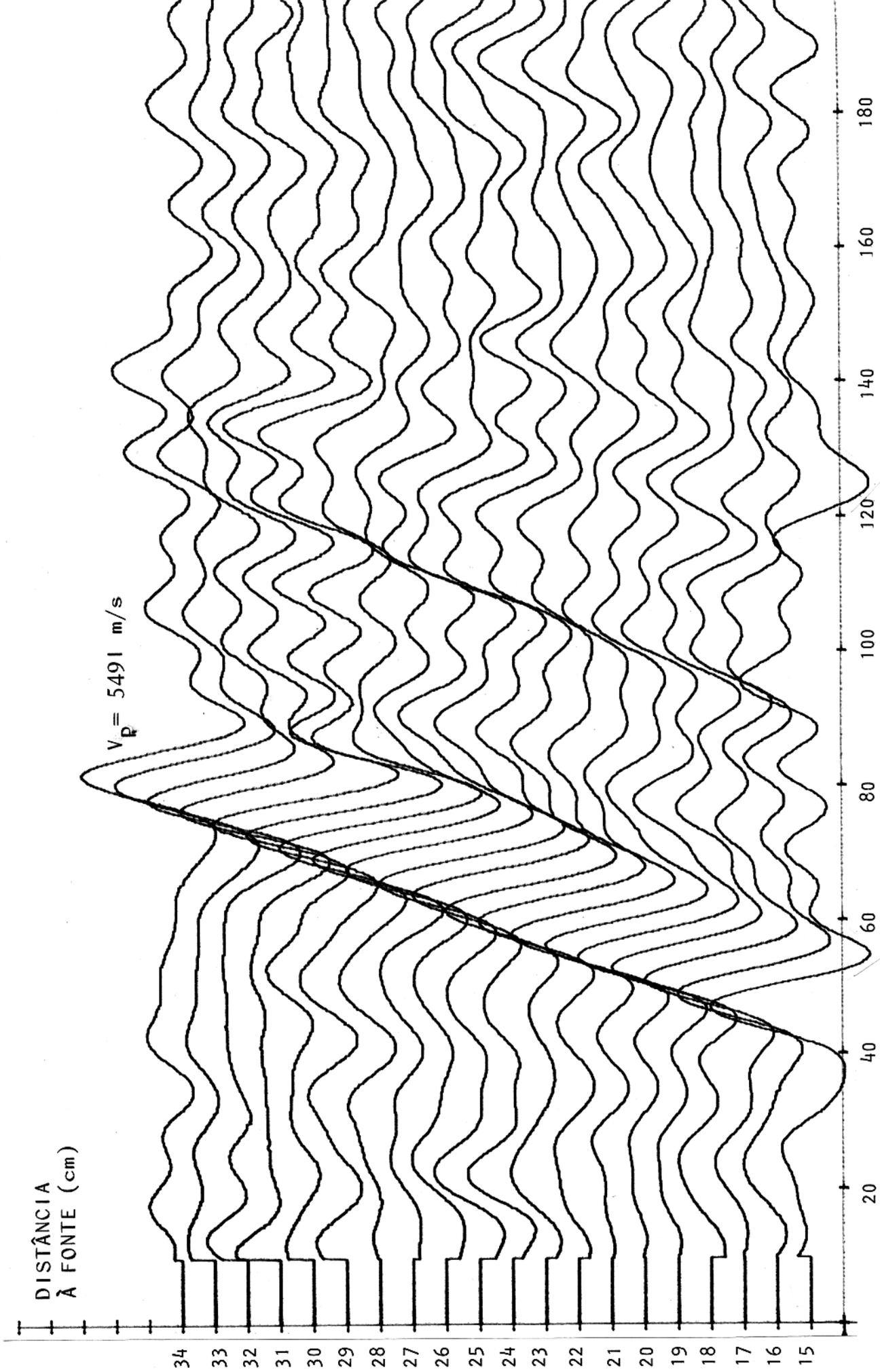


Fig.47 - Velocidade da onda P: Alumínio

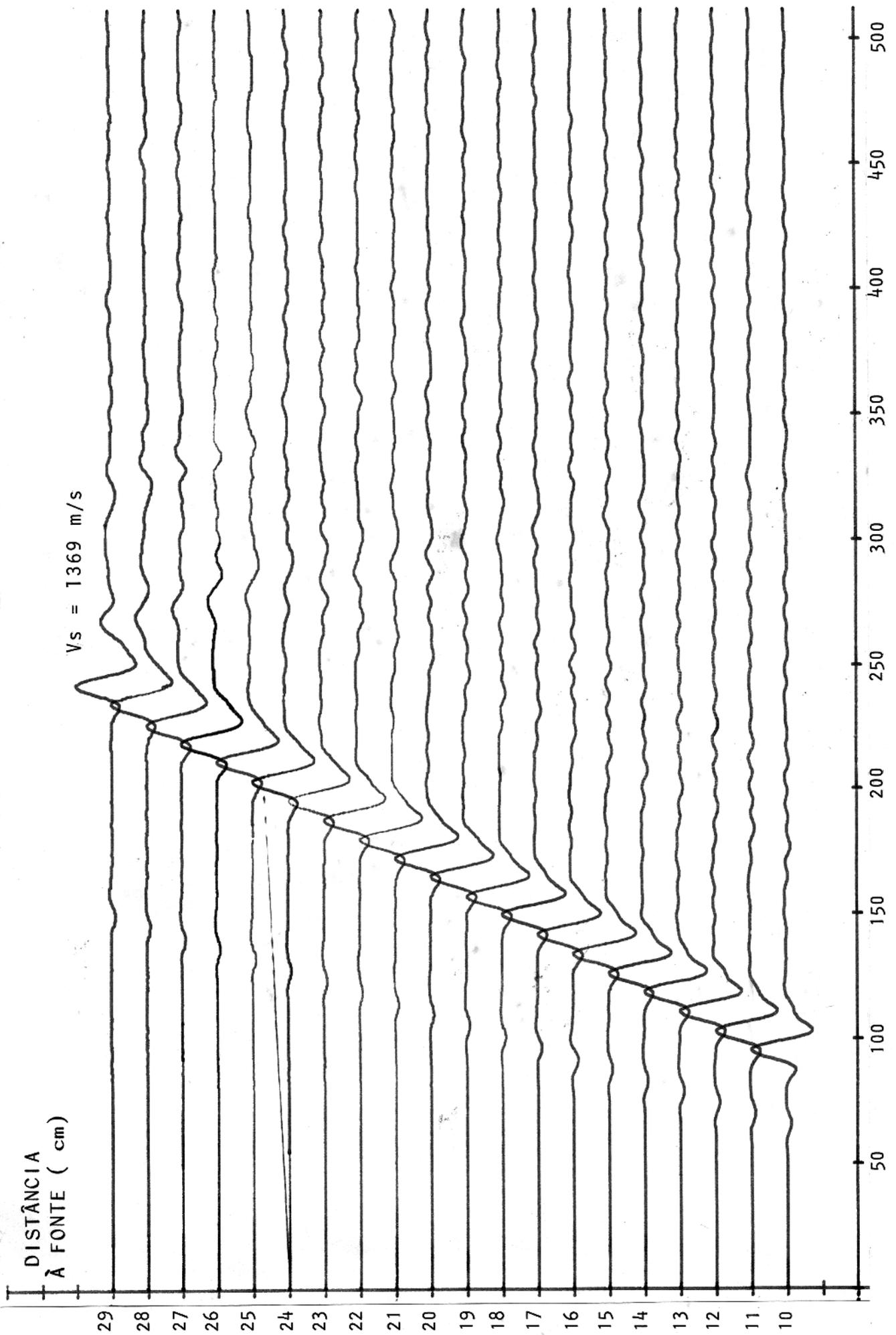


Fig. 48 - Velocidade da onda S: Acrílico 2mm

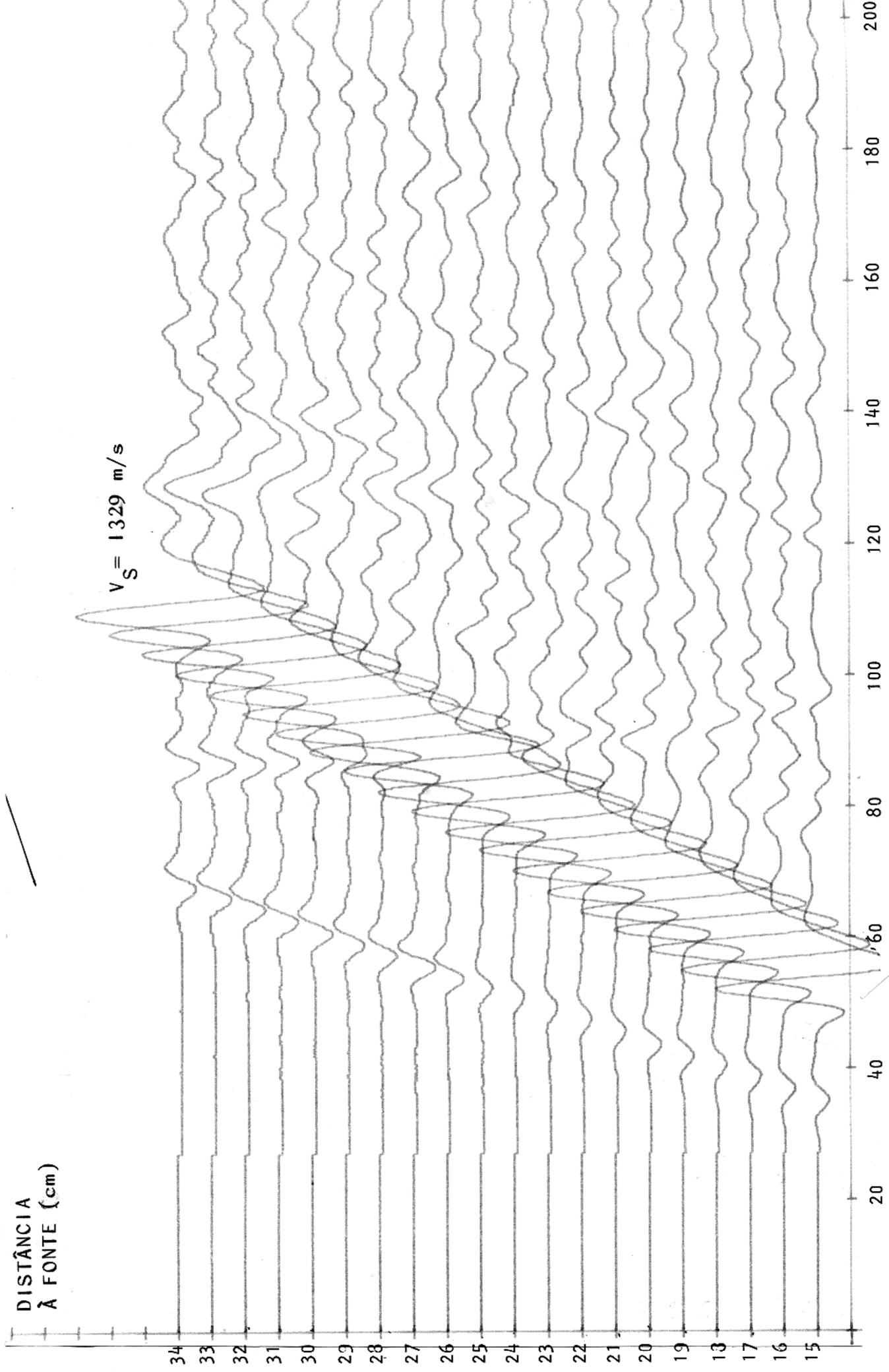


Fig. 49- Velocidade da onda S: Acrílico 3mm.

