

# TECNICA ELECTRODINAMICA PARA LA MEDIDA DEL MODULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION. (EQUIPO PUESTO A PUNTO EN EL IETcc PARA LA MEDIDA DEL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO)

[ELECTRODYNAMIC TECHNIQUE FOR THE MEASUREMENT OF THE ELASTICITY MODULE OF THE BUILDING MATERIALS. (EQUIPMENT FITTED IN IETcc FOR THE MEASUREMENT OF THE DYNAMIC MODULE OF ELASTICITY)]

César del Olmo Rodríguez

Dr. en Ciencias Químicas. IETcc/CSIC

Fotos: J. J. López del Amor

410-2

## RESUMEN

*El presente trabajo puede dividirse en dos partes. La primera hace referencia a la utilidad de la medida del módulo de elasticidad dinámico de los materiales de construcción y contiene, además, una introducción del comportamiento elástico general de los materiales y, en particular, del hormigón. La segunda parte comprende una revisión del método de ensayo establecido por las normas, de uso más extendido, para la medida de esta característica; una descripción del equipo adoptado recientemente en el IET con esta finalidad, donde se señalan las novedades introducidas en el mismo; así como el estudio efectuado para la puesta a punto del equipo, que incluye la determinación de la repetibilidad (\*) de resultados del ensayo.*

*El trabajo se articula en los siguientes apartados: 1. – Introducción. 2. – El hormigón como material elástico. 3. – Medida de las características elásticas del hormigón. 4. – Método electrodinámico para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción. 4.1. – Fundamento del método. 4.2. – Procedimiento de ensayo. 4.3. – Equipo del IET para la medida del módulo de elasticidad. 4.4. – Puesta a punto del equipo. 4.5. – Método operatorio. – 4.6. – Cálculo del módulo de elasticidad dinámico. 4.7. – Repetibilidad (\*) de resultados. 5. – Conclusiones. – 6. – Agradecimiento. 7. – Bibliografía.*

## SUMMARY

*This work can be divided into two parts. The first considers the utility of the measurement of the dynamic module of elasticity of the building materials; it also contains an introduction to the elastic performances of the materials particularly of the concrete. Part two includes a revision of the test method established by the standards mostly used for the measurement of this characteristic, a description of the equipment recently adopted by the IETcc for this purpose, where the changes are pointed out, as well as the study carried out for the fitting, including the repeatability of test results.*

*The work includes the following paragraphs: 1. – Introduction. 2. – The concrete as an elastic material. 3. – Measurement of the elastic characteristics of the concrete. 4. – Electrodynamic method for the measurement of the elasticity module of the building materials. 4.1. – Method base. 4.2. – Test process. 4.3. – IETcc equipment for the measurement of the elasticity module. 4.4. – Setting of the equipment. 4.5. – Operative method. 4.6. – Calculation of the dynamic elasticities module. 4.7. – Results repeatability. 5. – Conclusions. 6. – Acknowledgements. 7. – Bibliography.*

## 1. INTRODUCCION

Los materiales de construcción están sometidos en obra a una serie de sollicitaciones mecánicas o esfuerzos, por lo que su durabilidad está condicionada, en algunos casos, porque sus propiedades elásticas le permitan asimilar estas sollicitaciones sin merma de sus características.

Los esfuerzos que inciden en estas condiciones, sobre un material de construcción, son de distinta naturaleza: correspondientes a su propio peso, consecuencia de las cargas que soporta, por efecto del secado del material, por las variaciones higrotérmicas a que se encuentra sometido, etc.

(\*) En los ensayos de calidad de los materiales de construcción, se emplea el término repetibilidad para indicar el grado de precisión con que es posible obtener el valor de un parámetro determinado de un material (p.e. las resistencias mecánicas del cemento) en un mismo

laboratorio; mientras que la palabra reproductibilidad se aplica a la precisión de las medidas de una característica cualquiera de un material, realizadas en varios laboratorios (13).

Por la razón apuntada, el estudio de las características elásticas de un material de construcción es una propiedad física de utilidad en la valoración global del mismo.

La consideración de esta característica es especialmente importante en determinados casos: por ejemplo, en la evaluación de los materiales usados en la edificación como revestimiento de paramentos o cerramientos (revocos de fachada, aplacados, etc.), como impermeabilización, etc., donde su funcionalidad está condicionada muchas veces por la capacidad que tengan de deformarse acompañando, sin fisurarse, los movimientos del soporte sobre el que están aplicados. O, también, en el estudio de la capa externa de un hormigón armado o pretensado, en su función de barrera física de protección de las armaduras, puesto que la capacidad de protección se reduce o llega a desaparecer incluso, si en el hormigón de la capa de recubrimiento aparecen fisuras de cierta importancia, por las que se facilita el acceso hasta las armaduras de los agentes exteriores (humedad, CO<sub>2</sub> atmosférico, SO<sub>2</sub> contenido en el ambiente, etc.).

Pero la medida del módulo de elasticidad dinámico del hormigón se emplea, principalmente, como procedimiento indirecto para predecir, por medio de este ensayo no destructivo, la resistencia estática del hormigón a través de una relación empírica entre ambas magnitudes.

Por último, en ensayos de durabilidad, se emplea también la medida del módulo de elasticidad dinámico como método no destructivo para seguir la evolución de un hormigón sometido a la acción de los agentes agresivos.

El objeto de la elasticidad es el estudio de la deformación de los materiales por la acción de las fuerzas que actúan sobre ellos, entendiéndose por deformación la variación de forma y dimensiones de un cuerpo.

Como se recordará, los materiales en general (\*) tienen un comportamiento elástico hasta que alcanzan una cierta deformación máxima, correspondiente al límite elástico.

En este entorno son capaces de recuperar su forma original al cesar el esfuerzo aplicado;

(\*) En ambos extremos de la escala del comportamiento elástico de los materiales se encuentran: el material perfectamente elástico, que es aquél que recobra su forma original cuando se suprimen las fuerzas deformadoras y, por el contrario, uno perfectamente plástico, el que no la recupera en absoluto.

