

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR PATRONES DE CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO SIMPLE

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

Gabriela Valencia Elguera

Miguel Angel Ibarra Navarro

ASESOR: Enrique Pasquel Carbajal

Lima, Diciembre del 2013

DEDICATORIA

A mis padres, Margarita y Washington, y a mi futuro esposo Jorge Luis, quienes siempre me mantuvieron motivada para culminar este desafío.

A todos aquellos con espíritu de investigación.

Gabriela Valencia Elguera

A mis dos madres Maritza y Rosario por su paciencia y empuje a terminar lo ya comenzado y a mi hija María Fernanda por ser un motor en el día a día.

Miguel Ibarra Navarro

AGRADECIMIENTOS

Deseamos reconocer todo el apoyo recibido de la empresa UNIÓN DE CONCRETERAS S.A. (UNICON) y agradecer al personal técnico y profesional que de diversas formas estuvieron involucrados en el desarrollo de esta tesis, especialmente a nuestro asesor el ingeniero Enrique Pasquel Carbajal y al ingeniero Daniel Torrealva Dávila.

RESUMEN

Debido al crecimiento continuo del consumo de concreto como material de construcción, resulta de ayuda contar con métodos de evaluación no destructivos que, de manera sencilla y rápida, permitan caracterizar una estructura de concreto en términos de Resistencia a Compresión; en función de ello la presente investigación propone el Ensayo de Ultrasonido para la estimación de dicho parámetro, basándose en un modelo de aproximación que correlacione la Resistencia a Compresión con la Velocidad de Pulso Ultrasónico, con un grado de confiabilidad asociado. La idea es realizar un control de calidad permanente in situ, que permita la continuidad correcta de labores y/o evitar retrabajos probablemente costosos, en resumen, generar ahorros para la industria de la construcción.

El trabajo experimental desarrollado comienza en Laboratorio con la preparación, muestreo y control de seis diseños patrón de concreto, para los cuales se establece algunas variables de estudio: la relación Agua/Cemento y el tamaño del agregado (representado por el Huso del mismo). La siguiente etapa importante se realiza a Escala Industrial, para ello se hace una selección, muestreo y control de las mezclas de producción que son de mayor consumo en el entorno de la construcción de Lima, considerando que el rango de resistencias a compresión es similar al del trabajo en Laboratorio. Con los resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de Resistencia a Compresión, obtenidos de ensayos en estado endurecido para ambas etapas (Laboratorio y Escala Industrial), se establecen relaciones y se realiza un análisis de confiabilidad, a fin de determinar ecuaciones de tendencia que se ajusten al comportamiento de los concretos. Finalmente, identificando la relación Agua/Cemento y el Huso del agregado, se evalúan los márgenes de error al simular estimaciones de la Resistencia a Compresión con las ecuaciones establecidas, observando en qué medida se presentan los casos de sobreestimación o subestimación.

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN</u>	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Específico	3
1.2.2 Objetivos Generales	3
<u>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</u>	4
2.1 Ensayos en el concreto	4
2.1.1 Ensayos en el concreto en estado fresco	4
2.1.2 Ensayos en el concreto en estado endurecido	6
A) Ensayos destructivos en el concreto	6
B) Ensayos no destructivos en el concreto	6
2.2 Ensayos materia de la investigación	7
2.2.1 Ensayo de Resistencia a Compresión	8
2.2.2 Ensayo de Ultrasonido	12
2.3 Antecedentes del Ensayo de Ultrasonido	18
<u>CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL ESTUDIO</u>	21
3.1 Identificación de variables	21
3.2 Hipótesis de la investigación	21
3.3 Condiciones de borde	22
3.4 Planeamiento y programa del trabajo experimental	24
<u>CAPÍTULO 4: RECURSOS PARA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS</u>	25
4.1 Insumos para mezclas de concreto	25
4.2 Equipo de ultrasonido	27
4.3 Equipos, instrumentos y herramientas complementarios	31

<u>CAPITULO 5: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS</u>	32
5.1 Etapa Inicial - Ensayo Preliminar	32
5.1.1 Planificación	32
5.1.2 Desarrollo	34
5.1.3 Resultados	35
5.2 Etapa I - Ensayo en Laboratorio	38
5.2.1 Planificación	38
5.2.2 Desarrollo	40
5.2.3 Resultados	44
5.3 Etapa II - Ensayo a Escala Industrial	49
5.3.1 Planificación	49
5.3.2 Desarrollo	49
5.3.3 Resultados	53
<u>CAPÍTULO 6: ANÁLISIS</u>	56
6.1 Evaluación del Valor de Confiabilidad	56
6.1.1 Muestra	57
6.1.2 Selección de datos	58
6.1.3 Determinación del modelo de ajuste de tendencias	59
A) Análisis con Resultados de Ensayo en Laboratorio	60
B) Análisis con Resultados de Ensayo a Escala Industrial	62
C) Análisis con Integración de Resultados de Ensayos en Laboratorio y a Escala Industrial	64
6.2 Obtención de los Porcentajes Residuales	66
6.2.1 Análisis con Modelo de Aproximación Exponencial	68
6.2.2 Análisis con Modelo de Aproximación Cúbica	73
6.2.3 Sobrevaloración y Subvaloración	78
6.2.4 Porcentajes Residuales máximos	80
<u>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	82
<u>CAPÍTULO 8: LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</u>	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS	90

CAPITULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde hace más de una década la construcción en el Perú resulta ser uno de los sectores productivos que impulsa considerablemente la economía nacional, es uno de los principales aportantes al Producto Bruto Interno (PBI). En las estadísticas se observa un crecimiento sostenido, los indicadores de control lo expresan claramente, tal como: el *Consumo Interno de Cemento*, este incrementó 298% en los últimos 12 años (en referencia a la Gráfica 1.01).

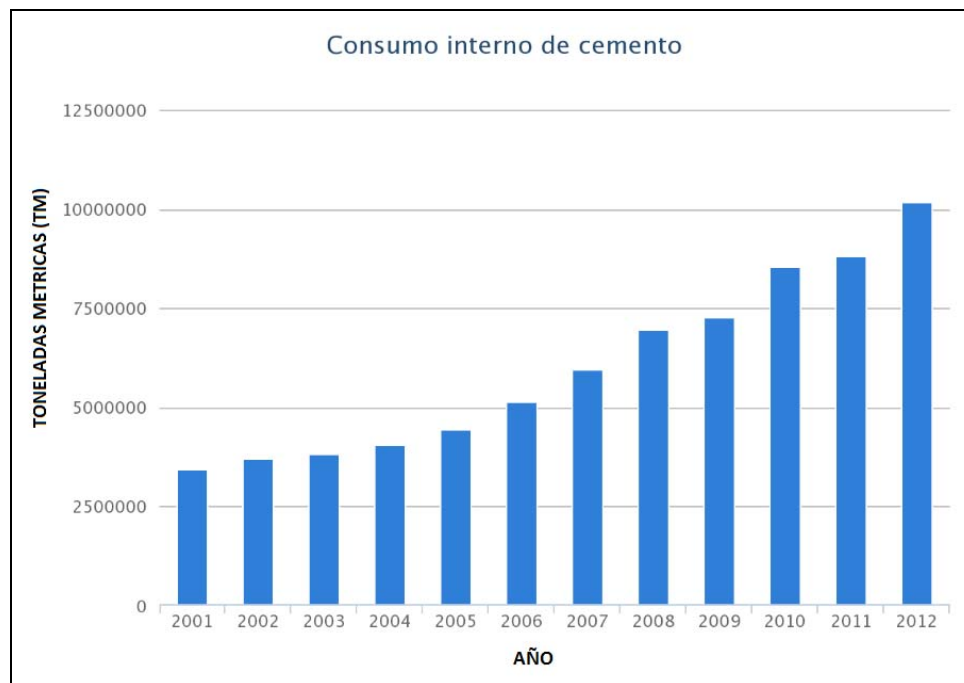
Esta tendencia explica la mayor demanda del uso del concreto (con el cemento como insumo imprescindible), la cual está influenciada por la valoración de este material como uno de los que mejores cualidades tiene al hacer una estructura: resistencia, durabilidad y versatilidad para construir. En cuanto a costo/beneficio es el que, con un proceso estándar de fabricación y aplicación, ofrece mayor seguridad entre los materiales tradicionalmente usados y será más accesible mientras más avances tecnológicos se den en torno a él.

De la misma manera, en los últimos tiempos se puede apreciar que una parte, cada vez más importante, de los gastos para ejecutar un proyecto de construcción, se destinan a reconstrucción, reparación y/o mantenimiento de edificaciones, a fin de corregir los defectos que ponen en riesgo la seguridad de los ocupantes; ante esta situación los ensayos no destructivos en general juegan un papel importante en el control de calidad y para obtener información, sin alterar la estructura, concerniente al grado de deterioro, durabilidad, estado de corrosión de armaduras y resistencia de materiales (entre los cuales principalmente tenemos al concreto).

En ese sentido, esta investigación pretende efectuar una contribución práctica a la comunidad relacionada con la tecnología del concreto, atendiendo la necesidad de optimizar un ensayo poco conocido y de definir su grado de confiabilidad: el Ensayo de Ultrasonido; a fin de lograr aplicaciones de control de calidad in situ en correlación al ensayo de Resistencia a Compresión, lo cual permitiría estimar rápidamente la característica más importante de este material.

Se propone el Ensayo de Ultrasonido para control de calidad en obra, en complemento al clásico ensayo destructivo de Resistencia a Compresión efectuado bajo un proceso estándar. La idea sería contar con una tecnología práctica además de amigable con el planeta, dado que permite infinitas repeticiones y técnicamente no genera residuos ni emplea químicos.

Gráfica 1.01: Crecimiento sostenido del Consumo Interno de Cemento en el Perú (Fuente: INEI)



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

El objetivo de esta tesis es realizar un estudio que nos permita, con cierto grado de confiabilidad, hallar patrones de comportamiento entre los resultados del Ensayo de Ultrasonido y del Ensayo de Resistencia a Compresión en elementos de concreto simple, evaluando las resistencias de diseño de los concretos más comerciales en nuestro medio.

1.2.2 OBJETIVOS GENERALES

- Determinar la influencia del tamaño nominal del agregado grueso (Huso 57 y el Huso 67) en la Velocidad de Pulso Ultrasónico.
- Determinar la influencia de la relación Agua/Cemento (0.50, 0.70 y 0.90) en la Velocidad de Pulso ultrasónico.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ENSAYOS EN EL CONCRETO

El concreto es un material importante para la construcción, debido a ello es necesario determinar su calidad y buen comportamiento frente a cargas de diseño y durante los procesos constructivos, por lo cual normalmente se le efectúan diversos ensayos de control cuando está en estado fresco y endurecido.

2.1.1 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Estos ensayos son esenciales para monitorear las características iniciales del concreto y el efecto que tienen los insumos en la mezcla final, de esta manera se controla su puesta en servicio. También aplica para la verificación de una mezcla de diseño o de una muestra de investigación. El tiempo para efectuar los ensayos de rutina no debe exceder de 15 minutos desde la toma de la muestra representativa, entre ellos tenemos los siguientes:

Ensayo para la medición del asentamiento (ASTM C143):

Este ensayo es el método más usado para medir la consistencia del concreto, aunque no mide todos los factores que contribuyen a la trabajabilidad, de todos modos es usado convenientemente como una prueba de control dado que ofrece una indicación de la uniformidad de la mezcla.

