

**Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña  
(UNPHU)**

**Facultad de Ciencias y Tecnologías**

**Escuela de Ingeniería Civil**



**Evaluación de la resistencia a compresión del hormigón  
endurecido mediante la aplicación de técnicas de ultrasonido.**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
INGENIERO CIVIL**

**Sustentada por:**

Ana Argelia Hernández de la Cruz

Aderly Emilio Gutiérrez Martínez

**Asesor:**

Ing. Ramón Emilio Tavares Bello

Santo Domingo, D. N.

2016

**Evaluación de la resistencia a compresión  
del hormigón endurecido mediante la  
aplicación de técnicas de ultrasonido.**

## **DEDICATORIA**

A Dios, porque sin el nada hubiese sido posible. A mis padres, Secundina Martínez y Luis E. Gutiérrez, a mis hermanos y a todos mis seres queridos quienes siempre me mantuvieron motivado para culminar este desafío. A todos aquellos que formaron parte de esta investigación, a mi alma mater.

**Aderly E. Gutiérrez Martínez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero reconocer todo el apoyo recibido de la **empresa ARGOS S.A.** y agradecer al personal técnico y profesional que de diversas formas estuvieron involucrados en el desarrollo de esta tesis, **a nuestros amigos Juan M. Soto, Jorge Moquete y al Ing. Maceo.** También agradecemos de forma muy especial **a nuestro asesor y director de la escuela de ingeniería civil el profesor Ing. Ramón Emilio Tavares Bello** quien de forma incansable nos guio a lo largo de todo este proceso.

**Aderly E. Gutiérrez Martínez**

## **DEDICATORIA**

A Dios, Alfa y Omega de todo. Único merecedor de toda gloria y toda honra.

A mi madre, Ana De La Cruz, mujer abnegada, excelente educadora, trabajadora esforzada y ejemplar.

A mis Hermanas y hermano, Ana Greicyfer Hernández, Ana Luisa Hernández y José Luis Hernández Jr. Por su confianza, respaldo y solidaridad incondicional.

A mi sobrino Chris Manuel Ovalle. Para que tenga en su tía un modelo, porque siempre puede llegar más lejos.

A mi padre, José Luis Hernández de la Cruz, por aportar su grano de arena para que fuera posible la realización de esta investigación.

A mis familiares, por su gran colaboración, mi tío Julián De La Cruz, mi prima Margarita De La Cruz, mi Abuela Celia Heredia, mi tío Inginio De La Cruz, entre otros.

A mi Pastora Dionicia Reyes y a todos los miembros de la Iglesia de Dios en Cristo La Senda Inc. Yamasá. Por tenerme pendiente siempre en sus oraciones.

**Ana Argelia Hernández de la Cruz**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la sabiduría; siempre me ha ayudado a salir adelante, en todo momento y porque sin el nada sería posible.

A mi Mamá, Ana De La Cruz, por su respaldo sin condiciones y por qué nunca planteo excusas al momento de necesitarla, sino que siempre estuvo ahí. A mi Padre, José L. Hernández, por extenderme su mano cuando lo requería. A mis hermanos Greicyfer, Luisa y Junior por su apoyo total.

A La Cooperativa Nacional de Servicios Múltiples de Los Maestros, Inc. (COOPNAMA), por otorgarme una beca completa para cursar mis estudios de grado. A Argos Dominicana, por su gesto de solidaridad y apoyo en esta investigación, en especial a Juan Soto, Ing. Maceo, Miguel Valdez y Jorge Moquete. A nuestro asesor el Ing. Ramón Tavarez, por su enorme apoyo siempre. A María Ulloa, Moisés Charles y la Ing. Yndira Mazara por su gran ayuda.

A mis amigos por su confianza y apoyo siempre. Aderly, Christian, Elisa, Emmanuel, Francis, Iván, Jean Carlos, José, Julia, Keidy, Lauren, Fernanda, Manuel, Máximo, Melissa, Misael, Oliver, Rafael, Tancredo, Viola e Yasmilka.

A la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña UNPHU, alma máter. Por otorgarme la oportunidad y el privilegio de estudiar en sus aulas. A mis profesores por sus enseñanzas. Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

**Ana Argelia Hernández De La Cruz**

## RESUMEN

Gracias al incremento incesante del consumo de hormigón como material de construcción, resulta de mucha envergadura contar con técnicas de estimación no destructivas que, de forma fácil y efectiva, hagan posible la caracterización de una estructura de concreto en lo relacionado a Resistencia a Compresión; en vista de ello este trabajo de investigación plantea el Ensayo de Ultrasonido para la predicción de dicha medida, haciendo hincapié en una modelación matemática de aproximación que asocie la Resistencia a Compresión con la Velocidad de Pulso Ultrasónico, con un grado de confianza admisible. El objetivo es llevar a cabo una inspección de la calidad de forma permanente in situ, que admita la continuación correcta de las labores y así impedir trabajar doblemente lo que sería posiblemente costoso, en síntesis, generar ganancias para el sector construcción.

El trabajo práctico efectuado comienza en los Laboratorios con la elaboración, muestreo y control de tres diseños patrón de hormigón (los más vendidos), para los cuales se ponen de manifiesto algunas variables de investigación: la relación Agua/Cemento o resistencia y el tiempo de curado. Con los datos de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de Resistencia a Compresión, conseguidos de pruebas en estado endurecido, se forman relaciones y se lleva a cabo un análisis de confianza, a fin de establecer ecuaciones de correspondencia que se acoplen a la conducta de los hormigones.

En conclusión, se estiman los intervalos de error al iterar apreciaciones de la Resistencia a Compresión con las ecuaciones encontradas, analizando en qué proporción se muestran los casos de sobrevaloración o subvaloración.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO I.- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1.Planteamiento y formulación del problema.....	8
1.1.1. - Preguntas de la investigación .....	10
1.2.Objetivos de la investigación.....	11
1.2.1.Objetivo general .....	11
1.2.2.Objetivos específicos .....	11
1.3.Justificación del tema .....	12
1.4.Antecedentes de la investigación.....	13
<b>CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1. Exámenes en el concreto en general.....	16
2.1.1. Pruebas en el concreto en estado fresco .....	16
2.1.1.1 Prueba para el cálculo del asentamiento (ASTM C143) .....	16
2.1.1.2. Prueba para establecer el peso unitario y densidad (ASTM C138) .....	17
2.1.1.3. Prueba para establecer el contenido de aire (ASTM C138).....	18
2.1.1.4. Prueba para establecer la temperatura (ASTM C1064).....	18
2.1.2. Pruebas en el concreto en estado endurecido .....	19
2.1.2.1. Pruebas destructivas en el concreto .....	19
2.1.2.2. Pruebas no destructivas en el concreto .....	20
2.1.3. Exámenes materia de estudio .....	22
2.1.3.1. Prueba de resistencia a compresión.....	22
2.1.3.2. Prueba ultrasónica.....	25
2.2. Marco conceptual.....	35
2.2.1. Prueba ultrasónica.....	35
2.2.2. Mezclas de hormigón .....	35
2.2.3. Dosificación del hormigón .....	35
2.2.4. Ensayo a compresión.....	35
2.2.5. Resistencia a compresión .....	35
2.3. Marco contextual .....	36
2.4.Formulación de hipótesis .....	37
2.5.Alcances y limitaciones.....	37

## **CAPITULO III.- MARCO METODOLÓGICO..... 39**

3.1. Enfoque de la investigación .....	39
3.2. Tipo de investigación .....	39
3.3. Método de investigación .....	40
3.4. Técnicas de investigación .....	40
3.5. Población y muestra .....	40
3.5.1. Juicios para la selección de la muestra .....	41
3.6. Procedimientos.....	45
3.6.1 Obtención de los agregados .....	45
3.6.2 Ensayos realizados para obtener las características de los agregados.....	45
3.6.3.Cemento Portland Tipo I.....	53
3.6.4.Aditivos .....	53
3.6.5. Elaboración de las mezclas de hormigón especificadas .....	54
3.6.6. Dispositivo de ultrasonido .....	62
3.6.7. Preparación de especímenes para ensayos.....	67
3.6.8. Ensayo de ultrasonido .....	69
3.6.9. Ensayo de resistencia a compresión .....	72
3.6.10. Recopilación de datos.....	73
3.7. Cronograma de actividades .....	74
3.8.Análisis de los datos .....	75
3.8.1.Evaluación estadística sobre la calidad y homogeneidad del hormigón tratado .....	75
3.8.2.Análisis de la edad del hormigón .....	77
3.8.3.Análisis de la relación agua / cemento .....	80
3.8.4.Análisis global de los resultados velocidad vs resistencia .....	83
3.8.5.Evaluación del valor de confiabilidad .....	85

## **CAPITULO IV.- RESULTADOS..... 88**

4.0. Análisis de resultados .....	88
4.0.1.Ajuste de la gráfica más favorable mediante el método de los valores atípicos .....	93
4.0.2.Gráfica ajustada y tabla de resultados final .....	97
4.1. Conclusiones.....	100
4.2.Recomendaciones .....	101
4.3.Líneas futuras de investigaciones.....	102
Bibliografía.....	103
Anexos .....	106

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Técnicas de medición para aplicar el ensayo de ultrasonido. ....	31
Ilustración 2: Técnica de medición directa sobre probeta cilíndrica. ....	32
Ilustración 3: Laboratorio de control de calidad de la planta concretara Argos Las Américas, fuente propia.....	36
ilustración 4: Planta de agregado bisonó, fuente propia.....	45
Ilustración 5: Ensayo de peso unitario para agregado fino ASTM C-29, fuente propia.....	46
Ilustración 6: Ensayo de peso unitario para agregado grueso ASTM C-29, fuente propia.....	46
Ilustración 7: Ensayo de gravedad específica para A. F. ASTM 128, fuente propia .....	47
Ilustración 8: Ensayo de gravedad específica A.G. ASTM- 127, fuente propia.....	48
Ilustración 9: Análisis granulométrico A.F. ASTM C-136, fuente propia. ....	49
Ilustración 10: Análisis granulométrico A.G. ASTM C-136, fuente propia. ....	51
Ilustración 11: Oficina de control de dosificación de mezcla, fuente propia. ....	55
Ilustración 12: Obtención del concreto mediante el bachiplan, fuente propia. ....	55
Ilustración 13: Prueba de revenimiento o slump, fuente propia. ....	55
Ilustración 14: Prueba de temperatura, fuente propia.....	55
Ilustración 15: Elaboración probetas de hormigón, fuente propia.....	56
Ilustración 16: Especímenes a las 24 horas, fuente propia. ....	57
Ilustración 17: Probetas introducidas en la cámara de curado, fuente propia. ....	58
Ilustración 18: Extracción de probetas de los cilindros mediante la máquina de compresión de aire,	
Ilustración 19: Equipo de Ultrasonido de la UNPHU, fuente propia.....	64
Ilustración 20: Cables de conexión con sus transductores (emisor y receptor), fuente propia. ....	65
Ilustración 21: Barra calibradora con tiempo de tránsito, de referencia, inscrito. fuente propia. ....	66
Ilustración 22: Grasa útil para acoplar superficies de contacto con transductores, fuente propia. ..	66
Ilustración 23: Lijado y nivelación de las superficies de contacto en la probeta, fuente propia. ....	68
Ilustración 24: Limpieza de las superficies de contacto en la probeta, fuente propia.....	69
ilustración 25: Esquema secuencial de ensayo de ultrasonido, fuente propia. ....	69
Ilustración 26: Aplicación de grasa acoplante.....	69
Ilustración 27: Calibración del tiempo de propagación en base a referencia grabada en la barra calibradora, fuente propia.....	70
Ilustración 28: Medición del tiempo de propagación del pulso ultrasónico, fuente propia.....	71
Ilustración 29: Ensayo de Resistencia a Compresión, fuente propia.....	72

## ÍNDICE DE GRAFICAS

grafica 1: velocidad vs resistencia $f'c=210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	77
grafica 2: velocidad vs resistencia a compresión $f'c=280$ kg/cm <sup>2</sup> .....	78
grafica 3: velocidad vs resistencia $f'c=350$ kg/cm <sup>2</sup> .....	79
grafica 4: velocidad vs resistencia $f'c= 210$ kg/cm <sup>2</sup> con tiempo de curado fijado a 7 días.....	80
grafica 5: Velocidad vs resistencia a compresión con tiempo de curado fijado a 14 días.....	81
grafica 6: velocidad de pulso vs resistencia a compresión con tiempo de curado fijado a 28 días.	82
grafica 7: Velocidad.....	83
grafica 8: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión general del modelo lineal .....	86
grafica 9: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión general del modelo potencial .....	86
grafica 10: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión general del modelo exponencial .....	87
grafica 11: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión general del modelo cuadrático .....	87
grafica 12: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión .....	97
grafica 13: Tabla de resultados final .....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados de ensayos en el concreto en estado endurecido para muestras obtenidas a nivel industrial.....	73
Tabla 2: Cronograma de actividades realizadas para ejecución de ensayos.....	75
Tabla 3: tabla de las resistencias obtenidas. ....	77
Tabla 4: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión del hormigón $f'c=210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	77
Tabla 5: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión del hormigón $f'c=280$ kg/cm <sup>2</sup> .....	78
Tabla 6: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión del hormigón $f'c=350$ kg/cm <sup>2</sup> .....	79
Tabla 7: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión con tiempo de curado fijado a 7 días.....	80
Tabla 8: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión con tiempo de curado fijado a 14 días...	81
tabla 9: velocidad de pulso vs resistencia a compresión con tiempo de curado fijado a 28 días.....	82
Tabla 10: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión general .....	83
Tabla 11: Porcentajes residuales para el modelo de aproximación lineal .....	89
Tabla 12: Porcentajes residuales para el modelo de aproximación potencial .....	90
Tabla 13: Porcentajes residuales para el modelo de aproximación exponencial .....	91
Tabla 14: Porcentajes residuales para el modelo de aproximación cuadrática.....	92
Tabla 15: Porcentajes residuales y diferencias de resistencias ordenados de menor a mayor.....	94
Tabla 16: Valores atípicos diferencia de resistencia.....	95
Tabla 17: Valores atípicos porcentaje residual .....	95
Tabla 18: Tabla general con valores atípicos a descartar .....	96
Tabla 19: Velocidad de pulso vs resistencia a compresión .....	97

## INTRODUCCIÓN

El cálculo de la rapidez del pulso ultrasónico como opción de prueba no destructiva para valorar la calidad del concreto ha sido manejado desde hace alrededor de 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá (Malhotra y Carino 1991), y se manejó con gran éxito desde la década de los sesenta para auscultar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas.

En la actualidad se puede percibir que una parte, cada vez más significativa, de los costos para llevar a cabo un proyecto de construcción, se consignan a reconstrucción, reparación y/o mantenimiento de edificios, a fin de enmendar las fallas que ponen en peligro la vida de los ocupantes. Muchas veces para detectar estas fallas se requiere de una afectación de la estructura, lo que supone un peligro cuando se trata de estructuras muy viejas y deterioradas.

Un caso de mucho interés por parte del gobierno en la República Dominicana ha sido la preservación del patrimonio cultural, como es el caso de las estructuras históricas y monumentales en sectores de la región tales como la zona colonial y otros que, por su condición de antigüedad y grado de deterioro, no pueden ser evaluadas con ensayos destructivos ya que podrían generar un gran daño e incluso podrían provocar un colapso.

Ante este escenario los ensayos no destructivos en general representan un papel sustancial en la inspección de la calidad y para conseguir información, sin perturbar la estructura, referente al nivel de avería, durabilidad, estado de desgaste de armaduras y resistencia de materiales (entre los cuales especialmente tenemos al concreto).

En ese orden, con esta indagación se procura efectuar una contribución práctica a la comunidad asociada con la tecnología del concreto, atendiendo la necesidad de mejorar un ensayo poco acreditado en la República Dominicana y de precisar su grado de seguridad; a fin de conseguir herramientas de control de calidad in situ estimando y/o verificando una de las propiedades mecánica más importante del concreto, su resistencia.

Se plantea el examen ultrasónico para la predicción de la resistencia a compresión en estructuras de concreto, como complemento al clásico ensayo destructivo de Resistencia a Compresión efectuado bajo un proceso estándar.

La Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (UNPHU), yergue como pionera en República Dominicana al emplear este método para la evaluación de la calidad del concreto. La idea fundamental sería contar con una tecnología práctica además de amigable con el medio ambiente, dado que admite infinitas repeticiones y básicamente no produce residuos ni emplea combustible.

## **CAPITULO I.- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

Cuando hablamos de estructuras de hormigón, uno de los aspectos más importantes son las solicitaciones para las cuales fueron diseñadas y una vez llevadas a cabo, la verificación de estas mediante los métodos existentes. Si bien es cierto, las pruebas de extracción de testigos de hormigón en función de sus resultados no pueden ser sustituidas por pruebas no destructivas según la (ASTM C-42), no obstante, por obvias razones se debe saber que no siempre las pruebas de extracción de testigo de hormigón se podrán ejecutar debido a que existen muchos factores que en algún momento lo impiden.

En estructuras históricas y monumentales, el realizar una perforación de la magnitud que lo amerita un testigo de hormigón representativo implicaría un riesgo, ya que eventualmente pudiese afectar la estructura e incluso ocasionar un colapso dependiendo de qué tan antigua sea dicha estructura, y del estado en que la misma se encuentre. El alto costo que representa la operación de extracción, la preparación, y la experimentación de las muestras tomadas, también significa una limitación para la implementación de este instrumento de verificación.

Otro de los inconvenientes presentes al momento de realizar dicha prueba es el tamaño del equipo rotatorio, el cual, en ocasiones no puede acceder a lugares pequeños como es el caso de pasillos o franjas estrechas, donde sólo cabe el operador.

Según la (ASTM C-42), los especímenes para el ensayo de resistencia no deben ser tomados hasta que el concreto haya desarrollado la resistencia adecuada, es decir, no se recomienda hacer perforaciones antes de catorce días debido a que el elemento estructural ensayado se puede ver afectado y por demás el espécimen extraído pudiese no ser válido por roturas alternas al momento de la perforación.

Una alternativa ante esta problemática es la evaluación de la resistencia a compresión del hormigón endurecido mediante la aplicación de técnicas de ultrasonido, con la cual se persigue establecer una correlación entre la velocidad de onda emitida por el ultrasonido, y la resistencia a compresión de concreto elaborado en la República Dominicana.

### **1.1.1. - Preguntas de la investigación**

1. ¿Cómo se comportan las ondas de ultrasonido a través de distintos diseños de mezclas de hormigón?
2. ¿Qué tanto varía la velocidad ultrasónica generada en especímenes de diferentes edades?
3. ¿Se podría establecer una correlación entre la velocidad ultrasónica y el ensayo a compresión simple, para la valoración de la resistencia del concreto?
4. ¿Qué tan aproximados son los resultados de la resistencia a compresión del hormigón obtenidos por métodos a compresión simple, versus técnicas de ultrasonido?

## **1.2. Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

1. Evaluar la resistencia a compresión del hormigón endurecido mediante la aplicación de técnicas de ultrasonido.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Examinar el comportamiento de las ondas de ultrasonido a través de distintos diseños de mezclas de hormigón.
2. Verificar la variabilidad de la velocidad ultrasónica generada en especímenes de diferentes edades.
3. Establecer una correlación entre la velocidad de ultrasonido y el ensayo a compresión simple para la estimación de la resistencia del concreto.
4. Comparar los resultados de la resistencia a compresión del hormigón, obtenidos por métodos a compresión simple, versus técnicas de ultrasonido.

### **1.3. Justificación del tema**

El ensayo destructivo de resistencia a compresión simple del concreto ha sido asunto de manejo oficial en todo aspecto, lo que en ingeniería civil representa un auténtico reto para los profesionales del área, es cuando se ha querido medir de manera no destructiva alguna propiedad física del concreto, asociada con su resistencia.

El avance tecnológico que se ha presentado en los últimos años en la industria de la construcción ha mejorado el aspecto constructivo en todos los ámbitos, dando así lugar, a una gama de dispositivos dentro de los cuales está el Pulse Velocity o ultrasonido.

En vista de las potencialidades ya conocidas que proporciona el método de ultrasonido según la ASTM C-597, (estimar la uniformidad y calidad relativa del concreto, mostrar la presencia de vacíos y grietas, indicar los cambios en las propiedades del concreto) se ha optado por la implementación del mismo como una solución ante los ensayos destructivos de resistencia a compresión, con la finalidad de obtener resultados a partir de la forma en que la velocidad de onda de ultrasonido se propaga a través de especímenes de hormigón, y así establecer correlaciones para predecir su resistencia a compresión.

