

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

687 - 8 ENSAYO DE HORMIGONES POR MEDIO DE ONDAS ULTRASONORAS

(Betonprüfung mit Hilfe von Ultraschall)

Autor: Karlhans Wesche

De: "BETON- UND STAHLBETONBAU", nº 5, Mayo 1953, pág. 116

- - - -

Como es sabido, no se puede confiar siempre en la determinación de la resistencia a compresión del hormigón puesto en obra por preparación y ensayo de probetas cúbicas, de acuerdo con las normas, por las siguientes razones:

a) 3 probetas, tomadas de masas de hormigón de 200 a 500 m³, no pueden reflejar las fluctuaciones que siempre se presentan entre los distintos amasados.

b) Con frecuencia, las probetas y el hormigón puesto en obra se compactan de diferente modo y endurecen en distintas condiciones. L'Hermite ha comprobado, a base de numerosos ensayos, que el hormigón puesto en obra poseía, las más veces, unas resistencias superiores en un 10 a un 15% a las del hormigón de las probetas.

c) No es fácil conseguir que el hormigón de las probetas tenga la misma consistencia que el puesto en obra.

d) No se pueden reproducir los ensayos con las mismas probetas.

Además, se dan casos en que resulta preciso seguir de un modo continuo el aumento de resistencia con el tiempo; por ejemplo, para determinar el momento adecuado para desencofrar o

para cesar el tesado, si se trata de hormigón pretensado.

La toma de probetas en elementos que trabajan a compresión es raras veces posible, y en otros casos es engorrosa, cara y poco conveniente, porque supone una destrucción parcial del elemento de que se trate. El ensayo no destructivo por impacto es también relativamente inexacto y, además, tiene la desventaja de que sólo proporciona información sobre la superficie del hormigón, no permitiendo predecir nada sobre la resistencia en el interior de los elementos, sobre todo cuando la sección de éstos es de grandes dimensiones.

Por esta razón, en muchos países, entre los que se cuentan Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Suecia, Holanda y Alemania, se ha trabajado en el último decenio en el desarrollo de un procedimiento de ensayo basado en la determinación del módulo dinámico de elasticidad, E_d , por medida de ondas ultrasonoras en el seno del hormigón. Como entre E_d y la resistencia del hormigón existe una cierta relación, puede determinarse de este modo dicha resistencia con relativa rapidez y sin destrucción alguna. El problema de la determinación del módulo dinámico de elasticidad está prácticamente resuelto; sin embargo, el cálculo de la resistencia del hormigón a partir de E_d precisa aún de estudios más a fondo.

Con este procedimiento se puede también detectar las primeras grietas y modificaciones estructurales en los ensayos de flexión y rotura, determinar el espesor de pavimentos y seguir el proceso de fraguado del cemento.

1. Módulo de elasticidad

1.1 Fundamentos.

La curva tensión-deformación del hormigón presenta una curvatura, decreciendo el módulo estático de elasticidad, $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$, al aumentar la tensión. Esta curvatura es menor, como han comprobado Yoshida, Glanville, Jones y Richards en extensos estudios, para velocidades de carga elevadas; así, cuanto más rápida es la carga, tanto menor se hace la diferencia entre E en estado sin cargar y E en estado de carga.

Si la carga consiste en someter la probeta a vibración, la velocidad de carga aumenta con la frecuencia; la amplitud de la vibración define la magnitud de la carga.

Las diferencias de tensión provocadas por las ondas ultrasonoras son muy pequeñas, con lo cual las deformaciones elásticas son también muy pequeñas y no aparecen deformaciones plásticas.