Bajo condiciones de laboratorio con estricto control de todos los materiales del concreto (en ausencia de aditivos plastificantes), el asentamiento está vinculado proporcionalmente al contenido de agua que tiene la mezcla y por lo tanto está inversamente relacionado con la resistencia del concreto.

Para este ensayo se utiliza el cono de Abrams y el tiempo de evaluación no debe ser mayor a 2.5 minutos de realizado el muestreo la mezcla. La consistencia del concreto se establece 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.

Ensayo para determinar el peso unitario y densidad (ASTM C138):

Este ensayo sirve para determinar el peso unitario y el rendimiento de la mezcla. Para realizar este ensayo se utiliza un molde rígido el cual se rellena y compacta metódicamente, se determina la masa de concreto restando la masa del molde de la masa total; para obtener la densidad se divide la masa del concreto 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 aceptables.

Ensayo para determinar el contenido de aire (ASTM C138):

Este ensayo determina la cantidad de aire que puede contener el concreto recién mezclado, excluyendo cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados, el control del contenido del aire entrampado es importante, debido a que un incremento relevante del mismo se traduce en una disminución de la resistencia por el aumento de vacíos en el mortero.

Ensayo para determinar la temperatura (ASTM C1064):

Este ensayo cumple con la finalidad de examinar la temperatura del concreto recién mezclado, puede usarse para verificar que dicho concreto satisfaga requerimientos específicos de temperatura; es importante realizar este control debido a que condiciona la velocidad del proceso de endurecimiento inicial del concreto, la cual es influenciada por la temperatura ambiente y calor específico de los materiales constituyentes; a mayor temperatura durante el muestreo mayor será la resistencia inicial y también el efecto de contracción, disminuyendo posiblemente la resistencia a largo plazo.

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

2.1.2 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Estos ensayos se efectúan para determinar la resistencia y/u otros parámetros de calidad mediante pruebas estándar efectuadas a probetas de concreto fraguadas o a especímenes extraídos de un elemento de concreto, los cuales pueden ser obtenidos en obra o en alguna evaluación realizada en laboratorio. Se clasifican en:

A) ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO:

Son pruebas realizadas sobre testigos de concreto que permiten determinar, generalmente de forma directa, ciertas propiedades inherentes al material, produciendo en ellos una alteración irreversible de su geometría dimensional y/o de su composición química. Se tiene por ejemplo:

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

B) ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO:

Son métodos que permiten inspeccionar o comprobar determinadas propiedades del concreto endurecido, sin afectar de forma permanente sus dimensiones, características de servicio, propiedades físicas, químicas o mecánicas.

Cada método tiene ventajas y limitaciones, en general los ensayos no destructivos proveen datos no muy exactos acerca del estado de la variable a evaluar a comparación de los ensayos destructivos, por lo cual es conveniente complementar los resultados de ensayos no destructivos con datos provenientes de ensayos destructivos; sin embargo, suelen ser más

económicos ya que no implican la destrucción del elemento evaluado y algunos de ellos permiten hacer más de una repetición.

La aplicación de los métodos de ensayos no destructivos se encuentra resumida en los siguientes grupos:

Defectología: Detección de discontinuidades, deterioro por agentes ambientales, actividad corrosiva del acero de refuerzo, etc.

Caracterización: Evaluación de características químicas, estructurales, mecánicas, físicas, etc.

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

Hay distintos métodos de ensayos no destructivos para concreto, cada uno de ellos depende del parámetro que se desee controlar y las condiciones bajo las cuales se realice el ensayo, entre estos métodos tenemos:

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

2.2 ENSAYOS MATERIA DE LA INVESTIGACIÓN

Los ensayos en el concreto endurecido que son de especial interés para realizar la presente investigación son: el Ensayo de Resistencia a Compresión (Ensayo Destructivo - ED) y el Ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico (Ensayo No Destructivo - END).

2.2.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Normas

ASTM C39 - Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto

NTP 339.034 - Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas

Definición

“Consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta”.

El parámetro obtenido es una propiedad principalmente física y es frecuentemente usado en el diseño de estructuras, se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²) o en megapascales (MPa).

Importancia

Los resultados de las pruebas de Resistencia a Compresión se emplean fundamentalmente para verificar que la mezcla del concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada (f_c) en la definición del proyecto.

También se puede utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia en elementos estructurales que permitan definir la programación de los siguientes procesos constructivos en la ejecución de una obra (remoción de encofrados, puntales, etc.).

Equipo

La máquina de ensayo deberá tener capacidad conveniente, debe ser operada por energía (no manual) y debe permitir una velocidad de carga sobre la probeta de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, de forma continua sin intermitencia ni detenimiento.

La máquina de ensayo será equipada con dos bloques de acero con caras resistentes, uno de los cuales se asentará sobre una rótula, que le permita acomodarse a la parte superior de la probeta, y el otro se apoya sobre una sólida base en el que se asienta la parte inferior de la misma. Las caras de los bloques serán paralelas durante el ensayo y deben tener una dimensión mínima de al menos 3% mayor que el diámetro de las probetas a ser ensayadas.

Especímenes para ensayo

El ensayo se puede realizar 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.
- Especímenes extraídos o aserrados de una estructura de concreto endurecido, de acuerdo con la ASTM C42.
- Especímenes producidos con moldes de cilindros colocados in situ (embebidos en la estructura), de acuerdo con la ASTM C873.

Procedimiento de ensayo

En el caso de probetas cilíndricas, curadas y moldeadas, se pueden tener dimensiones de 6" x 12" o 4" x 8", las probetas más pequeñas suelen ser más fáciles de manipular en el campo y en laboratorio, el diámetro de la probeta a utilizar debe ser como mínimo 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado utilizado en la preparación del concreto.

Según la ASTM C39 y la NTP 339.034 las probetas deben ser ensayadas tan pronto como sea práctico luego de ser retiradas de la condición de curado, es decir, se ensayarán en condiciones húmedas superficialmente secas.

Medir el diámetro de la probeta 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 calcular el área de la sección.

Antes de colocar la probeta entre los cabezales de la máquina de ensayo, se limpiarán las caras de contacto de los bloques de acero, superior e inferior, y las de la probeta, evaluar si es conveniente aplicar capping, refrentado o usar pads de neopreno. Se alinearán los ejes de la probeta a ensayar con el centro de empuje de la máquina a manera de evitar excentricidades.

Verificar que el indicador de carga de la maquina esté en cero, de no ser así se deberá ajustar. Luego aplicar la carga de manera continua y uniforme, hasta el momento de la falla de la probeta, por último registrar el tipo de falla y la carga máxima soportada por la probeta antes de fracturarse.

Calcular la Resistencia a Compresión (R) dividiendo la carga máxima entre el área promedio de la sección.

Consideraciones en el ensayo

Registrar como dato la edad de la probeta a ensayar, la cual es la diferencia entre la fecha de ensayo y la fecha de elaboración. Para la hora de ensayo considerar las siguientes tolerancias:

Tabla 2.01: Tolerancia Permisible para tiempo de curado y hora de ensayo

Edad de ensayo de resistencia a compresión	Tolerancia permisible
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%

Para probetas de dimensiones 6" x 12" se tomará como valor de resistencia de un determinado diseño de mezcla el promedio del resultado de 2 probetas y para las dimensiones de 4" x 8" el promedio del correspondiente a 3 probetas, tomar en cuenta el porcentaje de dispersión máximo a controlar para cada caso:

Tabla 2.02: Porcentaje de dispersión máxima

	Coeficiente de Variación	Rango aceptable de Resistencias individuales por Cilindro	
6" x 12" (150mm x 300mm)			
Condiciones de laboratorio	2.4 %	6.6 %	7.8 %
Condiciones de campo	2.9 %	8.0 %	9.5 %
4" x 8" (100mm x 200mm)			
Condiciones de laboratorio	3.2 %	9.0 %	10.6 %

Principales fuentes de variación

Considerar la influencia de las fuentes de variación en los resultados de Resistencia a Compresión:

Tabla 2.03: Fuentes de variación de la Resistencia a Compresión

Debido a variaciones en las propiedades del concreto	Debido a deficiencias en los métodos de prueba
<ul style="list-style-type: none"> 1) Cambios en la relación Agua/Cemento <ul style="list-style-type: none"> a) Control deficiente de la cantidad de agua. b) Variación excesiva de humedad en los agregados. c) Agua adicional al pie de obra. 2) Variación en los requerimientos de agua de mezcla. <ul style="list-style-type: none"> a) Gradación de los agregados, absorción y forma. b) Características del Cemento y Aditivos. c) Contenido de aire. d) Tiempo de suministro y temperatura. 3) Variaciones en las características y proporciones de los insumos. <ul style="list-style-type: none"> a) Agregados. b) Cemento. c) Puzolanas. d) Aditivos. 4) Variaciones ocasionadas por el transporte, colocación y compactación. 5) Variaciones en la temperatura y curado. 	<ul style="list-style-type: none"> 1) Procedimientos de muestreo inadecuados. 2) Dispersiones debidas a las formas de preparación manipuleo y curado de cilindros de prueba. 3) Mala calidad de los molde para cilindros de prueba. 4) Defectos de curado : <ul style="list-style-type: none"> a) Variaciones de temperatura. b) Humedad Variable. c) Demoras en el transporte de los cilindros al laboratorio. 5) Procedimientos de ensayo deficientes. <ul style="list-style-type: none"> a) En el refrendado (capping) de los cilindros. b) En el ensayo de compresión.

2.2.2 ENSAYO DE ULTRASONIDO

Norma

ASTM C597 - Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto

Definición

Este método de ensayo consiste en determinar la velocidad de pulso ultrasónico a partir de la generación de pulsos de ondas de tensión longitudinal emitidos por un transductor electro-acústico que se mantiene en contacto con la superficie del

concreto bajo prueba. Después de recorrer a través el espécimen de concreto, estos pulsos son recibidos y convertidos en energía eléctrica por un segundo transductor situado a una distancia (L) de la transmisión del primer transductor; el tiempo de tránsito (T) se mide electrónicamente y la velocidad del pulso ultrasónico (V) se puede establecer dividiendo L entre T.

El parámetro obtenido (V) está asociado a las propiedades del concreto y su densidad, por lo mismo permite predecir el estado de calidad del mismo en estado endurecido; se expresa en metros por segundos (m/s).

Importancia

Este método se puede usar principalmente para pruebas de control de calidad e inspección in situ en estructuras de concreto; como indica la ficha técnica de un proveedor del equipo: “El sistema es ideal para revisar la uniformidad del concreto, cavidades, fisuras o defectos por hielo-deshielo o fuego, como también para la determinación de resistencias”. Este método como ensayo no destructivo resulta útil por su simplicidad, versatilidad y repetibilidad.

Equipo

Las partes del mismo están constituidas por las siguientes características:

Generador de pulso eléctrico – Transductor transmisor

El generador de pulso consiste en un circuito para producir 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 producir las pulsaciones en forma repetitiva 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 generado debe ser amplificado tanto como sea necesario, para producir pulsaciones que se detecten en el circuito medidor de tiempo. El amplificador tendrá una respuesta clara entre la mitad y tres veces la frecuencia de resonancia del transductor receptor.

Los transductores

Los transductores, emisor y receptor, pueden ser construidos 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 los pulsos de disparo asociados deberán estar en condiciones de ofrecer una precisión de tiempo de medición de al menos 1 μ s y deben ser insensibles a una temperatura de funcionamiento que oscile entre 0 y 40 °C. La medición debe iniciarse mediante una descarga de voltaje procedente del generador de pulsos, y operar repetitivamente con la misma frecuencia. El circuito medidor de tiempo debe estar provisto de una salida acoplada a una unidad de respuesta de tiempo, esta se utiliza para determinar el tiempo de tránsito que se muestra en la pantalla del equipo.

