

# The influence of the physical properties of aggregates on the ultrasound pulse technique in predicting the compressive strength of concrete

**Rómel Solís Carcaño y Julio Baeza Pereyra**

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Apartado 150.*

*Administración 10 Cordemex, C.P. 97110. Mérida, Yucatán, México.*

*E-mails: tulich@tunku.uady.mx / bpereyra@tunku.uady.mx*

## Abstract

The ultrasound pulse technique has been used for more than 50 years, for measuring the quality of concrete elements. Among other applications, the technique has been used for predicting the compressive strength of concrete. This work presents regression models between the ultrasound pulse velocity, and the compressive strength of concrete cylinders, obtained from destructive testing. The results of this research point out that the sole use of the ultrasound technique can predict around 70% of the variability of the compressive strength in the case where the aggregates come from the same region of Mexico.

**Key words:** Concrete, non-destructive test, ultrasound pulse, compressive strength.

## Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto

### Resumen

La técnica de medición de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto ha sido usada por más de medio siglo para evaluar la calidad de este material. Entre otras aplicaciones, se ha utilizado para predecir la resistencia del concreto. En este trabajo se presentan los modelos de regresión obtenidos de las mediciones de velocidad en especímenes cilíndricos de concreto y de los valores alcanzados con su posterior destrucción en pruebas uniaxiales a la compresión. El análisis de los resultados nos permite concluir que la técnica de medición de la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto alcanza explicar alrededor de un 70% de la varianza en la resistencia de este material. Lo anterior para una muestra de concretos que fueron preparados con diferentes agregados de la misma región de México.

**Palabras clave:** Concreto, pruebas no destructivas, pulso ultrasónico, resistencia a la compresión uniaxial.

### Introducción

El método de medición de pulso ultrasónico ha sido usado desde hace aproximadamente cincuenta años en muchos países y día a día ha ido incrementando sus aplicaciones en el campo de

la tecnología del concreto como una alternativa de prueba no destructiva para este material.

La técnica se basa en la teoría de la propagación de las ondas compresionales en un medio infinito, homogéneo, isotrópico y elástico [1]. De acuerdo a esta teoría física, la velocidad de las

ondas depende principalmente de la densidad y de las características elásticas del medio que recorren, como se aprecia en la ecuación 1.

$$V = \sqrt{K \frac{E}{D}} \quad (1)$$

donde:

- V: es la velocidad de pulso ultrasónico
- E: es el módulo de elasticidad dinámico del medio
- D: es la densidad del medio.
- K: es una constante que depende de la relación de Poisson del material.

El comité 364 del ACI [2] en su guía para la evaluación de estructuras de concreto, ha recomendado la utilización de esta técnica para la determinación de las diferentes propiedades y condiciones físicas del concreto como material, tales como: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, agrietamiento, delaminación, estructura de panal, uniformidad del concreto, etc.

Una de las aplicaciones más comunes de la técnica ha sido la verificación del nivel de calidad de las estructuras de concreto sobre la base de correlacionar la velocidad de pulso con la resistencia a la compresión uniaxial. En este sentido, Malhotra [3] estableció un criterio de aceptación para el concreto, en el cual calificó al material como excelente si presenta velocidades de pulso arriba de los 4 575 metros por segundo, bueno con velocidad en el rango de 3 660 a 4 575, cuestionable si el pulso transita entre 3 050 y 3 660, pobre para velocidades entre 2 135 y 3 050 y finalmente muy pobre con mediciones por debajo de los 2 135.

Chung y Law [4] pusieron en duda este tipo de criterio de calificación para el concreto, ya que encontraron que pequeñas diferencias en la velocidad de pulso, en ocasiones reflejan diferencias relativamente grandes en la calidad de los concretos.

Lo anterior se debe a que son muchos los factores que influyen en la correlación de la velocidad con la resistencia del concreto. Sturup, Vecchio y Caratin [5] establecieron que tanto la velocidad de pulso como la resistencia están influenciados por los mismos factores, pero éstos pueden afectar a cada una de las dos variables en

diferentes medidas. Los factores más importantes que estos autores encontraron fueron: las propiedades de los componentes, las proporciones establecidas, las condiciones de curado, el contenido de humedad del concreto y la acción del deterioro ambiental.

Por su parte Anderson y Seals [6] encontraron que la relación agregados/cemento tienen un efecto significativo en la correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso, ya que cuando se varía esta razón se pueden generar grandes diferencias en los valores de la velocidad ultrasónica, debido a que el pulso es generalmente más rápido a través del agregado grueso que en el interior de la pasta de cemento; mientras que el mismo cambio en esta relación puede producir en la resistencia, apenas una pequeña diferencia o incluso un cambio en sentido inverso.

