

MODELO PRELIMINAR DE VELOCIDADES SÍSMICAS DA CROSTA ATRAVÉS DE EXPLOSÕES LOCAIS REGISTRADAS PELA REDE SISMOGRÁFICA DE SOBRADINHO-BA¹

S. KNIZE, J. BERROCAL e D. M. DE OLIVEIRA

Instituto Astronômico e Geofísico — USP
Caixa Postal 30627 — 01051 — São Paulo — SP — Brasil

Seismograms of explosions from local mines and quarries registered by the Seismographic Network of Sobradinho (Bahia) during the period from 1979 to 1983 have been analysed. A preliminary model of seismic velocities for the crust and upper mantle in the adjacent regions of the Reservoir of Sobradinho (8°-10.5°S and 40°-42°W) is proposed on the basis of the seismic record sections. An experimental S-P/distance curve up to distances of about 200 km is also presented. It gives smaller S-P times than the Jeffreys-Bullen model and suggests a single layer crustal model without the Conrad discontinuity and a depth to the Moho discontinuity of more than 33 km. The velocity values and V_p/V_s ratios seems to show a difference in the structure and composition of the crust to the south and to the north of the Reservoir of Sobradinho. The depth to the Moho discontinuity (~ 40 km) suggested in this work agrees with the results of previous gravimetric measurements taken in the region. The upper mantle P-wave velocity is about 8.2 km/s.

INTRODUÇÃO

A determinação do modelo estrutural da crosta e manto superior terrestres, é de grande importância na localização confiável de hipocentros sísmicos com dados instrumentais e na interpretação dos processos tectônicos e geológicos ocorridos numa determinada região.

Estudos sobre a estrutura das camadas mais superficiais da Terra que constituem a litosfera, e com ênfase na crosta, vêm sendo executados em número crescente em diversas regiões da Terra, utilizando principalmente o método de prospecção sísmica profunda (Deep Seismic Sounding), desenvolvido originalmente por sismólogos soviéticos (Kosminskaya, 1971).

O desenvolvimento do método de prospecção sísmica profunda está baseado na tecnologia da prospecção sísmica superficial, amplamente conhecida e descrita em inúmeros tratados de prospecção sísmica, como o de Sheriff & Geldart (1982). Por outro lado, as aplicações e metodologia da sísmica de exploração têm também evoluído a partir dos resultados obtidos com a prospecção sísmica profunda. A combinação destes dois métodos de prospecção sísmica, têm permitido estudos pormenorizados da porção superior da crosta terrestre em diversas regiões da Terra, resultando na identificação de concentrações significativas de recursos minerais e energéticos (Kosminskaya, 1971).

No território brasileiro são poucos os levantamentos sismológicos efetuados com a finalidade de obter modelos crustais e os resultados são ainda de caráter preliminar. Entre esses trabalhos podem ser citados os efetuados com explosões da mina Itabira-MG (Giese & Shute, 1975), das obras da barragem Emborcação-MG/GO (Veloso, 1984) e

explosões nas proximidades da barragem de Sobradinho-BA (Dias et al., 1980).

O Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP), em convênio com a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), vem planejando um projeto de estudo da estrutura crustal na área do reservatório de Sobradinho, utilizando explosões efetuadas em algumas minas dessa região, que serão registradas em sismógrafos portáteis a serem instalados em linhas que garantam um conhecimento adequado da estrutura, até pelo menos a interface crosta/manto (descontinuidade de Mohorovičić).

O estudo efetuado no presente trabalho representa a fase inicial desse projeto, em que foram utilizados os sismogramas da Rede Sismográfica de Sobradinho (RSS), instalada em outubro/1978 e que registrou um número elevado de explosões, principalmente das minas Caraíba Metais, Pedrinhas e Tiquara, e em menor número das pedreiras Cone e da própria barragem de Sobradinho (pedreira nas proximidades do dique C), do canteiro de obras do Projeto Massangano (início do canal, dique B) e dos canteiros de obras das barragens de Pedra do Cavalo e Touirão. Posteriormente, durante a análise da atividade local registrada pela RSS, foi identificada uma fonte importante de explosões ao norte do reservatório de Sobradinho nas proximidades de Trindade-PE, que também foi utilizada neste trabalho.

No mapa da Fig. 1, apresenta-se a localização das fontes utilizadas e das estações da RSS. Na Tabela 1 incluem-se as coordenadas geográficas das fontes de explosões e das estações da RSS utilizadas.

É necessário salientar o caráter preliminar do modelo obtido neste trabalho, devido principalmente à falta de controle da hora de origem da grande maioria das explosões utilizadas e à distribuição inapropriada para este tipo de

¹ Pesquisa efetuada através do Convênio IAG/USP-CHESF e com o auxílio do CNPq, FINEP e FAPESP.