Unidad de pantalla

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

Barra Calibradora

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

Cables de conexión

En el caso de necesitar cables de conexión muy largos se recomienda usar cables coaxiales blindados de baja capacitancia.

Agente de Acoplamiento

Su función es eliminar el aire entre la superficie de contacto de los transductores y la del concreto, ya que las frecuencias que se aplican en el concreto no se

transmiten en el aire, de esta manera se asegura la transferencia eficaz de la energía entre el concreto y los transductores.

Para este fin normalmente se utilizan materiales viscosos tales como: vaselina, gel soluble en agua, goma moldeable, petróleo en gel o grasas; en algunas referencias se menciona que incluso el agua puede cumplir este papel, de acuerdo al estado de las superficies en contacto.

Especímenes para ensayo

Se puede aplicar en las presentaciones usuales del concreto en estado endurecido (testigos, elementos estructurales, etc.), siempre que se tome en cuenta los siguientes criterios para la selección de los puntos de evaluación:

- Antes de realizar el ensayo es necesario efectuar un reconocimiento visual de los puntos que se van a evaluar, con el fin de evaluar la rugosidad de la superficie, la presencia de huecos, fisuras u otras características que podrían afectar la prueba.
- Cuando la superficie es rugosa es necesario lijarla y nivelarla, con el fin de evitar que los transductores obtengan una señal defectuosa.
- Es conveniente evitar la presencia cercana de las barras de acero de refuerzo dado que influirá en la medición.
- Al hacer la evaluación en una estructura el aspecto más importante 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 obtener un juicio acerca de la calidad del concreto.

Considerando las recomendaciones anteriores, la selección de los puntos de evaluación debe hacerse de preferencia en forma aleatoria a fin de obtener una muestra representativa de resultados.

Tipos de medición

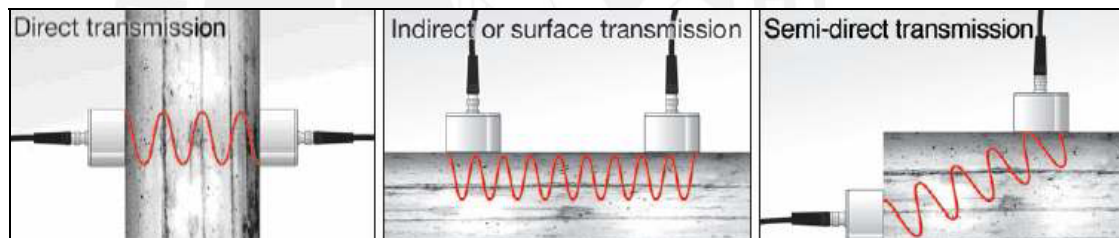
Existen tres técnicas de medición para realizar el ensayo de ultrasonido:

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

Medición indirecta: se aplica en la misma cara (considerando 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 usualmente tienen la influencia de la capa de concreto cercana a la superficie, que no serán representativas del concreto en estratos más profundos. Además la longitud de trayectoria está menos definida y no resulta satisfactorio tomarla como la distancia de centro a centro de los transductores (existen algunos métodos para corregir los resultados).

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

Imagen 2.01: Técnicas de medición para aplicar el ensayo de ultrasonido



Procedimiento de ensayo

Control de funcionamiento del equipo con barra calibradora

Aplicar agente de acoplamiento en los extremos de la barra calibradora y las superficies de contacto de los transductores, una vez que el equipo está energizado, presionar los transductores con firmeza 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 realizar el ajuste al cero de referencia, esto sucede cuando el tiempo de tránsito mostrado se hace coincidir con el valor marcado en la barra calibradora.

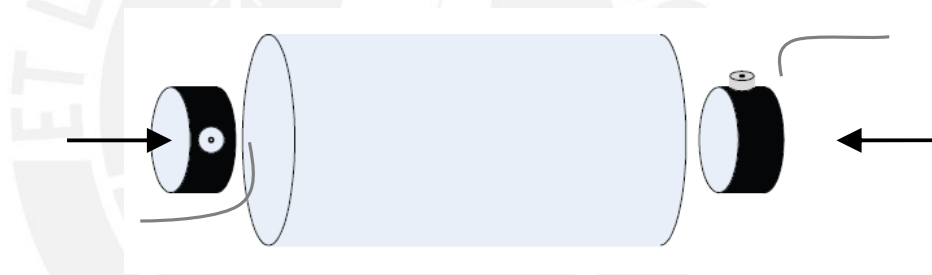
Durante operación continua del instrumento se debe verificar el ajuste a “tiempo cero”, principalmente cada vez que el transductor y/o cables de conexión se cambien.

Si el tiempo mostrado no puede ser ajustado con el tiempo marcado en la barra es mejor no utilizar el equipo y verificar con el fabricante del mismo la correcta calibración.

Determinación del tiempo de tránsito (medición directa)

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

Imagen 2.02: Técnica de medición directa sobre probeta cilíndrica



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

La longitud de camino es la distancia en línea recta entre los centros de las caras de los transductores, se debe obtener de la forma más precisa dado que la exactitud de la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico se rige también por la precisión de esta, considerar que al usar el método de medición directa la transferencia de energía entre los transductores está en su máximo potencial.

Es conveniente repetir las mediciones en el punto de evaluación, estas deben hacerse en el mismo lugar para reducir al mínimo las lecturas erróneas debido a acoplamientos pobres.

Finalmente la velocidad de pulso ultrasónico (V) se calcula dividiendo la longitud de camino (L) entre el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico (T).

Ventajas y desventajas

Del ensayo

Este método de ensayo es aplicable para evaluar de forma rápida y sencilla la uniformidad y calidad relativa del concreto, una ventaja importante es su repetibilidad infinita. La precisión de la medición depende en gran parte de la capacidad del operador para determinar con exactitud la distancia entre los transductores y del estado de los equipos para medir precisamente el tiempo de tránsito del pulso. Una desventaja a señalar es que los resultados son muy sensibles a: diferentes condiciones de humedad, presencia de otros elementos cercanos de material distinto al concreto, longitud del recorrido de la onda y calidad de acoplamiento entre la superficie del elemento evaluado y la de los transductores.

Del equipo

Como ventaja podemos mencionar su poco peso, fácil uso y manejo. Como desventaja cabe resaltar que los cables transmisores en ocasiones presentan falsos contactos debido al exceso de movimiento, con lo cual se dificulta efectuar las lecturas.

2.3 ANTECEDENTES DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

Para el desarrollo de esta tesis se tiene algunos precedentes con origen en el extranjero, muy poco se ha desarrollado en Perú.

Investigaciones anteriores

Diversos especialistas en concreto se han interesado por décadas en la determinación de las propiedades de este material. A partir de 1930 se aceleró la investigación en ensayos no destructivos y surgieron métodos de prueba para muestras de laboratorio utilizando técnicas de vibración. Powers, Obert, Hernibrook, y Thomson fueron los primeros en llevar a cabo una amplia investigación empleando estas técnicas, tal como el método de frecuencia de resonancia.

El primer informe de la medición de la velocidad de los pulsos generados mecánicamente a través del concreto apareció en los EE.UU. a mediados de la década de 1940. Se encontró que la velocidad depende principalmente de las propiedades elásticas del material y era casi independiente de la geometría. El valor potencial de este enfoque era evidente, pero los problemas de medición eran considerables.

La medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva, para evaluar la calidad del concreto, se ha utilizado desde el año 1950 aproximadamente. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman (Canadá) y se utilizó con gran éxito desde la década de 1960 para diagnosticar el estado del concreto en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones (Inglaterra) desarrolló una técnica basada en el mismo principio: transductores electroacústicos, que ofrecían un mayor control sobre el tipo y la frecuencia de los pulsos generados, este tipo de pruebas ha sido convertido en el método moderno de ultrasonido.

En muchos países se han realizado estudios de correlación con la intención de obtener modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto en base a la velocidad ultrasónica (Anderson y Seals en 1981; Sturup et al. en 1984 para el ACI). De los estudios realizados en Canadá, Malhotra en 1985, publicó un criterio de aceptación 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 estudió la correlación entre la velocidad y la resistencia utilizando concretos preparados con agregados de propiedades físicas promedio, respecto a la variabilidad que se da en Yucatán. Solís et al. (México) posteriormente en el año 2003 obtuvo una curva de regresión exponencial como mejor ajuste para concretos preparados con diferentes muestras de agregados calizos triturados, que se escogieron entre los más utilizados en la misma región de Yucatán.

De igual forma Urtubey, E. et al. en el 2009 (Argentina), realizó un trabajo práctico con materiales de la región 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 un estudio 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 además de Agraval y otros.

Como resultado de estas menciones se han obtenido modelos diferentes, debido principalmente al carácter compuesto del material, por lo mismo se hace necesario realizar estudios particulares tomando en cuenta el tipo de agregados que se utilizan en la región donde se desee aplicar la investigación.

Este tipo de ensayos en concreto actualmente se basan, en gran medida, en las mediciones del tiempo de transmisión del pulso ultrasónico utilizando técnicas de transmisión; el método ha sido ampliamente aceptado en todo el mundo y a la fecha se producen comercialmente equipos fuertes y ligeros, adecuados para uso en obra así como en laboratorio.

Tabla 2.04: Clasificación de la calidad del concreto según Leslie y Cheesman

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

Tabla 2.05: Clasificación de la calidad del concreto según Agraval

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

CAPITULO 3: DEFINICIÓN DEL ESTUDIO

3.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Las variables de estudio son:

VARIABLES DEPENDIENTES: Elegidas para el estudio de la correlación entre ellas.

- La Resistencia a Compresión, denominada también R o Resistencia en el presente estudio.
- La Velocidad de Pulso Ultrasónico, denominada también V o Velocidad en el presente estudio.

VARIABLES INDEPENDIENTES: Elegidas para definir las características de los concretos más utilizados en nuestro medio.

- El tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso:
Piedra TMN $\frac{3}{4}$ ", denominado Huso 67 en el presente estudio.
Piedra TMN 1", denominado Huso 57 en el presente estudio.
- La relación Agua/Cemento:
A/C = 0.50
A/C = 0.70
A/C = 0.90

3.2 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.- En un elemento de concreto simple, a mayor resistencia a compresión se obtendrá mayor velocidad de pulso ultrasónico.

2.- Cuanto mayor sea el tamaño máximo de agregado en un concreto, mayor será la velocidad de pulso ultrasónico.

3.- Cuanto mayor sea la relación Agua/Cemento en un concreto, menor será la velocidad de pulso ultrasónico.