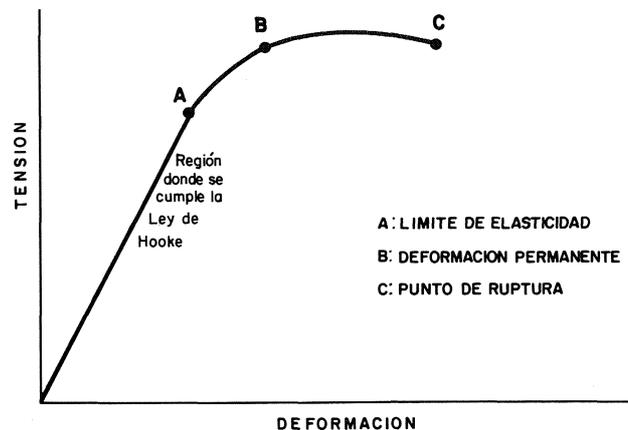


Fig. 1.—Estados de deformación de un material.

pero, sobrepasado este límite, la deformación alcanzada se hace permanente. Si el esfuerzo que incide sobre el material sigue en aumento, hasta llegar a ser de una magnitud lo suficientemente grande como para superar las fuerzas internas de cohesión, el material comienza por fisurarse y termina por romper.

En la figura 1 se representan los estados de deformación de un material.

La relación entre el esfuerzo que actúa sobre un cuerpo y la deformación unitaria que alcanza, se denomina *módulo de elasticidad*, y expresa la resistencia del mismo frente a la deformación.

Esta relación es, por lo general, constante (lineal) y característica del material para pequeños esfuerzos aplicados, inferiores al correspondiente límite elástico, cumpliéndose en este entorno la ley de Hooke.

Los principales tipos de esfuerzos que pueden incidir sobre un material de construcción son los siguientes: de compresión, de tracción y cortante, que dan lugar, respectivamente, a las deformaciones por compresión, por tracción y por cizallamiento.

Según sea el tipo de esfuerzo y deformación considerados, el módulo de elasticidad recibe una denominación distinta; así, en el caso de esfuerzos y deformaciones longitudinales, recibe el nombre de módulo de Young, y de módulo de rigidez, para la deformación por cizallamiento.

## 2. EL HORMIGON COMO MATERIAL ELASTICO

El hormigón, sin embargo, es un material cuyo comportamiento no es realmente elástico, sino que la aplicación de una fuerza produce en el mismo una respuesta no lineal.

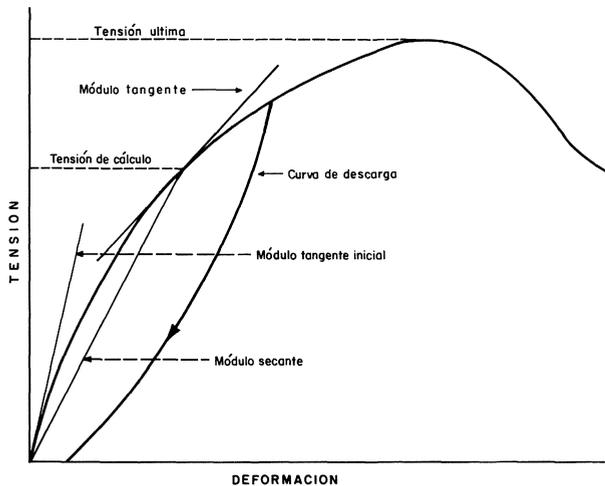


Fig. 2.- Comportamiento elástico del hormigón.

La figura 2 contiene el trazado de la curva tensión-deformación del hormigón, en la que puede apreciarse la respuesta irreversible del mismo.

El hormigón adopta una línea curvada en su relación tensión-deformación, como consecuencia de la microfisuración que se produce en el material al recibir una carga; estas fisuras se localizan principalmente en la interfase de los áridos con la pasta intersticial que componen el hormigón. Sin embargo, tanto la pasta intersticial, como los áridos, por separado, presentan un comportamiento elástico (lineal).

Pero la deformación observada en el hormigón y la curvatura de la relación tensión-deformación dependen, también, de la forma cómo se aplica la tensión; cuanto mayor sea la velocidad a que se aplica la carga, menor es la deformación que se produce en el hormigón; por esta razón, el valor del módulo de elasticidad depende de las condiciones del ensayo aplicado para efectuar la medida.

### 3. MEDIDA DE LAS CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DEL HORMIGÓN

La medida de las características elásticas del hormigón, resulta difícil de obtener, por el carácter no lineal de la curva tensión-deformación del material, ya mencionado.

Como aproximación a la valoración de las características elásticas se definen para el hormigón, dos tipos distintos de módulos: el módulo de elasticidad «estático», que se conoce simplemente como módulo de elasticidad, y el módulo de elasticidad dinámico.

El primero de ellos se determina experimentalmente por medida directa, en

condiciones de carga estática, de la tensión aplicada al hormigón y de la deformación resultante; siendo el módulo de elasticidad, la relación entre ambas magnitudes. El módulo que satisface este requerimiento es el módulo secante de la figura 2.

La medida del módulo secante se obtiene por medio de un ensayo destructivo, para distintos valores –crecientes– de la tensión aplicada, que corresponden a determinados porcentajes de la resistencia máxima del material (\*).

El módulo de elasticidad dinámico es, por su parte, el que se obtiene al aplicar al hormigón, en condiciones dinámicas de carga, una tensión reducida (véase más adelante), por cuya razón, el ensayo capta los efectos puramente elásticos del material. El módulo de elasticidad dinámico corresponde, aproximadamente, al módulo tangente inicial de la figura 2.

Por la razón mencionada de que la tensión aplicada a la probeta de hormigón durante el ensayo es débil, la medida del módulo de elasticidad dinámico constituye un procedimiento de ensayo no destructivo, puesto que durante la medida no se producen cambios en la estructura del hormigón.

El valor del módulo de elasticidad dinámico es más alto que el correspondiente módulo estático, aproximadamente entre un 20 y un 30% mayor que éste.

La diferencia que existe entre ambos módulos, es consecuencia de que la heterogeneidad propia del hormigón produce respuestas proporcionalmente diferentes en el material (distintos grados de deformación), cuando sobre él actúan tensiones de magnitudes diferentes. En el ensayo estático, sobre el hormigón actúa la fluencia (\*\*), deformación que no llega a manifestarse en el ensayo dinámico.

Pero, esta diferencia entre los dos módulos no es una magnitud constante, sino que aumenta con el valor de las resistencias del hormigón; asimismo, para una dosificación determinada, esta diferencia se incrementa con la edad del hormigón.

El módulo de elasticidad dinámico puede medirse por dos procedimientos distintos: por medida de la velocidad de propagación del sonido a través de la probeta de ensayo, y por

(\*) La norma ASTM C 469-65 (revisada en 1975) describe un método de ensayo para la medida del módulo de elasticidad (estático) del hormigón.