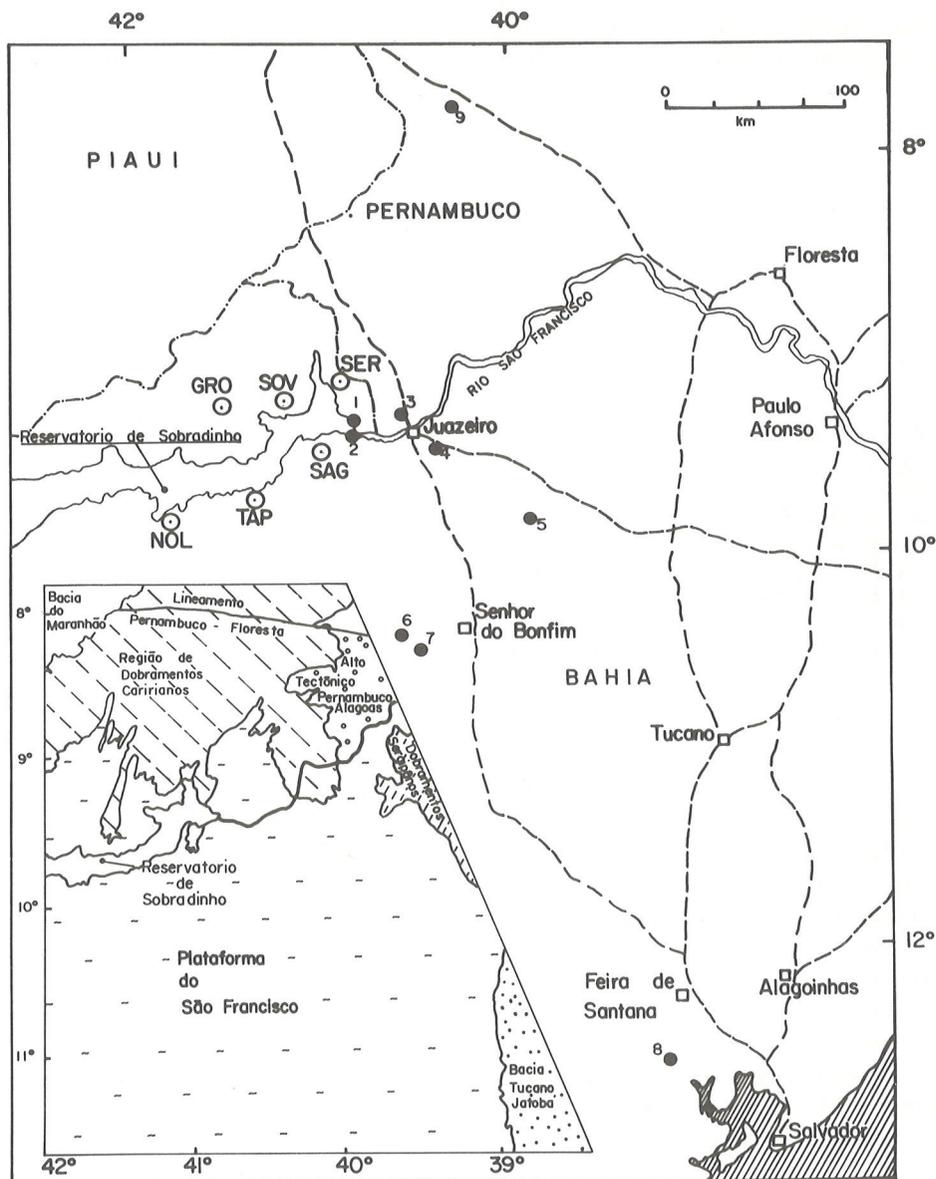


Figura 1 — Mapa de localização das estações da RSS e das fontes utilizadas (os números correspondem à Tabela 1). Inserido o mapa geo-estrutural da região.

levantamento, entre fontes e estações registradoras. Algumas explosões efetuadas nas proximidades dos diques B e C da barragem de Sobradinho (fontes 1 e 2), tiveram suas horas de origem controladas, abrangendo distâncias epicentrais entre aproximadamente 20 e 75 km, com relação às estações da RSS e foram utilizadas na construção do modelo sugerido por Dias et al. (1980). Os dados dessas explosões permitiram, no presente trabalho, o cálculo de velocidades médias mais precisas, correspondentes às camadas superficiais na área do reservatório de Sobradinho.

AQUISIÇÃO DOS DADOS

A RSS opera com sismógrafos portáteis modelo Portacorder (Teledyne Geotech) com registro a tinta em papel. Sismômetros S-500 (Teledyne Geotech) são utilizados nas

estações SAG, TAP, SOV, GRO e NOL; na estação SER é utilizado o sismômetro Willmore MKIII (Sensonics). Os sismômetros utilizados na RSS são de período curto ($T_0 \sim 1,0$ s) e operam na componente vertical.

Os sismogramas analisados foram registrados durante o período de 1979 a 1983 com os seguintes parâmetros operacionais: em todas as estações utilizou-se o filtro passa banda de 5,0-12,5 Hz exceto em SOV em 1979 e em SER durante 1982 e 1983 (0,2-12,5 Hz); o ganho das estações variou dependendo do ruído de fundo (78-84-90-96 dB); a velocidade de registro foi em geral de 120 mm/min, exceto em 1979 e 1980, quando se registrou com 60 mm/min; a estação NOL somente operou durante alguns meses de 1979 e com velocidade de registro de 30 mm/min.

Nas velocidades de 120 mm/min, 60 mm/min e 30 mm/min obtém-se precisão nas leituras de 0,1 s, 0,2 s e

Tabela 1 — Coordenadas geográficas das estações da RSS e das fontes de explosões utilizadas. Os erros máximos das coordenadas são $\pm 0,05'$ (~ 100 m), exceto para Trindade.

— Coordenadas Geográficas da RSS

Estação		Lat. S	Long. W	Altitude
Nome	Código			
Serra	SER	09° 12,53'	40° 53,69'	423,78 m
Sovela	SOV	09 17,33	41 10,16	415,59
Grosador	GRO	09 20,55	41 29,05	440,23
Tapuio	TAP	09 46,25	41 15,83	434,36
S. Gonçalo	SAG	09 34,11	40 57,67	490,55
N. Olinda	NOL	09 52,28	41 40,89	439,31

Coordenadas referidas ao Datum "Córrego Alegre"

Coordenadas Geográficas das Fontes

Fonte		Lat. S	Long. W	Altitude
Nº	Nome			
1	Dique B	09° 22,25'	40° 48,10°	390,0 m
2	Dique C	09 26,90	40 49,95	382,0
3	Cone	09 20,40	40 33,70	389,0
4	Tourão	09 32,50	40 22,05	395,0
5	Caraíba Metais	09 51,90	39 51,60	465,5
6	Tiquara	10 28,50	40 32,40	800,0
7	Pedrinhas	10 32,75	40 25,20	700,0
8	Pedra do Cavalo	12 35,10	38 59,90	30,0
9	Trindade	07 42,54	40 13,11	510,0

As coordenadas correspondem aproximadamente ao centro das áreas de explosões

0,4 s respectivamente, quando a espessura do traço do sismograma é de 0,2 mm e precisões maiores quando o traço é mais fino (quando as penas são novas).

A deriva dos relógios dos sismógrafos é da ordem de 50 ms por dia. Os aferimentos dos relógios com sinais de tempo padrão (WWV, LOL) são controlados regularmente através de gráficos deriva/tempo construídos para cada estação, permitindo correções do tempo com precisão de ± 10 ms.

