

# Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados

Rómel G. Solís Carcaño<sup>1</sup>, Éric Iván Moreno<sup>2</sup> y William R. Castillo Pak<sup>3</sup>

## RESUMEN

La velocidad ultrasónica se empezó a desarrollar como técnica para probar materiales desde hace medio siglo. En la actualidad, es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su simplicidad, versatilidad y repetibilidad. El carácter heterogéneo del concreto y el hecho de que las estructuras con este material sean, la mayoría de las veces, construidas sin estricto control industrial, provocan gran variabilidad en sus propiedades físicas; lo anterior da lugar a que no exista un único valor de la velocidad para cada valor de la resistencia a la compresión de este material. El objetivo del estudio fue identificar variables adicionales a la velocidad que expliquen la varianza independiente en la resistencia. Experimentalmente se manipularon tres variables: la fuente de origen de los agregados, la relación agua/cemento (A/C) y la relación entre la grava y la arena. Se encontró que la A/C fue la principal fuente de varianza, tanto en la velocidad como en la resistencia, y por lo tanto a ella se puede atribuir la correlación entre estas variables. Por otro lado, las principales fuentes de dispersión en esta correlación fueron el índice de calidad de los agregados, variable que fue definida en base a las principales propiedades de los agregados mismos, y la cantidad de agua de mezclado.

**Palabras Clave:** Agregados, calidad, concreto, resistencia, velocidad de pulso ultrasónico.

---

## INTRODUCCIÓN

La medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá (Malhotra y Carino 1991) y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio.

Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma

de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh (Rose 1999). La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material.

De los estudios realizados en Canadá, Malhotra (1985) publicó un criterio de aceptación del concreto sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica. La clasificación del concreto en categorías con base a intervalos de velocidad se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

Velocidad ultrasónica, $v$ (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4\ 575$	Excelente
$4\ 575 > V > 3\ 660$	Bueno
$3\ 660 > V > 3\ 050$	Cuestionable
$3\ 050 > V > 2\ 135$	Pobre
$V < 2\ 135$	Muy pobre

En muchos países (Sturup et al. 1984; Anderson y Seals 1981), y por muchos años, se han realizado estudios de correlación con la intención de obtener modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto en base a la velocidad ultrasónica (estas variables, en adelante, se mencionarán como la resistencia y la velocidad); como resultado de esto, se han obtenido múltiples modelos diferentes, debido principalmente al carácter compuesto del material y la falta de controles rígidos en los procesos constructivos. Los principales factores que afectan la correlación están en función de las diferencias en las propiedades de los agregados utilizados, así como también en las diferentes proporciones relativas entre los agregados y la pasta de cemento —fases que presentan diferencias en sus propiedades elásticas.

Lo anterior no le resta valor a la técnica, pero hace obligado realizar estudios particulares tomando en cuenta el tipo de agregados que se utilizan en la región. En Yucatán, los agregados son producidos por medio de la trituración de roca caliza que se extraen de mantos superficiales —con profundidades que van entre 1 y 7 metros— y que geológicamente corresponden a formaciones sedimentarias del Cenozoico.

En 1985, Castellanos, en un trabajo exploratorio, estudió la correlación entre la velocidad y la resistencia utilizando concretos preparados con un agregado con propiedades físicas promedio, respecto a la variabilidad que se da en Yucatán. La curva de ajuste exponencial que obtuvo (concretos curados al ambiente por 28 días) tuvo un coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0,94 (Figura 1); después de obtener esta alta correlación, surgió la pregunta sobre si este modelo tendría aplicación general para los

concretos de la región preparados con cualquier agregado calizo triturado.

Posteriormente, Solís et al. (2003) obtuvieron una curva de regresión exponencial con una  $r$  de 0,82 para concretos preparados con 6 diferentes muestras de agregados calizos triturados que se escogieron entre los más utilizados en la misma región (Figura 2). Aunque en términos estadísticos, un coeficiente como el que se obtuvo significa que las variables tienen una fuerte relación, en términos ingenieriles la dispersión que se produjo entre los datos experimentales es demasiado grande para poder aplicar el modelo. La respuesta a la interrogante planteada arriba fue que no se podía usar un único modelo bivariado entre la velocidad y la resistencia, aun cuando los concretos fueran preparados con el mismo tipo de agregado.

En el experimento de Castellanos las propiedades elásticas de los agregados permanecieron constantes —ya que se utilizó un único agregado— y se hicieron variar las proporciones de los componentes del concreto —vía la aplicación del método de dosificación del ACI; el análisis estadístico mostró que gran parte de la varianza de la resistencia podía ser explicada por medio del cambio de la velocidad. Por su parte, en el trabajo de Solís et al. se hicieron variar en forma simultánea las propiedades elásticas de los agregados —ya que se utilizaron seis agregados diferentes— y las proporciones de los componentes del concreto —vía el método del ACI; de aquí se pudo concluir que la variación en los agregados introdujo una varianza en la resistencia que la velocidad por sí misma no puede explicar.