(\*\*) Se entiende por fluencia del hormigón la deformación lenta del material que se produce bajo la acción de una carga permanente de magnitud suficiente, pero inferior a la carga de rotura.

medida de la resonancia que es el método más comúnmente utilizado. En este trabajo se hace referencia a este segundo método.

#### 4. METODO ELECTRODINAMICO PARA LA MEDIDA DEL MODULO DE ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

##### 4.1. Fundamento del método

El método de medida, consiste en someter a una probeta del material objeto de estudio a una vibración elástica y en determinar la frecuencia de resonancia de la misma, que es la que corresponde a la amplitud máxima de vibración.

Cuando se somete una probeta a una excitación de magnitud suficiente, en forma de pequeños impulsos sucesivos, adecuadamente espaciados, la probeta entra en vibración con una amplitud que varía con la frecuencia aplicada; la frecuencia particular que corresponde a la amplitud máxima de vibración se denomina frecuencia de resonancia.

La frecuencia de resonancia –que se expresa en Hz– es característica del material, y su valor depende de las propiedades elásticas del mismo, pero también del tamaño, forma (esbeltez) y grado de humedad de la probeta ensayada, así como del modo de vibración aplicado a la misma (ya se trate de vibraciones longitudinales, de flexión o de torsión) (\*).

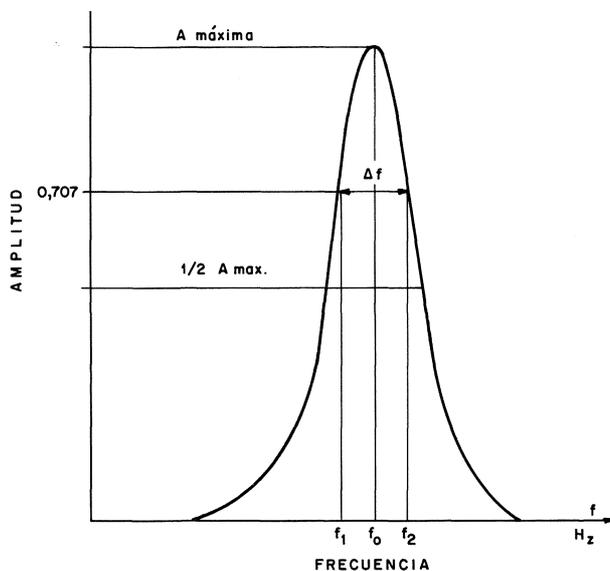
Por esta razón, el resultado de la medida del módulo de elasticidad dinámico de un material deberá ir acompañado por las características de la probeta utilizada en la medida.

##### 4.1.1. Amortiguación

El haz de ondas elásticas que atraviesa la probeta durante el ensayo, sufre una amortiguación, que depende de las características elásticas y plásticas del material ensayado.

El grado de amortiguación, que afecta a la propagación del movimiento del haz de ondas

(\*) El modo habitual de excitar las probetas en el ensayo es longitudinalmente, con lo que la dirección de las vibraciones transcurre paralela al eje de las probetas; este modo de vibración es el único aplicado en la mayoría de las normas que miden esta característica (B.S. 1881, NF B 10-511, etc.) y con este procedimiento se determina del módulo de elasticidad dinámico de Young. Pero la excitación puede aplicarse además en el plano perpendicular al eje longitudinal de la probeta, en cuyo caso, se obtienen vibraciones de flexión; o sometiendo a la probeta a un par alternativo, para producir vibraciones de torsión, con lo que se determinan, respectivamente, los módulos de flexión y de cizallamiento (1) (2).



$f_0$  = frecuencia de resonancia de la probeta

$f_1$  y  $f_2$  = frecuencias para las que el valor de la amplitud de vibración se encuentra reducido a  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  (ó 70,7 %) de la amplitud máxima

$\Delta f$  = anchura de semivalor de la curva de resonancia

Fig. 3.–Relación entre la amplitud y la frecuencia de una probeta de hormigón en las proximidades de la resonancia.

en el material, se mide por el decrecimiento logarítmico, o logaritmo neperiano del cociente entre las amplitudes de dos oscilaciones mecánicas sucesivas de la probeta.

El estudio de la amortiguación puede realizarse también a través de las características de la curva de resonancia, de la frecuencia de resonancia (o cumbre) y de la anchura del semivalor, datos que permiten obtener información sobre las características elásticas del material objeto de estudio.

La figura 3 contiene el trazado de la curva de resonancia en las proximidades de la frecuencia de resonancia.

Para amortiguaciones suficientemente pequeñas, la curva de resonancia es simétrica y con forma de campana; cuanto mayor sea la amortiguación, la amplitud de resonancia es tanto menor y la curva de resonancia, tanto más ancha.

Como medida de la amortiguación se usa también la anchura del semivalor de la curva de resonancia ( $\Delta f$ ), que se define como la distancia entre las frecuencias con valores por encima y por debajo de la frecuencia de resonancia, y cuyas magnitudes se encuentran reducidas a  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  (ó 70,7 %) de la amplitud máxima, y el factor de calidad o de intensidad

de resonancia ( $Q$ ) que es igual a la frecuencia de resonancia dividido por la anchura del semivalor (\*).

#### 4.2. Procedimiento en ensayo

Existen varios procedimientos de ensayo para la medida del módulo de elasticidad dinámico, por el método de la frecuencia de resonancia, adaptados al hormigón, pero que pueden ser aplicables también a otros materiales de construcción.

El equipo de medida y la técnica operatoria utilizada en todos los casos es bastante similar; sin embargo, tanto el instrumental usado en el ensayo, como la técnica operatoria (tipo de probeta, etc.) seguida en el mismo, adolecen, por ahora, de una indefinición grande, pudiendo ser considerado el método únicamente como una técnica marco, de la que caben adaptaciones diversas.

De estos métodos de ensayo aludidos, cabe mencionar los siguientes: Las recomendaciones de la RILEM, emanadas de la Comisión 43 - CND (1) y las normas: ASTM C 215 - 60, revisada en 1976 (2), BS 1881: Parte 5: 1970 (3), NF B 10 - 511, de abril de 1975 (4), NBN B 15 - 230 (5), DIN 53 440 (6), etc.

El equipo de medida adoptado en todos los casos debe ser capaz de producir vibraciones armónicas en el intervalo de frecuencias de 1.000 a 10.000 Hz.

Este equipo consta esquemáticamente de los siguientes elementos: Un generador de baja frecuencia, un emisor electroacústico, un soporte, un receptor electroacústico y un medidor, dispuestos como se indica en la figura 4.