Por esta razón, el módulo dinámico de elasticidad (E_d) es exactamente el mismo para cualquier carga estática con que se mida y prácticamente igual al módulo estático de elasticidad (E_{est}) en estado descargado (E_0). Hasta una tensión de unos 40 Kg/cm² la diferencia entre E_{est} y E_d es inferior al 5%, mientras que para tensiones superiores a los 40 Kg/cm² es válida, según Le Camus, la siguiente expresión:

$$E_{est} = E_d \left(1 - 0.15 \frac{\sigma - 40}{100} \right)$$

1.2 Relaciones entre el módulo dinámico de elasticidad y los resultados de las mediciones.

En un cuerpo de dimensiones infinitas, homogéneo e isotrópico, pueden distinguirse teóricamente, por excitación por medio de vibraciones, dos tipos de ondas:

- a) Ondulaciones longitudinales, en las que coinciden la dirección de la vibración y la dirección de propagación, y
- b) Ondulaciones transversales, en las cuales la dirección de las vibraciones y la de propagación de las mismas son perpendiculares.

1.21 Ondas longitudinales.

Para un cuerpo de dimensiones infinitas es válida la siguiente relación entre E_d y v_l (velocidad de propagación de las ondulaciones longitudinales):

$$E_d = \frac{v_l \cdot \rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{g(1 - \mu)}$$

donde ρ es el peso específico del hormigón, que para los hormigones preparados con arena y grava fluctúa entre límites relativamente próximos (aproximadamente de 2,50 a 2,55 Kg/dm³), $\mu = \frac{1}{m}$, siendo m el coeficiente de Poisson, y g la aceleración de la gravedad. Unidades: Kg, cm, seg.

Para placas se utiliza la ecuación:

$$E_d = \frac{v_l^2 \cdot \rho (1 - \mu^2)}{g}$$

y para barras y prismas:

$$E_d = \frac{v_l^2 \cdot \rho}{g}$$

1.22 Ondas transversales.

Entre E_d y v_t (velocidad de propagación de las ondas transversales) existe la siguiente relación:

$$E_d = \frac{2 v_t^2 \rho (1 + \mu)}{g}$$

De acuerdo con los estudios realizados hasta la fecha, estas fórmulas son válidas también para el cálculo del módulo dinámico de elasticidad del hormigón.

1.23 Frecuencia de resonancia.

El procedimiento más sencillo para la determinación del módulo de elasticidad por medio de ondas ultrasonoras es el de resonancia. Si se hace vibrar un cuerpo de determinada magnitud, se originan ondas estacionarias para la frecuencia de resonancia. Esta frecuencia puede determinarse variando la de la vibración aplicada. Los resultados mejores se obtienen con ondas longitudinales. Entre la frecuencia, f , la velocidad de las ondas, v , y la longitud del cuerpo, l , existe la siguiente relación:

$$f = \frac{v}{2nl}$$

(n = número entero).

Resulta así, para $n = 1$, para una probeta cuya longitud sea varias veces mayor que su anchura y altura

$$E_d = \frac{4f^2 l^2 \rho}{g}$$

2. Procedimiento de medida

2.1 Medida de la frecuencia característica de la probeta (método de resonancia).

Se emite un ultrasonido continuo por medio de una membrana de altavoz y se recibe en el otro extremo la frecuencia característica de la probeta por medio de una aguja o bien se utilizan los impulsos ultrasónicos de un timbre eléctrico y se reciben en un cuarzo piezoeléctrico. La medida se realiza con un oscilógrafo. Cuando la frecuencia de la probeta y del productor del ultrasonido es distinta, se obtiene en la pantalla del oscilógrafo una oscilación. Se modifica entonces la frecuencia hasta que desaparezca la oscilación, obteniéndose así la frecuencia de resonancia.