Muchos investigadores han encontrado que la relación entre la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión se ve afectada significativamente cuando se varía el tipo de agregado, manteniendo bajo control de laboratorio la mayoría de los otros factores, como son: tipo de cemento, proporciones, procedimiento de compactación y curado, contenido de humedad, etc. Por esto, autores como Jenkins [8] han llegado a la conclusión que debido a que no hay una correlación estándar entre la velocidad y la resistencia, la técnica no debería ser usada como un predictor de la resistencia del concreto; excepto en los casos en los que se haya establecido una correlación entre las dos variables para el tipo de concreto específico sujeto a evaluación.

De acuerdo a lo establecido arriba, Castellanos [9] estudió la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto, utilizando una muestra de agregados calizos triturados provenientes de la ciudad de Mérida, México; por su origen geológico, los agregados de esta región provienen de formaciones sedimentarias del Cenozoico de la Península de Yucatán. Logró obtener un coeficiente de determinación de 0,86 para la población estudiada, el cual representa una correlación estadística entre las variables, razonablemente buena.

En la presente investigación se buscó responder a las preguntas: ¿se mantiene el mismo

nivel de correlación si se mezclan en una población concretos preparados con agregados provenientes de diferentes bancos de extracción de la misma región de México?; ¿se puede obtener un modelo de correlación que se aplique en forma general a los concretos preparados con agregados esta región, en la que se comparte el origen geológico de la roca y los procedimientos de trituración utilizados para producir los agregados.

## Metodología

### Selección de los agregados

Los agregados que se utilizaron son producto de la trituración de piedra caliza, que es abundante en la Península de Yucatán, región en la que se llevó a cabo el estudio. Fueron seleccionados en base a una encuesta aplicada a constructores de esta región de México, buscando incluir, aquellos que tenían un mayor impacto en el mercado de consumo. El resultado de esta encuesta, el cual fue consistente con otros sondeos previamente reportados en el mismo entorno geográfico [10], definió los bancos de materiales que se incluyen en el presente trabajo; los mismos son referidos con las letras: A, B, C, D, E y F. A partir de esta selección se realizaron muestreos, tanto del agregado fino como del grueso almacenado en las instalaciones de estas plantas, según requerimiento de la norma mexicana vigente (NMX-C-030-ONNCCE).

### Caracterización de los agregados

Una vez seleccionados y muestreados los agregados, se realizaron los análisis necesarios para caracterizar sus propiedades físicas. En la Tabla 1 se muestran la pruebas de laboratorio realizadas y las normas seguidas.

### Diseño de las mezclas

Se estudiaron muestras de concreto que estuvieron incluidas dentro del intervalo de resistencias de diseño de  $150 \text{ kg/cm}^2$  (15,30 Mpa) a  $350 \text{ Kg/cm}^2$  (35,68 Mpa); el cual contiene los valores más usuales de resistencia especificada para las estructuras de concreto normal coladas o vaciadas in situ.

Las mezclas fueron diseñadas siguiendo los lineamientos señalados por el ACI, basados espe-

Tabla 1  
Estudios y normas establecidas para los agregados

Prueba	Norma
Granulometría.	NMX-C-077-ONNCCE
Absorción y de la masa específica del agregado grueso.	NMX-C-164
Absorción y de la masa específica del agregado fino.	NMX-C-165
Masa volumétrica.	NMX-C-073
Prueba de desgaste.	NMX-C-196
Contenido de humedad.	NMX-C-166

cíficamente en la relación agua/cemento (ACI-318R-89). Para los 2 primeros agregados, provenientes de los bancos A y B, se estudiaron 5 niveles de resistencia, mientras que para los cuatro restantes se optó por aumentar a 10 los niveles de resistencia, con la finalidad de mejorar la certidumbre de las relaciones inferidas entre las variables. El cemento utilizado fue el Portland Tipo I de marca nacional, fabricado de conformidad a la norma mexicana NMX-C-001.

### Elaboración y curado de los especímenes de prueba

A cada una de las 50 mezclas de concreto diseñadas y fabricadas en el laboratorio, se les determinó su revenimiento (norma NMX-C-156-ONNCCE). Para cada mezcla se moldearon 2 cilindros estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura (norma mexicana NMX-C-159); en total, se prepararon 100 cilindros.

El objetivo del presente estudio fue obtener información sobre la relación que existe entre la resistencia a la compresión uniaxial del concreto y la velocidad de pulso ultrasónico, midiendo ambas propiedades en el mismo material; de tal manera que luego los resultados pudieran ser utilizados como referencia en la evaluación de estructuras de concreto ya construidas. Es por ello que se decidió no seguir el método normalizado de curado en laboratorio, sino simular las condiciones

de exposición reales que enfrentan en sus primeras semanas la mayoría de las estructuras de concreto construidas en el entorno geográfico de esta investigación. Para esto se omitió la aplicación de los procedimientos ideales de curado: inmersión, riego, membrana de curado o cubierta de protección. La falta de un adecuado curado en un clima tropical húmedo es, sin duda, una mala práctica constructiva que tiene mucho arraigo, la cual se ha basado en la confianza de que la alta humedad relativa del aire puede suplir este aspecto de gran importancia para el proceso químico de hidratación del cemento [11]. Sin embargo, otros factores adversos como son la alta evaporación, la velocidad del viento y la propia fluctuación del porcentaje de humedad durante el día, dejan al azar la influencia del clima en el curado.