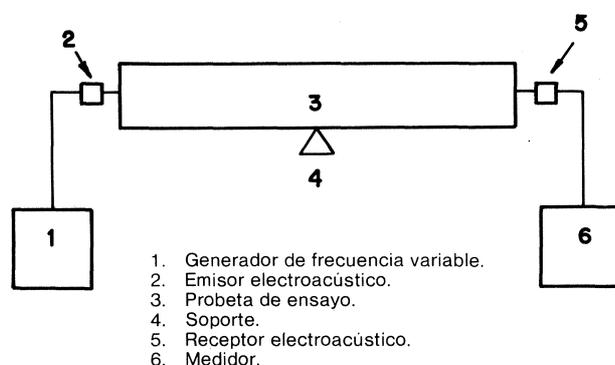


Fig. 4.-Esquema del equipo para la medida del Módulo de elasticidad dinámico.

(\*) También se definen otros parámetros en el estudio de la amortiguación, tales como el factor de pérdida ( $d$ ) que es igual al inverso de  $Q$  (6).

Más explícitamente, las características de los elementos que componen el equipo de medida se indican a continuación.

El generador de frecuencia variable (oscilador), debe ser capaz de producir frecuencias en el intervalo antes indicado (1.000 a 10.000 Hz). La frecuencia de excitación se debe poder medir con una precisión de  $\pm 1\%$ .

El emisor, está formado por un vibrador electromagnético que transforma en vibraciones mecánicas la corriente alterna, de frecuencia variable, suministrada por el generador de frecuencias.

El soporte donde se coloca la probeta durante el ensayo, debe permitir que ésta pueda vibrar libremente; o bien, que pueda quedar sujeta en los nodos de vibración, correspondientes a la vibración deseada. El espesor del soporte deberá ser menor de  $1/20$  de la longitud de la probeta.

El receptor está formado por un transductor electroacústico que transforma las vibraciones mecánicas de la probeta ensayada, en oscilaciones eléctricas. La masa del transductor en contacto con la probeta debe ser inferior al 3% del peso de la misma.

Por último, el medidor de voltaje, con el que se mide, después de una amplificación adecuada, las oscilaciones suministradas por el receptor. Puede utilizarse como instrumento de medida un voltímetro, un amparímetro o un oscilador de rayos catódicos.

El acoplamiento entre el emisor y la probeta y entre ésta y el receptor ha de ser correcto y reproducible con facilidad.

La frecuencia de resonancia de las partes independientes del equipo debe estar situada fuera del ámbito de medida.

Para la medida del módulo de elasticidad dinámico del hormigón, se utilizan probetas cilíndricas o prismáticas, con una relación entre la longitud y la sección de las mismas comprendidas entre 3 y 6.

En el caso de los morteros, en particular de los morteros de recubrimiento (7), la medida de esta característica se realiza con probetas prismáticas de dimensiones:  $2,54 \times 2,54 \times 28,5$  cm. (\*).

(\*) Correspondientes a las probetas usadas en el ensayo de autoclave del cemento (cuyos moldes son de uso habitual en un laboratorio especializado en materiales de construcción), pero, en este caso, sin la colocación de índices en sus extremos.

#### 4.3. Equipo del IET para la medida del módulo de elasticidad dinámico

El equipo desarrollado recientemente por el IET para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción, por el método electrodinámico (fotografía n.º 1), recoge las directrices generales contenidas en las normas mencionadas.

El equipo está formado por los elementos que se relacionan en el Cuadro I, donde se reseña además algunas de las principales características técnicas de los mismos, junto con la marca y modelo de cada componente (\*).

Las novedades introducidas en el equipo de medida del módulo de elasticidad dinámico, consisten principalmente en el empleo de un analizador de espectros para la medida de la señal transmitida a través de la probeta objeto de estudio (señal que se recoge por medio de un acelerómetro) y en realizar de forma automática la exploración del campo de frecuencias, operación que se efectúa con el mismo equipo.

El empleo de este instrumento permite visualizar en pantalla la respuesta de la probeta sometida a excitación dinámica que se ensaya, en todo el campo de frecuencias considerado, por lo que resulta fácil poder discriminar la frecuencia de resonancia de la misma; además,

(\*) En la elección de algunos de los elementos que componen el equipo de medida descrito en este trabajo, adquiridos recientemente con este fin, se ha tenido en cuenta los demás instrumentos de que se disponía en el Centro, cuya gran versatilidad de aplicaciones es más amplia que la sola realización de este ensayo.

con el uso de este equipo, se obtiene una mayor información global del ensayo, una mayor precisión de resultados y una reducción sensible del tiempo de realización de la medida.

Asimismo, el diseño del banco de ensayo o soporte adoptado, constituye una aportación útil para la mejora del ensayo, puesto que permite la colocación de la probeta en disposición de medida de forma rápida y reproducible (fotografía n.º 2).

Con los elementos contenidos en el Cuadro I la medida del módulo de elasticidad dinámico puede realizarse de dos formas distintas: a) con el empleo del analizador de espectros, a que se refiere este trabajo; y b) con el medidor de frecuencias (en la operación manual de barrido de este campo) y el osciloscopio (para la medida de la señal recibida por el captador) que se mencionan por ser éstos más fácilmente accesibles por su menor costo; empleando los restantes elementos en ambas formas de medida.

#### 4.4. Puesta a punto del equipo

La puesta a punto del equipo de medida del módulo de elasticidad dinámico, ha consistido principalmente en la comprobación de las siguientes cuestiones:

1. Medida del módulo de elasticidad dinámico de un material (acero) de valor conocido, con resultado satisfactorio.
2. Estudio de la forma cómo vibra la probeta en el ensayo, habiéndose comprobado que, con el diseño del banco de ensayo o soporte adoptado, se consigue una vibración libre de la misma.