2.2 Medida de la velocidad del ultrasonido en el seno del hormigón.

Se determina el tiempo que un impulso ultrasónico tarda en recorrer la distancia entre dos puntos. Los tiempos (centésimas de segundo) se miden eléctricamente por medio de un oscilógrafo. El trazo horizontal que aparece sobre la pantalla luminosa se divide en intervalos regulares por medio de un indicador de tiempo, y se pasa a una escala, cuyas divisiones distan entre sí un intervalo equivalente a 5 microsegundos y con cuya ayuda puede leerse el espacio de tiempo buscado. El procedimiento es muy sencillo. Solamente se originan dificultades cuando el espacio de tiempo mencionado es inferior a 14 microsegundos, esto es, cuando la distancia entre los dos puntos de medida es menor de 5 cm. Para realizar mediciones a pie de obra resulta adecuado producir los impulsos por medio de un martillo mecánico; de este modo es posible verificar las medidas en distancias superiores a los 2 m. La velocidad de las ondas se determina en este caso como en los aparatos de radio (y de radar): manipulando en el potenciómetro se hacen coincidir las crestas de los impulsos de

emisión y recepción y entonces se puede leer en una escala el espacio de tiempo transcurrido.

La reproductibilidad de este procedimiento es excelente; los resultados de muchas medidas aisladas arrojaron diferencias inferiores a $\pm 1\%$. De acuerdo con los datos bibliográficos, las frecuencias óptimas de emisión se encuentran entre 100 y 250 KHz; por encima de 250 KHz la absorción producida por el hormigón se hace demasiado grande. Wenzel indica, por el contrario, como frecuencias más favorables, las comprendidas entre 20 y 70 KHz, para poder trabajar en todas las posiciones de emisor a receptor y eliminar los efectos de dirección de ondas que aparecen por encima de 100 KHz.

Para ensayos de laboratorio, el método de resonancia resulta el más sencillo y barato. Sin embargo, no se puede utilizar con probetas de más de 60 cm. de longitud, ni en elementos constructivos; en estos casos se hace preciso operar por el método de la medición de velocidades.

3. Factores que afectan la velocidad de las ondas ultrasonoras o la frecuencia de resonancia y el módulo de elasticidad.

En numerosas publicaciones se ha informado sobre los resultados de extensos ensayos, conducentes a averiguar la influencia de diversos factores como dosificación, relación agua/cemento, compactación, volumen de huecos, condiciones de curado y edad, sobre la velocidad de los ultrasonidos en el seno del hormigón y, con ello, sobre el módulo dinámico de elasticidad. El efecto de la mayor parte de estos factores resultó ser análogo, como se sabe ya en lo que se refiere a la resistencia a la compresión. Sólo se presentó el caso inverso al modificar la dosificación: -

los hormigones ricos en cemento poseían un módulo de elasticidad más bajo que los hormigones pobres. Esto se atribuye a que el módulo de elasticidad de los áridos es superior al del mortero que les rodea, de suerte que, al elevar el contenido de aquéllos, - crece también E_d .

3.1 Influencia de la armadura.

Otro factor que influye sobre la velocidad de las ondas ultrasonoras en el seno del hormigón es la presencia de una armadura de acero. En las proximidades de ésta se hace mayor la velocidad, resultando preciso realizar una corrección en el valor medido. No obstante, la influencia de la armadura no es muy grande y da lugar a errores de únicamente unas pocas unidades - por ciento, pues la diferencia de velocidades en el acero (5.060 m/seg.) y en el hormigón (alrededor de 4.000 m/seg.) no es muy elevada.

Dawance ha estudiado un prisma de 20 x 20 x 80 cm, con 2 redondos de 20 mm de diámetro como armadura. En la fig. 1 se indican las velocidades medidas en los distintos puntos de la sección. Puede verse que el aumento de velocidad producido por la armadura se eleva al 6,3% a 4 cm de distancia del punto central de la armadura y al 3,2 a 6 cm de distancia. En el gráfico de la fig. 2 pueden leerse las correcciones para los distintos valores de la relación diámetro de la armadura/distancia entre los puntos de medida, d/p ; para $d/p < 0,15$ puede despreciarse la influencia de la armadura.

4. Relaciones entre la velocidad de los ultrasonidos y el módulo de elasticidad y las resistencias mecánicas del hormigón.

