

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Predicción de la resistencia a la compresión del hormigón  
mediante métodos de ensayo no destructivos para  
hormigones convencionales en Pichincha, Ecuador  
Trabajo experimental**

**Luis Alberto Villagómez Rivera**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 21 de diciembre de 2016

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Predicción de la resistencia a la compresión del hormigón mediante  
métodos de ensayo no destructivos para hormigones convencionales en  
Pichincha, Ecuador  
Trabajo experimental**

**Luis Alberto Villagómez Rivera**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan José Recalde, Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 21 de diciembre de 2016

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Luis Alberto Villagómez Rivera

Código:

101224

Cédula de Identidad:

1715414320

Lugar y fecha:

Quito, 21 de diciembre de 2016

## RESUMEN

En el país hay muy poco conocimiento sobre las prácticas y procedimientos necesarios para establecer correlaciones para predecir la resistencia a la compresión del hormigón utilizando ensayos no destructivos. Es una práctica común utilizar los modelos generales proporcionados por los fabricantes de los equipos que corresponden a unos materiales y procedimientos completamente ajenos a nuestra realidad. Este trabajo busca establecer un procedimiento adecuado para la elaboración de especímenes, la realización de ensayos, la generación de modelos individuales y combinados y el análisis estadístico para la correcta utilización de dos de los métodos no destructivos más conocidos, rápidos y económicos: el ensayo de número de rebote y el ensayo de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión de hormigones convencionales en la provincia de Pichincha. Se consideran tres relaciones agua-material cementante correspondientes a un hormigón estructural convencional de baja, media y alta resistencia así como dos tipos de agregado grueso de buena y de mala calidad. A partir de 6 diseños de hormigón se generan modelos individuales y combinados en base a regresiones de tipo potencial. Se demuestra que los modelos combinados pueden mejorar la confiabilidad de las predicciones si se eligen métodos que conlleven a la cancelación de errores. El número de rebote y la velocidad de pulso son dos ensayos muy compatibles para combinarse debido principalmente al efecto contrario que tiene la humedad de los elementos de hormigón en los resultados. Su combinación permite además controlar efectos locales y superficiales relacionados con la heterogeneidad del hormigón.

Palabras clave: hormigones convencionales, Pichincha, ensayos no destructivos, resistencia a la compresión, modelos combinados

## ABSTRACT

In Ecuador there is not enough knowledge about the necessary practices and procedures to establish correlations to predict the compressive strength of concrete based on non-destructive testing. It is common practice to use general models provided by the equipment manufacturers based on materials and procedures completely foreign to our reality. This work aims to establish an adequate procedure for the preparation of specimens, testing, generation of individual and combined models and statistical analysis for the correct use of two of the best known, fast and inexpensive non-destructive methods: the rebound number and the ultrasonic pulse velocity test to predict the compressive strength of conventional concrete in the province of Pichincha. Three water-cementing ratios are considered representing a low, medium and high strength conventional structural concrete as well as coarse aggregate of good and poor quality. From 6 concrete designs individual and combined models are generated based on potential type regressions. It is demonstrated that combined models can improve reliability of predictions by choosing methods that lead to error cancellation. The rebound number and the pulse rate are two very compatible tests due mainly to the opposite effect of the moisture of the concrete elements on the results. Their combination also allows to control local and superficial effects related to the heterogeneity of the concrete.

*Key words:* conventional concrete, Pichincha, non destructive testing, compressive strength, combined models

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>Antecedentes y justificación .....</b>	<b>11</b>
<b>Número de rebote.....</b>	<b>12</b>
<b>Velocidad de pulso .....</b>	<b>14</b>
<b>Predicción de la resistencia la compresión .....</b>	<b>17</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>18</b>
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>19</b>
<b>Materiales .....</b>	<b>19</b>
Agregados .....	19
Cemento .....	24
<b>Diseño y proporcionamiento de las mezclas .....</b>	<b>24</b>
<b>Elaboración de especímenes.....</b>	<b>25</b>
<b>Ensayos hormigón fresco.....</b>	<b>27</b>
<b>Determinación de la resistencia a la compresión .....</b>	<b>27</b>
<b>Determinación del número de rebote.....</b>	<b>28</b>
<b>Determinación de la velocidad de pulso.....</b>	<b>29</b>
<b>Resultados y Conclusiones .....</b>	<b>31</b>
<b>Modelos individuales .....</b>	<b>31</b>
Número de rebote.....	31
Velocidad de pulso.....	33
<b>Modelo combinado.....</b>	<b>34</b>
<b>Comprobación de los modelos .....</b>	<b>35</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>36</b>

**Referencias bibliográficas .....38**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla # 1: Granulometría agregado grueso mina “El Guabo” según serie 467 ASTM C33 ...20	20
Tabla # 2: Granulometría agregado grueso mina Holcim según serie 467 ASTM C33 .....21	21
Tabla # 3: Densidad, densidad relativa y absorción agregado grueso “El Guabo” y Holcim según ASTM C127.....22	22
Tabla # 4: Densidad de masa y porcentaje de vacíos agregado grueso “El Guabo” y Holcim según ASTM C29.....22	22
Tabla # 5: Granulometría agregado fino mina Holcim según ASTM C33.....23	23
Tabla # 6: Nomenclatura de los diseños de hormigón.....25	25
Tabla # 7: Proporciones por peso (kg) para 1 m <sup>3</sup> de hormigón.....25	25
Tabla # 8: Ensayos en hormigón fresco (asentamiento según la ASTM C143 y densidad y contenido de aire por el método gravimétrico según la ASTM C138) .....27	27
Tabla # 9: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón según ASTM C39.....28	28
Tabla # 10: Promedios de los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón en función de la relación a/mc final.....28	28
Tabla # 11: Determinación del número de rebote en configuración vertical con el punzón hacia abajo según la norma ASTM C805.....29	29
Tabla # 12: Determinación del número de rebote en configuración horizontal según la norma ASTM C805 .....29	29
Tabla # 13: Determinación del número de rebote en configuración vertical con el punzón hacia arriba según la norma ASTM C805.....29	29
Tabla # 14: Determinación de la velocidad de pulso según la norma ASTM C597.....30	30
Tabla # 15: Promedios del número de rebote en las tres configuraciones y la resistencia a la compresión .....31	31

Tabla # 16: Constantes de las funciones obtenidas en los modelos individuales para predecir la resistencia a la compresión en función del número de rebote para las tres configuraciones .....	32
Tabla # 17: Promedios de la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión .....	33
Tabla # 18: Constantes de la función obtenida en el modelo individual para predecir la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso y sus coeficientes de correlación.....	34
Tabla # 19: Constantes de las funciones obtenidas en los modelos combinados para predecir la resistencia a la compresión en función del número de rebote y la velocidad de pulso para las tres configuraciones, su coeficiente de correlación y un intervalo de predicción del 95%.....	35
Tabla # 20: Comprobación de los modelos individuales y el modelo combinado para dos diseños de hormigón desconocidos .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura # 1: Esquema de la operación del esclerómetro (ACI Committee 228, 2003).....	12
Figura # 2: Esquema del funcionamiento del equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico (ACI Committee 228, 2003).....	15
Figura # 3: Disposición de los transductores: a) directa, b) semidirecta, c) indirecta o superficial (Carino & Malhotra, 2004).....	16
Figura # 4: Esquema de la relación entre el ensayo no destructivo y la resistencia a la compresión (ACI Committee 228, 2003).....	17
Figura # 5: Apreciación visual de los dos tipos de agregados grueso utilizados, a la izquierda agregado Holcim, a la derecha agregado “El Guabo”.....	19
Figura # 6: Curva granulométrica agregado grueso mina “El Guabo” según serie 467 ASTM C33.....	20
Figura # 7: Curva granulométrica agregado grueso mina Holcim según serie 467 ASTM C33 .....	21
Figura # 8: Curva granulométrica agregado fino mina Holcim según ASTM C33.....	23
Figura # 9: Moldes de madera de 150 x 150 x450 mm para la elaboración de las vigas de hormigón.....	26
Figura # 10: Regresiones potenciales de los modelos individuales para predecir la resistencia a la compresión del hormigón en función del número de rebote para cada configuración .....	32
Figura # 11: Regresión potencial del modelo individual para predecir la resistencia a la compresión del hormigón en función de la velocidad de pulso.....	33
Figura # 12: Curvas de correlación suministrada por el fabricante del esclerómetro.....	35

