

**PRIMEROS ENSAYOS DE PROPAGACION DE ONDAS
EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

**Dr. J.O.Agnusdei (LEMIT)
Ing.M.Brück (DVBA)**

Serie II, nº 154

INTRODUCCION

La técnica de ensayo de pavimentos mediante la propagación de ondas de superficie, desarrollada por el Road Research Laboratory de Inglaterra, permite en una forma no destructiva e "in situ", la determinación de características de calidad de las distintas capas que componen la estructura del pavimento en ensayo.

Iniciada por el Dr. R. Jones (1) en 1954, la técnica fue rápidamente adoptada en Holanda y Francia. Una recopilación de todo lo realizado por los grupos de trabajo francés e inglés se encuentra detallado en una publicación especial del Bulletin de Liaison del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2).

Los resultados obtenidos con los ensayos tienen aplicación en el campo del diseño de pavimentos, dado que es posible el cálculo de los módulos de elasticidad dinámicos de las diversas capas que componen la estructura; en la etapa constructiva, dado que permite efectuar el control de calidad de capas cementadas y por último en el campo de investigación ya que permite estudiar el comportamiento de los pavimentos en servicio frente a la acción del clima y el tránsito.

En nuestro país se encuentran antecedentes sobre la técnica aquí presentada en varios trabajos (3) (4) (5) a los cuales se remite a los efectos de ampliar lo aquí expuesto.

En la actualidad aparte de los países mencionados, han adoptado este método Laboratorios y reparticiones viales de Australia, Checoslovaquia, Dinamarca, Sud Africa y Nueva Zelanda (6).

Los propósitos de la presente comunicación son los de informar sobre las características y puesta en marcha

del equipo, presentar los primeros resultados de ensayos obtenidos con el mismo y por último los trabajos inmediatos que deberán encararse a los efectos de obtener un máximo aprovechamiento de esta técnica.

INSTRUMENTAL UTILIZADO

Básicamente la técnica empleada consiste en generar vibraciones en el medio en estudio y medir la longitud de onda de las vibraciones propagadas.

Las vibraciones de la frecuencia deseada, la que puede variarse a voluntad, son producidas por un vibrador electrodinámico, el que se alimenta por medio de un oscilador a través de un amplificador de potencia. Las vibraciones mecánicas generadas se transmiten a través del camino y son detectadas en la superficie por medio de un captor (pick-up). Las vibraciones recogidas son amplificadas mediante un amplificador selectivo, el cual tiene por función amplificar solamente las señales de igual frecuencia a las emitidas por el vibrador. La señal así obtenida es enviada a un canal de un osciloscopio de dos canales. Al segundo canal, se envía la señal que alimenta al vibrador permitiendo de esta manera determinar la diferencia de fase entre ambas señales.

En sí, el equipo consiste en una fuente de emisión y un sistema de detección de las ondas emitidas. A las altas frecuencias las ondas se propagan en las capas superiores de la estructura, mientras que a frecuencias bajas la propagación se realiza en las capas inferiores y subrasante.

En la fig. 1 se presenta un esquema de las distintas partes componentes del equipo.

El conjunto de elementos con que se dispone en la actualidad, permite realizar mediciones hasta una frecuencia de 5 000 cps. aproximadamente, si bien es posible aumentar este rango por medio de transductores cerámicos.

El sistema de propagación y detección es similar al

empleado en el Road Research Laboratory de Inglaterra y en el Laboratorio Central des Ponts et Chaussées de Francia (2).

Las distintas partes del equipo no difieren en esencia, aunque sí en lo que se refiere a precisión y potencia.

Durante las mediciones efectuadas en campaña, los distintos instrumentos que componen el sistema de propagación de ondas, fueron dispuestos sobre una mesa en forma provisoria ya que en un futuro se los dispondrá en un vehículo. La corriente necesaria para el funcionamiento de los instrumentos se realiza por medio de un grupo electrógeno de 1 800 watts.

A continuación se detallan las distintas partes del actual sistema de propagación de ondas.

Oscilador de audio frecuencia y amplificador de potencia General Radio, tipo 1308 A.

Es una fuente de potencia de corriente alterna cuya frecuencia puede variarse en la gama de las frecuencias acústicas. Su elevada potencia de salida lo hace muy útil para alimentar vibradores. Este instrumento consiste en un oscilador tipo puente de Wien de frecuencia variable y un amplificador de potencia de baja distorsión. El rango de frecuencia con que puede operar, va de 20 cps a 20 000 cps con una potencia de salida de 200 VA, lo que permite tener una intensidad máxima de 5 A o una tensión de 400 V. La intensidad y tensión se ajusta durante las medidas de modo de no sobrecargar los valores admisibles por el vibrador.

El instrumento está previsto para trabajar entre 0°C y 40°C, con una precisión de frecuencia de $\pm 3 \%$.

Amplificador selectivo, General Radio tipo 1232 A.

Es un amplificador de bajo ruido, continuamente sintonizable desde 20 cps a 20 000 cps; mediante este aparato es posible eliminar señales parásitas de frecuencia distintas a la emitida por el vibrador, tales como las producidas por motores, vehículos en movimiento, etc.