4.1 Módulo de elasticidad y resistencia.

Diversos investigadores (Ros, Graf, Ritter, etc.) han establecido fórmulas que relacionan el módulo estático de elasticidad y la resistencia. En Francia se toma como válida la siguiente relación:

$$E = c\sqrt{w_b} \quad (c = 18.000)$$

w_b = resistencia a compresión del hormigón.

Chefdeville ha comprobado que, para hormigones de distintas composiciones y sometidos a diferentes tratamientos, el valor del coeficiente c oscila entre 16.000 y 23.000, esto es, presenta una dispersión considerable. Por el contrario, al estudiar el módulo dinámico de elasticidad en función de la resistencia a la tracción se obtiene para c un valor prácticamente constante, $c = 70.000$, con una dispersión de alrededor del 7%.

Long, Kurtz y Sandenaw determinaron la relación entre el módulo dinámico de elasticidad y la resistencia a flexión-tracción, fig. 3, a partir del ensayo de unas 1.400 probetas de 10 x 10 x 40 cm. La dispersión máxima se eleva en este caso a $\pm 5 \text{ Kg/cm}^2$, esto es, aproximadamente del 15 al 20%.

4.2 Relación entre la velocidad de los ultrasonidos y la resistencia a la compresión.

Jones, Andersen-Nerenst y Wenzel han estudiado la relación entre el módulo dinámico de elasticidad y la resistencia del hormigón. En las figs. 4 a 6 se reproducen los resultados obtenidos por cada uno para la resistencia a la compresión.

En estos gráficos se pone de manifiesto que la dosificación o contenido de cemento ejerce una gran influencia sobre

la determinación de la resistencia a la compresión por medio de ondas ultrasonoras. La razón se ha indicado ya en el apartado 3. Pero, según Andersen, la consistencia del hormigón y, por tanto, el contenido de agua del hormigón fresco, es un factor que también influye.

Las curvas son prácticamente paralelas entre sí, aumentando la velocidad de las ondas al crecer la resistencia a la compresión. La dispersión es relativamente elevada, debido a la influencia de la dosificación; según Wenzel y Andersen es aproximadamente de $\pm 15\%$, pero de acuerdo con Jones es aún mayor. Claro que se debe tener en cuenta que estos resultados proceden de un número relativamente pequeño de ensayos.

En la fig. 7 se comparan entre sí los resultados de las distintas investigaciones; en lugar de dar los valores aislados se indican sus zonas de variación. A partir de los módulos de elasticidad determinados por Chefdeville, se han calculado las correspondientes velocidades de las ondas ultrasonoras y se han introducido, por fines comparativos, en la mencionada fig. 7.

Los valores de Wenzel y Andersen presentan la misma tendencia y la misma dispersión, mientras que las investigaciones de Chefdeville y Jones dan resultados bastante distintos. Pero debe tenerse en cuenta que, en las correspondientes publicaciones, no se indica de qué modo y en qué tipo de probetas se ha determinado la resistencia a la compresión.

4.3 Relación entre la velocidad de las ondas ultrasonoras y la resistencia a la flexión-tracción.

En las figs. 8 y 9 se representan los resultados de las investigaciones de Jones y Andersen-Nerenst sobre la relación

existente entre la velocidad de los ultrasonidos y la resistencia a la flexión-tracción. De estos estudios se desprende que, análogamente a la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión-tracción depende de la dosificación y de la consistencia del hormigón fresco. Pero, en este caso, la dispersión es mayor; se eleva a $\pm 30\%$. En la comparación que se realiza en la fig. 10 se observa que las curvas muestran el mismo hábito, si bien los valores aislados presentan una mayor dispersión.

5. Coeficientes de Poisson

Para poder calcular E_d a partir de v_l o v_t , es preciso conocer el coeficiente de Poisson, $m = \frac{1}{\mu}$. Este coeficiente puede calcularse también por medio de ultrasonidos, del siguiente modo:

- a) Por medida de la frecuencia de resonancia para 2 clases de ondas.
- b) Por medida de la frecuencia de resonancia y de la velocidad de las ondas y
- c) Por medida de la velocidad de propagación de 2 clases de ondas.