# INTRODUCCIÓN

## **Antecedentes y justificación**

Tradicionalmente se ha evaluado la resistencia en sitio del hormigón por medio de cilindros curados en obra basados en la norma ASTM C31. Este ensayo destructivo es relativamente fácil de realizar en términos de muestreo, elaboración del espécimen y determinación de la resistencia. Por este motivo es el principal parámetro considerado por los códigos de diseño. Sin embargo, la resistencia de un cilindro curado en obra difícilmente representa la del hormigón en sitio porque es muy complicado lograr las mismas condiciones de colocación, compactación, terminado y curado. La resistencia a la compresión de cilindros curados en obra puede ser significativamente distinta.

La principal ventaja de los métodos no destructivos es la posibilidad de realizar muchas mediciones sin afectar la integridad de la estructura de forma rápida y económica.

Una limitación importante para el desarrollo de los ensayos no destructivos de hormigón es la falta de referencias internacionales reconocidas. No existe un soporte sólido para elegir la técnica más adecuada, realizar los ensayos y mediciones de manera estandarizada e interpretar los resultados (Malhotra & Carino, 2004).

En el país hay muy poco conocimiento sobre las prácticas y procedimientos necesarios para establecer correlaciones para predecir la resistencia a la compresión del hormigón en base a ensayos no destructivos. Es una práctica común utilizar los modelos generales proporcionados por los fabricantes de los equipos que corresponden a unos materiales y procedimientos completamente ajenos a nuestra realidad. Este trabajo busca establecer un procedimiento adecuado para la elaboración de especímenes, realización de ensayos, generación de modelos individuales y combinados y análisis estadístico para la correcta utilización de dos de los métodos no destructivos más conocidos, rápidos y económicos para

lograr predicciones de la resistencia a la compresión de hormigones convencionales en la provincia de Pichincha confiables y útiles.

## Número de rebote

Debido a su simplicidad, velocidad y bajo costo el ensayo de número de rebote es el ensayo no destructivo para hormigón más utilizado. El esclerómetro mide la dureza superficial del hormigón. Más específicamente, se evalúa la resiliencia del material, es decir su habilidad para absorber energía cuando es deformado elásticamente y liberar esa energía tras ser descargado. El número de rebote es afectado por el ángulo que forma el punzón con la superficie en contacto que determina la influencia de la gravedad en el rebote.

El martillo recibe la energía potencial almacenada en el resorte calibrado y se desliza por una barra guía hasta golpear al punzón de impacto en contacto con el hormigón que rebota proporcionalmente a la rigidez del espécimen. Un indicador se desplaza en una escala graduada debido al movimiento de rebote.

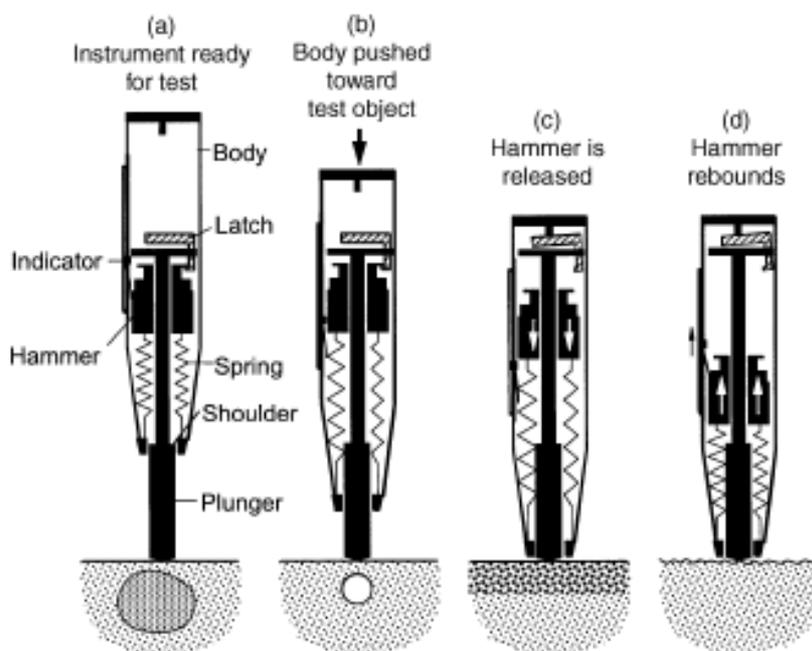


Figura # 1: Esquema de la operación del esclerómetro (ACI Committee 228, 2003)

El número de rebote  $R$  corresponde a la energía del impacto no absorbida por el hormigón. Se calcula según la raíz de la razón entre la energía potencial elástica de rebote y la

$$\text{energía inicial: } R = \sqrt{\frac{e_{rebote}}{e_{inicial}}} \times 100 = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}Kx_R^2}{\frac{1}{2}Kx_0^2}} \times 100 = \frac{x_R}{x_0} \times 100 \text{ donde K es la constante del}$$

resorte,  $x_0$  es el desplazamiento al inicio del impacto y  $x_R$  es el desplazamiento de rebote.

La energía absorbida depende de la relación esfuerzo-deformación del hormigón en el rango elástico, es decir su rigidez. Un hormigón de baja resistencia y baja rigidez absorberá una mayor cantidad de energía que un hormigón de alta resistencia y rigidez, resultando en un número de rebote menor.

El principal factor a considerar es que el número de rebote es muy sensible a las propiedades locales del hormigón. El ensayo refleja las propiedades superficiales del hormigón (alrededor de 3 cm).

Con referencia a la Figura #2, cuando el punzón se ubica sobre agregado fuerte se obtendrá un número de rebote inusualmente alto (a). Cuando el punzón se ubica sobre vacíos o sobre agregado débil se obtendrá un número de rebote inusualmente bajo (b). El número de rebote depende de las características superficiales del hormigón por lo que puede no ser representativo de todo el elemento (c). Cuando el ensayo es realizado en una superficie rugosa puede ocurrir fisuración local que conlleva a obtener un número de rebote menor (d). De ser necesario es recomendable alisar la superficie con una piedra abrasiva o una moladora. Se debe tener especial atención cuando se utilicen elementos fundidos con encofrado de materiales distintos que dejan acabados diferentes.

Durante el ensayo se debe asegurar que los especímenes sean lo suficientemente pesados o de preferencia deben estar empotrados para evitar cualquier movimiento debido al impacto que causa lecturas menores. Un esclerómetro estándar puede ser usado en superficies de elementos de al menos 100 mm de espesor.

Los resultados son afectados por varios factores que deben ser considerados para la interpretación de los resultados. La humedad superficial tiene un impacto importante en el

número de rebote obtenido en relación inversa con la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón. Se debe tener en cuenta que hormigones fundidos en encofrados que absorben humedad como la madera obtienen números de rebote mayores que materiales de baja porosidad y permeabilidad (encofrados metálicos). Es necesario tener cuidado cuando se utilicen elementos fundidos con encofrado de materiales distintos.