El instrumento es totalmente transistorizado y se alimenta con nueve baterías de mercurio de pequeño tamaño. La tensión de salida es de 1 volt.

Generador de vibraciones Goodman, tipo V 50 MK1, fabricado por Ling Electronics de EE. UU.

El principio de funcionamiento se basa en la acción recíproca entre un campo magnético y una corriente alterna que pasa a través de una bobina. La bobina se encuentra solidaria a un eje que actúa dentro del campo magnético. En tales circunstancias se genera una fuerza que es proporcional al producto de la corriente instantánea por la densidad de flujo magnético. La corriente que atraviesa la bobina es la corriente amplificada proveniente del oscilador. La frecuencia y amplitud de la bobina móvil es controlada por la frecuencia y amplitud del oscilador, siendo por lo tanto proporcional a ésta.

Al eje del vibrador se encuentra unido rigidamente un plato de aluminio de 9,5 cm de diámetro sobre el cual reposa la masa principal del vibrador por intermedio de hojas elásticas de acero.

Para evitar el calentamiento del vibrador se hace necesario adosarle un ventilador para refrigerarlo.

La frecuencia de trabajo del vibrador Goodman llega hasta 6 000 cps en algunos casos muy especiales puede llegar hasta 10 000 cps pero las medidas obtenidas a partir de los 6 000 cps son deficientes.

Osciloscopio Tektronix tipo 561 A.

Esencialmente es una unidad indicadora, provista de un tubo de rayos catódicos, una unidad base de tiempo modelo 2 B 67 y un amplificador de desviación vertical modelo 3 A 72 de doble haz.

La señal de alimentación del vibrador es enviada a uno de los canales del osciloscopio, mientras que la señal

