

PROPIEDADES DINAMICAS DE LAS GRAVAS DE SANTIAGO

Pedro M. ACEVEDO M.*
María Soledad AVENDAÑO R.**
Manuel ARANEDA C.**

RESUMEN

Se dan a conocer los módulos de Young, E, coeficientes de Poisson, ν , estratigrafías y factores de atenuación, $a(\omega)$, determinados en la unidad de gravas del sector urbanizado de Santiago. Con tal objeto se utilizó información geológica, geofísica, mecánica y dinámica de suelos; en particular se midieron velocidades de ondas longitudinales, P, velocidades de ondas transversales, S, y densidades in situ.

INTRODUCCION

El propósito de esta investigación es estudiar las propiedades dinámicas y de amortiguamiento de la unidad de suelo más densamente construída, y con obras civiles de gran envergadura. Además de la información de mecánica de suelos se ocupó refracción sísmica como elemento de exploración y para la determinación de las propiedades del suelo. Básicamente se usó el método Ita-Tataki, desarrollado por investigadores japoneses, que consiste en medir los tiempos de recorrido de las ondas sísmicas usando fuentes y geófonos apropiados.

En el diseño asísmico, el rango de deformación del suelo que debería interesar sería el impuesto durante el sismo, que es en general mayor que el experimentado por el suelo durante las determinaciones de propiedades usando refracción sísmica. Es por lo tanto importante determinar factores correctores, a partir de instrumentación de las obras civiles.^{1,2}

*Investigador de IDIEM.

**Investigadores del Departamento de Geofísica y Sismología.

Las determinaciones de las propiedades aquí presentadas se efectuaron en 18 sitios sobre gravas, con delgado relleno superficial de espesor variable y 2 sitios sobre bloques de origen glacio-fluvial. La Fig. 1 muestra que los puntos se distribuyeron tratando de cubrir en la mejor forma posible el área de interés, considerando naturalmente que el instrumental usado es sensible a ruidos y necesita una superficie libre de obstáculos de por lo menos 60 metros.

Existe amplia evidencia de que durante un terremoto el movimiento de la superficie libre o el sello de fundación dependerá, además de las características de la estructura y vibraciones, de las propiedades dinámicas del suelo. Las propiedades aquí presentadas ayudarán a modelar dinámicamente las capas superiores del subsuelo de Santiago y de esta forma al avance en diseño asísmico.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS Y DE MECANICA DE SUELOS

El valle del Mapocho, originado en un hundimiento tal vez post cretácico que se enmarca en dos grandes fallas longitudinales, se rellenó por los sedimentos de dos o tres períodos de glaciación y por el arrastre del río durante las correspondientes épocas interglaciales.³

El cono de rodados formados por el río Mapocho se encontró en su parte inferior con el mucho más voluminoso del río Maipo, viéndose empujado hacia el norte en la zona del extremo occidental del cerro San Cristóbal y desde dicho extremo hacia el oeste.

El relleno, en consecuencia, ha sido en gran parte la obra de un torrente de mayor pendiente que el río actual y con un régimen de grandes irregularidades y caudales. Además, ha tenido como aporte los escombros de faldas arrastrados por el agua de los cerros vecinos.

La sucesión de los depósitos glaciales in situ o arrastrados posteriormente y los del río, con grandes variaciones de velocidad y caudal, tienen como característica, los primeros, la arcilla y conglomerados arcillosos y los segundos, desde bolones, grava hasta arena limpia en donde quedó el material arrastrado y arcilla y arena en donde quedó el material en suspensión.

Por otra parte, en el proceso de relleno el río debe haber discurrido por cursos muy variables dentro del cerro, erosionando depósitos más antiguos y volviéndolos a transportar o depositar sobre antiguos lechos.

Toda la configuración anteriormente reseñada se refleja en la cubierta superficial ilustrada en la Fig. 2, en la que es posible limitar aproximadamente la zona de gravas que tiene sobre ella rellenos artificiales heterogéneos, de espesores que varían de 0 a 6 metros.

La información de mecánica de suelos corresponde a trabajos de laboratorio y terreno realizados a partir de pozos de reconocimiento de profundidades que varían entre 2 y 18 m, complementados con información de los archivos de IDIEM

Las determinaciones de las propiedades aquí presentadas se efectuaron en 18 sitios sobre gravas, con delgado relleno superficial de espesor variable y 2 sitios sobre bloques de origen glacio-fluvial. La Fig. 1 muestra que los puntos se distribuyeron tratando de cubrir en la mejor forma posible el área de interés, considerando naturalmente que el instrumental usado es sensible a ruidos y necesita una superficie libre de obstáculos de por lo menos 60 metros.

Existe amplia evidencia de que durante un terremoto el movimiento de la superficie libre o el sello de fundación dependerá, además de las características de la estructura y vibraciones, de las propiedades dinámicas del suelo. Las propiedades aquí presentadas ayudarán a modelar dinámicamente las capas superiores del subsuelo de Santiago y de esta forma al avance en diseño asísmico.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS Y DE MECANICA DE SUELOS

El valle del Mapocho, originado en un hundimiento tal vez post cretácico que se enmarca en dos grandes fallas longitudinales, se rellenó por los sedimentos de dos o tres períodos de glaciación y por el arrastre del río durante las correspondientes épocas interglaciales.³

El cono de rodados formados por el río Mapocho se encontró en su parte inferior con el mucho más voluminoso del río Maipo, viéndose empujado hacia el norte en la zona del extremo occidental del cerro San Cristóbal y desde dicho extremo hacia el oeste.

El relleno, en consecuencia, ha sido en gran parte la obra de un torrente de mayor pendiente que el río actual y con un régimen de grandes irregularidades y caudales. Además, ha tenido como aporte los escombros de faldas arrastrados por el agua de los cerros vecinos.

La sucesión de los depósitos glaciales in situ o arrastrados posteriormente y los del río, con grandes variaciones de velocidad y caudal, tienen como característica, los primeros, la arcilla y conglomerados arcillosos y los segundos, desde bolones, grava hasta arena limpia en donde quedó el material arrastrado y arcilla y arena en donde quedó el material en suspensión.

Por otra parte, en el proceso de relleno el río debe haber discurrido por cursos muy variables dentro del cerro, erosionando depósitos más antiguos y volviéndolos a transportar o depositar sobre antiguos lechos.

Toda la configuración anteriormente reseñada se refleja en la cubierta superficial ilustrada en la Fig. 2, en la que es posible limitar aproximadamente la zona de gravas que tiene sobre ella rellenos artificiales heterogéneos, de espesores que varían de 0 a 6 metros.

La información de mecánica de suelos corresponde a trabajos de laboratorio y terreno realizados a partir de pozos de reconocimiento de profundidades que varían entre 2 y 18 m, complementados con información de los archivos de IDIEM

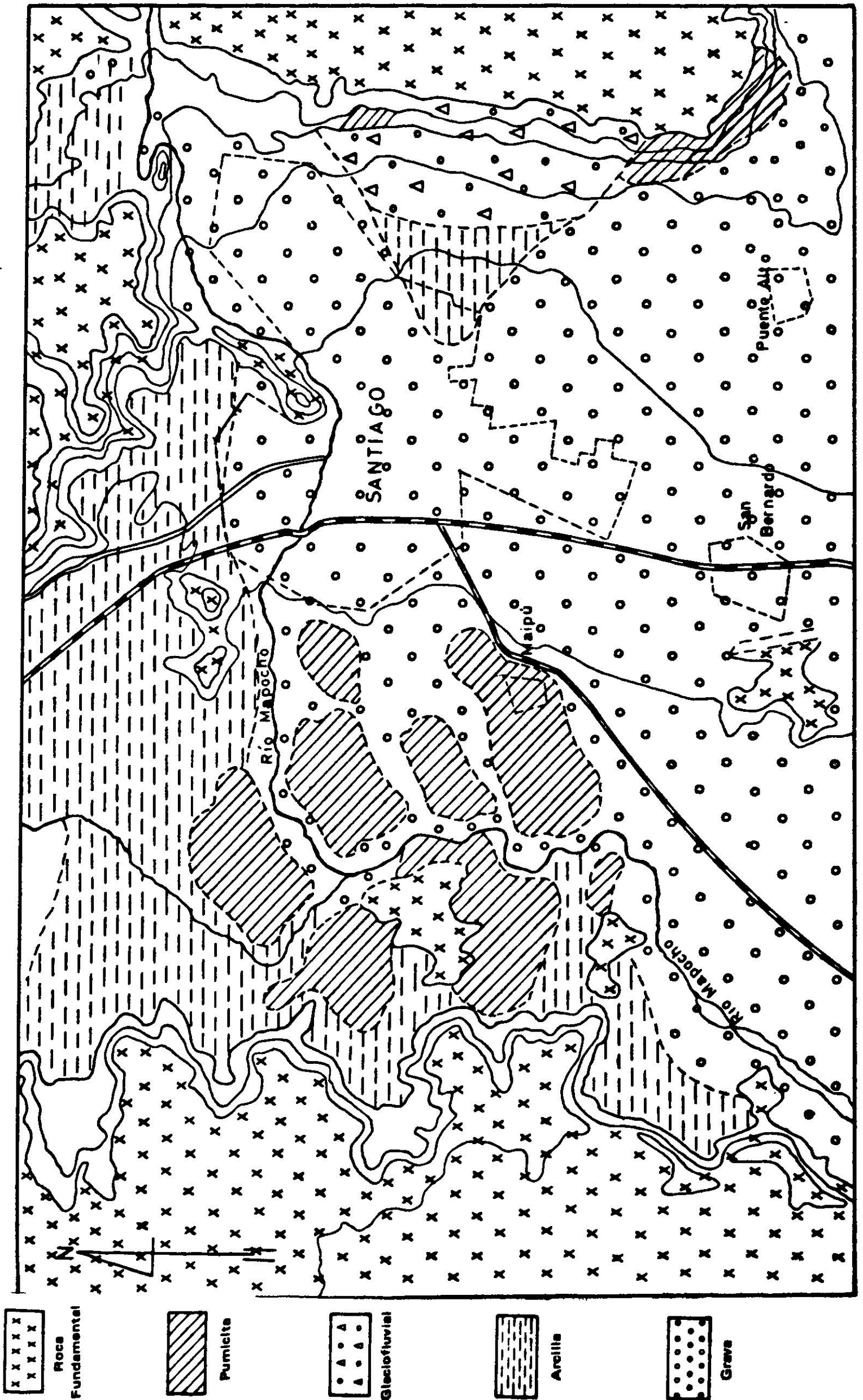


Fig. 2. Configuración geológica de la zona experimentada. Geología por J. Karzulovic.

desde 1959 a la fecha. Además en algunos puntos hay información de módulos de Young estáticos y cíclicos o cíclicos.

Los depósitos fluviales desde el punto de vista de mecánica de suelos se clasifican como gravas arenosas con porcentajes variables pero pequeños de finos, con diferentes grados de plasticidad, de cantos subredondeados, de compacidad densa a media; apoyándose en un suelo bastante compacto con granulometría muy variada y con gran cantidad de finos. La napa freática está por debajo del nivel más profundo alcanzado en estas determinaciones.

VELOCIDADES DEDUCIDAS DE LOS SISMOGRAMAS

En cada determinación experimental se obtuvo un registro sísmico o sismograma que contiene toda la información recogida en el terreno, registros que no se presentan aquí.

A partir de estos sismogramas es posible hacer parte de la interpretación trazando las relaciones tiempo-distancia correspondientes a cada una de las experiencias realizadas, y aplicando el método de los mínimos cuadrados.

Las Figs. 3 a 20 muestran las relaciones tiempo-distancia correspondientes a los lugares estudiados. Debajo de cada una de estas relaciones tiempo-distancia se muestra, a escala, la profundidad y espesor de los estratos encontrados y en cada uno se muestran dos velocidades, una corresponde a la calculada a partir de los sismogramas, se anota junto a las rectas tiempo-distancia y la otra, anotada junto al esquema de profundidades es la velocidad aparente para los puntos de la Fig. 3; en cambio, esta velocidad es real para los puntos de las Figs. 4 a 20. En el primer grupo de puntos mencionado, sólo se usó la fuente de energía en un extremo del perfil sísmico, obteniéndose varios registros desde el mismo punto. El segundo grupo de puntos corresponde a fuentes de energía en los dos extremos del perfil sísmico, verificándose de este modo la ley de reciprocidad, es decir, el tiempo de propagación de las ondas elásticas en su trayectoria desde un punto A hasta un punto B es el mismo que el tiempo de propagación desde B hasta A, donde A y B son dos puntos cualesquiera. Además de verificarse el tiempo de propagación, es posible calcular la velocidad real de las ondas en cada estrato.