## Velocidad de pulso

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico es un método verdaderamente no destructivo para la evaluación del hormigón. La idea básica es que la velocidad de propagación de una onda longitudinal depende de las propiedades elásticas y la densidad del medio:  $V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}}$  donde V es la velocidad de una onda longitudinal,  $K = \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}$  es una constante relacionada con el módulo de Poisson dinámico  $\mu$ , E es módulo de elasticidad dinámico y  $\rho$  es la densidad del medio

El dispositivo genera señales de corta duración y alto voltaje en el transductor causando que este vibre a su frecuencia de resonancia. Para hormigones convencionales generalmente se utilizan transductores de 24 o 54 kHz. Un transductor emite ondas longitudinales perpendiculares a la superficie de contacto que viajan una distancia determinada por el elemento hasta ser captadas por el transductor receptor. El aparato cuenta con un cronómetro de alta precisión que mide el tiempo que le toma al pulso de ondas recorrer esta distancia. A partir de la distancia conocida y el tiempo medido se calcula la velocidad de pulso.

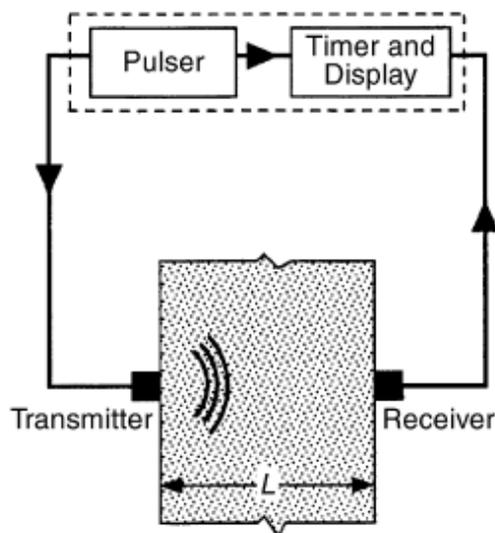


Figura # 2: Esquema del funcionamiento del equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico (ACI Committee 228, 2003)

El ensayo de velocidad de pulso permite evaluar fisuración interna y otros defectos del hormigón y puede ser correlacionada con la resistencia a la compresión. El principio es que en la interfaz entre dos medios o en discontinuidades como vacíos o fisuras una parte de las ondas se dispersan de la trayectoria original, incrementando el tiempo de recorrido. La velocidad de pulso tiene una relación directa con el contenido de humedad debido a que el agua actúa como puente entre distintos medios o discontinuidades.

Existen tres arreglos para los transductores: 1) transmisión directa, 2) transmisión semidirecta y 3) transmisión indirecta o superficial. Siempre que sea posible se debe utilizar la transmisión directa pues tiene las menores pérdidas. Una configuración directa permite reducir considerablemente la falta de homogeneidad del hormigón.

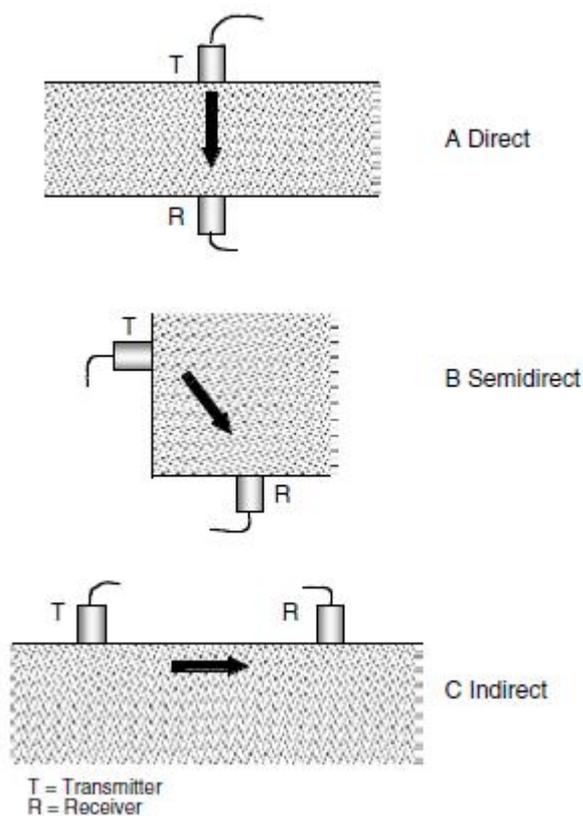


Figura # 3: Disposición de los transductores: a) directa, b) semidirecta, c) indirecta o superficial (Carino & Malhotra, 2004)

Para transmitir y recibir adecuadamente el pulso los transductores deben tener un contacto adecuado con el hormigón. El acoplamiento además afecta significativamente la amplitud de la onda y la evaluación de la atenuación. Las cámaras de aire entre los transductores y el espécimen introducen un error considerable debido a que solo una pequeña parte de la energía de las ondas se transmite en el aire. Para asegurar un buen contacto es vital utilizar gel acoplante.

La velocidad de pulso en acero es 1.4 a 1.7 veces mayor que en hormigón por lo que cuando se inspeccionen elementos armados se debe detectar la ubicación del refuerzo y realizar el ensayo de tal manera que las ondas recorran únicamente el hormigón. Cuando el refuerzo se encuentra en la misma dirección de las ondas aumenta la velocidad de pulso mientras que el refuerzo perpendicular a la dirección de las ondas la disminuye.

## Predicción de la resistencia la compresión

Los ensayos no destructivos predicen la resistencia a la compresión de manera indirecta, es decir miden una propiedad que puede ser correlacionada con la resistencia a la compresión. Para esto se realizan regresiones en base a resultados empíricos.

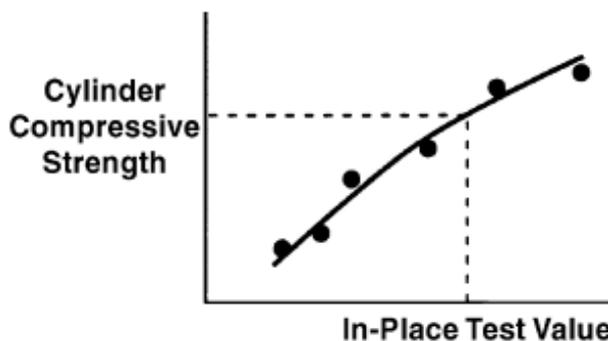


Figura # 4: Esquema de la relación entre el ensayo no destructivo y la resistencia a la compresión (ACI Committee 228, 2003)

El procedimiento básico para elaborar un modelo individual parte de elaborar especímenes tanto para los ensayos no destructivos como para el ensayo de compresión. Estos deben recibir un curado lo más similar posible a las condiciones del hormigón en la estructura. Para estructuras existentes es necesaria la extracción de núcleos. Una vez que los especímenes alcancen la edad necesaria se realizan los ensayos no destructivos y los ensayos destructivos de los cilindros o los núcleos de hormigón. La variable independiente son los promedios de los ensayos no destructivos y la variable dependiente son los promedios de la resistencia a la compresión. A partir de estos datos se realiza un análisis de regresión buscando la función con mayor correlación. La confiabilidad de las predicciones se encuentra limitada por la incertidumbre y variabilidad causadas por el método de ensayo, el entorno, la variabilidad de los materiales, la interpretación de los datos y el error humano. Se debe considerar que la exactitud de los modelos disminuye conforme aumenta la resistencia por lo que no es recomendable utilizar modelos fuera del rango de resistencias en el que fueron creados.

Tradicionalmente la determinación de la resistencia del hormigón por medio de ensayos no destructivos se ha usado para identificar zonas problemáticas que podrían necesitar de ensayos adicionales, evaluar estructuras existentes, especialmente después de haber sufrido daño o deterioro y monitorear la ganancia de resistencia del hormigón en construcciones nuevas como ayuda en la programación de obra, especialmente para decidir cuándo retirar las cimbras y el encofrado, finalizar el curado o aplicar fuerzas de postensado.