Con la intención de reproducir las condiciones antes mencionadas, todos los especímenes fueron colocados a la intemperie al día siguiente de su moldeo; quedando expuestos a la humedad ambiental, con una relativa protección que impidió la caída directa de la precipitación pluvial. Esta condición fue considerada similar en cuanto a condiciones de curado a la que presentan las estructuras durante sus primeras semanas de vida; época en la cual aún no se han construido los muros de mampostería, ni se han colocado las ventanas que proporcionan cierto aislamiento a los elementos estructurales contra el clima. En este estado de exposición ambiental permanecieron los especímenes hasta la fecha de sus respectivos ensayos. Cabe observar que el hecho de simular las condiciones de curado típicas de obra no significa que los cilindros representen con suficiencia la calidad del concreto colado in situ, ya que éste se ve afectado por diferentes condiciones tales como: los controles ejercidos durante la fabricación, transporte y colocación del concreto, tipo de consolidación, efecto de pared de las cimbras, maniobras de descimbrado, etc.

### Pruebas efectuadas

Los ensayos al concreto endurecido se realizaron a 28 días, edad de referencia para la evaluación del  $f_c$  resistencia de diseño; la primera acción fue medir y pesar los especímenes. Para la prueba de pulso ultrasónico se siguió la norma de la ASTM C597; el equipo utilizado fue el Medidor de Pulso (V Meter, modelo 4902), con trans-

ductores de frecuencia nominal de 54 KHz, el cual permite medir el tiempo de tránsito de un pulso ultrasónico a través de la masa de concreto con precisión de una décima de microsegundo; en la colocación de los transductores se utilizó el arreglo directo, acoplándolos a las bases del cilindro. Posteriormente, las superficies transversales extremas de los cilindros se cabecearon con azufre (norma mexicana NMX-C-109) y luego se sometieron a la prueba destructiva del ensayo de compresión uniaxial (norma NMX-C-083). Los promedios de los valores (de resistencia y velocidad) medidos en cada pareja de cilindros fueron tomados como representativos de cada uno de los diferentes concretos fabricados y probados.

### Elaboración de base de datos

Se conformó una base de datos que incluyó lo siguiente:

- Para cada una de las 6 muestras de agregados: los resultados de los análisis granulométricos, los porcentajes de finos que pasan la malla N° 200, las masas volumétricas, las masas específicas, y el porcentajes de absorción todo lo anterior tanto para los agregados finos, como para los gruesos; el módulo de finura de la arena; y el tamaño máximo de agregado y porcentaje de desgaste, de la grava.
- Para cada una de las 50 mezclas: la resistencia de diseño, los pesos de los materiales dosificados y las relaciones en peso: agua/cemento, arena/cemento, grava/cemento y agregados/cemento. Asimismo el resultado de la medición del revenimiento o asentamiento.
- Para cada uno de los 100 cilindros de concreto endurecido: la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión, el peso volumétrico, la edad de prueba y el origen de los agregados (planta de trituración).

### Análisis estadístico

Las variables estudiadas fueron la resistencia a la compresión uniaxial y velocidad de pulso ultrasónico (que en forma abreviadas son denominadas en este escrito como **la resistencia y la velocidad**); sobre éstas posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal. A través de este

análisis se determinó el grado de relación y la significancia estadística y entre las variables [12]. Los modelos que se probaron para efectuar el ajuste analítico de los datos experimentales fueron: el lineal, el logarítmico, el cuadrático, el cúbico, y el exponencial.

El coeficiente de determinación  $r^2$  se tomó como la medida de la bondad del ajuste de la relación de dependencia entre las variables; este parámetro nos permitió definir el mejor modelo de aproximación, mediante el método de los mínimos cuadrados, y representa la razón entre la variación estimada y la variación total. Por definición [13], si  $r^2$  es igual a 1,00 la predicción de la variable dependiente es perfecta, mientras que si  $r^2$  es igual a 0,00 la relación entre las variables está sólo dispuesta por el azar.

Las ecuaciones de regresión fueron evaluadas para probar su significancia estadística por medio del análisis de variancia haciendo uso de la razón F de Snedecor-Fisher. Se utilizó un nivel de significancia del 0,01, el cual representa la probabilidad de que el valor del  $r^2$  haya surgido por el azar de un 1% [14]. Las operaciones del análisis estadístico fueron realizadas por medio del paquete SPSS® 10.0.

## Resultados

Se contó con 6 grupos de concretos, que fueron producto de la variación en la fuente de origen de los agregados. Para los primeros 2 agregados (A y B) se tuvieron 5 datos; cada dato contiene un valor de la variable resistencia medida en forma destructiva, la cual fue manipulada experimentalmente dentro del rango de valores prefijados; y un valor de la variable velocidad, que fue medida en el mismo espécimen de concreto, antes de la aplicación de las cargas. Y para los restantes 4 agregados (C, D, E y F) se contó con 10 datos que abarcaron el mismo rango de valores de la resistencia.