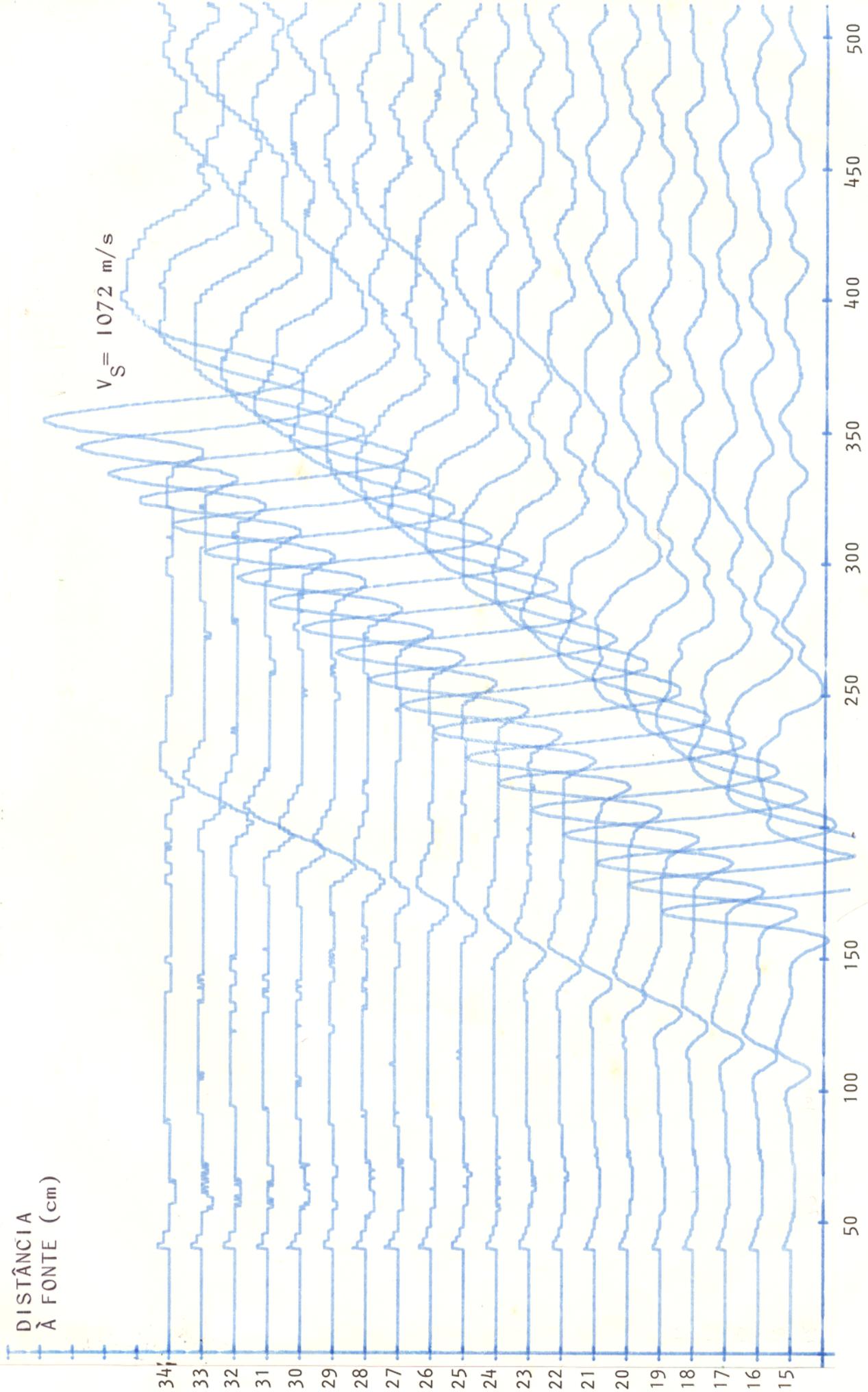


Fig.50 - Velocidade da onda S: PVC.

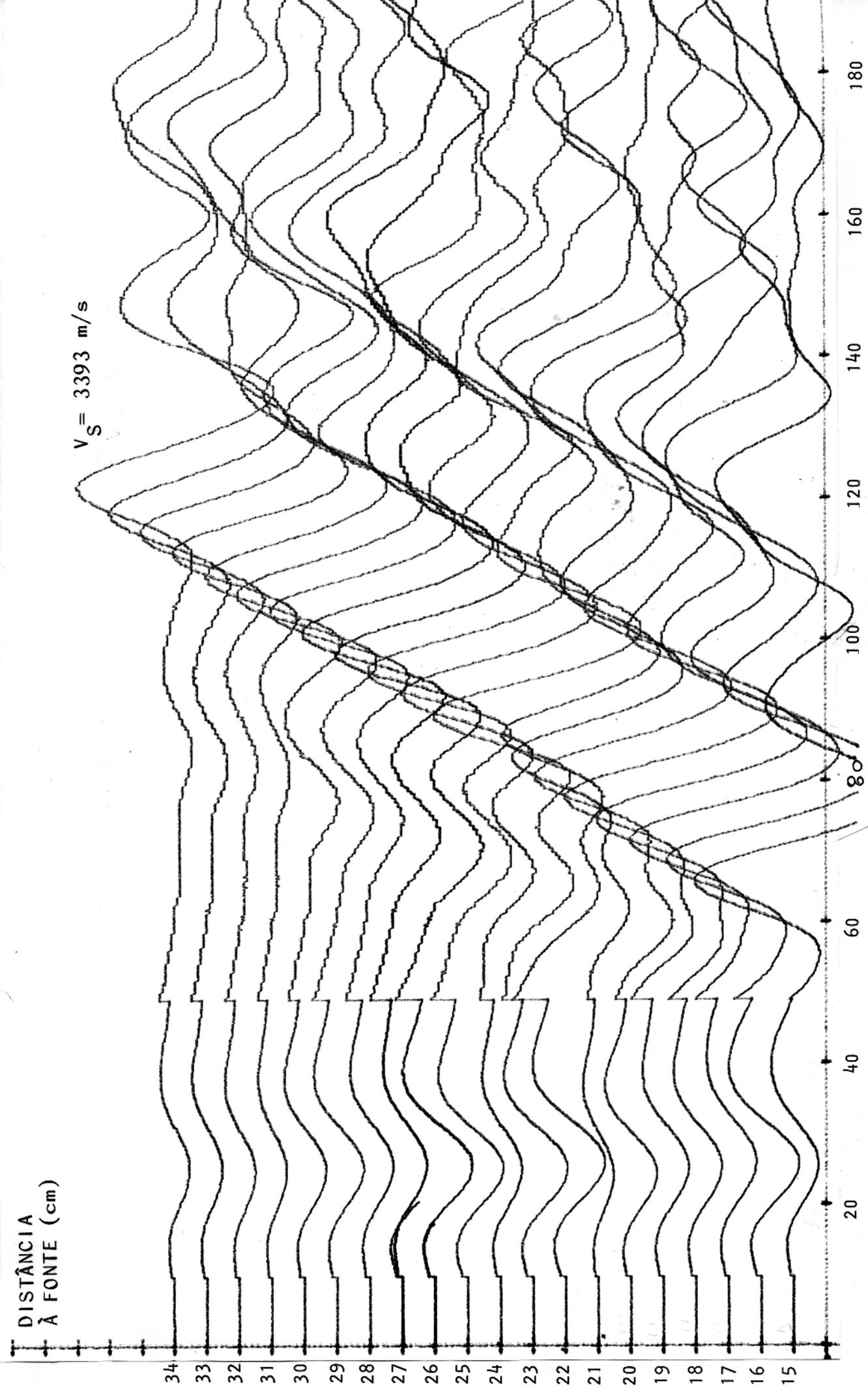


Fig. 51- Velocidade da onda S: Vidro.

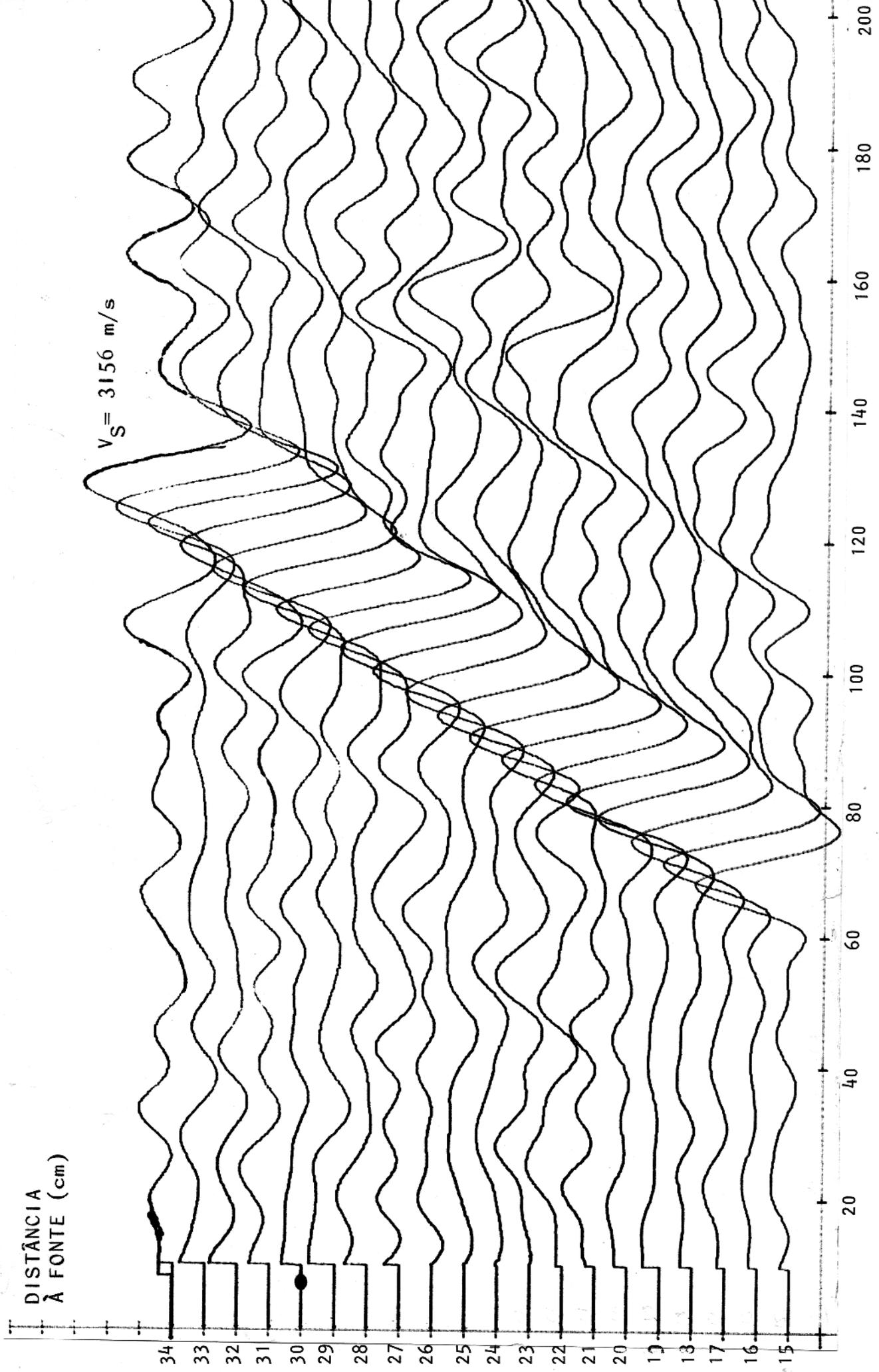


Fig. 52- Velocidade da onda S: Alumínio.

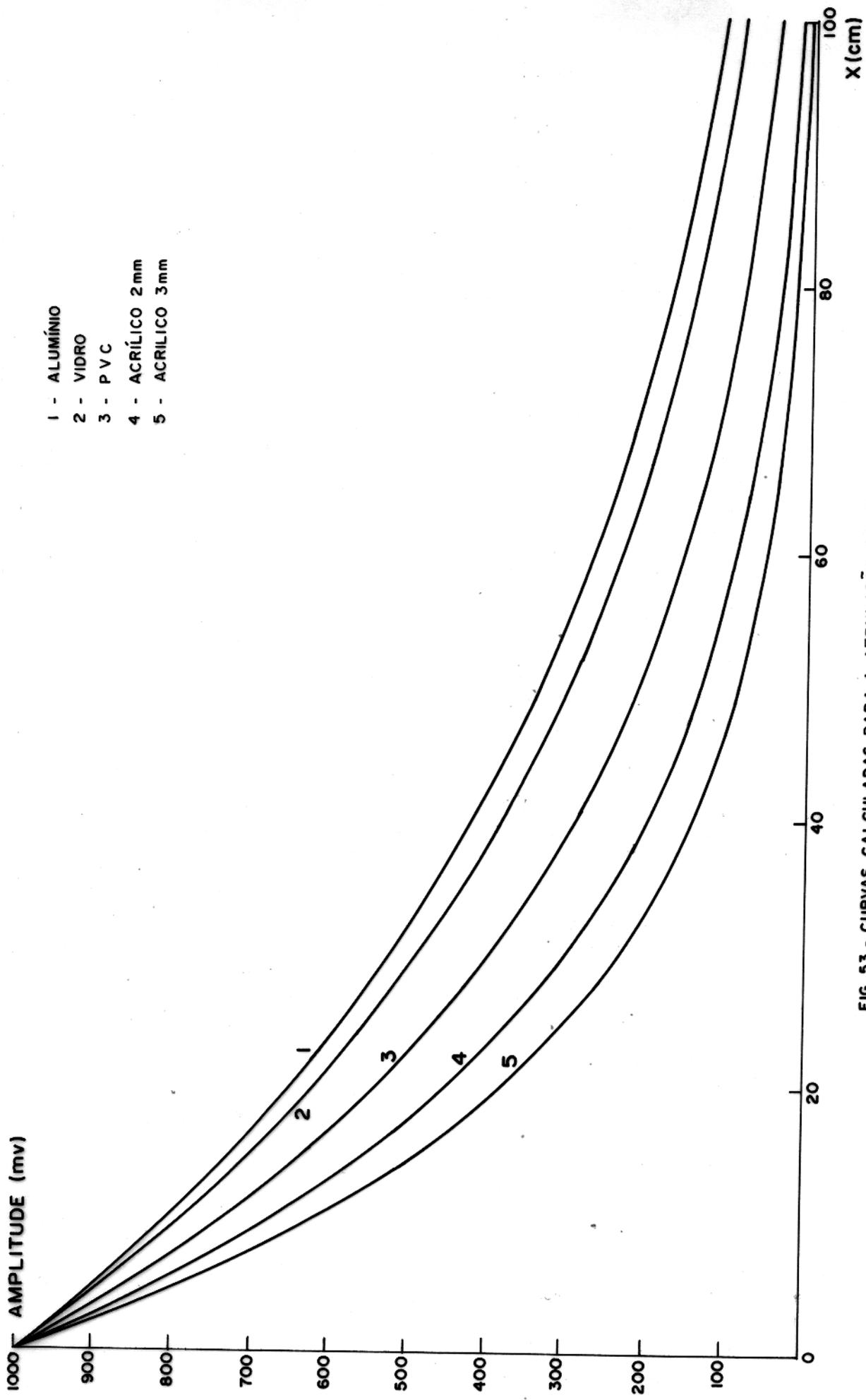


FIG. 53 - CURVAS CALCULADAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA P.