El objetivo de combinar métodos no destructivos es mejorar la confiabilidad del modelo con respecto a los modelos individuales. Un modelo combinado puede tener mayor exactitud que un modelo individual si una variación de una propiedad del hormigón produce efectos en las mediciones de cada ensayo, cancelando errores.

La combinación de técnicas puede tener varios objetivos:

- 1) Comparar resultados obtenidos por distintos métodos a manera de verificación
- 2) Mapear rápidamente las zonas que necesitan un estudio más minucioso
- 3) Combinar las mediciones de varios métodos en un solo modelo para mejorar la precisión y exactitud de los resultados

## **Objetivos**

Desarrollar un modelo de predicción de la resistencia a la compresión mediante métodos no destructivos

Comprobar la validez y aplicabilidad del modelo de predicción

Identificar las ventajas y limitaciones de los métodos no destructivos utilizados

## DESARROLLO DEL TEMA

### Materiales

#### Agregados

Se utiliza agregado grueso Holcim proveniente de la mina de Pifo y agregado de la mina “El Guabo” ubicada en San Antonio de Pichincha. En el medio estos dos tipos de agregado son considerados de buena y de mala calidad respectivamente. Visualmente se puede apreciar que las piedras del agregado grueso Holcim son de tipo angular y poco porosas mientras que las del agregado grueso “El Guabo” son más redondeadas pero más porosas.



*Figura # 5: Apreciación visual de los dos tipos de agregados grueso utilizados, a la izquierda agregado Holcim, a la derecha agregado “El Guabo”*

Se realiza el análisis granulométrico de los agregados según la ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. El agregado grueso de la mina “El Guabo” tiene una gradación fuera de los límites establecidos por el ASTM C33 para hormigón estructural. Este agregado es más fino que lo permitido.

Granulometría agregado grueso "El Guabo" (serie 467 ASTM C33)						
Tamaño nominal (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	% mínimo	% máximo
50	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
37.5	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	95%	100%
19	1045.4	20.9%	20.9%	79.1%	35%	70%
9.5	1886.1	37.7%	58.7%	41.3%	10%	30%
4.75	1674.8	33.5%	92.2%	7.8%	0%	5%
pasante	390.7	7.8%	100.0%	0.0%		

Tabla # 1: Granulometría agregado grueso mina "El Guabo" según serie 467 ASTM C33

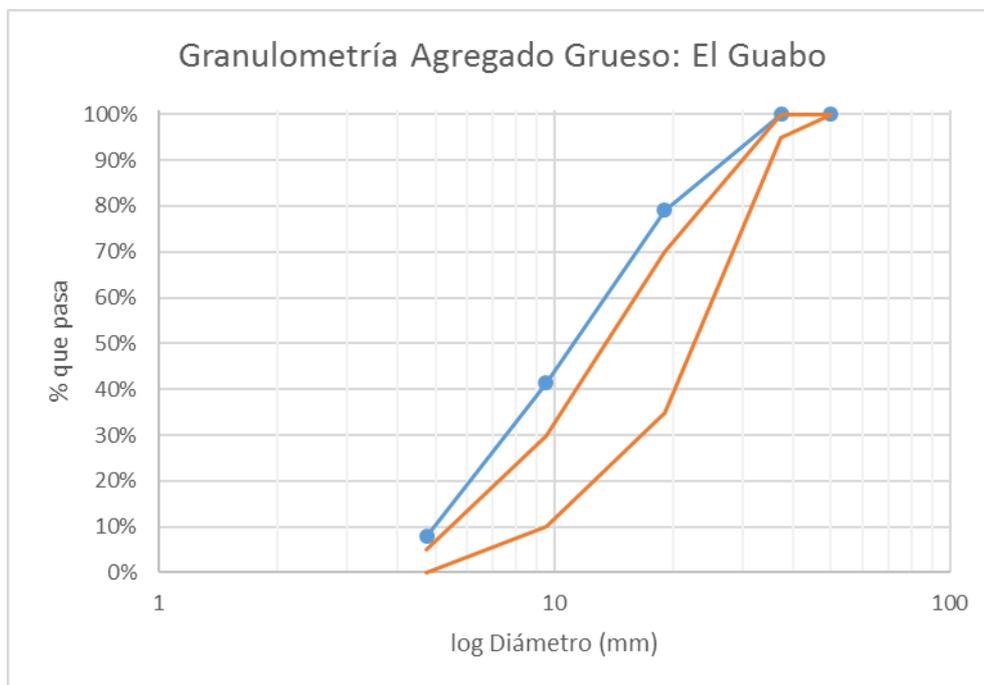


Figura # 6: Curva granulométrica agregado grueso mina "El Guabo" según serie 467 ASTM C33

El análisis granulométrico del agregado grueso Holcim muestra una gradación ligeramente fuera de los límites establecidos por el ASTM C33 para hormigón estructural. Este agregado es ligeramente más más pequeño que lo permitido.

Granulometría agregado grueso Holcim (serie 467 ASTM C33)						
Tamaño nominal (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	% mínimo	% máximo
50	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
37.5	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	95%	100%
19	970.1	19.4%	19.4%	80.6%	35%	70%
9.5	2721.7	54.4%	73.8%	26.2%	10%	30%
4.75	1224.6	24.5%	98.3%	1.7%	0%	5%
pasante	84.2	1.7%	100.0%	0.0%		

Tabla # 2: Granulometría agregado grueso mina Holcim según serie 467 ASTM C33

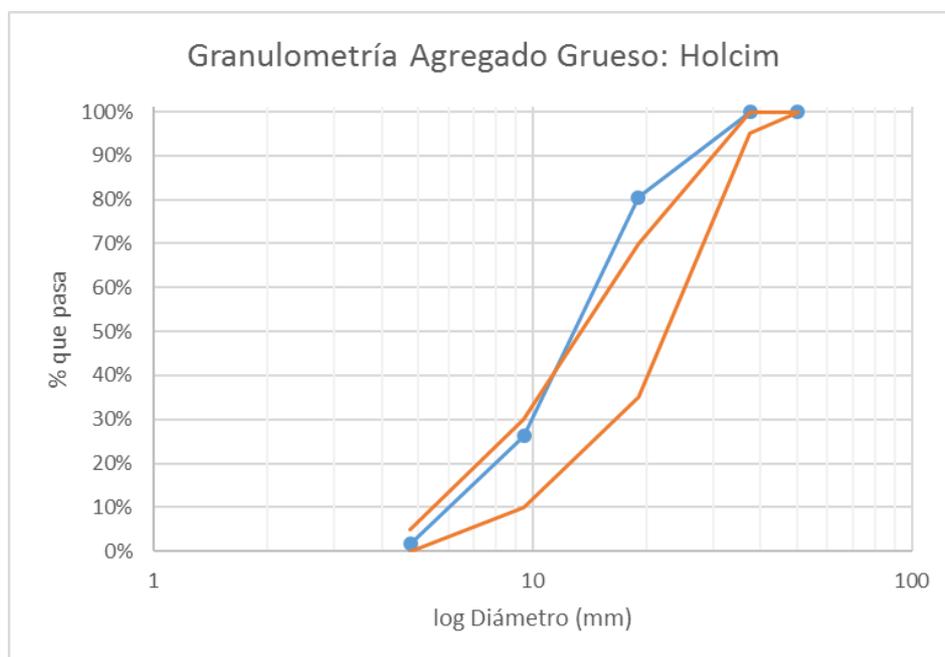


Figura # 7: Curva granulométrica agregado grueso mina Holcim según serie 467 ASTM C33

Se determina la densidad, densidad relativa y la absorción del agregado grueso según el ASTM C127: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. En general, el agregado proveniente de la mina “El Guabo” tiene densidades menores y una absorción mayor que el agregado Holcim.