A los gráficos tiempo-distancia se les ajustan rectas calculando la pendiente y el origen por el método de los mínimos cuadrados.

De la observación de estas figuras se puede concluir que los perfiles de la estructura del subsuelo obtenidos desde las ondas *P* son diferentes a los obtenidos con ondas *S*. Esto puede deberse a la existencia de un estrato de menor velocidad (en profundidad), el cual no es registrado por la onda *P* debido a su alta velocidad, pero sí lo registra la onda *S*, dando lugar a que el espesor calculado a partir de ella sea mayor.

Los rangos de velocidades de propagación son 900 y 1500 m/s para V_p y 300 a 750 m/s para V_s . Es importante destacar que por primera vez se ha definido un

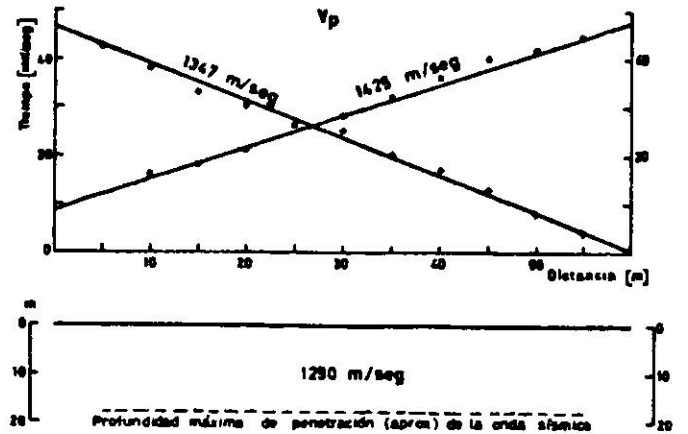
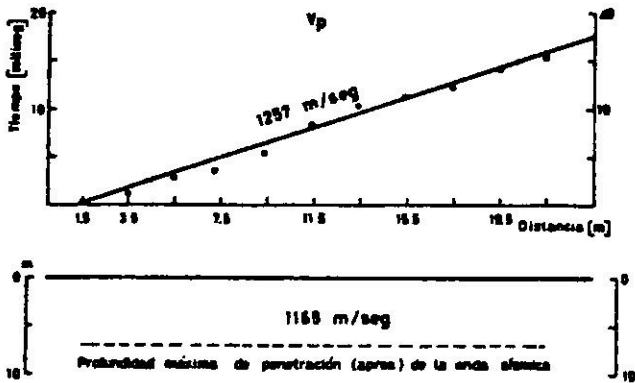
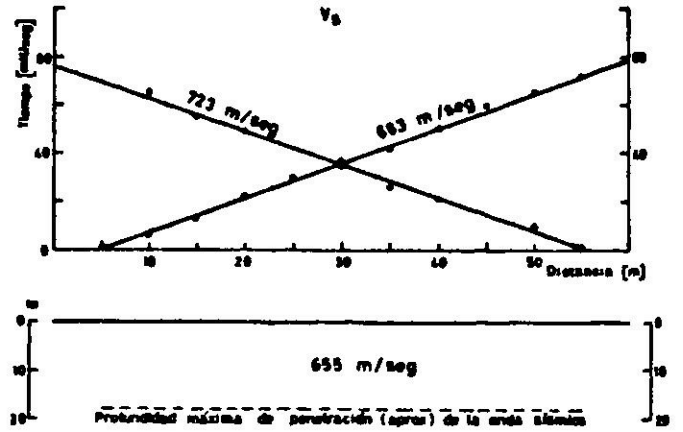
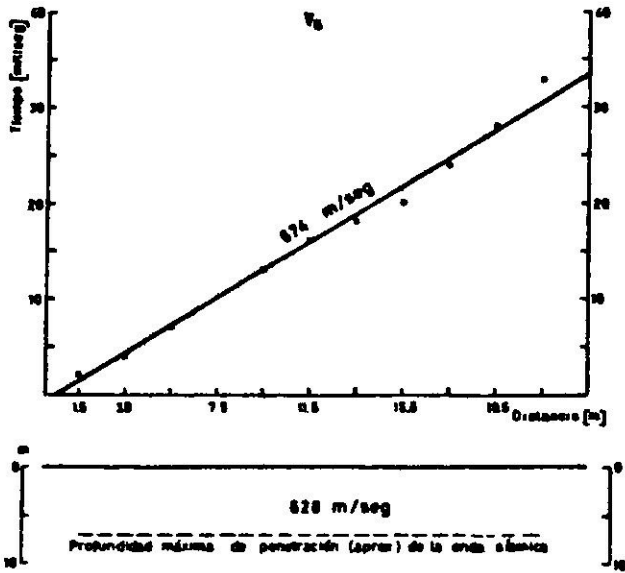


Fig. 3. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Blanco Encalada con Beaucheff, 16-7-73.

Fig. 4. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Reactor Nuclear La Reina, 7-11-72.

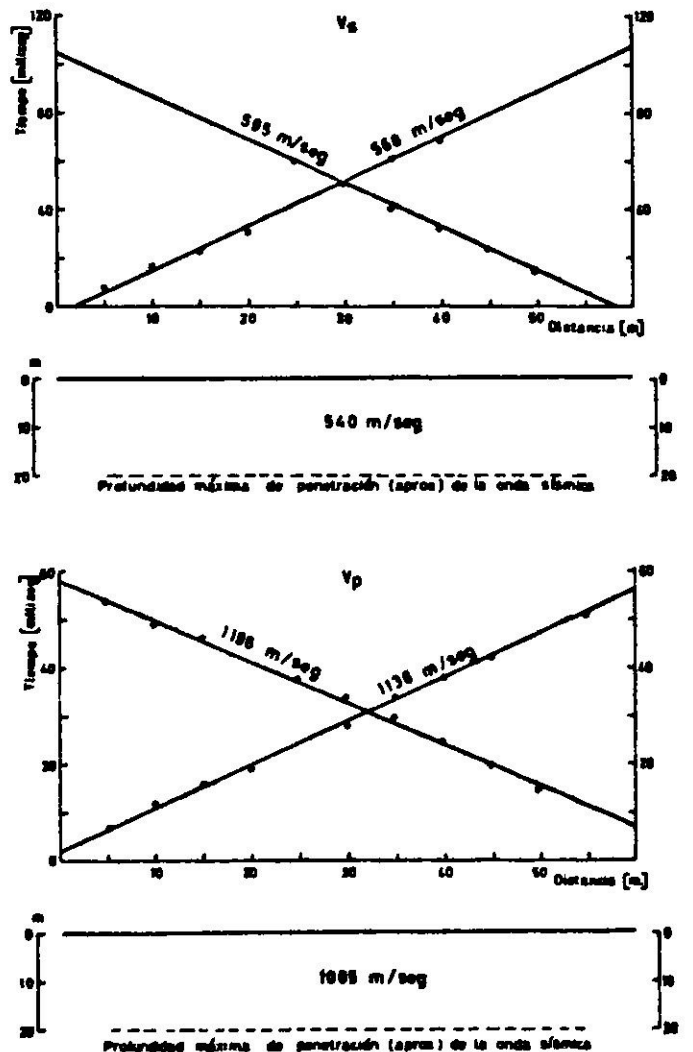
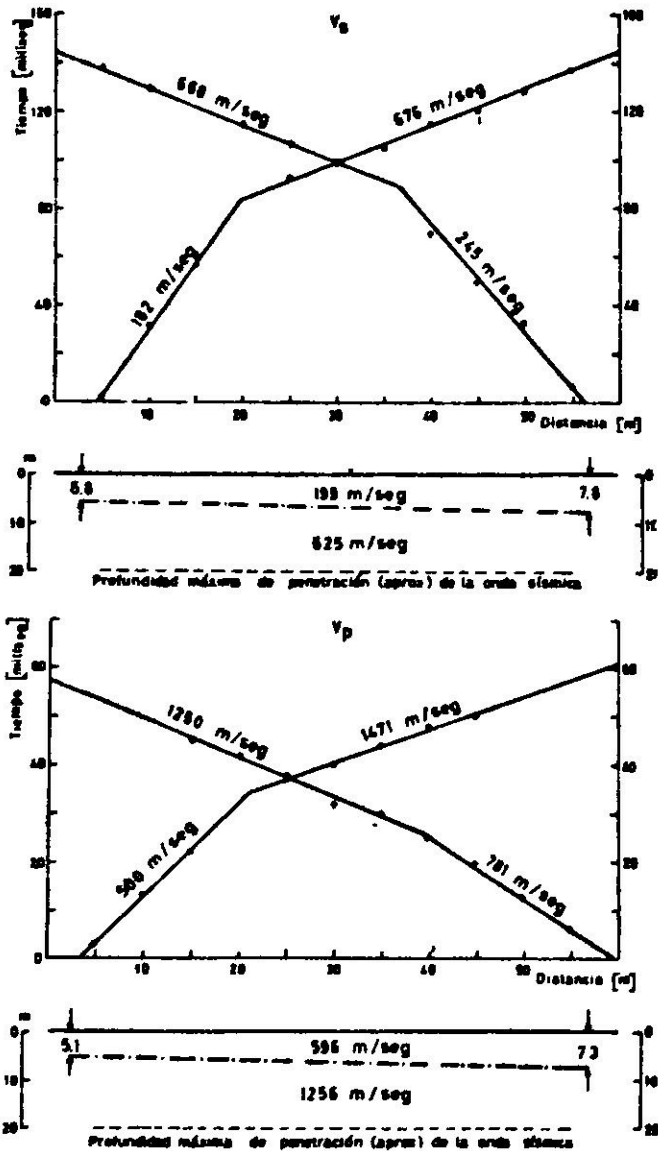


Fig. 5. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Aeródromo Tobalaba, 11-11-72.

Fig. 6. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Country Club, 16-11-72.

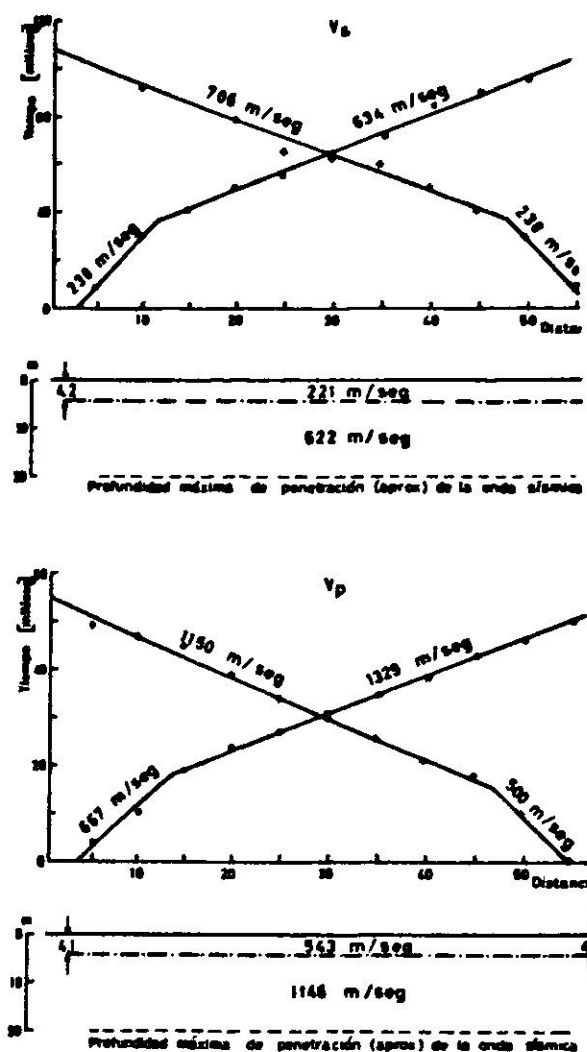


Fig. 7. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Estadio Palestino, 21-11-72.