Leslie y Cheesman han comprobado que m aumenta con el peso aparente del hormigón; para 1.200 Kg/m^3 vale aproximadamente 3,3 y para 2.400 Kg/m^3 alrededor de 4,2. Por otra parte, de los estudios de Jones se desprende que m depende de la edad del hormigón:

a las 10 horas	aproximadamente	2,2
" " 20 "	" "	3,0
" " 40 "	" "	3,5
de 60 "	en adelante	4,2 aproximadamente.

Además, según Jones, m también depende de la composi -

ción del hormigón; los valores oscilan entre 3,2 y 5,5. Dawarence para m un valor de 4,35, con una dispersión de $\pm 4\%$.

Los estudios realizados ponen de manifiesto que el valor de m dado generalmente para el hormigón, $m = 6$, parece demasiado alto.

6. Ensayos a pie de obra

Existen en el momento actual las siguientes posibilidades para el ensayo de hormigones a pie de obra por medio de ondas ultrasonoras.

6.1 Determinación de las diferencias de calidad del hormigón.

Por medida de la velocidad de propagación de ondas ultrasonoras se pueden determinar, en toda la extensión de un elemento, las variaciones de calidad del hormigón, las grietas, defectos, las juntas de construcción mal ejecutadas, etc. Realizando medidas en distintos momentos en un mismo punto, puede determinarse la influencia de la edad y de las condiciones climáticas.

6.2 Determinación de la calidad de un hormigón en particular.

Las velocidades de propagación medidas se clasifican en clases, que corresponden a hormigones de determinada calidad. Así, Whitehurst indica velocidades de 3,7 a 4,6 Km/seg para un hormigón de buena calidad, apto para puentes, esclusas, muros de presas y carreteras; por encima de 4,6 Km/seg el hormigón es excelente, y por debajo de 3,7 Km/seg resulta de mala calidad y poco resistente desde el punto de vista mecánico.

6.3 Determinación de la resistencia del hormigón.

Se determina la velocidad de propagación de las ondas ultrasonoras y las correspondientes resistencias a la compresión

en una serie de probetas del hormigón utilizado y, con los resultados, se construye, por así decir, una curva de calibrado para la obra de que se trate. Con ayuda de esta curva se puede entonces determinar la resistencia del hormigón puesto en obra.

Conclusiones

El ensayo de hormigones por medio de ultrasonidos puede suponer en el futuro ciertas simplificaciones, sobre todo en el trabajo de laboratorio. La aplicación de este método permite operar con un número mucho menor de probetas en los ensayos en serie. Además, los resultados que con él se obtienen constituyen valores medios, mientras que los ensayos mecánicos ordinarios indican siempre la resistencia mínima de las probetas. Aunque la determinación de la resistencia a compresión a partir de la velocidad de propagación de los ultrasonidos es aún en el momento actual algo imprecisa, puede llegarse a una comparación de resistencias de gran exactitud.

Por medio de los ultrasonidos pueden determinarse también con exactitud la aparición de las primeras grietas en los ensayos a flexión, el comienzo de la rotura en los ensayos de este tipo y el principio y el fin del fraguado en los estudios sobre cemento.

Pero el porvenir de los métodos ultrasónicos puede residir en los ensayos a pie de obra, para detectar la presencia de defectos de ejecución o para determinar la resistencia del hormigón. Esta puede medirse actualmente con una exactitud de $\pm 15\%$.

Finalmente, una ventaja nada despreciable consiste en que los aparatos precisos son de fácil manejo, y las mediciones cómodas y rápidas.

El aspecto físico y electrotécnico de los métodos ultrasónicos está ampliamente desarrollado, pero las relaciones entre los factores técnicos que afectan al hormigón y los resultados de las medidas ultrasónicas precisan aún de ulterior investigación.