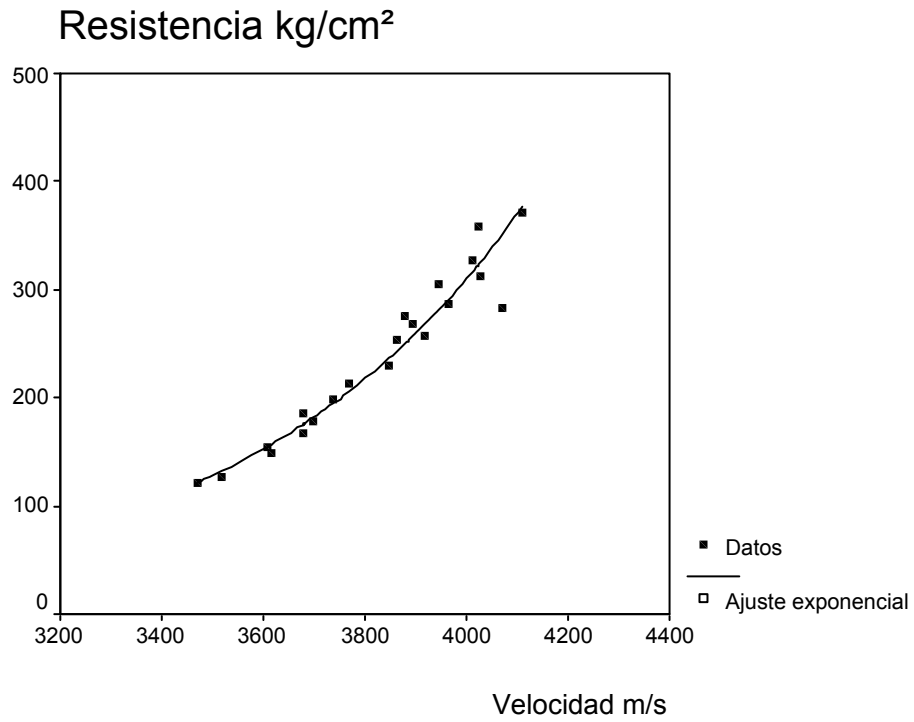


Figura 1. Datos y curva de ajuste velocidad-resistencia para concretos preparados con un agregado calizo triturado con características promedio de Yucatán (Castellanos 1985).

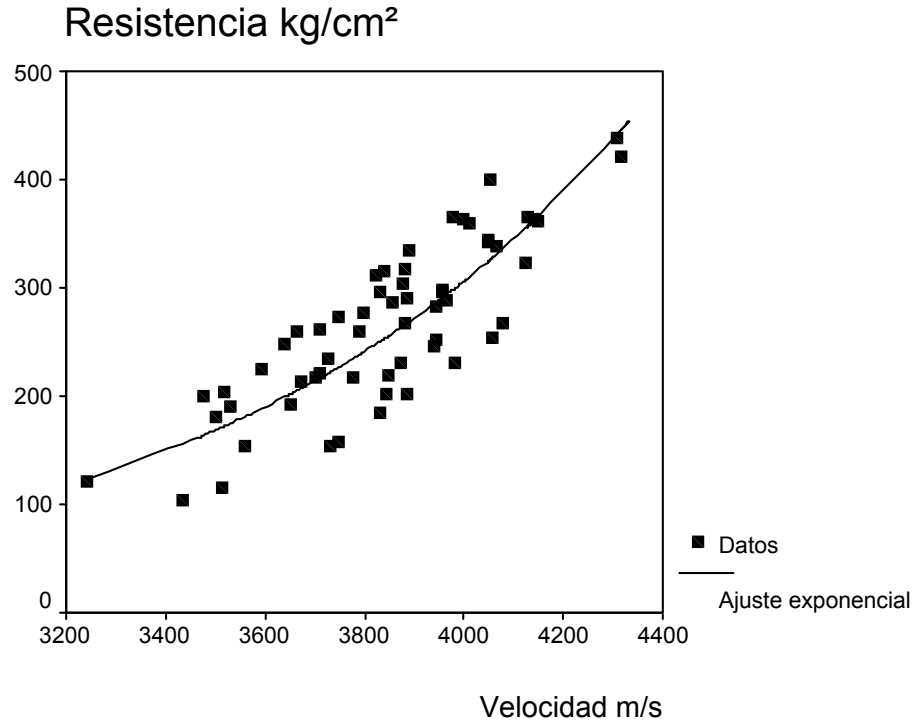


Figura 2. Datos y curva de ajuste velocidad-resistencia para concretos preparados con 6 agregados de la región (Solís et al. 2003).

El objetivo de la presente investigación fue identificar las fuentes de la varianza en la resistencia que no puede ser explicada por la variación de la velocidad en un modelo bivariado; y de aquí obtener un modelo predictivo de la resistencia que incluya además de la velocidad, algunas características físicas de los agregados, y/o algún parámetro de los proporcionamientos de los componentes.

## METODOLOGÍA

En esta investigación se probaron concretos que fueron preparados con 6 diferentes muestras de agregados provenientes de bancos situados en la periferia de la ciudad de Mérida cubriendo los 4 puntos cardinales, siendo el criterio de selección de los agregados el volumen de ventas y el nivel de penetración en el mercado. Estos agregados serán denominados en adelante como: 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Con lo anterior, se formaron 6 subconjuntos de concretos en los que se mantuvieron constantes las propiedades elásticas de los agregados; de tal manera que, dentro de los 6 subconjuntos, estas propiedades no introdujeron varianza a la velocidad o a la resistencia. Los 6 agregados se muestrearon y se caracterizaron de acuerdo a las normas mexicanas. Con cada uno de éstos se prepararon concretos con 4 relaciones agua/cemento (A/C) diferentes: 0,4, 0,5, 0,6 y 0,7 buscando cubrir el intervalo de concretos que se utilizan en la región para las estructuras coladas en sitio (aproximadamente entre 200 y 350 kg/cm<sup>2</sup>). Así, se formaron 4 subconjuntos de concretos en los que se mantuvo constante el principal parámetro que define la resistencia del material, de tal manera que dentro de los 4 subconjuntos esta relación no introdujo varianza a la velocidad o a la resistencia.