3.3 CONDICIONES DE BORDE

Como sabemos el concreto es un material de naturaleza anisotrópica, por lo mismo los especímenes conformados por este material al ser evaluados tendrán

resultados que mostrarán variaciones, esto sucede a pesar de que la mezcla de origen sea lo más homogénea posible, dado que las proporciones de cemento, arena, piedra, agua y dosis de aditivos empleados marcarán ciertas diferencias entre los especímenes ensayados, por ello se recomienda que los resultados sean analizados estadísticamente en conjunto y no individualmente. Así mismo deben considerarse las fuentes de variación aportadas por la mano de obra que interviene y por los equipos empleados; como se mencionó, el equipo de ultrasonido en particular puede tener alguna pérdida de sensibilidad e imprecisión en ciertas condiciones, al igual que la prensa para compresión de probetas. Con el fin de limitar e interpretar el efecto de estas variables se establecieron las siguientes condiciones de borde:

- Para definir los procedimientos operativos de los ensayos a correlacionar se utilizó el método de ensayo de Resistencia a Compresión, basado en la ASTM C39 (NTP 339.034) y el método de ensayo de velocidad de pulso ultrasónico basado en la ASTM C597.
- De acuerdo a lo indicado en el capítulo 5.4 de la ASTM C597 se considera que la menor dimensión del objeto de ensayo debe exceder el requerimiento de longitud mínima de onda de las vibraciones ultrasónicas, a fin de no complicar la determinación del tiempo en la llegada de los pulsos transmitidos directamente (verificado con la máxima velocidad de pulso obtenida y la mínima frecuencia posible del equipo). Durante la fase experimental se aseguró cumplir con esta recomendación.
- Se considera uniformidad en el voltaje de la fuente de alimentación para el equipo de medición, lo cual se procuró controlar mediante un regulador de voltaje automático (estabilizador), por tanto se desprecian los errores introducidos por esta causa en las lecturas reportadas por el dispositivo de medición.
- Se considera que el circuito de medición de tiempo es prácticamente insensible a la temperatura de operación en el rango de 0 a 40 °C. Ningún ensayo fue realizado fuera de este rango de temperatura.
- Dado que el grado de saturación del concreto afecta a la velocidad del pulso (en concreto saturado la velocidad puede ser hasta un 5% superior a la del concreto en estado seco), se consideró realizar los ensayos durante un “estado de sequedad aparente”, para ello se tuvo el cuidado de igualar el grado de saturación de las probetas curadas (en poza o por aspersión) retirando los testigos de ese estado aproximadamente 2 horas antes de su

evaluación, secándolos y exponiéndolos a un ventilador hasta que se elimine cualquier rastro de humedad aparente (libre de agua superficial y relativamente seco), en ese estado se ejecutarán los ensayos requeridos, dentro de las tolerancias de tiempo acorde a cada edad del espécimen. Esta es una condición de rutina, normalmente empleada por concreteras peruanas debido a un tema de practicidad, en las cuales no se aplica la condición húmeda propuesta por la ASTM C39.

- Se consideran paralelas las superficies de evaluación y las de los transductores; de igual forma se considera una correcta alineación y concentricidad entre ambos. En todo momento, durante los ensayos, se tuvo cuidado de asegurar estas condiciones.
- Todos los resultados en este estudio son obtenidos a partir de pruebas en concreto simple (sin acero de refuerzo). No se realizaron mediciones en concreto armado considerando que la velocidad de pulso en el acero es hasta el doble que en el concreto; la velocidad de pulso medida en las proximidades del acero de refuerzo sería mayor que en el concreto simple de la misma composición.
- Se considera despreciable el efecto de la manipulación de los especímenes y del equipo, dado que la medición del tiempo de tránsito del pulso ultrasónico estuvo a cargo de solo 2 operadores, quienes aseguraron que se preparara adecuadamente las superficies de los especímenes de ensayo, que se aplicara suficiente agente de acoplamiento en estas y que se ejerciera una adecuada presión a los transductores para garantizar que se dé un adecuado acoplamiento entre las superficies y de esta manera el tiempo de tránsito sea estable. Para mayor precisión en las mediciones con el equipo, se consideró tomar al menos 3 lecturas en el mismo punto de análisis mediante el proceso de acople-desacople-acople de los transductores.

3.4 PLANEAMIENTO Y PROGRAMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Como base de la investigación se tomó experiencias previas asociadas a temas de concreto, de esta forma se concibió desarrollar la parte experimental del estudio, de forma estructurada, considerando las siguientes etapas:

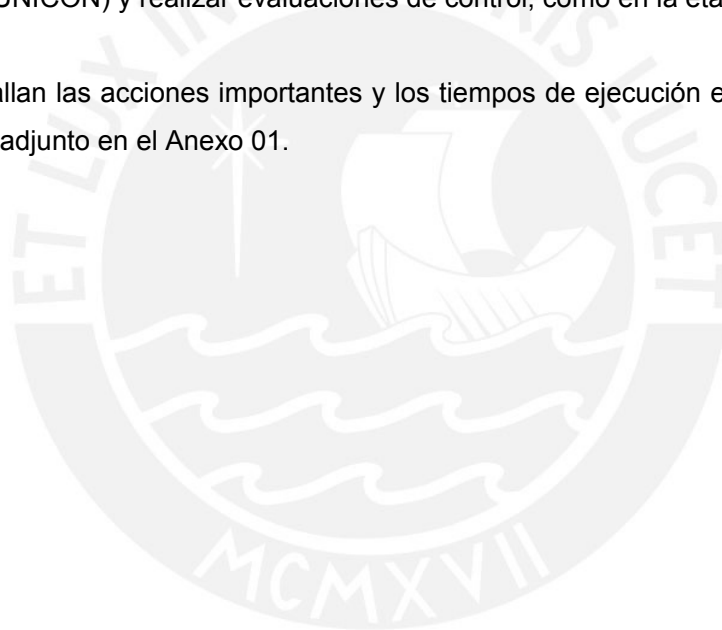
ETAPA INICIAL - ENSAYO PRELIMINAR: La finalidad es evaluar mezclas de prueba a partir de diseños teóricos y hacer los ajustes necesarios en laboratorio

para que se cumplan las especificaciones en estado fresco y de Resistencia a Compresión para 3 y 7 días de edad. Los diseños ajustados se utilizarán para la elaboración de los diseños patrón definitivos

ETAPA I - ENSAYO EN LABORATORIO: La finalidad es replicar los diseños patrón definitivos en condiciones controladas de laboratorio, de ellos se evaluará el comportamiento en estado fresco, así como los resultados de los siguientes ensayos en estado endurecido: Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a Compresión

ETAPA II - ENSAYO A ESCALA INDUSTRIAL: La finalidad es seleccionar los diseños de mayor demanda de la producción de concreto premezclado (Planta San Juan - UNICON) y realizar evaluaciones de control, como en la etapa anterior.

Se detallan las acciones importantes y los tiempos de ejecución en el programa de trabajo adjunto en el Anexo 01.



CAPITULO 4: RECURSOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS

Los materiales necesarios en las diferentes fases de preparación fueron provistos por UNIÓN DE CONCRETERAS S.A. (UNICON), al igual que los equipos, herramientas, moldes, etc. empleados en pruebas específicas del concreto en estado fresco y en estado endurecido, al detalle estos fueron:

4.1 INSUMOS PARA MEZCLAS DE CONCRETO

- Cemento Portland Tipo I
- Agregado Grueso
- Agregado Fino
- Agua
- Aditivos plastificantes

Imagen 4.01: Insumos empleados durante la preparación de mezclas patrón



A continuación se describen las principales características de los mismos:

Cemento Portland Tipo I

Para todas las mezclas de concreto se empleó Cemento Portland Tipo I a granel, de la empresa Cementos Lima S.A., el cual se sabe es un cemento estándar de uso general en los diseños de mayor demanda en el entorno de la construcción en Lima, aplicado normalmente en casos donde no se requieren propiedades especiales. El lote del cemento utilizado tenía una densidad de 3120 kg/m³ y

superficie específica Blaine de 325 m²/kg, estas y otras características se encuentran detalladas en el informe de control de calidad adjunto en el Anexo 02.

Agregado Grueso

Se utilizó piedra Huso 67 (TMN ¾") y piedra Huso 5 (TMN 1"), ambas procedentes de la cantera Jicamarca (características físicas en el Anexo 03.01 y 03.02). Como antes se mencionó, para evaluar la influencia del tamaño de piedra en las mediciones ultrasónicas se clasificaron las mezclas con dos variables:

- Piedra Huso 67: conformada al 100% de piedra correspondiente al Huso 67.
- Piedra Huso 57: conformada por la combinación 50% de piedra Huso 67 y 50% de piedra Huso 5.

Agregado Fino

Se empleó arena gruesa igualmente extraída de la cantera Jicamarca (características físicas en el Anexo 04). Esta arena usada en los ensayos tenía un Módulo de Fineza igual a 2.84 y el material pasante de la malla #200 era 5.72%, ligeramente mayor al límite recomendado en la ASTM C33 para la cantidad de finos, pero dado que esta arena es producto de material chancado y los finos no corresponden a limos y/o arcillas está dentro del límite permisible (hasta 7%).

Se optó por almacenar los agregados en cúmulos, protegidos de contaminación y humedad excesiva, en lugar de que fueran guardados en cilindros, para evitar la segregación del material en capas de granulometrías diferentes y de alguna forma pudieran influir en la dispersión de los resultados de manera innecesaria.

Agua

Se usó agua potable, la misma que es utilizada en las instalaciones del Centro de Investigación Tecnológica del Cemento y el Concreto (CITEDEC), donde se realizaron las pruebas de laboratorio, y en la producción industrial de concreto en la Planta San Juan de UNICON; este insumo cumple con la NTP 339.088.

Aditivos

Se evaluaron dos opciones de aditivos empleados normalmente en la producción de los concretos con mayor volumen de despacho en la Planta San Juan de UNICON:

- Polyheed 770R (BASF): Según su hoja técnica, adjunta en el Anexo 05, este es un aditivo libre de cloruros, retardante inicial y reductor de agua de rango medio; sugerido para reducir la segregación, lograr buena trabajabilidad y

bombeabilidad en climas calurosos. Se utilizó solo en la fase de ensayos preliminares para las mezclas de prueba que permitieron definir las mezclas patrón; la dosis aplicada fue mínima y aunque estuvo dentro del rango recomendado en la ficha técnica se verificó que el aditivo incorporaba aire fuera de los límites establecidos para este parámetro, como se muestra más adelante en la Tabla 5.02, por lo mismo se descartó su uso.

- **Plastiment TM27 (SIKA):** Según su hoja técnica, adjunta en el Anexo 06, este es un aditivo plastificante exento de cloruros que produce en el concreto un aumento considerable de su trabajabilidad y ofrece buena mantención de la misma, es recomendado para concretos fabricados en plantas concreteras. Para los ensayos definitivos de la investigación se eligió este aditivo considerando que en ensayos previos se verificó el cumplimiento de los parámetros de control del concreto en estado fresco y endurecido. Cabe resaltar que la aplicación de las dosis se hizo en función de los rangos recomendados en la ficha técnica proporcionada por el proveedor.

4.2 EQUIPO DE ULTRASONIDO

En la actualidad existen diversos proveedores del extranjero que ofrecen, a través de representantes o a través de la web, equipos y sistemas que permiten determinar la Velocidad de Pulso Ultrasónico en el concreto; la mayoría de estos ponen a disposición artefactos de última generación conformados por sistemas que, con el paso del tiempo y las exigencias del medio, han logrado optimizar los niveles de precisión, confiabilidad y la facilidad de operación en equipos modernos, guardando en ellos la misma esencia de los antecesores.

No se tiene muchas referencias de empresas y/o entidades en el Perú que brinden servicios con el equipo de ultrasonido como opción de ensayo no destructivo para concreto, no es muy difundido en nuestro medio; una de estas pocas empresas es UNICON, la cual cuenta con personal calificado del CITEDEC para esta actividad.