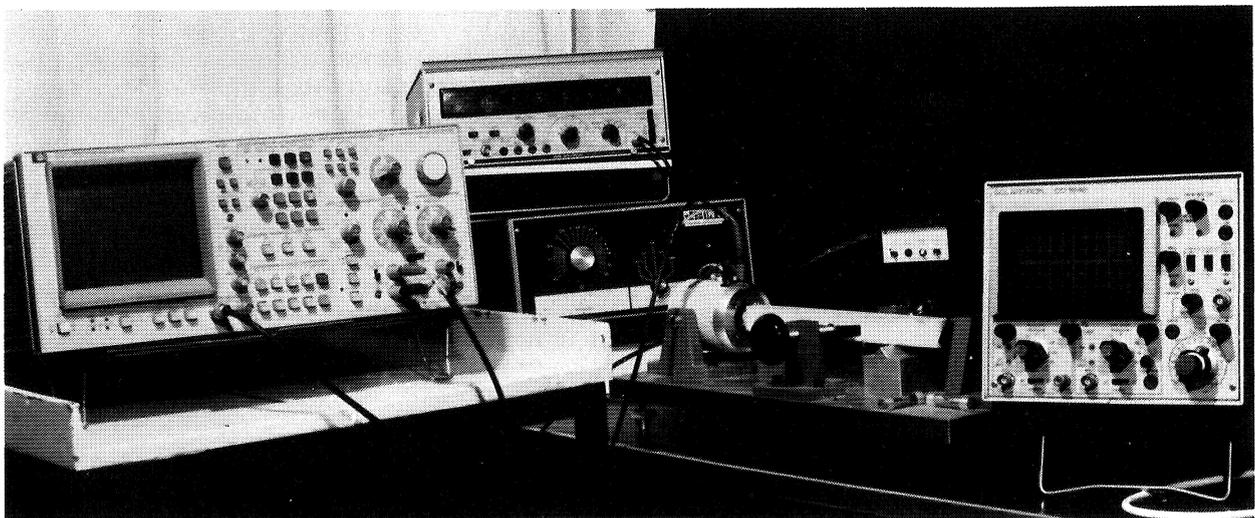


Foto 1.-Equipo para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción por el método electrodinámico. La foto contiene los elementos o aparatos utilizados en las 2 formas de medida aludidas en el texto.

1. Analizador de espectros (6) (\*).
2. Medidor de frecuencias (6) (\*\*)
3. Oscilador con amplificador (1).
4. Vibrador electromagnético (2).
5. Acondicionador de señal (5).
6. Acelerómetro (5).
7. Banco de ensayo (4).
8. Probeta (3).
9. Osciloscopio (6) (\*\*).

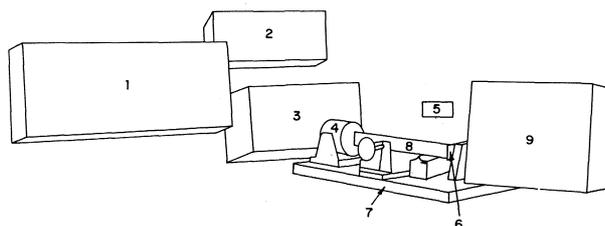


Fig. 5.-Silueta del equipo de la fotografía 1.

Nota: El número entre paréntesis corresponde al elemento de medida indicado en el esquema de la Figura 4.

(\*). Medidor utilizado en el procedimiento de ensayo n.º 1.

(\*\*) Id. en el procedimiento n.º 2.

### Cuadro I

#### Componentes y características del equipo electrodinámico para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción

Elemento	Características	Marca	Modelo
<b>Generador (oscilador) de frecuencia variable, con Amplificador</b>	Margen: 1,5 Hz a 25 kHz en 4 escalas Tipo de onda: sinusoidal Potencia de salida: 25 W r.m.s. para cargas entre 4 y 10 ohm Voltaje máx. de salida: 15 V en 8 ohm Respuesta en frecuencias: desde 0 Hz a 25 kHz $\pm$ 1 dB (a 25 W) de salida Puede ser conducido desde una fuente de señal externa (desde el A.E.)	LING	TPO 25
<b>Medidor digital de frecuencias</b> (para la lectura de la frecuencia de excitación, correspondiente a la amplitud máxima medida con el osciloscopio)	Número de dígitos: 5 Margen de frecuencias: 1 a 10.000 kHz	SOLARTRON SCHLUMBERGE	EM 1616
<b>Vibrador electromagnético</b> (emisor electroacústico)	Corriente a frecuencia media: 2,5 A Factor de fuerza en C.A.: 5,78 N/A Margen de frecuencias de operación: 13 kHz en C.A.	LING	Serie 201
<b>Acelerómetro, con Acondicionador de señal</b> (receptor electroacústico)	Sensibilidad: 10 mV/g $\pm$ 5% Margen: $\pm$ 500 g. ancho de escala Frecuencia de respuesta: $\pm$ 5% de 4 a 15.000 Hz Salida: 10 V fondo de escala, pico a pico a 2 mA máx.	ENDEVCO ENDEVCO	22 4416
<b>Medidor de voltaje para lo que se usa indistintamente:</b> - Un osciloscopio, o, mejor aún, - Un Analizador de espectros (A.E.)	Bicanal de 20 MHz	SOLARTRON	CD 1642
	A.E. en tiempo real, con medida de la función de transferencia. Genera una señal interna de ruido para producir la función de transferencia. Presenta en pantalla todos los parámetros de la señal	HEWLETT-PACKARD	3582 A
<b>Soporte</b> (para la colocación de las probetas durante el ensayo)	Banco soporte nivelable, donde se ancla el vibrador electromagnético, con sujeciones laterales elásticas y soportes fijos intercambiables para la colocación de las probetas	Diseño IET	

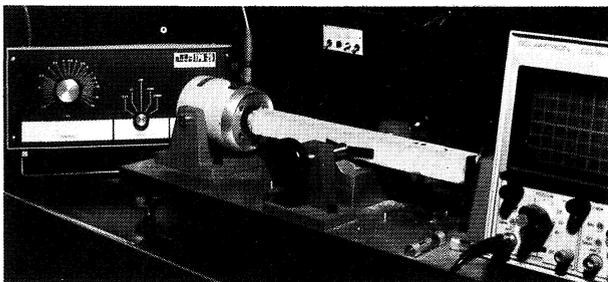


Foto 2.—Vista parcial del equipo anterior, donde se aprecia el soporte de las probetas o banco en ensayo.

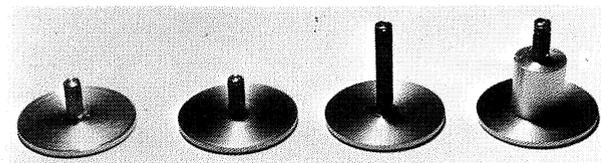


Foto 3.—Émbolos intercambiables del vibrador electromagnético.