As fontes de explosões utilizadas neste trabalho funcionaram nos seguintes períodos: dique B, dique C e Tourão, em 1979; Cone, em 1979 e 1980; Caraíba Metais, Pedra do Cavalo e Tiquara, de 1981 a 1983 e Pedrinhas e Trindade, em 1983. Em outubro de 1979 foram registradas as horas de origem de explosões efetuadas nas proximidades do dique C (250 kg) e do dique B (475 kg). Nestes locais foram também efetuadas outras explosões, principalmente uma de 1575 kg na pedreira do dique C, a qual não teve sua hora de origem controlada, mas foram utilizadas na construção da curva S-P/distância. A hora aproximada e as cargas

das explosões de todas as outras fontes foram extraídas de planos de fogo fornecidos regularmente pelas próprias fontes via CHESF.

Inicialmente foram catalogadas 379 explosões para serem utilizadas neste trabalho. Dessas, foram selecionadas 120, registradas pela maioria das estações da RSS e que apresentam uma boa qualidade do sinal para a leitura do tempo de chegada das fases sísmicas. Da fonte Trindade foram selecionadas 13 explosões efetuadas em 1983. Neste caso as cargas não são conhecidas por falta de planos de fogo, mas são suficientemente elevadas de modo que a energia transmitida é registrada pela RSS a distâncias acima de 200 km.

INTERPRETAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

Durante a interpretação dos sismogramas da RSS foram utilizadas somente as leituras do tempo de chegada dos primeiros impulsos das ondas P e S, devido à alta densidade

de sinais registrados, não permitindo, na maioria dos casos, distinguir as mudanças de frequência e de fase dos sinais para a identificação e leitura do tempo de chegada das fases retardatárias das ondas P e S.

Não foram utilizadas na interpretação as amplitudes dos sinais registrados nos sismogramas, por falta de calibração atualizada dos sismógrafos da RSS, que foram calibrados em 1979, pouco depois de sua instalação e que posteriormente sofreram vários consertos, sem terem sido calibrados novamente.

Para a construção da curva S-P experimental, apresentada na Fig 2, correspondente à região de estudo, foram utilizados principalmente sismogramas registrados com 120 mm/min e alguns com 60 mm/min e foram calculados valores médios de S-P de um número suficiente de observações para cada conjunto estação-fonte, que são apresentados na Tabela 2, juntamente com os respectivos valores de desvio padrão (s).

A dispersão dos valores S-P, representada pelo desvio padrão, para as explosões nas proximidades dos diques B e C da barragem de Sobradinho ($s \leq 0,1$ s), corresponde principalmente ao erro na precisão da leitura. Para as outras fontes a dispersão indicada representa principalmente pequenas variações da localização da fonte (explosões efetua-

das em diferentes locais próximos, sobretudo quando são minas a céu aberto, como é o caso de Caraíba Metais, Pedrinha e Tiquara). Nestes casos, o valor médio adotado deve corresponder ao centro da área de explosões, a partir do qual foram calculadas as distâncias fonte-estação da Tabela 2.

Na construção da curva S-P da Fig. 2, não foram utilizados os dados de explosões de Tourão registrados em NOL, devido a velocidade de registro dessa estação ser muito baixa (30 mm/min). Não houve possibilidade de leitura do tempo de chegada da onda S das explosões do dique C em SAG, devido à saturação dos sinais, nem das explosões de Tourão em SOV, devido ao ruído microsísmico excessivo na estação durante o horário dessas explosões. Não foram utilizados os dados de GRO das explosões de Tourão por apresentarem sinais muito fracos da primeira chegada da onda S.

As velocidades das ondas sísmicas da parte superficial da crosta na área do reservatório de Sobradinho, foram calculadas com os dados do tempo de chegada das explosões efetuadas nas proximidades dos diques B e C, que tiveram suas horas de origem controladas. O tempo de percurso das ondas P (T_p) e das ondas S (T_s) para cada estação da RSS, assim como as distâncias (Δ) desde cada fonte até as esta-