ESQUEMA DEL INSTRUMENTAL UTILIZADO

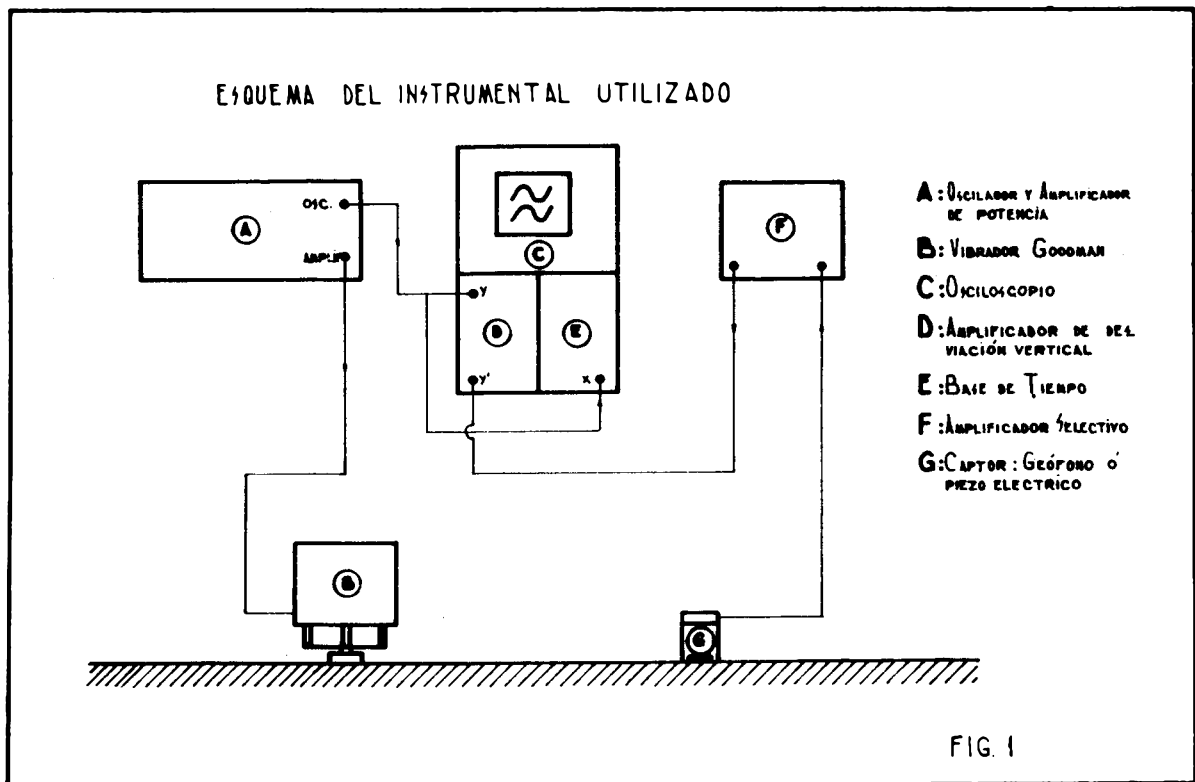


FIG. 1

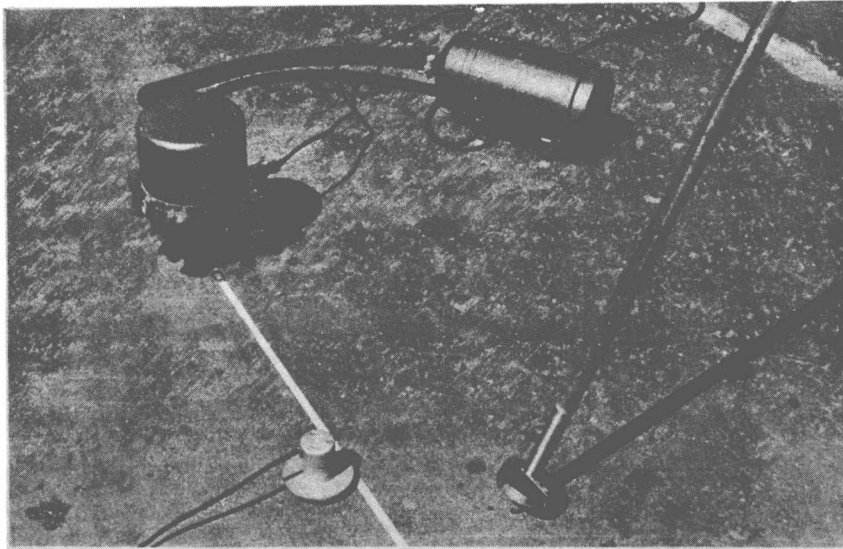


Fig. 2

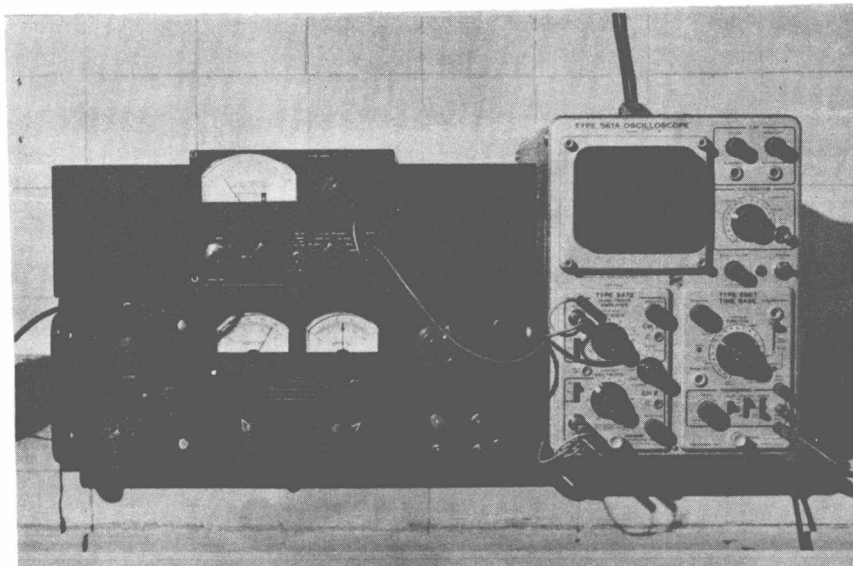


Fig. 3

proveniente del captor, convenientemente amplificada mediante el amplificador selectivo, se envía al segundo canal. De esta manera es posible comparar la diferencia de fase entre ambas señales en la pantalla del osciloscopio.

Captores

Geófono, Hall Sears, tipo HS1: Básicamente consiste en una bobina que se desplaza en el interior de un imán. El desplazamiento de la bobina producido por las vibraciones de la estructura, genera una tensión proporcional a la velocidad de desplazamiento de la bobina. Mediante este captor es posible trabajar hasta 300 cps, siendo la frecuencia de resonancia de 7,5 cps.

Acelerómetro piezo eléctrico: ACOS I.D 1005: El principio de este captor se basa en que al ponerse en contacto con un cuerpo vibrante, reproduce el movimiento en términos de un voltaje, proporcional a la aceleración. La gran sensibilidad que posee se alcanza mediante la utilización de un elemento piezoeléctrico grande constituido por sal de Rochelle. El rango de frecuencia en que se emplea va de 300 cps a 5 000 cps. La frecuencia propia de resonancia es de 2 500 cps.

Acelerómetro piezo eléctrico General Radio: Las características de este captor son similares al citado anteriormente pero con una frecuencia de resonancia de 3 200 cps.

Grupo electrógeno Wincolux, modelo L K 2 R

Este equipo suministra corriente a los distintos elementos que componen la cadena de generación y detección de ondas. Consta de un motor de combustión interna y un generador eléctrico autoexcitado, directamente acoplado al motor. El grupo se arranca ya sea manual o eléctricamente mediante una batería de 12 V. La potencia que suministra es de 1 800-2 000 Watts.

El equipo está montado en un bastidor de acero tubular para facilitar el transporte entre diferentes lugares de funcionamiento.

En las figuras 2 y 3 se pueden observar las distintas partes componentes del equipo.

INCONVENIENTES PRESENTADOS DURANTE LA PUESTA EN MARCHA

Al instalarse el equipo se notaron señales parásitas que hacían difícil la medición del desfase entre las señales observadas en la pantalla del osciloscopio. Estas se debían al empleo de cables con blindaje inadecuado y a los conectores utilizados, principalmente en la interconexión del captor con el amplificador selectivo.

Para resolver este problema se cambiaron los cables por otros de tipo coaxial, caracterizados por tener una malla externa de blindaje mucho más cerrada que las anteriormente empleadas.