El equipo de ultrasonido que posee el CITEDEC, con el que se realizó la parte experimental de la investigación, tiene las siguientes características:

Equipo

Marca: **JAMES ELECTRONICS INC**
Proveedor: Instrument Division Chicago, Illinois 60618

Modelo:	C-4899
Serie:	772587
Poder:	110V
Frecuencia:	54 kHz
Precisión:	+/- 0.1 microsegundo

Transductores

Cantidad:	02 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:	26.3 microsegundos
Material:	Metal
Diámetro:	4.70 cm
Longitud:	15.80 cm

El equipo se pone en funcionamiento con energía eléctrica, se debe conectar mediante un regulador de voltaje automático que permite convertir la fuente de voltaje de 110V a 220V.

Se verificó, según como indica la ASTM C 597, que la frecuencia de vibración no resulta un obstáculo para trabajar con especímenes cilíndricos de concreto de tamaño 4"x8" o 6"x12", dado que la longitud de onda de la vibración ultrasónica resulta menor que cualquiera de las dimensiones longitudinales de estos elementos y no dificultan el tiempo de llegada de los pulsos transmitidos directamente:

$$\begin{aligned}
 \text{Longitud de onda máxima (LOM)} &= \text{Velocidad de pulso máxima} / \text{Frecuencia del equipo} \\
 &= 4881 / 54000 \\
 &= 0.09 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$(\text{LOM}) \ 0.09 \text{ m} < 0.20 \text{ m} \ (\text{Longitud de probeta } 4'' \times 8'')$$

En operación, el instrumento primero debe calibrarse para tener un adecuado control de funcionamiento del equipo y ajuste en tiempo cero, esto se logra con la ayuda de la barra metálica de referencia que tiene inscrito en su superficie el valor de tiempo (26.3 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 conectar transductor-superficie sin vacíos y se regula el equipo hasta obtener dicho valor en la pantalla, luego de ello recién está disponible para la evaluación de los especímenes de concreto.

En el presente estudio se utilizó la transmisión directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida.

Imagen 4.02: Equipo de Ultrasonido del CITEDEC



Imagen 4.03: Cables de conexión con sus transductores (emisor y receptor)



Imagen 4.04: Barra calibradora con tiempo de tránsito, de referencia, inscrito



Imagen 4.05: Grasa útil para acoplar superficies de contacto con transductores



4.3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS COMPLEMENTARIOS

Con el fin de dejar una base detallada del trabajo experimental, para posibles investigaciones futuras, se presenta una relación de los principales equipos, instrumentos, herramientas y consumibles utilizados durante los ensayos:

- Mezcladora de 70 litros de capacidad útil
- Prensa Forney para ensayo de compresión simple
- Compresora de aire (para desmoldar las probetas de los moldes de pvc)
- Cono de Abrams para medición de slump
- Olla Washington para medición para peso unitario y contenido de aire
- Balanzas de precisión gruesa (kg.) y fina (gr.)
- Termómetro para concreto
- Almohadillas de neopreno de 4" y 6" de diámetro

- Moldes cilíndricos, de PVC, para elaborar probetas de tamaño 4"x8" y 6"x12"
- Vernier para mediciones de 0-18 pulgadas
- Micrómetro
- Carretillas
- Lampas
- Martillo de goma
- Cucharas medidoras
- Plancha para enrasar superficie de concreto fresco
- Baldes plásticos para el pesaje del material
- Cepillo metálico
- Grasa como agente de acoplamiento transductor-superficie
- Lijas



CAPITULO 5: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS

Según el planeamiento definido para el presente estudio se detallan las etapas ejecutadas para el trabajo experimental:

5.1 ETAPA INICIAL - ENSAYO PRELIMINAR

5.1.1 PLANIFICACIÓN

En base a las variables independientes definidas anteriormente (Capítulo 3) se establecen 6 mezclas de diseño para ensayos en condiciones controladas (Laboratorio), las mismas que en esta etapa serán verificadas y/o ajustadas de acuerdo a los parámetros en estado fresco y endurecido (Tabla 5.02), a fin de validar los diseños que serán definitivos para la etapa siguiente.

Tabla 5.01: Parámetros de diseño de mezclas

Código de Mezcla Patrón	Relación A/C	Huso de Agregado Grueso	Resistencia a compresión de diseño (kg/cm ²)
M1 - 0.5H57	0.5	Huso 57	280
M2 - 0.7H57	0.7		175
M3 - 0.9H57	0.9		100
M4 - 0.5H67	0.5	Huso 67	280
M5 - 0.7H67	0.7		175
M6 - 0.9H67	0.9		100

Tabla 5.02: Parámetros de control para verificación del concreto

Parámetros de Control en estado fresco		
Asentamiento inicial	4" - 6"	ASTM C143
Contenido de aire	1% - 3%	ASTM C138
Rendimiento (Peso unitario)	0.98 - 1.02	ASTM C138
Temperatura del Concreto	Control de referencia con Temperatura Ambiente	ASTM C1064
Parámetros de Control en estado endurecido		
Resistencia a compresión	Control a 3 y 7 días	ASTM C39

Las dosificaciones iniciales a emplear en la presente etapa se definieron en base al tamaño máximo del agregado (Huso) y la relación Agua/Cemento (A/C) como parámetros principales del diseño de mezcla.

Tabla 5.03: Dosificaciones iniciales para diseños preliminares

Materiales (kg)	Pesos en seco (Kg x m3)						
	Piedra Huso 57			Piedra Huso 67			
	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	
Slump 4"-6"	Cemento	380	270	215	385	275	215
	Agua	188	188	193	192	192	198
	Arena	894	941	997	923	972	1027
	Piedra # 67	467	491	481	889	937	913
	Piedra # 5	466	490	480	-	-	-
	Polyheed 770R	1.70	1.21	0.96	1.72	1.23	0.91

En base a la tabla anterior se proyectó la cantidad de insumos y recursos que se utilizarían para todos los ensayos planificados en el laboratorio. Los agregados fueron separados y almacenados en cantidad suficiente para realizar todas las mezclas previstas, el cemento se almacenó paulatinamente de acuerdo al uso, para evitar la hidratación parcial anticipada por efecto del humedecimiento y el aditivo inicialmente se dosifico en una cantidad equivalente al 0.45 % peso del cemento.

5.1.2 DESARROLLO

La preparación de las mezclas de concreto se realizó considerando la siguiente secuencia de carga:

Tabla 5.04: Secuencia de carga en mezcladora

Secuencia de Carga		
1	Agua (primera descarga)	50-85% en volumen
2	Agregados (piedra y arena)	100% en peso
3	Cemento	100% en peso
4	Agua (segunda descarga)	15-50% en volumen
5	Aditivo	100% en volumen

Es importante resaltar que el aditivo se colocó al final, una vez que los agregados estuvieron hidratados con el agua de la dosificación y que se controló que el tiempo de mezcla, luego de colocado el cemento, no exceda los 5 minutos.

Por cada diseño se preparó un volumen de mezcla de 40 a 50 litros, cantidad que permitió realizar todos los ensayos necesarios para verificar los parámetros de control antes indicados y para la preparación de 6 probetas de dimensiones 4" x 8" (con rotura programada a 3 y 7 días). Al día siguiente de realizadas las mezclas (24 horas en promedio) se realizaba el desmolde de las probetas on la compresora de aire para retirar los moldes de PVC y de inmediato se almacenaban en los gabinetes de curado donde habían jabas que contenían una solución de agua con cal.

Imagen 5.01: Proceso de carguío de materiales



5.1.3 RESULTADOS

En esta etapa preliminar se elaboraron en total 18 mezclas de concreto, las cuales se fueron evaluando, descartando y corrigiendo hasta cumplir con la preparación de los 6 diseños definitivos para la siguiente etapa.

A continuación se presenta una Tabla con el resumen de los resultados de las primeras mezclas preparadas en esta etapa.

Tabla 5.05. Validación de parámetros de diseño

CODIGO DE MEZCLA	ADITIVO	DOSIS (%)	SLUMP (pulg)	CONTENIDO DE AIRE (%)	RENDIMIENTO	TEMPERATURA (°C)		RESISTENCIA 3 DÍAS (kg/cm ²)	RESISTENCIA 7 DÍAS (kg/cm ²)	
						AMBIENTE	CONCRETO			
M1 - 0.5H57 (a)		0.45%	4 1/2	2.3%	1.01	21.2	21.2	265	320	
M2 - 0.7H57 (a)		0.45%	5 3/4	3.4%	1.03	21.4	21.9	150	204	
M3 - 0.9H57 (a)	POLYHEED 770R	0.45%	5 1/4	3.6%	1.03	21.3	21.5	99	203	
M4 - 0.5H67 (a)		0.45%	4 1/4	3.3%	1.03	20.0	21.2	261	313	
M5 - 0.7H67 (a)		0.45%	4 1/4	4.0%	1.04	19.2	21.2	148	208	
M6 - 0.9H67 (a)		0.45%	4 1/4	4.0%	1.04	19.7	21.2	88	133	
M1 - 0.5H57 (b)			0.59%	6 3/4	3.7%	1.03	16.4	20.2	273	326
M2 - 0.7H57 (b)			0.71%	7 3/4	3.6%	1.03	19.5	20.4	154	208
M3 - 0.9H57 (b)		0.59%	4 1/2	2.9%	1.01	17.2	19.9	105	144	
M4 - 0.5H67 (b)		0.70%	5 1/2	3.7%	1.02	19.4	19.7	292	364	
M5 - 0.7H67 (b)		0.71%	2 1/2	3.5%	1.02	18.3	20.1	175	248	
M6 - 0.9H67 (b)		0.70%	4 3/4	3.3%	1.02	19.4	19.5	90	146	
M1 - 0.5H57 (c)	PLASTIMENT TM27	0.47%	4 3/4	2.5%	1.01	21.2	23.5	252	331*	
M2 - 0.7H57 (c)		0.47%	6	2.7%	1.01	21.4	23.3	144	211*	
M3 - 0.9H57 (c)		0.47%	4 3/4	2.4%	1.01	17.3	22.5	88	124*	
M4 - 0.5H67 (c)		0.59%	4 3/4	3.4%	1.02	20.5	23.0	258	345*	
M5 - 0.7H67 (c)		0.59%	5 1/2	3.7%	1.02	17.0	22.4	137	205*	
M6 - 0.9H67 (c)		0.59%	5	2.9%	1.01	17.5	22.1	86	124*	

* Resultados de resistencia a 8 días

Considerando los parámetros de control mostrados en la Tabla 5.02 se fueron afinando las dosificaciones de mezcla con los siguientes criterios:

Asentamiento

Se observa que, al preparar las últimas 6 mezclas de esta etapa, no se obtuvo una variación importante en los valores de asentamiento inicial, como sucedía al inicio, los cuales oscilaban entre 4 $\frac{3}{4}$ " y 6". Adicionalmente se observó que estas mezclas eran uniformes, es decir tenían una distribución homogénea de materiales, lo cual se conservó en la preparación de las mezclas sucesivas.

Contenido de aire

Al establecer los diseños teóricos se consideró un rango de contenido de aire en el diseño teórico que podría variar entre 1.0% y 3.0%, pero como se puede observar en la Tabla 5.05 en las primeras mezclas se obtuvieron valores mayores, el promedio de estos fue 3.4%. Debido a la influencia de este parámetro en el resultado de la resistencia a compresión, se buscó explicar este resultado; para ello se revisó los reportes de las características físicas de los agregados, el certificado de calidad del cemento y la ficha técnica del aditivo.