Adicionalmente, para cada uno de los 4 subconjuntos anteriores (definidos por la A/C) se prepararon concretos con cuatro relaciones grava/arena (g/a) diferentes (en volúmenes absolutos): 60%/40%, 55%/45%, 50%/50% y 45%/55% buscando cubrir el rango de las posibles combinaciones de agregado grueso y agregado fino, que van desde mezclas muy gravosas, hasta mezclas plásticas ricas en mortero.

A diferencia de las investigaciones que anteriormente se hicieron en la región sobre el uso de la velocidad como una forma de pronosticar la resistencia, en esta ocasión no se siguió el método de dosificación del ACI para definir las cantidades de agregado grueso y del agregado fino, sino que estas proporciones se predefinieron para evitar que cada

concreto tenga volúmenes diferentes de grava y arena, lo que probablemente sea otra fuente de varianza para las variables en estudio.

De acuerdo a lo anterior, se probaron 16 concretos diferentes para cada uno de los 6 agregados; con cada mezcla se moldearon 3 cilindros estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. De lo anterior resultó una población total de 96 concretos diferentes y 288 cilindros a probar. La Tabla 2 muestra el esquema general del experimento para cada agregado.

A partir de pruebas preliminares se definió una cantidad fija de agua para todas las mezclas buscando mantener fijos otros parámetros de los proporcionamientos, tales como: la relación entre la pasta y los agregados, y la cantidad de cemento (para aquellas mezclas con la misma A/C); y los volúmenes absolutos de los agregados (para aquellas mezclas con las mismas A/C y g/a). La cantidad definida de agua fue de 215 kg por m<sup>3</sup>, misma que representa un 5% más que la que sugiere el ACI para un agregado grueso triturado de ¾" de tamaño máximo. Sin embargo, con 4 de los 6 agregados se incrementó el agua en las cantidades que fueron necesarias para lograr que los componentes se mezclaran adecuadamente y obtener mezclas homogéneas; en el caso más crítico se incrementó el agua en un 16%; esta situación estuvo relacionada con el exceso de finos de la arena. Por lo tanto, se produjeron variaciones en los parámetros arriba mencionados y consecuentemente se introdujeron posibles fuentes de varianza en las variables en estudio.

Los cilindros se sometieron a curado por inmersión durante 7 días y posteriormente se mantuvieron al aire por 3 semanas; con lo anterior se buscó una aproximación al procedimiento de curado usado generalmente en obra, en el cual se reaprovisiona agua al concreto durante su primera semana. A la edad de 28 días se aplicó la prueba de medición de la velocidad a los cilindros utilizando transductores de onda compresional de 54 kHz acoplados al equipo medidor de pulso (V Meter, MK II). Y posteriormente se probaron a la resistencia por el método destructivo tradicional.

El promedio de las mediciones, en los tres cilindros de cada mezcla, de la velocidad y la resistencia se asignó a cada concreto. Para el caso de la velocidad la unidad utilizada fue el m/s y la aproximación fue de una decena; y para la resistencia la unidad fue el kg/cm<sup>2</sup>.

Los valores de la velocidad y la resistencia de cada concreto fueron asociados a: las diferentes

propiedades del agregado con el que se preparó y a los diferentes parámetros resultantes de los proporcionamientos. Con esta base de datos se realizó

el análisis estadístico haciendo uso del paquete estadístico SPSS 10.0.

**Tabla 2. Esquema general del manejo experimental para cada agregado**

Mezcla	Relación agua/cemento (peso)	Relación grava/arena (volumen absoluto)	Número de cilindros
1	0,40	60%/40%	3
2	0,40	55%/45%	3
3	0,40	50%/50%	3
4	0,40	45%/55%	3
5	0,50	60%/40%	3
6	0,50	55%/45%	3
7	0,50	50%/50%	3
8	0,50	45%/55%	3
9	0,6	60%/40%	3
10	0,6	55%/45%	3
11	0,6	50%/50%	3
12	0,6	45%/55%	3
13	0,7	60%/40%	3
14	0,7	55%/45%	3
15	0,7	50%/50%	3
16	0,7	45%/55%	3
<b>Número de cilindros por agregado</b>			<b>48</b>