## **1.4. Antecedentes de la investigación**

Para el desarrollo de esta investigación se tienen algunos antecedentes de origen extranjero, no se encontró ninguna investigación relacionada con el tema en la República Dominicana.

El cálculo de la rapidez del pulso ultrasónico como una opción de prueba no destructiva, para valorar la calidad del concreto, se ha manejado desde el año 1950 aproximadamente. La prueba fue desarrollada por Leslie y Cheesman (Canadá) y se manejó con gran éxito desde la década de 1960 para determinar el estado del concreto en cortinas de presas; casi paralelamente Jones (Inglaterra) descubrió una técnica fundamentada en el mismo principio: transductores electroacústicos, que brindaban un mayor control sobre el tipo y la frecuencia de los pulsos generados, este tipo de ensayos ha sido convertido en el método moderno de ultrasonido.

En diversos países se han ejecutado estudios de correlación con el propósito de lograr modelos que permitan pronosticar la resistencia a la compresión uniaxial del concreto en base a la velocidad ultrasónica (Anderson y Seals en 1981; Sturup et al. en 1984 para el ACI). De los estudios ejecutados en Canadá, Malhotra en 1985, creo un criterio de aprobación del concreto sobre la base de la medición de la velocidad ultrasónica, clasificando el concreto en categorías con base a intervalos de velocidad ultrasónica.

Castellanos (México) en 1985, experimentó la correlación entre la velocidad y la resistencia manejando concretos elaborados con agregados de propiedades físicas promedio, respecto a la inestabilidad que se da en Yucatán. Solís et al. México, subsiguientemente en el año 2003 obtuvo una curva de regresión exponencial como mejor ajuste para concretos compuestos con diferentes muestras de agregados calizos fraccionados, que se escogieron entre los más manipulados en la misma región de Yucatán.

De forma equivalente Urtubey, E. et al. en el 2009 (Argentina), llevo a cabo un trabajo practico con agregados de la zona de Santiago del Estero sobre la correlación de la resistencia a compresión entre rotura con prensa y ensayos de ultrasonido. Así mismo en (Perú), en el 2006, Pacheco, P. realizó una investigación de base para determinar curvas de velocidad de propagación y su relación con resistencias probables del concreto endurecido, corroborando los resultados con los criterios de evaluación de Leslie y Cheesman, así como los de Agraval y otros.

Más adelante Valencia e Ibarra, en el 2013 Perú, presentaron una investigación orientada a la estimación de modelos de comportamiento entre los resultados del ensayo de ultrasonido y del ensayo de resistencia a compresión en elementos de concreto simple.

**Como consecuencia de estas menciones se han conseguido modelos distintos, debido principalmente al carácter compuesto del concreto,** por lo mismo se hace indispensable realizar estudios particulares **tomando en cuenta las características y tipos de agregados que se utilizan en el país** donde se desee aplicar el método de ultrasonido.

## **CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Exámenes en el concreto en general**

El hormigón es un material significativo para la construcción, debido a ello es de mucha importancia comprobar su eficacia y buen funcionamiento frente a solicitaciones de diseño y durante los procesos constructivos, por lo que habitualmente se le efectúan varios ensayos de control cuando está en estado fresco y endurecido.

#### **2.1.1. Pruebas en el concreto en estado fresco**

Estas pruebas son fundamentales para monitorear las particularidades iniciales del hormigón y el efecto que tienen los materiales en la mezcla final, de esta manera se controla su puesta en servicio. También aplica para la comprobación de una mezcla de diseño o de una muestra de investigación. El lapso de tiempo para consumir los ensayos de rutina no debe sobrepasar de 15 minutos desde la toma de la muestra característica, entre ellos tenemos los siguientes:

##### **2.1.1.1 Prueba para el cálculo del asentamiento (ASTM C143)**

Esta prueba es el procedimiento más utilizado para medir la firmeza del concreto, aunque no mide todos los componentes que ayudan a la trabajabilidad, de todos modos, es usado útilmente como una prueba de control dado que brinda una indicación de la uniformidad de la mezcla.

Bajo situaciones de laboratorio con preciso control de todos los materiales del hormigón (en ausencia de aditivos plastificantes), la fluidez está vinculada equitativamente al contenido de agua que tiene la mezcla y por lo tanto está contrariamente relacionado con la resistencia del concreto.

Para esta prueba se maneja el cono de Abrams y el tiempo de valoración no debe ser superior a 2.5 minutos de realizado el muestreo de la mezcla. La consistencia del hormigón se define por la medida del asentamiento, el cual está determinado por la diferencia entre la altura del molde cónico invertido y la altura del cono de mezcla deformado, la medida es tomada en el eje del cono de concreto y se expresa en pulgadas.

#### **2.1.1.2. Prueba para establecer el peso unitario y densidad (ASTM C138)**

Este ensayo se utiliza para establecer el peso unitario y el rendimiento de la mezcla. Para ejecutar este ensayo se usa un molde rígido el cual se rellena y compacta sistemáticamente, se determina la masa de concreto restando la masa del molde de la masa total; para conseguir la densidad se divide la masa del hormigón entre el volumen del molde. Los valores de rendimiento (PU real entre PU teórico) deberían estar en el rango de 1.00 +/- 0.02 para considerarse admisibles.

#### **2.1.1.3. Prueba para establecer el contenido de aire (ASTM C138)**

Este examen comprueba la cuantía de aire que puede tener el concreto recién mezclado, exceptuando cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados, el control del contenido del aire entrampado es sustancial, debido a que un incremento notable del mismo se traduce en una disminución de la resistencia por la ampliación de vacíos en el mortero.

#### **2.1.1.4. Prueba para establecer la temperatura (ASTM C1064)**

Esta prueba cumple con el fin de examinar la temperatura del hormigón recién mezclado, puede utilizarse para confirmar que dicho concreto satisfaga requerimientos específicos de temperatura; es significativo realizar este control debido a que condiciona la celeridad del proceso de endurecimiento inicial del concreto, la cual es influenciada por la temperatura ambiente y calor específico de los materiales componentes; a mayor temperatura durante el muestreo mayor será la resistencia inicial y también el efecto de contracción, reduciendo posiblemente la resistencia a largo plazo.

El examen consiste en poner un dispositivo de medición de temperatura en la muestra de hormigón de tal modo que esté rodeado de mezcla por todos sus lados (al menos 3" y lejos del recipiente que lo aguanta), el tiempo mínimo que debe estar incrustado el dispositivo medidor es de 2 minutos o hasta que la lectura se afiance. Se debe perpetrar este ensayo dentro de los 5 minutos de tomada la muestra.

### **2.1.2. Pruebas en el concreto en estado endurecido**

Estos estudios se consuman para comprobar la resistencia y/u otros parámetros de calidad a través de pruebas patrón realizadas a probetas de hormigón fraguadas o a muestras sacadas de un elemento de concreto, los cuales pueden ser conseguidas en obra o en alguna estimación realizada en laboratorio. Se clasifican en:

#### **2.1.2.1. Pruebas destructivas en el concreto**

Son experimentos ejecutados sobre testigos de concreto que permiten comprobar, mayormente de forma directa, ciertas particularidades inherentes al material, generando en ellos una variación definitiva de su geometría dimensional y/o de su composición química. Se tiene, por ejemplo:

- Prueba de resistencia a compresión
- Examen a flexo tracción
- Prueba a tracción indirecta
- Prueba de petrográfico
- Prueba de contenido de cloruros (si se analiza una sección de concreto)
- Prueba del grado de carbonatación (si se analiza una sección de concreto)
- Prueba de permeabilidad
- Prueba de humedad
- Prueba de resistencia a la abrasión

### **2.1.2.2. Pruebas no destructivas en el concreto**

Son técnicas que admiten examinar o evidenciar determinadas propiedades del hormigón endurecido, sin perturbar de forma fija sus dimensiones, particularidades de servicio, propiedades químicas, mecánicas o físicas.

Cada procedimiento tiene ventajas y restricciones, en general los ensayos no destructivos suministran datos no muy puntuales acerca de la condición de la variable a evaluar en comparación de las pruebas destructivas, por lo que es provechoso complementar los resultados de exámenes no destructivos con datos derivados de ensayos destructivos; sin embargo, suelen ser más económicos ya que no involucran la destrucción del elemento examinado y varios de ellos admiten hacer más de una repetición.

La implementación de las técnicas de ensayo no destructivo se halla someras en los grupos siguientes:

**Caracterización:** Valoración de peculiaridades químicas, estructurales, mecánicas, físicas, etc.

**Defectología:** Descubrimiento de discontinuidades, avería por agentes ambientales, actividad corrosiva del acero de refuerzo, etc.

**Metrología:** Control de grosores, medidas de espesores de recubrimiento, niveles de llenado, etc.

Existen diferentes técnicas de pruebas no destructivas para hormigón, cada uno de ellos depende del parámetro que se desee controlar y las situaciones bajo las cuales se ejecute el ensayo, entre estos métodos tenemos:

- Prueba de ultrasonido
- Examen de líquidos penetrantes
- Estudio con esclerómetro
- Prueba de partículas magnetizables
- Examen radiográfico
- Estudio de emisiones acústicas
- Prueba de impacto acústico
- Ensayo de carga
- Estudio por absorción o difusión de isótopos radiactivos
- Método de madurez

### **2.1.3. Exámenes materia de estudio**

Las pruebas en el concreto endurecido que son de mucho interés para ejecutar el presente estudio son: el Ensayo de Resistencia a Compresión (Prueba Destructiva - ED) y la Prueba de Velocidad de Pulso de Ultrasonido (Prueba No Destructiva - END).

#### **2.1.3.1. Prueba de resistencia a compresión**

##### **Normas**

**ASTM C-39** - Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

##### **Definición**

“Radica en emplear una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una rapidez normalizada en un rango prescrito mientras sucede la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es determinada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta”.

La medida obtenida es una propiedad primariamente física y es repetidamente usada en el diseño de estructuras, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm<sup>2</sup>) o en mega pascales (MPa).

## **Importancia**

Los resultados de las Prueba de Resistencia a Compresión se utilizan esencialmente para comprobar que la mezcla del hormigón suministrado cumpla con las exigencias de la resistencia especificada ( $f'c$ ) en la definición del proyecto. Asimismo, es posible utilizarla para fines de manejo de calidad, aprobación del concreto o para valorar la resistencia en elementos estructurales que admitan definir la programación de los siguientes procesos constructivos en la realización de una obra (remoción de encofrados, puntales, etc.).

## **Equipo**

El artefacto de ensayo deberá poseer capacidad conveniente, debe ser maniobrada por energía (no a mano) y debe admitir una celeridad de carga sobre la probeta de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s, de forma incesante sin interrupción ni detenimiento.

El aparato de ensayo será equipado con dos dispositivos de acero con caras duras, uno de los cuales se dispondrá sobre una rótula, que le permita adaptarse a la parte superior de la probeta, y el otro descansa sobre una consistente base en el que se asienta la parte inferior de la misma. Las caras de los bloques serán paralelas durante la prueba y deben tener una extensión mínima de al menos 3% mayor que el diámetro de las probetas a ser ensayadas.

## **Muestras para ensayo**

El examen se puede llevar a cabo con especímenes obtenidos en cualquiera de las siguientes condiciones:

- Especímenes curados y moldeados, de acuerdo con la ASTM C31, de una muestra de concreto fresco.
- Muestras extraídas o aserrados de una estructura de concreto endurecido, según la ASTM C42.
- Muestras producidas con moldes de cilindros colocados in situ (embebidos en la estructura), según la ASTM C873.

## **Procedimiento de ensayo**

Para el caso de probetas cilíndricas, curadas y moldeadas, se logran tener dimensiones de 6" x 12" o 4" x 8", las probetas más pequeñas a menudo suelen ser más cómodas de trabajar en el campo y en laboratorio, el diámetro del espécimen a utilizar debe ser al menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado usado en la elaboración del concreto. Según la ASTM C-39 las probetas deben ser examinadas tan pronto como sea práctico luego de ser aisladas de la condición de curado, es decir, se probarán en estado de humedad superficialmente secas.

Tomar el diámetro del espécimen con el micrómetro en dos posiciones que estén en ángulo recto entre sí, a la altura media de la misma, estos diámetros deben promediarse para poder hallar el área de la sección.

Previo a disponer el espécimen entre los cabezales de la máquina de ensayo, se limpiarán las superficies de contacto de los bloques de acero, superior e inferior, y las de la probeta, valorar si es conveniente aplicar capping, refrentado o usar **pads de neopreno**. Se ordenarán los ejes de la probeta a experimentar con el centro de empuje de la máquina a manera de evitar excentricidades.

Confirmar que el indicador de carga de la maquina esté en cero, de no ser así se deberá ajustar. Luego destinar la carga de manera incesante y uniforme, hasta el instante de la abertura de la probeta, por último, registrar el tipo de falla y la carga máxima aguantada por la probeta antes de romper. Calcular la Resistencia a compresión (R) dividiendo la carga máxima entre el área promedio de la sección.

### **2.1.3.2. Prueba ultrasónica**

#### **Norma**

**ASTM C597** - Ensayo de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto.

#### **Definición**

Este procedimiento de ensayo radica en determinar la rapidez de pulso ultrasónico a partir de la reproducción de pulsos de ondas de tensión longitudinal pronunciados por un transductor electro-acústico que se mantiene en unión con la superficie del concreto bajo ensayo.

Posteriormente de recorrer a través de la muestra de concreto, estos pulsos son recogidos y transformados en energía eléctrica por un segundo transductor situado a una longitud (L) de la emisión del primer transductor; el tiempo de tránsito (T) se mide electrónicamente y la rapidez del pulso ultrasónico (V) se puede establecer dividiendo L entre T.

El parámetro logrado (V) está relacionado a las propiedades del concreto y su densidad, por esta razón permite predecir el estado de calidad del mismo en estado endurecido; se mide en metros por segundos (m/s).

### **Importancia**

Este procedimiento se puede usar especialmente para ensayos de control de calidad e inspección in situ en estructuras de concreto; como muestra la ficha técnica de un fabricante del equipo: "El método es ideal para examinar la homogeneidad del concreto, huecos, grietas o defectos por congelación y deshielo o fuego, como también para la determinación de resistencias". Esta técnica como ensayo no destructivo resulta ventajosa por su sencillez, versatilidad y receptibilidad.

## **Equipo**

Las porciones del mismo están formadas con las siguientes características:

### **Productor de pulso eléctrico – Transductor transmisor**

El creador de pulso consiste en un circuito para provocar pulsaciones de voltaje, el transductor transforma estas pulsaciones en ondas intermitentes de energía mecánica, las cuales deben tener una frecuencia de resonancia con intervalo de 20 a 100 kHz. El generador de pulso debe originar las pulsaciones en forma iterativa con un valor no menor de 3 pulsos por segundo y para iniciar la medición del tiempo del circuito producirá un pulso de disparo.

### **El amplificador – Transductor receptor**

El voltaje formado debe ser ampliado tanto como sea preciso, para producir pulsaciones que se divisen en el circuito medidor de tiempo. El amplificador tendrá una respuesta serena entre la mitad y tres veces la frecuencia de resonancia del transductor receptor.

### **Los transductores**

Los transductores, emisor y receptor, pueden ser erigidos con elementos piezoeléctricos, magneto estrictivos, u otro material sensible al voltaje, ellos pueden ser: cuarzo, sulfato de litio, titanato de bario, metaniobato de bario y zirconato titanato de plomo.

### **Circuito de medición de tiempo**

El circuito de medición de tiempo y las pulsaciones de disparo asociados deberán estar en condiciones de ofrecer una exactitud de tiempo de medición de al menos  $1 \mu\text{s}$  y deben ser insensibles a una temperatura de trabajo que oscile entre 0 y 40 °C. El cálculo debe iniciarse a través de una descarga de voltaje procedente del generador de pulsos, y operar intermitentemente con la misma frecuencia. El circuito medidor de tiempo debe estar dotado de una salida acoplada a una unidad de respuesta de tiempo, esta se usa para comprobar el tiempo de transmisión que se presenta en el monitor del equipo.

### **Dispositivo de pantalla**

Están dos tipos: uno que usa un tubo de rayos catódicos, en el que los pulsos transmitidos y recibidos se convierten en deflexiones de trayectoria para una escala de tiempo; y otro que utiliza un cronómetro con respuestas digitales.

### **Barra Calibradora**

Es una barra de polímero u otro material duro del cual se conoce el tiempo de tránsito de las ondas longitudinales. Dicho tiempo de tránsito deberá estar marcado invariablemente en la barra como referencia.

### **Cables de conexión equipo**

En la posibilidad de requerir cables de conexión muy largos se recomienda usar cables coaxiales blindados de baja capacitancia.

### **Agente de Acoplamiento**

Su oficio es excluir el aire entre la superficie de contacto de los transductores y la del concreto, ya que las frecuencias que se usan en el concreto no se transfieren en el aire, de este modo se asegura la transmisión eficaz de la energía entre el concreto y los transductores. Para este fin regularmente se utilizan materiales viscosos tales como: vaselina, gel soluble en agua, goma moldeable, petróleo en gel o grasas; en algunos informes se indica que incluso el agua puede cumplir este papel, de acuerdo al estado de las superficies en contacto.

### **Especímenes para ensayo**

Se puede emplear en las presentaciones frecuentes del concreto en estado endurecido (testigos, elementos estructurales, etc.), siempre que se tomen en cuenta los subsiguientes juicios para la selección de los puntos de evaluación:

- Antes de ejecutar el ensayo es preciso efectuar un reconocimiento visual de los puntos que se van a evaluar, con el fin de valorar la rugosidad de la superficie, la presencia de huecos, fisuras u otras particularidades que podrían afectar la prueba.
- Cuando la zona es rugosa es preciso lijarla y nivelarla, con el fin de evitar que los transductores obtengan una señal incorrecta.
- Es provechoso evadir la presencia cercana de las barras de acero de refuerzo dado que influirá en la medición.

- Al realizar la valoración en una estructura el aspecto más significativo que se debe considerar es el número de elementos ensayados, ya que entre mayor sea la muestra se tendrán más elementos de comparación para poder lograr un juicio acerca de la eficacia del concreto.

Considerando las encomiendas anteriores, la elección de los puntos de evaluación debe hacerse de preferencia en forma aleatoria a fin de obtener una muestra característica de resultados.

### **Tipos de medición**

Hay tres métodos de medición para ejecutar el ensayo de ultrasonido:

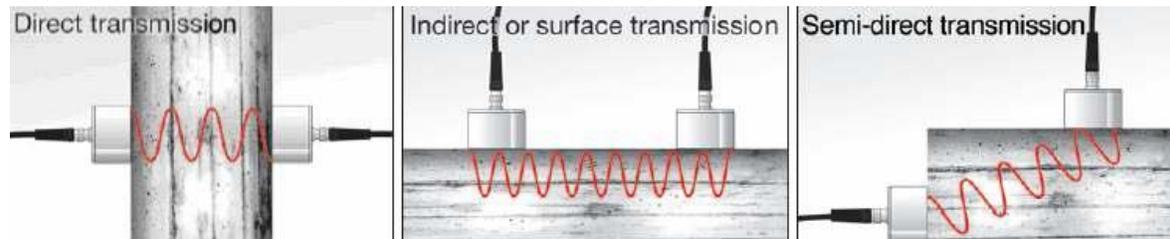
**Medición directa:** se emplea en caras opuestas, suministra la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida. Siempre que sea posible es provechoso aplicar esta técnica de medición.

**Medición indirecta:** se usa en la misma cara (asumiendo que la otra cara es inaccesible), es la menos satisfactoria, ya que además de su relativa sensibilidad, nos da medidas de la velocidad de pulso que casi siempre tienen la influencia de la capa de concreto cercana a la superficie, que no serán características del concreto en estratos más profundos.

Además, la longitud de recorrido está menos definida y no resulta satisfactorio tomarla como la distancia de centro a centro de los transductores (hay algunos métodos para corregir los resultados).

**Medición semi-directa:** si por determinadas circunstancias el concreto tiene que evaluarse mediante el uso de trayectorias diagonales (en caras adyacentes), es posible aplicar esta medición, tomando en consideración que la distancia a medir será en diagonal, aplicando el teorema de Pitágoras entre los centros de los transductores.

**ILUSTRACIÓN 1: TÉCNICAS DE MEDICIÓN PARA APLICAR EL ENSAYO DE ULTRASONIDO.**



## Procedimientos de ensayos

### Control de funcionamiento del equipo con barra calibradora

Emplear agente de acoplamiento en los extremos de la barra calibradora y las superficies de empalme de los transductores, una vez que el equipo está energizado, presionar los transductores con estabilidad contra los extremos de la barra (medición directa) hasta que el tiempo de tránsito se muestre estable en la pantalla.