Al mismo tiempo se eliminaron los conectores, haciendo la interconexión en forma directa, con excepción de la entrada al amplificador selectivo.

Otro problema que se presenta y dificulta las mediciones a frecuencias superiores a 1 500 cps es el sonido emitido por el vibrador. Este se propaga a través del aire y es captado por el pick-up, produciendo una señal que interfiere con las vibraciones captadas a través del pavimento. Este problema no se encuentra totalmente resuelto pero se espera atenuarlo cambiando los resortes sobre los que apoya la masa del vibrador o bien aislándolo acústicamente con una caja protectora.

TECNICA OPERATIVA

La técnica de ensayo mediante propagación de ondas consiste básicamente tal como se adelantara, en la aplica-

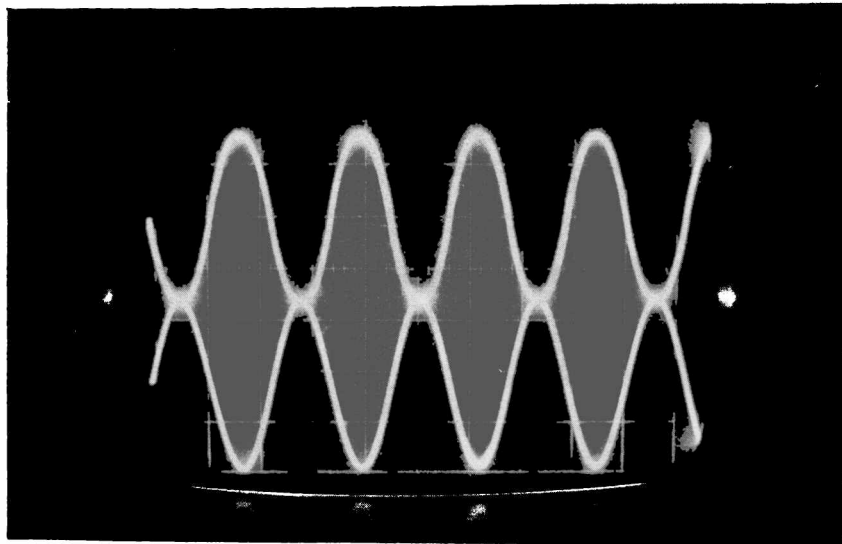


Fig. 4

ción al pavimento, a ensayar de una fuente de emisión de ondas, éstas últimas se propagan en las distintas capas de la estructura y la tarea experimental estriba fundamentalmente en la medición de la longitud de onda, λ , de las ondas detectadas con el instrumental ya mencionado.

Obtenida la longitud de onda, λ , es posible calcular la velocidad de propagación de las ondas detectadas efectuando el producto:

$$c = f \cdot \lambda$$

donde:

c: velocidad de fase del tren de ondas detectado

f: frecuencia de ensayo

λ : longitud de onda medida

En los ensayos realizados en la Provincia de Buenos Aires la técnica adoptada para la determinación de la longitud de onda, λ , consistió en desplazar el pick-up a lo largo de una línea paralela al eje longitudinal del camino y ubicada aproximadamente en el lugar de aplicación de la rueda externa del tránsito. Esta línea de medición se materializó mediante una cinta métrica (fig. 2) el pick-up se fue desplazando hasta encontrar un punto que se encuentre vibrando en igualdad de fase con la onda generada por el oscilador (onda ésta que luego de ser amplificada es transmitida al pavimento por medio del vibrador). Hallado este punto se determina su posición mediante una primera lectura L_1 en la cinta métrica a lo largo de la cual se va desplazando el pick-up. Acto seguido se continúa moviendo el detector hasta encontrar un segundo punto, consecutivo del anterior, que se encuentre vibrando en oposición a la onda generada por el oscilador (fig. 4); hallado este segundo punto se determina su posición mediante una segunda lectura, L_2 en la cinta métrica.

En estas condiciones sería ya posible el cálculo de la longitud de onda, λ buscada, dado que la diferencia entre estas dos lecturas no es otra cosa que una semilongitud de onda:

$$L_2 - L_1 = \frac{1}{2} \cdot \lambda$$

A fin de llevar a un mínimo los errores experimentales, como así también el obtener una longitud de onda promedio de un tramo de camino, se continúa desplazando el pick-up a lo largo de la línea de medida y se van determinando así sucesivos puntos del pavimento que se encuentran vibrando en fase y oposición con la onda generada.

Estas determinaciones se representan gráficamente mediante el auxilio de un par de ejes coordenados, tomando en el eje de las abcisas las sucesivas distancias medidas a lo largo de la cinta métrica y en el eje de las ordenadas, el número de semi-longitudes de onda comprendido entre las correspondientes lecturas de cinta métrica realizada (fig.5). Al primer punto, correspondiente a la lectura L_1 se le asigna una ordenada arbitraria, y las ordenadas de los puntos siguientes estarán desplazadas, consecutivamente, un segmento constante correspondiente al intervalo entre dos lecturas sucesivas y proporcional a una semi-longitud de onda.