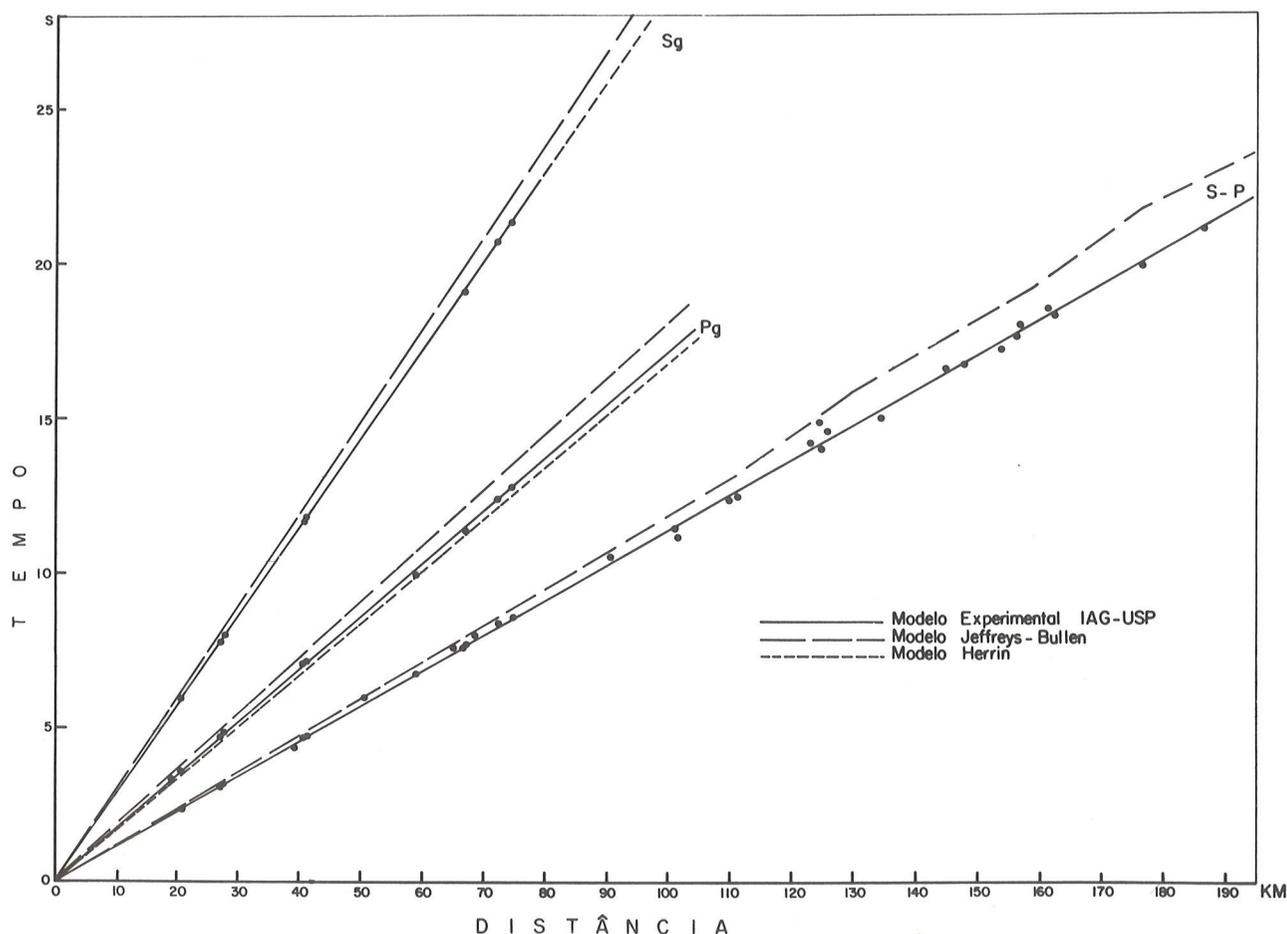


Figura 2 — Gráfico das curvas S-P, P e S dos modelos experimental (IAG) e teórico (Jeffreys-Bullen) e da curva P do modelo de Herrin.

Tabela 2 — Valores médios de S-P (em segundos) e distâncias epicentrais (Δ em km) entre as estações da RSS e as fontes de explosões, com os correspondentes desvios padrão (s). Os valores de S-P entre parênteses são muito imprecisos.

Estação		SAG	SER	SOV	TAP	GRO	NOL
Dique B	Δ	27,91	20,75	41,45	67,26	75,08	—
	S-P	3,13	2,34	4,68	7,67	8,52	—
	s	0,05	0,05	0,20	0,10	0,20	—
Dique C	Δ	19,43	27,35	41,02	59,33	72,58	—
	S-P	—	3,04	4,63	6,79	8,33	—
	s	—	0,05	0,05	0,10	0,10	—
Cone	Δ	50,60	39,33	66,96	90,61	101,30	—
	S-P	5,91	4,32	7,57	10,45	11,37	—
	s	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	—
Tourão	Δ	65,27	68,67	92,44	101,63	124,64	148,77
	S-P	7,51	7,96	—	11,10	(14,73)	(16,27)
	s	0,10	0,10	—	0,12	0,40	0,40
Caraiba Metais	Δ	125,17	134,78	157,20	154,33	187,39	—
	S-P	13,95	14,96	17,96	17,15	21,05	—
	s	0,13	0,10	0,11	0,10	0,14	—
Tiquara	Δ	110,40	145,36	148,26	111,20	162,54	—
	S-P	12,28	16,55	16,66	12,36	18,21	—
	s	0,15	0,10	0,20	0,13	0,10	—
Pedrinhas	Δ	123,32	156,79	161,51	126,10	177,01	—
	S-P	14,18	17,53	18,47	14,50	19,83	—
	s	0,21	0,16	0,10	0,10	0,20	—

ções da RSS e as velocidades médias correspondentes (V_p e V_s), são apresentados na Tabela 3.

Em alguns casos não foi possível a identificação de algumas fases (onda S em SAG e TAP para a explosão do dique C), em outros casos as leituras de tempo de chegada são duvidosas, aparecendo os respectivos valores entre pa-

rênteses na Tabela 3. Os sinais correspondentes à explosão do dique B, em geral, são menos claros nos sismogramas que os da explosão do dique C, apesar da carga da explosão do dique B ter sido maior que a do dique C. Esta explosão foi efetuada em furos mais profundos (15 m) e em rocha de embasamento, ao passo que no dique B foram utilizados fu-

Tabela 3 — Resultados da análise dos registros das explosões com hora de origem (H) controlada, onde a distância epicentral (Δ) é dada em km, os tempos de percurso T_p e T_s , das ondas P e S, são dados em segundos e as velocidades médias, V_p e V_s , são dadas em km/s. Valores entre parênteses são menos precisos.

Estação	DIQUE C						DIQUE B					
	Δ	T_p	V_p	T_s	V_s	V_p/V_s	Δ	T_p	V_p	T_s	V_s	V_p/V_s
	19,43	3,36	5,78	—	—	—	27,91	4,79	5,82	7,92	3,52	1,653
SAG	19,43	3,36	5,78	—	—	—	27,91	4,79	5,82	7,92	3,52	1,653
SER	27,35	4,70	5,82	7,74	3,53	1,649	20,75	3,57	5,81	5,91	3,51	1,655
SOV	41,02	7,02	5,84	11,65	3,52	1,659	41,45	(7,09)	(5,84)	(11,77)	(3,52)	1,659
TAP	59,33	9,87	6,01	—	—	—	67,26	(11,34)	(5,93)	19,01	3,54	1,675
GRO	72,58	(12,31)	(5,89)	20,67	3,51	1,678	75,08	(12,78)	(5,87)	(21,30)	(3,52)	1,668