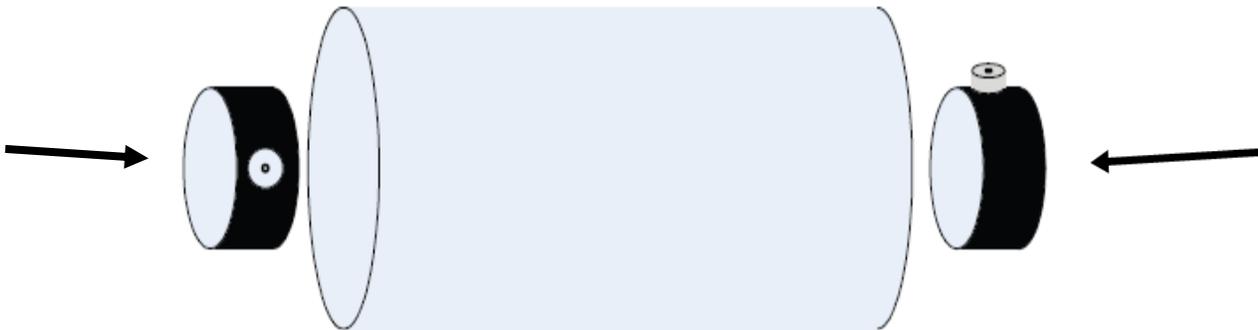
### Ajuste a “tiempo cero”

En la misma operación de control de funcionamiento se debe ejecutar el ajuste al cero de referencia, esto ocurre cuando el tiempo de tránsito mostrado se hace coincidir con el valor mostrado en la barra calibradora.

Durante operación continua del instrumento se debe comprobar el ajuste a “tiempo cero”, primariamente cada vez que el transductor y/o cables de conexión se cambien. Si el tiempo presentado no puede ser regulado con el tiempo marcado en la barra es preferible no usar el equipo y verificar con el fabricante del mismo la correcta calibración.

### **Detección del tiempo de tránsito (medición directa)**

Para ejecutar la prueba en probetas cilíndricas o en un elemento de concreto de una construcción existente, inicialmente compruebe la calidad de la superficie del punto de evaluación, afirme la suficiente cantidad del agente de acoplamiento y luego ubique los transductores directamente opuestos entre sí en las caras del espécimen de evaluación.



**ILUSTRACIÓN 2: TÉCNICA DE MEDICIÓN DIRECTA SOBRE PROBETA CILÍNDRICA.**

El tiempo de circulación se medirá electrónicamente al activar el mecanismo de lectura en el equipo mientras presiona los transductores contra la superficie del concreto bajo ensayo, registre el tiempo que figura en la pantalla cuando este se afiance.

La distancia de camino es la longitud en línea recta entre los centros de las caras de los transductores, se debe conseguir de la forma más precisa dado que la precisión de la obtención de la velocidad de pulso ultrasónico se rige también por la exactitud de esta, considerar que al usar el método de medición directa la transmisión de energía entre los transductores está en su máximo potencial. Es conveniente repetir las mediciones en el punto de valoración, estas deben hacerse en el mismo lugar para disminuir al mínimo las lecturas erróneas debido a acoplamientos pobres.

Finalmente, la velocidad de pulso ultrasónico ( $V$ ) se calcula dividiendo la longitud punto a punto ( $L$ ) entre el tiempo de transmisión del pulso ultrasónico ( $T$ ).

## **Ventajas y desventajas**

### **Del ensayo**

Este procedimiento de ensayo es aplicable para valorar de forma vertiginosa y fácil la igualdad y calidad relativa del concreto, una ventaja significativa es su repetitividad infinita. La exactitud de la medición depende en gran parte de la capacidad del ejecutor para establecer con precisión la distancia entre los transductores y de la condición de los equipos para medir precisamente el tiempo de transmisión de pulso.

Una desventaja a señalar es que los resultados son muy variantes en: desiguales condiciones de humedad, presencia de otros elementos colindantes de material diferente al concreto, longitud de la transmisión de la onda y disposición de acoplamiento entre la faceta del elemento evaluado y la de los transductores.

### **Del equipo**

Como ventaja podemos indicar su poco peso, cómodo uso y manejo. Como desventaja cabe destacar que los cables emisores en ocasiones muestran falsos contactos debido a la abundancia de movimiento, con lo cual se dificulta verificar las lecturas.

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Prueba ultrasónica**

Según lo prescrito en la ASTM C-597, obtiene la velocidad de la propagación de un pulso de energía vibratoria a través de un miembro de concreto.

### **2.2.2. Mezclas de hormigón**

El concreto es una mezcla que está conformada por aglomerante (cemento), agregado fino (arena), agregado grueso (grava), aditivos y agua, que tiene la particularidad de endurecerse con el tiempo.

### **2.2.3. Dosificación del hormigón**

La dosificación muestra en qué cantidad se utiliza cada material para obtener como resultado una resistencia específica para el hormigón.

### **2.2.4. Ensayo a compresión**

La prueba a compresión es la técnica a través de la cual se aplica una velocidad especificada de carga por unidad de área a una muestra de concreto para así lograr su resistencia a compresión, puesto que ésta es la característica mecánica que más nos concierne de este.

### **2.2.5. Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión ( $f'_c$ ), se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de muestras o especímenes de concreto, la cual usualmente se expresa en kilogramo por centímetros cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

### 2.3. Marco contextual

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en los laboratorios de control de calidad de la planta concretara Argos La Jacobo y Argos Las Américas ubicadas en la ciudad de Santo Domingo, República Dominicana.



**ILUSTRACIÓN 3: LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE LA PLANTA CONCRETARA ARGOS LAS AMÉRICAS, FUENTE PROPIA.**

## 2.4. Formulación de hipótesis

La presunción de la cual se parte, se basa en la posibilidad de poder medir alguna cualidad del concreto relacionada con su resistencia, ante la cual ha surgido la siguiente interrogante: ¿Será posible la determinación de la resistencia a compresión del hormigón endurecido mediante la aplicación de técnicas de ultrasonido?, para dar respuesta se han planteado las hipótesis a continuación:

- Existe una relación directamente proporcional entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión simple del hormigón.
- Cuanto mayor sea el tiempo de fraguado, mayor será la velocidad de ultrasonido.
- La correlación obtenida presenta un alto grado de confiabilidad con referencia a los datos obtenidos por el método a compresión simple.

## 2.5. Alcances y limitaciones

**Alcances:** Con esta investigación sólo se pretende encontrar un modelo matemático de evaluación que permita verificar la resistencia a compresión del hormigón endurecido.

**Limitaciones:** Esta investigación está restringida únicamente al análisis de laboratorio de probetas de hormigón, las cuales específicamente serán de resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>, 280 kg/cm<sup>2</sup> y 350 kg/cm<sup>2</sup>, las mismas, por razones de tiempo deberán ser ensayadas a 7 días, 14 días y 28 días, y los agregados gruesos a usar serán del tipo ígneo y calizo de tamaño máximo nominal igual a ¾ pulgada producidos en la República Dominicana.

**NOTA:** La empresa ARGOS S.A se reserva todos los derechos de su información relacionadas con los ensayos realizados a los agregados y su diseño de mezcla.

## **CAPITULO III.- MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1. Enfoque de la investigación**

Se tomarán en cuenta las cantidades, y cualidades o particularidades de los materiales a trabajar entendiéndose por estos los agregados, y con esto se persigue caracterizar experimentalmente el hormigón objeto de estudio para su posterior evaluación. Es por esta razón que el enfoque de esta investigación es cuali-cuantitativo.

### **3.2. Tipo de investigación**

Se procederá a realizar una serie de probetas con diseños de mezclas de diferentes resistencias, de forma tal que de manera práctica se consigan los resultados deseados. De este modo se puede afirmar que esta investigación, según la recogida de datos, es de tipo experimental.

Se puede definir esta investigación, según el objeto de estudio, como un trabajo de tipo exploratorio, ya que el mismo se basa en la aplicación del equipo de ultrasonido para la examinación de especímenes de variada composición, con el cual se pretende obtener una modelación matemática que sirva como herramienta de verificación para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón en estructuras.

### **3.3. Método de investigación**

Tomando en cuenta el carácter exploratorio que posee este trabajo de grado, y considerando los objetivos que se plantearon al principio, nos auxiliaremos de un método de investigación del tipo analítico y comparativo, para poder así, realizar comparaciones entre los especímenes de hormigón y analizar el comportamiento de los pulsos ultrasónicos a través de cada probeta.

### **3.4. Técnicas de investigación**

La técnica de investigación a emplear se basará en la realización de test o pruebas de ultrasonido, para observar la conducta de las ondas de ultrasonido a lo largo de cada probeta, y de esa forma dar respuestas a las preguntas de investigación planteadas en este trabajo.

### **3.5. Población y muestra**

Como marcha preliminar en cualquier estudio estadístico, se debe definir el tamaño de la muestra probabilística a investigar. Para encontrar el tamaño muestral o valor de  $n$ , hay que tener en consideración que se depende de diferentes variables, entre las que se encuentran:

- Tamaño de la población.
- Dispersión de las variables objeto de estudio.
- Variabilidad de los datos a analizar.
- Parámetro objeto de estudio (media, mediana, desviación típica, etc.) según los resultados a los que queramos llegar.

Para ello se esboza inicialmente una estimación, en función del nivel de confianza a obtener y del error máximo aceptable (CHAMBERS, CLEVELAND, KLEINERAND TUKEY, 1983).

### **3.5.1. Juicios para la selección de la muestra**

En la determinación del tamaño muestral, para la apreciación del coeficiente de correlación lineal de Pearson, el grado de correspondencia entre dos variables numéricas (características poblacionales), puede medirse mediante la valoración de varios coeficientes.

La medida más corrientemente utilizada para el estudio de la analogía, es el coeficiente de correlación lineal de Pearson, que mide el grado de asociación lineal entre dos variables independientes. Una vez calculado el coeficiente de correlación entre un par de variables X e Y, debe ejecutarse un “test de hipótesis”, basado en la distribución t de Student, para valorar la “significación” del coeficiente de correlación y ratificar si existe o no, una relación estadísticamente importante entre ambas características. Así mismo, puede lograrse un intervalo de confianza para el coeficiente de correlación en la población.

La eficacia del test de hipótesis sobre la correlación entre las variables, solicita que al menos una de ellas, tenga una “distribución normal” en la población de la cual proviene la muestra. Para el cálculo del intervalo de confianza, se requiere, además, que ambas variables presenten una distribución normal (PÉRTEGA DIAZ, S. 2003).

La distribución muestral del Coeficiente de Pearson no es normal, pero bajo la suposición de que las dos variables de estudio (Resistencia – R, Velocidad – V), muestran una distribución gaussiana, el Coeficiente de Pearson logra transformarse para obtener un valor de z que sigue una distribución normal. Se suele usar la transformación de Fisher, con la siguiente expresión para el cálculo de n (muestra):

$$z = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + r}{1 - r} \right)$$

Sabiendo que el error estándar, z es aproximadamente equivalente a:  $\frac{1}{\sqrt{n-3}}$ .

Usando esta ecuación, se logra una fórmula para el cálculo del número de probetas (n) necesarios para la estimación, que nos va a definir el tamaño muestral (n) o número de datos de Resistencia (R) y Velocidad (V), necesarios para esta investigación:

$$n = \left( \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}} + Z_{1-\beta}}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)} \right)^2 + 3$$

Como resultado, para el cálculo de n se obliga conocer:

La dimensión de la correlación que se desea descubrir ( $r$ ), como coeficiente de correlación en la población (valor que es desconocido). Este se logró a partir de publicaciones y estudios anteriores sobre el valor aproximado del coeficiente de correlación existente entre las dos variables a estudiar que, en nuestro caso, según Alcañiz (2011), ha resultado ser  $r = 0.677$ , que por conveniencia lo aproximamos a  $r = 0.7$  como valor habitual en este tipo de investigaciones.

- La seguridad con la que se desea trabajar,  $1-\alpha$ , o riesgo de cometer un error de tipo I. Generalmente se trabaja con un valor de  $\alpha = 0.05$ .
- La potencia estadística,  $1-\beta$ , que se quiere para el estudio, o riesgo de cometer un error de tipo II. Es habitual tomar  $\beta = 0.2$  o, equivalentemente, una potencia estadística del 80%.
- Los valores  $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  y  $z_{1-\beta}$ , se obtienen de la distribución normal estándar, en función del nivel de significación y potencia estadística elegidos para el estudio. En particular, para un  $\alpha = 0.05$  (porque buscamos un 95% de confianza) y  $1-\beta = 0.80$  (lo fijamos en 80, como valor – técnica habitual en estadística), por lo que se tiene que  $z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1.96$  y  $z_{1-\beta} = 0.84$  (Valor obtenido de tablas estadísticas de normalidad - curva “normal” de Gauss).

Así pues, si se supone un coeficiente de correlación de al menos 0.7, aplicando la fórmula anterior con  $\alpha = 0.05$  y  $1-\beta = 0.80$  (seguridad del 95 % y potencia estadística del 80 %) se obtiene:

$$n = \left( \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} + z_{1-\beta}}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)} \right)^2 + 3 = \left( \frac{1,96 + 0,84}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+0,7}{1-0,7} \right)} \right) + 3 = \left( \frac{2,80}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1,7}{0,3} \right)} \right) + 3 = \left( \frac{2,80}{\frac{1}{2} \ln(5,66)} \right) + 3 = 13,42$$

El valor logrado de “n” en esta fórmula, sería el número de elementos que precisamos como mínimo para cada sub-población (y tenemos tres sub-poblaciones: especímenes de resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>, 280 kg/cm<sup>2</sup> y 350 kg/cm<sup>2</sup>).

Este valor de 13.42 unidades, que para mejorar la calidad del trabajo se redondeó a 15 unidades x 3 (sub-poblaciones) = 45 unidades, por lo que con cuarenta y cinco valores serían suficientes para la realización de este estudio.

## 3.6. Procedimientos

### 3.6.1 Obtención de los agregados



ILUSTRACIÓN 4: PLANTA DE AGREGADO BISONÓ, FUENTE PROPIA

Los agregados utilizados para este estudio fueron obtenidos de la planta La Jagua, la misma fue provista por Industrias Bisonó, ubicada en Yaguatero, provincia San Cristóbal, República Dominicana.

### 3.6.2 Ensayos realizados para obtener las características de los agregados

- **Peso unitario para agregado fino ASTM C-29**

Procedimiento:

1.- Se calibra el medidor de peso unitario, determinando el peso del agua, a temperatura ambiente. El volumen del medidor en pie cubico, será el peso del agua usada para llenarlo, dividido entre la densidad del agua a temperatura ambiente.

2.- Seleccionar aproximadamente 10,000 grs. de arena.



ILUSTRACIÓN 5: ENSAYO DE PESO UNITARIO PARA AGREGADO FINO ASTM C-29, FUENTE PROPIA.

3.- Se llena el medidor hasta un tercio de su capacidad, se nivela la superficie y con una barra se propician 25 golpes, uniformemente distribuidos sobre la superficie. La segunda y

tercera capa se vierte y se compactan de una manera similar. Al golpear la primera capa, la barra no debe llegar hasta el fondo, y en las dos últimas capas, la barra sólo debe penetrar la última capa.

4.- Se enraza la superficie y se pesa.

- **Peso unitario para agregado grueso ASTM C-29**

Procedimiento:

1.- Se calibra el medidor de peso unitario, determinando el peso del agua, a temperatura ambiente. El volumen del medidor en pie cubico, será el peso del agua usada para llenarlo, dividido entre la densidad del agua a temperatura ambiente.



ILUSTRACIÓN 6: ENSAYO DE PESO UNITARIO PARA AGREGADO GRUESO ASTM C-29, FUENTE PROPIA.

2.- Seleccionar aproximadamente 55 libras de grava.

3.- Se llena el medidor hasta un tercio de su capacidad, se nivela la superficie y con una barra se imparten 25 golpes, uniformemente distribuidos sobre la superficie. La segunda y tercera capa se vierte y se compactan de una manera similar. Al golpear la primera capa, la barra no debe llegar hasta el fondo, y en las dos últimas capas, la barra sólo debe penetrar la última capa.

4.- Se enraza la superficie y se pesa.

- **Gravedad específica y absorción para agregado fino ASTM 128**

Procedimiento:



ILUSTRACIÓN 7: ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA A. F. ASTM 128, FUENTE PROPIA

1.- Se toma una muestra de alrededor de 1,500 grs. de arena mojada saturada (arena sumergida en agua durante 24 horas); se coloca en una superficie limpia y se seca con aire caliente hasta que llegue al estado de saturado y superficialmente seco (SSS). Esta condición se determina al

colocar la arena en un molde y apisonarla suavemente 25 veces. Si hay humedad, la arena mantendrá su forma cuando se retire el molde. Cuando existe la condición SSS, la arena cae al retirarse el molde.

2.- Se introduce 500 grs. del material en estado SSS en un frasco de 500 ml y a continuación se gira el frasco suavemente varias veces para liberar el aire atrapado. Se añade más agua hasta llegar exactamente a la marca de 500 ml. Y se determina el peso del agua añadida.

3.- Se remueve toda la arena del frasco para conseguir todas las partículas, se coloca la arena junto al agua en un horno y se seca durante 2 horas a 100 grados Celsius.

- **Gravedad específica y absorción para agregado grueso ASTM 127**

Procedimiento:



1.- Se selecciona cerca de 1 kg. de grava mojada (grava sumergida en agua durante 24 horas) y se pasa por el tamiz #4, salvando la porción retenida.

2.- Se vierte la muestra en un mantel ó papel absorbente, hasta que toda el agua visible en la superficie del material haya sido removida.

**ILUSTRACIÓN 8: ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA A.G. ASTM- 127, FUENTE PROPIA.**

3.- Inmediatamente después que la muestra haya sido secada en una condición (SSS), pésela.

4.- Coloque la muestra en el canasto con malla de alambre y determine su peso en el agua.

5.- Coloque la muestra en un horno y seque hasta que tenga un peso constante.

- **Análisis granulométrico para agregado fino ASTM C-136**

Procedimiento:

1.- Se toma una muestra de aproximadamente 2,000 gramos de arena secada al aire y se separa una muestra de 500 gramos, mediante el separador de muestras (splitter).

2.- Se ordena los tamices por tamaño,

colocando el más grande arriba.

3.- Se coloca la muestra en el tamiz de

arriba, se tapa y se agita durante 3 minutos o hasta que no más de 1 % de residuo por peso pase a través de algún tamiz durante 1 minuto de agitación manual.

4.- Se pesa el material en cada tamiz y en el recipiente de fondo. Si el total no es igual al peso original, con límites de 1 %, se repite la prueba.



ILUSTRACIÓN 9: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO A.F. ASTM C-136, FUENTE PROPIA.