Con estos valores se realizó una exploración para determinar cuáles modelos de curva de ajuste representaron mejor la correlación entre las variables de acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente. Tomando el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) como criterio para juzgar la fuerza del ajuste de los diferentes modelos matemáticos, se encontró que las mejores curvas, para los

datos que se obtuvieron en el laboratorio, fueron la exponencial y la cúbica. Las ecuaciones 2 y 3 muestran sus ecuaciones representativas.

Curva exponencial:

$$R = a e^{bV} \quad (2)$$

Curva cúbica:

$$a + bV + cV^3 \quad (3)$$

En la Tabla 2 se presentan los coeficientes de determinación calculados ( $r^2$ ) para cada curva de regresión, así como los valores de las constantes incluidas en los modelos. En los 6 casos estudiados se encontró una fuerte dependencia entre las 2 variables para ambos modelos, estando los valores de  $r^2$  comprendidos en el rango de 0,904 a 0,994.

En cada una de las regresiones calculadas se probó la significancia estadística por medio de un análisis de varianza. En todos los casos el valor de la F calculada resultó mayor que la F crítica para un nivel de significancia de 0,01 ( $\alpha$ ); lo anterior significa una probabilidad muy baja de que la relación observada entre las variables se haya dado por el azar. Estos valores aparecen también en la Tabla 2.

En las Figuras del 1 al 6 se han graficado las curvas de ajuste cúbicas para los concretos preparados con los diferentes agregados; en las mismas gráficas se incluyen los datos medidos en laboratorio. La fuerza de la correlación entre la resistencia y la velocidad es evidente, y en las citadas figuras se puede apreciar visualmente.

Haciendo uso de los parámetros que definieron las curvas de ajuste cúbicas, se calcularon los residuales que resultaron entre los valores de las resistencias estimada y medida, para cada uno de los valores de la velocidad medida en laboratorio. Los residuales representan el error en la estimación de la resistencia, y nos dieron una medida de la subvaloración o sobrevaloración en la que se podría incurrir al utilizar los modelos matemáticos obtenidos, para pronosticar la resistencia del material en base a la velocidad de pulso. En la Tabla 3 se presentan los máximos valores que se calcularon para las subvaloraciones y para las sobrevaloraciones en la resistencia; en el primer caso el mayor error fue de un 10% de la resistencia medida, y en el segundo

Tabla 2  
Curvas de ajuste más satisfactorias para concretos preparados con los 6 agregados estudiados

Agregado	Curva	$r^2$	F (Snedecor-Fisher)		Términos de Ajuste		
			Calculada	Crítica $\alpha=0,01$	a	b	c
A	Exponencial	0,993	184,99	30,82	0,3396	0,0017	
	Cúbica	0,994	448,03	99,00	2 075,67	-0,9128	2,8721E-8
B	Exponencial	0,904	28,41	30,82	0,6243	0,0016	
	Cúbica	0,977	41,82	99,00	-5 538,12	2,0957	-3,9270E-8
C	Exponencial	0,939	122,76	8,65	0,0360	0,0023	
	Cúbica	0,965	95,54	9,55	-4 949,73	1,7012	-2,4148E-8
D	Exponencial	0,958	183,90	8,65	0,1798	0,0018	
	Cúbica	0,951	68,41	9,55	2 459,09	-1,0632	3,1962E-8
E	Exponencial	0,926	100,55	8,65	1,5061	0,0014	
	Cúbica	0,948	63,29	9,55	-4 647,81	1,8199	-3,5974E-8
F	Exponencial	0,920	80,97	8,65	0,5754	0,0016	
	Cúbica	0,904	28,49	9,55	4 415,49	-1,8463	5,1934E-8

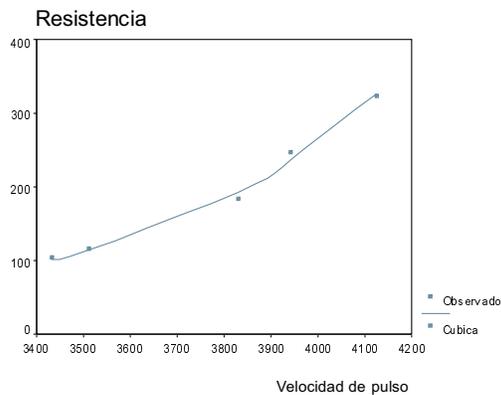


Figura 1. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado A.

