

Módulo de elasticidad estático del hormigón determinado por medio de pruebas de ultrasonido

Static modulus of elasticity of concrete measured by the ultrasonic method

G. S. SENA RODRIGUES; E. PAZINI FIGUEIREDO
Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Goiás

Fecha de recepción: 15-XII-02
Fecha de aceptación: 9-VI-03

BRASIL

RESUMEN

Recientemente se ha registrado un gran número de accidentes causados por problemas relacionados con la durabilidad de las estructuras de hormigón y debidos a un inadecuado proyecto de diseño, ausencia de control de calidad durante la ejecución del proyecto, prácticas inadecuadas de construcción y un ambiente agresivo. Este hallazgo ha dado lugar a que los ingenieros realicen constantes inspecciones y evaluaciones de la condición real de todas las estructuras de hormigón. Para llevar a cabo estas inspecciones, se debe conocer no sólo el módulo de elasticidad, para analizar el comportamiento estructural del hormigón, sino, también, investigar su desarrollo, ya que los esfuerzos pueden originar grietas que comprometan la durabilidad de las estructuras.

Varias técnicas no-destructivas, particularmente ensayos ultrasónicos, se han desarrollado para evaluar y determinar la calidad de una estructura o un elemento de hormigón. Actualmente, este tipo de pruebas ha sido ampliamente investigado y analizado, ya que permiten el examen de las estructuras sin afectarlas.

El propósito del presente estudio fue correlacionar la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático de cierto número de probetas de hormigón elaborados variando la relación agua/cemento, usando diferentes tipos de áridos y métodos de curado. Todas las probetas de hormigón fueron ensayadas a diferentes edades, determinando la velocidad del pulso y el módulo de elasticidad estático mediante un ensayo según la Norma NBR 8522, y usando extensores mecánicos, deformímetros eléctricos y transductores inductivos LVD.

KEY-WORDS: hormigón, ensayos ultrasónicos, velocidad del pulso ultrasónico, módulo de elasticidad estático, módulo de elasticidad dinámico.

SUMMARY

Lately, a huge number of accidents caused by problems found in the durability of concrete structures due to inappropriate project design, lack of control of quality during the project's execution, inadequate maintenance practices and an aggressive environment has been reported. This finding has required from the professionals constant inspections and evaluations of the real conditions of all concrete structures. In order to perform those inspections, one should know not only the elastic modulus to analyze the concrete structural behaviour but also to investigate its performance, since the strains may yield cracks able to compromise the durability of structures.

Non-destructive testing techniques, particularly the ultrasonic testing, are performed to evaluate and determine the quality of a concrete structure or element. Currently, such essays have been widely researched and analyzed all over the world because they enable the examination of structures without damaging them.

The purpose of the present study was to correlate the ultrasonic pulse velocity and the elastic modulus of several concrete specimens molded with a range of water-cement ratios, different kinds of aggregates and curing methods. All the concrete specimens were tested in different ages to determine the pulse velocity and the static modulus of elasticity standardized according to NBR 8522, through mechanical extensometers, electrical strain gauge and LVDT inductive transducer.

KEYWORDS: concrete, ultrasound, ultrasonic pulse velocity, elastic modulus, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de los años 60 se ha generado un interés creciente en el desarrollo de un método de evaluación *in situ* del hormigón endurecido a causa del gran número de estructuras que han presentado signos de deterioro. Por esta razón, se han desarrollado varios métodos que aportan información para efectuar un diagnóstico más preciso.

Un ensayo no destructivo del hormigón (NDT) se define como un ensayo que no altera el comportamiento de una estructura o un miembro de ella que está siendo sometido a investigación para evaluar y determinar la calidad del hormigón que lo compone.

El ensayo se lleva a cabo por una de las siguientes razones o una suma de ellas: (a) la resistencia estimada del hormigón ($f_{ck\ est}$) es menor que la especificada (f_{ck}) y se requiere de ensayos definitorios; (b) aparecen defectos de construcción como, por ejemplo, nidos de grava y juntas frías; (c) cambios en el uso de una estructura; (d) comportamiento estructural inadecuado de una estructura en uso (aparición de un número de grietas y tensiones mayor que el esperado); (e) determinación de la capacidad residual de una estructura (después de un accidente, fuego, sobrecargas eventuales e imprevistas, impacto, etc.); (f) desplazamientos o deflexiones y la necesidad de investigar sus causas (1).

Dentro de las diversas técnicas de evaluación no destructivas disponibles en la actualidad, el ensayo para medir la velocidad del pulso ultrasónico es uno de los ensayos más empleados y sobre el que más investigaciones se ha llevado a cabo alrededor del mundo. Su ventaja más grande es que determina las más importantes características del hormigón. Sin embargo, hay que ser extremadamente cuidadoso y estricto al interpretar los resultados, ya que se requiere de cierta experiencia específica para encontrar los factores que puedan tener una gran influencia en las lecturas. De esta manera, las ventajas ofrecidas por el método y las numerosas dudas que surgen en los ensayos demandan estudios adicionales científicos y tecnológicos sobre la relevancia del ultrasonido y sus limitaciones.

Para entender mejor las metas que se debían alcanzar a través de este estudio, es necesario distinguir los conceptos de módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico. El módulo de elasticidad estático del hormigón está basado en la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación del hormigón bajo ensayo de compresión uniaxial. El elemento es sometido a incrementos de cargas y la correspondiente deformación longitudinal es observada para cada incremento de carga.

1. INTRODUCTION

Since the 1960's there has been a growing interest in the development of an "in situ" evaluation of hardened concrete because of the great number of structures that have shown deterioration signs. Hence, several methods have been developed to provide inputs for the establishment of a more accurate diagnosis.

A concrete non-destructive testing (NDT) is defined as a test that does not impair the intended performance of the element or member under investigation evaluating and determining the quality of the concrete structures or elements.

The tests may be performed because of one of the following reasons: (a) the estimated concrete strength ($f_{ck\ est}$) is lower than the usual (f_{ck}) and in such a ratio that requires a test to verify the structure; (b) existing errors during the performance (honey combs and construction joints, for instance); (c) changes in the use of a certain structure; (d) inadequate behavior of a structure in use (more functional cracks or strains than the expected); (e) measurement of the residual capacity of a structure (in cases of accidents, fire, eventual unpredicted overloading, impact due to accident, etc); (f) offsets and the need to investigate the causes that motivated them (1).