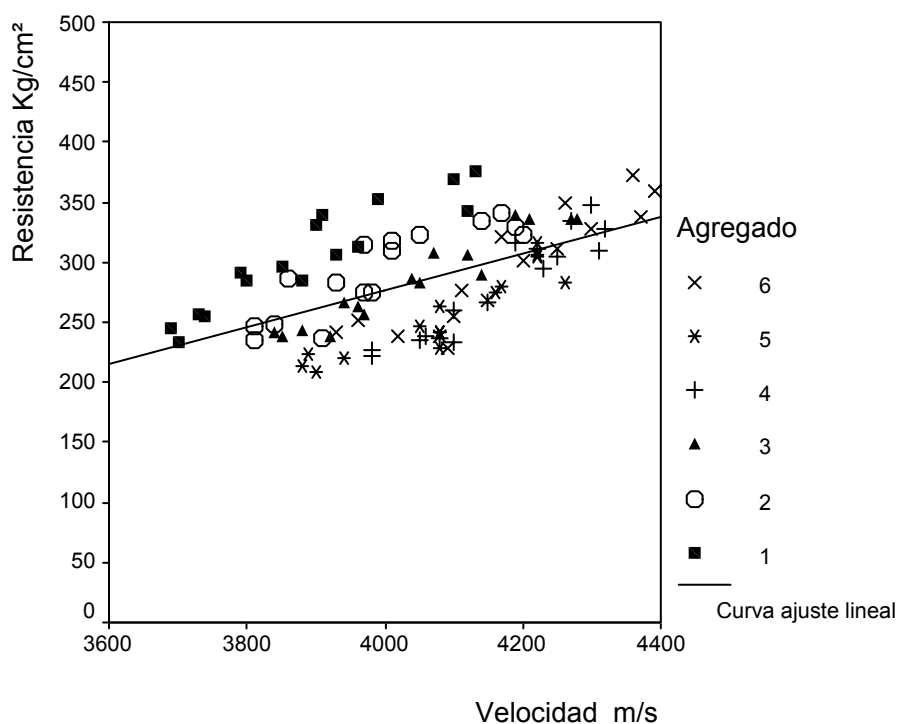
## RESULTADOS

La Figura 3 presenta el diagrama de dispersión de los datos experimentales y la curva de ajuste lineal obtenida; el coeficiente de correlación para toda la población fue 0,58, el cual fue muy inferior a los obtenidos en los trabajos anteriores. En esta figura se observa que los puntos que representan concretos preparados con el mismo agregado presentan un agrupamiento notable.

Se evaluaron las diferentes propiedades físicas de los agregados intentando atribuir a alguna

de ellas la razón por la que concretos con la misma resistencia presentan la distribución de velocidades que se observa en la figura anterior. Se encontró que las siguientes propiedades tenían alguna correlación con la velocidad, con significancia al menos de 5%: densidad de la grava ( $r = 0,28$ ), densidad de la arena ( $r = 0,34$ ), porcentaje de finos que pasa la malla 200 en la arena ( $r = 0,41$ ), peso volumétrico seco compacto de la grava ( $r = 0,40$ ), absorción de la grava ( $r = 0,46$ ), y porcentaje de desgaste de la grava ( $r = 0,33$ ); además, las siguientes dos propiedades mostraron correlaciones menos fuertes, con significancia ligeramente mayores al 5%: absorción de la arena ( $r = 0,19$  y significancia de 7%) y peso

volumétrico seco suelto de la arena ( $r = 0,17$  y significancia de 9%).



**Figura 3. Datos y curva de ajuste velocidad-resistencia para los concretos preparados con 6 muestras de agregados**

Por otro lado ninguna de estas propiedades tuvo correlación con la resistencia con significancia menor o igual al 5%. Se puede notar que las propiedades anteriores tienen una correlación que en ningún caso es suficientemente fuerte para poder atribuirle individualmente el efecto de la dispersión en la velocidad para concretos con la misma resistencia. Por lo anterior, se optó por definir un índice que tomara en cuenta las ocho propiedades anteriores; se decidió utilizar para este índice las dos propiedades de la arena que tuvieron significancia ligeramente mayor a 5% atendiendo a un criterio de simetría respecto a las propiedades de la arena y de la grava. El índice se calculó dividiendo el valor de cada propiedad con relación a un valor máximo esperado entre los agregados de la región (a esta operación se le denominó normalización de la propiedad); este valor máximo se tomó como el percentil 90 de los valores obtenidos en 15 muestras de agregados estudiadas; el valor normalizado máximo fue la unidad. El índice de calidad (IC) del agregado fue la suma de los ocho valores normalizados de las propiedades arriba mencionadas. De esta forma el valor límite superior de este índice fue de 8 y

corresponde al agregado ideal que tiene en las 8 propiedades el valor máximo esperado para la región.

La Tabla 3 presenta los valores de las propiedades físicas de los seis agregados estudiados en esta investigación, así como los valores base para la normalización, y los IC. En la Figura 3 se puede apreciar que los datos se han ordenado (de izquierda a derecha) de acuerdo al índice de calidad definido, por lo que esta variable, aun cuando se definió de manera simple, sin ponderar las diferentes propiedades de los agregados, parece jugar un papel importante en la correlación entre la velocidad y la resistencia.

En la misma Figura 3 se puede notar que los agregados 4, 5 y 6, que tuvieron un IC mayor a 7,30 (más de 90% con respecto a la máxima calidad), se juntan y mezclan en la parte derecha de la gráfica, presentado las mayores velocidades, medidas en esta investigación. En la Figura 4 se presentan estos datos agrupándolos en una sola colección; la curva de ajuste exponencial presentó una  $r$  de 0,92 la cual representa una fuerte dependencia entre las variables. Lo anterior muestra que pudiera utilizarse un único modelo, para los agregados que pudieran ser calificados de alta