	<b>El Guabo</b>	<b>Holcim</b>
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
Seca al horno (OD)	2371	2430
Saturada superficie seca (SSD)	2496	2517
Aparente	2712	2662
<b>Densidad relativa (kg/m<sup>3</sup>)</b>		
Seca al horno (OD)	2.38	2.44
Saturada superficie seca (SSD)	2.50	2.52
Aparente	2.72	2.67
<b>Absorción</b>		
	5.3%	3.6%

*Tabla # 3: Densidad, densidad relativa y absorción agregado grueso "El Guabo" y Holcim según ASTM C127*

Se obtiene también la densidad aparente y los vacíos del agregado grueso según la ASTM C29: Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate.

	<b>El Guabo</b>	<b>Holcim</b>
<b>Densidad de masa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1388</b>	<b>1413</b>
<b>Vacíos</b>	<b>41%</b>	<b>42%</b>

*Tabla # 4: Densidad de masa y porcentaje de vacíos agregado grueso "El Guabo" y Holcim según ASTM C29*

Se utiliza arena Holcim de la planta de Pifo para todos los especímenes debido a que numerosos estudios demuestran que el tipo de arena que se utilice no afecta apreciablemente la resistencia a la compresión del hormigón o los resultados de los ensayos no destructivos. El análisis granulométrico del agregado fino Holcim muestra una gradación que no cumple con la norma. El agregado es más grueso que lo permitido con un módulo de finura de 3.4 cuando la ASTM C33 especifica unos límites entre 2.3 y 3.1.

Granulometría agregado fino Holcim						
Tamaño nominal (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa	% mínimo	% máximo
9.5	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
4.75	116.5	13.0%	13.0%	87.0%	95%	100%
2.36	245.5	27.3%	40.3%	59.7%	80%	100%
1.18	141.5	15.7%	56.0%	44.0%	50%	85%
0.6	99.6	11.1%	67.1%	32.9%	25%	60%
0.3	87.4	9.7%	76.8%	23.2%	5%	30%
0.15	70.5	7.8%	84.7%	15.3%	0%	10%
pasante	137.8	15.3%	100.0%	0.0%		

Tabla # 5: Granulometría agregado fino mina Holcim según ASTM C33

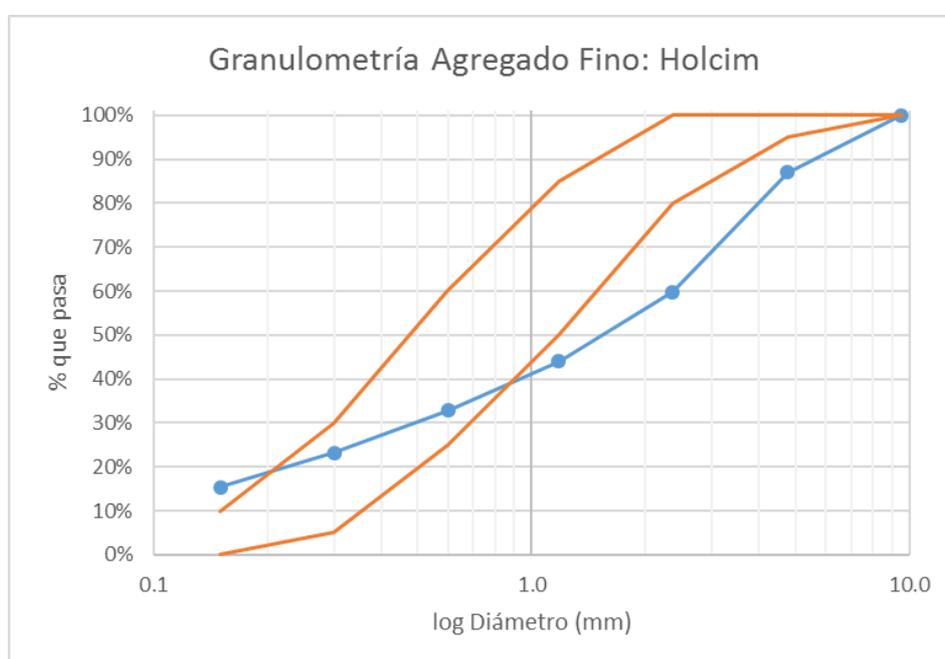


Figura # 8: Curva granulométrica agregado fino mina Holcim según ASTM C33

Se han utilizado agregados comerciales de distintas calidades ampliamente utilizados en el medio tal como los distribuyen los proveedores buscando caracterizar de la mejor manera los hormigones convencionales en Pichincha. Los ensayos demuestran que ninguno cumple con los requisitos de la ASTM C33 para ser utilizados como agregados para hormigón estructural. Sin embargo, el ACI 318 reconoce que agregados que cumplan con las normas ASTM no siempre están disponibles o son económicos por lo que pueden ser aceptados si existe evidencia de un comportamiento satisfactorio a criterio del profesional responsable.

## **Cemento**

Se utiliza para todos los especímenes cemento Holcim Fuerte. Se trata de un cemento hidráulico GU (para construcción en general) tipo IP (cemento portland-puzolánico) que cumple con la Norma Técnica ecuatoriana NTE INEN 2380, equivalente a la ASTM C1157. En el medio es la utilización de otro tipo de cemento está limitada a aplicaciones muy específicas. Las normas son basadas en desempeño por lo que se desconoce las proporciones de los materiales cementantes.

## **Diseño y proporcionamiento de las mezclas**

El diseño y proporcionamiento de las mezclas se realiza según el ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, reprobada en 2009.

La selección de los materiales y los criterios de diseño busca representar las características de los hormigones estructurales convencionales que se utilizan en la provincia de Pichincha. Se consideran hormigones de peso normal no expuestos a ciclos de congelamiento y deshielo por tanto sin aire introducido. No se utiliza ningún tipo de aditivo.

Se apunta a un revenimiento entre 75 y 100 mm que brinda una buena trabajabilidad para la construcción de un elemento estructural en obra.

Para los dos tipos de agregado grueso considerados el tamaño nominal máximo del agregado grueso es de 20 mm, que se consideran cumplan sin problema los criterios del ACI 318 referentes a las dimensiones del elemento y el espaciamiento mínimo libre entre el refuerzo para la gran mayoría de elementos estructurales.

Se utilizan tres relaciones agua-material cementante ( $a/mc$ ) inicial representativas de un hormigón estructural convencional de baja, media y alta resistencia para los dos tipos de agregado grueso considerados. Se tienen por tanto los siguientes 6 diseños de hormigón con las siguientes denominaciones:

Nomenclatura de los diseños de hormigón		
Agregado Grueso	a/mc inicial	ID
Guabo	0.35	G35
Holcim	0.35	H35
Guabo	0.45	G45
Holcim	0.45	H45
Guabo	0.55	G55
Holcim	0.55	H55

*Tabla # 6: Nomenclatura de los diseños de hormigón*

Proporciones por peso (kg) para realizar 1 m <sup>3</sup> de hormigón					
ID	Agua	Cemento	Agregado Fino	Agregado Grueso	Total
<b>G35</b>	248.2	522.9	679.0	857.5	2307.6
<b>H35</b>	242.1	551.4	637.5	873.2	2304.3
<b>G45</b>	252.6	406.7	773.6	857.5	2290.4
<b>H45</b>	246.8	428.9	737.3	873.2	2286.2
<b>G55</b>	255.4	332.7	833.9	857.5	2279.5
<b>H55</b>	249.7	350.9	800.8	873.2	2274.7

*Tabla # 7: Proporciones por peso (kg) para 1 m<sup>3</sup> de hormigón*

## Elaboración de especímenes

Para cada uno de los 6 diseños de hormigón se elaboraron una viga de 150 x 150 x 450 mm y 3 cilindros de 100 x 200 mm de acuerdo a la ASTM C31 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Todos los especímenes tuvieron un curado en agua de 7 días y 21 días de curado en aire. En las vigas se realizan los ensayos no destructivos mientras que los cilindros se utilizaron para determinar la resistencia a la compresión.