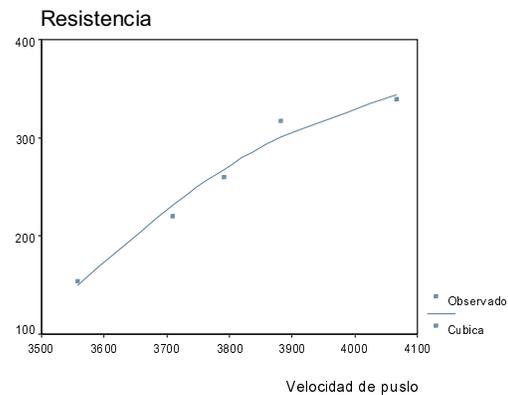


Figura 2. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado B.

caso fue de un 13%. En realidad, la principal preocupación sería incurrir en una sobrevaloración de la calidad del material, ya que eso no llevaría a cometer un error tipo I, en el cual podríamos aceptar un material que no cumpla con el requerimiento de resistencia necesario, con el consecuente del riesgo estructural.

Para ejemplificar lo anterior, supóngase que la resistencia real obtenida por prueba des-

tructiva fue  $200 \text{ Kg/cm}^2$ ; si estimamos las resistencias en base a mediciones de velocidad con los con los modelos obtenidos, podríamos obtener estimaciones sobrevaloradas de la resistencia de hasta:  $210 \text{ Kg/cm}^2$  (5% para agregados A),  $206 \text{ Kg/cm}^2$  (3% para B),  $224 \text{ Kg/cm}^2$  (12% para C),  $218 \text{ Kg/cm}^2$  (9% para D),  $216 \text{ Kg/cm}^2$  (8% para E) y  $226 \text{ Kg/cm}^2$  (13% para F). Los valores anteriores pueden ser considerados dentro la variabilidad esperada en la medición de la propiedad me-

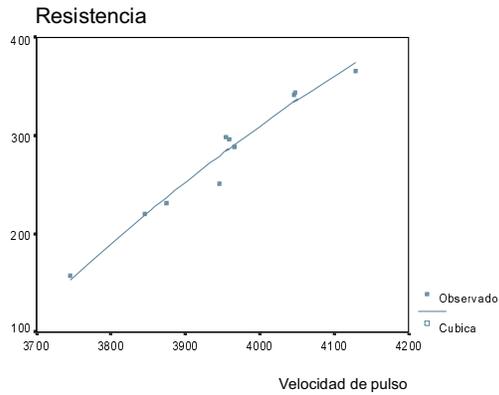


Figura 3. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado C.

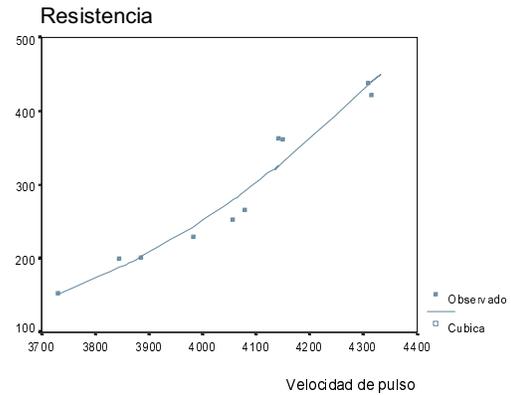


Figura 4. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado D.

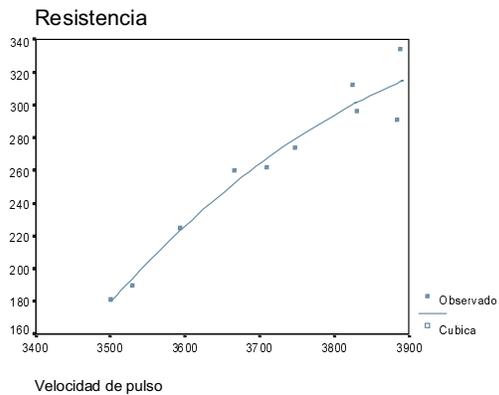


Figura 5. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado D.

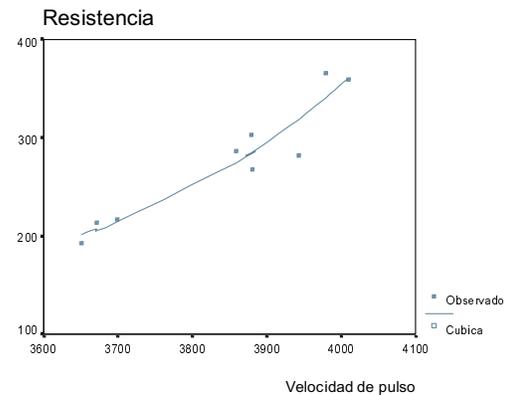


Figura 6. Curva de ajuste cúbica para concretos preparados con agregado E.

**Tabla 3**  
Errores en la estimación de la resistencia con base en las curvas de ajuste calculadas por agregado

Agregado	Máxima sobrevaloración de la resistencia		Máxima subvaloración de la resistencia	
	Diferencia de resistencia (real - estimada) Kg/cm <sup>2</sup>	% respecto a la resistencia real	Diferencia de resistencia (real - estimada) Kg/cm <sup>2</sup>	% respecto a la resistencia real
A	-8	5%	+10	4%
B	-8	3%	+18%	6%
C	-29	12%	+13	4%
D	-24	9%	+37	10%
E	-22	8%	+20	6%
F	-37	13%	+25	7%

cánica del material, atribuible a las diferentes fuentes de variación del propio material y de ejecución de las pruebas, por lo que la utilización de los modelos puede considerarse factible.