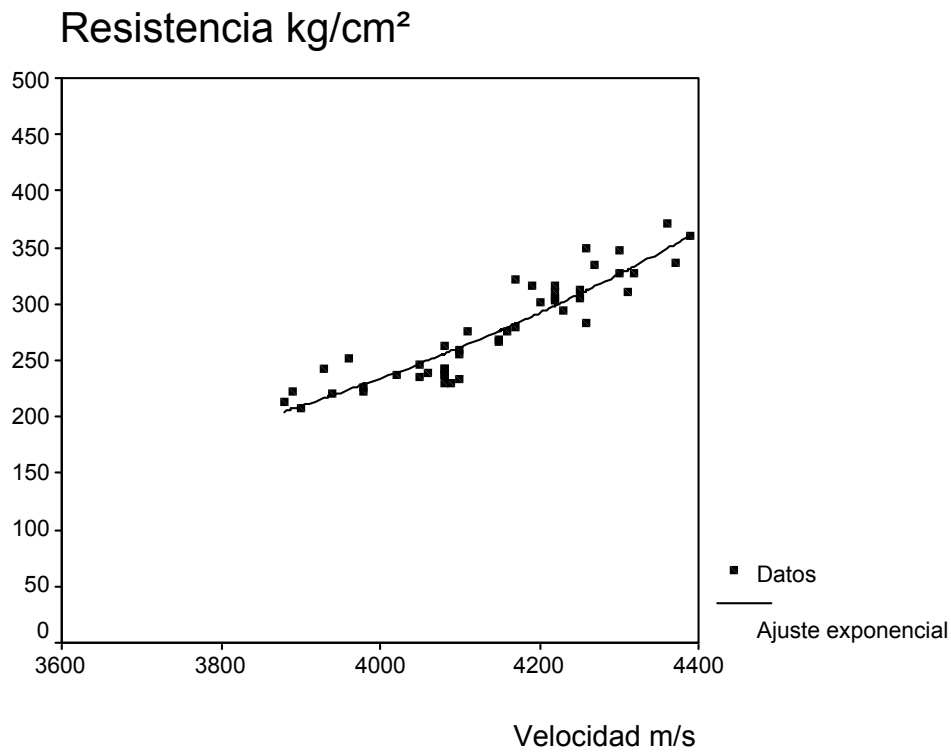
calidad en la región, por medio de un criterio cuantitativo.

Individualmente, los concretos preparados con cada uno de los otros 3 agregados presentaron los

siguientes coeficientes de correlación con modelos de ajuste exponencial: concreto con agregado 1, la r fue 0,93; con agregado 2, la r fue 0,86; y con el agregado 3, la r fue 0,96.

**Tabla 3. Caracterización de los agregados e índice de calidad calculado**

Agregado	1	2	3	4	5	6	Base de la normalización
<b>Grava</b>							
<b>PVSC</b>	1 219	1 294	1 267	1 259	1 288	1 334	<b>1 344 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Densidad SSS</b>	2,34	2,40	2,34	2,36	2,35	2,42	<b>2,44</b>
<b>% Absorción</b>	6,7	5,5	5,6	5,7	5,8	5,1	<b>4,86%</b>
<b>% Desgaste</b>	27	28	28	27	25	23	<b>24%</b>
<b>Arena</b>							
<b>PVSS</b>	1 358	1 299	1 340	1 336	1 364	1 379	<b>1 407 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Densidad SSS</b>	2,25	2,44	2,51	2,5	2,45	2,54	<b>2,54</b>
<b>% Absorción</b>	4,7	4,7	5,3	3,5	5,0	4,9	<b>3,86%</b>
<b>% Finos</b>	22	25	20	19	14	14	<b>14%</b>
<b>Índice de Calidad</b>	<b>6,79</b>	<b>6,95</b>	<b>7,00</b>	<b>7,32</b>	<b>7,43</b>	<b>7,71</b>	<b>8,00</b>



**Figura 4. Datos y curva de ajuste exponencial para los agregados de alta calidad**

Se analizaron los grupos de concretos según su A/C; las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran los diagramas de dispersión para la relación velocidad-resistencia. En todos los casos se observa que del lado derecho se juntan los concretos preparados con los tres agregados de alta calidad (IC > 7,30), que en el extremo izquierdo se ubican los concretos preparados con los dos agregados de menor calidad (IC de 6,79 y 6,95), y que en el centro se encuentran los concretos con calidad intermedia (IC de 7,00).

En ninguno de los cuatro casos hubo correlación alguna entre la velocidad y la resistencia, ya que el nivel de resistencia es relativamente constante, y la relación que existe entre ambas variables se manifiesta con los incrementos simultáneos; lo anterior se aprecia gráficamente, ya que conforme disminuye la A/C los intervalos de valores de ambas variables aumentan. De lo anterior

se puede entender que el factor más importante para que exista una correlación entre la velocidad y la resistencia es la variación en la A/C, que es responsable de la variación en la estructura porosa del concreto y de la resistencia.

Por otro lado, también se puede suponer que una de las principales fuentes de dispersión en la correlación es la variación entre las propiedades físicas de los agregados, que como se observa en las Figuras 5 a 8 producen variación en la velocidad, sin provocar grandes cambios en la resistencia. De hecho, para toda la colección de concretos, el IC se correlacionó con la velocidad con una r de 0,53, mientras que no tuvo correlación alguna con la resistencia. Y para los grupos de concreto de acuerdo a su A/C, el IC se correlacionó con la velocidad con los coeficientes siguientes: 0,82, 0,85, 0,88 y 0,79 para las A/C 0,4, 0,5, 0,6 y 0,7, respectivamente.