Teniendo en cuenta que una vibración libre de la probeta es más fácil de reproducir que una sujeción por los nodos de vibración, el tipo de acoplamiento o sujeción de la probeta al soporte se ha diseñado en este sentido; al mismo tiempo, se ha provisto al banco de ensayo de unos elementos laterales (flejes) que permiten una sujeción elástica de la probeta, impidiendo que ésta pudiera experimentar pequeños desplazamientos durante el ensayo por efecto de los impulsos transmitidos a la misma por el émbolo del vibrador electromagnético o emisor, lo que produciría fallos en el acoplamiento entre éste y la probeta, que repercuten, de forma importante, en la medida de la frecuencia de resonancia en que se trata de hallar.

3. El estudio de la señal de excitación transmitida por el vibrador y, en particular, estudio de la forma cómo repercuten, en la frecuencia de resonancia de la probeta sometida a ensayo, las partes independientes del equipo de medida, habiéndose demostrado que éstas no ejercen ninguna influencia en el valor obtenido.

Para realizar esta experiencia, se diseñaron, en primer lugar, cuatro tipos distintos de émbolos (fotografía n.º 3), para su colocación en el vibrador electromagnético, o emisor. Estos émbolos tenían formas diferentes y sus pesos eran también distintos, de valor creciente, con lo que se consiguió modificar la frecuencia de resonancia de las partes independientes del equipo de medida, alcanzándose frecuencias de resonancia también crecientes.

El estudio de la influencia del equipo en la medida de la frecuencia de resonancia, se efectuó con probetas de las mismas dimensiones, fabricadas con cuatro tipos de materiales distintos (poliestireno extruido, mortero especial de cemento, mortero convencional y acero) (fotografía n.º 4), cuyas frecuencias de resonancia respectivas presentaban los siguientes órdenes de magnitud: 900, 2.500, 6.000 y 9.000 Hz.

4. El estudio de la repetibilidad de resultados, véase el apartado 4.7 de este trabajo.

5. Estudio de la forma cómo repercute la sensibilidad de los instrumentos de medida (medidores de frecuencia y de voltaje, principalmente) en el valor del módulo de elasticidad dinámico obtenido.

#### 4.5. Método operatorio

En resumen, la técnica operatoria consiste en excitar dinámicamente la probeta objeto de estudio, colocada en el banco de ensayo, por el centro de uno de sus extremos, y en medir la señal transmitida, que se recibe por el centro del otro extremo, por medio de un captador. El medidor permite determinar la amplitud máxima de la señal, que corresponde a la frecuencia de resonancia.

La exploración del campo de frecuencia se realiza normalmente en una operación manual; aunque con el equipo puesto a punto, la exploración se efectúa también automáticamente, con el analizador de espectros.

Es necesario efectuar un estudio de la señal de excitación, para evitar errores, en el caso de que la probeta pudiera vibrar sobre un armónico de la señal de excitación, lo que podría ser confundido con la resonancia de la probeta.

#### 4.6. Cálculo del módulo de elasticidad dinámico

La frecuencia de resonancia de la probeta del material ensayado, está relacionada con la velocidad de propagación del sonido en este medio, a través de la fórmula clásica:

$$f = \frac{V}{2L} \quad (\text{vibración de la probeta en}$$

semionda)

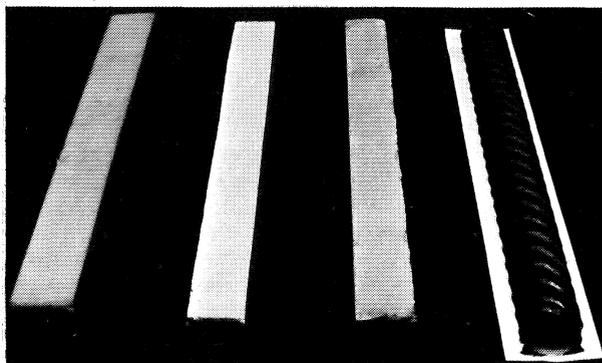


Foto 4.—Probetas con características elásticas muy diferentes, usadas en el estudio efectuado para la puesta a punto del equipo de medida del módulo de elasticidad dinámico de los materiales de construcción.

Donde:  $f$  = frecuencia  
 $V$  = velocidad del sonido  
 $L$  = Longitud de la probeta

Por otra parte, se sabe que:

$$V^2 = \frac{E}{\left(\frac{\rho}{g}\right)}$$

Donde:  $E$  = Módulo de elasticidad dinámico  
 $\rho$  = densidad aparente  
 $g$  = aceleración de la gravedad,

despejando la  $V$  en la fórmula anterior, elevando al cuadrado ambos términos y comparando las dos expresiones, se tiene que:

$$V^2 = 4 f^2 L^2 = \frac{E \cdot g}{\rho}$$

de donde se deduce que:

$$E = 4 f^2 L^2 \frac{\rho}{g}$$

sustituyendo en la fórmula precedente la densidad aparente ( $\rho$ ), por el peso ( $P$ ) y el volumen ( $v$ ) de la probeta, se obtiene la fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad de Young ( $E$ ), en función de la frecuencia fundamental longitudinal, el peso y las dimensiones de la probeta utilizada en el ensayo, de la siguiente forma:

$$E = \frac{4 f^2 L^2 P}{g \cdot v} \quad (1)$$

que es válida cuando se utilizan para la medida probetas prismáticas o cilíndricas cuya longitud es, al menos, tres veces las dimensiones transversales de la misma, en caso contrario debe usarse una fórmula más compleja en la que interviene el coeficiente de Poisson (1) (12) (\*).

El módulo de elasticidad dinámico ( $E$ ) obtenido a partir de la fórmula (1) viene expresado en  $\text{kp/cm}^2$ , cuando los parámetros que intervienen en la misma se expresan en las unidades indicadas a continuación:

$f$  = Frecuencia (longitudinal) de resonancia, en Hz (ó  $\text{s}^{-1}$ )

(\*) Como se recordará, el coeficiente de Poisson representa la relación que existe entre la deformación transversal y la longitudinal que se produce cuando un cuerpo (p.e. una probeta de hormigón) está sometido a una tensión; como resultado de la cual, la probeta no sólo se alarga en la dirección de la fuerza aplicada, sino que sus dimensiones transversales también disminuyen. Si, por el contrario, se le somete a una compresión, las dimensiones transversales aumentan y las longitudinales disminuyen.

$L$  = Longitud de la probeta, en cm  
 $P$  = Peso de la probeta, en g  
 $v$  = Volumen de la probeta, en  $\text{cm}^3$   
 $g$  = Aceleración de la gravedad, en  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$

y, al mismo tiempo, la expresión (1) se multiplica por un factor =  $1/981 \times 10^3$  (véase el ejemplo aclaratorio en el siguiente apartado 4.6.1.).