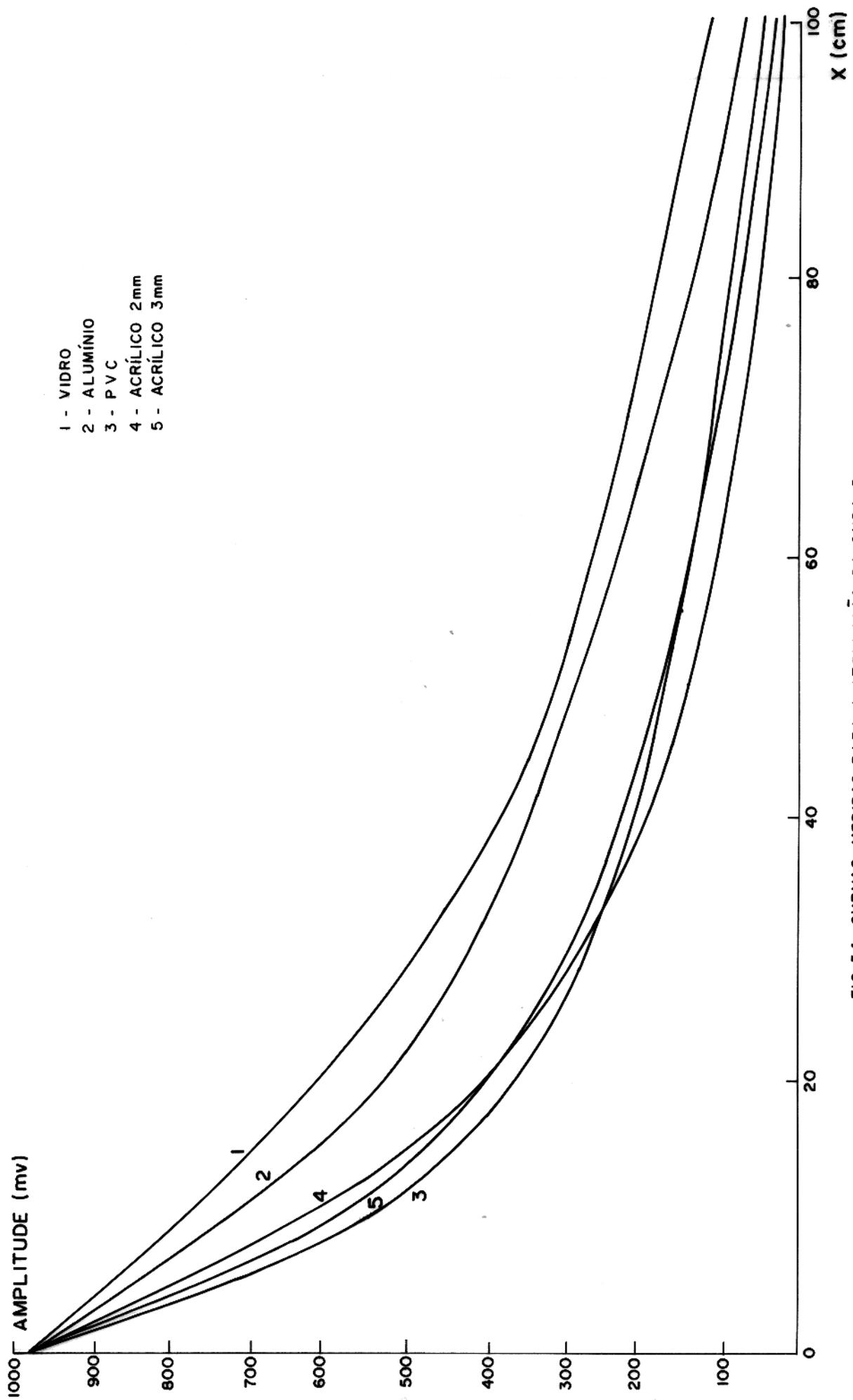


FIG. 54 - CURVAS MEDIDAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA P.

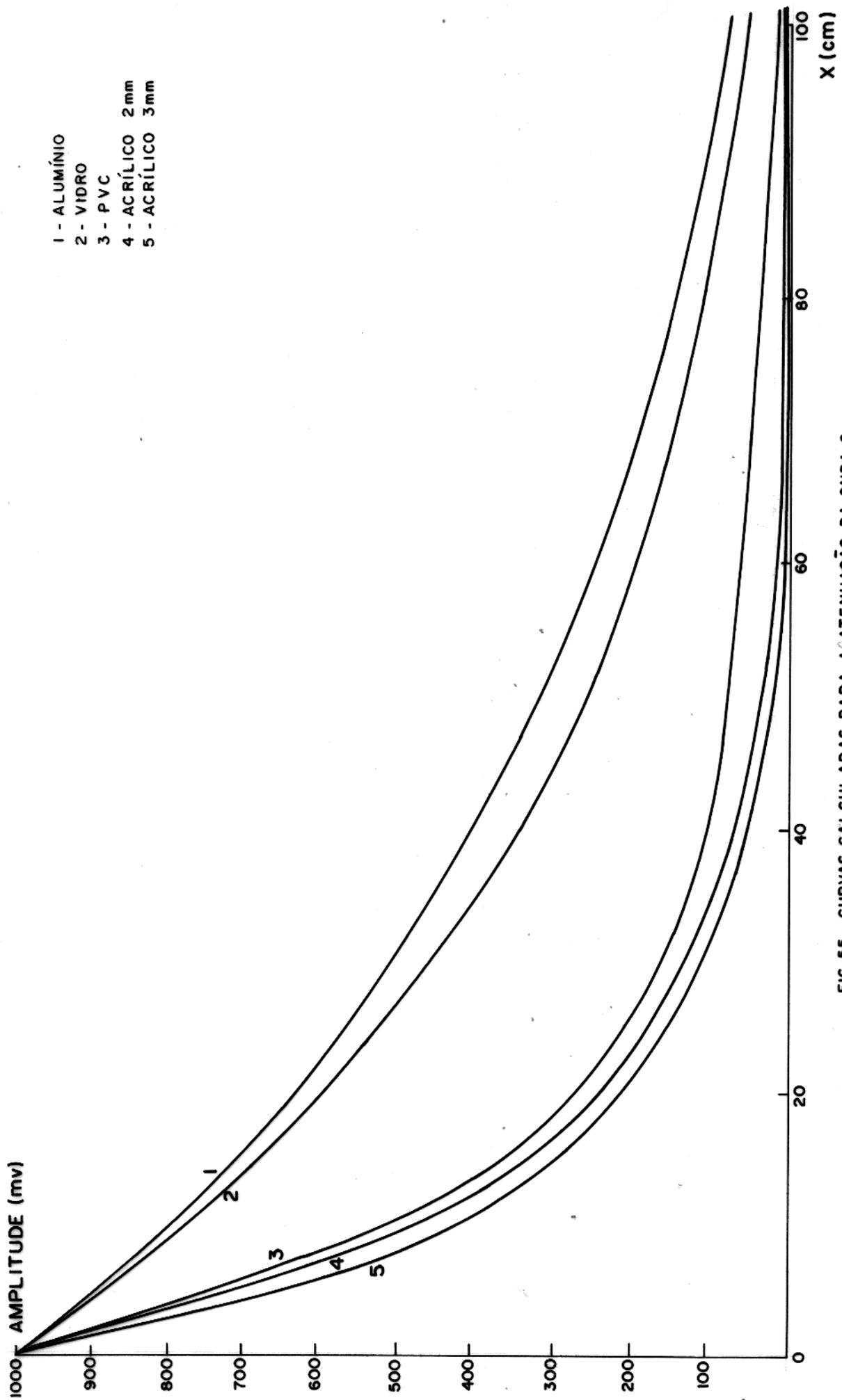


FIG. 55 - CURVAS CALCULADAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA S.

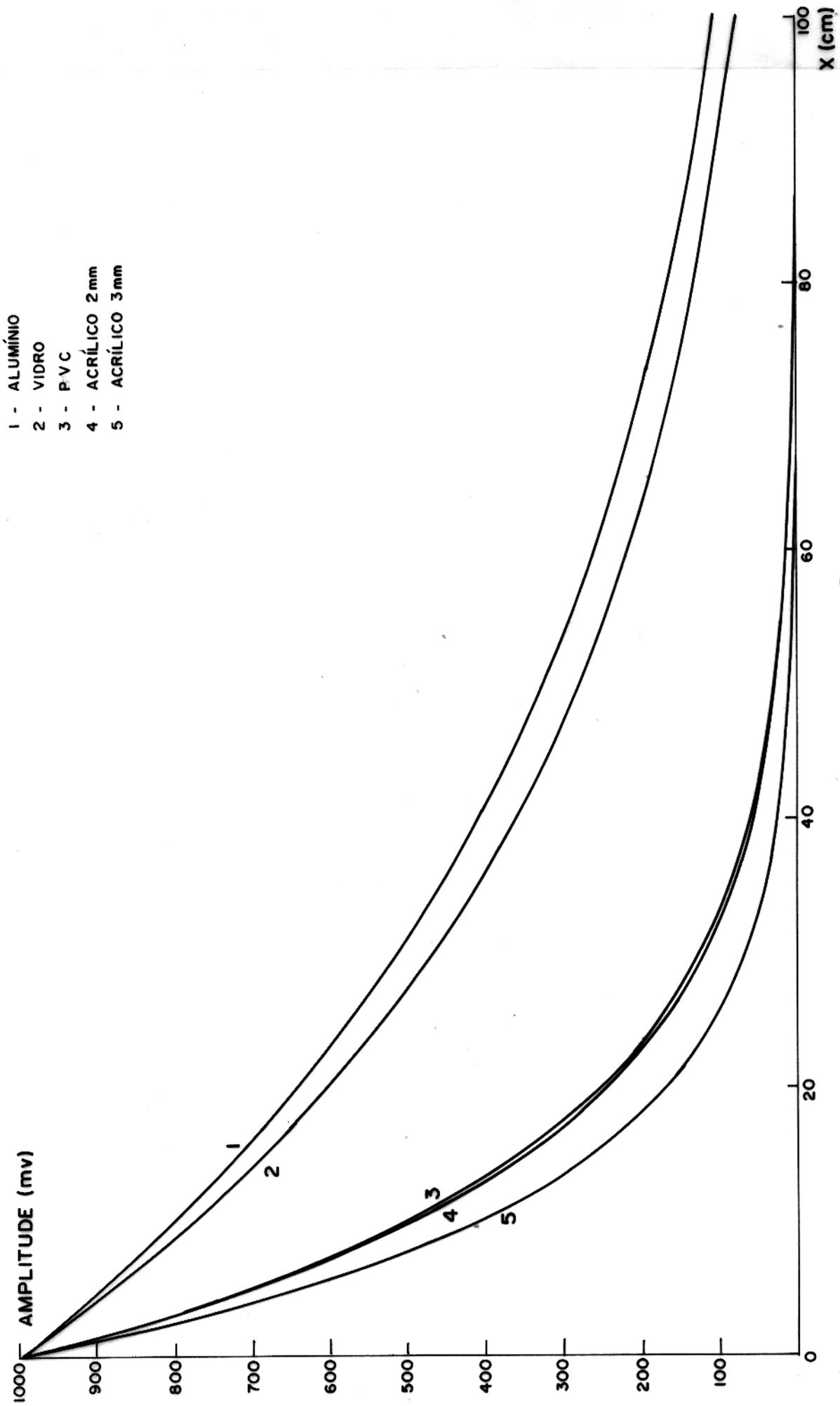


FIG. 56 - CURVAS MEDIDAS PARA A ATENUAÇÃO DA ONDA S.