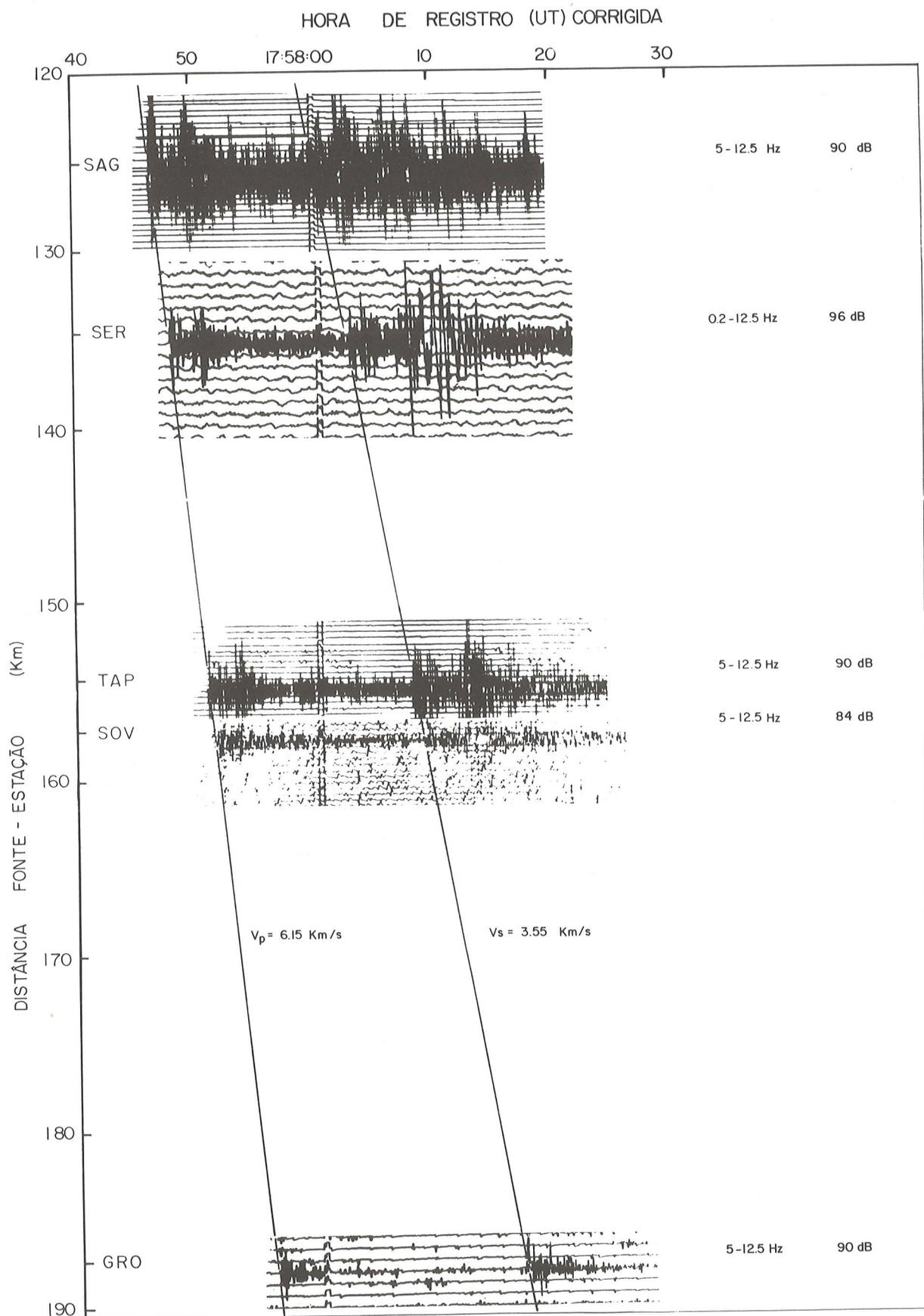


Figura 3 — Exemplo de seção sísmica mostrando a correlação das ondas P e S de uma explosão de 9760 kg, efetuada em Carafba Metais (Fonte 5, Fig. 1) no dia 03.09.1982, registrada em cinco estações da RSS.

ros menos profundos (~ 1 m) numa área de desmonte relativamente extensa, dissipando a maior parte da energia.

Para determinar as velocidades das ondas sísmicas das explosões sem hora de origem controlada, foram construídas primeiramente seções sísmicas para explosões escolhidas, no mínimo 4 para cada fonte, onde foram correlacionadas as fases P e S. Seguidamente foram calculadas as velocidades aparentes V_p e V_s a partir das inclinações das retas de correlação das fases P e S respectivamente. O critério para selecionar as explosões, além da apresentação de sinais claros nos registros, consistiu na escolha de valores de S-P mais próximos das médias adotadas (Tabela 2), garantindo desse modo que as explosões escolhidas foram efetuadas próximo do centro da área de explosões.

Um exemplo de seção sísmica é mostrado na Fig. 3, correspondente a uma explosão da fonte Caraíba Metais registrada em 5 estações da RSS. Pode-se observar nessa seção que as ondas P e S são claramente correlacionadas em todo o intervalo de distâncias compreendido pela seção (125-187 km). As amplitudes dos sinais da Fig. 3 não correspondem à propagação da energia com a distância, devido aos diferentes ganhos e filtros utilizados nas estações da RSS.

Os resultados da interpretação gráfica tempo de chegada/distância para cada fonte de explosões, obtidos das seções sísmicas, são apresentados na Tabela 4. Os valores das velocidades aparentes V_p e V_s apresentam as médias de no mínimo 4 (no caso de Pedra do Cavalo) e no máximo 14 (no caso de Caraíba Metais) seções sísmicas.

Os valores de V_p são de maior confiança para as explosões da pedreira Cone (relativamente próxima da RSS e efetuadas em rocha de embasamento) e de Caraíba Metais (cargas elevadas e grande número de explosões), e de menor confiança para as explosões de Tourão e Pedrinhas (cargas pequenas e relativamente distantes da RSS) e de Pedra do Cavalo e Trindade (muito distantes da RSS). As explosões de Tiquara apresentam sinais de boa qualidade na maioria das estações da RSS, principalmente para a onda P. Os valores de V_s são imprecisos para Cone (onda S é mascarada pela cauda da onda P), Tourão (registro com velocidade de 60 mm/min) e Pedrinhas e Trindade (amplitudes fracas da onda S). A energia das ondas S das explosões de Pedra do Cavalo, foi insuficiente para identificar o início dessas ondas para a definição de V_s .

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A curva S-P da Fig. 2 construída com dados da RSS, corresponde principalmente à região do quadrante SE a partir da barragem de Sobradinho, até uma distância próxima de 200 km. Comparando-se essa curva com a curva S-P do modelo teórico da crosta de Jeffreys & Bullen (1948), também incluída na Fig. 2, nota-se que ambas as curvas confundem-se até uma distância (Δ) de aproximadamente 10 km, a partir de onde a curva S-P experimental começa a afastar-se da curva teórica, apresentando tempo de S-P cada vez menor para a mesma distância, até um máximo

de aproximadamente 1,7 s, ao redor de 176 km de distância.