Among the several types of non-destructive testing techniques available today, the test to measure the ultrasonic pulse velocity is the one that has been widely researched and analyzed throughout the world. Its greatest advantage is to fully measure the concrete core characteristics. However, one should be very careful and strict when interpreting the results, since a specific knowledge is required to find out about the factors that might have a strong influence over the readings. Thus, the advantages offered by the method and the numerous doubts about the tests' results demand additional scientific and technological studies on the ultrasound relevance and limitation.

To understand better the aims to be achieved through this study, it is necessary to distinguish the concepts of concrete static modulus of elasticity and dynamic modulus of elasticity. The static modulus of elasticity of concrete is determined based on the slope of the stress-strain curve of the concrete under uniaxial compressive test. The specimen is submitted to increasing loads and the corresponding longitudinal strain is observed at each loading increment.

Las estructuras de hormigón susceptibles a la acción repetida de ciclos de hielo y deshielo, ataque químico, terremoto o impactos de carga, no tienen suficiente tiempo para sufrir una deformación longitudinal seguida de cargas y deformaciones por flujo bajo carga y que ocurren antes del primer minuto de carga (10). En estos casos, algunos ensayos para investigar los abundantes cambios sufridos por la estructura deben ser desarrollados teniendo en cuenta también la frecuencia de la resonancia, que permite el cálculo del módulo de elasticidad dinámico del hormigón. Por lo general, el módulo de elasticidad dinámico es 20, 30 y 40 % mayor que el módulo estático, para hormigones con baja, media y alta resistencia respectivamente.

Sin embargo, es importante enfatizar que el intento aquí es determinar la correlación existente entre la velocidad del pulso ultrasónico, comúnmente utilizado para determinar el módulo de elasticidad dinámico, y los valores obtenidos por el módulo de elasticidad estático de los ensayos normalizados.

2. MÉTODOS APLICADOS

2.1. Variables

Después de analizar los principales factores que pueden influir en los valores encontrados cuando se mide el módulo elástico del hormigón, fueron escogidas para este estudio las siguientes variables:

- Dos clases de árido grueso (piedras trituradas 1): micáceo y granito triturado;
- Relación agua/cemento: 0,4 y 0,7;
- Edades de ensayo: 7, 28, 90 y 180 días;
- Condiciones de curado: el curado de los elementos se realizó en una cabina húmeda después de 3 ó 28 días de permanencia en el encofrado.

La selección de estas variables puede ser explicada con múltiples razones. Primero, como se muestra en los estudios previos, la porosidad presentada por la matriz de la pasta de cemento y la zona de transición tiene un enorme impacto sobre el módulo elástico del hormigón (2, 3), la variación en la relación agua/cemento permite el análisis de diferentes tipos de matrices de cemento, así como de zonas de transición pasta /árido que muestran las propiedades que las distinguen. De igual forma, el uso de dos tipos de áridos que presentan diferentes módulos de elasticidad ($E_{\text{micáceo}} \cong 36 \text{ GPa}$ y $E_{\text{granito}} \cong 50 \text{ GPa}$), demuestra como el módulo del árido influye en el módulo de elasticidad del hormigón. Adicionalmente, cuando los elementos son sometidos al ambiente húmedo de curado después de 3 o 28 días, se pudo estudiar la influencia del curado en el módulo y la humedad interna del hormigón sobre la velocidad del pulso

Concrete structures susceptible to the action of repeated cyclic freezing and thawing, chemical attack, earthquake or impact loading, do not have enough time to suffer a longitudinal strain following the loading and the creep deformation that occurs before the first minute of loading (10). In these cases, some essays to investigate the several changes in the structure can be performed also estimating the fundamental resonant frequency, which allows the calculus of the concrete dynamic modulus of elasticity. Usually, the dynamic modulus of elasticity is 20, 30 and 40 per cent higher than the static modulus for low, medium and high strength concretes, respectively.

Therefore, it is important to emphasize that the intent here is to determine the existing correlation between the ultrasonic pulse velocity, commonly used to determine the dynamic modulus of elasticity, and the values obtained for the static modulus of elasticity from the normalized essays.

2. APPLIED METHODS

2.1. Variables

After analyzing the main factors that might influence the values found when measuring the elastic modulus of the concrete, the following variables were chosen for this present study:

- *Two types of coarse aggregate (crushed stones 1): mica-shist and crushed granite;*
- *Water-cement ratio: 0.4 and 0.7;*
- *Testing ages: 7, 28, 90 and 180 days;*
- *Curing conditions: the curing of specimens is made in a moist cabinet after 3 days or 28 days of molding.*

The selection of these variables can be explained through several reasons. Firstly, as shown by previous studies, the porosity presented by the cement paste matrix and the transition zone have a strong impact over the concrete elastic modulus (2, 3), the variation in the water/cement ratio provided the analysis of different types of cement matrixes, as well as paste/aggregate transition zones showing distinctive properties. Likewise, the use of two kinds of aggregates showing different modulus of elasticity ($E_{\text{mica-shist}} \cong 36 \text{ GPa}$ and $E_{\text{granite}} \cong 50 \text{ GPa}$) demonstrated how the modulus of the aggregate influences the concrete modulus of elasticity. In addition, when the specimens were submitted to the moist-air curing after 3 or 28 days, a curing influence over the modulus and the concrete inner humidity on the ultrasonic pulse velocity

ultrasonico. Finalmente, el efecto de la edad del hormigón sobre el módulo elástico también fue evaluada utilizando hormigón de diferentes edades en la prueba.

2.2. Material, probetas y hormigones producidos

El conglomerante hidráulico utilizado en el presente estudio fue Portland CP II Z 32 RS, cuya composición química se muestra en la Tabla 1. El árido fino utilizado consistió en arena común de río, mientras que para el agua de mezcla fue empleada la de la red de suministro local. Se efectuaron los ensayos sobre probetas cilíndricas, que tenían un diámetro de 15 cm y 30 cm de altura.