Para el caso del agregado fino obtenido, la granulometría resultante según la planta de concreto ARGOS ubicada en la Jacobo Majluta fue la siguiente:



# FORMATO ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Argos Regional Caribe y Centroamérica  
Planta Jacobo Majluta RD

Código Material 310RD

## GRANULOMETRIA AGREGADO FINO - ASTM C 136

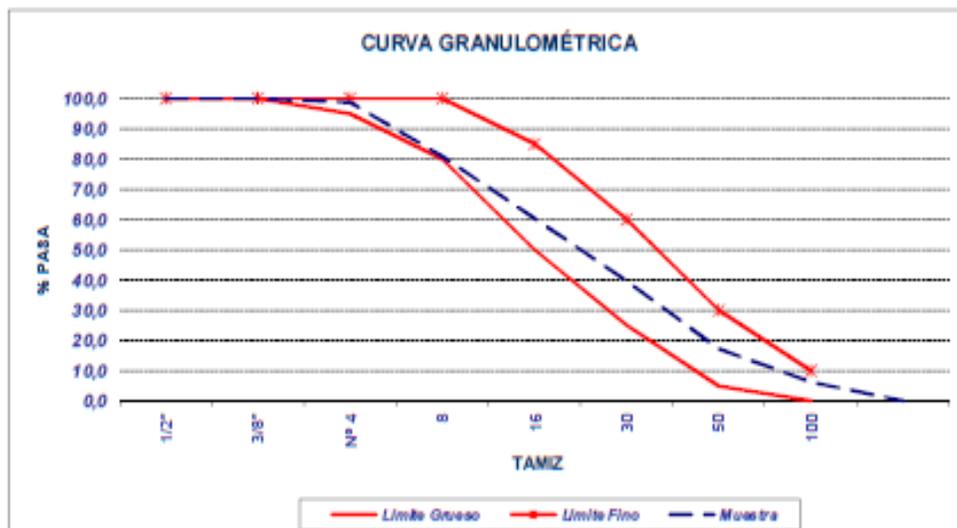
Fecha Ensayo: 01-jun-16 Tipo Agregado: Arena Grs  
 Hora Inicio Ensayo: 2:50 PM Procedencia: La Jagua, San Cristóbal  
 Temp. Ambiente: 30.0 °C Proveedor: Industrias Elsonó  
 Muestra por: Jorge Moquete Fuente Muestra: Pila del Patio de Agregados

### LABORATORIO DE AGREGADOS

Masa Inicial: 631.6 g

Abertura del Tamiz		Masa Retenida (g)	(%) Retenido	(%) Ret. Acumulado	(%) Pasa	% Grueso	% Fino
mm	pulg.						
12.5	1/2"		0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
9.500	3/8"		0.0	0.0	100.0	100.0	100.0
4.800	Nº 4	8.5	1.3	1.3	98.7	95.0	100.0
2.400	8	111.7	17.7	19.0	81.0	80.0	100.0
1.200	16	130.2	20.6	39.6	60.4	50.0	85.0
0.600	30	129.8	20.6	60.2	39.8	25.0	60.0
0.300	60	141.7	22.4	82.6	17.4	5.0	30.0
0.150	100	69.7	11.0	93.7	6.3	0.0	10.0
Fondo	Fondo	40.0	6.3	100.0	0.0		
		<b>2</b>	<b>631.6</b>				

%Error 0.00



Módulo de Finura: 2.97  
 Tamaño máximo (mm) 9.5  
 Tamaño máximo nominal (mm) 4.8

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Ejecutó: Jorge Moquete  
 Laboratorio Argos

Revisó: \_\_\_\_\_

Cargo: Profesional Aseguramiento Calidad

Cargo: \_\_\_\_\_

- **Contenido de humedad para agregado fino ASTM C-566**

Procedimiento:

- 1.- Se selecciona 500 grs. de arena.
- 2.- Se pesa una muestra lo más próximo a 0.1 gr. de error y se seca en el horno durante 24 horas a 100 grados C.

- **Análisis granulométrico para agregado grueso ASTM C-136**

Procedimiento:

1.- Escoja 5,000 gramos de grava secada al aire.

2.- Ordene los tamices desde 1 ½" hasta el tamiz #8.

3.- Pase el material por cada tamiz en orden de mayor a menor.

4.- Pese el material retenido en cada tamiz, y si la suma total del material no es igual al peso original, con límites de 1 %, repita la prueba.



ILUSTRACIÓN 10: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO A.G. ASTM C-136, FUENTE PROPIA.

Para el caso del agregado grueso obtenido, la granulometría resultante según la planta de concreto ARGOS ubicada en la Jacobo Majluta fue la siguiente:



# FORMATO ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Argos Regional Caribe y Centroamérica  
Planta Jacobo Majluta RD

Código Material 200RD

## GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO - ASTM C 136

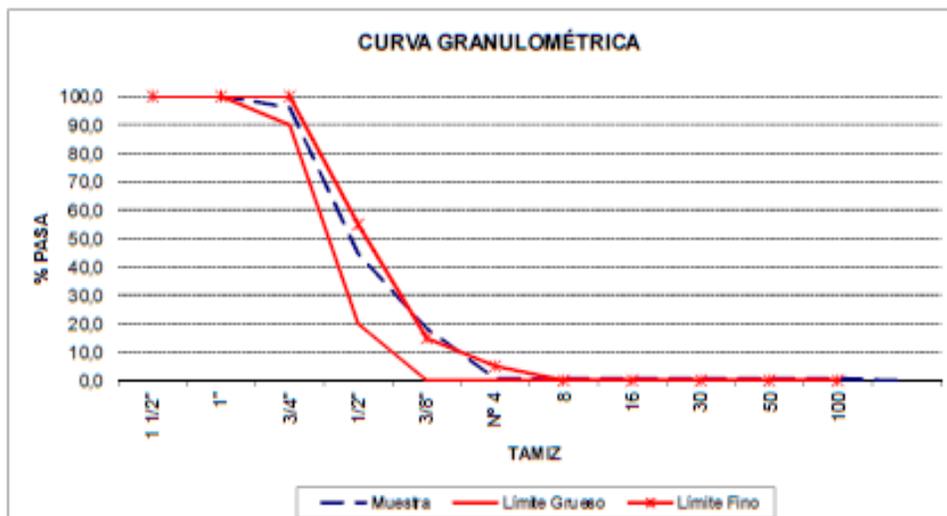
Fecha Ensayo: <u>01-jun-16</u>	Tipo Agregado: <u>Grava Silicea 3/4"</u>
Hora Inicio Ensayo: <u>2:30 PM</u>	Procedencia: <u>La Jagua, San Cristóbal</u>
Temp. Ambiente: <u>30.0 °C</u>	Proveedor: <u>Industrias Bisonó</u>
Muestreo por: <u>Jorge Moquete</u>	Fuente Muestra: <u>Pila de Agregados</u>

## LABORATORIO DE AGREGADOS

Masa Inicial: 1.450,8 g      No. Tamayo 6

Abertura del Tamiz mm	pulg.	Masa Retenida (g)	(% Retenido)	(% Ret. Acumulado)	(% Pasa)	% Grueso y % Fino Criterios de la ASTM C33	
						% Grueso	% Fino
36.1	1 1/2"		0.0	0.0	100.0	100	100
25.0	1"		0.0	0.0	100.0	100	100
19.0	3/4"	57.1	3.9	3.9	96.1	90	100
12.5	1/2"	745.7	51.4	55.3	44.7	20	55
9.500	3/8"	362.1	25.3	81.7	18.3	0	15
4.800	Nº 4	255.3	17.6	99.3	0.7	0	5
2.400	8		0.0	99.3	0.7	0	0
1.200	16		0.0	99.3	0.7	0	0
0.600	30		0.0	99.3	0.7	0	0
0.300	50		0.0	99.3	0.7	0	0
0.150	100		0.0	99.3	0.7	0	0
Fondo	Fondo	10.4	0.7	100.0	0.0		
		<b>1.450,8</b>					

% Error 0,01



Módulo de Finura:	6,81
Tamaño máximo (mm)	25,0
Tamaño máximo nominal (mm)	19,0

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

Ejecutó: Jorge Moquete  
Laboratorio Argos

Revisó: \_\_\_\_\_

Cargo: Profesional de Calidad

Cargo: \_\_\_\_\_

- **Contenido de humedad para agregado grueso ASTM C-566**

Procedimiento:

1.- Seleccione de 9-13 libras de grava. Si la grava es de 1", seleccione 9 lbs., si es de 1½ ", seleccione 13 lbs.

2.- Pese una muestra lo más próximo a 0.1 gr. de error y seque en el horno durante 24 horas a 100 grados Celsius.

### **3.6.3. Cemento Portland Tipo I**

Para todas las mezclas de concreto se utilizó Cemento Portland Tipo I a granel, de la empresa Cementos Argos S.A., el cual se sabe es un cemento estándar de uso general en los diseños de mayor petición en el entorno de la construcción en República Dominicana, aplicado regularmente en casos donde no se solicitan propiedades especiales.

### **3.6.4. Aditivos**

Se enfatizan dos clases de aditivos utilizados regularmente en la elaboración de los concretos con mayor volumen de despacho en la Planta Argos Las Américas:

*Master Polyheed 843 (BASF)*: Según su hoja técnica, es un aditivo que no posee cloruros, retardante inicial y reductor de agua de rango medio; sugerido para reducir la segregación, lograr buena trabajabilidad y bombeabilidad en climas calurosos.

*Master Glenium 3030 (BASF)*: Según su hoja técnica, es un aditivo plastificante y reductor de agua de alto rango, libre de cloruros, este produce en el concreto un aumento considerable de su trabajabilidad y ofrece buena mantención de la misma, es sugerido para concretos elaborados en plantas concreteras. Cabe destacar que la utilización de la dosis deberá hacerse en función de los rangos presentados en la ficha técnica proporcionada por el fabricante.

### **3.6.5. Elaboración de las mezclas de hormigón especificadas**

Procedimiento:

1.- Se diseñan las diferentes resistencias de hormigón utilizando las características obtenidas de los agregados. El método utilizado para el diseño de mezclas fue el de la American Concrete Institute (ACI-318).

2.- Se pesan los 4 ingredientes de la mezcla y se agregan los aditivos siguiendo las especificaciones del fabricante, de esta manera se vierten las proporciones adecuadas al camión con la olla en movimiento a través del SHUTTER O BACHIPLAN. Luego se aplican de 60-100 revoluciones a la mezcla de hormigón con una duración de aproximadamente 5 minutos, esto para garantizar el buen mezclado de la misma.

Todo el proceso se lleva a cabo de manera automática con los equipos de alta calidad con los cuales cuenta la empresa Argos.



**ILUSTRACIÓN 12: OBTENCIÓN DEL CONCRETO MEDIANTE EL BACIPLAN, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 11: OFICINA DE CONTROL DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLA, FUENTE PROPIA.**

3.- Se hacen las pruebas de revenimiento o (slump) y temperatura. Una vez concluida la prueba de revenimiento, se regresa este hormigón al recipiente (carretilla) y se mezcla a mano.



**ILUSTRACIÓN 14: PRUEBA DE REVENIMIENTO O SLUMP, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 13: PRUEBA DE TEMPERATURA, FUENTE PROPIA.**

4.- Se introduce el hormigón en los cilindros plásticos de 4"x 8", y se aplican 3 capas, por cada capa se les darán 25 golpes con una barra metálica para que el hormigón quede compactado.



**ILUSTRACIÓN 15: ELABORACIÓN PROBETAS DE HORMIGÓN, FUENTE PROPIA.**

Hay que destacar que la conveniencia de un cilindro de menor tamaño para las pruebas de resistencia a la compresión fue investigada por Forstie y Schnormeier en 1981, y por Malhotra en 1976. Ambas investigaciones estudiaron el uso de cilindros de 4"x8". Forstie y Schnormeier concluyeron que para los casos donde el tamaño del agregado grueso no exceda 1 pulgada, los cilindros de 4"x 8" son satisfactorios para el control de calidad y aceptación del concreto.

5.- Al día siguiente se sacan las probetas de los cilindros, y estas se introducen en la cámara de curado por 7, 14, y 28 días respectivamente.



**ILUSTRACIÓN 17: ESPECÍMENES A LAS 24 HORAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 16: EXTRACCIÓN DE PROBETAS DE LOS CILINDROS MEDIANTE LA MÁQUINA DE COMPRESIÓN DE AIRE, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 18:** PROBETAS INTRODUCIDAS EN LA CÁMARA DE CURADO, FUENTE PROPIA.



Martes 12 de Julio de 2016

## Formulario Para Prueba Industrial de Probetas (ARGOS)

- Operador del Camión: **Pablo Almanzar**
- Ficha del Camión: **F-83**
- Hora de Carga del Camión (Inicio): **11:17 A.M**
- Hora de Carga del Camión (Final): **11:21 A.M**
- Resistencia del Hormigón ( $\text{kg/cm}^2$ ): **210  $\text{kg/cm}^2$**
- Revenimiento o Slump (Pulgada): **3''**
- Peso Volumétrico ( $\text{Kg/m}^3$ ): **3114  $\text{kg/m}^3$**
- Temperatura ( $^{\circ}\text{c}$ ): **34 $^{\circ}\text{c}$**

### Numeración y Marcado de Probetas

(A los 7 días)

- 1) **C210-1**
- 2) **C210-2**
- 3) **C210-3**
- 4) **C210-4**
- 5) **C210-5**

(A los 14 días)

- 6) **C210-6**
- 7) **C210-7**
- 8) **C210-8**
- 9) **C210-9**
- 10) **C210-10**

(A los 28 días)

- 11) **C210-11**
- 12) **C210-12**
- 13) **C210-13**
- 14) **C210-14**
- 15) **C210-15**



Jueves 14 de Julio de 2016

## Formulario Para Prueba Industrial de Probetas (ARGOS)

- Operador del Camión: **Pablo Almanzar**
- Ficha del Camión: **F-55**
- Hora de Carga del Camión (Inicio): **2:26 P.M**
- Hora de Carga del Camión (Final): **2:31 P.M**
- Resistencia del Hormigón ( $\text{kg/cm}^2$ ): **280  $\text{kg/cm}^2$**
- Revenimiento o Slump (Pulgada): **7''**
- Peso Volumétrico ( $\text{Kg/m}^3$ ): **3090  $\text{kg/m}^3$**
- Temperatura ( $^{\circ}\text{c}$ ): **33 $^{\circ}\text{c}$**

### Numeración y Marcado de Probetas

(A los 7 días)

- 1) **C280-1**
- 2) **C280-2**
- 3) **C280-3**
- 4) **C280-4**
- 5) **C280-5**

(A los 14 días)

- 6) **C280-6**
- 7) **C280-7**
- 8) **C280-8**
- 9) **C280-9**
- 10) **C280-10**

(A los 28 días)

- 11) **C280-11**
- 12) **C280-12**
- 13) **C280-13**
- 14) **C280-14**
- 15) **C280-15**



Viernes 15 de Julio de 2016

## Formulario Para Prueba Industrial de Probetas (ARGOS)

- Operador del Camión: **Nicaury Severino**
- Ficha del Camión: **F-55**
- Hora de Carga del Camión (Inicio): **6:11 P.M**
- Hora de Carga del Camión (Final): **6:15 P.M**
- Resistencia del Hormigón ( $\text{kg/cm}^2$ ): **350  $\text{kg/cm}^2$**
- Revenimiento o Slump (Pulgada): **7.5''**
- Peso Volumétrico ( $\text{Kg/m}^3$ ): **3092  $\text{kg/m}^3$**
- Temperatura ( $^{\circ}\text{c}$ ): **32 $^{\circ}\text{c}$**

### Numeración y Marcado de Probetas

(A los 7 días)

- 1) **C350-1**
- 2) **C350-2**
- 3) **C350-3**
- 4) **C350-4**
- 5) **C350-5**

(A los 14 días)

- 6) **C350-6**
- 7) **C350-7**
- 8) **C350-8**
- 9) **C350-9**
- 10) **C350-10**

(A los 28 días)

- 11) **C350-11**
- 12) **C350-12**
- 13) **C350-13**
- 14) **C350-14**
- 15) **C350-15**

### **3.6.6. Dispositivo de ultrasonido**

No se tienen informes de empresas y/o entidades en República Dominicana que ofrezcan servicios con el equipo de ultrasonido como elección de ensayo no destructivo para concreto. El equipo de ultrasonido que posee la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (UNPHU), con el que se ejecutó la parte experimental de la indagación, tiene las siguientes características:

#### **Equipo**

Marca: **Proceq (pundit PL-200) INC**

Fabricante: PROCEQ Switzerland

Modelo: PL-200

Serie: 772587

Voltaje: 110

Frecuencia: 54 kHz

Precisión: +/- 0.1 microsegundo

#### **Transductores**

Numero: 2 unidades

Material: Metal

Diámetro: 5.00 cm

Longitud: 5.10 cm

## Cables de transductores

Longitud Cable 1: 3.72 m

Longitud Cable 2: 2.66 m

## Barra Calibradora

Tiempo de referencia: 25.4 microsegundos

Material: Polímero

Diámetro: 4.70 cm

Longitud: 10.80 cm

Se comprobó, según muestra la ASTM C-597, que la frecuencia de vibración no resulta una dificultad para trabajar con muestras cilíndricas de hormigón de tamaño 4"x8", dado que la longitud de onda de la vibración ultrasónica resulta menor que cualquiera de las extensiones longitudinales de estos elementos y no entorpece el tiempo de llegada de los pulsos transmitidos directamente:

Longitud de onda máxima (L max.) = Velocidad de pulso máxima / Frecuencia del equipo

$$= 4999 / 54000$$

$$= 0.0926 \text{ m}$$

$$(L \text{ max.}) = \mathbf{0.0926 \text{ m}} < \mathbf{0.20 \text{ m}} \text{ (Longitud de probeta 4"x8")}$$

En ejercicio, el equipo primero debe calibrarse para tener un conveniente control de funcionamiento del utensilio y ajuste en tiempo cero, esto se consigue con la ayuda de la barra de polímero de referencia que tiene apuntado en su superficie el valor de tiempo (25.4 microsegundos) durante el cual el pulso ultrasónico pasa a través de su mayor longitud, para ello se aplica la grasa acoplante en los extremos a fin de vincular transductor-superficie sin vacíos y se regula el equipo hasta obtener dicho valor en la pantalla, luego de ello recién está utilizable para la valoración de los especímenes de hormigón.

***La presente investigación uso la transmisión directa, ya que suministra la mayor sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien ajustada.***

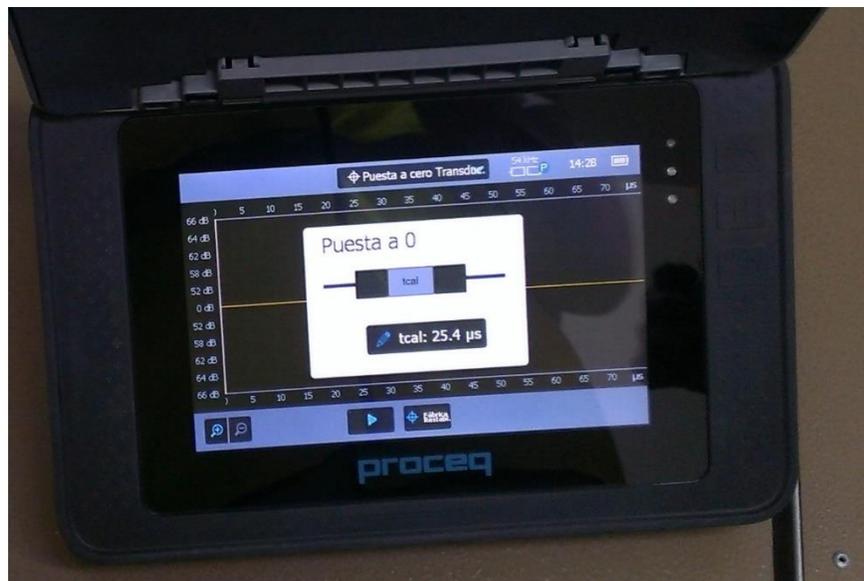
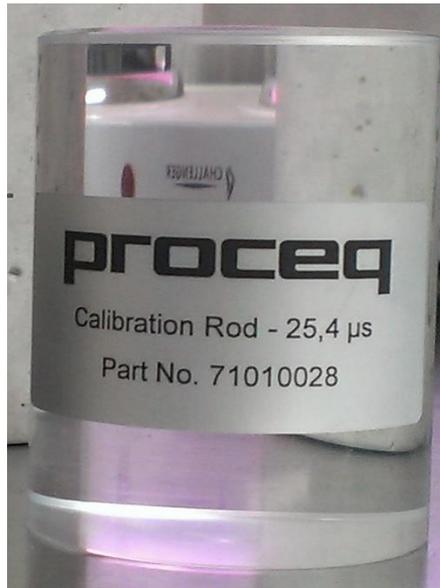


ILUSTRACIÓN 19: EQUIPO DE ULTRASONIDO DE LA UNPHU, FUENTE PROPIA.



**ILUSTRACIÓN 20: CABLES DE CONEXIÓN CON SUS TRANSDUCTORES (EMISOR Y RECEPTOR), FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 21: BARRA CALIBRADORA CON TIEMPO DE TRÁNSITO, DE REFERENCIA, INSCRITO. FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 22: GRASA ÚTIL PARA ACOPLAR SUPERFICIES DE CONTACTO CON TRANSDUCTORES, FUENTE PROPIA.**

### 3.6.7. Preparación de especímenes para ensayos

Los especímenes se trabajaban poco antes de consumir la edad definitiva de ensayo a compresión, debido a que primero se ejecutaría el ensayo de ultrasonido, para ello fue preciso:

- Detener la condición de curado: máximo 6 horas antes del ensayo, con lo cual todavía es posible cumplir con la tolerancia aceptable de tiempo de curado y hora de ensayo para las probetas con 7 días de edad, lo que, por demás, también aplicaríamos para las probetas con 14 y 28 días de edad.
- Uniformizar el estado de humedad: secado con una toalla y luego bajo un abanico.
- Adecuar las superficies donde se acoplarán los transductores: lijar, nivelar, limpiar y marcar.

<b>Edad de ensayo de resistencia a compresión</b>	<b>Tolerancia permisible</b>
24 horas	± 0.5 horas ó 2.1 %
3 días	± 2 horas ó 2.8 %
7 días	± 6 horas ó 3.6 %
28 días	± 20 horas ó 3.0 %
90 días	± 48 horas ó 2.2%

TABLA: TOLERANCIA PERMISIBLE PARA TIEMPO DE CURADO Y HORA DE ENSAYO, ASTM C-39.