A diferença entre as curvas S-P aumenta de forma notória nos intervalos de Δ entre 110-130 km e entre 158-176 km, onde a curva teórica apresenta inflexões causadas pelas combinações S_g - P^* (S da camada acima da descontinuidade de Conrad e P refratada nessa descontinuidade) para o primeiro intervalo, e S^* - P_n (S da camada entre as descontinuidades de Conrad e Mohorovičić e P refratada nesta segunda descontinuidade) para o segundo intervalo. A curva S-P experimental não apresenta tais inflexões, sugerindo para a região de estudo a provável inexistência da descontinuidade de Conrad e uma profundidade maior que os 33 km estipulados para a descontinuidade de Mohorovičić pelo modelo Jeffreys-Bullen.

Os valores sucessivamente menores de S-P da curva experimental com relação à curva do modelo teórico Jeffreys-Bullen, indicam que os tempos de propagação das ondas P e S na região de estudo são mais próximos entre si que os tempos desse modelo. Isto significa que a razão entre as velocidades dessas ondas são diferentes em ambos os modelos.

Os valores das velocidades médias V_p correspondentes à parte superficial da crosta na área do reservatório de Sobradinho (Tabela 3), mostram para a onda P um aumento pequeno, porém constante, da velocidade com a distância, desde 5,78 km/s para $\Delta = 19,43$ km até cerca de 5,9 km/s para $\Delta > 72$ km, apresentando valores ligeiramente altos (6,01 e 5,93 km/s) correspondentes à estação TAP, localizada ao sul do reservatório com $\Delta < 70$ km. As velocidades médias da onda S não apresentam uma tendência definida, podendo ser adotado um valor médio de 3,52 km/s.

Os valores da velocidade das ondas P_g e S_g , no modelo Jeffreys-Bullen, que chegam em primeiro lugar até a distância de 110 km aproximadamente (ver Fig. 2), são 5,58 e 3,36 km/s respectivamente, com $V_p/V_s = 1,66$. Os valores correspondentes para o modelo estrutural sob a área do reservatório de Sobradinho (Fig. 2) são $V_p = 5,96 \pm 0,08$ km/s, $V_s = 3,52 \pm 0,04$ km/s (obtidos da regressão linear dos dados da Tabela 3) e $V_p/V_s = 1,69$. O valor de V_p do modelo experimental aproxima-se mais, a $V_p = 6,0$ km/s para a onda P_g , do modelo de Herrin (1968), conforme mostra a Fig. 2.

Estes resultados sugerem que sob a área do reservatório de Sobradinho os materiais apresentam características diferentes daquelas do modelo Jeffreys-Bullen (camada entre a superfície e a descontinuidade de Conrad), e são mais próximos do modelo sugerido por Herrin (1968), com um provável aumento gradativo da velocidade da onda P com a profundidade (ou a existência de uma camada superficial fina de baixa velocidade sobre outra de maior velocidade) e velocidades médias maiores, tanto da onda P quanto da onda S, em relação ao modelo Jeffreys-Bullen. Estes valores de V_p e V_s para o modelo experimental, concordam satisfatoriamente com a curva S-P da Fig. 2, explicando também os valores menores de S-P do modelo experimental em relação ao modelo Jeffreys-Bullen, e apresentando uma razão V_p/V_s diferente, como foi sugerido na análise da curva experimental S-P da Fig. 2.

Tabela 4 — Resultados da interpretação gráfica das seções sísmicas construídas para cada conjunto fonte/estações da RSS, onde a distância epicentral (Δ) é dada em km e os valores das velocidades aparentes V_p e V_s , das ondas P e S, são dadas em km/s.

Fonte \ Estação		SAG	TAP	GRO	SOV	SER
Cone	Δ	50,6	90,6	101,3	67,0	30,3
	V_p	6,07	6,07	5,93	5,93	5,93
	V_s	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
Tourão	Δ	65,3	101,6	124,6	92,4	68,7
	V_p	6,30	6,30	6,16	6,16	6,16
	V_s	3,65	3,65	3,65	3,65	3,65
Caráfa Metais	Δ	125,2	154,3	187,4	157,2	134,8
	V_p	6,28	6,28	6,15	6,15	6,15
	V_s	3,67	3,67	3,55	3,55	3,55
Tiquara	Δ	110,4	111,2	162,5	148,3	145,4
	V_p	6,27	6,27	6,16	6,16	6,16
	V_s	3,63	3,63	3,46	3,46	3,46
Pedrinhas	Δ	123,3	126,1	177,0	161,5	156,8
	V_p	6,30	6,30	—	6,20	6,20
	V_s	3,69	3,69	—	3,69	3,69
Pedra do Cavalo	Δ	396,6	397,6	449,9	435,0	427,1
	V_p	8,27	8,27	8,27	8,27	—
	V_s	—	—	—	—	—
Trindade	Δ	220,5	254,5	226,9	202,6	181,0
	V_p	8,1	8,1	8,1	6,2	6,2
	V_s	4,2	4,2	4,2	3,7	3,7

Com relação às velocidades aparentes contidas na Tabela 4, determinadas a partir das seções sísmicas, podem ser efetuadas as seguintes observações:

- Até distâncias de ~ 100 km, os valores de V_p de Cone são de maior confiança e concordantes com os valores obtidos com as explosões dos diques B e C.
- É interessante observar nas explosões de Cone a diferença entre o valor de $V_p = 6,07$ km/s obtido entre as estações TAP e SAG, que estão localizadas ao sul do reservatório de Sobradinho, que é um pouco maior que o valor $V_p = 5,93$ km/s correspondente às outras estações (GRO, SOV, SER), localizadas ao norte do reservatório. Valores ligeiramente altos de velocidade média da onda P foram observados em TAP nas explosões dos diques B e C, com Δ entre 60 e 70 km, porém não em SAG, com Δ entre 19 e 28 km. A distância entre SAG e Cone é ~ 50 km, e neste caso apresenta juntamente com TAP um valor alto de velocidade aparente da onda P com relação às outras estações localizadas ao norte do reservatório de Sobradinho, sugerindo que esta característica poderia ser observada somente em valores relativamente altos

de Δ , ou seja, quando as ondas atingem camadas não tão superficiais.