La investigación fue realizada en el edificio del laboratorio de materiales en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Goiás, se usó el método de proporción de mezclas de hormigón del ACI modificado (6). Un estudio piloto también fue desarrollado para verificar la variabilidad de los resultados del módulo de elasticidad estático, demostrando que, al menos tres elementos, eran necesarios para representar con certeza las propiedades a estudiar. La Tabla 2 muestra que todas las mezclas de hormigón utilizadas mantuvieron el mismo contenido de mortero para diferentes tipos de árido y la misma relación agua/cemento, permitiendo el análisis de la influencia del árido en el módulo de elasticidad.

was studied. Finally, the effect of the concrete age on its elastic modulus was also evaluated using different concrete ages at testing.

2.2. Material, specimens and produced concretes

The hydraulic agglomerative employed in the present study was Portland CP II Z 32 RS, which chemical composition is shown in Table 1. The fine aggregate employed consisted of common sand from a river bed, while the mixing water was collected from the local water supply company. Basic tests were carried out on cylindrical samples, which presented a diameter of 15 cm and were 30 cm high.

The dosage investigation was carried out at the Building Material Laboratory at the School of Civil Engineering at the Federal University of Goiás, through the modified ACI Method of Proportioning Concrete Mixes (6). A pilot study was also performed to verify the variability of results in the elastic modulus, demonstrating that at least three specimens would be necessary to accurately represent the reliability of the studied properties. Table 2 shows that all concrete batches used kept equal contents of mortar for different types of aggregates and the same water-cement ratio enabling the analyses of the aggregate influence on the elastic modulus. Although this approach also changed

TABLA 1/TABLE 1

Composición química del cemento Portland (CP II Z 32 RS) empleado en la investigación
Chemical composition of the Portland cement (CP II Z 32 RS) used in the study

ENSAYOS QUÍMICOS <i>CHEMICAL TESTS</i>	PROMEDIO (%) <i>MEAN (%)</i>	CONTENIDO MÁXIMO (%) <i>MAXIMUM CONTENT (%)</i>	CONTENIDO MÍNIMO (%) <i>MINIMUM CONTENT (%)</i>
SiO ₂	23,40	25,07	22,41
Al ₂ O ₃	9,88	10,68	8,35
Fe ₂ O ₃	2,98	3,26	2,80
CaO	56,76	57,96	54,30
MgO	1,87	2,09	1,53
SO ₃	1,89	2,53	1,67
Na ₂ O	0,33	0,36	0,29
K ₂ O	0,88	1,75	0,76
Residuo insoluble <i>Insoluble residue</i>	13,23	15,29	11,39
Pérdida a fuego <i>Loss on ignition</i>	5,37	6,37	3,58

TABLA 2/TABLE 2

Tipos de áridos, tiempos de curado, mezclas e identificaciones de las mezclas empleadas en el estudio
Aggregate types, curing times, batching and batching identifications

TIPO DE ÁRIDO <i>TYPE OF AGGREGATE</i>	CURADO EN CUARTO HÚMEDO <i>CURING IN A MOIST CABINET</i>	MEZCLAS MASA EN SECO <i>DRY MASS BATCHING</i>		ASENTAMIENTO (mm) <i>SLUMP TEST (mm)</i>	CONTENIDO DE MORTERO (α) <i>CONTENT OF MORTAR (α)</i>	ABREVIATURAS <i>ABBREVIATIONS</i>
		cemento:arena <i>cement: sand:</i> árido grueso <i>crushed aggregate</i>	relación a/c <i>w/c ratio</i>			
GRANITO <i>GRANITE</i>	DURANTE 28 DÍAS <i>DURING 28 DAYS</i>	1 : 1,12 : 1,59	0,4	100	57,1 %	GR = GRANITO <i>GR = GRANITE</i>
GRANITO <i>GRANITE</i>		1 : 2,87 : 3,43	0,7	80	53,0 %	MIC = MICÁCEO <i>MIC=MICA-SHIST</i>
MICÁCEO <i>MICA-SHIST</i>		1 : 1,12 : 1,59	0,4	70	57,1 %	7D = 7 DÍAS <i>7D = 7 DAYS</i>
MICÁCEO <i>MICA-SHIST</i>		1 : 2,87 : 3,43	0,7	70	53,0 %	28D = 28 DÍAS <i>28D = 28 DAYS</i>
GRANITO <i>GRANITE</i>	DURANTE 3 DÍAS <i>DURING 3 DAYS</i>	1 : 1,12 : 1,59	0,4	110	57,1 %	90D = 90 DÍAS <i>90D = 90 DAYS</i>
GRANITO <i>GRANITE</i>		1 : 2,87 : 3,43	0,7	80	53,0 %	RELACIÓN a/c <i>0,4 and 0,7 = w/c RATIO</i>
MICÁCEO <i>MICA-SHIST</i>		1 : 1,12 : 1,59	0,4	70	57,1 %	1 = CURADO 3 DÍAS <i>1 = CURING</i>
MICÁCEO <i>MICA-SHIST</i>		1 : 2,87 : 3,43	0,7	70	53,0 %	2 = CURADO 28 DÍAS <i>2 = CURING DURING 28 DAYS</i>

Aunque este acercamiento también cambió los valores de asentamiento de los hormigones evaluados, no afectó a la manejabilidad ni a la homogeneidad de todos los hormigones producidos.

Las mezclas se elaboraron en una mezcladora de eje horizontal con una capacidad nominal de 50 litros. Inicialmente, el árido grueso y parte del agua se

the slump values of the evaluated concretes, it didn't affect the spading and the homogeneity of all produced concretes.

The material mixing was made in an inclined axis mixer with a nominal capacity for 50 liters. Initially, the coarse aggregate and part of the water were put

colocaron en la mezcladora. Después de haberlos mezclado durante 20 segundos, el árido fino, el cemento y el resto del agua fueron adicionados a la masa inicial y mezclados durante 4 minutos.

Como algunos elementos fueron moldeados con el extensómetro adherido, se decidió compactar manualmente para mantenerlo centrado. Este mismo procedimiento de compactación fue repetido para el resto de los elementos en aras de mantener su uniformidad. La probeta se llenó en cuatro capas, con una aplicación de 30 penetraciones de la varilla compactadora por cada capa.