**LUSTRACIÓN 23: LIJADO Y NIVELACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO EN LA PROBETA, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 1: LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES DE CONTACTO EN LA PROBETA, FUENTE PROPIA.**

### 3.6.8. Ensayo de ultrasonido

Como se señaló al inicio, la prueba de ultrasonido se realizó de acuerdo a la ASTM C-597, en ese sentido, se sintetiza el procedimiento de forma esquemática:

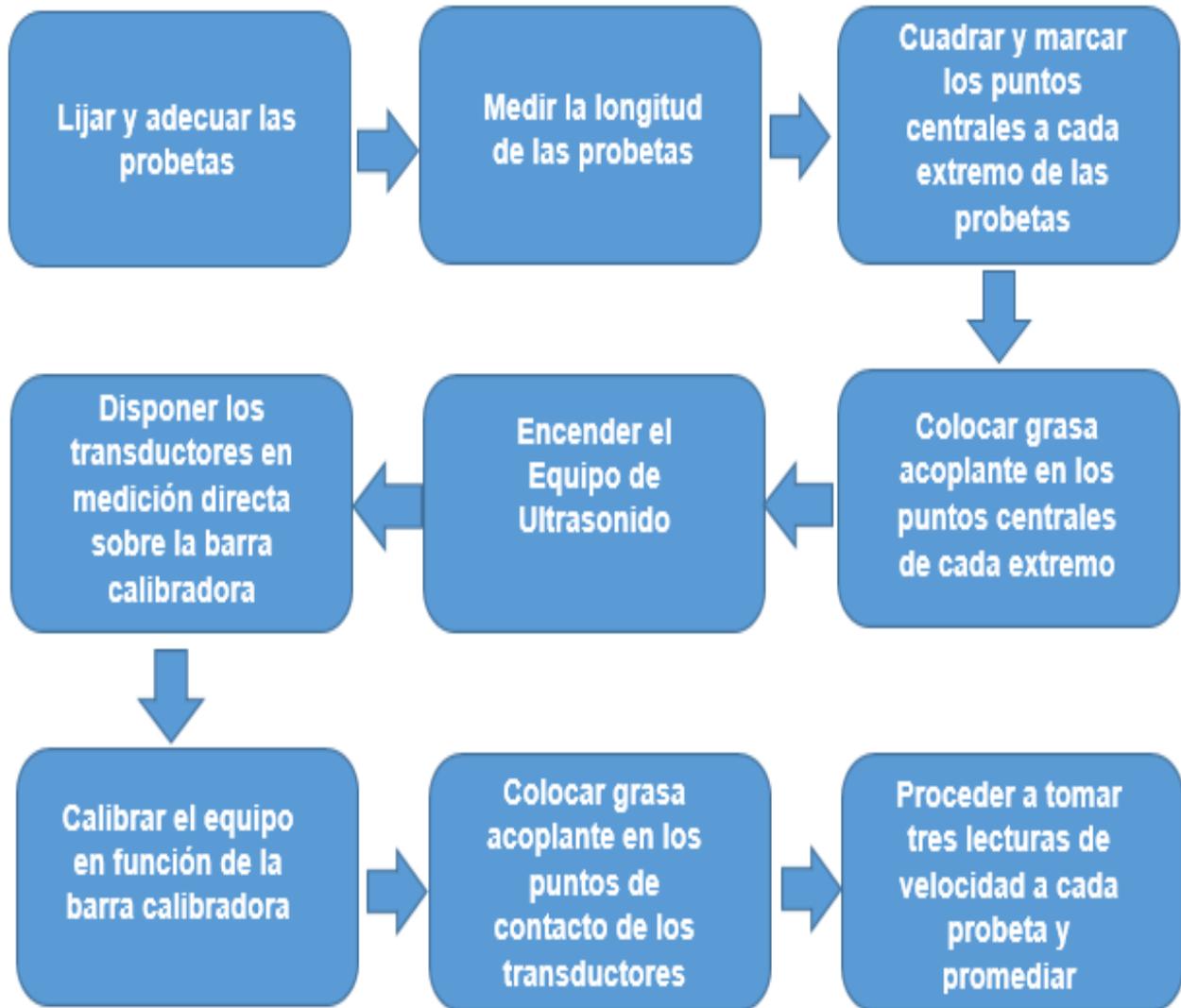
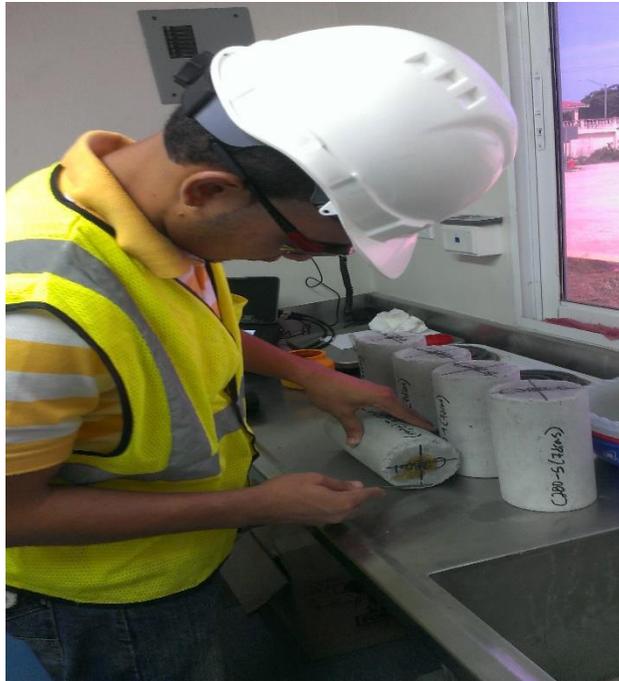


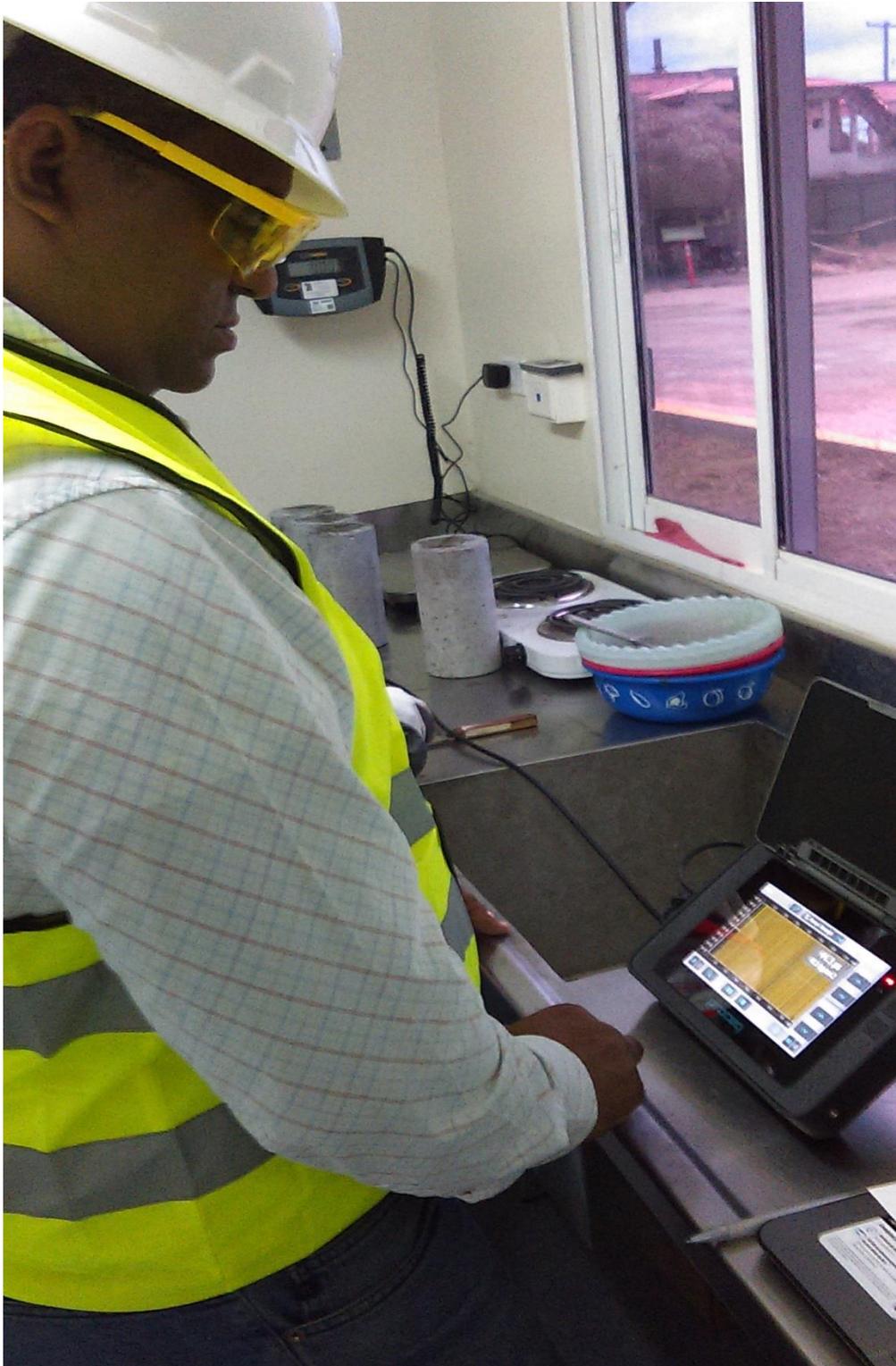
ILUSTRACIÓN 24: ESQUEMA SECUENCIAL DE ENSAYO DE ULTRASONIDO, FUENTE PROPIA.



**ILUSTRACIÓN 25: APLICACIÓN DE GRASA ACOPLANTE EN LOS EXTREMOS DE LAS PROBETAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 26: CALIBRACIÓN DEL TIEMPO DE PROPAGACIÓN DE PULSO EN BASE A REFERENCIA GRABADA EN LA BARRA CALIBRADORA, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN 27: MEDICIÓN DEL TIEMPO DE PROPAGACIÓN DEL PULSO ULTRASÓNICO, FUENTE PROPIA.**

### 3.6.9. Ensayo de resistencia a compresión

El ensayo se realizó en función a la ASTM C-39, durante el Ensayo a Compresión **se usaron pads de neopreno** y se comprobó la aplicación de una adecuada velocidad de carga hasta producir la falla del espécimen.



ILUSTRACIÓN 28: ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, FUENTE PROPIA.

### 3.6.10. Recopilación de datos

En la presente tabla se muestran los datos obtenidos del ensayo de las probetas de hormigón de forma detallada para cada mezcla patrón. En ella se puede observar el tiempo de curado de cada probeta, la masa, el tiempo de transmisión de pulso, la velocidad de pulso, la carga máxima aplicada hasta la rotura, y el tipo de rotura, todo esto por ser considerado de importancia para su posterior análisis.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	ALTURA (m)	MASA (kg)	TIEMPO DE TRANSMISIÓN DE PULSO ( $\mu$ s)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	CARGA (kgf)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	TIPO ROTURA
C210-1	7	0,206	4,03	45,1	4568	24090	307	D
C210-2	7	0,202	4	44,9	4501	23695	302	A
C210-3	7	0,205	4,07	45,6	4499	22995	293	D
C210-4	7	0,203	4,09	45,2	4496	21550	274	D
C210-5	7	0,202	4,04	44,2	4570	25060	319	B
C280-1	7	0,206	3,94	46,7	4411	20825	265	A
C280-2	7	0,205	3,97	46,5	4409	21050	268	B
C280-3	7	0,205	3,99	47,1	4352	20955	267	A
C280-4	7	0,206	3,96	46,2	4459	21220	270	A
C280-5	7	0,204	3,46	46,9	4352	22205	283	A
C350-1	7	0,205	4	43,8	4685	27680	352	D
C350-2	7	0,207	4	44,9	4612	27395	349	D
C350-3	7	0,205	4,01	44,1	4653	27950	356	D
C350-4	7	0,205	4	44,3	4632	27730	353	D
C350-5	7	0,206	3,99	43,7	4719	28525	363	D
C210-6	14	0,205	4,05	44,0	4654	27135	345	A
C210-7	14	0,205	4,05	44,0	4662	28260	360	D
C210-8	14	0,206	4,08	43,9	4693	28730	366	A
C210-9	14	0,205	4,06	44,1	4653	27030	344	A
C210-10	14	0,205	4,07	43,6	4705	28895	368	A
C280-6	14	0,206	4,03	44,6	4618	26240	334	A
C280-7	14	0,205	3,99	44,2	4637	25415	324	D
C280-8	14	0,207	4,03	44,2	4683	24210	308	A
C280-9	14	0,207	4	44,4	4661	25530	325	A
C280-10	14	0,208	4,01	44,6	4663	24900	317	A
C350-6	14	0,206	4,05	43,2	4768	30385	387	D
C350-7	14	0,207	4,06	44,1	4693	30990	395	A
C350-8	14	0,207	4,01	43,3	4780	30125	384	A
C350-9	14	0,205	3,99	43,3	4734	31125	396	E
C350-10	14	0,205	3,99	43,3	4734	30900	393	A
C210-11	28	0,205	4,08	43,1	4760	30825	392	D
C210-12	28	0,207	4,07	43,2	4794	30240	385	D
C210-13	28	0,206	4,07	43,4	4748	30300	386	E
C210-14	28	0,206	4,1	43,7	4716	28330	361	A
C210-15	28	0,206	4,05	43,2	4770	29660	378	D
C280-11	28	0,207	3,99	43,3	4785	29570	376	D
C280-12	28	0,206	4,03	42,9	4798	32135	409	D
C280-13	28	0,207	4,03	43,8	4730	29380	374	D
C280-14	28	0,206	3,99	44,2	4665	28530	363	B
C280-15	28	0,207	4,02	44,2	4688	27715	353	A
C350-11	28	0,207	4,02	42,0	4930	35925	457	D
C350-12	28	0,207	4,04	41,8	4951	36075	459	A
C350-13	28	0,207	4,03	41,4	4999	38955	496	A
C350-14	28	0,206	4,01	41,6	4948	37110	472	A
C350-15	28	0,207	4,01	42,0	4926	37245	474	A

**TABLA 1: RESULTADOS DE ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO PARA MUESTRAS OBTENIDAS A NIVEL INDUSTRIAL.**



### 3.8. Análisis de los datos

En el actual capítulo se examinarán estadísticamente los resultados conseguidos en la fase de Ensayo a Nivel Industrial, con el fin de hallar el modelo de tendencia que, para cada caso, permita establecer con cierto grado de seguridad los mínimos valores de Porcentajes Residuales, que simbolizan el error en la apreciación de la Resistencia a Compresión entre lo deseado y lo logrado.

#### 3.8.1. Evaluación estadística sobre la calidad y homogeneidad del hormigón tratado

Según el **ACI 318-05** Cuando un establecimiento productor de concreto “no tenga evidencias de ensayos de resistencia en obra para la determinación de la desviación estándar **Ss**”, y asumiendo un caso hipotético en nuestra investigación como más desfavorable, para encontrar la resistencia requerida o de diseño  $f'_{cr}$  debe determinarse de la **Tabla 5.3.2.2** de esta documentación la cual se detalla a continuación:

**TABLA 5.3.2.2 — RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA**

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 20$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$20 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5.0$

Todo esto para asegurar una probabilidad de que 1 de cada 100 datos de los promedios de tres ensayos consecutivos sean inferiores a la resistencia a compresión nominal especificada  $f'_c$ .

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	MEDIA ARITMÉTICA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
C210-1	7	307	299	16,69	5,59
C210-2	7	302			
C210-3	7	293			
C210-4	7	274			
C210-5	7	319			
C280-1	7	265	271	7,03	2,60
C280-2	7	268			
C280-3	7	267			
C280-4	7	270			
C280-5	7	283			
C350-1	7	352	355	5,39	1,52
C350-2	7	349			
C350-3	7	356			
C350-4	7	353			
C350-5	7	363			
C210-6	14	345	356	11,19	3,14
C210-7	14	360			
C210-8	14	366			
C210-9	14	344			
C210-10	14	368			
C280-6	14	334	321	9,63	3,00
C280-7	14	324			
C280-8	14	308			
C280-9	14	325			
C280-10	14	317			
C350-6	14	387	391	5,46	1,40
C350-7	14	395			
C350-8	14	384			
C350-9	14	396			
C350-10	14	393			
C210-11	28	392	380	12,16	3,20
C210-12	28	385			
C210-13	28	386			
C210-14	28	361			
C210-15	28	378			
C280-11	28	376	375	21,13	5,64
C280-12	28	409			
C280-13	28	374			
C280-14	28	363			
C280-15	28	353			
C350-11	28	457	471	15,60	3,31
C350-12	28	459			
C350-13	28	496			
C350-14	28	472			
C350-15	28	474			

TABLA 3: TABLA ESTADÍSTICA DE LAS RESISTENCIAS OBTENIDAS.

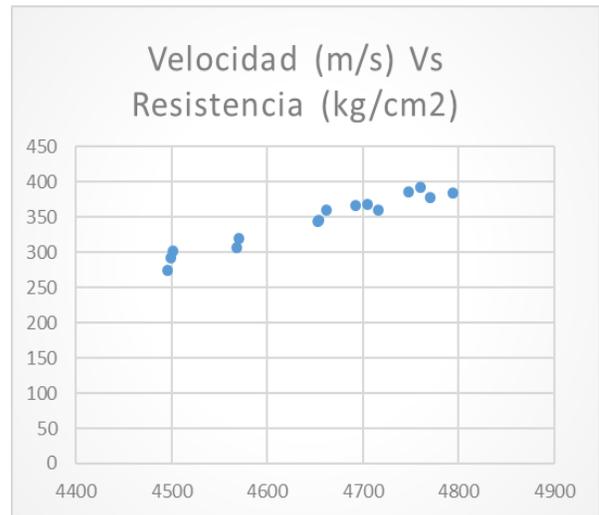
En la tabla 3 se puede comprobar que las resistencias obtenidas sobrepasaron la requerida específica por el ACI 318-05, a su vez se puede verificar que el coeficiente de variación está dando muy por debajo del 50% en todos los casos, demostrando de esta manera que el análisis muestral es homogéneo y de alta calidad.