*Figura # 9: Moldes de madera de 150 x 150 x 450 mm para la elaboración de las vigas de hormigón*



*Figura # 10: Vigas de 150 x 150 x 450 mm para los ensayos no destructivos*

## Ensayos hormigón fresco

Se realizan ensayos de asentamiento según la norma ASTM C143: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete y de densidad y contenido de aire por el método gravimétrico según la norma ASTM C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

ID	a/mc final	Asentamiento (cm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de aire
<b>G35</b>	0.37	9.0	2269	2.8%
<b>H35</b>	0.39	7.0	2406	2.3%
<b>G45</b>	0.48	9.5	2206	2.6%
<b>H45</b>	0.50	8.0	2294	2.1%
<b>G55</b>	0.59	10.5	2183	2.2%
<b>H55</b>	0.61	9.5	2254	1.8%

*Tabla # 8: Ensayos en hormigón fresco (asentamiento según la ASTM C143 y densidad y contenido de aire por el método gravimétrico según la ASTM C138)*

## Determinación de la resistencia a la compresión

Se ensayan los 3 cilindros a compresión de acuerdo a la norma ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.



*Figura # 11: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de 100 x 200 mm de acuerdo a ASTM C39*

Se obtiene el promedio de los resultados de los 3 cilindros curados en obra de cada diseño de hormigón así como su desviación estándar.

Resistencia a la compresión (MPa)					
ID	1	2	3	Prom	Dsv Std
H35	42.2	42.6	43.6	42.8	0.7
G35	35.9	36.6	37.7	36.8	0.9
H45	33.6	34.5	35.0	34.4	0.7
G45	28.4	28.0	27.5	28.0	0.4
H55	25.6	24.1	25.4	25.0	0.8
G55	17.9	18.3	16.3	17.5	1.0

Tabla # 9: Resultados ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón según ASTM C39

ID	a/c final	fc (Mpa)
H35	0.39	42.79
G35	0.37	36.76
H45	0.50	34.36
G45	0.48	27.97
H55	0.59	25.04
G55	0.60	17.51

Tabla # 10: Promedios de los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón en función de la relación a/mc final

Para el caso del agregado de la mina de “El Guabo” el modo de falla fue aplastamiento del agregado por lo que se obtuvieron resistencias menores.

### Determinación del número de rebote

Los ensayos para determinar el número de rebote se realizan con el martillo para ensayos de hormigón MATEST C380-1 cumpliendo la norma ASTM C805: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. Se realizan un total de 12 pruebas en cada una de las 6 vigas, 3 en cada una de las 4 caras grandes de la viga. La gravedad afecta el rebote de acuerdo al ángulo del esclerómetro por lo que se requiere una calibración por separado para cada posición. Se consideran las 3 configuraciones perpendiculares a la superficie de contacto: posición vertical con el punzón hacia abajo, posición horizontal y posición vertical con el punzón hacia arriba.

↓ Número de rebote configuración vertical con el punzón hacia abajo													
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Promedio
H35	32	36	34	34	32	34	34	32	34	36	34	32	33.7
G35	32	32	34	34	34	34	32	32	34	32	34	32	33.0
H45	32	32	30	32	32	34	32	34	30	32	32	30	31.8
G45	30	32	28	32	30	30	30	30	30	32	32	28	30.3
H55	26	28	28	30	30	28	28	28	28	28	26	28	28.0
G55	24	26	24	24	24	24	24	26	26	24	26	24	24.7

Tabla # 11: Determinación del número de rebote en configuración vertical con el punzón hacia abajo según la norma ASTM C805

→ Número de rebote configuración horizontal													
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Promedio
H35	34	32	34	36	34	34	36	36	36	34	36	36	34.8
G35	32	32	34	34	36	36	34	36	32	34	36	36	34.3
H45	34	32	32	30	30	34	32	34	32	30	32	30	31.8
G45	28	30	32	30	32	28	30	28	32	30	32	28	30.0
H55	34	34	34	30	34	30	32	30	30	32	30	28	31.5
G55	26	28	26	28	28	26	28	28	26	28	28	26	27.2

Tabla # 12: Determinación del número de rebote en configuración horizontal según la norma ASTM C805

↑ Número de rebote configuración vertical con el punzón hacia arriba													
ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Promedio
H35	32	36	34	34	34	34	34	34	34	36	34	36	34.3
G35	34	34	32	34	32	32	34	34	32	34	34	34	33.3
H45	34	32	34	36	34	36	32	34	34	36	34	34	34.2
G45	30	32	32	30	30	30	32	32	32	30	30	30	30.8
H55	34	34	32	32	32	32	34	32	34	32	34	32	32.8
G55	28	28	26	26	28	28	26	28	26	26	28	28	27.2

Tabla # 13: Determinación del número de rebote en configuración vertical con el punzón hacia arriba según la norma ASTM C805

## Determinación de la velocidad de pulso

Los ensayos para determinar la velocidad de pulso se realizan según la norma ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Se utiliza el instrumento ultrasónico Proceq Pundit Lab. Para cada una de las 6 vigas, se realizan 3 pruebas con los dos

transductores ubicados en el centro de las caras de 150 x 150 mm, es decir las ondas recorren 450 mm.

ID	Velocidad de pulso (m/s)				
	1	2	3	Promedio	Dsv Std
<b>H35</b>	3866	3883	3883	3877	9.81
<b>G35</b>	3722	3707	3722	3717	8.66
<b>H45</b>	3662	3676	3707	3682	23.03
<b>G45</b>	3425	3438	3438	3434	7.51
<b>H55</b>	3425	3425	3438	3429	7.51
<b>G55</b>	3275	3275	3287	3279	6.93

*Tabla # 14: Determinación de la velocidad de pulso según la norma ASTM C597*

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### Modelos individuales

Al realizar la regresión con los logaritmos naturales de los resultados se obtienen dos beneficios: se satisface el supuesto del análisis por mínimos cuadrados ordinarios de que el error de la variable dependiente es constante y se puede generar una correlación no lineal. Tradicionalmente la mayoría de modelos de predicción de la resistencia a la compresión han sido lineales generados por regresiones lineales por el método de mínimos cuadrados ordinarios. Sin embargo, este modelo solo es adecuado para hormigones de resistencias relativamente bajas. Las funciones potenciales son más apropiadas para un mayor rango.

### Número de rebote

Se trabaja con los promedios tanto de la resistencia a la compresión como del número de rebote. Las regresiones se realizan a partir de los siguientes valores.

ID	Número de rebote			f <sub>c</sub> (MPa)
	↓	→	↑	
<b>H35</b>	33.7	34.8	34.3	42.8
<b>G35</b>	33.0	34.3	33.3	36.8
<b>H45</b>	31.8	31.8	34.2	34.4
<b>G45</b>	30.3	30.0	30.8	28.0
<b>H55</b>	28.0	31.5	32.8	25.0
<b>G55</b>	24.7	27.2	27.2	17.5

*Tabla # 15: Promedios del número de rebote en las tres configuraciones y la resistencia a la compresión*

El Comité 228 del ACI recomienda considerar funciones potenciales porque permiten lograr predicciones más exactas. (ACI Committee 228, 2003). Para la elaboración de los modelos individuales de predicción de la resistencia a la compresión en función del número de rebote para cada una de las 3 configuraciones se realizan regresiones de tipo potencial.