L. S. C.

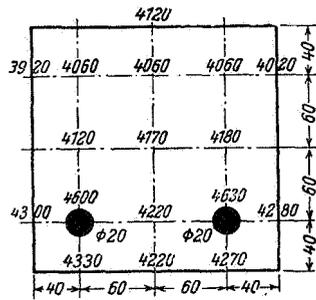


Fig. 1.—Velocidad de las ondas ultrasónicas, v_p , en m/seg., medida en una sección de hormigón armado.

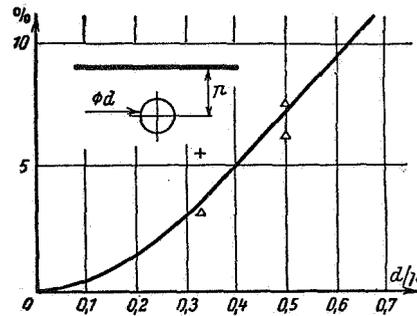


Fig. 2.—Aumento de la velocidad de los ultrasonidos, v_p , por presencia de una armadura de acero, en función de su magnitud y de la distancia entre los puntos de medida (para $v_p \approx 4.000$ m/seg.).

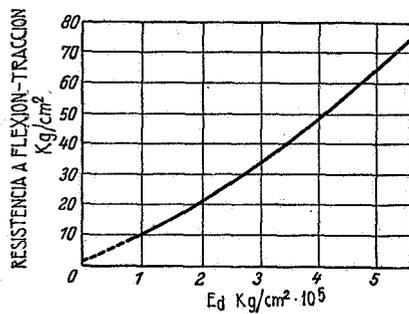


Fig. 3.

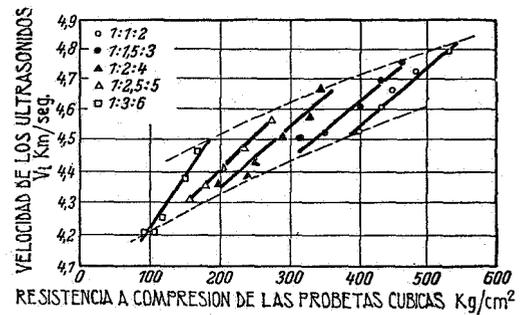


Fig. 4.—Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de los ultrasonidos, v_p , para distintas dosificaciones, según Jones.

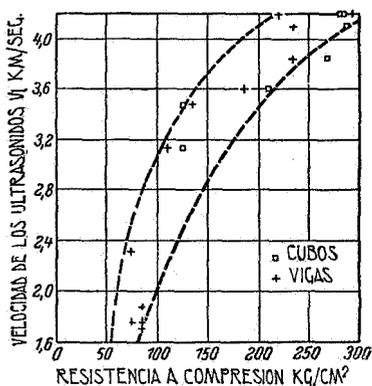


Fig. 5.—Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de los ultrasonidos, v_p , según Wenzel.

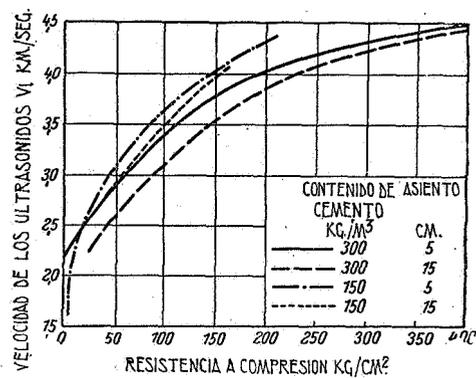


Fig. 6.—Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de los ultrasonidos, v_p , determinada en probetas cúbicas de $10 \times 10 \times 10$, según Andersen y Nerenst.