Las probetas fueron mantenidas por espacio de 24 horas en la sala, donde se moldearon. Después de este período las probetas fueron retiradas y llevadas a la cámara húmeda. Para estudiar la influencia del tiempo de curado húmedo y de la humedad propia del hormigón sobre el módulo de elasticidad, los elementos fueron dejados en la cámara durante 3 ó 28 días. La cabina húmeda utilizada para el proceso de curado tenía una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa $\geq 95 \pm 5\%$.

2.3. Ensayos desarrollados

2.3.1. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del hormigón

La medida del módulo de elasticidad estático en elementos cilíndricos de hormigón fueron hechos de acuerdo con la norma NBR 8522/84 Plan de Cargas I y III (8) utilizando diferentes equipos de medición de deformación incluyendo equipos mecánicos con una base móvil y un compresómetro-extensómetro, extensómetros eléctricos *strain gauges* adheridos a las probetas y un transductor inductivo LVTD. Las probetas, en momento de las mediciones, tenían edades de 7, 28, 90 y 180 días. La relación de Poisson fue obtenida con la ayuda de un deformímetro eléctrico, adherido transversalmente al elemento.

Las medidas del módulo de elasticidad estático del hormigón fueron también realizadas en el laboratorio de hormigón del Centro Tecnológico de Ingeniería Civil en la Compañía Eléctrica FURNAS, mediante un aparato para medición de deformaciones (compresómetro/extensómetro) y el transductor inductivo LVDT.

La carga última obtenida en la prueba de resistencia a compresión fue utilizada a cada edad específica para medir el módulo. En el caso de pruebas a 90 días, la carga última fue la misma que la utilizada a los 28 días para cada prueba.

inside the mixer. After being mixed for about 20 seconds, the fine aggregate, the cement and the remaining water were added to the initial mass and mixed for 4 minutes.

As some of the specimens were molded having attached extensometers, one decided to adopt a manual spading to keep the centralized position of the extensometers. This same spading procedure was repeated for the remaining specimens to keep the uniformity. The spading was performed in four layers with an application of 30 beats in each layer.

The specimens were kept in the molding room for 24 hours. Following this period of time, the samples were stripped and they were taken to the humid chamber. To assess the influence of the amount of time in a moist-air-curing chamber and concrete inner humidity upon the elastic modulus, the specimens were left in the chamber for 3 or 28 days. The moist cabinet used for the curing process presented a temperature of 23 ± 2 °C and relative humidity $\geq 95 \pm 5\%$.

2.3. Tests performed

2.3.1. Determination of the static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete

The measurement of the static modulus of elasticity in cylindrical concrete specimens was made according to the NBR 8522/84 Loading Plans I and III (8) using different measuring devices of deformation including a mechanical device with a mobile base and a compressometer/extensometer, extensometers electrical strain gauges to be attached and LVTD inductive transducer. The samples to be measured presented testing ages of 7, 28, 90 and 180 days. The Poisson's Ratio was obtained with the aid of electrical strain extensometers transversally attached to the specimens.

The measurement of the concrete elastic modulus was also performed at the Concrete Laboratory at the Technological Center of Civil Engineering at FURNAS Electrical Company through a mechanical device to measure the strain (compressometer/extensometer) and the LVDT inductive transducer.

An ultimate load obtained in the compressive strength tests was employed in each specific age. In the case of tests performed at the 90 day, the ultimate load used was the same used at the 28 day for each test.

2.3.2. Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del hormigón, de acuerdo con las prescripciones NBR 8802/94 (9) a las edades de 7, 28, 90 y 180 días

Las mediciones para determinar la velocidad del pulso se practicaron a todas las probetas ensayadas a las edades de 7, 28, 90 y 180 días, incluyendo las utilizadas en la prueba de resistencia a compresión.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Las Figuras 1a y 1b, 2a y 2b, 3a y 3b muestran la influencia de los áridos gruesos, de la relación agua/cemento y de la edad del hormigón sobre los valores de la velocidad del pulso ultrasónico y del módulo de elasticidad estático.

Cuando se compara el comportamiento mostrado en las Figuras 1a y 1b, se puede concluir que para la mayoría de las propiedades estudiadas, los valores obtenidos por la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático fueron mayores que los del hormigón moldeado con el uso de granito como árido grueso. Entre las características del árido grueso que afectan el módulo de elasticidad del hormigón, la porosidad es la más importante, ya que determina la rigidez de la matriz que envuelve el árido. Como la rigidez controla la capacidad del árido de limitar la deformación del hormigón, se puede concluir que agregados más densos con un alto módulo de elasticidad producirán hormigones con un módulo de elasticidad mayor (2-5). Como se evidenció después del ensayo para determinar el módulo de elasticidad del árido grueso, el granito muestra un módulo que es, aproximadamente, un 39% mayor que el micáceo. Por esta razón, los resultados hacen que destaquen algunos hormigones elaborados con granito, que exhiben un módulo de elasticidad cerca del 20% mayor que aquellos moldeados con micáceo.

Las Figuras 2a y 2b prueban el impacto de la relación agua/cemento en la velocidad del pulso ultrasónico y del módulo de elasticidad estático. Los hormigones que presentan una disminución de la relación agua/cemento tenían una microestructura con porosidad más baja y una mayor reducción del espesor de la zona de transición pasta/árido. Por lo tanto, los hormigones que fueron producidos con una relación agua/cemento de 0,4 mostraron valores de la velocidad del pulso ultrasónico y del módulo de elasticidad estático, un 8 y 35% respectivamente mayores que aquellos que presentan una relación agua/cemento de 0,7.

2.3.2. Determination of the ultrasonic pulse velocity through the concrete, according to the NBR 8802/94 prescriptions (9) at the ages 7, 28, 90 and 180 days

Measurements were obtained to determine the pulse velocity in all tested specimens at the ages of 7, 28, 90 and 180 days, including the specimens employed in the compressive strength test.

3. PRESENTATION AND DISCUSSION OF THE RESULTS

Figures 1a and 1b, 2a and 2b and 3a and 3b show the influence of the coarse aggregate, the concrete age and the water-cement ratio over the values of the concrete ultrasonic pulse velocity and static modulus of elasticity.