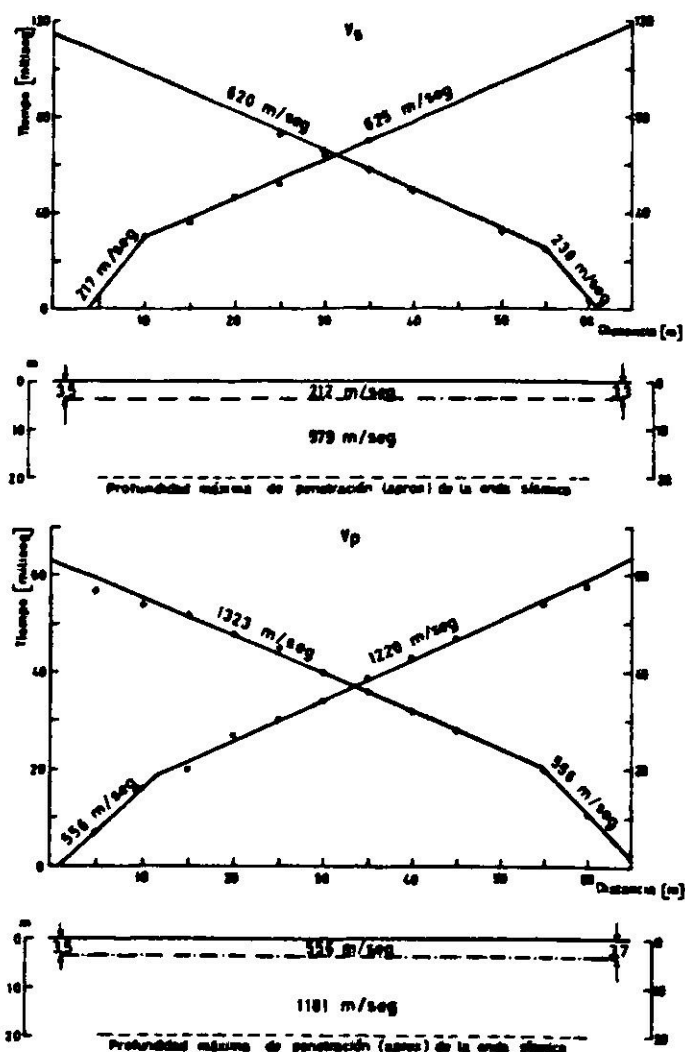


Fig. 8. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Club de Polo San Cristóbal, 22-11-72.

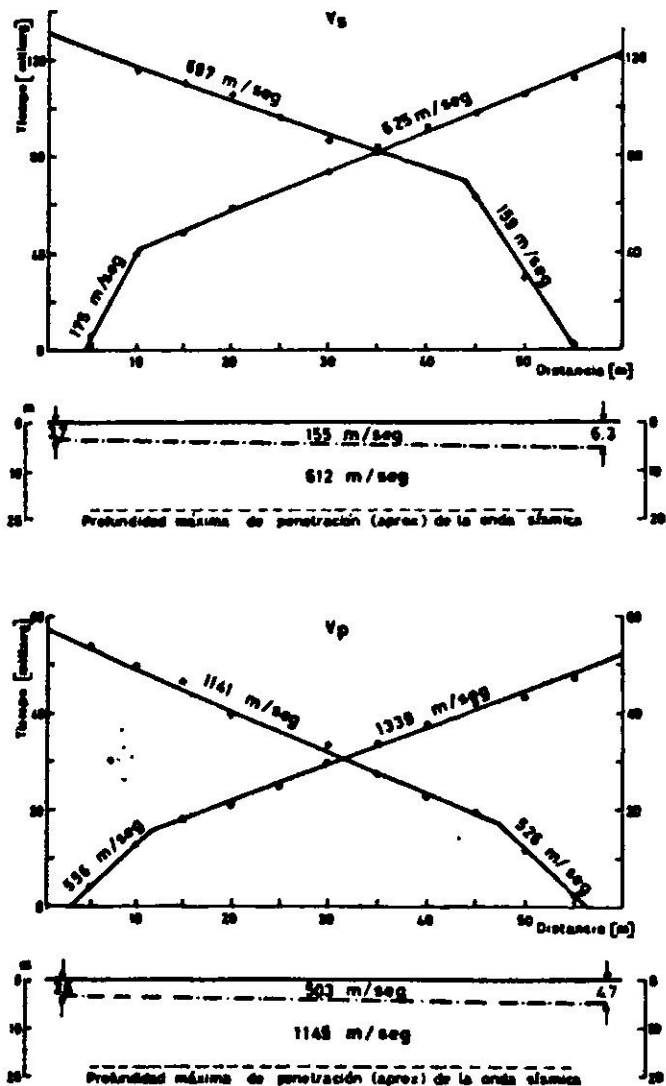


Fig. 9. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Estadio Recoleta, 23-11-72.

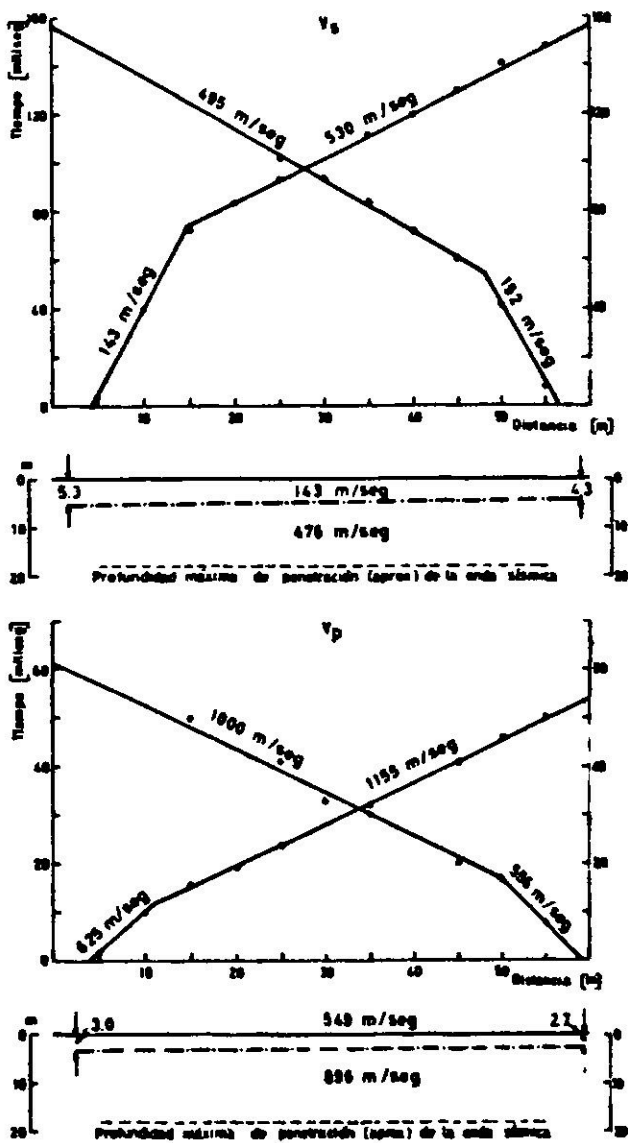


Fig. 10. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Hipódromo Chile, 24-11-72.

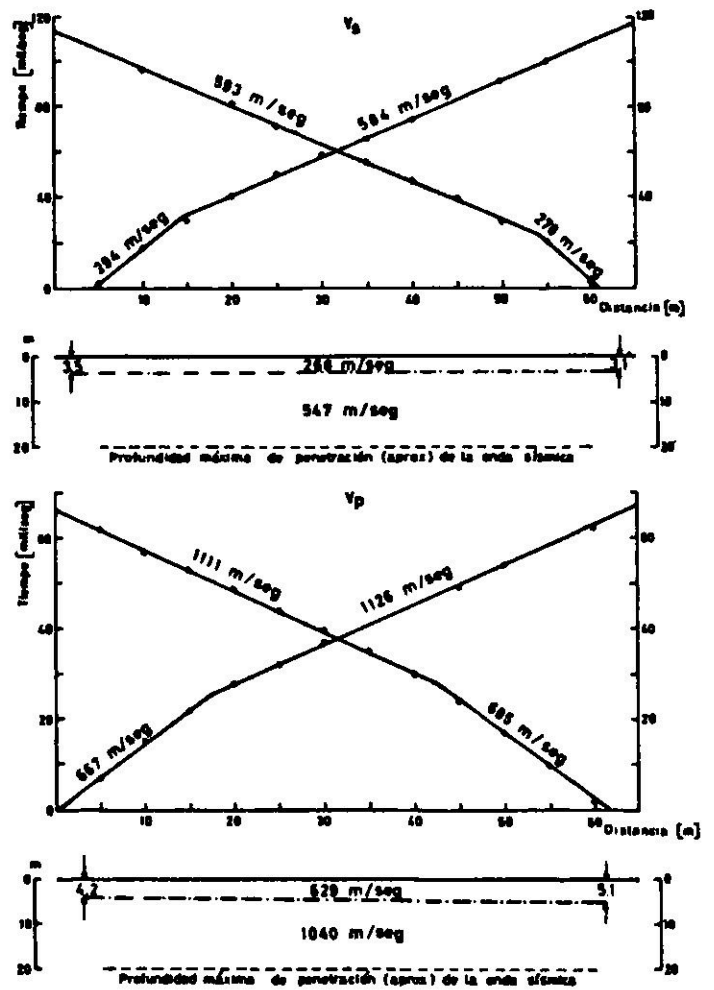
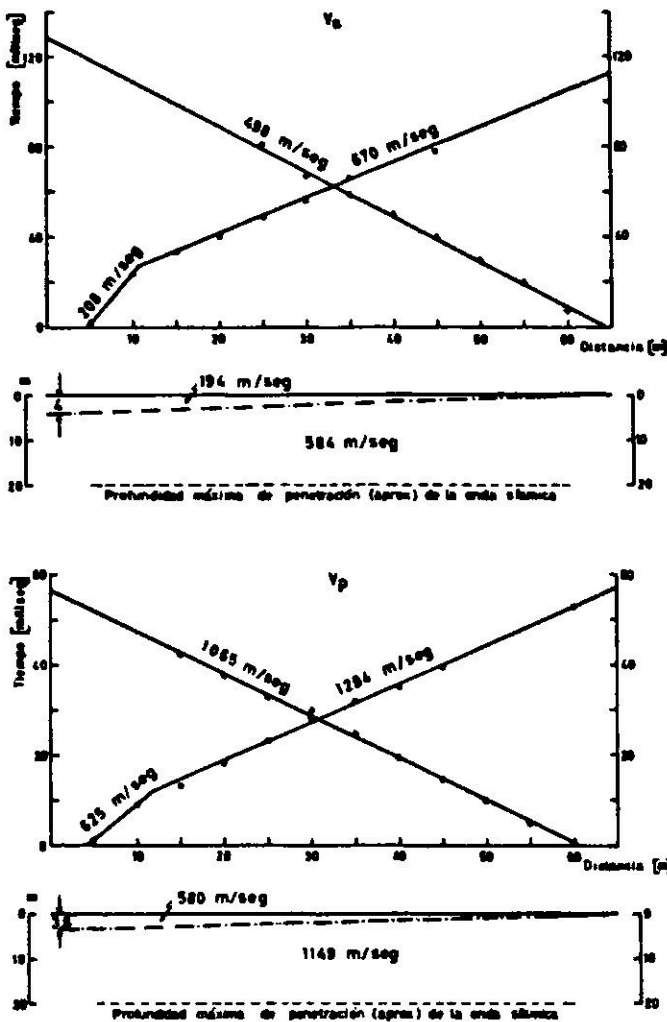


Fig. 11. Relación tiempo-distancia, ondas V_S y V_P . Estadio Chilecra, 28-11-72.

Fig. 12. Relación tiempo-distancia, ondas V_S y V_P . Parque La Feria, 29-11-72.