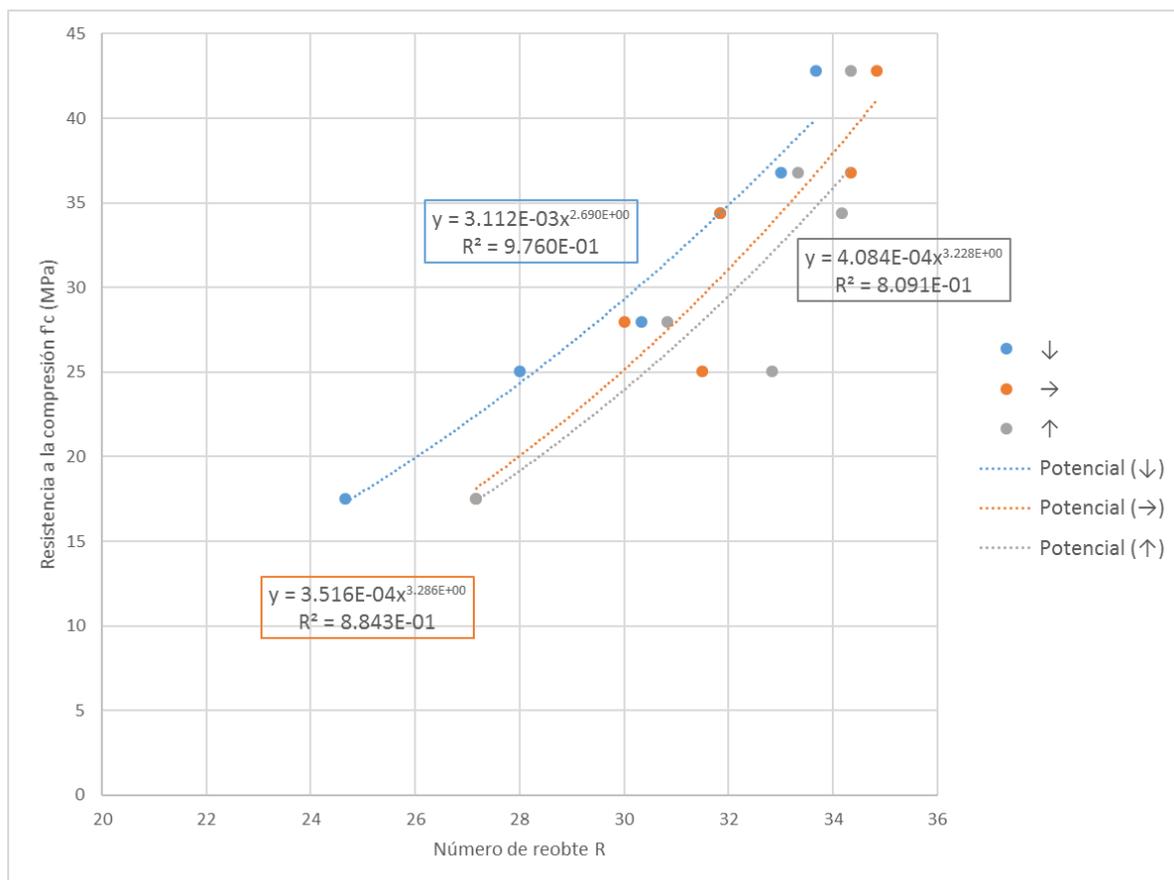


Figura # 12: Regresiones potenciales de los modelos individuales para predecir la resistencia a la compresión del hormigón en función del número de rebote para cada configuración

Las funciones obtenidas a partir de regresiones simples que tienen la forma  $f_{ck} = aR^b$ , donde  $f'_c$  es la variable dependiente resistencia a la compresión, R es la variable independiente número de rebote y a y b son constantes. Para cada función se presentan los valores de las constantes obtenidas, así como su coeficiente de correlación.

Configuración	a	b	$R^2$
↓	$3.112 \times 10^{-3}$	2.690	0.976
→	$3.516 \times 10^{-4}$	3.286	0.884
↑	$4.084 \times 10^{-4}$	3.228	0.809

Tabla # 16: Constantes de las funciones obtenidas en los modelos individuales para predecir la resistencia a la compresión en función del número de rebote para las tres configuraciones

## Velocidad de pulso

Se trabaja con los promedios tanto de la resistencia a la compresión como de la velocidad. La regresión se realiza a partir de los siguientes valores.

ID	Velocidad de pulso (m/s)	fc (Mpa)
H35	3877	42.8
G35	3717	36.8
H45	3682	34.4
G45	3434	28.0
H55	3429	25.0
G55	3279	17.5

Tabla # 17: Promedios de la velocidad de pulso y la resistencia a la compresión

La velocidad de pulso con respecto a la resistencia la compresión tiene un comportamiento no lineal, los modelos lineales obtenidos no son significativos. (Malhotra & Carino, 2004).

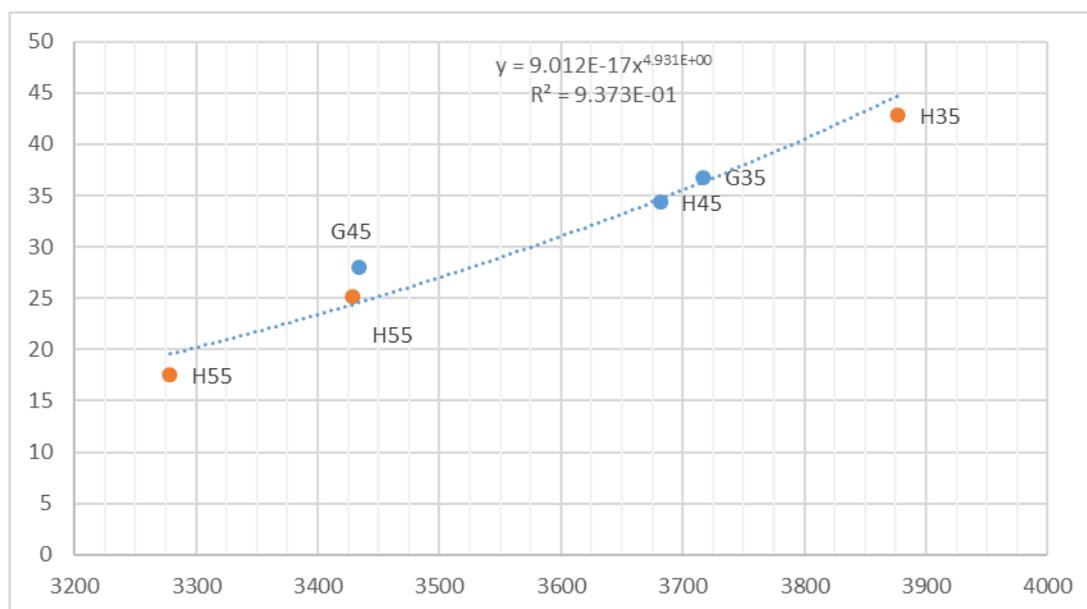


Figura # 13: Regresión potencial del modelo individual para predecir la resistencia a la compresión del hormigón en función de la velocidad de pulso

Se realiza una regresión simple considerando una función de la forma  $f_{ck} = aV^b$ , donde  $f'_c$  es la variable dependiente resistencia a la compresión, V es la variable independiente velocidad de pulso y a y b son constantes. Para cada función se presentan los valores de las constantes obtenidas, así como su coeficiente de correlación.

a	b	$R^2$
$9.012 \times 10^{-17}$	4.931	0.937

Tabla # 18: Constantes de la función obtenida en el modelo individual para predecir la resistencia a la compresión en función de la velocidad de pulso y sus coeficientes de correlación