When comparing the behavior shown in Figures 1a and 1b one can conclude that for the most of the properties studied, the obtained values for ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity were higher than for the molded concretes with the use of granite as the coarse aggregate. Among the coarse aggregate characteristics that affect the elastic modulus of the concrete, the porosity is the most important one, since it determines the aggregate's rigidity. As the rigidity controls the capacity of the aggregate limiting the concrete strains, one can conclude that denser aggregates with a high elastic modulus will produce concretes with higher elastic modulus (2-5). As evidenced after the test for determination of the elastic modulus of the coarse aggregate, the granite shows an modulus that is approximately 39% bigger than the mica-shist's. Thus, the results pointed out some concretes that present an elastic modulus of about 20% higher than those molded with mica-shist.

The behavior demonstrated in Figures 2a and 2b proves the impact of the water-cement ratio on the ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity. Concretes presenting a decreased water-cement ratio present a less porosity micro-structure and more reduced paste/aggregate transition zone thickness (2, 3, 5). Therefore, concretes that were produced with a 0.4 water-cement ratio revealed ultrasonic pulse velocity and static modulus of elasticity values 8% to 35% (respectively) higher than those with a water-cement ratio of 0.7.

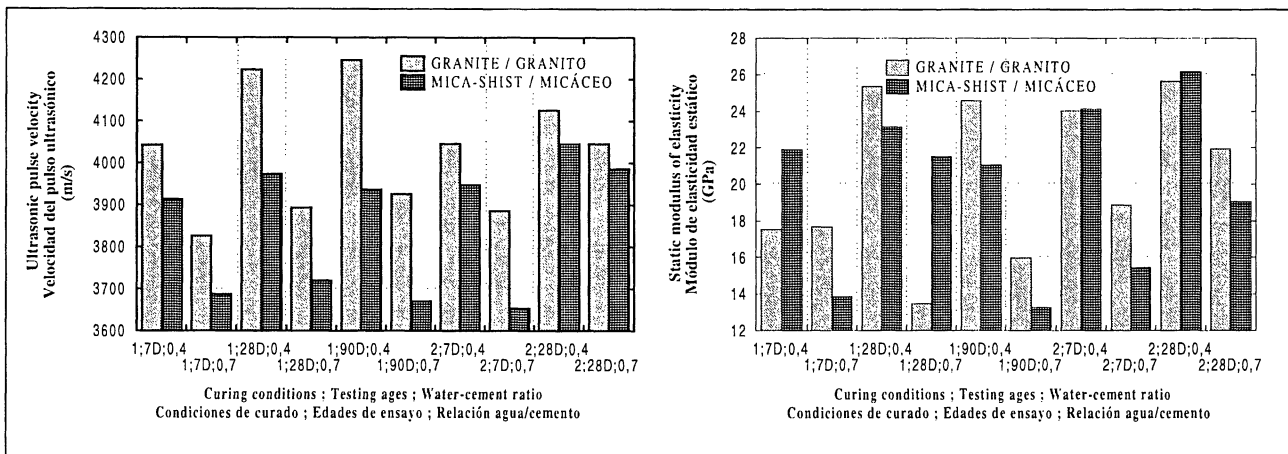


Figura 1a y 1b.- Influencia del tipo de árido grueso sobre la velocidad del pulso ultrasónico (izquierda) y sobre el módulo de elasticidad estático (derecha).

Figure 1a and 1b.- Influence of the coarse aggregate type upon the concrete ultrasonic pulse velocity (on the left) and the static modulus of the elasticity (on the right).

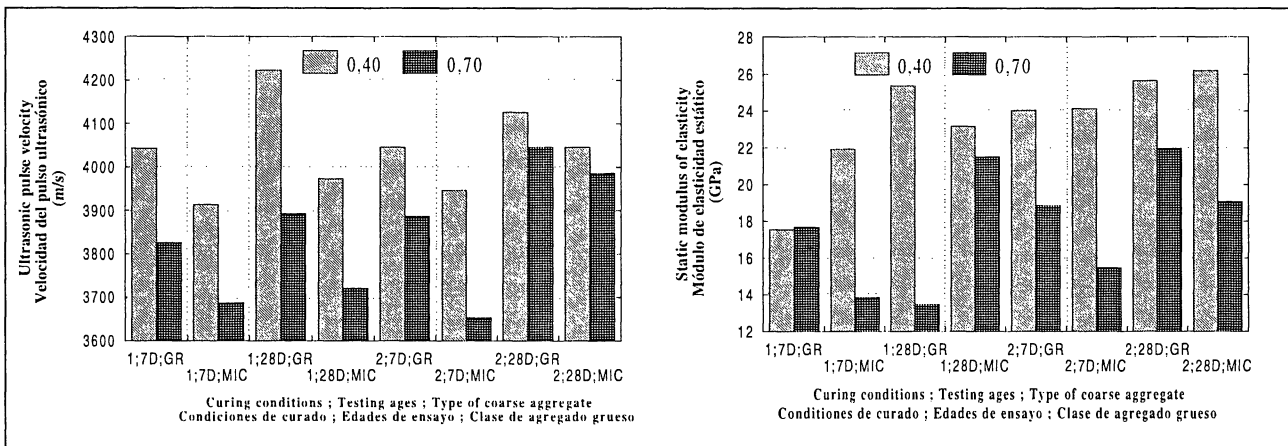


Figura 2a y 2b.- Influencia de la relación agua/cemento sobre la velocidad del pulso ultrasónico (izquierda) y sobre el módulo de elasticidad estático (derecha).

Figure 2a and 2b.- Influence of the water-cement ratio upon the concrete ultrasonic pulse velocity (on the left) and the static modulus of the elasticity (on the right).