Dado que la arena tenía 5.72% como pasante de la malla #200 se podría esperar una ligera influencia en el incremento del aire atrapado, pero no se consideró modificar su aplicación dado que este material era parte de las materias primas invariables, tanto en producción como en los ensayos de laboratorio, al igual que el Cemento Portland Tipo I, cuyo informe de control de calidad indicaba que estaba conforme a norma.

Para no afectar la esencia de los diseños de concreto se optó por analizar el aditivo y su aplicación. Al revisar la hoja técnica del POLYHEED 770R, se confirmó que ya se había aplicado la dosis mínima recomendada, la cual sugería trabajar en el rango de 400 ml a 560 ml por cada 100 Kg. Por lo que en los próximos ensayos se reemplazó por PLASTIMENT TM27, que es un aditivo empleado igualmente en la producción de concreto premezclado, cuya hoja técnica recomendaba trabajar en el rango de 250 ml a 600 ml por cada 100 kg de cemento. Con este aditivo se obtuvo en promedio 2.9% de contenido de aire, el cual está dentro de los límites esperados para este parámetro de control.

Rendimiento (Peso unitario)

En la Tabla 5.05 puede observarse que los valores de rendimiento de las mezclas iniciales se ubican fuera del rango establecido (mayores que 1.02), lo cual da a

entender que se produce un exceso de concreto respecto al volumen diseñado, esto podría deberse a alguna dificultad en la compactación del concreto, la cantidad de aire incorporado y/o la cantidad de agregado fino en la mezcla.

Las mezclas posteriores fueron corregidas para ajustar este parámetro, lo cual se logró regulando la cantidad del aditivo nuevo (PLASTIMENT TM27) dentro del rango de dosis recomendado según su hoja técnica, de esta forma las mezclas posteriores permitieron registrar parámetros dentro del rango establecido.

Temperatura

Durante esta etapa de ensayos las temperaturas registradas resultaron dentro de los valores normales de acuerdo a las condiciones climáticas, lo que se confirmó al obtener un adecuado desarrollo de resistencia a corto y largo plazo.

Resistencia a Compresión

Se puede observar en el cuadro de resumen (Tabla 5.05) que los resultados de resistencia a compresión fueron consistentes considerando que cumplen con la dispersión según la ASTM C39, además los valores obtenidos son razonables para las edades evaluadas y la relación A/C de cada diseño.

5.2 ETAPA I - ENSAYO EN LABORATORIO

5.2.1 PLANIFICACIÓN

A partir de los ensayos preliminares se obtuvieron las 6 mezclas patrón, preparadas bajo condiciones controladas en el laboratorio, con ellas se evaluó el comportamiento de los testigos mediante los siguientes ensayos:

- Ensayo de Ultrasonido (ASTM C597): para aplicación previa a las probetas que se ensayarían luego a compresión, este ensayo permitirá monitorear la variación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico a: 3, 7, 14, 21 y 28 días de edad.
- Ensayo de Resistencia a Compresión (ASTM C39): aplicado igualmente a las edades de: 3, 7, 14, 21 y 28 días, considerando como condición de curado la inmersión de las probetas en agua con cal, hasta la edad indicada de cada ensayo.

En cuanto al tamaño de probetas, se evaluó que si se elegía trabajar con moldes de 6"x12" la mezcladora del laboratorio sería insuficiente para preparar la mezcla patrón en una sola tanda, dado que esta situación no era favorable para lograr hacer la toma de ensayos en estado fresco y el muestreo en una sola tanda (podría introducir una fuente de dispersión adicional); se optó por trabajar con los moldes para probetas de tamaño 4"x8", verificando el cumplimiento de la NTP 339.033, la cual señala que el diámetro del cilindro debe ser por lo menos tres veces el tamaño nominal máximo del agregado grueso.

En la siguiente tabla se explica la cantidad de especímenes requeridos (ASTM C39) en función de los ensayos que se realizarían:

Tabla 5.06: Cuantificación de probetas para ensayos

Código de Mezcla Patrón	N° de Probetas por edad de ensayo					N° total de probetas por mezcla
	3 días	7 días	14 días	21 días	28 días	
M1 - 0.5 H57	3	3	3	3	3*	15
M2 - 0.7 H57	3	3	3	3	3*	15
M3 - 0.9 H57	3	3	3	3	3*	15
M4 - 0.5 H67	3	3	3	3	3*	15
M5 - 0.7 H67	3	3	3	3	3*	15
M6 - 0.9 H67	3	3	3	3	3*	15

En resumen, por cada mezcla patrón se requería moldear 15 probetas, de ellas las últimas 3(*) estaban destinadas a ensayarse a compresión los 28 días, de esta forma se utilizaron inicialmente como especímenes de monitoreo en todas las edades previas para los Ensayos de Ultrasonido, en paralelo a los ensayos de Resistencia a Compresión de la edad correspondiente.

5.2.2 DESARROLLO

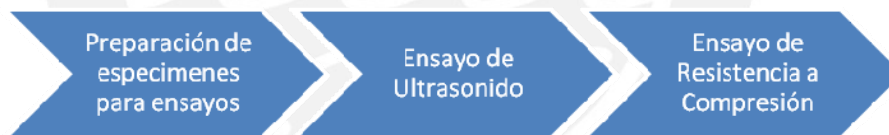
Las mezclas finales de la etapa preliminar (mezclas patrón) fueron replicadas y evaluadas para verificar que los parámetros en estado fresco cumplan los límites establecidos inicialmente. El detalle de los diseños se encuentra en el Anexo 07.

Imagen 5.02: Probetas moldeadas con mezclas de diseños patrón



En cuanto a las evaluaciones en estado endurecido se estableció el siguiente procedimiento:

Imagen 5.03: Esquema secuencial de ensayos en estado endurecido



PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES PARA ENSAYOS

Las probetas se preparaban poco antes de cumplir la edad determinada de ensayo a compresión, dado que primero se realizaría el ensayo de ultrasonido, para ello fue necesario:

- Interrumpir la condición de curado: mínimo 2 horas antes del ensayo, con lo cual todavía es factible cumplir con la tolerancia permisible de tiempo de curado y hora de ensayo para las probetas con 3 días de edad.
- Homogenizar el estado de humedad: secado con un paño y luego bajo ventilador.
- Preparar las superficies donde se acoplarán los transductores: retirar la etiqueta de identificación, lijar, nivelar y limpiar.

Imagen 5.04: Limpieza de las superficies de contacto en la probeta



ENSAYO DE ULTRASONIDO

Tal como se mencionó anteriormente, el ensayo de ultrasonido se llevó a cabo de acuerdo a la ASTM C597, a continuación se resume el procedimiento de forma esquemática:

Imagen 5.05: Esquema secuencial de Ensayo de Ultrasonido

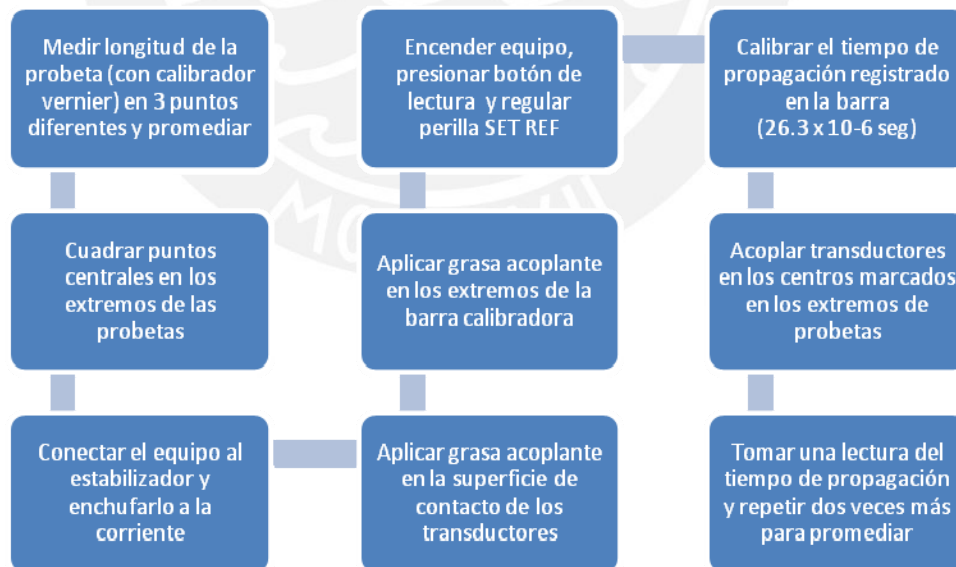


Imagen 5.06: Aplicación de grasa acoplante en los extremo de las probetas



Imagen 5.07: Calibración del tiempo de propagación en base a referencia grabada en la barra calibradora



Imagen 5.08: Medición del tiempo de propagación del pulso ultrasónico



ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo se llevó a cabo de acuerdo a la ASTM C39, inicialmente se determinó con el micrómetro los diámetros promedio de cada probeta a ensayar, durante el Ensayo a Compresión se utilizaron pads de neopreno y se verificó la aplicación de una adecuada velocidad de carga hasta producir la falla del espécimen.

Imagen 5.09: Medición del diámetro de las probetas con el micrómetro



Imagen 5.10: Ensayo de Resistencia a Compresión



5.2.3 RESULTADOS

Se observa que los resultados obtenidos, de los controles realizados en estado fresco, para las mezclas patrón se encuentran bajo control respecto de los parámetros establecidos como referencia en la Etapa Preliminar (Tabla 5.02).

Tabla 5.07: Resultados de ensayos de control en el concreto en estado fresco para muestras obtenidas en Laboratorio

Código de Mezcla Patrón	Slump (pulg)	Contenido de aire (%)	Rendimiento	Temperatura (°C)	
				Ambiente	Concreto
M1 - 0.5H57	4 1/2	3.0	1.01	17.1	20.1
M2 - 0.7H57	4 1/2	3.0	1.01	21.7	20.3
M3 - 0.9H57	5 3/4	2.8	1.02	19.7	20.1
M4 - 0.5H67	5 3/4	3.0	1.01	18.5	19.5
M5 - 0.7H67	5 1/2	2.9	1.02	18.4	19.4
M6 - 0.9H67	5 1/2	3.1	1.02	16.8	19.2

En la siguiente tabla se presentan los resultados en estado endurecido (Ensayos de Ultrasonido y Resistencia a Compresión) de forma detallada para cada mezcla patrón. Se observa que la dispersión de la resistencia está dentro de lo que nos permite la norma para probetas obtenidas en laboratorio con medidas de 4" x 8" (10.6%, en referencia a la Tabla 2.02), excepto 2 valores que se obtuvieron para diferentes diseños a 14 y 3 días respectivamente (estos serán observados para efectos de análisis, si fuera el caso).