Los modelos anteriores pudieran ser utilizados para evaluar concretos preparados con los agregados específicos del estudio; sin embargo, en ocasiones no se tiene información sobre el origen de los materiales, principalmente sobre los agregados, o bien éstos se adquirieron con más de un proveedor. Por lo anterior, el siguiente paso fue agrupar en una sola población los datos obtenidos de los concretos preparados con las 6 muestras de agregados. En este caso se contó con 50 datos.

Se volvieron a probar los diferentes modelos matemáticos para buscar las mejores curvas de ajuste. La Tabla 4 muestra los parámetros de los modelos lineal, exponencial y cúbico. La mejor curva, de acuerdo a los datos experimentales fue la cúbica, aunque en este caso la dispersión de los datos provoca poca diferencia entre los modelos; se aprecia que aún el modelo lineal propor-

ciona un grado de ajuste similar a la curva cúbica. Las ecuaciones representativas de los modelos corresponden a las ecuaciones 2 y 3 –antes mostradas– y la 4, que se presenta a continuación:

Modelo lineal:

$$R = a + bV \quad (4)$$

La Figura 7 muestra la curva de ajuste cúbica, así como los datos experimentales para todos los concretos. Se puede apreciar la mayor dispersión de los datos, aunque sin embargo, se aprecia que se alinean notablemente aquellos que corresponden a concretos preparados con el mismo agregado.

En la Tabla 5 se presentan las máximas sobrevaloraciones y subvaloraciones en las que se incurren utilizando el modelo general de correlación para estimar la resistencia. En este caso, los máximos valores de los errores incurridos sobrevalorando al material son en 3 de los 6 casos magnitudes muy altas (del 39% al 45%). De tal manera que utilizar el modelo de ajuste general,

Tabla 4  
Curvas de ajuste más satisfactorias para la población de concretos estudiados

Agregado	Curva	$r^2$	F		Términos de Ajuste		
			Calculada	Crítica $\alpha=0,01$	a	b	c
Proveniente de 6 bancos	Lineal	0,699	109,32	5,05	-937,60	0,3112	
	Exponencial	0,670	95,30	5,05	1,9576	0,0013	
	Cúbica	0,702	54,14	5,05	-236,02	0,0381	6,0846E-9

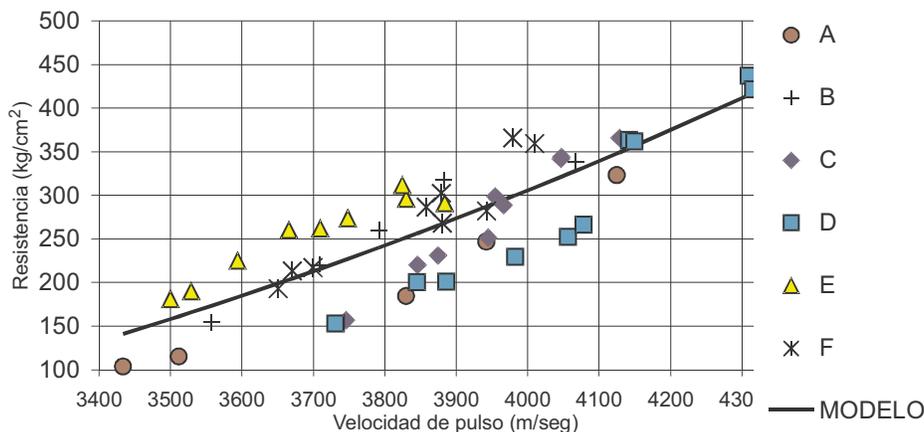


Figura 7. Curva de ajuste cúbica para todos los concretos estudiados.

Tabla 5  
Mayores valores de los errores en la estimación de la resistencia  
con base en la curva de ajuste general

Agregado	Máxima Sobrevaloración de la Resistencia		Máxima Subvaloración de la Resistencia	
	Diferencia de resistencia (real - estimada) Kg/cm <sup>2</sup>	% respecto a la resistencia real	Diferencia de resistencia (real - estimada) Kg/cm <sup>2</sup>	% respecto a la resistencia real
A	-45	39%	0	0%
B	-19	12	+50	16
C	-69	44%	+23	7%
D	-69	45%	23	5%
E	0	0%	57	22%
F	-6	3%	67	18%

para los concretos preparados con cualquier agregado de piedra caliza triturada de la región, puede llevar a errores fuera de cualquier límite aceptable en la ingeniería.