Los puntos experimentales así representados deberán estar teóricamente alineados según una recta; las imprecisiones de la técnica experimental, la falta de homogeneidad del material que actúa como medio de propagación, etc. hacen que en la práctica, como es lógico suponer, se encuentre una normal dispersión de los puntos hallados experimentalmente. A los efectos de hallar la longitud de onda promedio del tramo de camino en ensayo se aproximan entonces gráficamente los puntos representados mediante una recta, de modo tal de hacer mínima su dispersión experimental.

Hallada esta recta, la inversa de su pendiente no es otra cosa que la longitud de onda promedio, λ buscada.

La operación hasta aquí descripta es repetida con cada frecuencia de ensayo y al ensayar una sección con distintas frecuencias se tendrá entonces un conjunto de pares de valores de longitud de onda, λ y velocidad de fase, C .

Representando mediante un par de ejes coordenados λ , c , con este conjunto de valores, se tendrá la denominada "curva de dispersión" del tramo ensayado.

La correcta interpretación de esta curva, en base a la teoría de la propagación de ondas en medios elásticos, permite determinar características de calidad de los mate-

riales ensayados. Ejemplos de interpretación se verán a continuación, en base a determinaciones experimentales realizadas sobre un pavimento flexible y sobre una capa de suelo seleccionado.

DETERMINACIONES EXPERIMENTALES

Ensayo sobre pavimento flexible (Acceso a frigoríficos de Berisso).

La estructura del pavimento ensayado se encuentra indicada en el cuadro 1.

La curva de dispersión hallada mediante el ensayo se encuentra en la figura 6, determinada por los sucesivos puntos experimentales. En este gráfico se pueden observar, en forma general, dos zonas bien diferenciadas entre sí, la primera, correspondiente a cortas longitudes de onda (altas frecuencias de ensayo) donde se nota una disposición de los puntos experimentales según una curva bien definida y la segunda, correspondiente a largas longitudes de onda (bajas frecuencias de ensayo), donde se nota una disposición de los puntos experimentales según una serie de rectas escalonadas, paralelas al eje horizontal.

Se ha encontrado en la práctica (7) que estas sucesivas rectas proporcionan, en su intersección con el eje vertical, las velocidades de propagación de ondas de corte, β , en las sucesivas capas no cementadas del pavimento, que se encuentran por debajo de las capas cementadas bituminosa o hidráulicamente. Por lo tanto, aproximando los puntos experimentales obtenidos con bajas frecuencias de ensayo mediante las rectas paralelas al eje horizontal que se observan en la figura 6, se han determinado las velocidades: $\beta_1 = 135$ m/s, $\beta_2 = 245$ m/s y $\beta_3 = 290$ m/s, correspondientes a subrasante, sub-base de suelo seleccionado y sub-base pétreo respectivamente.

En lo que respecta a la capa superior bituminosa se puede considerar, comportándose como una capa de alto módu-

PAVIMENTO ENYAYADO EN ACC. A FRIG. DE BERI550

PROG. 4800

TEMPERATURA AMBIENTE 25°C

TIPO DE PAVIMENTO	DENSIDAD 'IN SITU' γ ₂₀ ³	HUMEDAD 'IN SITU' %	GRANULOMETRÍA % PMA TAMIZ 200	LIMITE LIQUIDO	INDICE PLASTICIDAD	% PMA TAMIZ 200	CLASIFIC. N.R. D.	V. S. C. 'IN SITU'
SELLADO SUPERFICIAL	—	—	—	—	—	—	—	—
BASE NEGRA	2.35	—	—	—	—	—	—	—
BASE DE MATERIAL PE TRES (ab. espesores separados con 2% de RC mínimo)	1.43	25.9	3/4" 80% 3/8" 30% 10 24% 200 10%	—	—	—	—	—
QUELO SELECCIONADO	1.35	28.6	—	40	10	51	A-2-4(0)	35
SUBGRANTE	1.30	26.2	—	35	16	64	A-6(5)	2

CUADRO 1

MODULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS EN ACC. A FRIG. DE BERLINO

	DENSIDAD γ (t/m ³)	COEFICIENTE DE POISSON	VELOCIDAD DE RAYLEIGH α (m/s)	VELOCIDAD DE CORTE β (m/s)	MODULO DE ELASTICIDAD E_1 (kg/cm ²)
BAIE NEGRA	2.35	0.33	1200	1290	106.000
BAIE DE MATERIAL PETREO	1.43	0.40	—	290	3.450
SUELO SELECCIONADO	1.33	0.45	—	245	2.350
TUBRIANTE	1.30	0.45	—	135	700