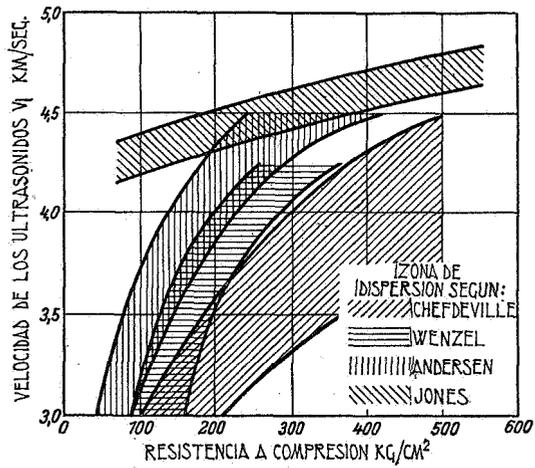


Fig. 7.—Comparación de los resultados de las figuras 4 a 6 y de los valores de Chefdeville.

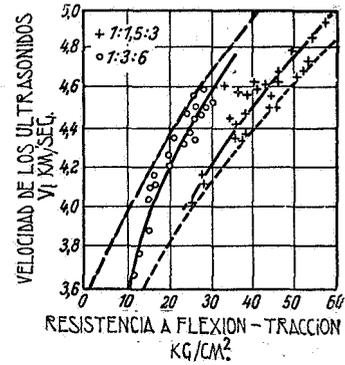


Fig. 8.—Relación entre la resistencia a flexión-tracción y la velocidad de los ultrasonidos, v_i , para dos dosificaciones, según Jones.

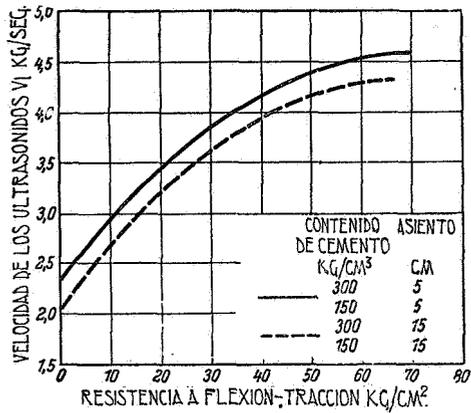


Fig. 9.—Relación entre la resistencia a flexión-tracción y la velocidad de los ultrasonidos, v_i , según Andersen y Nerenst.

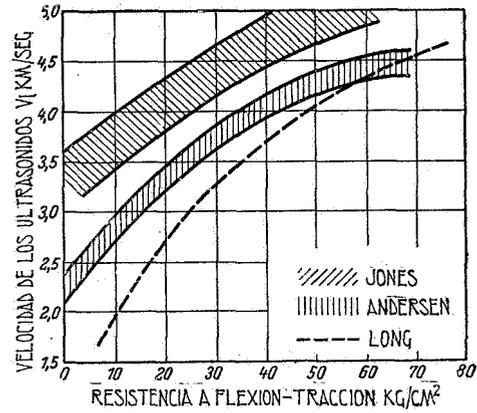


Fig. 10.—Comparación de los resultados de las figuras 3, 8 y 9.

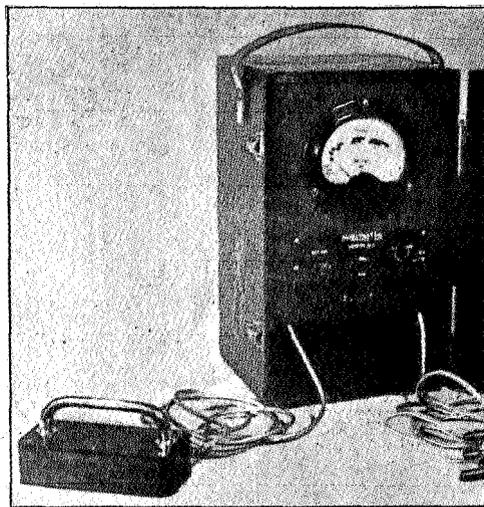


Fig. 11.