### 3.8.2. Análisis de la edad del hormigón

A continuación, se mostrarán una serie de tablas las cuales indican cómo se comporta la velocidad de pulso ultrasónico versus resistencia a compresión del concreto, con una mezcla patrón fija y con un tiempo de curado o edad del hormigón variable.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-1	7	4568	307
C210-2	7	4501	302
C210-3	7	4499	293
C210-4	7	4496	274
C210-5	7	4570	319
C210-6	14	4654	345
C210-7	14	4662	360
C210-8	14	4693	366
C210-9	14	4653	344
C210-10	14	4705	368
C210-11	28	4760	392
C210-12	28	4794	385
C210-13	28	4748	386
C210-14	28	4716	361
C210-15	28	4770	378

TABLA 4: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN F'c=210 KG/CM2

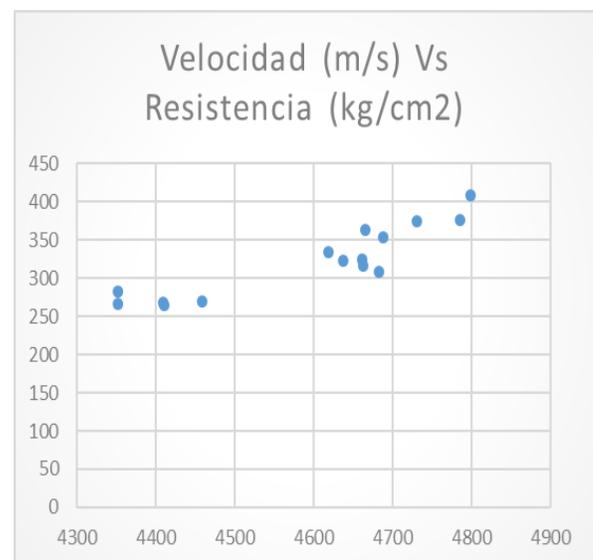


GRAFICA 1: VELOCIDAD VS RESISTENCIA F'c=210 KG/CM2

En la gráfica 1 se puede apreciar que a medida que la edad del hormigón aumenta la velocidad de pulso también aumenta, así como lo hace la resistencia a compresión, estableciendo así una relación directamente proporcional entre ambas variables y dando respuesta de esta forma a una de las hipótesis planteadas al principio.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C280-1	7	4411	265
C280-2	7	4409	268
C280-3	7	4352	267
C280-4	7	4459	270
C280-5	7	4352	283
C280-6	14	4618	334
C280-7	14	4637	324
C280-8	14	4683	308
C280-9	14	4661	325
C280-10	14	4663	317
C280-11	28	4785	376
C280-12	28	4798	409
C280-13	28	4730	374
C280-14	28	4665	363
C280-15	28	4688	353

TABLA 5: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN F'c=280 KG/CM2

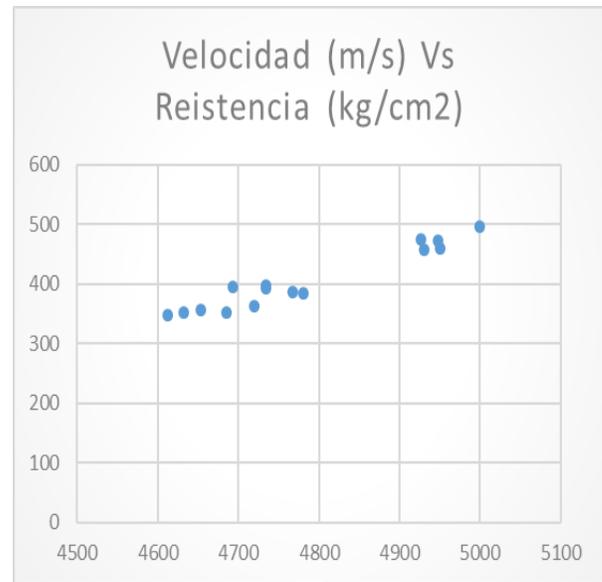


GRAFICA 2: VELOCIDAD VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN F'c=280 KG/CM2

En esta grafica donde se evalúa el hormigón de 280kg/cm<sup>2</sup>, se puede notar que la relación que existe entre la velocidad de pulso y la resistencia a compresión también es proporcional como en el caso anterior con la pequeña diferencia de que en esta grafica la distribución de los datos se dispara a partir de los 28 días dando una apariencia poco uniforme.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C350-1	7	4685	352
C350-2	7	4612	349
C350-3	7	4653	356
C350-4	7	4632	353
C350-5	7	4719	363
C350-6	14	4768	387
C350-7	14	4693	395
C350-8	14	4780	384
C350-9	14	4734	396
C350-10	14	4734	393
C350-11	28	4930	457
C350-12	28	4951	459
C350-13	28	4999	496
C350-14	28	4948	472
C350-15	28	4926	474

TABLA 6: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN F'C=350 KG/CM<sup>2</sup>



GRAFICA 3: VELOCIDAD VS RESISTENCIA F'C=350 KG/CM<sup>2</sup>

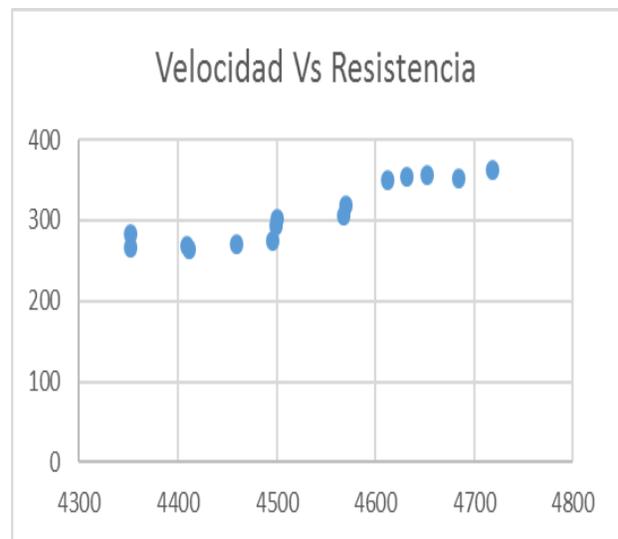
El grafico 3 examina el comportamiento de un diseño de mezcla de 350kg/cm<sup>2</sup>, y como en los casos anteriores, también confirma la relación proporcional directa existente entre la velocidad de pulso y la resistencia a compresión del hormigón a partir de lo cual queda confirmado, en probetas de hormigón, que **cuanto mayor sea el tiempo de fraguado, mayor será la velocidad de ultrasonido.**

### 3.8.3. Análisis de la relación agua / cemento

A continuación, se presentarán una serie de tablas que indican cómo se comporta la velocidad de pulso ultrasónico versus resistencia a compresión del concreto, variando el diseño de mezcla patrón y, por ende, las resistencias, a través de un tiempo de curado fijo.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-1	7	4568	307
C210-2	7	4501	302
C210-3	7	4499	293
C210-4	7	4496	274
C210-5	7	4570	319
C280-1	7	4411	265
C280-2	7	4409	268
C280-3	7	4352	267
C280-4	7	4459	270
C280-5	7	4352	283
C350-1	7	4685	352
C350-2	7	4612	349
C350-3	7	4653	356
C350-4	7	4632	353
C350-5	7	4719	363

TABLA 7: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 7 DÍAS

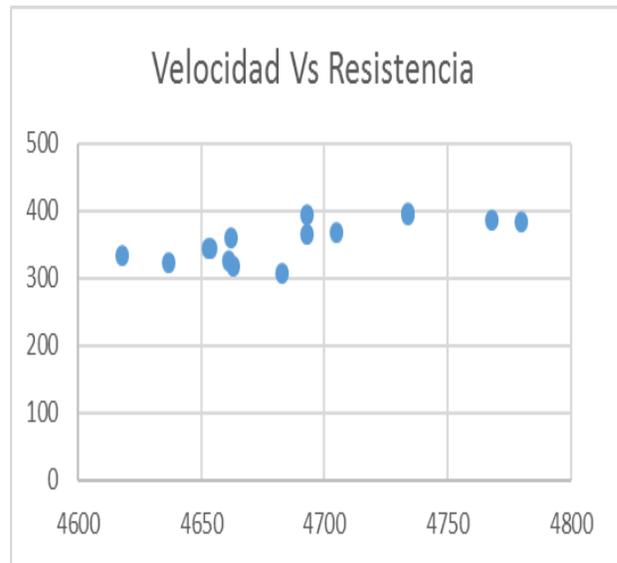


GRAFICA 4: VELOCIDAD VS RESISTENCIA  $F'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 7 DÍAS

En esta grafica se puede constatar que a medida que la relación agua/cemento disminuye, la velocidad de pulso aumenta, y por demás la resistencia a compresión, estableciendo, de esta forma, una relación directamente proporcional entre ambas variables (velocidad Vs resistencia) y dando así respuesta a una de las hipótesis planteadas al principio.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-6	14	4654	345
C210-7	14	4662	360
C210-8	14	4693	366
C210-9	14	4653	344
C210-10	14	4705	368
C280-6	14	4618	334
C280-7	14	4637	324
C280-8	14	4683	308
C280-9	14	4661	325
C280-10	14	4663	317
C350-6	14	4768	387
C350-7	14	4693	395
C350-8	14	4780	384
C350-9	14	4734	396
C350-10	14	4734	393

**TABLA 8: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 14 DÍAS**

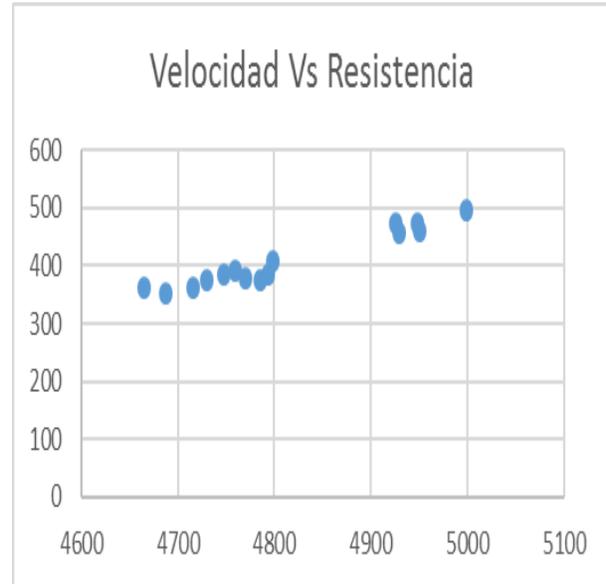


**GRAFICA 5: VELOCIDAD VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 14 DÍAS**

En la gráfica 5 donde se evalúa un tiempo de curado fijo de 14 días, se puede notar que la asociación que existe entre la velocidad de pulso y la relación agua/cemento es inversamente proporcional, lo que quiere decir que, a medida que aumenta la resistencia, la velocidad de transmisión de pulso también aumenta.

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-11	28	4760	392
C210-12	28	4794	385
C210-13	28	4748	386
C210-14	28	4716	361
C210-15	28	4770	378
C280-11	28	4785	376
C280-12	28	4798	409
C280-13	28	4730	374
C280-14	28	4665	363
C280-15	28	4688	353
C350-11	28	4930	457
C350-12	28	4951	459
C350-13	28	4999	496
C350-14	28	4948	472
C350-15	28	4926	474

TABLA 9: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 28 DÍAS



GRAFICA 6: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON TIEMPO DE CURADO FIJADO A 28 DÍAS

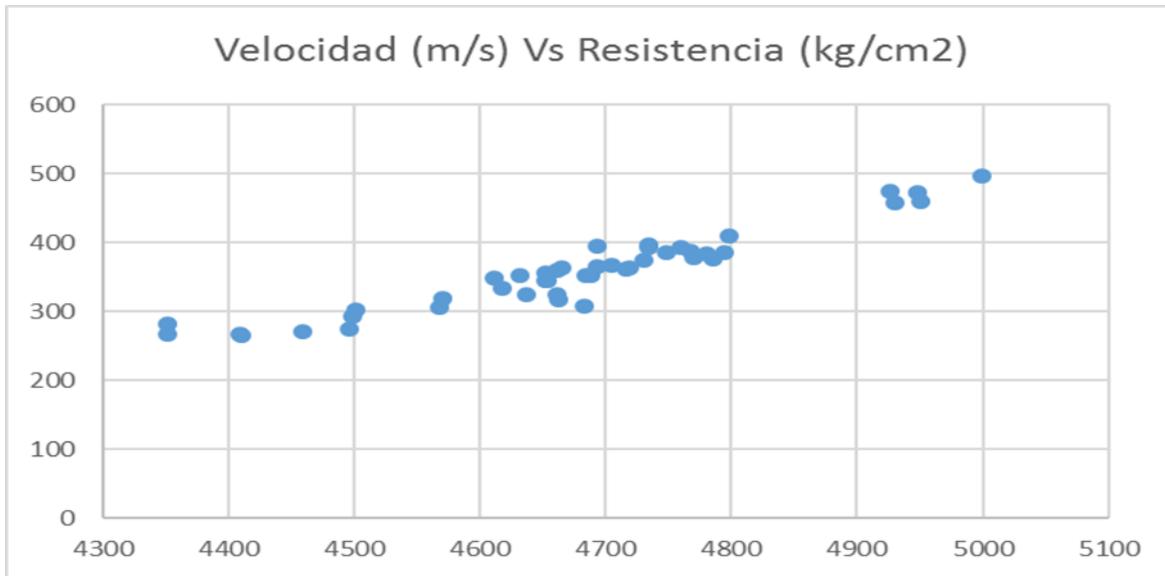
El presente grafico examina el comportamiento de varias resistencias a una edad fija de 28 días, y como en los casos anteriores, también confirma la asociación directa existente entre la velocidad de pulso y la resistencia a compresión del hormigón, a partir de lo cual queda confirmado, en probetas de hormigón, que **existe una relación directamente proporcional entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión simple del hormigón.**

### 3.8.4. Análisis global de los resultados velocidad vs resistencia

En este apartado se mostrará la tabla y la gráfica del conjunto total de datos obtenidos referentes a las velocidades versus resistencias, organizados de forma descendente:

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	CÓDIGO	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-1	7	C210-1	4568	307
C210-2	7	C210-2	4501	302
C210-3	7	C210-3	4499	293
C210-4	7	C210-4	4496	274
C210-5	7	C210-5	4570	319
C280-1	7	C280-1	4411	265
C280-2	7	C280-2	4409	268
C280-3	7	C280-3	4352	267
C280-4	7	C280-4	4459	270
C280-5	7	C280-5	4352	283
C350-1	7	C350-1	4685	352
C350-2	7	C350-2	4612	349
C350-3	7	C350-3	4653	356
C350-4	7	C350-4	4632	353
C350-5	7	C350-5	4719	363
C210-6	14	C210-6	4654	345
C210-7	14	C210-7	4662	360
C210-8	14	C210-8	4693	366
C210-9	14	C210-9	4653	344
C210-10	14	C210-10	4705	368
C280-6	14	C280-6	4618	334
C280-7	14	C280-7	4637	324
C280-8	14	C280-8	4683	308
C280-9	14	C280-9	4661	325
C280-10	14	C280-10	4663	317
C350-6	14	C350-6	4768	387
C350-7	14	C350-7	4693	395
C350-8	14	C350-8	4780	384
C350-9	14	C350-9	4734	396
C350-10	14	C350-10	4734	393
C210-11	28	C210-11	4760	392
C210-12	28	C210-12	4794	385
C210-13	28	C210-13	4748	386
C210-14	28	C210-14	4716	361
C210-15	28	C210-15	4770	378
C280-11	28	C280-11	4785	376
C280-12	28	C280-12	4798	409
C280-13	28	C280-13	4730	374
C280-14	28	C280-14	4665	363
C280-15	28	C280-15	4688	353
C350-11	28	C350-11	4930	457
C350-12	28	C350-12	4951	459
C350-13	28	C350-13	4999	496
C350-14	28	C350-14	4948	472
C350-15	28	C350-15	4926	474

TABLA 10: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL



GRAFICA 7: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL

En este grafico se puede observar como el conjunto de datos se acopla formando una especie de **línea encorvada** ascendente en forma de una semi-parábola, en función de esta grafica se realizarán las líneas de tendencia para poder detectar cuál presenta un mayor **coeficiente de determinación  $r^2$** , y en función de este proceder a crear la ecuación característica para poder **estimar la resistencia a compresión** a través de la velocidad de pulso de ultrasonido.

### 3.8.5. Evaluación del valor de confiabilidad

Los modelos de estimación que se experimentarán para verificar el ajuste metódico de los datos empíricos se exponen a continuación con sus referentes ecuaciones representativas:

- Modelo Lineal:  $R = a + bV$
- Modelo Potencial:  $R = a \cdot V^b$
- Modelo Exponencial:  $R = a \cdot e^{bV}$
- Modelo Cuadrático:  $R = a + bV + cV^2$

En donde:

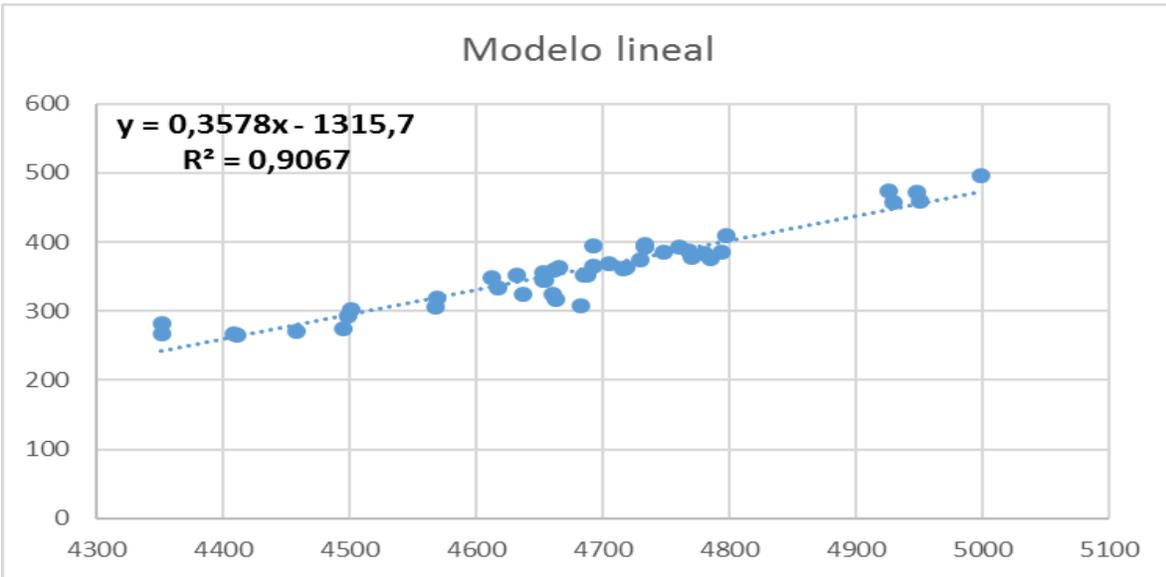
R = Resistencia a Compresión

V = Velocidad de Pulso Ultrasónico

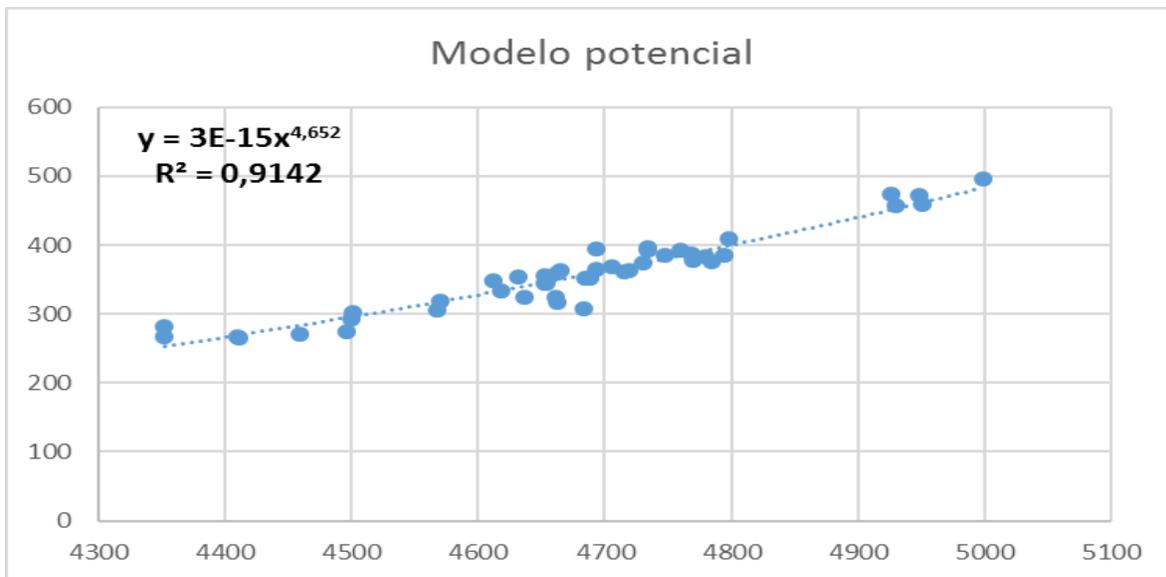
a, b, y c = coeficientes de la ecuación

Se interpreta el Coeficiente de Determinación  $r^2$  como la medida de la seguridad del ajuste en la relación de correspondencia entre las variables: Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a Compresión (designados también “V” o “Velocidad” y “R” o “Resistencia”, respectivamente). Este coeficiente admitió elegir el mejor modelo de aproximación, atreves del método de los mínimos cuadrados, dado que simboliza la razón entre la variación estimada y la variación total. Por definición:

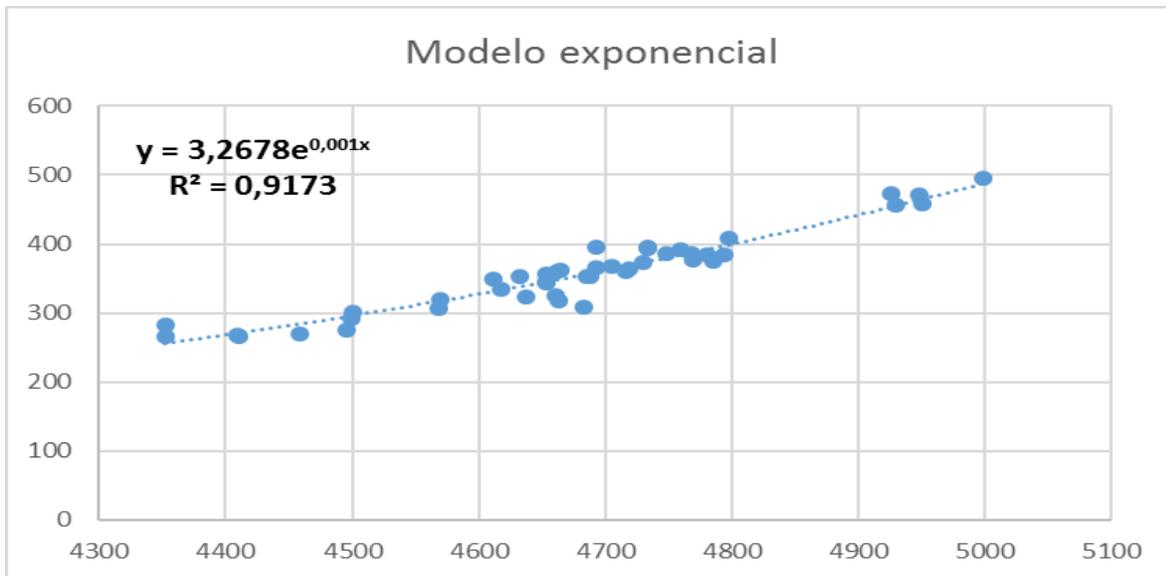
- Si  $r^2 = 1.00$ , el pronóstico de la variable dependiente es perfecta.
- Si  $r^2 = 0.00$ , la relación entre las variables está dispuesta por el azar.