CUADRO 2

CURVA DE DISPERSION ACCE10 FRIG. BER1410

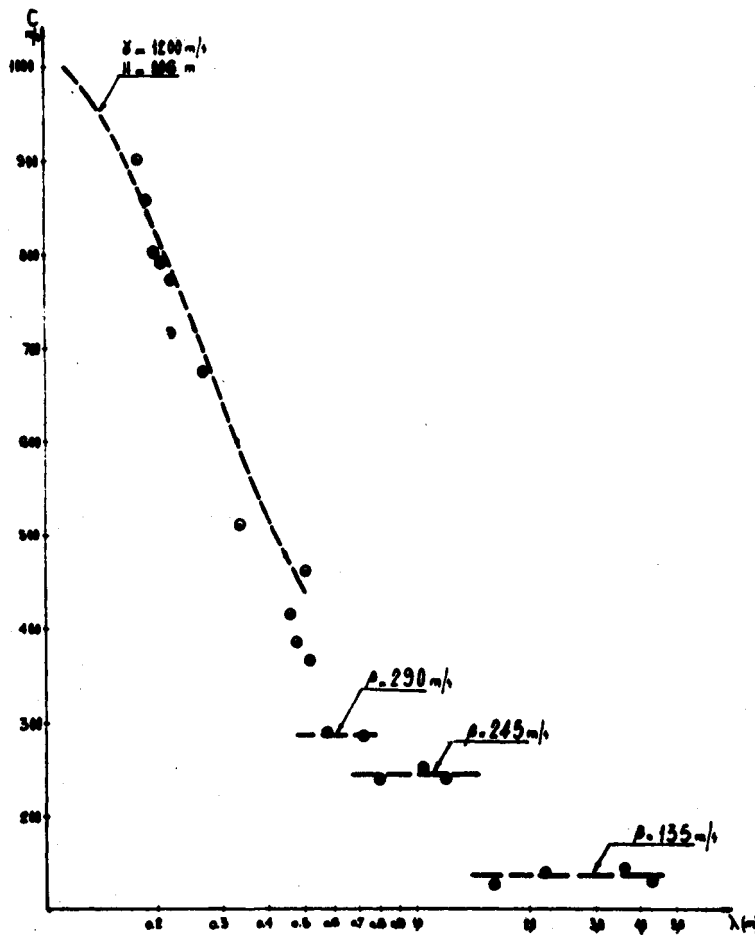
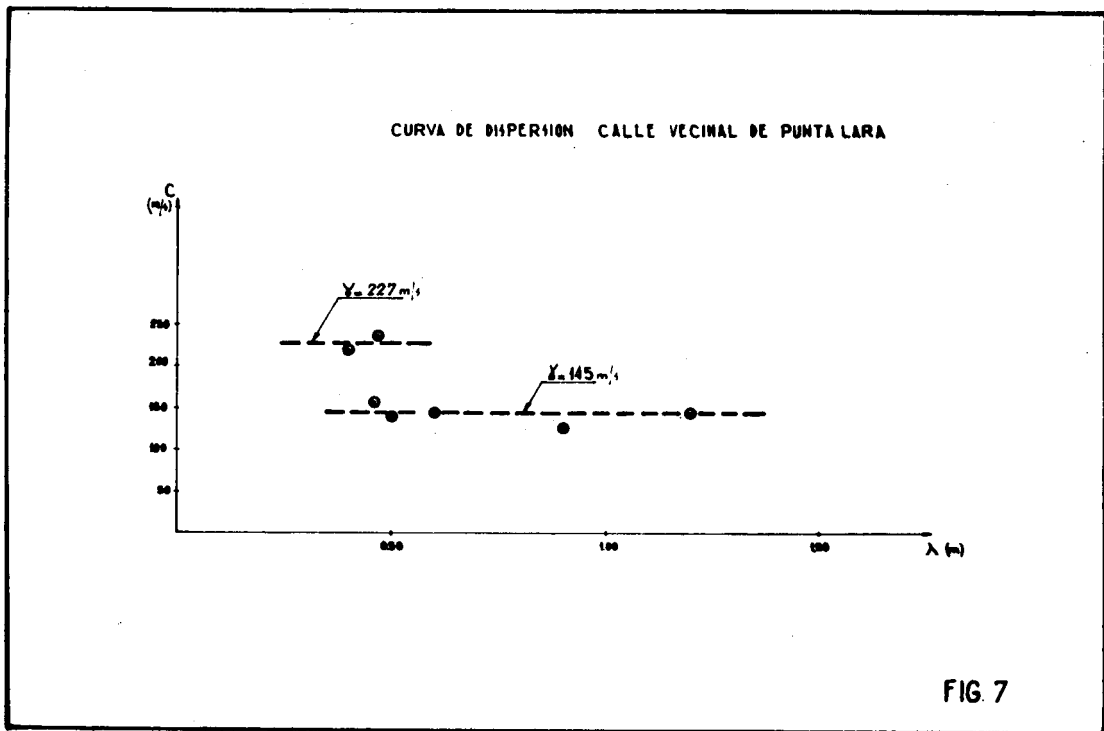
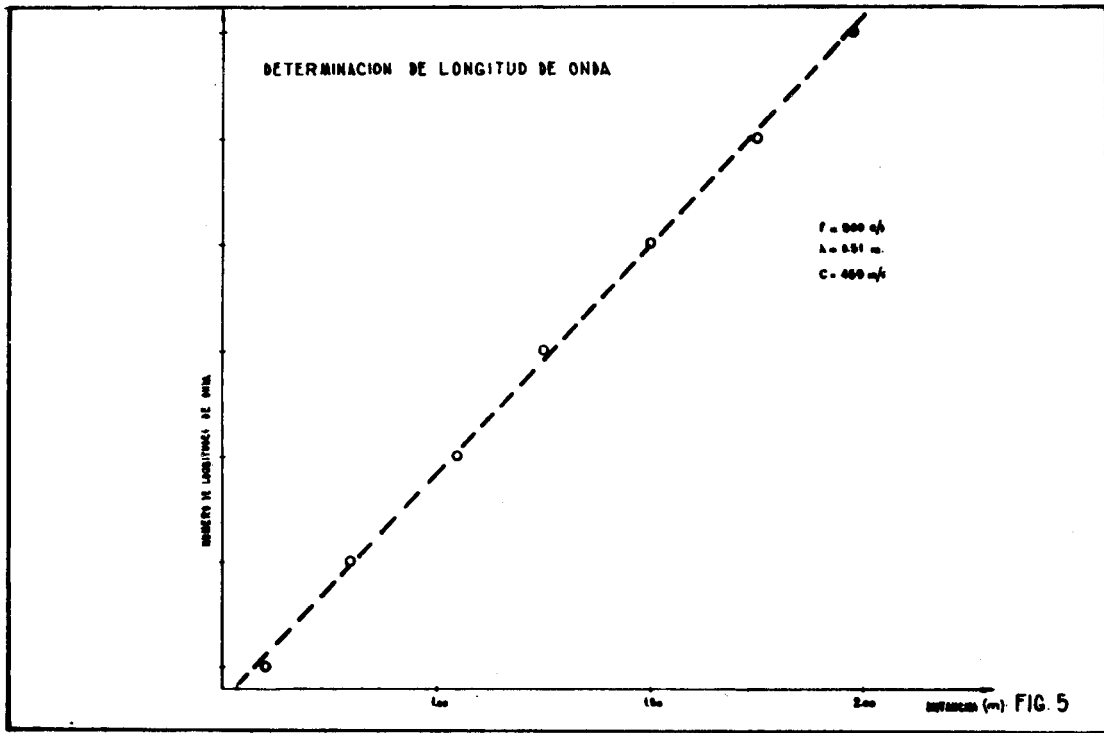