De la Figura 7 podemos apreciar que para un mismo valor de resistencia se midieron velocidades de pulso dentro de un amplio rango; por ejemplo para 250 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia las velocidades medidas (o en su caso estimadas con las curvas de ajuste particular por agregado) fueron: 3 660 m/s (agregado E), 3 750 m/s (agregado B), 3 801 m/seg (agregado F), 3 892 m/s (agregado C), 3 973 m/s (agregado A) y 3 996 m/s (agregado D).

Analizando las propiedades físicas de los agregados se pueden observar algunas tendencias que pudieran relacionar la velocidad de pulso con la densidad y la absorción de la arena y la grava; y con el porcentaje de desgaste de la grava. En las Figuras 8, 9 y 10 los ejes de las ordenadas miden estas propiedades de los agregados; y en el eje de las abscisas se han ordenado los agregados -de izquierda a derecha- según aumentan la velocidad de pulso (en los concreto preparados con ellos), de acuerdo a lo observado en la Figura 7.

En la Figura 8 se aprecia una tendencia a incrementar la densidad, tanto de la arena como de la grava, cuando los agregados se ordenan según la velocidad medida en el concreto. Compar-

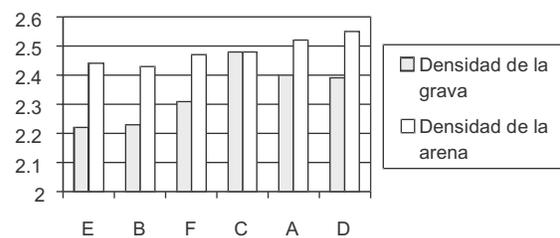


Figura 8. Influencia de la densidad de los agregados en la velocidad de pulso.

tamiento similar, pero en sentido inverso se observa en la Figura 9, con relación al porcentaje de absorción de ambos tipos de agregados. En la Figura 10 se ve una disminución del porcentaje de desgaste en la grava en relación a incrementos en la velocidad. Densidad, absorción y desgaste son propiedades altamente asociadas a la calidad del agregado; en este análisis podemos notar que mientras mejores índices muestran los agregados en esas propiedades el pulso ultrasónico se transmite con mayor velocidad, en concretos que presentan la misma resistencia a la compresión uniaxial. Esto se explica debido a que las propiedades elásticas del concreto mejoran en la medida que los agregados presentan mejores índices de calidad asociados a características tales como la densidad, la absorción y el desgaste.

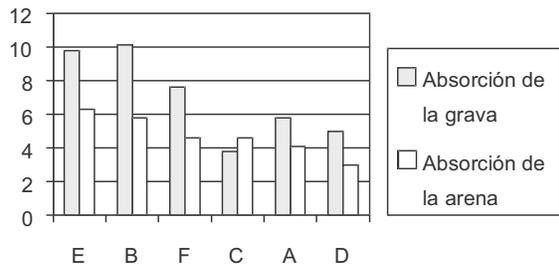


Figura 9. Influencia de la absorción de los agregados en la velocidad de pulso.

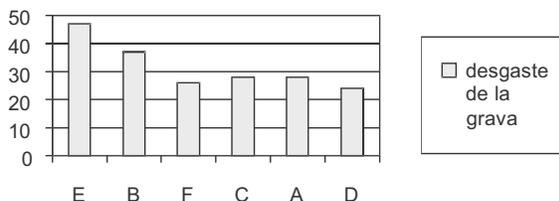


Figura 10. Influencia del porcentaje de desgaste de la grava en la velocidad de pulso.

## Discusión

En la presente investigación se obtuvieron 6 modelos de regresión correspondiente a concretos preparados con diferentes agregados calizos de roca triturada, dentro de la misma región de México; los coeficientes de determinación de las respectivas curvas de ajuste para el mejor modelo –curva cúbica– variaron entre 0,904 y 0,994. Ferreira, Castro y colaboradores [15] probando concretos preparados con 3 diferentes agregados, en los que hicieron variar la resistencia de la roca madre –entre 95 kN y 180 kN–, obtuvieron en Brasil, coeficientes de determinación de 0,90, 0,71 y 0,69 para tres modelos de regresión entre las mismas variables. En Argentina, Miretti, Grether y colaboradores [16] realizaron estudios de correlación bivariada entre las mismas dos variables utilizando dos diferente agregados: piedra chancada granítica y canto rodado silíceo. Para el primer agregado la  $r^2$  fue de 0,280, y para el segundo de 0,927 –utilizando un modelo exponencial.

Cuando reunimos en un único grupo los 50 concretos preparados con los 6 agregados, tuvimos decremento en el coeficiente de determina-

ción a 0,702. Mientras que para Ferreira, Castro y colaboradores el valor de  $r^2$  para toda su población fue solamente de 0,394. Para Miretti, Grether y colaboradores la  $r^2$  fue de 0,358 cuando trabajaron un modelo general sin discriminar los concretos por su tipo de agregado. Aun cuando en nuestro estudio, la disminución de este parámetro no fue tan drástica ya que los agregados fueron del mismo tipo, el modelo general tiene escasa confiabilidad para su utilización con fines de evaluación de estructuras, sin conocimiento previo del origen de los agregados.