TEMPO (us)

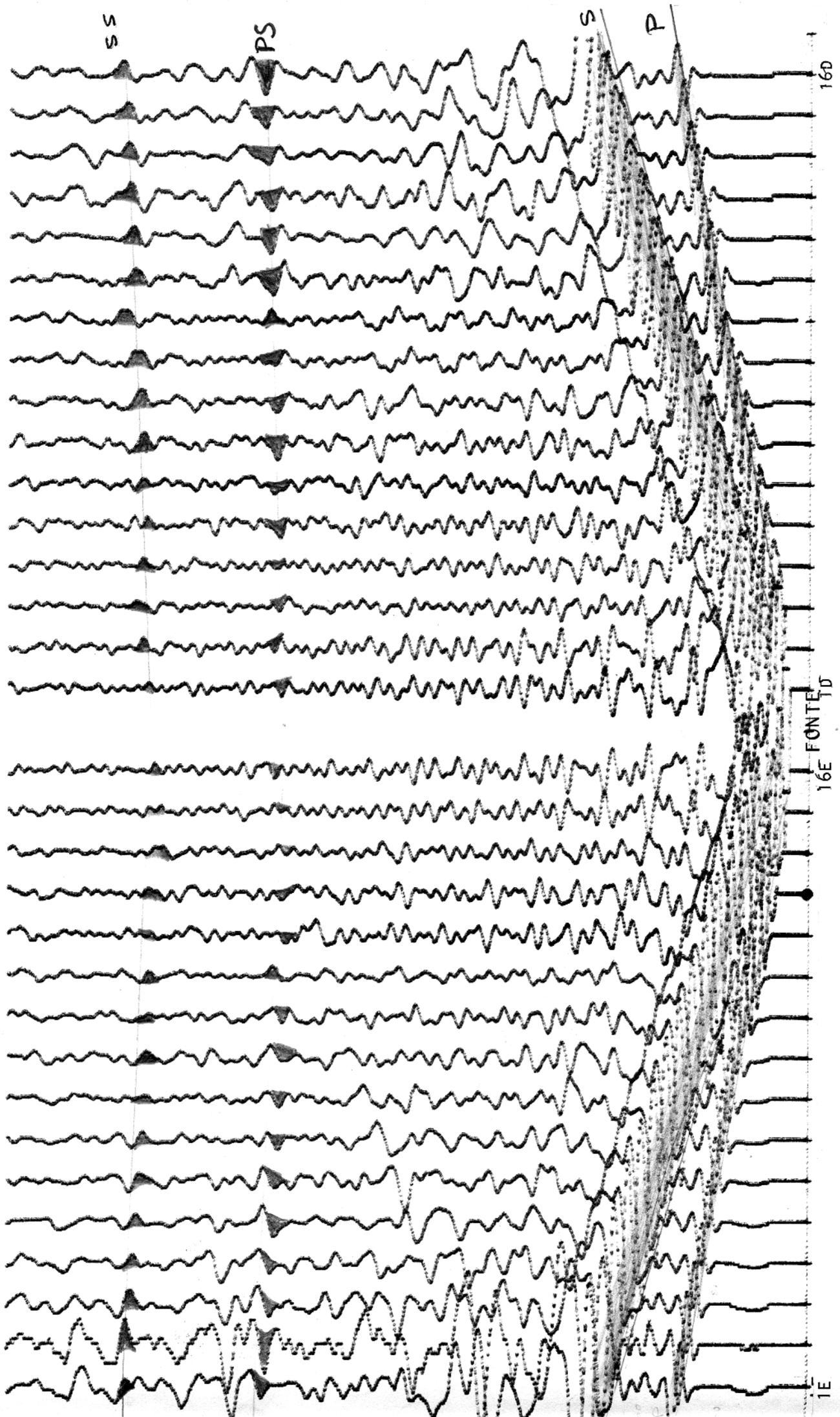


Fig. 58 - Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface plana - componente vertical.

DISTÂNCIA À FONTE

16D

FONTE
16E

1E

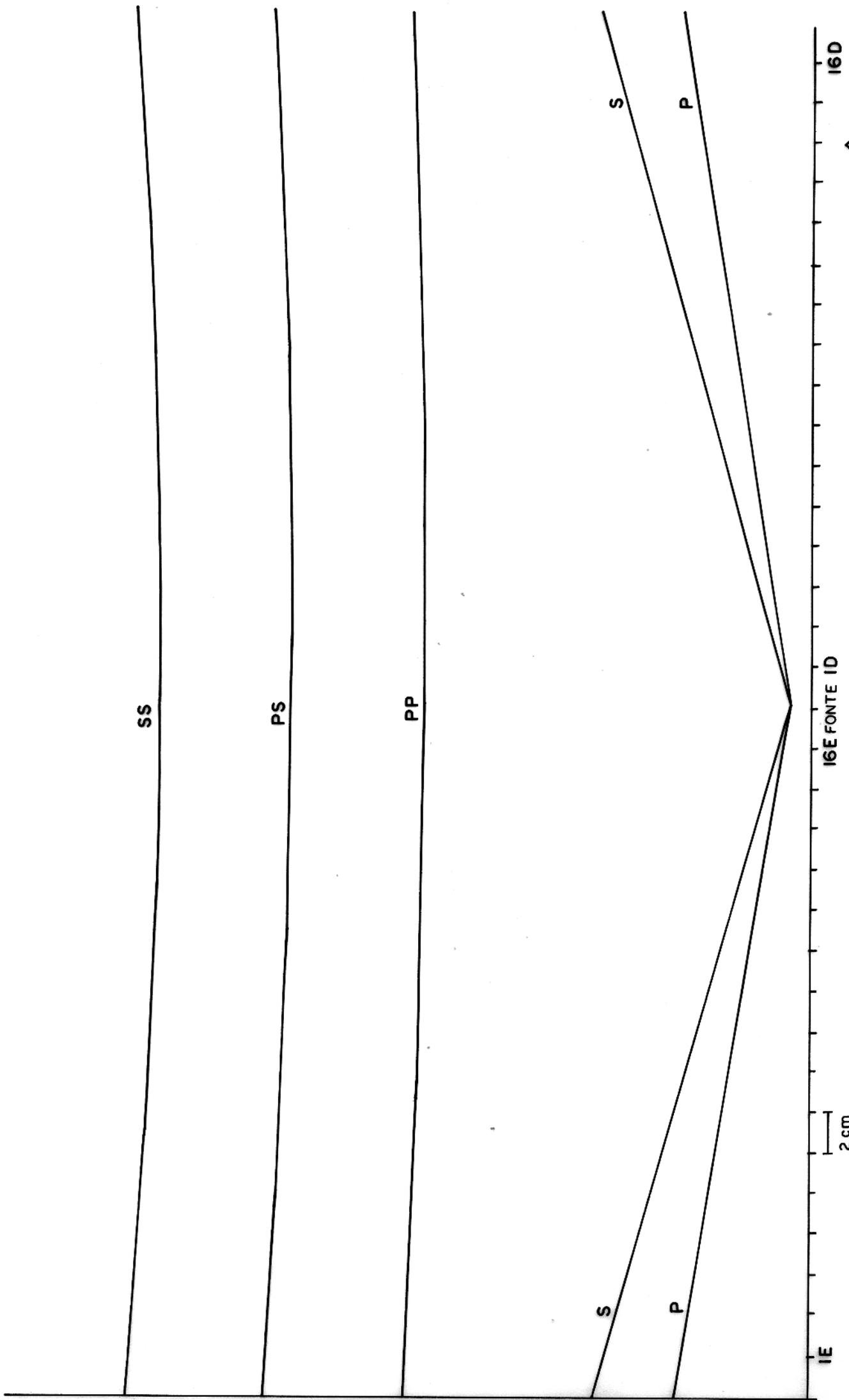


FIG. 59 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE UMA CAMADA, INTERFACE PLANA.

TEMPO (us)

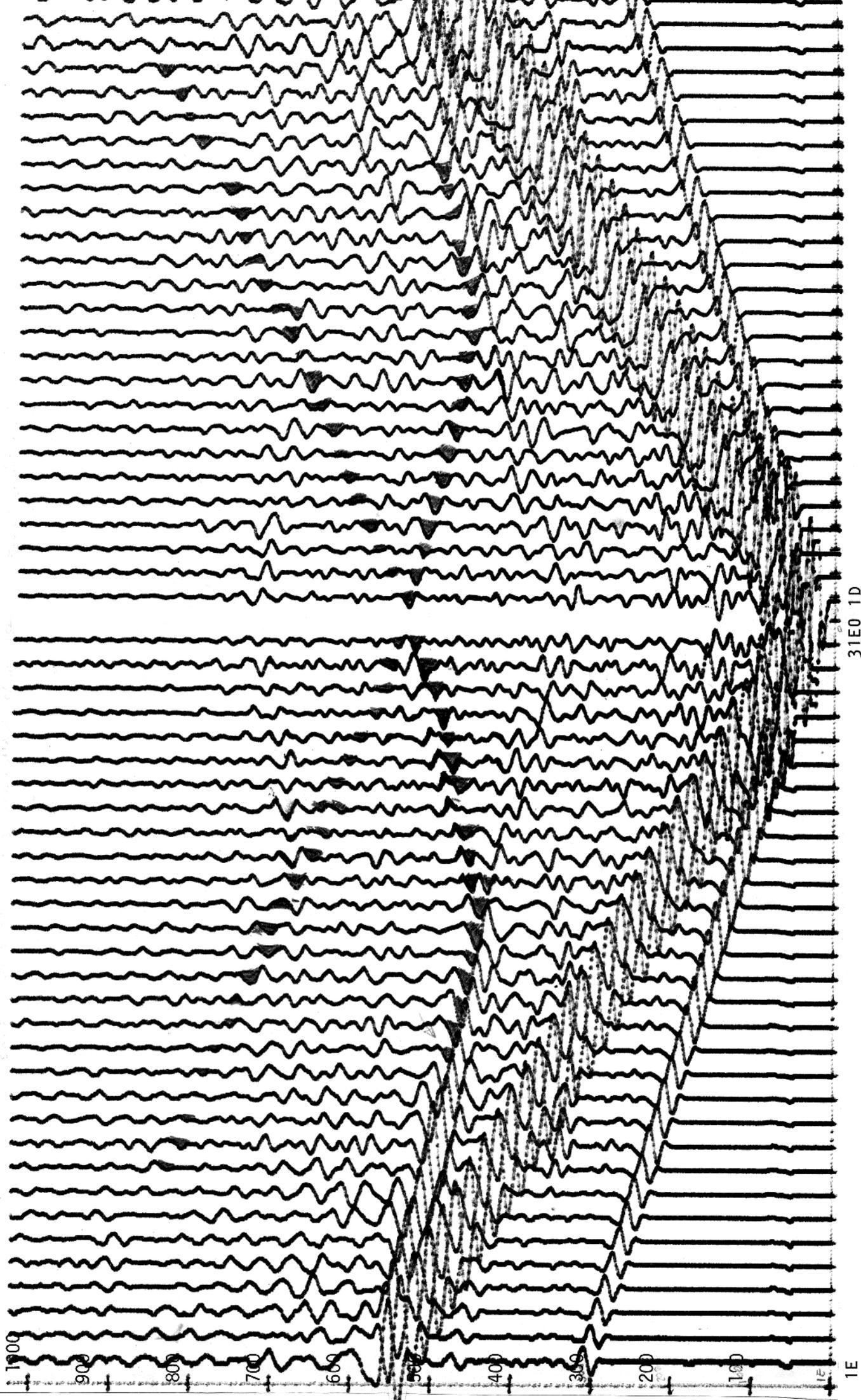
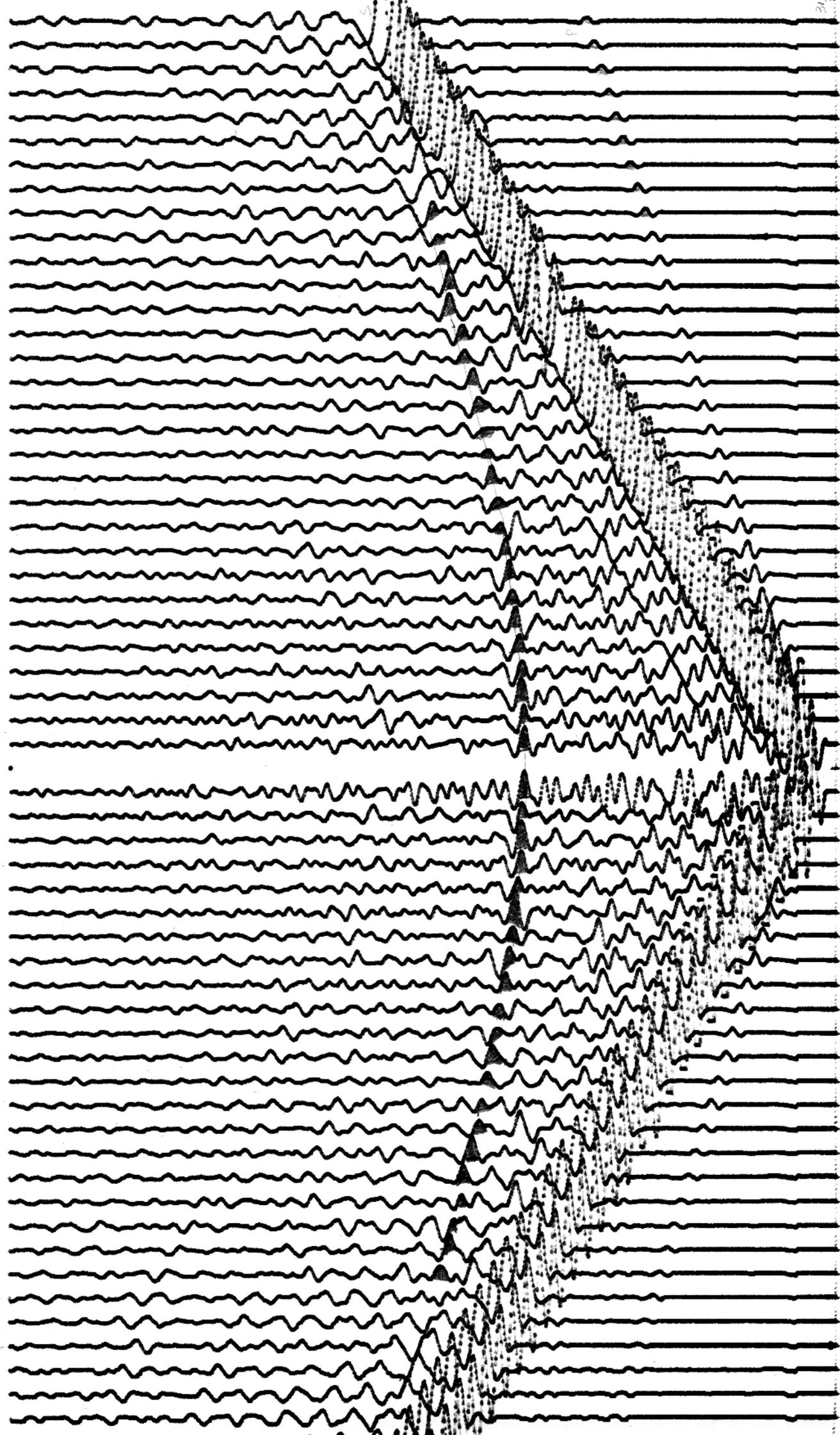


Fig.60 - Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface curvada - componente vertical.