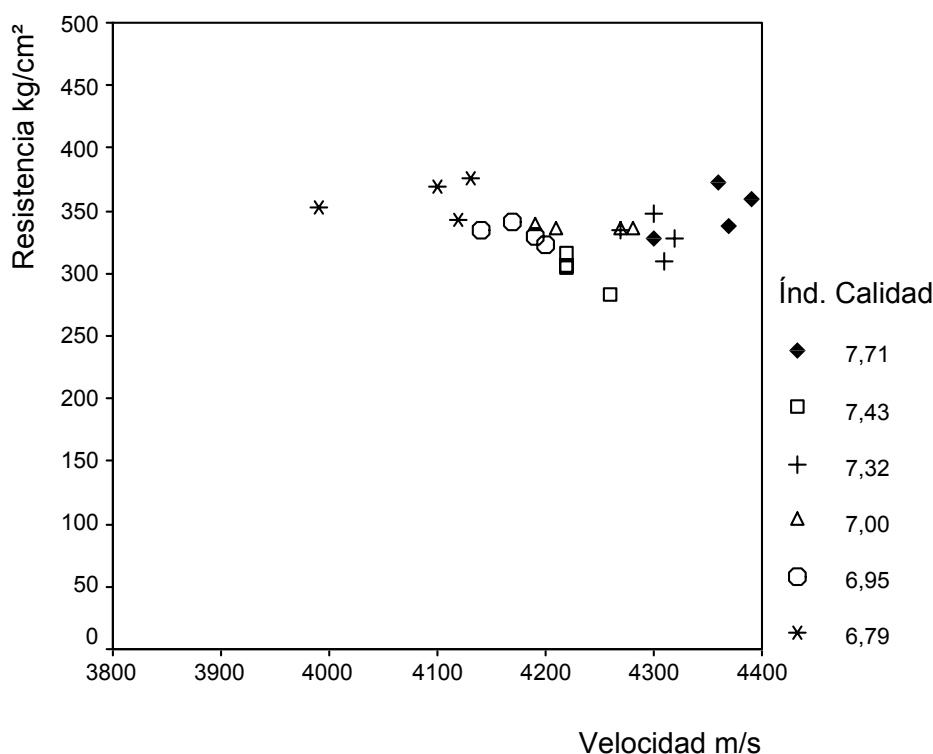


Figura 5. Concretos con A/C de 0,40



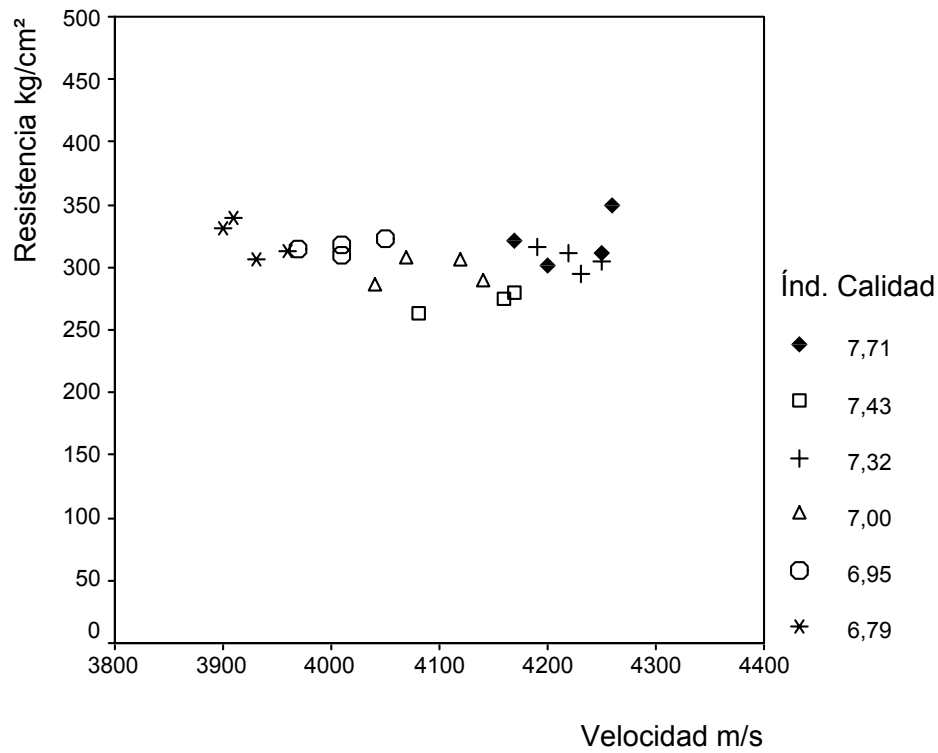


Figura 6. Concretos con A/C de 0,50

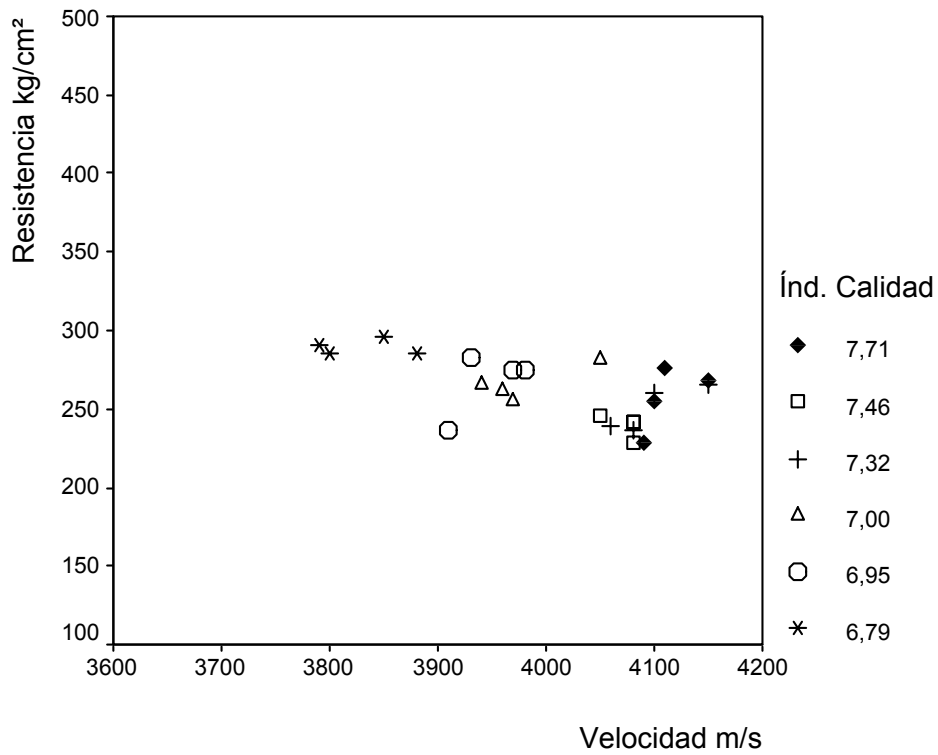


Figura 7. Concretos con A/C de 0,60

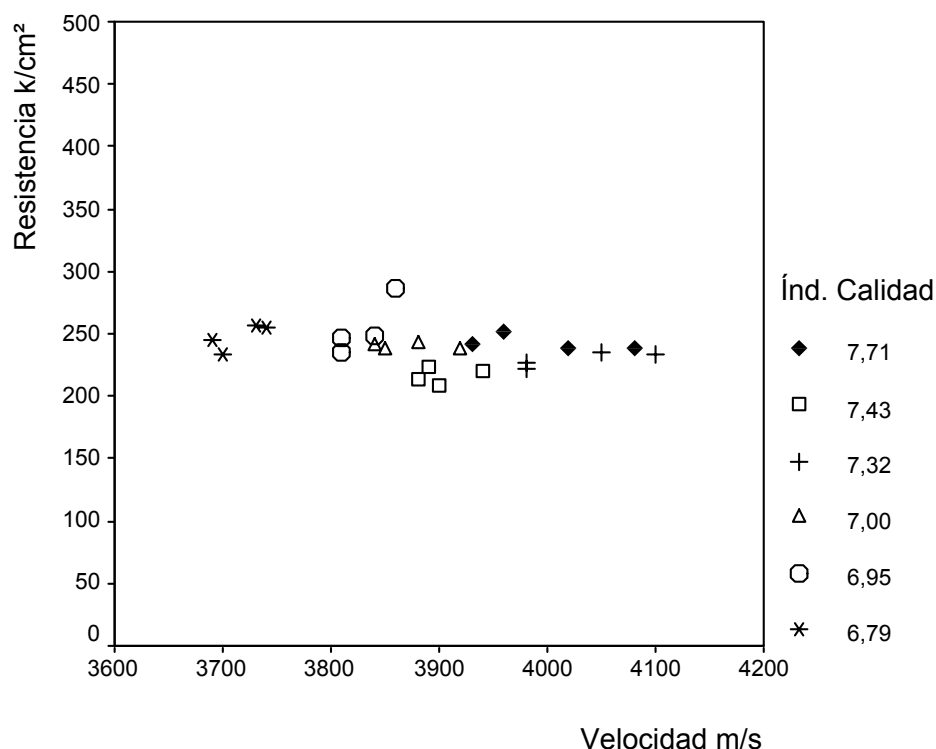


Figura 8. Concretos con A/C de 0,70

La A/C es el factor con mayor influencia en ambas variables; de hecho se correlaciona con la velocidad con un coeficiente de 0,77 y con la resistencia con un coeficiente de 0,89. Debido a esto, cuando se juntan en una sola colección los concretos preparados con las 4 A/C, la velocidad toma poder de predicción sobre la resistencia, sin que exista una explicación física directa de esto.

Pero por otro lado, el hecho de que la colección de concreto contenga 6 agregados con características físicas relativamente diferentes produce que la correlación entre la velocidad y la resistencia pierda fuerza ya que se introduce varianza en la velocidad, pero no en la resistencia.

La cantidad de agua por metro cúbico (A) fue otra variable que mostró tener influencia tanto sobre la velocidad, como sobre la resistencia. Con la velocidad se correlacionó con una  $r$  de 0,42 y con la resistencia con una  $r$  de 0,37 (en ambos casos con significancia inferior a 5%). Sin embargo, mientras que la correlación con la resistencia es real, con la velocidad es sólo un reflejo de la relación que existe entre la velocidad y el IC, ya que la cantidad de agua estuvo muy relacionada con las propiedades físicas de

los agregados, especialmente con la cantidad de finos de la arena; haciendo uso de una correlación parcial se comprobó que la cantidad de agua por metro cúbico no explica la varianza adicional en la velocidad a la que explica el IC. Esta variable por lo tanto juega un papel similar a IC, ya que al sólo influir en una de las dos variables en estudio (en este caso, en la resistencia) produce cierto grado de dispersión en la correlación.