- Esta mesma característica, com valores de V_p ligeiramente maiores para as estações localizadas ao sul do reservatório, é observada nos resultados (Tabela 4) conseguidos com as explosões de Tourão. Tiquara, Pedrinhas e Caráfa Metais, com Δ entre 65 e 154 km com relação a SAG e TAP.
- Para distâncias entre aproximadamente 100 e 200 km, os valores de V_p mais confiáveis são os correspondentes às explosões de Caráfa Metais, com $V_p = 6,28 \pm 0,03$ km/s, entre TAP e SAG, e $V_p = 6,15$ km/s, entre GRO, SOV e SER, valor este que concorda satisfatoriamente com os obtidos a partir das explosões de Tiquara e Tourão, utilizando as mesmas estações (Δ entre 68 e 162 km).
- Nas explosões de Trindade com Δ entre 181 e 254 km ao norte da RSS, foi possível identificar na mesma seção sísmica, fases não muito nítidas da onda P correspondente à crosta ($V_p = 6,2$ km/s) e ao manto superior ($V_p = 8,10 \pm 0,05$ km/s), com uma distância crítica definida em aproximadamente 210 km.

- f) As explosões de Pedra do Cavalo, com Δ entre 396 e 450 km ao sudeste da RSS, indicam um valor de $V_p = 8,27 \pm 0,04$ km/s correspondente ao manto superior.
- g) Os valores de V_s são mais dispersos para $\Delta < 200$ km e não apresentam nenhuma tendência definida até $\Delta \sim 100$ km (explosões de Cone e Tourão). Para Δ entre 100 e 200 km, nas explosões de Tiquara e Caraíba Metais, observa-se uma diferença entre os valores de V_s correspondentes às estações ao norte e ao sul do reservatório de Sobradinho, com valores de 3,55 km/s e 3,67 km/s respectivamente, correspondentes às explosões de Caraíba Metais, que são de maior confiança.
- h) As explosões de Trindade indicam valores de $V_s = 4,20 \pm 0,05$ km/s, correspondente ao manto superior e $V_s = 3,70$ km/s, correspondente à crosta. Estes valores foram baseados em identificação de fases S não muito claras, principalmente no caso da fase S_n , que apresenta um valor de velocidade notoriamente menor que o esperado.

Os resultados conseguidos na análise dos sismogramas da RSS, sugerem a existência de dois modelos estruturais ligeiramente diferentes, um ao norte do reservatório de Sobradinho, com velocidades da onda P ligeiramente menores e o outro ao sul do reservatório, com velocidades ligeiramente maiores, para distâncias superiores a 50 km.

Para $\Delta < 50$ km, aparentemente não existe diferença entre os valores de V_p ao sul e ao norte do reservatório como mostram os resultados da Tabela 3, o que sugere a presença da mesma camada superficial em ambos os lados do reservatório com valores de V_p variando entre 5,78 e 5,84 km/s, $V_s = 3,52$ km/s e V_p/V_s entre 1,64 e 1,66. Essa camada superficial estaria sobre outra camada intermediária com características diferentes ao norte e ao sul do reservatório de Sobradinho, resultando numa velocidade média V_p da ordem de 5,9 e 6,0 km/s respectivamente, para distâncias entre aproximadamente 50 e 100 km. Neste caso, os valores de V_p/V_s são da ordem de 1,67 e 1,68 para os modelos em ambos os lados do reservatório.

Na porção inferior da crosta, subjacente à camada intermediária, existiria uma camada detectada a distâncias entre 110 e 200 km, com valores $V_p = 6,28$ km/s, $V_s = 3,67$ km/s e $V_p/V_s = 1,71$ sob a parte sul do reservatório de Sobradinho (estações TAP e SAG) e com valores $V_p = 6,15$ km/s, $V_s = 3,55$ km/s e $V_p/V_s = 1,73$ sob a parte norte do reservatório (estações SER, SOV e GRO). As explosões de Trindade, apresentam valores de $V_p = 6,2$ km/s para esta camada, para distâncias da ordem de 200 km.

A curva experimental S-P/distância (Fig. 2) não sugere a existência de descontinuidades claras separando essas camadas, existindo provavelmente uma mudança gradual das características físicas dos materiais com a profundidade, provocando uma variação lenta da velocidade das ondas sísmicas entre 5,78 e 6,28 km/s para as ondas P e entre 3,52 e 3,67 km/s para as ondas S, com valores de V_p e V_s ligeiramente superiores sob a porção sul do reservatório de Sobradinho.

A velocidade aparente da onda P no manto superior, abaixo da descontinuidade de Mohorovičić, é da ordem de $8,27 \pm 0,04$ km/s a partir das explosões de Pedra do Cavalo, para Δ entre aproximadamente 400 a 450 km e da ordem de $8,10 \pm 0,05$ km/s com dados das explosões de Trindade, para Δ entre aproximadamente 215 e 250 km, neste caso a velocidade da onda S é da ordem de $4,20 \pm 0,05$ km/s, com um valor $V_p/V_s = 1,93$. Este último valor é muito elevado em relação a valores obtidos em outros lugares da Terra, provavelmente devido a imprecisão na identificação da fase S_n . Os resultados obtidos a partir das explosões de Trindade (velocidade V_p na crosta 6,2 km/s e no manto 8,1 km/s e distância crítica da ordem de 210 km) sugerem uma profundidade provável de Moho de aproximadamente 38 km. Por outro lado, as explosões de Pedra do Cavalo apresentam em SAG e TAP ($\Delta \sim 397$ km) uma fase nítida da onda P chegando 8,9 s após a onda P_n , correspondendo talvez a uma reflexão supercrítica no Moho (fase P_{MP}), sugerindo uma profundidade de aproximadamente 40 km para essa descontinuidade, assumindo um valor médio de $V_p = 6,2$ km/s na crosta e $V_p = 8,27$ km/s no manto superior.

A fase P_n chega a RSS como primeiro impulso somente após 200 km de distância, fato este compatível com a curva S-P/distância da Fig. 2.

CONCLUSÕES

Os resultados conseguidos neste trabalho, com base na interpretação dos dados das explosões locais e próximas registradas pela RSS, permitiram a obtenção de um modelo preliminar de velocidades sísmicas na área que circunda o reservatório de Sobradinho. Entretanto não é possível com esses dados definir claramente a existência de camadas na crosta nem suas prováveis profundidades, principalmente pela falta de controle da hora de origem da grande maioria das explosões utilizadas e pela distribuição inapropriada das explosões e estações para este tipo de estudo.