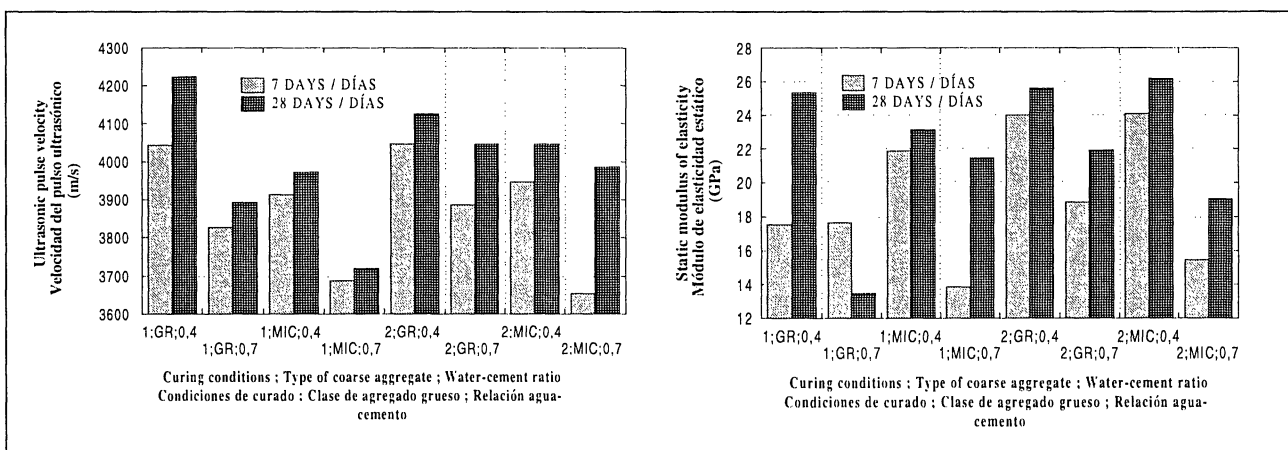


Figura 3a y 3b.- Influencia de la edad del hormigón sobre la velocidad del pulso ultrasónico (izquierda) y sobre el módulo de elasticidad estático (derecha).

Figure 3a and 3b.- Influence of the concrete age upon the concrete ultrasonic pulse velocity (on the left) and the static modulus of the elasticity (on the right).

De igual manera, como se ve en las Figuras 3a y 3b, la edad tiene un impacto sobre el incremento de todos los valores obtenidos. Hubo un 5% de incremento en la velocidad del pulso ultrasónico y 15% de incremento en el módulo de elasticidad estático de los elementos entre 7 y 28 días. Estos incrementos probablemente ocurren debido al desarrollo de las reacciones de hidratación, mayor formación de productos de hidratación y al efecto de relleno sobre la porosidad.

Es importante enfatizar la variación similar en el comportamiento de la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático encontrado entre las variables estudiadas. Cuando una determinada variable causa incremento en los valores de la velocidad del pulso ultrasónico, un incremento similar presenta el módulo de elasticidad estático. Estos hallazgos denotan la posible existencia de una correlación entre las dos propiedades.

Las Figuras 4a, 4b, 4c y 4d muestran las curvas de correlación entre los valores encontrados para la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático utilizando diferentes tipos de deformímetros para todo las clases de hormigón evaluados en este estudio.

La comparación entre los valores de módulo de elasticidad estático, obtenidos con deformímetros mecánicos compresómetro-expansómetro, y las velocidades de pulso ultrasónicos generaron la mejor

Likewise, as seen in Figures 3a and 3b, the age has an impact over the increment of all obtained values. There was a 5% increase in the ultrasonic pulse velocity and a 15% increase in the static modulus of the specimens from 7 to 28 days. These increases probably occurred due to the development of hydration reactions, formation of hydration products and the filler effect.

It's important to emphasize the similar variation in the behavior of the ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity found among the studied variables. Whenever a determined variable caused the increase in the pulse velocity values found in the study, a similar increase could be seen in the static modulus of elasticity. This finding proves the possibility of an existing correlation between the two properties.

Figures 4a, 4b, 4c and 4d show curves of correlation between the values found for the ultrasonic pulse velocity and static modulus of elasticity using different gauges for all type of concretes evaluated here.

The comparison between values of the static modulus of elasticity obtained with a mechanical device (compressometer-expansometer) and the ultrasonic pulse velocity generated the best correlation, with r^2

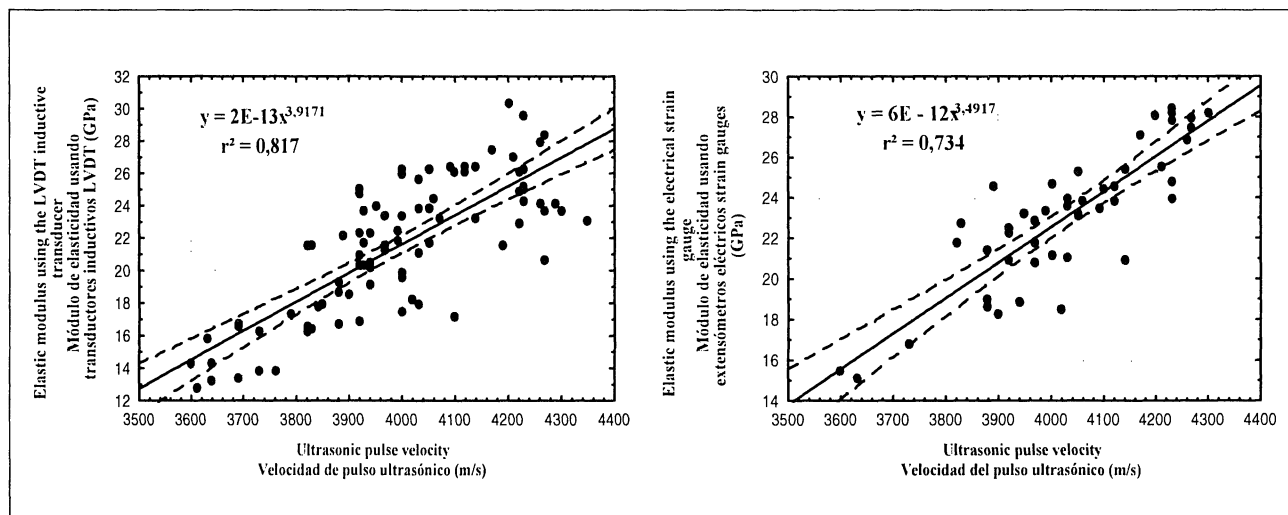


Figura 4a y 4b.- Curva que muestra la correlación entre los valores de velocidad de pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático usando transductores inductivos LVDT (izquierda) y curva que muestra la correlación entre la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático usando extensómetros eléctricos "strain gauges" (derecha).

Figure 4a and 4b.- Curve showing the correlation between the ultrasonic pulse velocity values and the static modulus of elasticity using a LVDT inductive transducer (on the left) and the curve presenting the correlation between the ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity using the electrical strain gauges (on the right).