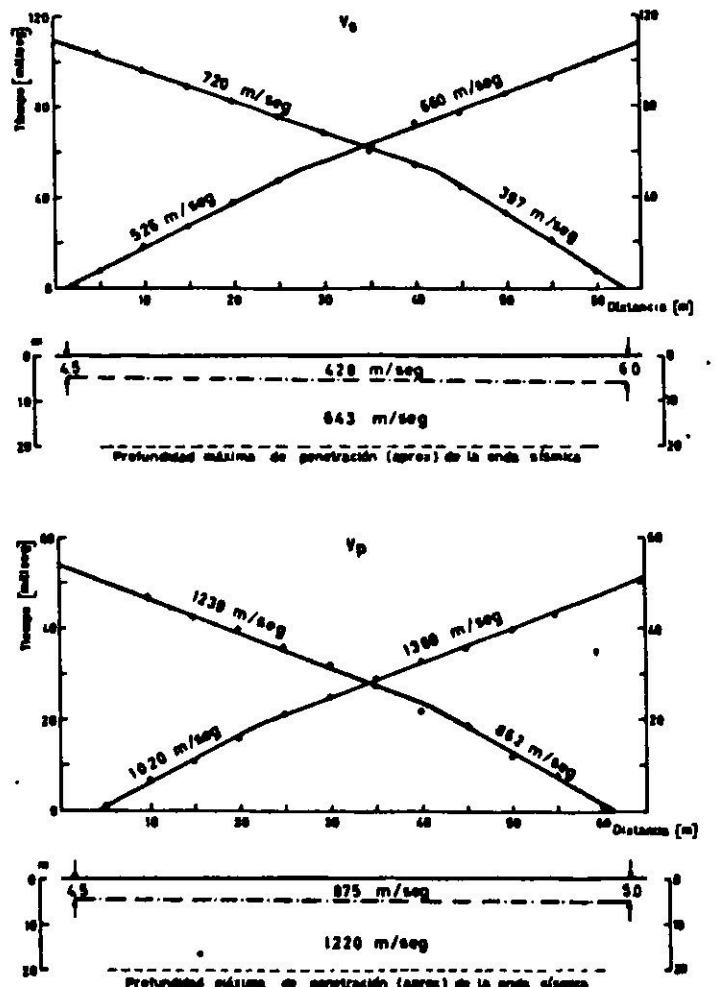
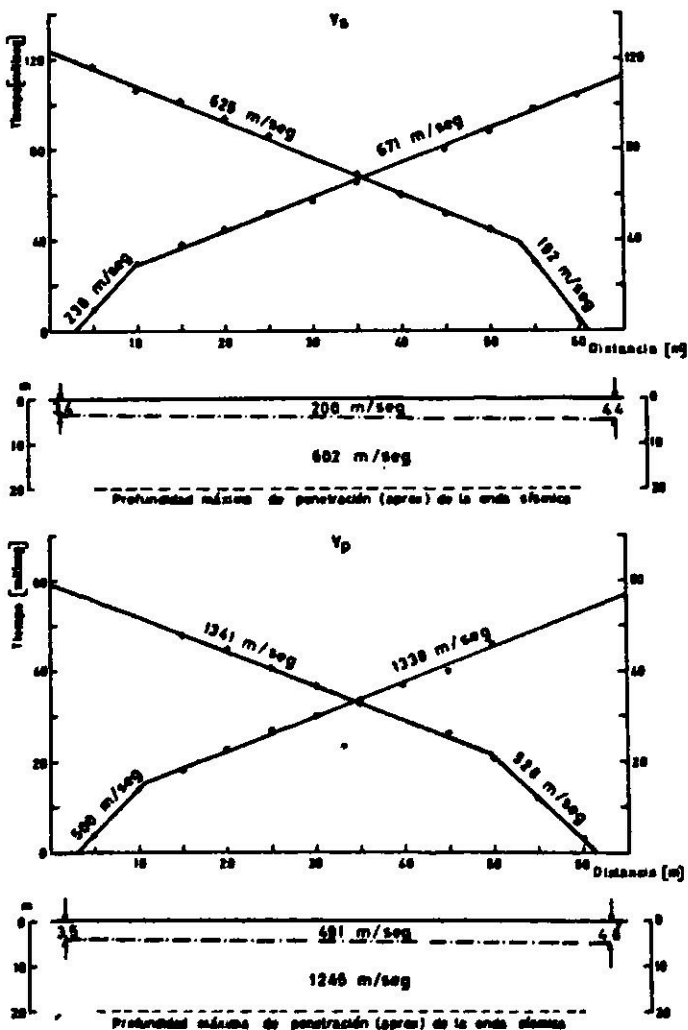


Fig. 13. Relación tiempo-distancia, ondas V_S y V_P . Estadio Nacional, 12-3-73.

Fig. 14. Relación tiempo-distancia, ondas V_S y V_P . Club de Golf Los Leones, 1º-12-72.

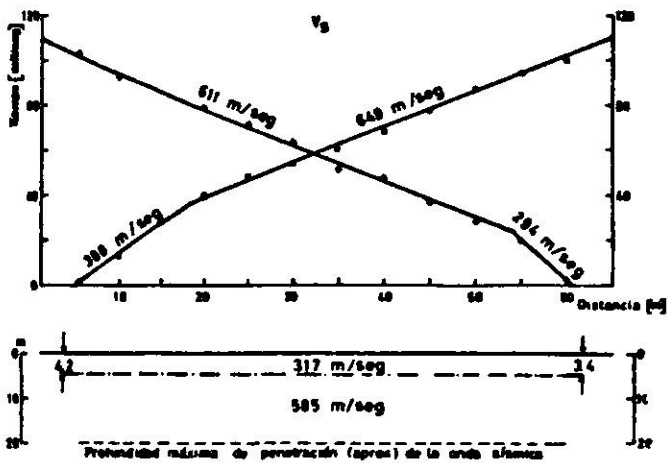


Fig. 15. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Departamental con Santa Rosa, 15-11-72.

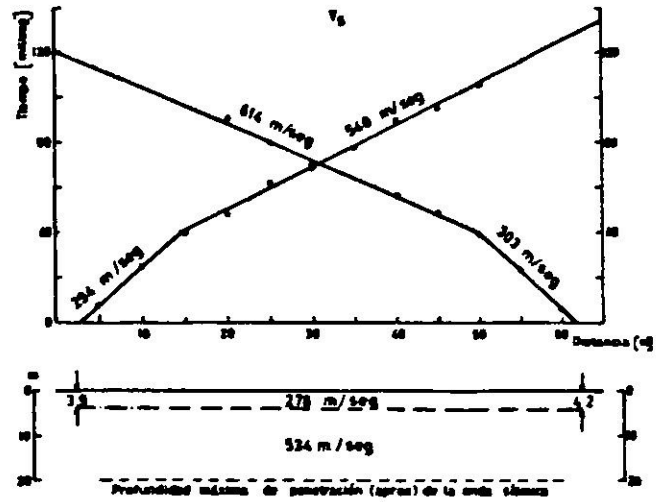


Fig. 16. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Colegio San Ignacio (Av. Bilbao), 13-12-72.

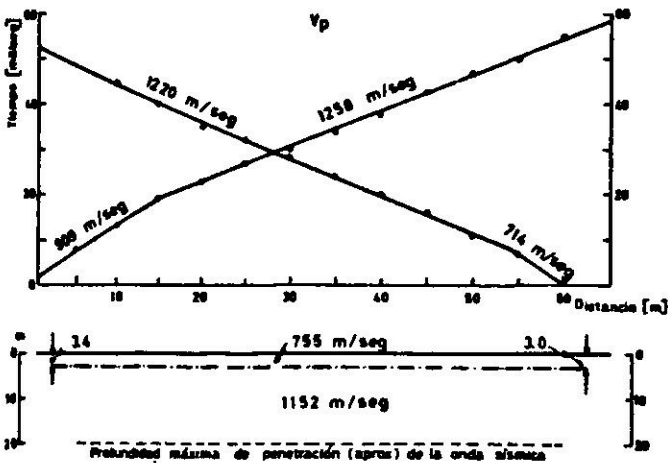


Fig. 17. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Seminario Pontificio, 30-11-72.

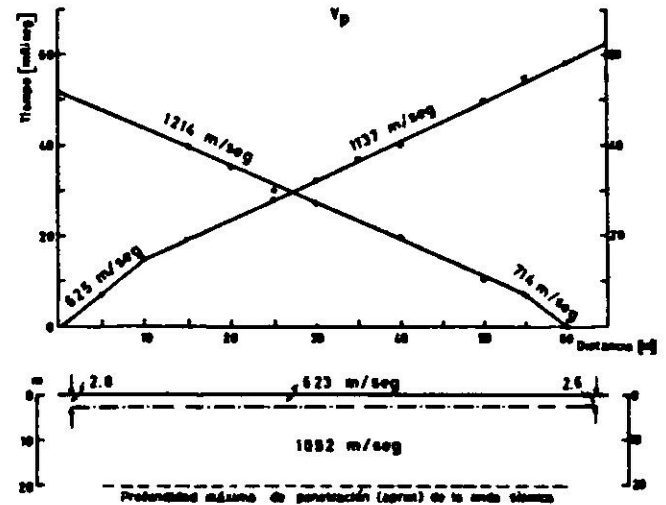
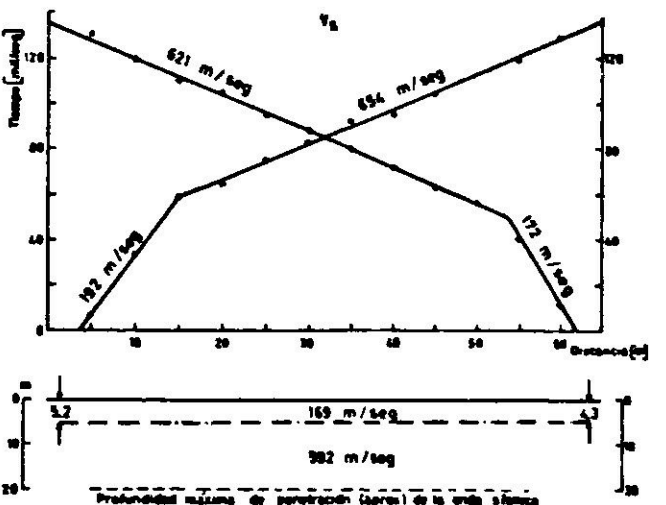
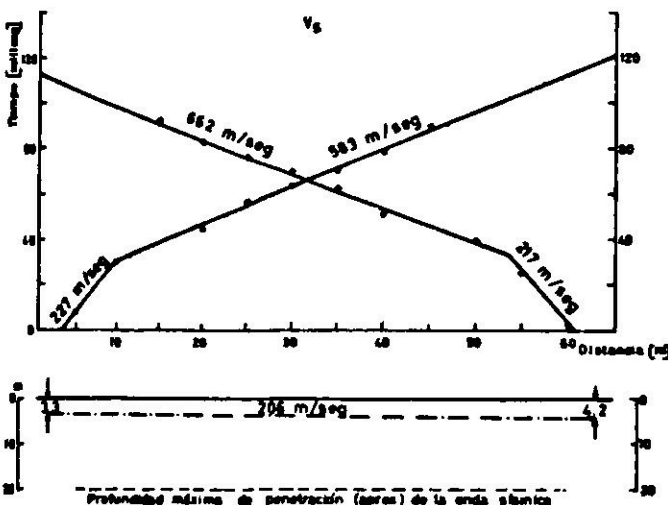


Fig. 18. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Población Chacón Zamora, 14-12-72.



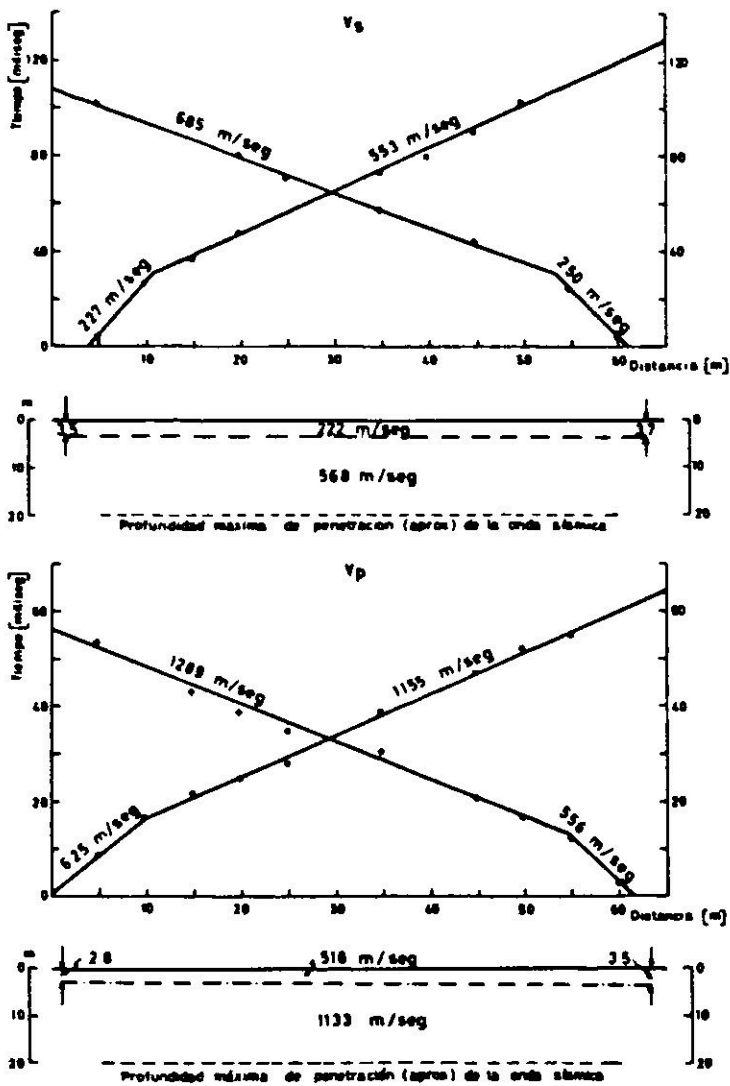


Fig. 19. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Club Hípico, 13-3-73.