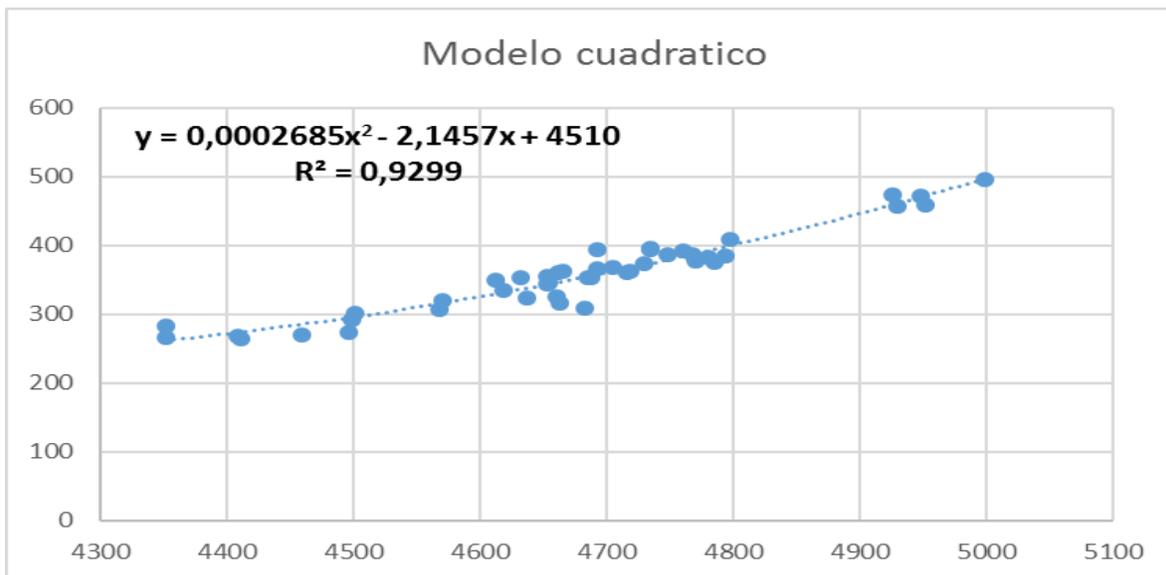
GRAFICA 8: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL DEL MODELO LINEAL



GRAFICA 9: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL DEL MODELO POTENCIAL



**GRAFICA 11: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL DEL MODELO EXPONENCIAL**



**GRAFICA 10: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN GENERAL DEL MODELO CUADRÁTICO**

## CAPITULO IV.- RESULTADOS

### 4.0. Análisis de resultados

Además de los detalles que se consideraron al momento de seleccionar el modelo de verificación matemático más seguro, es decir, aparte del  $r^2$ , se consideró también el **Porcentaje Residual** el cual se determina al calcular la diferencia entre la resistencia obtenida en los ensayos a compresión simple, hechos con anterioridad (**Resistencia real**) y la **Resistencia estimada** expresada en porcentaje respecto de la Resistencia real.

$$\text{Porcentaje Residual} = ((\text{Resistencia real} - \text{Resistencia estimada}) / \text{Resistencia real}) \times 100$$

Con las aclaraciones anteriores se muestran las siguientes tablas donde se detallan las diferencias porcentuales, **resaltando los valores máximos**, para los datos que conforman cada agrupación.

**TABLA 11: PORCENTAJES RESIDUALES PARA EL MODELO DE APROXIMACIÓN LINEAL**

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm2)	RESISTENCIA REAL (kg/cm2)	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA (kg/cm2)	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
C210-1	7	4568	319	307	-12	-4
C210-2	7	4501	295	302	7	2
C210-3	7	4499	294	293	-1	0
C210-4	7	4496	293	274	-19	-7
C210-5	7	4570	319	319	0	0
C280-1	7	4411	263	265	3	1
C280-2	7	4409	262	268	6	2
C280-3	7	4352	241	267	25	10
C280-4	7	4459	280	270	-10	-4
C280-5	7	4352	241	283	41	15
C350-1	7	4685	361	352	-8	-2
C350-2	7	4612	334	349	14	4
C350-3	7	4653	349	356	7	2
C350-4	7	4632	342	353	11	3
C350-5	7	4719	373	363	-10	-3
C210-6	14	4654	350	345	-4	-1
C210-7	14	4662	352	360	7	2
C210-8	14	4693	363	366	2	1
C210-9	14	4653	349	344	-5	-1
C210-10	14	4705	368	368	0	0
C280-6	14	4618	337	334	-3	-1
C280-7	14	4637	343	324	-20	-6
C280-8	14	4683	360	308	-52	-17
C280-9	14	4661	352	325	-27	-8
C280-10	14	4663	353	317	-36	-11
C350-6	14	4768	390	387	-3	-1
C350-7	14	4693	363	395	31	8
C350-8	14	4780	395	384	-11	-3
C350-9	14	4734	378	396	18	5
C350-10	14	4734	378	393	15	4
C210-11	28	4760	387	392	5	1
C210-12	28	4794	400	385	-15	-4
C210-13	28	4748	383	386	3	1
C210-14	28	4716	372	361	-11	-3
C210-15	28	4770	391	378	-13	-4
C280-11	28	4785	396	376	-20	-5
C280-12	28	4798	401	409	8	2
C280-13	28	4730	377	374	-3	-1
C280-14	28	4665	353	363	10	3
C280-15	28	4688	362	353	-9	-2
C350-11	28	4930	448	457	9	2
C350-12	28	4951	456	459	3	1
C350-13	28	4999	473	496	23	5
C350-14	28	4948	455	472	17	4
C350-15	28	4926	447	474	27	6

En el modelo lineal con ecuación igual a:  $R= 0.3578v-1315.7$ , podemos apreciar como el porcentaje residual máximo es igual a  $\pm 17\%$  y la diferencia de

resistencias mayor es igual a **+/- 52 kg/cm<sup>2</sup>**, lo cual demuestra que es un **modelo de predicción aceptable**.

**TABLA 12: PORCENTAJES RESIDUALES PARA EL MODELO DE APROXIMACIÓN POTENCIAL**

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA REAL (kg/cm <sup>2</sup> )	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA (kg/cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
C210-1	7	4568	318	307	-11	-4
C210-2	7	4501	297	302	5	2
C210-3	7	4499	296	293	-3	-1
C210-4	7	4496	295	274	-21	-8
C210-5	7	4570	318	319	1	0
C280-1	7	4411	270	265	-5	-2
C280-2	7	4409	270	268	-2	-1
C280-3	7	4352	254	267	13	5
C280-4	7	4459	284	270	-14	-5
C280-5	7	4352	254	283	29	10
C350-1	7	4685	357	352	-5	-1
C350-2	7	4612	332	349	17	5
C350-3	7	4653	346	356	10	3
C350-4	7	4632	339	353	14	4
C350-5	7	4719	370	363	-7	-2
C210-6	14	4654	347	345	-1	0
C210-7	14	4662	349	360	10	3
C210-8	14	4693	360	366	5	1
C210-9	14	4653	346	344	-2	-1
C210-10	14	4705	365	368	3	1
C280-6	14	4618	334	334	0	0
C280-7	14	4637	341	324	-17	-5
C280-8	14	4683	357	308	-49	-16
C280-9	14	4661	349	325	-24	-7
C280-10	14	4663	350	317	-33	-10
C350-6	14	4768	388	387	-1	0
C350-7	14	4693	360	395	34	9
C350-8	14	4780	392	384	-9	-2
C350-9	14	4734	375	396	21	5
C350-10	14	4734	375	393	18	5
C210-11	28	4760	385	392	8	2
C210-12	28	4794	398	385	-13	-3
C210-13	28	4748	380	386	5	1
C210-14	28	4716	369	361	-8	-2
C210-15	28	4770	389	378	-11	-3
C280-11	28	4785	394	376	-18	-5
C280-12	28	4798	399	409	10	2
C280-13	28	4730	374	374	0	0
C280-14	28	4665	350	363	13	3
C280-15	28	4688	359	353	-6	-2
C350-11	28	4930	453	457	4	1
C350-12	28	4951	462	459	-3	-1
C350-13	28	4999	483	496	13	3
C350-14	28	4948	461	472	11	2
C350-15	28	4926	451	474	23	5

En el modelo potencial con ecuación igual a:  $R= 3 \times 10^{-15} \cdot 652$ , podemos notar como el porcentaje residual máximo es igual a **+/- 16%** y la diferencia de

resistencias mayor es igual a **+/- 49 kg/cm<sup>2</sup>**, lo cual demuestra que es un **buen**

**TABLA 13: PORCENTAJES RESIDUALES PARA EL MODELO DE APROXIMACIÓN EXPONENCIAL**

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA REAL (kg/cm <sup>2</sup> )	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA (kg/cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
C210-1	7	4568	315	307	-8	-3
C210-2	7	4501	294	302	7	2
C210-3	7	4499	294	293	-1	0
C210-4	7	4496	293	274	-19	-7
C210-5	7	4570	315	319	4	1
C280-1	7	4411	269	265	-4	-1
C280-2	7	4409	269	268	-1	0
C280-3	7	4352	254	267	13	5
C280-4	7	4459	282	270	-12	-5
C280-5	7	4352	254	283	29	10
C350-1	7	4685	354	352	-2	0
C350-2	7	4612	329	349	20	6
C350-3	7	4653	343	356	13	4
C350-4	7	4632	336	353	17	5
C350-5	7	4719	366	363	-3	-1
C210-6	14	4654	343	345	2	1
C210-7	14	4662	346	360	14	4
C210-8	14	4693	357	366	9	2
C210-9	14	4653	343	344	1	0
C210-10	14	4705	361	368	7	2
C280-6	14	4618	331	334	3	1
C280-7	14	4637	337	324	-14	-4
C280-8	14	4683	353	308	-45	-15
C280-9	14	4661	346	325	-20	-6
C280-10	14	4663	346	317	-29	-9
C350-6	14	4768	385	387	2	1
C350-7	14	4693	357	395	38	10
C350-8	14	4780	389	384	-6	-1
C350-9	14	4734	372	396	25	6
C350-10	14	4734	372	393	22	6
C210-11	28	4760	382	392	11	3
C210-12	28	4794	395	385	-10	-3
C210-13	28	4748	377	386	9	2
C210-14	28	4716	365	361	-4	-1
C210-15	28	4770	385	378	-8	-2
C280-11	28	4785	391	376	-15	-4
C280-12	28	4798	396	409	13	3
C280-13	28	4730	370	374	4	1
C280-14	28	4665	347	363	16	4
C280-15	28	4688	355	353	-2	-1
C350-11	28	4930	452	457	5	1
C350-12	28	4951	462	459	-3	-1
C350-13	28	4999	484	496	12	2
C350-14	28	4948	460	472	12	2
C350-15	28	4926	450	474	24	5

**modelo de predicción.**

En el modelo exponencial con ecuación igual a:  $R = 3.2678e^{0.001v}$ , podemos ver como el porcentaje residual máximo es igual a **+/- 15%** y la diferencia de

resistencias mayor es igual a **+/- 45 kg/cm<sup>2</sup>**, lo cual demuestra que es un **muy buen modelo de predicción**.

**TABLA 14: PORCENTAJES RESIDUALES PARA EL MODELO DE APROXIMACIÓN CUADRÁTICA**

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA REAL (kg/cm <sup>2</sup> )	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA (kg/cm <sup>2</sup> )	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
C210-1	7	4568	311	307	-4	-1
C210-2	7	4501	290	302	12	4
C210-3	7	4499	289	293	4	1
C210-4	7	4496	288	274	-14	-5
C210-5	7	4570	310	319	9	3
C280-1	7	4411	268	265	-2	-1
C280-2	7	4409	267	268	1	0
C280-3	7	4352	255	267	12	4
C280-4	7	4459	279	270	-9	-3
C280-5	7	4352	255	283	27	10
C350-1	7	4685	349	352	4	1
C350-2	7	4612	323	349	26	7
C350-3	7	4653	337	356	19	5
C350-4	7	4632	330	353	23	7
C350-5	7	4719	362	363	2	0
C210-6	14	4654	338	345	8	2
C210-7	14	4662	340	360	19	5
C210-8	14	4693	352	366	14	4
C210-9	14	4653	337	344	7	2
C210-10	14	4705	356	368	12	3
C280-6	14	4618	325	334	9	3
C280-7	14	4637	332	324	-8	-2
C280-8	14	4683	348	308	-40	-13
C280-9	14	4661	340	325	-15	-5
C280-10	14	4663	341	317	-24	-7
C350-6	14	4768	381	387	6	1
C350-7	14	4693	352	395	43	11
C350-8	14	4780	386	384	-3	-1
C350-9	14	4734	368	396	29	7
C350-10	14	4734	368	393	26	7
C210-11	28	4760	378	392	14	4
C210-12	28	4794	392	385	-7	-2
C210-13	28	4748	373	386	13	3
C210-14	28	4716	360	361	0	0
C210-15	28	4770	382	378	-5	-1
C280-11	28	4785	388	376	-12	-3
C280-12	28	4798	394	409	15	4
C280-13	28	4730	366	374	8	2
C280-14	28	4665	341	363	22	6
C280-15	28	4688	350	353	3	1
C350-11	28	4930	456	457	1	0
C350-12	28	4951	466	459	-7	-2
C350-13	28	4999	491	496	5	1
C350-14	28	4948	465	472	7	2
C350-15	28	4926	454	474	20	4

En el modelo cuadrático con ecuación igual a: **R= 0.0002685v<sup>2</sup>-2.1457v+4510**, podemos constatar como el porcentaje residual máximo es igual a **+/- 13%** y la

diferencia de resistencias mayor es igual a **+/- 43 kg/cm<sup>2</sup>**, lo cual demuestra que es un **excelente modelo de predicción**.

#### **4.0.1. Ajuste de la gráfica más favorable mediante el método de los valores atípicos**

Con la finalidad de tener una gráfica más uniforme y a su vez desechar los datos que por alguna razón se disparan, ya sea por el mal manejo del equipo de medición o por un error en la lectura, en este apartado se procede a aplicar el método de los valores atípicos o **(Outlier)**, para ello aremos uso de una serie de herramientas estadísticas tales como mediana (Q2), cuartil1 (Q1) y cuartil3 (Q3).

Este método se aplicará tanto al porcentaje residual, así como a la diferencia entre la resistencia real y la resistencia estimada, **seleccionando de esta forma el valor atípico más desfavorable**.

A continuación, se mostrará una tabla con los valores de las diferencias de resistencias y los porcentajes residuales ordenados de menor a mayor, destacando en ellos la mediana, el cuartil1 y el cuartil3, para luego determinar el rango inter-cuartil y detectar los valores atípicos interiores y exteriores o lo que es igual, los valores atípicos leves y extremos.

TABLA 15: PORCENTAJES RESIDUALES Y DIFERENCIAS DE RESISTENCIAS ORDENADOS DE MENOR A MAYOR

DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
-40	-13
-24	-7
-15	-5
-14	-5
-12	-3
-9	-3
-8	-2
-7	-2
-7	-2
-5	-1
-4	-1
-3	-1
-2	-1
0	0
1	0
1	0
2	0
3	1
4	1
4	1
5	1
6	1
7	2
7	2
8	2
8	2
9	3
9	3
12	3
12	3
12	4
13	4
14	4
14	4
15	4
19	4
19	5
20	5
22	6
23	7
26	7
26	7
27	7
29	10
43	11

**TABLA 16: VALORES ATÍPICOS DIFERENCIA DE RESISTENCIA**

VALORES ATÍPICOS DIFERENCIA DE RESISTENCIA					
Q1	Q2	Q3	RANGO INTERCUARTIL	LIMITE INTERIOR	LIMITE EXTERIOR
-4	7	15	18	-31 @ 42	-59 @ 70
COEF. INT.	COEF. EXT.				
27	55				

Esta tabla muestra como el **límite interior** deja fuera dos valores, uno negativo **(-40)** y otro positivo **(43)**, por lo que pasan a ser considerados como **valores atípicos leve** y se desprecian al momento de crear el grafico velocidad de pulso vs resistencia para obtener mayor uniformidad del mismo.

**TABLA 17: VALORES ATÍPICOS PORCENTAJE RESIDUAL**

VALORES ATÍPICOS PORCENTAJE RESIDUAL					
Q1	Q2	Q3	RANGO INTERCUARTIL	LIMITE INTERIOR	LIMITE EXTERIOR
-1	2	4	5	-9 @ 12	-17 @ 20
COEF. INT.	COEF. EXT.				
8	16				

Esta tabla muestra como el **límite interior** deja fuera uno de los valores negativos **(-13)**, el cual coincide con el valor **-40** de la diferencia de resistencias por lo que pasa a ser considerado, nuevamente, como **valor atípico leve** y se desprecia al momento de crear el grafico velocidad de pulso vs resistencia para obtener mayor uniformidad del mismo.

En consecuencia, solo dos valores son descartados de la serie de datos obtenida la cual se muestra a continuación:

**TABLA 18: TABLA GENERAL CON VALORES ATÍPICOS A DESCARTAR**

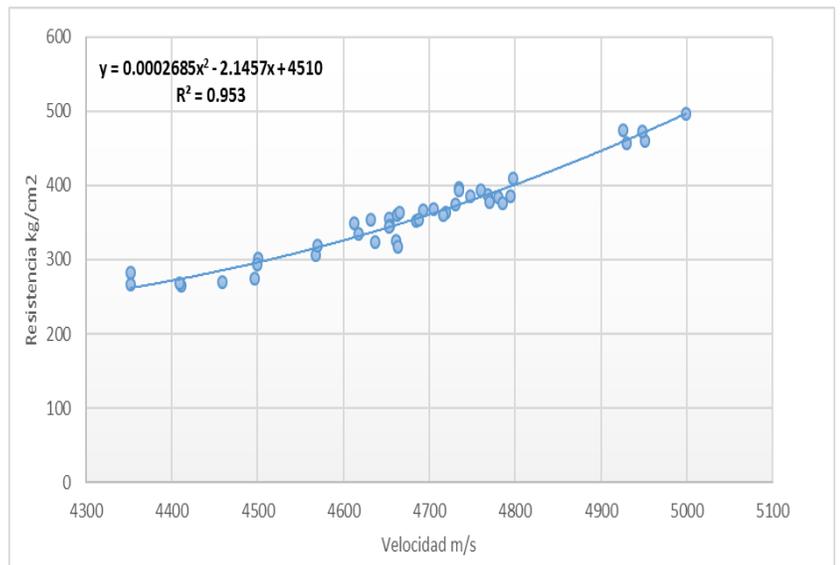
CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA REAL (kg/cm <sup>2</sup> )	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA	PORCENTAJE RESIDUAL (%)	OBSERVACIONES
C210-1	7	4568	311	307	-4	-1	Ok!
C210-2	7	4501	290	302	12	4	Ok!
C210-3	7	4499	289	293	4	1	Ok!
C210-4	7	4496	288	274	-14	-5	Ok!
C210-5	7	4570	310	319	9	3	Ok!
C280-1	7	4411	268	265	-2	-1	Ok!
C280-2	7	4409	267	268	1	0	Ok!
C280-3	7	4352	255	267	12	4	Ok!
C280-4	7	4459	279	270	-9	-3	Ok!
C280-5	7	4352	255	283	27	10	Ok!
C350-1	7	4685	349	352	4	1	Ok!
C350-2	7	4612	323	349	26	7	Ok!
C350-3	7	4653	337	356	19	5	Ok!
C350-4	7	4632	330	353	23	7	Ok!
C350-5	7	4719	362	363	2	0	Ok!
C210-6	14	4654	338	345	8	2	Ok!
C210-7	14	4662	340	360	19	5	Ok!
C210-8	14	4693	352	366	14	4	Ok!
C210-9	14	4653	337	344	7	2	Ok!
C210-10	14	4705	356	368	12	3	Ok!
C280-6	14	4618	325	334	9	3	Ok!
C280-7	14	4637	332	324	-8	-2	Ok!
<b>C280-8</b>	<b>14</b>	<b>4683</b>	<b>348</b>	<b>308</b>	<b>-40</b>	<b>-13</b>	<b>Atipico Leve</b>
C280-9	14	4661	340	325	-15	-5	Ok!
C280-10	14	4663	341	317	-24	-7	Ok!
C350-6	14	4768	381	387	6	1	Ok!
<b>C350-7</b>	<b>14</b>	<b>4693</b>	<b>352</b>	<b>395</b>	<b>43</b>	<b>11</b>	<b>Atipico Leve</b>
C350-8	14	4780	386	384	-3	-1	Ok!
C350-9	14	4734	368	396	29	7	Ok!
C350-10	14	4734	368	393	26	7	Ok!
C210-11	28	4760	378	392	14	4	Ok!
C210-12	28	4794	392	385	-7	-2	Ok!
C210-13	28	4748	373	386	13	3	Ok!
C210-14	28	4716	360	361	0	0	Ok!
C210-15	28	4770	382	378	-5	-1	Ok!
C280-11	28	4785	388	376	-12	-3	Ok!
C280-12	28	4798	394	409	15	4	Ok!
C280-13	28	4730	366	374	8	2	Ok!
C280-14	28	4665	341	363	22	6	Ok!
C280-15	28	4688	350	353	3	1	Ok!
C350-11	28	4930	456	457	1	0	Ok!
C350-12	28	4951	466	459	-7	-2	Ok!
C350-13	28	4999	491	496	5	1	Ok!
C350-14	28	4948	465	472	7	2	Ok!
C350-15	28	4926	454	474	20	4	Ok!