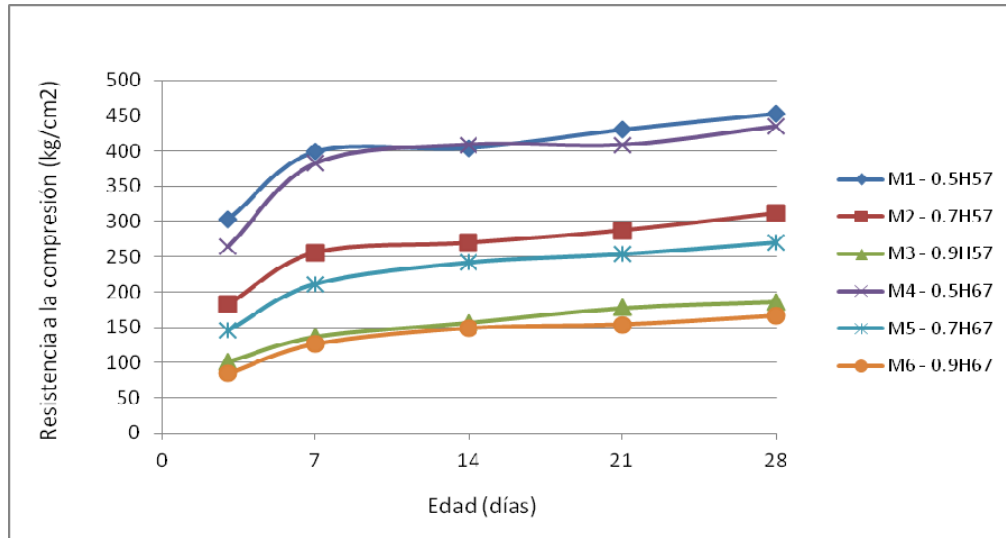
Tabla 5.08: Resultados de ensayos en el concreto en estado endurecido para muestras obtenidas en Laboratorio

Código	Edad de Ensayo (días)	Velocidad de pulso promedio (m/s)	f'c promedio (kg/cm ²)	Dispersión de f'c (%)	Observación
M1 - 0.5H57	3	4360	303	2.02%	Dispersión máxima 10.6% (ASTM C39)
	7	4620	399	2.75%	
	14	4630	404	4.15%	
	21	4590	430	9.62%	
	28	4880	452	8.71%	
M2 - 0.7H57	3	4090	183	4.48%	
	7	4510	256	4.23%	
	14	4410	270	10.91%	
	21	4350	287	7.15%	
	28	4560	311	5.26%	
M3 - 0.9H57	3	3880	101	1.81%	
	7	4070	136	4.07%	
	14	4310	157	6.72%	
	21	4230	178	10.15%	
	28	4290	186	4.25%	
M4 - 0.5H67	3	4260	264	10.62%	
	7	4410	382	4.70%	
	14	4580	409	4.19%	
	21	4650	408	3.72%	
	28	4560	434	6.52%	
M5 - 0.7H67	3	3890	145	8.21%	
	7	4070	211	8.04%	
	14	4120	241	7.29%	
	21	4380	253	7.52%	
	28	4320	270	3.67%	
M6 - 0.9H67	3	3670	84	2.42%	
	7	3840	126	10.46%	
	14	3990	148	6.41%	
	21	4250	154	5.28%	
	28	4140	166	2.25%	

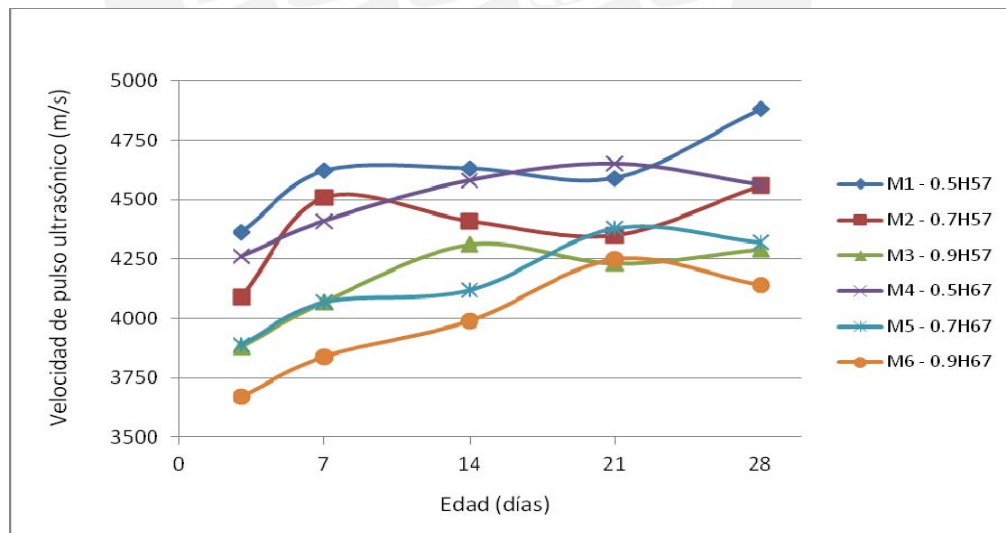
En función de los resultados de Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a la Compresión:

- Se muestra la evolución de la Resistencia a Compresión y de la Velocidad de Pulso ultrasónico, respectivamente, desde su elaboración hasta los 28 días, para las 6 mezclas patrón preparadas en Laboratorio (Graficas 5.01 y 5.02).

Gráfica 5.01. Desarrollo de la Resistencia a Compresión

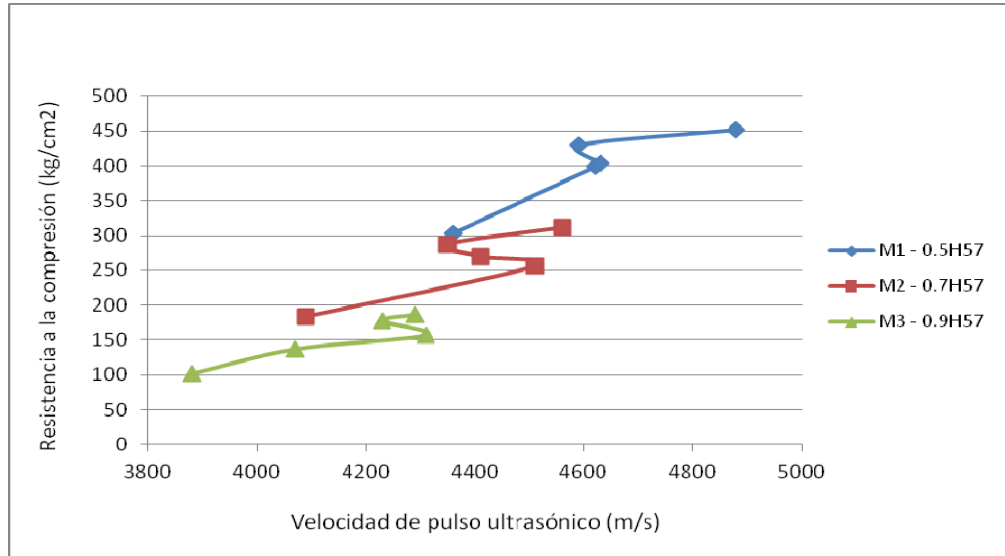


Gráfica 5.02: Desarrollo de la Velocidad de Pulso Ultrasónico

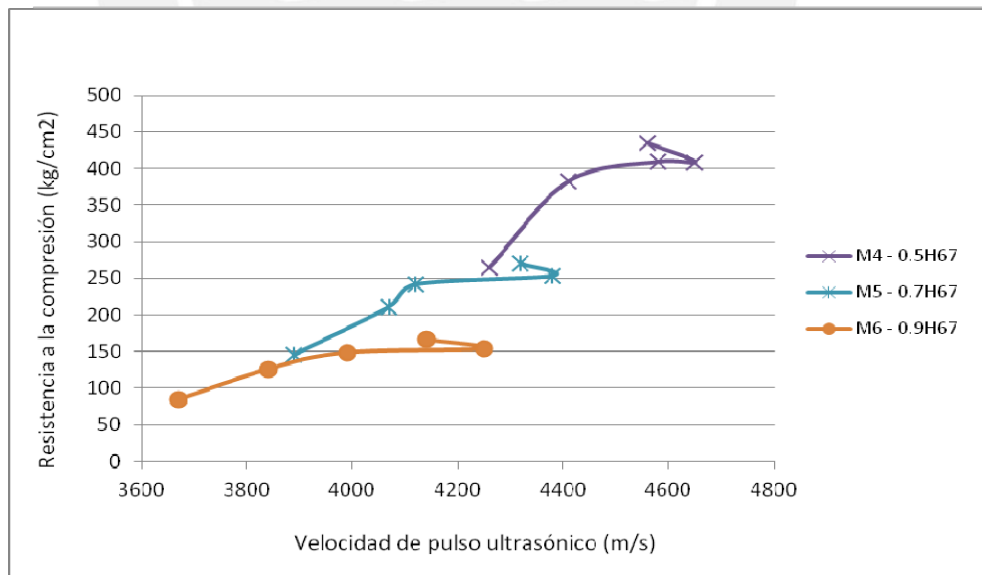


- Se muestra la relación de la Resistencia a Compresión vs la Velocidad de Pulso Ultrasónico para cada grupo de mezclas patrón correspondiente con un Huso. (Graficas 5.03 y 5.04)

Gráfica 5.03: Resistencia a Compresión vs la Velocidad de Pulso Ultrasónico relacionados al Huso 57



Gráfica 5.04: Resistencia a Compresión vs la Velocidad de Pulso Ultrasónico relacionados al Huso 67



5.3 ETAPA II - ENSAYO A ESCALA INDUSTRIAL

5.3.1 PLANIFICACIÓN

Considerando los diseños de mezclas que se programaban en la planta de producción de concreto premezclado (Planta San Juan - UNICON), se escogieron los diseños comerciales más solicitados en el lapso de una semana, cuyas resistencias características estaban comprendidas en el rango de 100 kg/cm² a 350 kg/cm², a fin de hacer evaluaciones como en la etapa anterior, que permitan obtener tendencias más consistentes de las gráficas elaboradas con los diseños preparados en Laboratorio.

Se planificó muestrear 140 litros de mezcla por diseño aproximadamente, cantidad suficiente para evaluaciones en estado fresco y moldeo de probetas tamaño 6"x12", las cuales fueron ensayadas a Compresión y a Ultrasonido a los 7 días (curado en la cámara de aspersión) y 28 días (curado en la poza de agua con cal).

5.3.2 DESARROLLO

Para cada muestreo de concreto a Escala Industrial se realizaron las siguientes acciones:

- Confirmar, con el supervisor de producción de turno, los códigos de diseños de concreto programados durante el día a fin de seleccionar los que se ajusten a las características de Huso y Resistencia a Compresión de diseño buscados (descartando concretos especiales).

Tabla 5.09: Interpretación del Código de Diseño

Elementos del Código de diseño	Definición de los Elementos	Interpretación
Ejemplo: 1100N57A		
1	Tipo de Cemento	Tipo I
100	Resistencia a compresión	100 kg/cm ²
N	Característica del aditivo	Normal (aditivo plastificante y aditivo retardante de fragua)
57	Tipo de agregado	Huso 57
A*	Tipo de Asentamiento	Slump normal de 2 ½"- 4" bombeable

*También se consideraron diseños con asentamiento tipo B y C, con slump de 4" - 6" y 6" - 8" respectivamente.

- Una vez identificada la unidad (mixer) que cargaría el concreto con el código de diseño deseado se registraban sus datos y se le hacía seguimiento durante el proceso de carga.
- Luego que el mixer cargara los materiales en la Planta dosificadora y pasara por el puesto de control para regulación de slump, se esperaba unos minutos con el tambor en velocidad de mezclado y finalmente se muestreaba en 02 buguis los 140 litros de mezcla.
- Para cada caso, el personal técnico de planta homogenizó la mezcla entre los 02 buguis, posteriormente realizó las verificaciones de los parámetros en estado fresco (obteniendo los valores referidos en la Tabla 5.11 y la cantidad de probetas indicadas).
- En la Tabla 5.10 se observa el total de diseños muestreados con sus respectivas características. Según lo obtenido de la programación disponible, el rango de resistencias a compresión para los concretos con Huso 57 está determinado entre 100 kg/cm² a 280 kg/cm² y para el Huso 67 está entre 175 kg/cm² a 350 kg/cm².