DISTÂNCIA A

(us)



31E 0 1D

DISTÂNCIA À FONTE

Fig. 61- Seção sísmica para o modelo de uma camada com interface curvada
Componente horizontal.

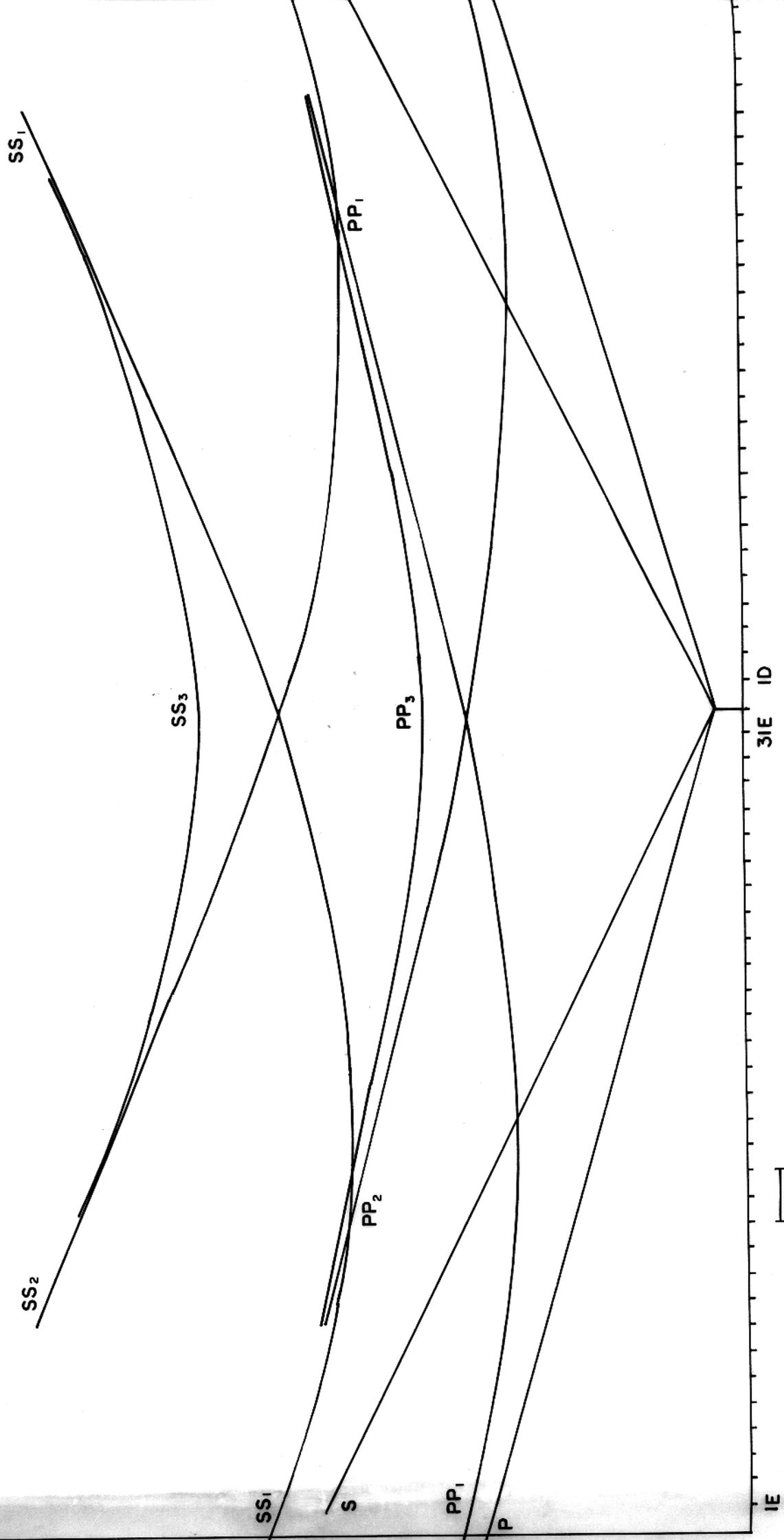
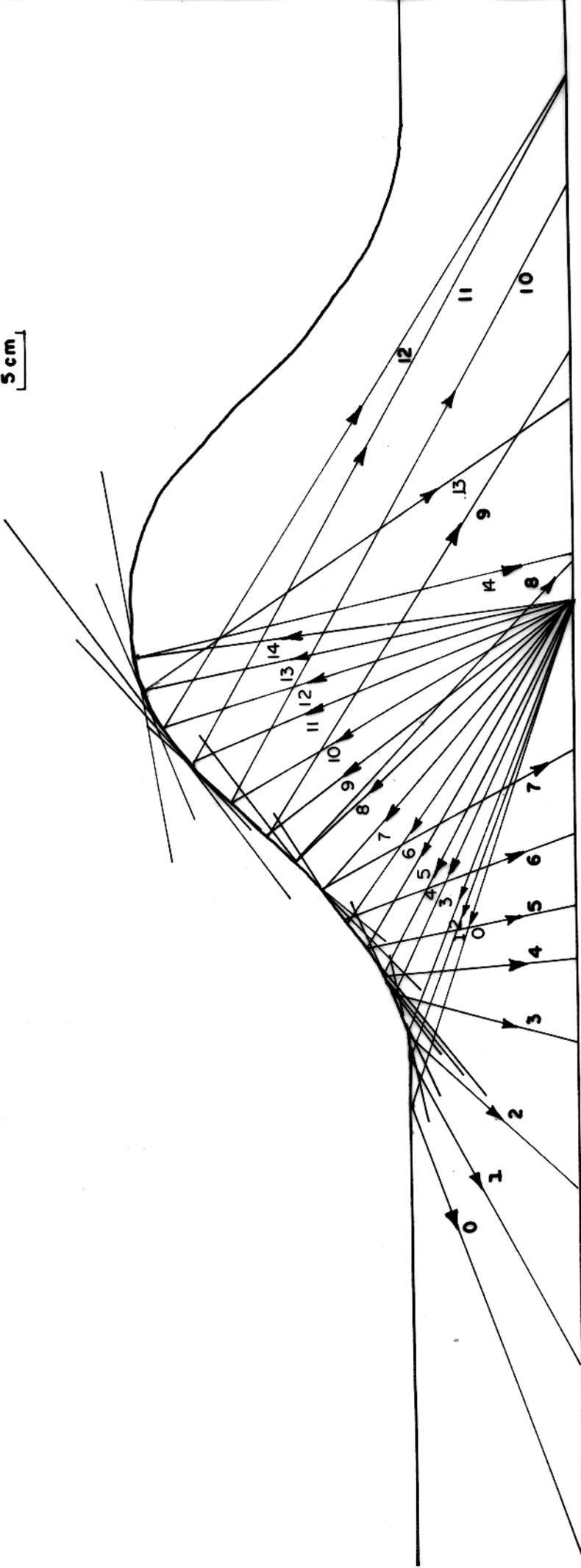


FIG. 62 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE UMA CAMADA. INTERFACE CURVADA.

U.M.A.

FIG. 63 - MODELO DE INTERFACE CURVADA EM ESCALA REDUZIDA 1:5

5 cm



TEMPO (us)

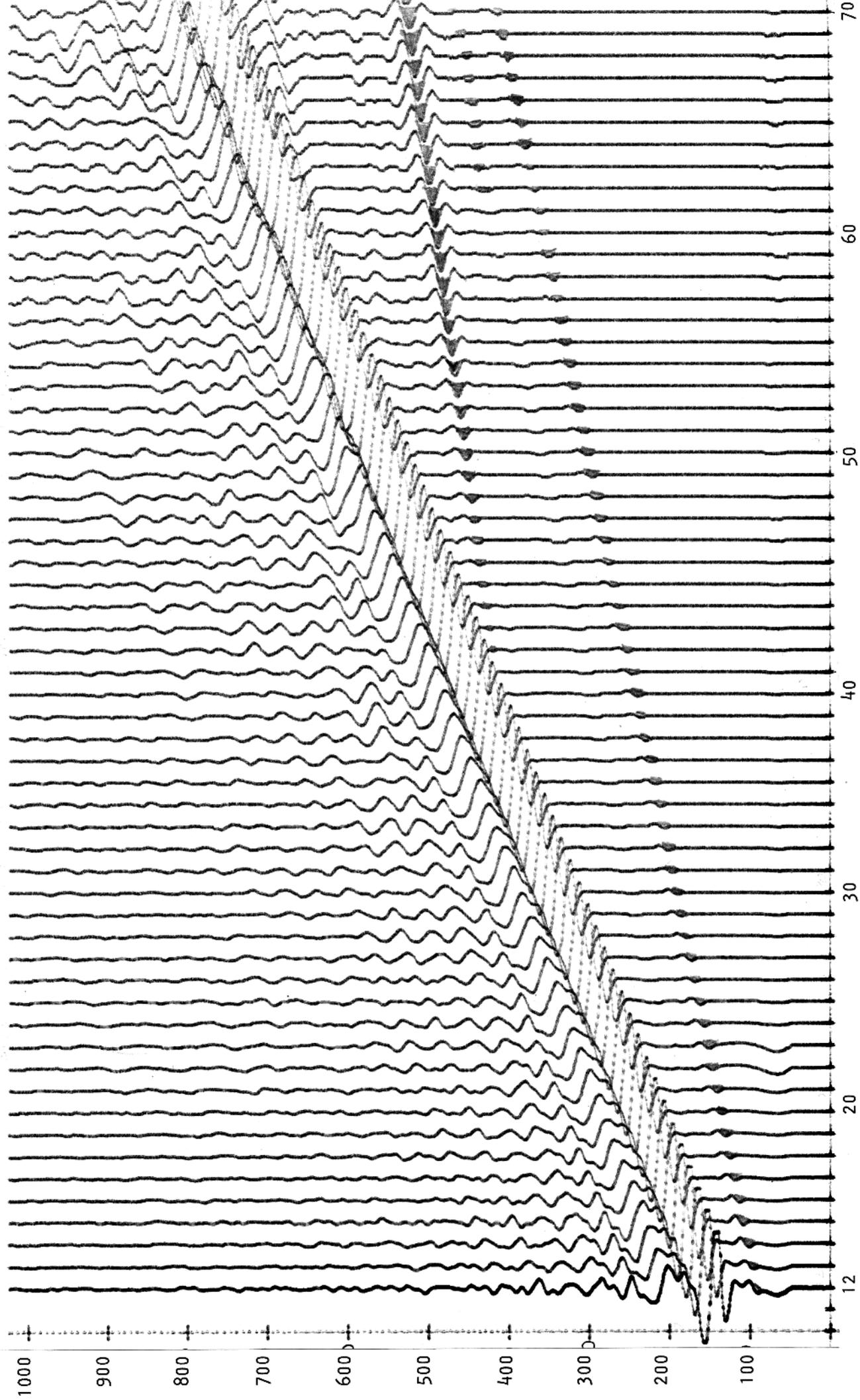


Fig. 64 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (PVC- vidro)
componente horizontal com interface plana.