FIG. 6



lo de elasticidad, apoyada sobre una serie de capas no cementadas de bajo módulo de elasticidad. La interpretación de este caso particular es relativamente simple; la propagación de ondas en esta capa está representada por la primera zona, de puntos experimentales dispuestos según una curva; esta curva de dispersión experimental se puede aproximar sin introducir mayor error, mediante una curva de dispersión teórica correspondiente a una placa elástica de longitud infinita, que vibra libremente en el espacio (3). Así se ha hecho en este caso, en la figura 6, la curva representada en línea de trazos es la curva de dispersión teórica correspondiente a la placa vibrante libre, que mejor aproxima los resultados experimentales. Esta curva ha sido calculada en base a la solución de Lamb, suponiendo una velocidad de propagación en su superficie de las ondas de Rayleigh, $v = 1\ 200$ m/s y un espesor, $H = 0,06$ m. Asimilando entonces este valor de v al de la capa bituminosa superior del pavimento ensayado, se dispone de una característica de calidad de la misma.

El espesor empleado para calcular la curva teórica que mejor aproxima los puntos experimentales difiere del espesor real, obtenido en este caso por medición directa, en 2 centímetros. La circunstancia de estar en los comienzos de la utilización de la técnica de propagación de ondas no nos permite todavía abrir juicio sobre su uso para la medición de espesores; no obstante es de señalar que el método proporciona en todos los casos una idea bastante aproximada del espesor con que se cuenta.

Como determinación complementaria, indispensable para el cálculo de tensiones y deformaciones, es posible calcular el módulo de elasticidad, E , de los distintos materiales constitutivos del pavimento. En efecto, obteniendo la velocidad de propagación de algún tipo de onda, es posible, en función del coeficiente de Poisson, ν , hallar la velocidad de propagación de las ondas de corte, β y en base a esta última, calcular E mediante la expresión (5).

$$E = \frac{2(1 + \nu)}{g} \beta^2 \rho$$

donde:

ν : Coeficiente de Poisson

g : Aceleración de la gravedad

ρ : Densidad

En el cuadro 2 se detallan los valores de γ adoptados para cada capa y los valores resultantes del módulo de elasticidad, E.

Comparando los valores calculados de E con los del Valor Soporte California de las capas de suelo seleccionado y subrasante, determinados sobre probetas moldeadas con la densidad y humedad halladas in-situ, se observa que se hallan en términos generales dentro de la correlación empírica, hallada entre ambos por W. Heukelom (8).

Ensayo sobre capa de suelo seleccionado (camino vecinal en Punta Lara)

La disposición y características de los materiales ensayados se encuentran indicados en el cuadro 3.

La curva de dispersión hallada mediante el ensayo se encuentra en la figura 7, determinada por los distintos puntos experimentales. Observando el gráfico se puede notar que los puntos experimentales se encuentran dispuestos según dos rectas escalonadas, paralelas al eje horizontal.

Los puntos agrupados según la recta inferior son representativos de la propagación de ondas en el núcleo arcilloso y aproximándolos mediante una recta paralela al eje horizontal, la intersección de esta última con el eje vertical proporciona el valor de la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en el núcleo del camino. El valor obtenido de esta velocidad es de: $\gamma = 145$ m/s.