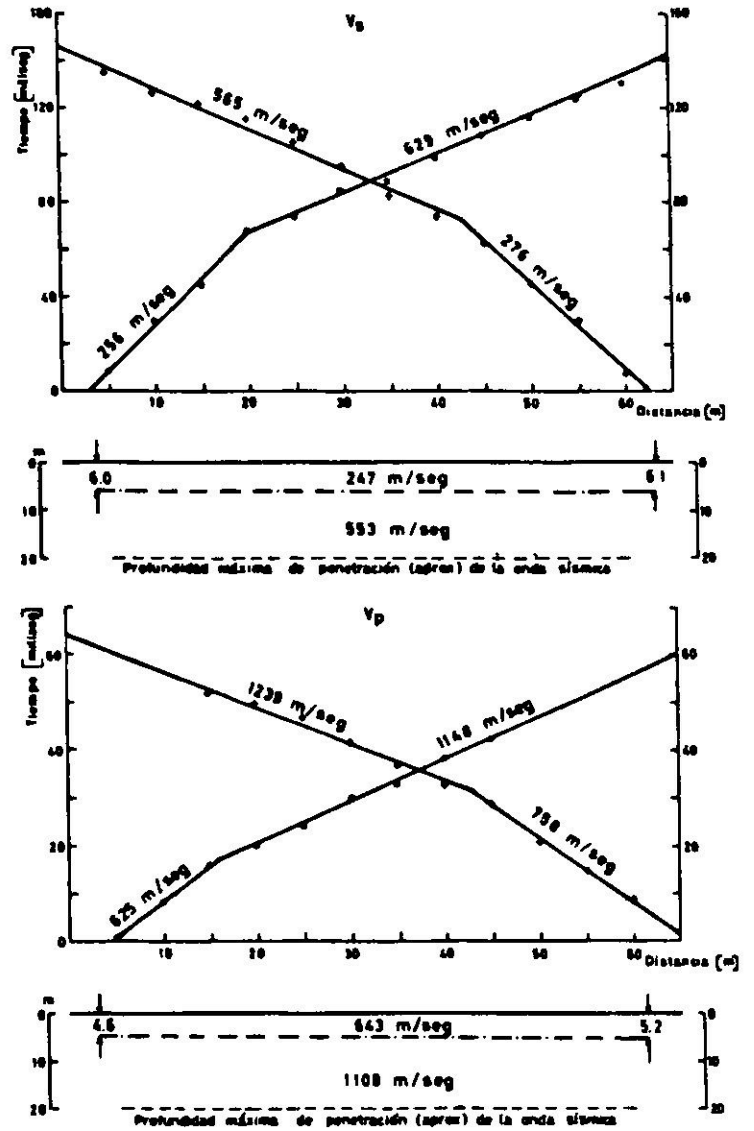


Fig. 20. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Quinta Normal, 18-7-72.

rango de valores de V_s en los suelos de Santiago, pues con anterioridad, sólo se hace mención a valores de V_p .

En los gráficos de profundidades aparecen tres tipos de líneas; cada una de ellas tiene su propia significación. La línea llena muestra la superficie del terreno, la línea de punto y raya muestra la interfaz de dos estratos y por último, la línea segmentada representa la profundidad máxima de penetración de la onda sísmica. La profundidad máxima de penetración depende de la longitud del tendido sísmico; en general es aproximadamente la tercera parte de la longitud del tendido sísmico. Los tendidos, en su mayoría, fueron de 60 metros y por ende, la máxima penetración de las ondas sísmicas fue de alrededor de 20 metros.

INTERPRETACION

Todos los resultados obtenidos, tanto por métodos de exploración indirecta, contenidos en las Figs. 3 a 20, como por determinaciones directas en pozos y sondajes, se presentan en la Tabla I.

En la tabla se identifican los lugares en donde se realizaron las experiencias en la primera columna; en la segunda aparecen los tipos de suelos encontrados en esos lugares según información directa de mecánica de suelos o deducciones de las observaciones geofísicas.

En las dos columnas siguientes se anotan las velocidades reales de las ondas

TABLA I
RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS OBSERVACIONES Y VALORES DE LOS MODULOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lugar	Tipo de suelo	V_p m/seg	V_s m/seg	ρ gr/cm ³	z m	e o/o	E kg/cm ²	ν	p_c kg/cm ²
1) TV Nacional	Arcilla	447	131	1,24*	5,8	1,17*	605	0,42	0,36
	Grava media	1413	684	2,31*	"18"	0,19*	29000	0,34	2,13
2) Carretera N-S Alameda/Riquelme	Grava media	1379	716	2,17*	"18"	-	29000	0,31	1,95
3) Blanco Encalada/ Beaucheff	Grava media	1165	628	2,31*	" 7"	0,19*	24000	0,30	0,81
4) Aeródromo Tobalaba	Arcilla	596	199	1,50	6,8	-	1700	0,44	0,51
	Grava media	1256	625	2,23	"20"	-	23000	0,34	2,49
5) Country Club	Grava media	1085	540	2,05*	"20"	0,30*	16000	0,34	2,05
6) Estadio Palestino	Arcilla	543	221	1,46*	4,3	0,85*	2000	0,40	0,32
	Grava gruesa	1146	622	2,15	"20"	-	21600	0,30	2,32
7) Club de Polo San Cristobal	Arcilla	556	212	1,85	3,6	-	2300	0,40	0,33
	Grava gruesa	1181	579	2,10	"20"	-	19000	0,34	2,39
8) Estadio Recoleta	Relleno art. (1)	503	155	1,50	5,0	-	1000	0,45	0,38
	Grava media	1145	612	2,15	"20"	-	21000	0,30	2,36
9) Hipódromo Chile	Relleno art. (2)	549	137	1,50	4,8	-	800	0,46	0,36
	Grava gruesa	996	476	2,23	"20"	-	13600	0,35	2,41
10) Estadio Chilectra	Relleno art. (3)	625	208	1,50	4,0	-	1600	0,44	0,30
	Grava gruesa	1149	584	2,08	"20"	-	16000	0,39	2,26
11) Parque La Feria	Relleno art. (4)	629	268	1,90	4,7	-	3700	0,39	0,45
	Grava media	1040	547	2,20	"20"	-	17000	0,31	2,58
12) Estadio Nacional	Relleno art. (4)	491	200	1,64*	4,2	-	1800	0,40	0,34
	Grava media	1245	602	2,20	"20"	-	25000	0,35	2,40
13) Club de Golf Los Leones	Relleno art. (5)	875	428	2,15	5,3	-	9500	0,37	0,57
	Grava media	1220	643	2,08*	"20"	0,30*	23000	0,34	2,67
14) Departamental/ Santa Rosa	Arcilla limosa	775	317	1,80	4,1	-	5000	0,40	0,37
	Grava media	1152	585	2,20	"20"	0,27*	20000	0,34	2,49
15) Colegio San Ignacio	Arcilla arenosa	623	278	2,15	4,1	-	4600	0,38	0,44
	Grava media	1092	534	2,18	"20"	-	17000	0,34	2,51
16) Seminario Pontificio	Arcilla	549	206	1,47*	3,8	0,79*	1800	0,42	0,26
	Grava gruesa	1199	577	2,18	"20"	-	19700	0,35	2,32
17) Población Chacón Zamora	Arcilla	405	169	1,70	4,8	-	1400	0,39	0,41
	Grava media	1235	592	2,10	"20"	-	20000	0,35	2,41
18) Club Hípico	Arcilla	518	222	1,70	3,6	-	2400	0,40	0,31
	Grava media	1133	568	2,15	"20"	-	19000	0,33	2,38
19) Quinta Normal	Arcilla	643	247	1,70	6,1	-	3000	0,41	0,52
	Grava media	1108	553	2,15	"20"	-	17700	0,33	3,14
20) Parque Residencial Apoquindo	Grava gruesa	800	385	2,00*	5,0	-	6940	0,38	0,50
	Grava gruesa	1400	670	2,10*	"15"	-	22000	0,35	1,11
21) La Portada de La Reina	Arcilla	500	218	1,58*	12,0	-	1800	0,38	0,95
	Grava media	1225	575	2,26*	"22"	-	17375	0,35	3,02
22) Parque Lo Aguirre	Bloques medios (fluvioglacial)	953	473	2,25*	"18"	0,24*	14000	0,33	2,03
23) Reactor Nuclear La Reina	Grava gruesa con bloques chí- cos (fluvioglacial)	1290	655	2,14*	"18"	0,24*	24400	0,30	1,93

(1) CL - GP y escombros

(2) SM - ML

(3) CL - GP

(4) CL

(5) GP, escombros, basuras

* valores obtenidos de Certificados de IDIEM

" " estos valores indican máxima penetración de la onda.

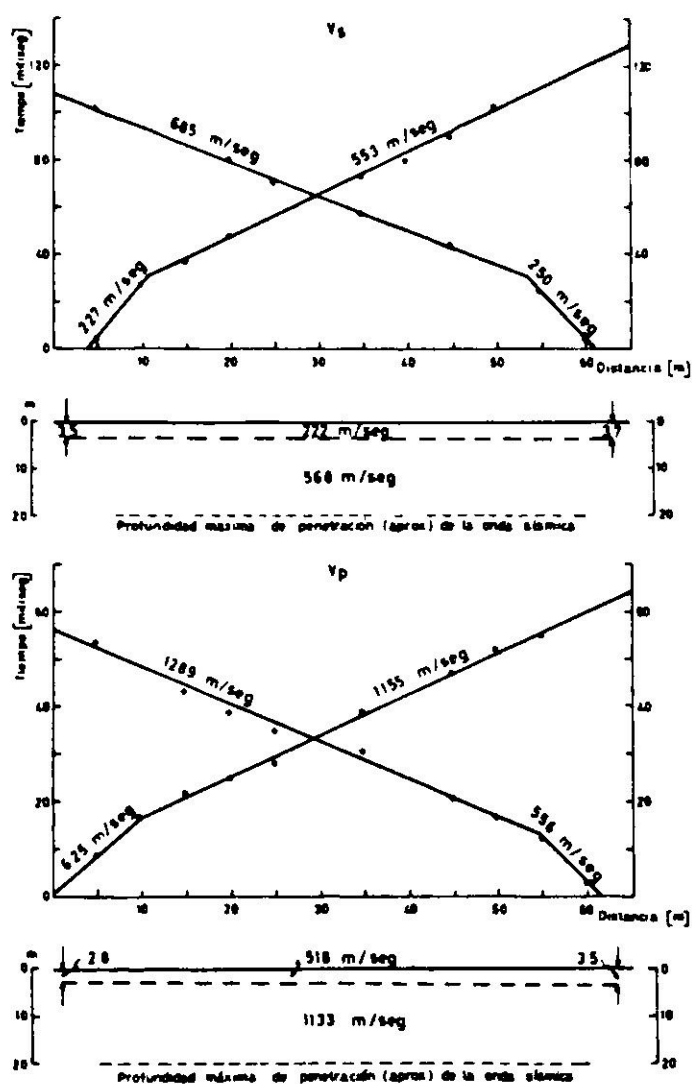


Fig. 19. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Club Hípico, 13-3-73.

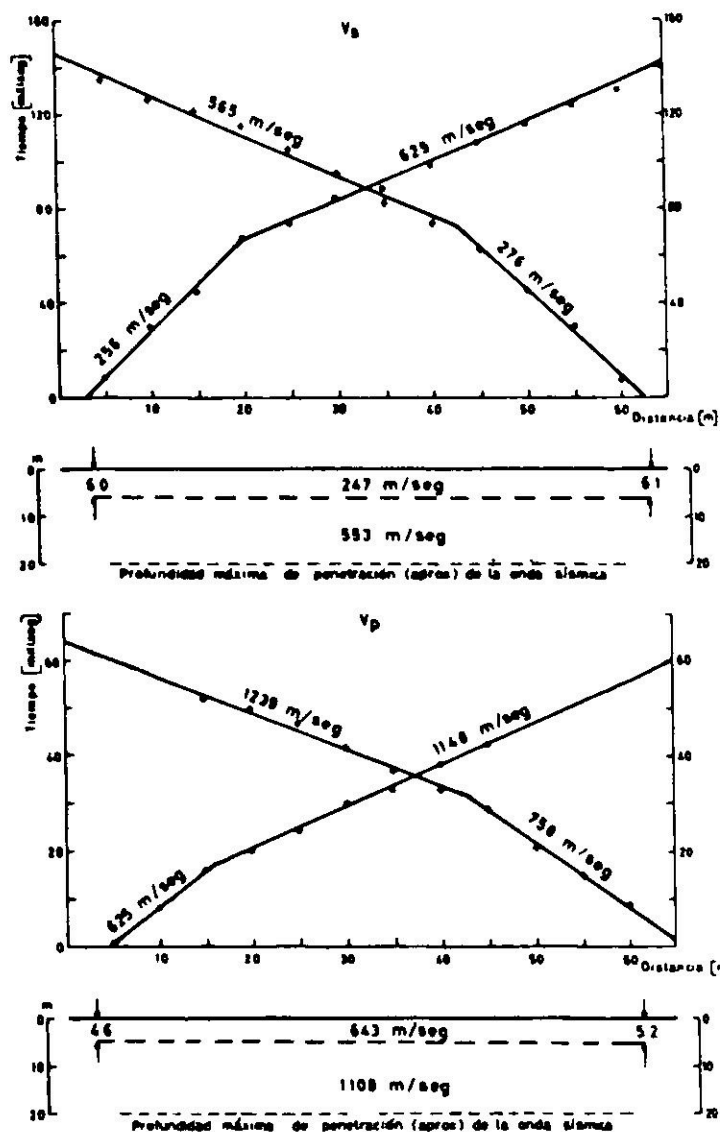


Fig. 20. Relación tiempo-distancia, ondas V_s y V_p . Quinta Normal, 18-7-72.

rango de valores de V_s , en los suelos de Santiago, pues con anterioridad, sólo se hace mención a valores de V_p .