## Modelo combinado

El objetivo de utilizar un modelo combinado es lograr una mejor correlación a través de la cancelación de errores que se produce cuando un determinado factor afecta en las variables independientes en direcciones opuestas. Para que el modelo combinado tenga una mayor confiabilidad que los modelos individuales se deben elegir dos métodos que cumplan con esta consideración. La combinación del número de rebote y la velocidad de pulso es la más utilizada debido principalmente al efecto opuesto que tiene el contenido de humedad en la predicción de la resistencia a la compresión. Aunque con un menor impacto, otros factores que cumplen esta condición es el tamaño del agregado, el tipo y contenido de cemento utilizado y la relación agua – material cementante. (RILEM Committee 207, 2012). Por otro lado, el número de rebote y la velocidad de pulso son dos de los métodos no destructivos más populares, económicos y estudiados. Una ventaja adicional de la combinación de estos dos métodos es que el número de rebote es un ensayo superficial altamente afectado por la posible heterogeneidad del hormigón mientras que las ondas ultrasónicas en el ensayo de velocidad de pulso viajan por el núcleo del elemento de hormigón distancias suficientes para prácticamente eliminar la incidencia de la heterogeneidad del hormigón.

Se realiza una regresión múltiple considerando una función de la forma  $f_{ck} = aV^bR^c$  para las tres configuraciones del número de rebote, donde  $f'_c$  es la variable dependiente resistencia a la compresión, V es la variable independiente velocidad de pulso, R es la variable independiente número de rebote y a, b y c son constantes. Para cada función se presentan los valores de las constantes obtenidas, así como su coeficiente de correlación y un intervalo de predicción del 95%.

Configuración	a	b	c	R <sup>2</sup> ajustado	IP 95% (MPa)
↓	$1.368 \times 10^{-8}$	1.900	1.749	0.993	3.36
→	$3.495 \times 10^{-13}$	3.460	1.092	0.919	3.82
↑	$5.100 \times 10^{-14}$	3.737	0.990	0.931	3.77

Tabla # 19: Constantes de las funciones obtenidas en los modelos combinados para predecir la resistencia a la compresión en función del número de rebote y la velocidad de pulso para las tres configuraciones, su coeficiente de correlación y un intervalo de predicción del 95%

## Comprobación de los modelos

Como referencia se realizan dos comprobaciones de los modelos a partir de dos diseños desconocidos de hormigón y especímenes realizados con los mismos moldes. Para el número de rebote se utiliza una configuración vertical con el punzón hacia abajo.

V (m/s)	R	fck(V) Mpa	fck(R) Mpa	fck(R,V) Mpa	f <sub>c</sub> (Mpa)
3843	34.8	42.8	43.8	44.0	38.6
3589	32.6	30.6	36.7	34.4	30.7

Tabla # 20: Comprobación de los modelos individuales y el modelo combinado para dos diseños de hormigón desconocidos

Los esclerómetros incluyen curvas de correlación desarrolladas por el fabricante. El uso de estas curvas no es recomendado debido a que los materiales y las condiciones con las que fueron elaboradas pueden ser muy diferentes a cada caso particular.

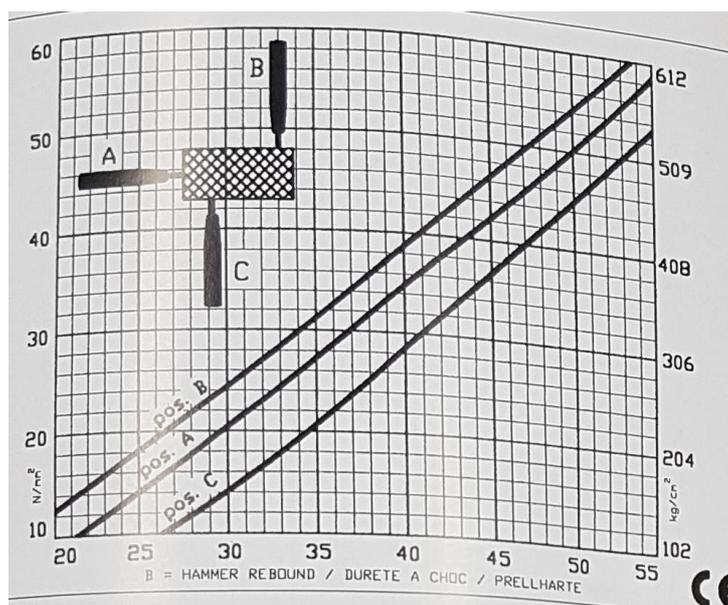


Figura # 14: Curvas de correlación suministrada por el fabricante del esclerómetro

A partir de las curvas de correlación suministradas por el fabricante del esclerómetro utilizado se obtiene valores muy distintos a los verdaderos. Se debe recordar que estas curvas son realizadas a partir de materiales totalmente distintos a los utilizados en el Ecuador y más específicamente en la provincia de Pichincha. Estas tablas no deben ser utilizadas.

## **Conclusiones y recomendaciones**

Los métodos no destructivos son adecuados para predecir la resistencia a la compresión del hormigón siempre y cuando se desarrollen correlaciones específicas para los materiales locales. Cuando esto se cumple constituyen una herramienta rápida y económica con una buena confiabilidad para hacer evaluaciones estructurales y tomar decisiones aunque las normas internacionales y locales no permiten sustituir los ensayos destructivos tradicionales como criterios de diseño y aceptación del hormigón.

Los modelos combinados pueden mejorar la confiabilidad de las predicciones si se eligen métodos que conlleven a la cancelación de errores. El número de rebote y la velocidad de pulso son dos ensayos muy compatibles para combinarse debido principalmente al efecto contrario que tiene la humedad de los elementos de hormigón en los resultados. Su combinación permite además controlar efectos locales y superficiales relacionados con la heterogeneidad del hormigón.

Para poder realizar predicciones de la resistencia a la compresión del hormigón se deben elaborar correlaciones utilizando los materiales y procedimientos locales. Las funciones obtenidas son representativas únicamente del rango de resistencias consideradas y su aplicación fuera de este rango debe evitarse.

Es necesario realizar más comprobaciones con distintos materiales, con varias resistencias y en las diferentes configuraciones del esclerómetro para poder juzgar de mejor manera la validez y aplicabilidad de los modelos obtenidos.

Para asegurar el empotramiento de los especímenes utilizados en los ensayos no destructivos se recomienda aplicar una carga de compresión dentro del rango establecido por las normas.

Cuando se realice el ensayo de número de rebote es muy importante trabajar con el elemento de hormigón para lo cual se debe retirar cualquier otro tipo de recubrimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Comité 318. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14); y Comentario (ACI318RS-14)*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Committee 228. (2003). *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength: ACI 228.1R-03*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Committee 228. (2013). *Report on Nondestructive Test Method for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ASTM Standard C136. (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C143. (2003). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C31. (2003). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C33. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C39. (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C597. (2009). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM Standard C805. (2002). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- Carino, N., & Malhotra, V. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (2 ed.). West Conshohocken: CRC Press.

Kosmatka, S., & Wilson, M. (2001). *Design and Control of Concrete Mixtures* (15 ed.).

Skokie: Portland Cement Association.

Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (2 ed.).

West Conshohocken: CRC Press.

Proceq. (2014). *Manual de Operación Pundit Lab Instrumento Ultrasónico*. Schwerzenbach.

RILEM Committee 207. (2012). *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures:*

*Reliability and Limits of Single and Combined Techniques*. (D. Breysse, Ed.)

Springer.

Weisberg, S. (2013). *Applied Linear Regression* (4 ed.). Hoboken: Wiley.