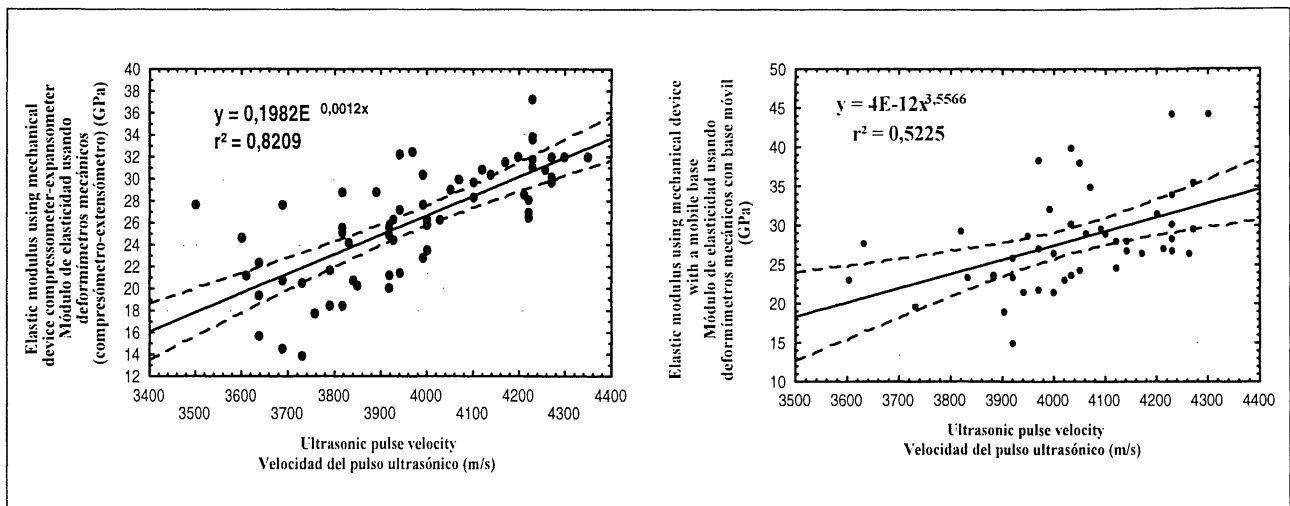


Figura 4c y 4d.- Curva que muestra la correlación entre los valores de velocidad de pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático usando deformímetros mecánicos (compresómetro-extensómetro) (izquierda) y curva que muestra la correlación entre la velocidad del pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad estático usando deformímetros mecánicos con base móvil (derecha).

Figure 4c and 4d.- Curve showing the correlation between the ultrasonic pulse velocity values and the static modulus of elasticity using mechanical device (compressometer-expansometer) (on the left) and the curve presenting the correlation between the ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity using mechanical device with a mobile base (on the right).

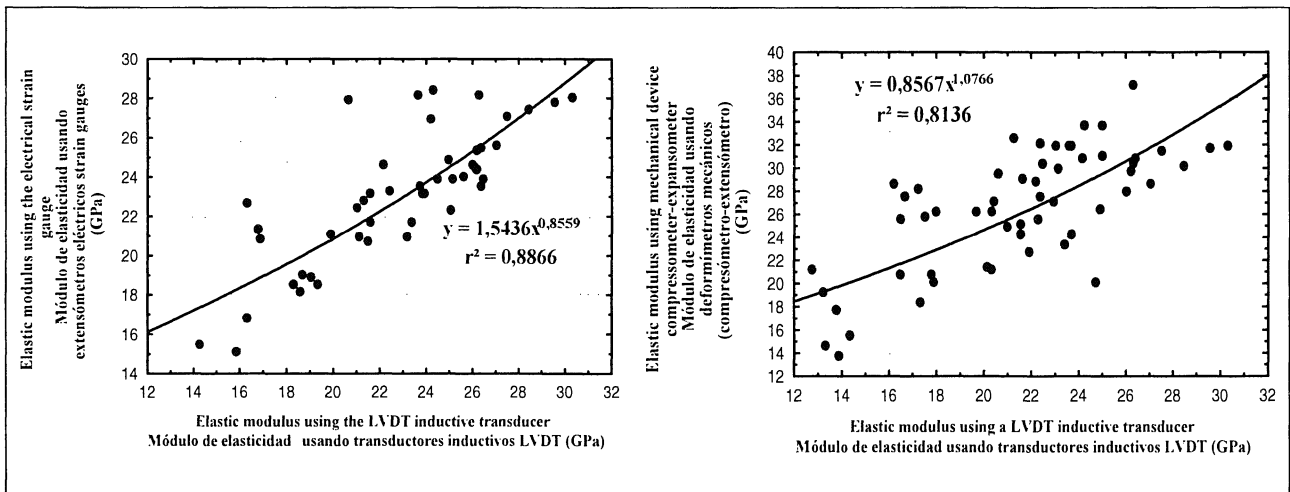


Figura 5a y 5b.- Curva que muestra la correlación entre los valores de módulo de elasticidad estático obtenido usando extensómetros eléctricos "strain gauges" y el módulo de elasticidad estático medido con LVDT (izquierda) y curva que muestra la correlación entre los valores de módulo de elasticidad estático obtenido usando deformímetros mecánicos (compresómetro-extensómetro) y el módulo de elasticidad estático medido con LVDT (derecha).

Figure 5a and 5b.- Curve showing the correlation between the static modulus of elasticity obtained using the electrical strain gauge and the static modulus of the elasticity measured by the LVDT (on the left) and the curve showing the correlation between the static modulus of elasticity obtained using mechanical device compressometer-expansometer and the static modulus of elasticity measured by the LVDT (on the right).

correlación, con valores de r^2 igual a 0,8209. La segunda mejor correlación con los valores de las velocidades del pulso ultrasónicos fue obtenida con el LVDT, con valor de r^2 igual a 0,817.

Las Figuras 5a, 5b y 5c muestran las curva de correlación entre los valores de módulo de elasticidad estático obtenidos con el LVDT comparados con las demás formas de medición del módulo empleadas en esa investigación.

values of 0,8209. The second best correlation was seen when employing the LVDT to measure the static modulus, showing that the r^2 was equal to 0.817.