En los gráficos de profundidades aparecen tres tipos de líneas; cada una de ellas tiene su propia significación. La línea llena muestra la superficie del terreno, la línea de punto y raya muestra la interfaz de dos estratos y por último, la línea segmentada representa la profundidad máxima de penetración de la onda sísmica. La profundidad máxima de penetración depende de la longitud del tendido sísmico; en general es aproximadamente la tercera parte de la longitud del tendido sísmico. Los tendidos, en su mayoría, fueron de 60 metros y por ende, la máxima penetración de las ondas sísmicas fue de alrededor de 20 metros.

INTERPRETACION

Todos los resultados obtenidos, tanto por métodos de exploración indirecta, contenidos en las Figs. 3 a 20, como por determinaciones directas en pozos y sondajes, se presentan en la Tabla I.

En la tabla se identifican los lugares en donde se realizaron las experiencias en la primera columna; en la segunda aparecen los tipos de suelos encontrados en esos lugares según información directa de mecánica de suelos o deducciones de las observaciones geofísicas.

En las dos columnas siguientes se anotan las velocidades reales de las ondas

TABLA I
RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS OBSERVACIONES Y VALORES DE LOS MODULOS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lugar	Tipo de suelo	V_p m/seg	V_s m/seg	ρ gr/cm ³	z m	e o/o	E kg/cm ²	ν	ρ_c kg/cm ²
1) TV Nacional	Arcilla	447	131	1,24*	5,8	1,17*	605	0,42	0,36
	Grava media	1413	684	2,31*	"18"	0,19*	29000	0,34	2,13
2) Carretera N-S Alameda/Riquelme	Grava media	1379	716	2,17*	"18"	-	29000	0,31	1,95
3) Blanco Encalada/ Beauchef	Grava media	1165	628	2,31*	"7"	0,19*	24000	0,30	0,81
4) Aeródromo Tobalaba	Arcilla	596	199	1,50	6,8	-	1700	0,44	0,51
	Grava media	1256	625	2,23	"20"	-	23000	0,34	2,49
5) Country Club	Grava media	1085	540	2,05*	"20"	0,30*	16000	0,34	2,05
6) Estadio Palestino	Arcilla	543	221	1,46*	4,3	0,85*	2000	0,40	0,32
	Grava gruesa	1146	622	2,15	"20"	-	21600	0,30	2,32
7) Club de Polo San Cristobal	Arcilla	556	212	1,85	1,6	-	2300	0,40	0,33
	Grava gruesa	1181	579	2,10	"20"	-	19000	0,34	2,39
8) Estadio Recoleta	Relleno art. (1)	503	155	1,50	5,0	-	1000	0,45	0,38
	Grava media	1145	612	2,15	"20"	-	21000	0,30	2,36
9) Hipódromo Chile	Relleno art. (2)	549	137	1,50	4,8	-	800	0,46	0,36
	Grava gruesa	996	476	2,23	"20"	-	13600	0,35	2,41
10) Estadio Chilectra	Relleno art. (3)	625	208	1,50	4,0	-	1600	0,44	0,30
	Grava gruesa	1149	584	2,08	"20"	-	16000	0,39	2,26
11) Parque La Feria	Relleno art. (4)	629	268	1,90	4,7	-	3700	0,39	0,45
	Grava media	1040	547	2,20	"20"	-	17000	0,31	2,58
12) Estadio Nacional	Relleno art. (4)	491	200	1,64*	4,2	-	1800	0,40	0,34
	Grava media	1245	602	2,20	"20"	-	25000	0,35	2,40
13) Club de Golf Los Leones	Relleno art. (5)	875	428	2,15	5,3	-	9500	0,37	0,57
	Grava media	1220	643	2,08*	"20"	0,30*	23000	0,34	2,67
14) Departamental/ Santa Rosa	Arcilla limosa	775	317	1,80	4,1	-	5000	0,40	0,37
	Grava media	1152	585	2,20	"20"	0,27*	20000	0,34	2,49
15) Colegio San Ignacio	Arcilla arenosa	623	278	2,15	4,1	-	4600	0,38	0,44
	Grava media	1092	534	2,18	"20"	-	17000	0,34	2,51
16) Seminario Pontificio	Arcilla	549	206	1,47*	3,8	0,79*	1800	0,42	0,26
	Grava gruesa	1199	577	2,18	"20"	-	19700	0,35	2,32
17) Población Chacón Zamora	Arcilla	405	169	1,70	4,8	-	1400	0,39	0,41
	Grava media	1235	592	2,10	"20"	-	20000	0,35	2,41
18) Club Hípico	Arcilla	518	222	1,70	3,6	-	2400	0,40	0,31
	Grava media	1133	568	2,15	"20"	-	19000	0,33	2,38
19) Quinta Normal	Arcilla	643	247	1,70	6,1	-	3000	0,41	0,52
	Grava media	1108	553	2,15	"20"	-	17700	0,33	3,14
20) Parque Residencial Apoquindo	Grava gruesa	800	385	2,00*	5,0	-	6940	0,38	0,50
	Grava gruesa	1400	670	2,10*	"15"	-	22000	0,35	1,11
21) La Portada de La Reina	Arcilla	500	218	1,58*	12,0	-	1800	0,38	0,95
	Grava media	1225	575	2,26*	"22"	-	17375	0,35	3,02
22) Parque Lo Aguirre	Bloques medios (fluvioglacial)	953	473	2,25*	"18"	0,24*	14000	0,33	2,03
23) Reactor Nuclear La Reina	Grava gruesa con bloques chi- cos (fluvioglacial)	1290	655	2,14*	"18"	0,24*	24400	0,30	1,93

(1) CL - GP y escombros

(2) SM - ML

(3) CL - GP

(4) CL

(5) GP, escombros, basuras

* valores obtenidos de Certificados de IDIEM

" " estos valores indican máxima penetración de la onda.

P y S , traspasadas de las Figs. 3 a 20.

La columna 5 da los pesos unitarios secos de las muestras de cada uno de los lugares. Los valores que aparecen con asterisco fueron obtenidos en certificados de ensayos de IDIEM; los otros son promedios de los tipos de suelos correspondientes. En algunas zonas con bolones las densidades in situ se determinaron en volúmenes de aproximadamente un metro cúbico.

En la columna 6 se indican los espesores de los estratos encontrados. Las cifras entre comillas corresponden a la máxima penetración aproximada de las ondas sísmicas de acuerdo a las longitudes de los tendidos.

La columna 7 contiene los índices de vacíos.

A partir de los resultados anteriores se dedujeron los módulos elásticos del suelo en cada localidad.

En la columna 8 se presentan los valores de E , módulo de elasticidad y la columna 9 los coeficientes de Poisson, ν . Estos y aquéllos se calcularon aplicando las fórmulas siguientes:

$$\nu = \frac{0,5 (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad E = \rho V_s^2 (1 + \nu)$$

En la columna 10 se anotan los valores de las presiones de confinamiento calculadas a partir de las densidades y profundidades promedios.

Cabe hacer el siguiente comentario en relación con la validez de las determinaciones estáticas de los módulos. Las gravas desde el punto de vista de su estructura, no presentan una dirección preferencial de orientación, cumpliendo una de las condiciones para que un material sea considerado isotrópico. Sin embargo, la presencia de bolones hace que los módulos determinados usando placas de carga sean dudosos, y por ello se ha llegado a la conclusión que es imprescindible determinarlos usando correlaciones sísmicas, obtenidas de sismogramas simultáneos usando geófonos de superficie y de pozo.

Una diferencia importante entre estos dos tipos de determinaciones es el rango de las deformaciones que experimenta cada uno de los ensayos. Para el caso estático, E_E , el rango de deformación varía entre 10^{-2} 0/o y 5 0/o. En ensayos cíclicos, E_c , el rango es de 10^{-3} 0/o a 1 0/o y para el caso dinámico, la deformación es de aproximadamente 5×10^{-4} 0/o.

Una importante influencia desempeña la presión de confinamiento al considerar E y ν , ya que se ha comprobado⁴ que a mayor presión de confinamiento mayor E y menor ν . Esta influencia se puede apreciar en la Tabla I para determinaciones a diferentes niveles efectuadas en Club Hípico y Beaucheff con Blanco Encalada.

Las Figs. 21 y 22 muestran la relación entre E y V_p y V_s para gravas. La Fig. 23 muestra la relación entre V_p y V_s con el índice de huecos, e . La Fig. 24 muestra la relación entre E y ν para un rango de V_p y ρ . Las líneas enteras muestran los datos experimentales y las punteadas la tendencia de cada curva.

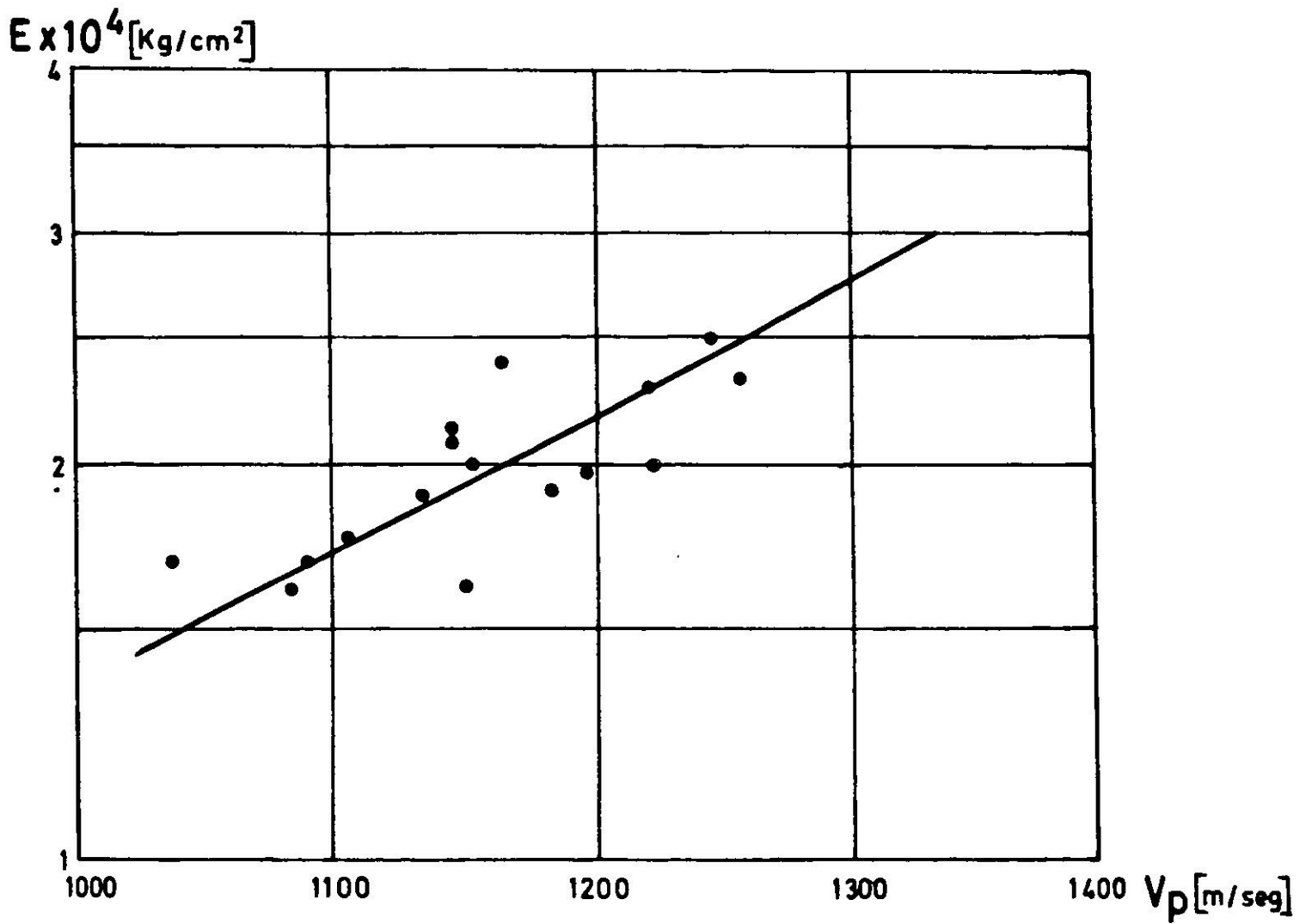


Fig. 21. Relación entre el módulo de elasticidad, E , y V_p .