DISTÂNCIA A FC

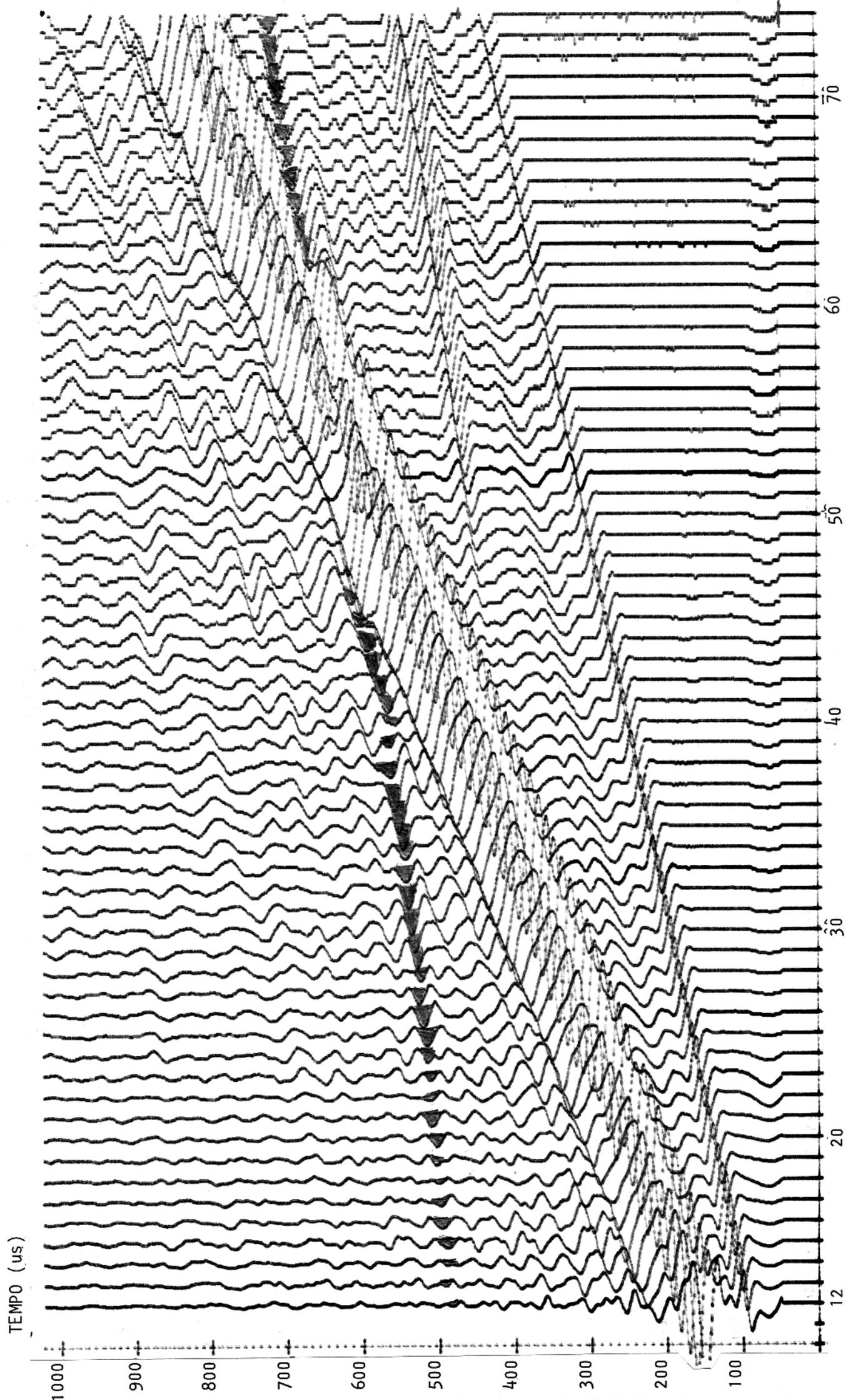


Fig. 65 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (PVC-vidro) com interface plana - componente vertical

DISTÂNCIA À FONTE (cm)

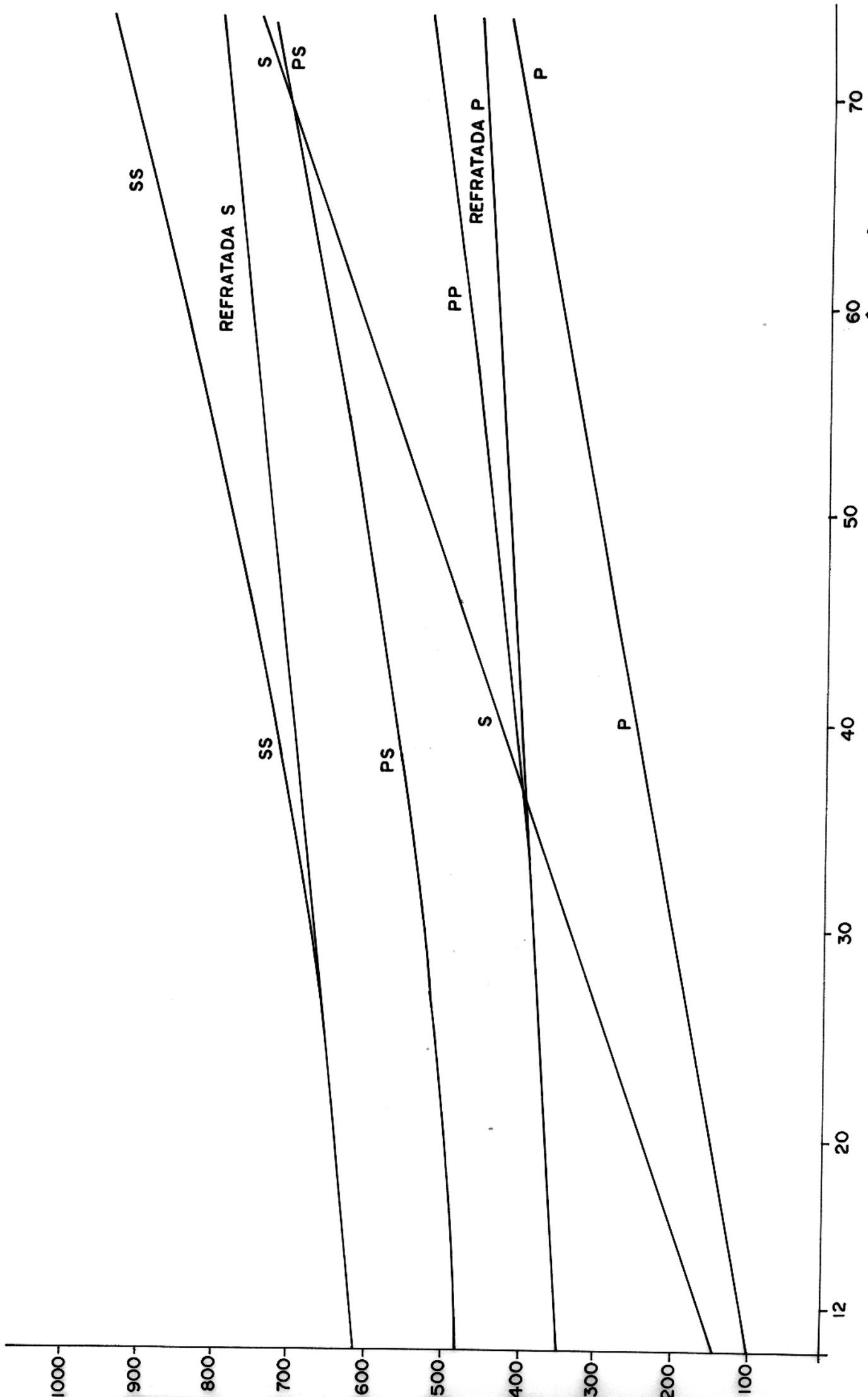
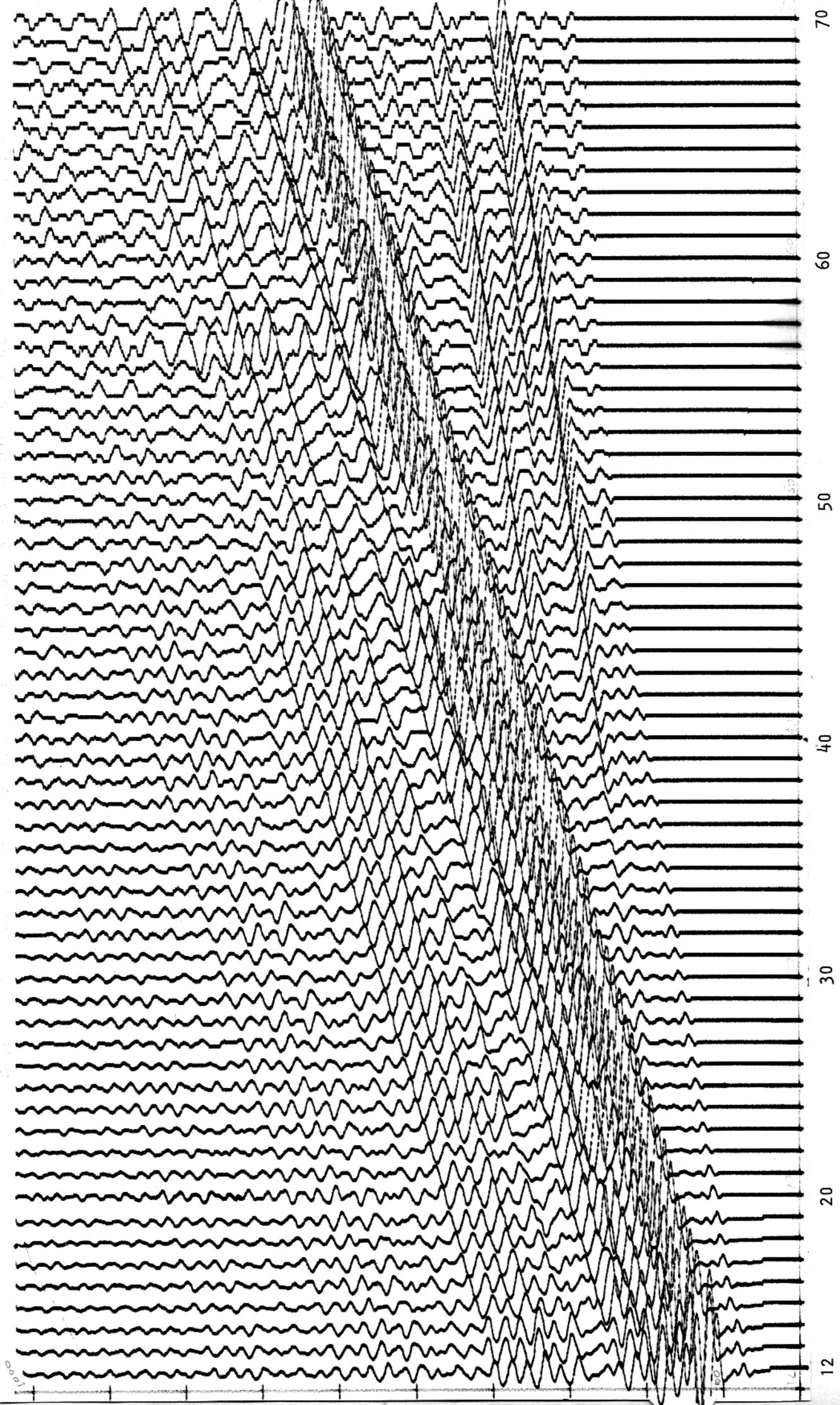


FIG. 66 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE PLANA (PVC - VIDRO).

TEMPO (us)



DISTÂNCIA A FONTE (cm)

Fig. 67- Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (acrílico-alumínio) Componente horizontal com interface plana.

TEMPO (us)

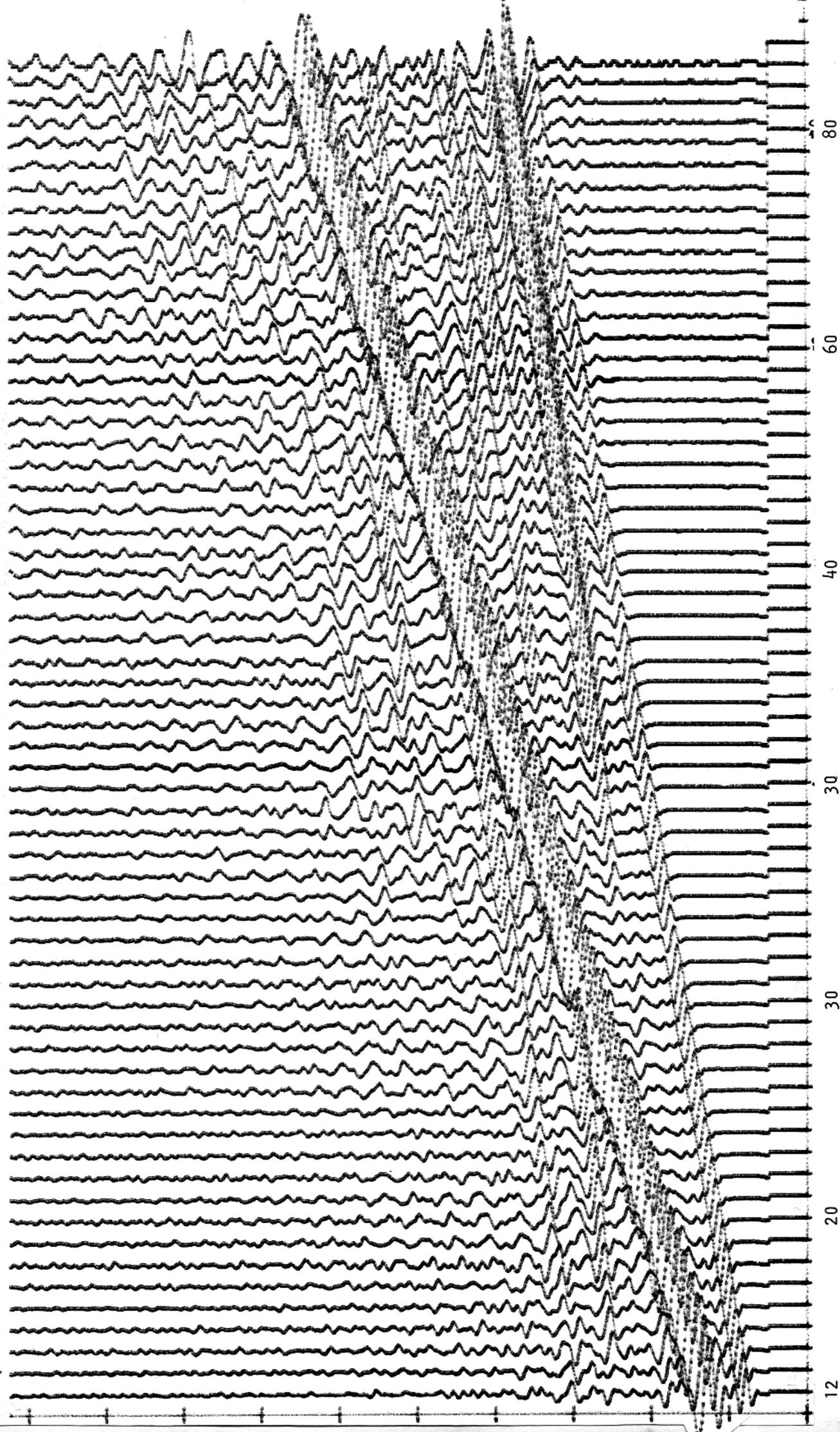


Fig. 68 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas (acrílico-alumínio)

componente vertical com interface plana.