On the other hand, Figures 5a, 5b and 5c illustrate the curves of correlation between the different scores for the static modulus of elasticity through the use of a LVDT inductive transducer and other types of device used in the present study.

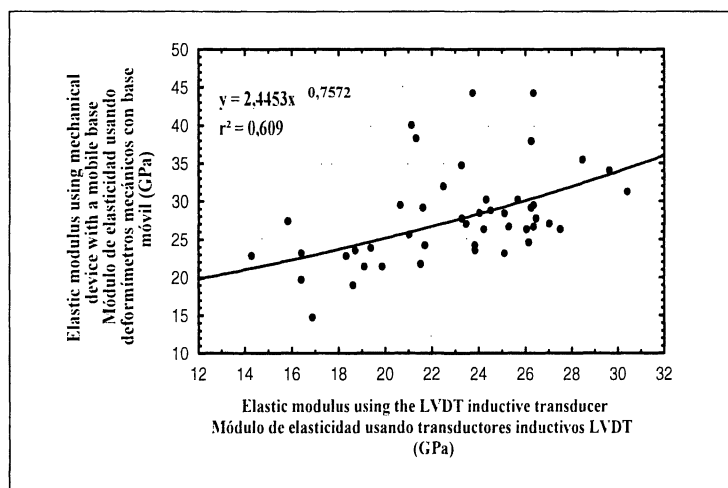


Figura 5c.- Curva que muestra la correlación entre los valores de módulo de elasticidad estático obtenido usando deformímetros mecánicos con base móvil y el módulo de elasticidad estático medido con LVDT.

Figure 5c.- Curve showing the correlation between the static modulus of elasticity obtained using the mechanical device and the curve with a mobile base and the static modulus of elasticity measured by the LVDT.

El análisis de las Figuras 5a, 5b, y 5c demuestra la existencia de diferencias en las mediciones del módulo de elasticidad estático en la medida que se usan diferentes tipos de deformímetros. Al comparar los deformímetros, los extensómetros eléctricos *strain gauges* y los LVDT resultan ser los más exactos, lo que se demuestra al analizar el coeficiente de determinación r^2 el cual fue igual a 0,89. Por otra parte, la curva resultante usando los deformímetros mecánicos (compresómetro-extensómetro) con un tablero digital, la curva resultante tiene un coeficiente de determinación r^2 igual a 0,81. Se aprecia en los resultados que al usar los LVDT con un aparejo de base móvil el coeficiente de determinación r^2 fue de 0,60. Ya que el coeficiente de determinación r^2 indica la dispersión existente entre los valores constantes graficados en los ejes "x, y" y la curva de correlación (7), el valor que más se acerque a 1 expresará la mejor correlación entre variables. Por lo tanto, del análisis de las Figuras 5a, 5b y 5c se puede concluir que la variabilidad encontrada, cuando se correlacionan las mediciones de módulo de elasticidad estático obtenidas usando los métodos estandarizados y los diferentes aparatos de medida de las deformaciones, es similar a la obtenida a través de la correlación de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico con las del módulo de elasticidad estático.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos muestran la aplicabilidad de los métodos ultrasónicos para evaluar el módulo de

The analyzes of Figures 5a, 5b and 5c points out the existing differences in the measurements of the static modulus of elasticity when different types of strain devices are used. When comparing the gauges that are considered the more accurate ones, such as the LVDT inductive transducer and the electrical extensometer strain gauge, one can notice a curve of correlation, where r^2 was equal to 0.89. On the other hand, the curve produced with the use of a mechanical device compressometer-extensometer with a digital reading yielded a tendency line where r^2 was equal to 0.81. Among the results found with the use of LVDT and the device with a mobile base, the curve r^2 was equal to 0.60. As the coefficient of determination r^2 indicates the scattering existing between the constant values in axes x and y and the curve of correlation (7), its value should have been about 1 to express a better ratio among the properties investigated here. Therefore, Figures 5a, 5b and 5c illustrates that the variability found, when one correlate the measurements for the static modulus of elasticity using the standardized method and different types of strain devices, is similar to that obtained through the correlation of the measures found for the ultrasonic pulse velocity and the static modulus of elasticity.

4. FINAL CONSIDERATIONS

The results obtained demonstrate the applicability of the ultrasonic method to evaluate the concrete static

elasticidad estático ya que es: 1) un método no destructivo y 2) el valor del coeficiente de correlación r^2 obtenido al correlacionar las curvas graficadas con los resultados del ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático usando los LVDT y la velocidad del pulso ultrasónico fueron mayores o muy cercanas a los valores de r^2 relacionados con los otros métodos de medición del módulo elástico de elasticidad.

modulus of elasticity since it: 1) is a non-destructive method and 2) the r^2 -values obtained by the correlation curves plotted between the essay of static modulus of elasticity using the LVDT and the ultrasonic pulse velocity were higher or very close to the r^2 -values related to the other types of static modulus of elasticity measurement methods.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) M. F. Cánovas, Patología e Terapia do Concreto Armado. Pini. São Paulo, 1988.
- (2) P. K. Mehta, P. J. M Monteiro, Concreto: propiedades e materiais. Pini, São Paulo, 1994.
- (3) A. Neville, J. Brooks, Concrete Technology. Longman, U. K., 1994.
- (4) A. Neville, Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete, ACI Materials Journal, V. 94, No. 1, jan-feb 1997, pp. 71-74.
- (5) M. G. Alexander, T. I. Milne, Influence of Cement Blend and Aggregate Type on Stress-Strain Behaviour and Elastic Modulus of Concrete, ACI Materials Journal, V. 92, No. 3, may-jun 1995, pp. 227-235.
- (6) J. D. Alves, Materiais de Construção, Ed. UFG/CEFET, Goiânia, 1999.
- (7) L. F. Nanni, J. L. Ribeiro, Planejamento e avaliação de experimentos. UFRGS, Porto Alegre, 1987.
- (8) NBR 8522. Concreto-Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama-Tensão-Deformação: Método de Ensaio, ABNT, Brasil, 1984.
- (9) NBR 8802. Concreto Endurecido-Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio, ABNT, Brasil, 1994.
- (10) A. C. Vasconcelos, S. E. Giammusso, O misterioso módulo de elasticidade. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40., 1998, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998. CD-ROM-Tabalho-090.

* * *