Los puntos dispuestos según la recta superior son representativos de la propagación de ondas en la capa de suelo seleccionado y aproximándolos mediante una recta paralela al eje horizontal se obtendría, con algunas reservas, el valor de la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en la capa de suelo seleccionado, $\gamma = 227$ m/s.

Utilizando la expresión indicada en el párrafo anterior, en el cuadro 4 se han calculado los correspondientes valores del módulo de elasticidad, E.

Son válidas también en este caso las consideraciones realizadas en el párrafo anterior acerca de la correlación entre los valores calculados de E, con los del Valor Soporte California.

CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

La tarea fundamental realizada hasta el momento consistió en el armado y puesta a punto del equipo. De esta última labor se desprende que el instrumental adoptado responde satisfactoriamente, pudiendo trabajar sin mayores problemas hasta una frecuencia de 5 000 cps.

Si bien los ensayos efectuados hasta el momento, no permiten obtener conclusiones definitivas se puede decir que, la forma general de las curvas de dispersión obtenidas experimentalmente, concuerdan con los tipos de estructuras ensayados, en otras palabras, se pueden apreciar en las curvas obtenidas, las distintas ramas correspondientes a la propagación de ondas en las sucesivas capas de las estructuras en estudio. Por otro lado las velocidades de propagación observadas están en correspondencia con valores obtenidos sobre materiales similares por investigadores de otros países.

Respecto a la técnica operativa se nota que la misma podría mejorarse fundamentalmente en lo que respecta a la rapidez de las determinaciones adoptando, entre otras cosas los actuales sistemas de medición de diferencia de fase utilizados en Francia e Inglaterra. Además se nota la necesidad de efectuar mediciones a frecuencias más elevadas llegando hasta 30 000 cps, mediante el empleo del instrumental adecuado para alcanzar esta gama de frecuencia. El objeto de este último es el poder aproximar las curvas de dispersión con mayor exactitud.

En lo que concierne a la interpretación de los resul-

SUELO ENSAYADO EN CALLE VECINAL DE PTA. LARA

	DENSIDAD "IN SITU" γ/m^3	HUMEDAD "IN SITU" %	LIMITE LIQUIDO	INDICE PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA % PASA TAMIZ	CLASIFIC. H. R. S.	V. P. C. "IN SITU"
SUELO SELECCIONADO	12.9	23.3	58	10	$\begin{matrix} 4 \\ 10 \\ 20 \\ 40 \end{matrix}$	A-4(6)	15
SUBRASANTE	12.7	30.7	59	25	200 96	A-7-5(6)	6

CUADRO 3

MODULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS EN CALLE VECINAL DE PTA. LARA

	DENSIDAD γ/m^3	COEFICIENTE DE POISSON	VELOCIDAD DE RAYLEIGH γ (m/s)	VELOCIDAD DE COMPRESION β (m/s)	MODULO DE ELASTICIDAD E (kg/cm ²)
SUELO SELECCIONADO	12.9	0.45	227	240	2200
SUBRASANTE	12.7	0.45	145	153	800

CUADRO 4

ados se hace necesario un trabajo en equipo a los efectos de elaborar programas de computación que permitan interpretar estructuras más complejas como son las formadas por diversas capas cementadas. Como futuros trabajos de aplicación práctica es propósito llevar a cabo ensayos sobre materiales locales, a los efectos de determinar límites de calidad, en base al criterio de velocidad de propagación de ondas. Así también es intención el ensayar sistemáticamente tramos experimentales con el objeto de evaluar su comportamiento frente a la acción del clima y del tránsito.

Dada la magnitud e importancia de la tarea a realizar estimamos necesario una estrecha colaboración entre los distintos grupos que en el país se encuentran abocados a estudios con la técnica de propagación de ondas de superficie.

Finalmente queremos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Antonio M. Méndez por la colaboración prestada en el armado del equipo y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por haber suministrado el subsidio que hizo posible la adquisición del instrumental.

BIBLIOGRAFIA

- 1).- Jones, R. In-situ measurements of the dynamic properties of soils by vibration methods. Geotechnique, nº 8, 1958.
- 2).- Bulletin de liaison des laboratoires Routiers. Especial J, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, julio 1968.
- 3).- Tosticarelli, J. y Agnusdei J. O. Determinación de las características elásticas de las diferentes partes del camino mediante el método de propagación de ondas de superficie. Decimocuarta Reunión Anual del Asfalto, 1966.
- 4).- Tosticarelli J. y Zalazar L. M. Investigación sobre mecánica dinámica de pavimentos con aplicación al diseño estructural. Decimoquinta Reunión Anual del Asfalto, 1968.

- 5).- Bruck, M. Ensayo dinámico de pavimentos mediante propagación de ondas. Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, publicación nº 85, 1969.
- 6).- Jones, R. Non destructive Testing in relation to Highways. International Road Federation. 1968.
- 7).- Jones, R. Interpretation of surface wave propagation data on road constructions, at low frequencies. Road Research laboratory, Research Note 3 830; 1960.
- 8).- W. Heukelom, Dynamic Stiffness of soils and pavements, Symposium on vibration Testing of Roads and runways, Amsterdam, 1959.