#### 4.0.2. Gráfica ajustada y tabla de resultados final

Al finalizar con el ajuste de la gráfica eliminando los valores atípicos podemos percibir como la gráfica adquiere una apariencia más uniforme y, por ende, podemos ver un mejor acoplamiento entre la línea de tendencia y la dispersión de puntos.

CÓDIGO	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
C210-1	4568	307
C210-2	4501	302
C210-3	4499	293
C210-4	4496	274
C210-5	4570	319
C280-1	4411	265
C280-2	4409	268
C280-3	4352	267
C280-4	4459	270
C280-5	4352	283
C350-1	4685	352
C350-2	4612	349
C350-3	4653	356
C350-4	4632	353
C350-5	4719	363
C210-6	4654	345
C210-7	4662	360
C210-8	4693	366
C210-9	4653	344
C210-10	4705	368
C280-6	4618	334
C280-7	4637	324
C280-9	4661	325
C280-10	4663	317
C350-6	4768	387
C350-8	4780	384
C350-9	4734	396
C350-10	4734	393
C210-11	4760	392
C210-12	4794	385
C210-13	4748	386
C210-14	4716	361
C210-15	4770	378
C280-11	4785	376
C280-12	4798	409
C280-13	4730	374
C280-14	4665	363
C280-15	4688	353
C350-11	4930	457
C350-12	4951	459

TABLA 19: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN



GRAFICA 12: VELOCIDAD DE PULSO VS RESISTENCIA A COMPRESIÓN

A continuación, se puede notar como en esta gráfica ya ajustada el  $r^2$  aumenta de **0.93** (antes de ajustar) a **0.95** (ajustada), un  $r^2$  que está **muy cercano a 1**, lo cual representa una predicción casi perfecta de la ecuación representativa.

GRAFICA 13: TABLA DE RESULTADOS FINAL

CÓDIGO	EDAD ENSAYO (días)	VELOCIDAD DE PULSO (m/s)	RESISTENCIA EST. (kg/cm <sup>2</sup> )	RESISTENCIA REAL (kg/cm <sup>2</sup> )	DIFERENCIA DE RESISTENCIA: REAL-ESTIMADA	PORCENTAJE RESIDUAL (%)
C210-1	7	4568	311	307	-4	-1
C210-2	7	4501	290	302	12	4
C210-3	7	4499	289	293	4	1
C210-4	7	4496	288	274	-14	-5
C210-5	7	4570	310	319	9	3
C280-1	7	4411	268	265	-2	-1
C280-2	7	4409	267	268	1	0
C280-3	7	4352	255	267	12	4
C280-4	7	4459	279	270	-9	-3
C280-5	7	4352	255	283	27	10
C350-1	7	4685	349	352	4	1
C350-2	7	4612	323	349	26	7
C350-3	7	4653	337	356	19	5
C350-4	7	4632	330	353	23	7
C350-5	7	4719	362	363	2	0
C210-6	14	4654	338	345	8	2
C210-7	14	4662	340	360	19	5
C210-8	14	4693	352	366	14	4
C210-9	14	4653	337	344	7	2
C210-10	14	4705	356	368	12	3
C280-6	14	4618	325	334	9	3
C280-7	14	4637	332	324	-8	-2
C280-9	14	4661	340	325	-15	-5
C280-10	14	4663	341	317	-24	-7
C350-6	14	4768	381	387	6	1
C350-8	14	4780	386	384	-3	-1
C350-9	14	4734	368	396	29	7
C350-10	14	4734	368	393	26	7
C210-11	28	4760	378	392	14	4
C210-12	28	4794	392	385	-7	-2
C210-13	28	4748	373	386	13	3
C210-14	28	4716	360	361	0	0
C210-15	28	4770	382	378	-5	-1
C280-11	28	4785	388	376	-12	-3
C280-12	28	4798	394	409	15	4
C280-13	28	4730	366	374	8	2
C280-14	28	4665	341	363	22	6
C280-15	28	4688	350	353	3	1
C350-11	28	4930	456	457	1	0
C350-12	28	4951	466	459	-7	-2
C350-13	28	4999	491	496	5	1
C350-14	28	4948	465	472	7	2
C350-15	28	4926	454	474	20	4

En la tabla de resultados final es evidente que el error porcentual más alto es de **+/- 10%**, error que es considerado casi despreciable al evaluar que **de 43 datos** solo uno llega a alcanzar un error de **+/-10%**, lo que equivale a **+/- 27 kg/cm<sup>2</sup>** de diferencia con referencia a la resistencia real obtenida, a partir de este error el que más se repite es el de **+/- 4%**, equivalente a **+/- 15 kg/cm<sup>2</sup>**, lo cual afianza aún más la efectividad del método ultrasónico.

Con todo esto se confirma que la correlación obtenida **presenta un alto grado de confiabilidad** con referencia a los datos obtenidos por el método a compresión simple, **confirmando otra de las hipótesis planteadas al principio.**

## 4.1. Conclusiones

Según los resultados de este trabajo y basándonos en los objetivos de investigación realizados al principio, tomando en cuenta los tres diseños de mezclas de mayor volumen despachado en la planta concretera Argos S.A, con tamaño máximo nominal del agregado grueso de  $\frac{3}{4}$  pulgada, se concluye lo siguiente:

- La **correlación encontrada resulto ser una herramienta de verificación de gran exactitud**, alcanzando un alto grado de confiabilidad con un  $r^2=0.953$  y un error porcentual máximo de  $\pm 10\%$ .
- Se demuestra que existe una relación directamente proporcional entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión simple del hormigón.
- Se confirma que cuanto mayor sea el tiempo de fraguado, mayor será la velocidad de ultrasonido.
- A pesar de que la práctica pone de manifiesto que la prueba no destructiva estudiada representa un instrumento muy útil para predecir la resistencia del concreto en estado endurecido con un alto grado de confiabilidad, en ningún caso puede reemplazar el ensayo de resistencia a compresión.

## 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar pruebas de ensayo de resistencia a compresión vs velocidad de ultrasonido con **resistencias menores a 260 kg/cm<sup>2</sup>**.
- Se sugiere aplicar un **Rebar Locator o Pacómetro** antes de realizar la prueba de ultrasonido para garantizar resultados coherentes.
- Se recomienda la aplicación conjunta del martillo de rebote (**esclerómetro**) y el método de ultrasonido.
- Se insta la realización de diseños de mezclas con **agregados gruesos** tanto de **menor tamaño** como de **mayor tamaño** al que se tiene en esta investigación.
- Se aconseja evaluar mezclas de hormigón con **agregados ígneos vs agregado calizo**.
- Se propone la evaluación tanto de un **mayor número de muestras** para garantizar mayor exactitud, como de **un mayor tiempo de curado** superior a 28 días.

### **4.3. Líneas futuras de investigaciones**

Con el objetivo de perfeccionar la correlación alcanzada, deseamos que el presente trabajo investigación se utilice como patrón para fomentar futuras investigaciones, las cuales complementen y optimicen el modelo de predicción ya definido.

Es por ello que se aconseja tomar en consideración los puntos que se detallan en lo adelante:

- Asociación entre el método del esclerómetro vs técnicas de ultrasonido para la evaluación de la resistencia a compresión del hormigón.
- Valoración de la influencia de presencia de vacíos en la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto.
- Detección y localización de fisuras, vacíos y porosidad en estructuras de concreto.
- Evaluación de la presencia del acero en la velocidad de pulso de ultrasonido a través del concreto.

## Bibliografía

1. ACI. "In-Place Methods to Estimate Concrete Strength" (Norma ACI 228.1R-03)
2. ACI. "Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures" (Norma ACI 228.2R-98)
3. ASTM. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field" (Norma ASTM C31).
4. ASTM. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory" (Norma ASTM C192).
5. ASTM. "Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete" (Norma ASTM C172).
6. ASTM. "Standard Specification for Concrete Aggregates" (Norma ASTM C33).
7. ASTM. "Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete" (Norma ASTM C1602).
8. ASTM. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" (Norma ASTM C39).
9. ASTM. "Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete" (Norma ASTM C138).
10. ASTM. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete" (Norma ASTM C597).
11. ASTM. "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete" (Norma ASTM C143).
12. ASTM. "Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete" (Norma ASTM C1064).

13. ASTM. "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete" (Norma ASTM C 42).
14. ASTM. "Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto" (Norma ASTM C 138).
15. ASTM. "Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds" (Norma ASTM C 873).
16. ASTM. "Standard Test Method for Bulk Density (&ldquo;Unit Weight&rdquo;) and Voids in Aggregate" (Norma ASTM C 29).
17. ASTM. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate" (Norma ASTM C 128).
18. ASTM. "Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate" (Norma ASTM C 127).
19. ASTM. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates" (Norma ASTM C 136).
20. ASTM. "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying" (Norma ASTM C 566).
21. Alcañiz Martinez, Jesus H. (2011), CHEQUEO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO, España.
22. CHAMBERS, J.M., CLEVELAND W.S., KLEINER B., and TUKEY, P.A. (1983). Graphical methods for data analysis. Duxbury Press, Boston, MA.

23. 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.
24. Edgardo Urtubey; Ricardo. Schiava; Miguel. Cárdenas. 2009. "Correlación de la resistencia a compresión entre rotura con prensa y ensayos de ultrasonido". 25. Humboldt. 1998. "Catálogo para ASTM C597 – Sistema de Ensayo de Velocidad de Pulso PUNDIT".
25. MALHOTRA V. M. (1985). "Non-destructive testing of concrete structures". International Atomic Energy Agency. Training course series No.17. Vienna, 2002. p. 44-46.
26. MALHOTRA V. M. Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002. p. 110.
27. MALHOTRA V. M. Nondestructive methods for testing concrete. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Septiembre, 2002.
28. PÉRTEGA DIAZ, S. y PITA FERNÁNDEZ, S. (2003). Determinación del tamaño muestral. Atención Primaria. Universidad de la Coruña.

## Anexos

TABLA: CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN

<b>Calidad del Concreto</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s)</b>
Excelente	>4570
Buena	De 3650 a 4570
Regular	De 3050 a 3650
Pobre	De 2130 a 3050
Muy pobre	<2130

TABLA: CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL

<b>Calidad del Concreto</b>	<b>Velocidad de Pulso Ultrasónico (m/s)</b>
Buena	>3000
Regular	De 2500 a 3000
Pobre	<2130

ILUSTRACIÓN: FICHA TECNICA ADICTIVO MASTER GLENIUM, BASF COMPANY.



The Chemical Company

3	03 30 00	Cast-in-Place Concrete
	03 40 00	Precast Concrete
4	03 70 00	Mass Concrete
	04 05 16	Masonry Grouting

# MasterGlenium® 3030

## Full-Range Water-Reducing Admixture

Formerly Glenium 3030 NS\*

### Description

MasterGlenium 3030 ready-to-use full-range water-reducing admixture is a patented new generation of admixture based on polycarboxylate chemistry. MasterGlenium 3030 admixture is very effective in producing concretes with different levels of workability including applications that require the use of self-consolidating concrete (SCC). MasterGlenium 3030 admixture meets ASTM C 494/C 494M requirements for Type A, water-reducing, and Type F, high-range water-reducing, admixtures.

### Applications

Recommended for use in:

- Concrete where high flowability, high-early and ultimate strengths and

### Features

- Dosage flexibility for normal, mid- and high-range water reduction
- Reduced water content for a given slump
- Produces cohesive and non-segregating concrete mixture
- Increased compressive strength and flexural strength performance at all ages
- Providing faster setting times and strength development
- Enhanced finishability and pumpability

### Benefits

- Providing economic benefits to the entire construction team through higher productivity and reduced variable costs

### Performance Characteristics

The dosage flexibility of MasterGlenium 3030 admixture allows it to be used as a normal, mid-range and high-range water reducer.

**Mixture Data:** 600 lb/yd<sup>3</sup> of Type I cement (360 kg/m<sup>3</sup>); slump, 8.5-9.25 in. (210-235 mm); non-air-entrained concrete; dosage rate adjusted to obtain 25-30% water reduction.



3	03 30 00	Cast in place Concrete
	03 40 00	Precast Concrete
	03 70 00	Mass Concrete

# MasterPolyheed® 843

## Mid-Range Water-Reducing Admixture

Polyheed® 843\*

### Description

All concrete where extended setting characteristics, and superior workability, and finishability qualities are desired, particularly in hot weather. MasterPolyheed 843 can be used for architectural or colored concrete.

MasterPolyheed 843 admixture meets ASTM C 494 for retarding Type B admixtures, Type A for water-reducing admixture and Type D for water reducing and retarding admixtures.

### Applications

- Any concrete where extended setting characteristics, and superior workability, and finishability qualities are desired, particularly in hot weather.

### Description

- A mid range water reducer (5 a 15%) and excellent performance through a wide range of mid-range slump, particularly in 6 to 8 in (150 a 200 mm) slump in concrete placement.
- Extended setting time throughout the recommended dosage.
- Improved workability, pumpability and finishability, even in concrete mixes containing reduced amount of cementitious materials and/or concrete mixes containing fly ashes.
- Development of comparable compressive strength to that of the water-reducing and retarding admixtures
- Better performance with wide range types of cements, fly ashes, slag and aggregates

### Benefits

- Superior workability and pumpability in warm weather applications
- Reduced bleeding and slump
- Improves finishability in flat, formed or extruded surfaces.
- Consistent performance in concrete mixes with low, mid-range of 6 to 8 in (150 to 200 mm) and high concrete slumps.

### Performance Characteristics

**Mixture data: 716 lb (325 kg) of cement Type I by ft<sup>3</sup> . Slump of 6.4 in (165.0 mm), non-airentrained concrete. Concrete temperature 86 °F (30 °C), ambient temperature 90 °F (32 °C).**

### Technical Data

**Setting Time.**

**ILUSTRACIÓN: MEDICIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL AGREGADO GRUESO ÍGNEO Y CALIZO, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: MEDICIÓN TEMPERATURA, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: ELABORACIÓN DE PROBETAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: EXTRACCIÓN DE PROBETAS DE LOS MOLDES, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: INSTRUCCIÓN DE MEDICIÓN, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: COLOCACIÓN DE ACOPLANTE, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: CONO DE ABRAMS P. REVENIMIENTO, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: PRUEBA DE SLUMP, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: MEDICIÓN DE FLUIDEZ DEL CONCRETO, FUENTE PROPIA.**



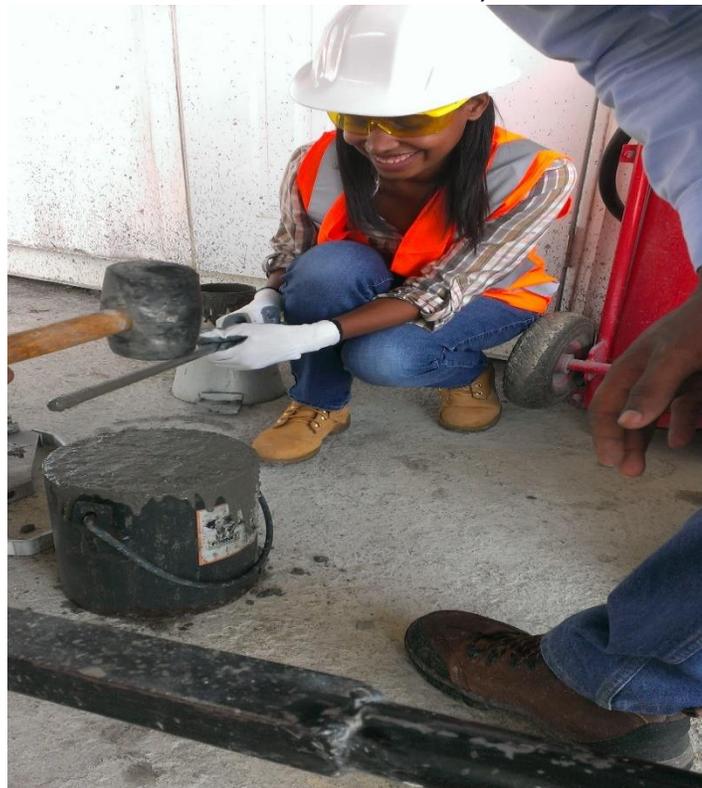
**ILUSTRACIÓN: CARGA DE LA MEZCLA, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: LLENADO DE PROBETAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: PRUEBA PESO VOLUMÉTRICO, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: PESADO DE PROBETAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: CALIBRACIÓN MAQUINA HIDRÁULICA DE COMPRESIÓN, FUENTE PROPIA.**



ILUSTRACIÓN: PRUEBA DE ULTRASONIDO, FUENTE PROPIA.



ILUSTRACIÓN: CALIBRACIÓN DEL EQUIPO, FUENTE PROPIA.



ILUSTRACIÓN: ADECUACIÓN Y MARCADO DE PROBETAS, FUENTE PROPIA.



ILUSTRACIÓN: CARGA DE COMPRESIÓN, FUENTE PROPIA.

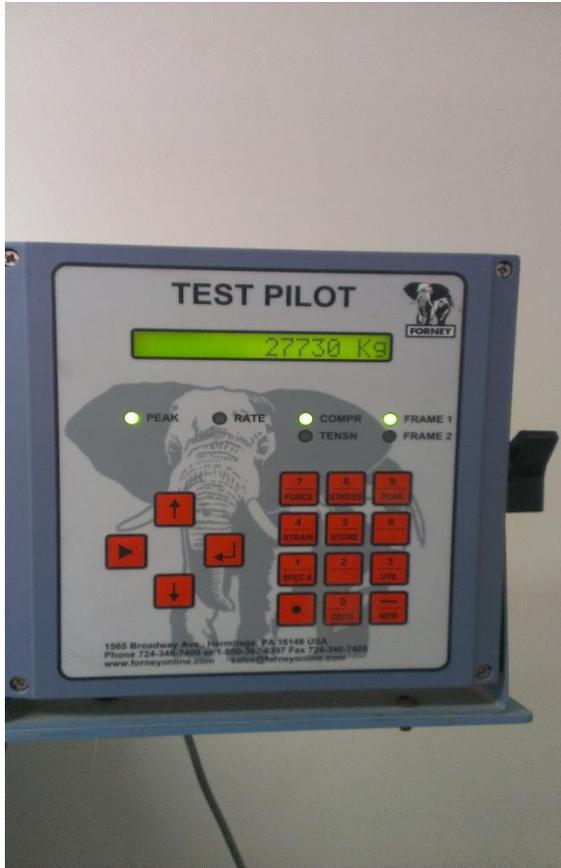


ILUSTRACIÓN: COLOCACIÓN DE ACOPLANTE, FUENTE PROPIA.



ILUSTRACIÓN: TIEMPO DE TRANS. Y VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO.



**ILUSTRACIÓN: ROTURA DE PROBETAS, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: INVESTIGADORES, FUENTE PROPIA.**



**ILUSTRACIÓN: INVESTIGADORES Y PERSONAL DE COLABORACIÓN, FUENTE PROPIA.**