El módulo de elasticidad dinámico ( $E$ ) puede expresarse también en otras unidades, tales como las que se mencionan en el siguiente Cuadro II, que corresponden a las que se indican en las normas reseñadas en el mismo. El paso del valor del módulo de elasticidad desde estas unidades a  $\text{kp/cm}^2$ , se realiza multiplicando cada caso por el factor de conversión contenido en la última línea del Cuadro II.

Cuadro II

Norma (Ref. bibliográf.)	ASTM C 215 (2)	BS 1881 (3)	NF B 10-511 (4)	Medida del módulo de elasticidad. (7) (9)	
$E$ unidades	$\text{lb/in}^2$	$\text{MN/m}^2$ ó $\text{MPa}$	$\text{N/mm}^2$	$\text{daN/cm}^2$	$\text{GN/m}^2$ ó $\text{GPa}$
Factor para conversión en $\text{kp/cm}^2$	0,07	10	10	1	$10^4$

El valor del módulo de elasticidad dinámico debe estar acompañado por la información siguiente:

1. Fecha del ensayo.
2. Tamaño y forma de la probeta.
3. Densidad aparente de la probeta.
4. Condiciones de curado de la probeta.

#### 4.6.1. Ejemplo aclaratorio

Para facilitar la comprensión del cálculo del módulo de elasticidad dinámico ( $E$ ) a partir de la fórmula (1), a continuación se incluye un ejemplo práctico, donde se dan los datos de una probeta de mortero de cemento ensayada, el valor de la frecuencia de resonancia obtenida en el ensayo y el resultado del módulo de elasticidad dinámico, calculado a partir de los datos anteriores.

Características de la probeta ensayada:

- Longitud ..... 28,5 cm
- Dimensiones transversales .....  $2,54 \times 2,54$  cm
- Peso ..... 390,15 g
- Frecuencia longitudinal de resonancia ..... 5.800 Hz

$$E = \frac{4 \times (5.800)^2 \times (28,5)^2 \times 390,15}{981 \times (2,54 \times 2,54 \times 28,5) \times 10^3} =$$

$$= 236.400 \text{ kp/cm}^2$$

#### 4.6.2. Cálculo del decrecimiento logarítmico y del Factor de calidad

El decrecimiento logarítmico de las vibraciones de una probeta (véase el apartado 4.11), puede calcularse con buena aproximación a partir de la curva de resonancia (Figura 3), por medio de la relación siguiente (2) entre las amplitudes de vibración de la probeta, medidas en la proximidad de la frecuencia de resonancia. Asimismo, el factor de calidad (Q) se obtiene de la expresión (3).

Decrecimiento logarítmico (D.L.)

$$D.L. = \pi \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (2)$$

Factor de calidad (Q)

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3)$$

Donde:  $f_0$  = frecuencia de resonancia de la probeta

$f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias para las que el valor de la amplitud de vibración se encuentra reducido a  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  (ó 70,7%) de la amplitud máxima.

#### 4.7. Repetibilidad de resultados

Para conocer el margen de error de que pudiera estar afectado el valor del módulo de elasticidad dinámico, obtenido con el equipo puesto a punto en el IET, como consecuencia de posibles deficiencias que pudieran surgir en la técnica operativa (fallos en los acoplamientos entre la probeta y el excitador, o entre ésta y el transductor de recepción, etc., por ejemplo), o por limitaciones de sensibilidad de los instrumentos de medida, o por dispersiones surgidas en la preparación de las probetas, etc.; o, en otras palabras, para conocer el grado de repetibilidad de resultados que cabría esperar en la medida obtenida en el ensayo, se han preparado dos series de probetas, con el fin de realizar un estudio estadístico de los resultados obtenidos.

Para efectuar este estudio se han elegido dos materiales de construcción con características elásticas bien diferentes, con los que se han fabricado diez probetas por serie, de dimensiones 2,5 x 2,5 x 28,5 cm.

La primera serie de probetas, corresponde a un mortero convencional de cemento, fabricado con un cemento comercial PA - 350 y un árido de granulometría continua, con una proporción cemento: arena de 1:3 y una relación agua/cemento = 0,6.

La segunda serie de probetas, se fabricó con un mortero comercial especial, empleado como revestimiento monocapa de fachada, de formulación compleja, preparado por mezcla de un cemento comercial P - 450 y árido calizo de granulometría continua, como componentes principales; con adición además de aligerantes, retenedores de agua, agentes tixotrópicos, hidrófugos de masa, etc., como constituyentes secundarios.

En el Cuadro III se incluyen los valores individuales de las frecuencias de resonancia de cada probeta ensayada, junto con las características de densidad aparente de las mismas y el valor del módulo de elasticidad dinámico calculado; el valor medio del módulo de elasticidad de cada serie, la desviación típica y el coeficiente de variación de las mismas.

Los resultados del módulo de elasticidad obtenidos en cada serie, vienen afectados lógicamente por las dispersiones que proceden de la propia fabricación de las probetas.

De tal manera, que el coeficiente de variación, que en la primera serie es de únicamente un 2,6%, cuando el coeficiente de variación de las densidades es de sólo 0,52%; en la segunda serie, debido a la dificultad que entraña en este caso la obtención de un material con suficiente grado de homogeneidad, dada la complejidad de su formulación, el coeficiente de variación de las densidades ha alcanzado un valor de 5,35%, lo que ha motivado que el coeficiente de variación del módulo de elasticidad se eleve hasta el 10,4%.

## 5. CONCLUSIONES

Del estudio efectuado, se deduce que el equipo de medida, en fase de experimentación, puesto a punto en el IET para la determinación del módulo de elasticidad de los materiales de construcción por el método electrodinámico (módulo de elasticidad dinámico), permite obtener resultados de este parámetro con una repetibilidad buena.