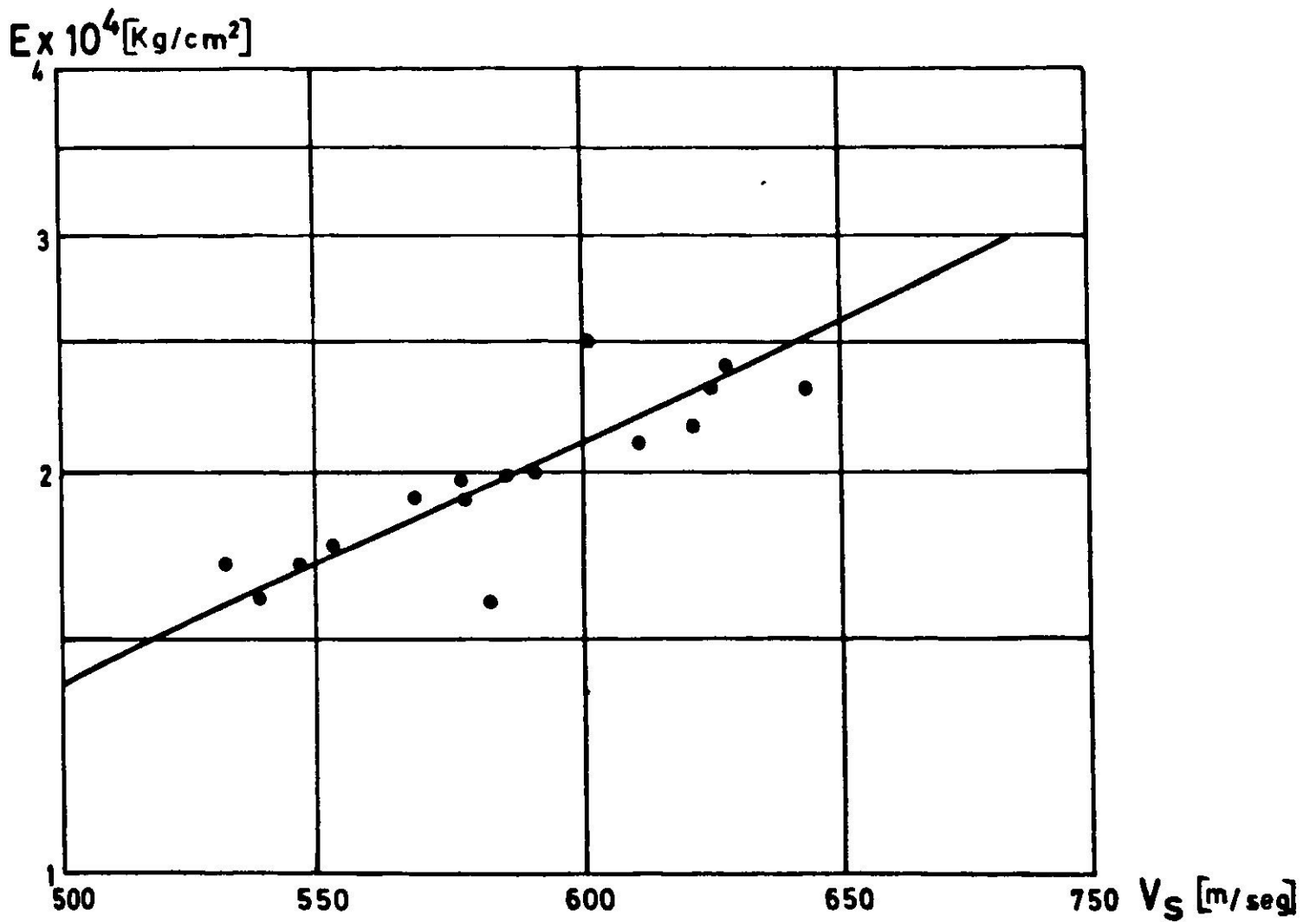


Fig. 22. Relación entre el módulo de elasticidad, E , y V_s .

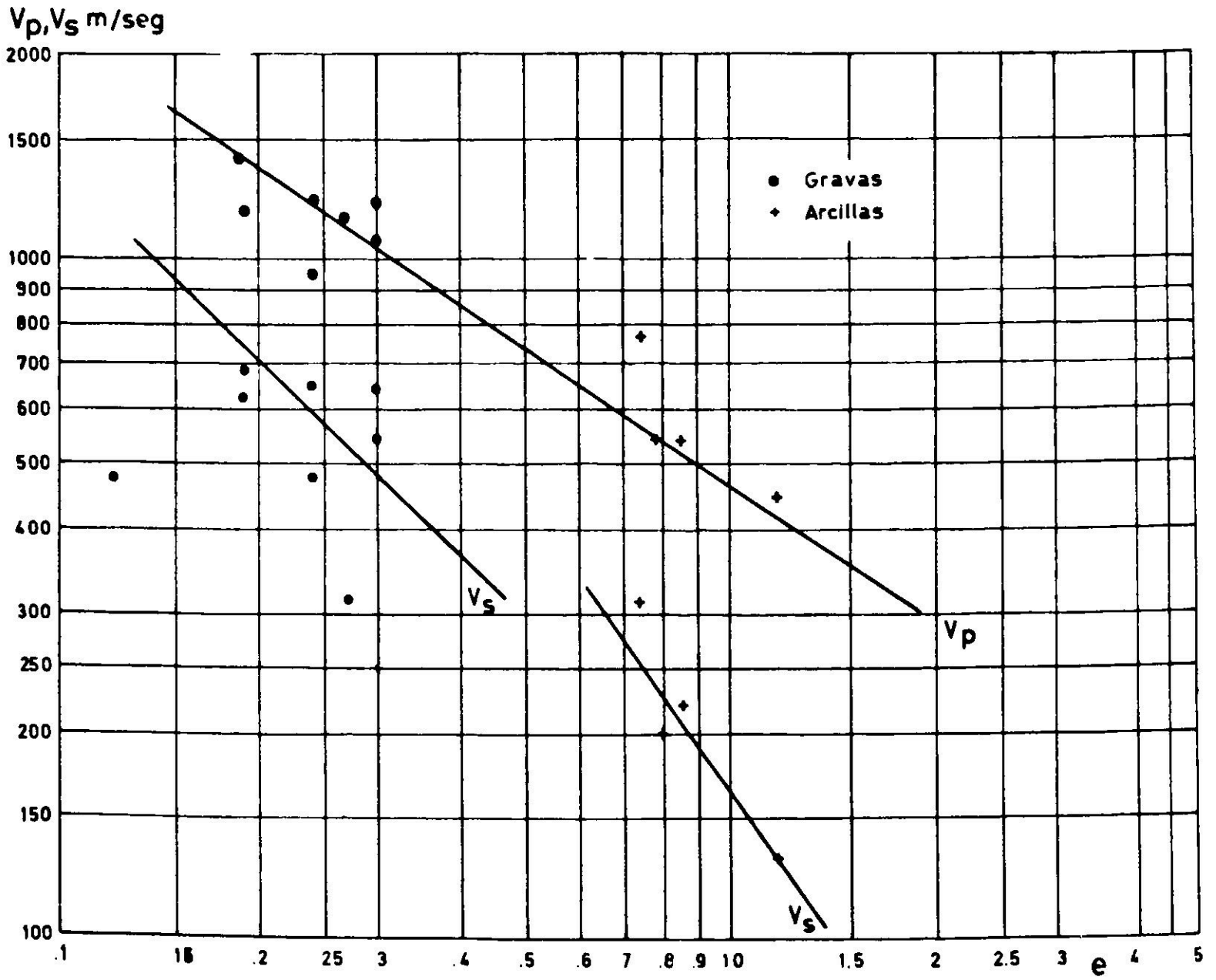


Fig. 23. Relación entre V_p y V_s y el índice de huecos, e .

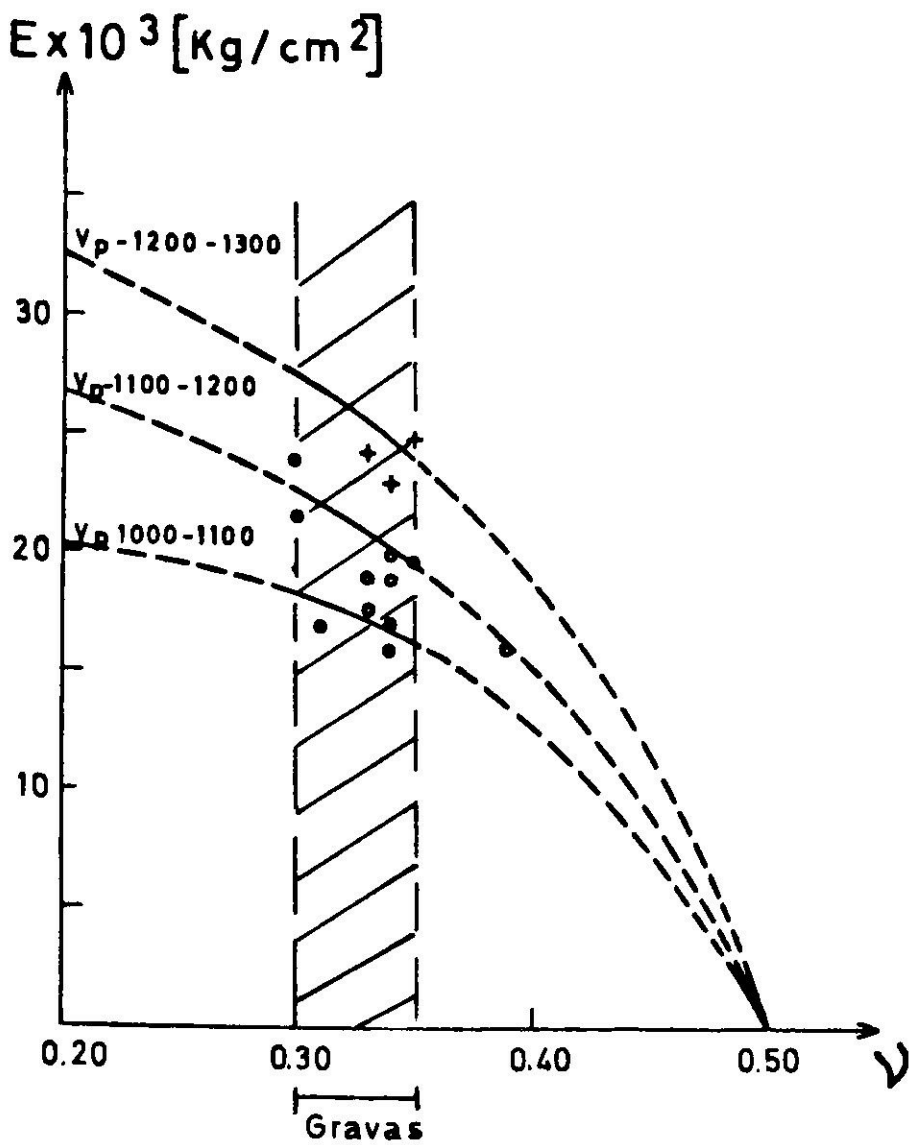


Fig. 24. Relación entre el módulo de elasticidad, E , y el coeficiente de Poisson, ν .

PROPIEDADES DE AMORTIGUAMIENTO DE LOS SUELOS

Las ondas sísmicas, al propagarse a través del suelo y rocas, sufren pérdidas de energía. Estas pérdidas se conocen como *amortiguamiento o atenuación*.

Este fenómeno se debe a que el suelo no es un medio perfectamente elástico, modificando con ella la relación esfuerzo-deformación, la que ya no es lineal. Además es común, tanto para las ondas de cuerpo como para las ondas superficiales. En ingeniería civil, el *amortiguamiento* de ondas transversales es el más importante, ya que en las aplicaciones -amplificación de temblores e interacción suelo-estructura- parte importante de la energía es transportada por las ondas transversales.