O modelo estrutural preliminar obtido para a região de estudo, estaria constituído por uma camada superficial, provavelmente presente em toda a área estudada, com V_p da ordem de 5,8 km/s, $V_s = 3,52$ km/s e V_p/V_s da ordem de 1,65. Subjacente a essa camada superficial, encontrar-se-ia uma camada intermediária, observada a partir de $\Delta = 50$ km, com V_p da ordem de 5,9 km/s na porção norte do reservatório de Sobradinho e 6,0 km/s na porção sul, com valores de V_s da ordem de 3,5 km/s e 3,6 km/s, respectivamente e V_p/V_s entre 1,67 e 1,68.

Utilizando os dados da Tabela 3, obtêm-se por regressão linear $V_p = 5,96$ km/s válidos até pelo menos $\Delta = 75$ km, que corresponderia a um valor médio para as camadas superficial e intermediária. Com $V_s = 3,52$ km/s a razão $V_p/V_s = 1,68$.

A parte inferior da crosta na porção norte do reservatório de Sobradinho aparentemente estaria constituída por uma camada com $V_p = 6,2$ km/s, $V_s = 3,7$ km/s e $V_p/V_s = 1,68$ observada com as explosões de Trindade. Na porção sul do reservatório existiria, sob a camada in-

termediária, uma camada observada a distâncias maiores que 110 km, com $V_p = 6,28$ km/s, $V_s = 3,67$ km/s e $V_p/V_s = 1,71$.

A interface crosta/manto (descontinuidade de Mohorovičić) estaria localizada aproximadamente a 40 km de profundidade, com a correspondente fase P_n chegando como primeiro impulso somente em torno de 210 km de distância epicentral. Isto é compatível com a curva experimental S-P da Fig. 2. As velocidades correspondentes ao manto superior são $V_p = 8,1$ km/s e $V_s = 4,2$ km/s, para distâncias pouco superiores a 210 km, e $V_p = 8,27$ km/s para distâncias em torno de 400 km, com um valor médio de $V_p = 8,2$ km/s. Esta velocidade média deve corresponder a um valor muito próximo da velocidade real das ondas P no manto superior, visto que os dados observados na RSS provém de fontes localizadas em direções bem diferentes.

Este modelo preliminar de velocidades típicas da crosta e manto superior é parecido com o modelo determinado na África do Sul (Press, 1966). A profundidade de ~ 40 km para a descontinuidade de Mohorovičić, concorda satisfatoriamente com os resultados dos levantamentos gravimétricos efetuados pela CPRM na região em estudo (Motta, 1979), e com valores encontrados em outras regiões de escudo de nosso planeta (Mueller, 1974).

A curva experimental S-P/distância obtida neste trabalho, para distâncias até aproximadamente 200 km, mostra que o modelo estrutural na região do reservatório de Sobradinho é diferente do modelo Jeffreys-Bullen, aproximando-se mais do modelo proposto por Herrin (1968). Essa curva concorda satisfatoriamente com os resultados obtidos com as explosões dos diques B e C, sugerindo ademais a

provável ausência da descontinuidade de Conrad sob a região e uma profundidade maior que 33 km para a descontinuidade de Mohorovičić, o qual é confirmado pelos resultados obtidos na análise das seções sísmicas. A curva experimental S-P/distância apresentada na Fig. 2, permitirá a obtenção de resultados mais precisos no cálculo de Δ , para a determinação de epicentros de sismos próximos e locais.

Este modelo preliminar da estrutura da crosta e manto superior da região em estudo, deverá ser definido com mais detalhe durante o levantamento que será efetuado proximamente, utilizando explosões com horas de origem controladas e distribuição apropriada de um número maior de estações sismográficas

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar o seu reconhecimento à Companhia Hidrelétrica do São Francisco, na pessoa do Eng^o Enandro Menezes, pelo seu constante apoio para a realização desta pesquisa e pela autorização para utilização dos dados da RSS. Também agradecemos aos membros da CHESF que participaram e participam na supervisão da RSS, de modo especial aos seus operadores, pelo excelente trabalho efetuado durante todos esses anos em que a RSS tem estado em operação.

Agradecemos também, pela concessão de auxílio e bolsas, ao CNPq (Processos n^{os} 401424-83 e 300746-77), FINEP (Convênio n^o 5.3.83.0141.00) e FAPESP (Processo n^o 83/1379-6).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DIAS, L., FERNANDES, C. & BERROCAL, J. — 1980 — Estrutura crustal na área do reservatório de Sobradinho. XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú — SC. Boletim n^o 2: 352.
- GIESE, P. & SHUTE, J. — 1975 — Preliminary report on the results of seismic measurements in the Brazilian coastal mountains. Relatório não publicado.
- HERRIN, E. — 1968 — 1968 seismological tables for P phases. Bull. Seism. Soc. Am., **58**: 1196-1237.
- JEFFREYS, H. & BULLEN, K.E. — 1948 — Seismological tables. British Association for the Advancement of Science. London, U.K., 50 pp.
- KOSMINSKAYA, I.P. — 1971 — Deep seismic sounding of the Earth's crust and upper mantle. Consultants Bureau, New York-London, 184 pp.
- MOTTA, A.C. — 1979 — Mapa de profundidade da descontinuidade de Mohorovičić — Base Bouguer médio. Relatório final da CPRM: Projeto Levantamento Gravimétrico do Estado da Bahia.
- MUELLER, STEPHAN — 1974 — The structure of the Earth's crust, based on seismic data. Upper Mantle Scientific Report n^o 39. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam — London, New York, 391 pp.
- PRESS, F. — 1966 — Seismic velocities. Handbook of Physical Constants-Section, 9. The Geological Society of America Memoir 97.
- SHERIFF, R.E. & GELDART, L.P. — 1982 — Exploration seismology, vol. 1. Cambridge University Press.
- VELOSO, J.A.V. — 1984 — Informação preliminar da crosta através de sísmica de refração. Submetido para publicação em "Ciências da Terra".

Versão original recebida em Jun./1984;
Versão final, em Jan./1985.