Cuadro III

## Estudio de la repetibilidad de resultados del Módulo de elasticidad dinámico

Serie	Probeta n.º	Característica de la probeta		Frecuencia de resonancia, Hz	Módulo de elasticidad dinámico, Kp/cm <sup>2</sup>
		Peso, g	Densidad, g/cm <sup>3</sup>		
1. Mortero tradicional	1	385,84	2,10	5.920	243.536
	2	389,26	2,117	5.880	242.386
	3	386,31	2,10	5.880	240.549
	4	387,88	2,109	5.800	234.999
	5	390,15	2,122	5.800	236.375
	6	391,51	2,129	5.800	237.199
	7	389,74	2,120	5.800	236.126
	8	389,61	2,119	6.040	255.986
	9	386,04	2,099	5.920	243.663
	10	390,67	2,124	5.920	246.522
	Valor medio, $\bar{x}$		2,11		241.734
	Desviación típica, $\sigma$		0,01		6.333
	Coficiente de Variación, V %		0,52 %		2,6 %

2. Mortero comercial especial (mortero monocapa)	1	239,18	1,30	2.520	27.355
	2	235,74	1,28	2.520	26.962
	3	237,09	1,29	2.400	24.595
	4	240,81	1,31	2.160	20.234
	5	214,37	1,16	2.680	27.730
	6	220,64	1,10	2.400	22.887
	7	215,01	1,17	2.480	23.816
	8	211,15	1,14	2.480	23.389
	9	-	-	-	-
	10	-	-	-	-
	Valor medio, $\bar{x}$		1,23		24.683
	Desviación típica, $\sigma$		0,06		2.564
	Coficiente de Variación, V %		5,35 %		10,4 %

El error de que viene afectado el valor del módulo de elasticidad dinámico obtenido, depende no sólo de la sensibilidad y precisión del equipo de medida, sino también –lógicamente– de la dispersión propia de las probetas usadas en el ensayo (por diferencias en la fabricación de las probetas, por falta de homogeneidad del material estudiado, etc.); en el caso de un material bien homogeneizado, el coeficiente de variación que cabe esperar de los resultados es del orden del 2,5%.

El coeficiente de variación obtenido en el ensayo, es similar, por ejemplo, al que se establece para la repetibilidad de resultados en las normas europea CEN 196 y española UNE 80 101, Métodos de ensayo de cementos. Determinación de las resistencias mecánicas (entre 1 y 3%), a pesar de que la precisión de resultados que se exige en la determinación de las resistencias mecánicas es alta, teniendo en cuenta que el valor obtenido a la edad de 28 días es el parámetro que sirve para definir la categoría de un cemento (13).

## 6. AGRADECIMIENTO

El autor agradece al Consejo Técnico del IET la subvención recibida a través del Programa de Investigación 633/327 «Estudio de nuevos materiales para revestimientos continuos horizontales y verticales», con la que ha sido posible adquirir parte del equipo para la medida del módulo de elasticidad dinámico que se describe en este trabajo y a los Sres. Garay, Castelo, Rentero y Sulzberger, del IET y Martín, de Alava Ingenieros las sugerencias y ayuda en la puesta en marcha del mismo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Recomendaciones de la RILEM para el empleo del método de resonancia en el ensayo de probetas de hormigón. *Matériaux et Construction*, vol. 16, n.º 95, 359 a 367.
2. Norma ANSI/ASTM C 215-60 (Revisada en 1976). Método de ensayo normalizado para la medida de las frecuencias fundamentales transversales, longitudinales y de tracción de probetas de hormigón, tomo 4, 1983.
3. British Standard 1881: Parte 5: 1970. Métodos de ensayo del hormigón. Ensayo para la determinación del módulo de elasticidad dinámico por un método electrodinámico.
4. Norma NF B 10-511, de abril de 1975. Medida del módulo de elasticidad dinámico de piedras calcáreas.
5. Norma (belga) NBN B 15-230. Medida del módulo de elasticidad dinámico.
6. Norma DIN 53440, hojas 1 a 3. Ensayo de oscilación de flexión.
7. Modalidades de ensayo de los revestimientos exteriores de impermeabilización de muros a base de conglomerantes hidráulicos. Medida del módulo de elasticidad dinámico. *CAHIERS du Centre Scientifique et Technique du Batiment*, n.º 1.779, junio 1982.
8. Tobio, J. M.: Ensayos no destructivos. Métodos aplicables a la construcción. IETcc, febrero 1967.
9. Windess, S. y Young, J. F.: *Concrete*. Prentice-Hall, Inc. 1981.
10. Neville, A. M.: *Properties of Concrete*. Pitman Publishing, 1973.
11. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado EH-82. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
12. Valoración de las propiedades del hormigón por métodos acústicos. American Concrete Institute (ACI). Monografía, n.º 2, capítulo 2 (1966).
13. Olmo Rodríguez, C. del: Resistencias mecánicas del cemento. Estudio de la precisión de la medida. *Materiales de Construcción*, n.º 192 (1983), 13 a 32.

## publicación del i.e.t.c.c.



### Manuel Fernández Cánovas Dr. Ingeniero de Construcción

Este libro, el primero en lengua castellana sobre resinas epoxi aplicadas a la construcción, está dirigido a arquitectos, ingenieros, constructores y aplicadores. En él, sobre una reducida base teórica imprescindible, se asienta toda una extensa gama de aplicaciones de gran interés.

El autor trabaja desde hace muchos años en el campo de la investigación, especialmente en el estudio de refuerzos y reparaciones estructurales realizados con resinas epoxi.

Con un lenguaje sencillo se tocan todos los problemas que pueden presentarse en la construcción y en los que la solución puede radicar en el correcto empleo de las resinas epoxi.

Se estudian los componentes de las formulaciones epoxi, sus propiedades físicas y químicas, y aplicaciones, deteniéndose, detalladamente, en las siguientes:

Unión de hormigón fresco a hormigón endurecido. – Unión de hormigones entre sí. – Inyecciones de fisuras y grietas. – Unión de acero a hormigón. – Barnices y pinturas. – Las combinaciones brea-epoxi. – Revestimientos de depósitos alimenticios. – Sellado de superficies cerámicas. – Protección de tubos. – Los suelos epoxi en sus diferentes variantes. – Terrazo epoxi. – Reparación de baches. – Reparación de desperfectos en estructuras. – Reparación de carreteras de hormigón. – Juntas elásticas. – Guardacantos de tableros de puentes. – Refuerzos de pilares, vigas, forjados y zapatas, etc. – Consolidación de suelos. – Anclajes. – Protección de aceros en pretensado.

Se termina con unos capítulos dedicados a la limpieza y preparación de las superficies según los materiales a unir; al control del estado superficial de éstos; a las condiciones de temperatura de aplicación; limpieza de los útiles de trabajo; precauciones en el manejo de los sistemas; almacenaje, mezcla y manejo de las formulaciones epoxi y métodos de ensayo de sistemas y aplicaciones epoxidicas.

Un volumen encuadrado en cartón plastificado con lomo de tela, de 17 x 24 cm. compuesto de 334 páginas y 158 figuras y fotografías.

Madrid, 1981.

Precios: España, 1.700 ptas.; extranjero, \$ USA 34,00.