De acuerdo a nuestros resultados, mientras mejores propiedades físicas tuvieron los agregados –en términos de densidad, absorción y resistencia al desgaste– se midieron mayores valores de la velocidad de pulso para un mismo nivel de resistencia a la compresión en el concreto. Ferreira, Castro y colaboradores obtuvieron velocidades de pulso entre 3 410 m/s y 4 070 m/s cuando la resistencia de la roca madre de los agregados fue de 95 kN; velocidades entre 4 120 m/s y 4 250 m/seg cuando la resistencia de la roca fue de 120 kN; y velocidades entre 4 190 m/s y 4 390 m/s cuando la resistencia de la roca fue de 180 kN; lo anterior para las mismas dosificaciones de los materiales componentes del concreto. Sus resultados muestran la misma tendencia a incrementar la velocidad del pulso a través del concreto, cuando los agregados tienen mayor calidad.

## Conclusiones

Aunque estadísticamente las variables mostraron una fuerte asociación, el modelo de regresión, que incluyó la población total de concretos estudiados, no puede ser utilizado para predecir la resistencia del concreto con un grado de confianza satisfactorio, a partir únicamente de la medición de la velocidad de pulso. El coeficiente de determinación obtenido ( $r^2 = 0,702$ ), significa que la variación en la resistencia a la compresión que está siendo explicada por medio de la velocidad de pulso es aproximadamente de un 70%, siendo el porcentaje restante producto de otras variables, tales como las propiedades físicas de los agregados y las proporciones definidas de los componentes del concreto, factor que en este trabajo no se analizó.

A pesar que las propiedades de los agregados utilizados en este estudio fueron muy similares, ya que tienen en común el origen geológico de la roca madre y el procedimiento industrial de trituración, se concluyó que no se puede utilizar un modelo general de correlación entre la resistencia y la velocidad de pulso, aun para una misma región geográfica. Cualquier modelo que pretenda ser general deberá incluir un componente que varíe en función de las propiedades físicas de los agregados, tales como densidad, absorción, resistencia, etc., y probablemente otro que varíe en función de la relación entre los componentes del concreto.

Los resultados de este estudio pueden ser interpretados afirmando que concretos con la misma velocidad de pulso pueden tener diferencia significativa en su resistencia, como producto de otras fuentes de variación, presentes aun cuando se utilizó el mismo tipo de agregado en la región del estudio.

### Referencias Bibliográficas

1. Malhotra V. M., Carino N. J.: "Handbook on nondestructive testing of concrete". CRC Press, USA, 1991, pp 171.
2. ACI Committee 364: "Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation". ACI Materials Journal, Vol. 90, (1993), pp 475-479.
3. Malhotra V. M.: "Non destructive methods for testing concrete". Department of energy, mines and resources. Ottawa, Canada, Monograph 875, (1985), pp 34-35.
4. Chung H., Law K. S.: "Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique". Concrete International Design and Construction ACI, October, (1983), pp 42-47.
5. Sturup V. R., Vecchio F. J., Caratin A.: "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength". Non destructive testing of concrete ACI SP 82-11, Ontario Canada, (1982), pp 201-207.
6. Anderson D, Seals R.: "Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength". Journal of the American Concrete Institute. March-April, n° 2, (1981), pp 116-119.
7. Facaoaru I.: "Non destructive testing of concrete in Romania". Non Destructive Testing of Concrete and Timber. ICE Bucharest, Romania, (1969), pp 40-42.
8. Jenkins R. S.: "Non destructive testing as evaluation tool". Concrete International Design and Construction ACI, February, (1985), pp 22-25.
9. Castellanos G.: "Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad del concreto hidráulico". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán. (1985), pp 218-230.
10. Cerón M., Duarte F., Castillo W.: "Propiedades físicas de los agregados pétreos de la ciudad de Mérida". Boletín Académico de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mayo-Agosto, (1996), pp 27-29.
11. Moreno, E.: "La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto". Ingeniería, Revista académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Mayo-Agosto, (2000), pp 46-47.
12. Naghi M.: "Metodología de la investigación". Editorial Limusa, México, (1990), pp 312-315.
13. Kerlinger F.: "Investigación del comportamiento". Interamericana, México, (1975), pp 423-426.
14. Elorza H.: "Estadística para las ciencias sociales y del comportamiento". Oxford, México, (2000), pp 446-448.
15. Ferreira A., Castro P., Protasio F.: "Application of NDT to concrete strength estimation". NDTISS'99 International Symposium on NDT, UFSM Santa Maria, RS, Brazil. (1999).
16. Miretti R, Grether R., Passerino C. y Carrasco M.: "Evaluación de hormigones mediante ultrasonido/esclerometría. Revista Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile. Vol. 17, Jul-Dic 1998 pp. 43.

Recibido el 16 de Abril de 2001

En forma revisada el 10 de Febrero de 2003