DISTANCIA A FONTE (cm)

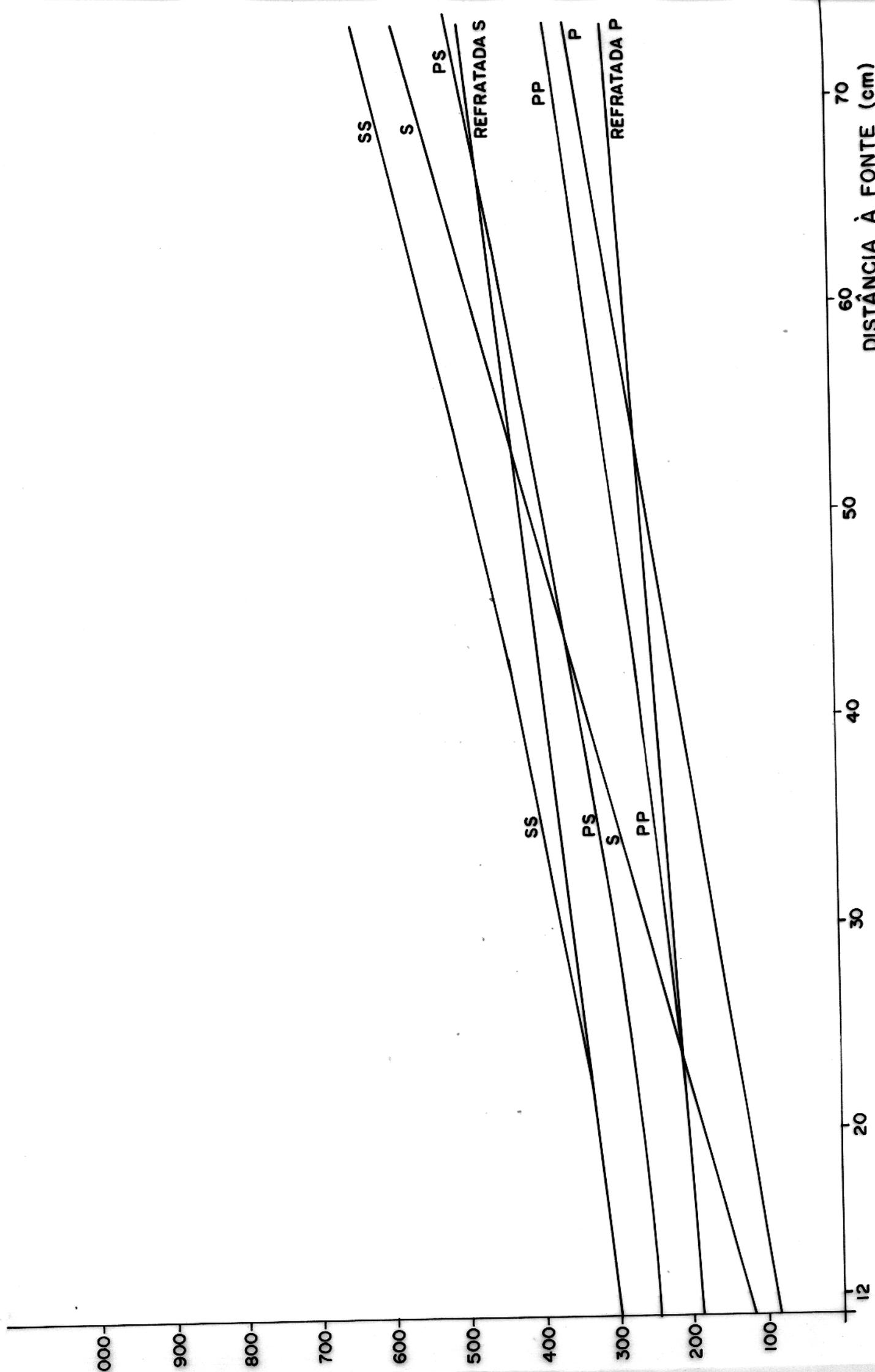


FIG. 69 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE PLANA (ACRÍLICO-ALUMÍNIO).

TEMPO (us)

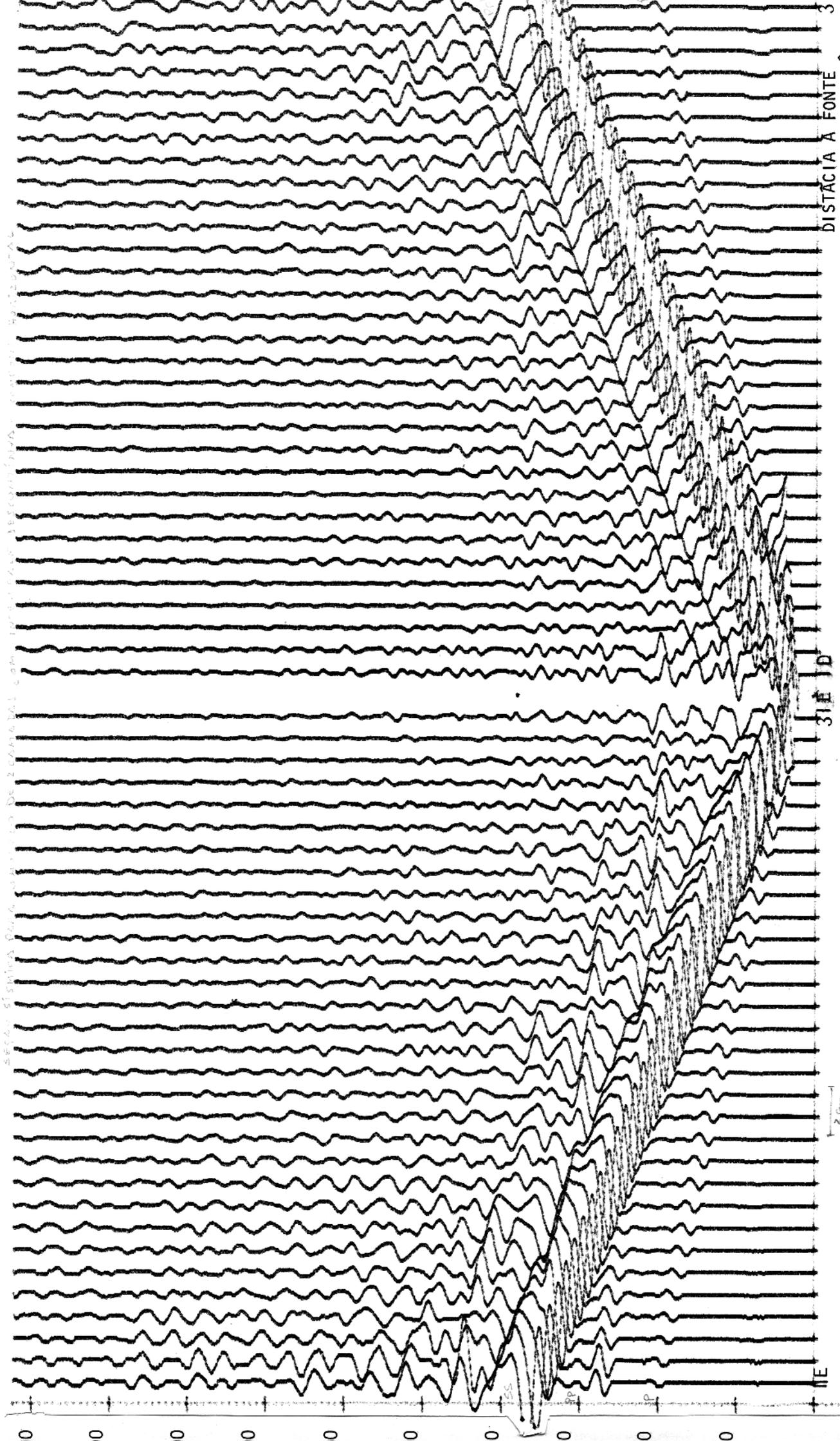


Fig. 70 - Seção sísmica para o modelo de 2 camadas com interface descontinua componente horizontal.

2cm

T (us)