Según todo lo anterior, el mejor modelo para pronosticar la velocidad estaría en función de la A/C y del IC del agregado; el coeficiente de correlación para este modelo lineal múltiple fue de 0,94, el cual confirmó lo antes expuesto. Mientras que el mejor modelo para predecir la resistencia estaría en función de la A/C y de la cantidad de agua por metro cúbico (A); lo anterior se confirmó ya que el modelo lineal múltiple arrojó un coeficiente de correlación de 0,93. De lo anterior resulta que en el modelo de predicción anterior de la resistencia (en función de la A/C y A), se podría sustituir el efecto de la A/C por el que produce la velocidad y el IC. Lo anterior se comprobó ya que en los modelos predictivos de la resistencia, de una  $r$  de 0,58 (con únicamente la velocidad como variable independiente), se pasó a una  $r$  de 0,81

(usando la velocidad y el IC como variables independientes), y a una  $r$  de 0,91 (para el modelo lineal múltiple que incluyó la velocidad ( $V$ ), el índice de calidad de los agregados ( $IC$ ) y la cantidad de agua de la mezcla ( $A$ ) como predictores de la resistencia). La ecuación 1 presenta el modelo final de predicción de la resistencia obtenido:

$$R = 0,25 V - 33,058 IC + 1,795 A - 904.35$$

(1)

### DISCUSIÓN

En esta investigación, en la que se utilizaron concretos con 4 valores de  $A/C$ , la relación entre la velocidad y la resistencia — $r$  de 0,58— disminuyó sensiblemente respecto a la investigación realizada por Solís *et al.* (2003) —en la que la  $r$  fue de 0,82— probando concretos con 10 valores diferentes de  $A/C$ .

El resultado anterior podría atribuirse a la menor variación experimental de la  $A/C$  en esta investigación, misma que es la principal variable que produce la correlación entre la velocidad y la resistencia.

El  $IC$  de los agregados definido en este trabajo demostró ser capaz de explicar varianza en la resistencia, independiente de la varianza que explica la velocidad. En esta investigación, su inclusión en el modelo predictivo de la resistencia, incrementó la  $r$  de 0,58 a 0,81; mientras que en la investigación de Solís *et al.* (2003), si se aplica a los datos experimentales el modelo que incluye el  $IC$  (6 valores diferentes de  $IC$ ) además de la velocidad, la  $r$  aumenta de 0,82 a 0,94, coeficiente similar al obtenido por Castellanos (1985) probando concreto con un único agregado (y por tanto con un sólo  $IC$ ). Lo anterior nos muestra que gran parte de la información que no está contenida en la velocidad, se puede encontrar en el  $IC$ , responsable de las propiedades elásticas de los agregados.

En este trabajo ha quedado demostrado que la variabilidad de los agregados de la región, aun cuando éstos sean muy parecidos desde el punto de vista de su composición mineral, de sus propiedades geométricas y de su resistencia, produce una variabilidad en la velocidad en un rango aproximado

de 400 m/s para concretos con la misma  $A/C$  y por ende, poca variación en la resistencia.

Esta variabilidad en las propiedades de los agregados mostró que es la principal responsable de la dispersión de los datos experimentales para concreto preparados con 6 diferentes agregados. Ferreira y Castro en Brasil (1999) reportaron variaciones en la velocidad de hasta 700 m/s para los mismos proporcionamientos, cuando prepararon concretos con agregados de diferentes resistencias.

Este mismo efecto de pérdida de fuerza en la correlación, cuando se mezclan concretos preparados con diferentes agregados de una misma región, fue reportado por Miretti y Grether en Argentina (1998); la  $r$  bajó de 0,95 para concretos preparados con un único agregado, a 0,62 cuando mezclaron concretos preparados con agregados de roca granítica y con canto rodado silíceo.

### CONCLUSIÓN

El modelo que se obtuvo en este trabajo permite predecir, con un aceptable grado de confianza, la resistencia a la compresión axial de concretos preparados con diferentes agregados de la ciudad de Mérida, utilizando la medición del pulso ultrasónico y otras dos variables independientes: el índice de calidad del agregado —que aporta información sobre las propiedades elásticas de los agregados—, y la cantidad de agua utilizada en la mezcla —que está asociada a la cantidad de cemento utilizada para una misma  $A/C$ .

### RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el CONACYT por medio del proyecto 34428U. Participantes del Proyecto: Ing. Rómel Solís Carcaño M.I. (responsable); Dr. Éric Iván Moreno, Ing. Arq. Miguel Cerón Cardeña y Tec. William Castillo Pak (colaboradores); Ing. Francisco Duarte Gómez, Tec. Luis Castro Sansores y Tec. Álar Nadal Martínez (apoyo de laboratorio); y Carolina Vega Sosa y Jorge Fernández Remellón (tesistas).

### REFERENCIAS

1. Anderson D. y Seals R. (1981). Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength. "Journal of the American Concrete Institute", March-April N°. 2, 116-119.

2. Castellanos G. (1985). “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, México.
3. Ferreira A., Castro P. y Protasio F. (1999). Application of NDT to concrete strength estimation. “NDTISS’99 International Symposium on NDT”. UFSM Santa María, R.S. Brazil.
4. Malhotra V. M. (1985). “Nondestructive methods for testing concrete”. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.
5. Malhotra V. M. y Carino N. J. (1991). “Handbook on nondestructive testing of concrete”. CRC Press, Boca Raton, U.S.A.
6. Miretti R., Grether R., Passerino C. y Carrasco M. (1998). Evaluación de hormigones mediante ultrasonido/esclerometría. “Revista Ingeniería de Construcción”, Pontificia Universidad Católica de Chile. Vol 17, Jul-Dic, 43-46.
7. Rose J. L. (1999). “Ultrasonic waves in solid media”. Cambridge University Press, United Kingdom.
8. Solís R. y Baeza J. (2003). Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto. “Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería”, Universidad del Zulia, Venezuela, Volumen 26, N°. 1, 44-55.
9. Sturup V. R., Vecchio F. J. y Caratin H. (1984). Pulse velocity as a measure of concrete compressive strengths. “Nondestructive testing of concrete ACI SP 82-11”, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Detroit, U.S.A., 201-227.