Lo anterior muestra la necesidad de estudiar el mecanismo físico involucrado y la manera de modificar las ecuaciones y soluciones para la propagación de ondas, para que se refleje en ellas que el suelo no es un medio perfectamente elástico.

Los primeros estudios teóricos y experimentales de propagación de ondas a través del suelo fueron realizados por Bornitz⁵, Barkan⁶ y otros, llegando a la conclusión de que en medios no perfectamente elásticos, además de la teoría de propagación de ondas hay que considerar la *absorción* parcial de la energía, dependiendo ésta del tipo de onda (de cuerpo o superficial) y de las propiedades del material, que, puesto que se trata de un suelo, está constituido por tres fases, sólida, líquida y gaseosa, las cuales se comportan de manera distinta en lo que a amortiguamiento se refiere.

No nos referiremos a los mecanismos que intervienen en las fases gaseosa y líquida.

Para la fase sólida -granos de suelo- existen varias teorías y la forma de la función de amortiguamiento, $a(\omega)$, cambia con la naturaleza de los sólidos. En algunos sólidos, los efectos viscosos parecen ser importantes, muy pocos de ellos se tratan como viscosidad lineal simple (como ocurre con la fase gaseosa y líquida).

La *absorción* de la energía por el suelo o *amortiguamiento* se presenta como una combinación de *amortiguamiento interno* y *amortiguamiento geométrico*, que es la disipación de la amplitud.

En el *amortiguamiento geométrico*, la amplitud de la onda disminuye al aumentar el frente de onda (distancia desde la fuente de onda), o sea, al disminuir la densidad de energía.

Se aceptará la hipótesis de que el amortiguamiento geométrico para las ondas de cuerpo es función inversa de la distancia desde la fuente, es decir,

$$A_r = A_o \frac{r_o}{r} \quad (1)$$

siendo A_r, A_o = amplitud de la vibración del suelo a la distancia r, r_o .

Pero como el suelo no es un material perfectamente elástico, hay que considerar el amortiguamiento interno. El efecto de este tipo de amortiguamiento

puede ser incluido en la misma expresión anterior, afectándola de un factor exponencial:

$$A_r = A_0 \frac{r_0}{r} e^{-a(r-r_0)} \quad (2)$$

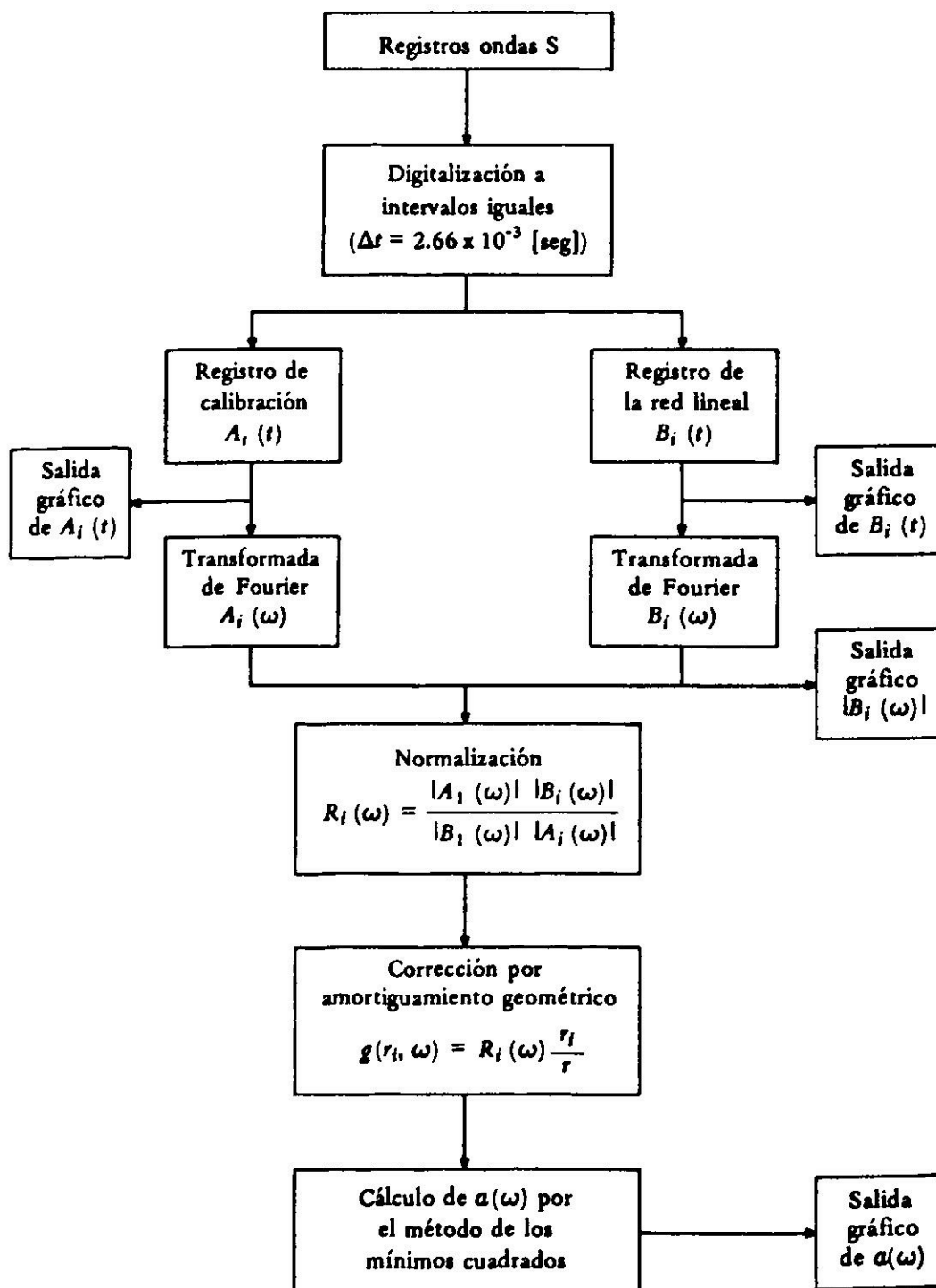
siendo a = factor de atenuación (metros⁻¹, centímetros⁻¹).

Este a depende de las propiedades del material, del tipo de onda y de la frecuencia. La forma de la función $a(\omega)$ está directamente relacionada al mecanismo físico responsable de la disipación de energía.

En suelos no saturados y rocas, el mecanismo de pérdida de la energía más importante parece ser la *fricción interna*, o tipo *histerético*, que tiene una relación de equivalencia aproximada⁷ de $a \approx \omega$.

La determinación de $a(\omega)$ se obtuvo analizando y calibrando los registros de ondas S. El diagrama de flujo del programa utilizado en el análisis es el mostrado en la Tabla II. La digitalización de los registros se realizó a intervalos de tiempos

TABLA II
DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR $a(\omega)$



iguales $\Delta t = 2.66 \times 10^{-3}$ s, usando una digitalizadora-perforadora tipo Benson France Modelo 5075.

Para obtener la relación a versus ω se consideró el rango de frecuencias comprendido entre 200 rad/s y 500 rad/s, y se obtuvo para este rango un valor promedio de $1.00 \times 10^{-4} \omega$.

Considerando que en ingeniería se usa la razón de amortiguamiento, D , en el estudio de vibraciones de un grado de libertad, es posible ajustar rectas a la relación a versus ω , determinándose así los valores de D (o/o) usando la relación:

$$D = \frac{a}{\omega} V_s$$

donde: a = factor atenuación

ω = frecuencia angular

V_s = velocidad de las ondas de corte, S.

CONCLUSIONES

De las experiencias y resultados presentados y considerando que el método de refracción sísmica en superficie es válido para lugares en donde haya un estrato de referencia de alta velocidad recubierto por formaciones de baja velocidad, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Los espesores de los estratos de suelos calculados a partir de las velocidades de las ondas longitudinales son menores que los calculados a partir de las velocidades de las ondas transversales.
2. Las ondas S son más lentas que las ondas P, teniendo una longitud de onda más corta; lo que da mayor precisión a los perfiles del subsuelo determinados a partir de ellas.
3. La velocidad longitudinal y transversal disminuye al aumentar el índice de huecos. La velocidad transversal disminuye más rápidamente al aumentar el índice de huecos, que la longitudinal.
4. Los valores característicos de los parámetros determinados tienen los siguientes rangos promedios hasta la profundidad de 10 metros:
 - Módulo de elasticidad.* Este módulo fluctúa entre $E = 15 \times 10^3$ kgf/cm² y $E = 30 \times 10^3$ kgf/cm².
 - Coefficiente de Poisson.* Su valor está comprendido entre 0.30 y 0.35.
 - Velocidad de las ondas longitudinales.* Las ondas longitudinales tienen velocidades que van desde 900 m/s a 1500 m/s.
 - Velocidad de las ondas transversales.* Estas ondas tienen velocidades comprendidas entre 300 m/s y 750 m/s.
5. Hay una relación entre el factor de amortiguamiento a y la frecuencia ω que se puede expresar en forma lineal por la relación:
 - $a = 1.00 \times 10^{-4} \cdot \omega$.

REFERENCIAS

1. KUESSEL, T.R. Earthquake design criteria for subways, *J.S.D., ASCE*, vol. 95, ST6, (1969), pp. 1213-1255.
2. ORTIGOSA, P. et al. *Informe de mecánica de suelos del Metropolitano de Santiago, n° 1 y 5*, IDIEM, U. de Chile, 1972.
3. FALCON, E. et al. *Hidrología de la cuenca de Santiago*. Publicación especial n° 3 del Instituto de Investigaciones Geológicas, 1970. Santiago.
4. SEED, H.B. y IDRIS, I.M. *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*, Report N° EE.RC 70-10, U. California, 1970.
5. BORNITZ, G. *Über die Ausbreitung der von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe*, 1931. Berlín, Alemania.
6. BARKAN, D.D. *Dynamics of bases and foundations*. Mc Graw Hill Inc. 1948.
7. STOKOE, K.H. y WOODS, R.D. In situ shear wave velocity by Cross-Hole method, *J.S.M.F., ASCE* vol. 98, n° SM5, 1972, pp. 443-460.

LISTA BIBLIOGRAFICA

1. KARZULOVIC, J. *Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago*. Publicación N° 10 del Instituto de Geología, 1958, U. de Chile. Santiago.
2. KITZUNEZAKI, C. *Field-experimental study of shear waves and the related problems*. Contributions of the Geophysical Institute, Kyoto University, N° 11 (1971), pp. 103-177.
3. SWAIN, R.J. Recent techniques for determination of in situ elastic properties and measurement of motion amplification in layered media, *Geophysics*, vol. 27, n° 2, (1962), pp. 237-241.
4. STOKES, K.H. y WOODS, R.D. In situ shear wave velocity by Cross-Hole method. *J.S.M.F., ASCE*, vol. 98, n° SM5, (1972), pp. 443-460.
5. KUDO, K. y SHIMA, E. Attenuation of shear wave in soil. *Bull. Earthquake Res. Inst.* Tokyo University, vol. 98, (1969), pp. 145-158.
6. KAWASUMI, H.; SHIMA, E. et al. S waves velocities of subsoil layers in Tokyo. *Bull. Earthquake Res. Inst.* Tokyo University (1969).
7. SHIMA, E. y YANAGISAWA, M. Experimental study on generation and propagation of S-waves: IV. S-wave prospecting by means of well shooting. *Bull. Earthquake Inst.*, Tokyo University, vol. 46, (1968), pp. 517-528.
8. SILVER, M.L. y SEED, H.B. Deformation characteristics of sands under cyclic loading, *J.S.M.F., ASCE*, vol. 97, n° SM8, (1971), pp. 1081-1098.
9. BROWN, P.D. y ROBERTSHAW, J.P. The in situ measurement of Young's modulus for rock by a dynamic method. *Geotechnique*, vol. III, (1952-1953), pp. 283-286.
10. DOBRY, R. *Damping in soils: its hysteretic nature and the linear approximation*, Soils Publication N° 253, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts. 1970.

DYNAMIC PROPERTIES OF SANTIAGO GRAVELS

SUMMARY:

Making use of informations coming from the fields of Geology, Geophysics, Soil Dynamics and Soil Mechanics, the Young modulus, E, the Poisson coefficient, ν , damping factors $\alpha(\omega)$, and stratigraphy of gravel deposits from Santiago urban zone were determined. The velocity of compressional waves, P, that of the shear waves, S, as well as the soil density were actually measured on 21 places on the field.