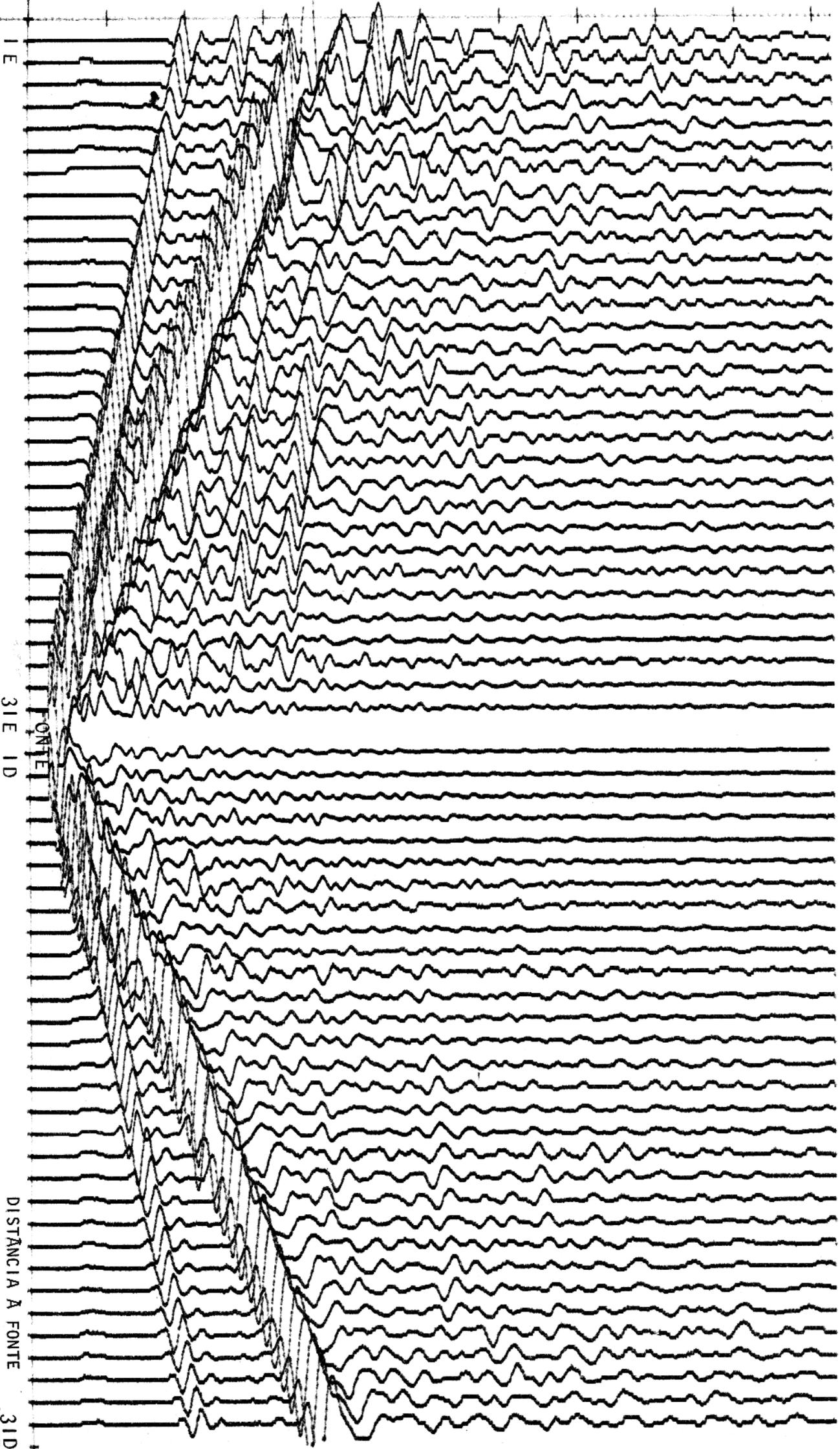


Fig. 71- Seção sísmica para o modelo de 2 camadas com interface descontínua

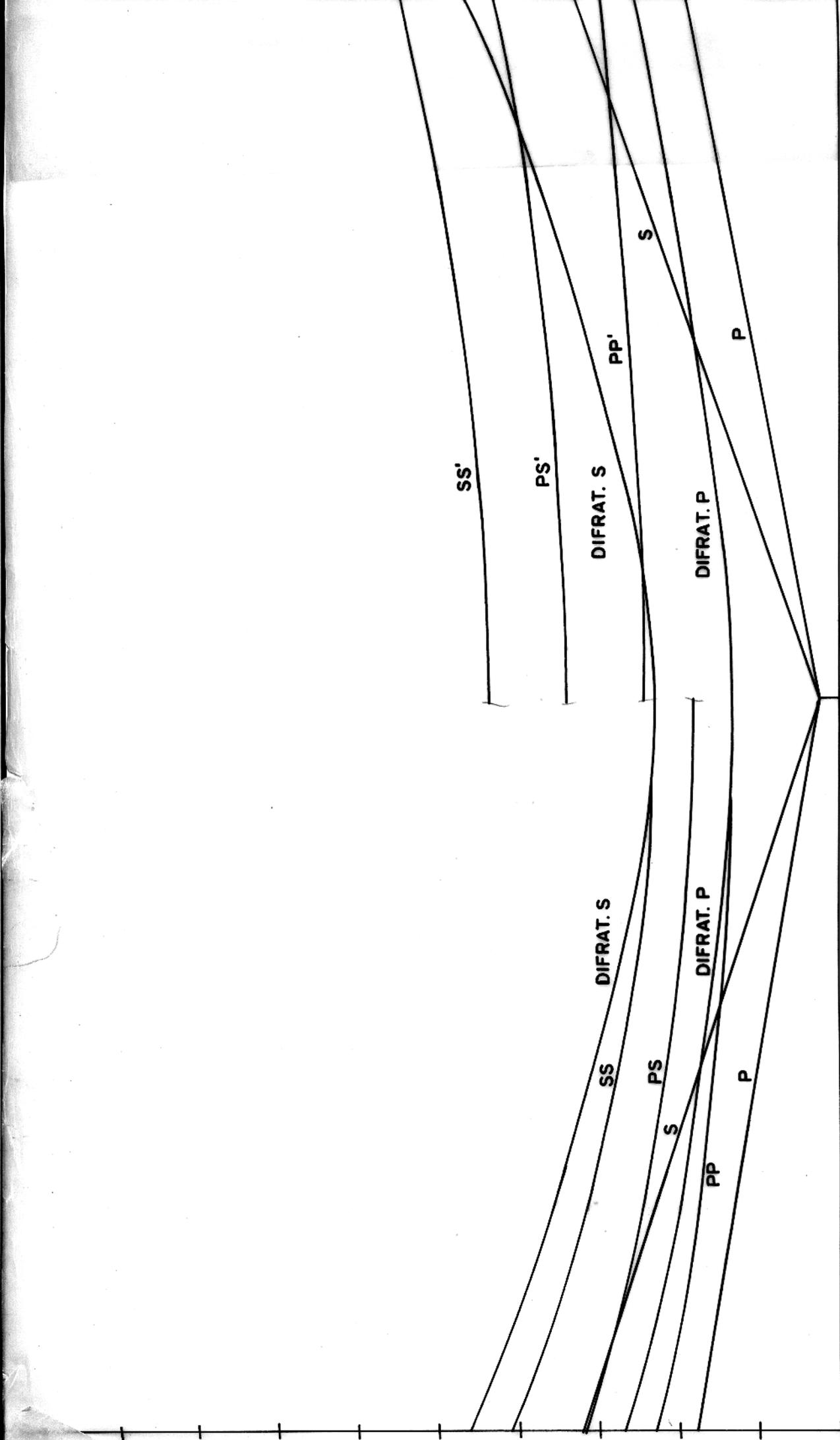


FIG. 72 - CURVAS CALCULADAS PARA O MODELO DE DUAS CAMADAS, INTERFACE DESCONTÍNUA.

- 1) O Programa 1 transfere o sinal de 1024 pontos do osciloscópio para o array A (1024), encontra o valor de A max. de cada sinal e grava esses valores de A max para os 46 pontos numa fita cassete. O array D(0:180) armazena os valores de A max. O programa é rodado para cada uma das cinco frequências utilizadas.

```

0: dim A[1024],
  D[0:180]
1: for H=0 to
  180 by 4
2: wtc 4,33
3: wtc 4,32
4: wtc 4,34
5: for N=1 to
  1024
6: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)→A[N]

```

Programa 1

```

7: next N
8: wtc 4,0
9: max(A[*])→D[H]
]
10: prt D[H]
11: stp
12: next H
13: ent L
14: rcf L,D[*]
15: end
*18771

```

- 2) O programa 2 lê os 46 pontos do array F (0:180), arquivados na fita cassete e plota seus valores correspondentes. O programa é rodado novamente, para a próxima frequência das cinco utilizadas.

```

0: dim F[0:180]
1: scl 500,9000,
  -10,200
2: axe 4500,0
3: ent L
4: ldf L,F[*]
5: for H=0 to
  180 by 4

```

Programa 2

```

6: plt 4500,0,1
7: csiz 2,1.7,
  10/7,H
8: cplt F[H]/
  180,0
9: lbl "."
10: next H:pen
11: sto 3
12: end

```

- 3) O programa 3 transfere o sinal do osciloscópio para A (1024), plota o sismograma correspondente e transfere o valor de A máx para o array H (0:30). O programa é rodado para cada um dos 20 pontos medidos. Ao final, quando a seção está completa a Velocidade da onda é impressa no papel.

```

0: dim A[1024],
  H[0:30]
1: scl -10,1024,
  -1,25
2: axe 0,0,100,1
3: for X=0 to 20
4: wtc 4,33
5: wtc 4,32
6: wtc 4,34
7: for I=1 to
  1024
8: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)→A[I]
9: next I
10: max(A[*])→K
11: for I=1 to
  1024

```

Programa 3

```

12: if A[I]=K
  I→H[X]
13: wtc 4,0
14: ofs 0,1
15: for J=1 to
  1024
16: plt J,3*(A[J]
  J/K)
17: next J
18: pen
19: stp
20: next X
21: (H[20]-H[0])
  *5→T
22: prt 20/T*
  500000
23: end

```

- 4) O programa 4 transfere o sinal do osciloscópio para o array A (1024), encontra A máx e calcula os valores de $\bar{\xi}$ e \bar{Q} . O array F (30) armazena os valores de A máx e o array Y (30) os valores para o logarítmo do decaimento ξ .

```

0: dim A[1024],
  F[30],Y[30]
1: for H=1 to 20
2: wtc 4,33
3: wtc 4,32
4: wtc 4,34
5: for I=1 to
  1024
6: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)→A[I]
7: next I
8: wtc 4,0
9: max(A[*])→F[H]

```

Programa 4

```

10: stp
11: next H
12: 0→Y
13: fxd 3
14: for H=1 to
  19
15: ln(F[H]/F[H+
  1])→Y[H]
16: Y[H]+Y→Y
17: prt Y[H]
18: next H
19: Y/19→Y
20: 1/Y+0!prt 0
21: end

```

- 5) O programa 5 entra com a frequência (F), o logarítmo do decaimento da amplitude (Y), a velocidade da onda (V) e a amplitude inicial (E); e calcula e traça as curvas para o decaimento da amplitude da onda. O array E (0:100) armazena os valores de $\exp(-\alpha.x)$, e A (0:100), os valores para as amplitudes da onda na distância x.

```

0: fxd 4
1: dim E[0:100],
  X[0:100],A[0:100]
2: ent F,Y,V,E
3: F*Y/V→G
4: for I=0 to 50
5: if I=0:0→X[I]
  isto 7
6: X[I-1]+.02→X[I]
7: X[I]*G→K
8: exp(-K)→E[I]
9: E[I]*E→A[I]
10: 10*log(A[I]/
  E)→E[I]

```

Programa 5

```

11: 10*log(A[I]/
  E)→E[I];prt
  E[I]
12: next I
13: stp
14: scl 0,1,0,
  1000
15: axe 0,0,.04,
  100
16: for I=0 to
  50
17: plt X[I],
  A[I]
18: next I;pen
19: end

```

- 6) O programa 6 entra com o número de pontos medidos (N), transfere o sinal do osciloscópio para A (1024) e plota seu sismograma correspondente. O programa é repetido da linha 2 a 16, para cada um dos n pontos, até completar-se a seção sísmica.

```

0: dim A[1024]
1: ent N
2: scl -2,2N,-
  50,1024
3: axe 0,0,2,100
4: wtc 4,33
5: wtc 4,32
6: wtc 4,34
7: for I=1 to
  1023
8: shf(shf(rdb(4
  ),3),-4)→A[I]

```

Programa 6

```

9: next I
10: max(A[*])→K
11: wtc 4,0
12: ofs 2,0
13: for J=1 to
  1024
14: plt 5*(A[J]/
  K),J
15: next J
16: pen
17: end

```

- 7) O programa 7 entra com os valores da profundidade H do meio 1, com as distâncias do primeiro e do último ponto à fonte; N e M, as velocidades das ondas P e S nos meios 1 e 2; P (1, 2) e S (1, 2). Calcula e traça as curvas para as ondas P e S diretas e refletidas, para a fonte posicionada no centro da superfície.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],M[0:80]
  ,P[2],S[2]
1: ent H,N,M
2: scl N-2,M+2,-
  50,1023
3: axe N-1,0,2,
  100
4: for I=1 to 2
5: ent P[I],S[I]
  inext I
6: M/2→Z
7: 1→I;P[I]→V
8: for X=N to Z
9: X/V*10000→A[X]
  ]
10: r(X↑2+4*H↑2)
  /V*10000→R[X]
11: next X
12: for X=N to Z
13: plt X,A[Z-
  X];next X;pen
14: for X=N to Z
15: plt X+Z,A[X]
  inext X;pen

```

Programa 7

```

16: plt X+Z,A[X]
  inext X;pen
17: for X=N to Z
18: plt X,R[Z-
  X];next X;pen
19: for X=0 to Z
20: plt X+Z,R[X]
  inext X;pen
21: S[1]→V;I+1→I
22: if I=2;eto 9
23: P[1]→P;S[1]→
  S
24: for X=N to M
25: r(X↑2/4+H↑2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0→M[X]
26: next X
27: for X=N to Z
28: plt X,M[Z-
  X];next X;pen
29: for X=0 to Z
30: plt X+Z,M[X]
  inext X;pen
31: end

```

- 8) O programa 8 entra com os valores de H do meio 1, distância do primeiro e do último ponto à fonte; N e M, as velocidades das ondas

diretas, refletidas e refratadas, para a fonte posicionada na extremidade da superfície do modelo.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],H[0:80]
  ,M[0:80],P[2],
  S[2]
1: ent H,N,M
2: for I=1 to 2
3: ent P[I],S[I]
  inext I
4: scl N-2,M+2,-
  50,1023
5: axe N-1,0,1,
  100
6: 1+I
7: P[I]+V
8: for X=N to M
9: X/V*10000+A[X]
  ]
10: r(X^2+4*H^2)
  /V*10000+R[X]
11: next X
12: for X=N to M
13: plt X,A[X];
  next X;pen
14: for X=N to M
15: plt X,R[X];
  next X;pen
16: S[I]+V;I+1+I
17: if I=2;eto 8

```

Programa 8

```

18: 1+I;P[I]+U;
  P[2]+V
19: 2*H/r(V^2/
  U^2-1)+C
20: prt C
21: for X=C to M
22: (X/V+2*H/U*
  r(1-(U/V)^2))*
  1000+H[X]
23: next X
24: for X=C to M
25: plt X,H[X];
  next X;pen
26: S[1]+U;S[2]+
  V;I+1+I
27: if I=2;eto
  19
28: P[1]+P;S[1]+
  S
29: for X=N to M
30: r(X^2/4+H^2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0+M[X]
31: next X
32: for X=N to M
33: plt X,M[X];
  next X;pen
34: end

```

- 9) O programa 9 entra com H do meio 1, distâncias do primeiro e último ponto à fonte; N e M, as velocidades de P e S; P (1, 2) e S (1, 2). Calcula e traça as curvas para as ondas diretas, refletidas e difratadas, para a fonte posicionada no centro da Superfície do modelo.

```

0: dim A[0:80],
  R[0:80],D[0:80]
  ,M[0:80],P[2],
  S[2]
1: ent H,N,M
2: scl N-2,M+2,-
  50,1023
3: axe N-1,0,2,
  100
4: for I=1 to 2
5: ent P[I],S[I]
  inext I
6: M/2+Z
7: 1+I;P[I]+V
8: for X=N to Z
9: X/V*10000+A[X]
  ]
10: r(X^2+4*H^2)
  /V*10000+R[X]
11: (2*H/V+X^2/
  2*V*H)*10000+D[X]
  ]
12: next X
13: for X=N to Z
14: plt X,A[Z-
  X];next X;pen
15: for X=N to Z

```

Program 9

```

17: for X=N to Z
18: plt X,R[Z-
  X];next X;pen
19: for X=0 to Z
20: plt X+Z,R[X]
  next X;pen
21: for X=N to M
22: plt X,D[Z-
  X];next X;pen
23: for X=N to M
24: plt X+Z,D[X]
  next X;pen
25: S[1]+V;I+1+I
26: if I=2;eto 9
27: P[1]+P;S[1]+
  S
28: for X=N to M
29: r(X^2/4+H^2)
  *(1/P+1/S)*1000
  0+M[X]
30: next X
31: for X=N to Z
32: plt X,M[Z-
  X];next X;pen
33: for X=0 to Z
34: plt X+Z,M[X]
  next X;pen

```