Tabla 5.10: Características de los diseños seleccionados a Escala Industrial

Código de diseño	Huso	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Número de Probetas a ensayar a 7 días	Número de Probetas a ensayar a 28 días
1100N57A	Huso 57	100	2	2
1140N57A		140	2	2
1175N57A		175	2	2
1210N57B		210	2	2
1245N57B		245	2	2
1280N57A		280	2	2
1175N67C	Huso 67	175	2	2
1210N67B		210	2	2
1245N67B		245	2	2
1280N67B		280	2	2
1350N67B		350	2	2

- Las probetas ya en estado endurecido estuvieron disponibles para ensayar, una vez que cumplieron los procesos de desmolde y curado, a los 7 días en la cámara de curado por aspersión y a los 28 días en la poza de agua con cal (este procedimiento es una práctica operativa realizada comúnmente por el personal de UNICON).
- Considerando los mismos procedimientos indicados anteriormente en la Etapa de Laboratorio, se efectuaron los ensayos para determinar la Velocidad de Pulso Ultrasónico (ASTM C597) y la Resistencia a Compresión (ASTM C39); cabe destacar que el valor obtenido para Velocidad de Pulso Ultrasónico correspondía a la misma probeta ensayada inmediatamente después a Compresión, es decir no se tuvieron probetas de monitoreo como en la etapa anterior.

Imagen 5.11: Selección y confirmación de códigos de diseño a muestrear

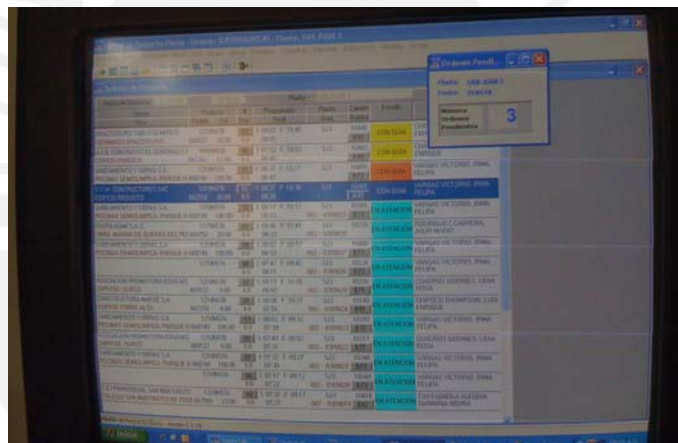


Imagen 5.12: Muestreo de mezcla obtenida de producción a Escala Industrial



Imagen 5.13: Control en estado fresco y elaboración de probetas 6"x12"



Imagen 5.14: Almacenaje en cámara de curado por aspersión para probetas tamaño 6"x12" a 7 días



Imagen 5.14: Almacenaje en poza de agua con cal para curado de probetas tamaño 6"x12" a 28 días



5.3.3 RESULTADOS

Se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas, a Escala Industrial, en el concreto en estado fresco; estos se encuentran bajo control respecto de lo esperado y para fines de la investigación el Contenido de Aire cumple correctamente con el parámetro establecido en la Tabla 5.02 (entre 1.0% y 3.0%).

Tabla 5.11: Resultados de ensayos de control en el concreto en estado fresco para muestras obtenidas a Escala Industrial

Código de diseño	Resistencia de diseño (kg/cm ²)	Huso	Slump (pulg)	Contenido de Aire (%)	Temperatura (°C)	
					Ambiente	Concreto
1100N57A	100	Huso 57	7	1.6	25.7	27.7
1140N57A	140		5 1/2	2.1	26.7	28.0
1175N57A	175		5	2.4	24.4	28.4
1210N57B	210		7	0.6	25.7	29.8
1245N57B	245		6 3/4	1.3	23.6	27.5
1280N57A	280		7	2.4	24.6	28.8
1175N67C	175	Huso 67	8 1/4	1.2	24.4	26.5
1210N67B	210		6	1.5	25.9	29.4
1245N67B	245		6 3/4	1.3	24.8	29.2
1280N67B	280		6 1/2	1.6	24.3	28.8
1350N67B	350		7	1.6	25.7	31.4

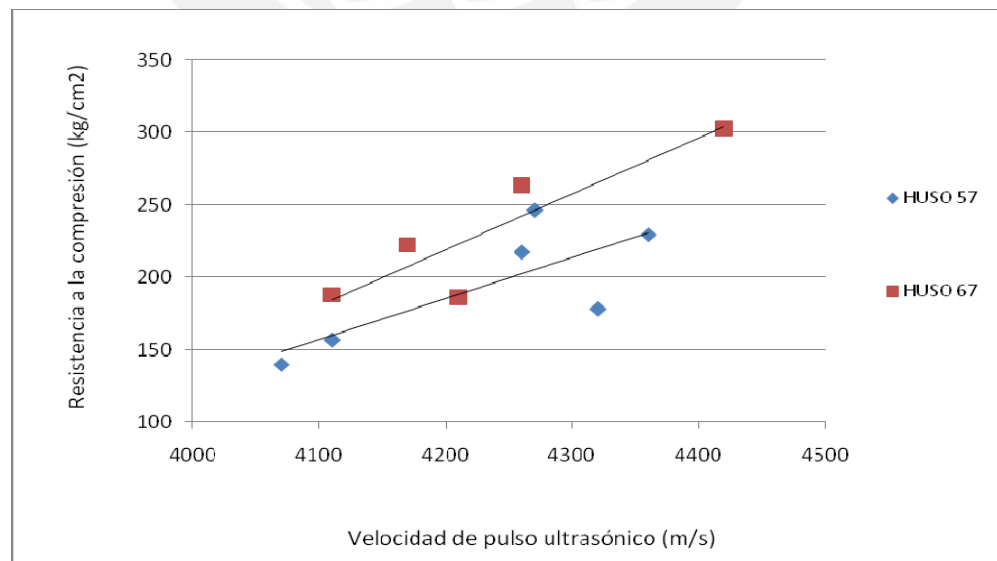
Se presentan los resultados de los ensayos de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de Resistencia a Compresión de acuerdo a la edad de evaluación (7 y 28 días) y el tipo de agregado grueso (Huso 57 y Huso 67). Se observa que los porcentajes de dispersión de los resultados de Resistencia a Compresión están dentro del máximo que indica la norma para las condiciones de lugar de muestreo y tamaño de probeta 6"x12" (8%, en referencia a la tabla 2.02), excepto 2 valores que se obtuvieron para diferentes diseños a 7 y 28 días respectivamente (estos serán observados para efectos de análisis, si fuera el caso).

Tabla 5.12: Resultados de ensayos en el concreto en estado endurecido para muestras obtenidas a Escala Industrial

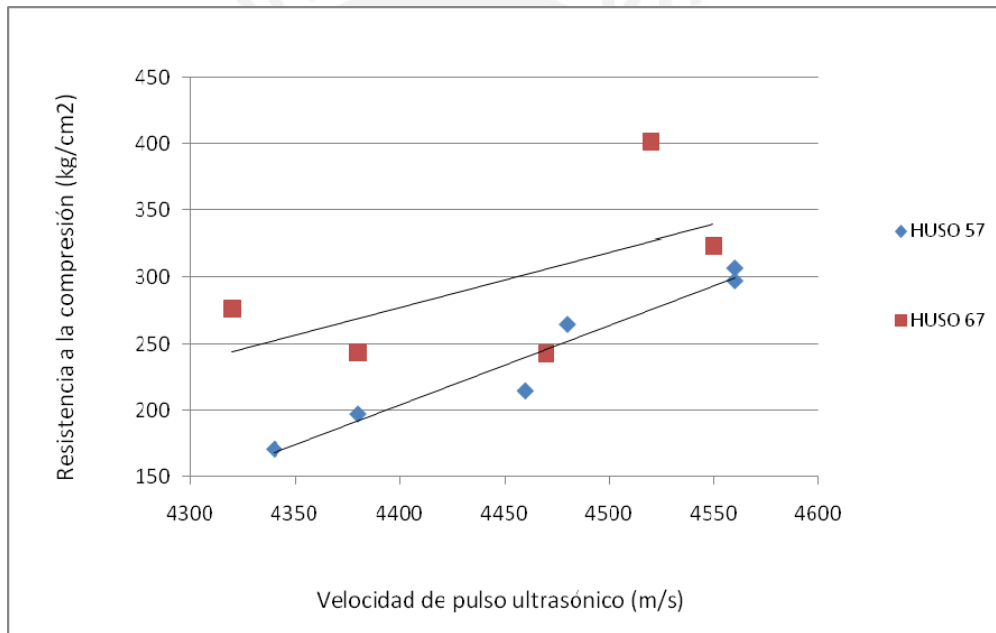
Código de mezcla	Edad de Ensayo (días)	Velocidad de pulso promedio (m/s)	f'c promedio (kg/cm ²)	Dispersión de f'c (%)	Observación
1100N57A	7	4070	140	0.72%	Dispersión Máxima 8.0% (ASTM C39)
	28	4340	171	1.76%	
1140N57A	7	4320	178	2.25%	
	28	4460	215	0.47%	
1175N57A	7	4110	157	3.19%	
	28	4380	197	2.03%	
1210N57B	7	4260	217	7.59%	
	28	4480	265	6.42%	
1245N57B	7	4360	229	7.21%	
	28	4560	307	6.51%	
1280N57A	7	4270	246	8.34%	
	28	4560	298	2.35%	
1175N67C	7	4210	186	5.38%	
	28	4470	242	8.26%	
1210N67B	7	4110	188	7.99%	
	28	4380	244	3.29%	
1245N67B	7	4170	222	7.90%	
	28	4320	276	7.87%	
1280N67B	7	4260	263	7.22%	
	28	4550	323	7.98%	
1350N67B	7	4420	303	1.98%	
	28	4520	402	0.75%	

De estos resultados se obtienen dos gráficas que permiten mostrar la relación de los valores de Resistencia a Compresión vs los valores de Velocidad de Pulso Ultrasónico:

Gráfica 5.05. Comparativo de Resistencia a Compresión vs la Velocidad de Pulso Ultrasónico entre el Huso 57 y Huso 67 a 7 días



Gráfica 5.06. Comparativo de Resistencia a Compresión vs la Velocidad de Pulso Ultrasónico entre el Huso 57 y Huso 67 a 28 días



CAPITULO 6: ANÁLISIS

En el presente capítulo se analizará estadísticamente los resultados obtenidos en la etapa de Ensayo en Laboratorio y Ensayo a Escala Industrial, con la finalidad de encontrar el patrón de tendencia que, para cada caso, permita determinar con cierto grado de confiabilidad los menores valores de Porcentajes Residuales, que representan el error en la estimación de la Resistencia a Compresión entre lo esperado y lo obtenido.

6.1 EVALUACIÓN DEL VALOR DE CONFIABILIDAD

Los modelos de aproximación que se probaron para efectuar el ajuste analítico de los datos experimentales se muestran a continuación con sus respectivas ecuaciones representativas:

- Modelo Exponencial: $R = a e^{bV}$
- Modelo Lineal: $R = a + bV$
- Modelo Logarítmico: $R = a \ln(V) + b$
- Modelo Potencial: $R = aV^b$
- Modelo Cúbico: $R = a + bV + cV^2 + dV^3$

En donde:

R = Resistencia a Compresión

V = Velocidad de Pulso Ultrasónico

a, b, c y d = coeficientes de la ecuación

Se considera el Coeficiente de Determinación r^2 como la medida de la confiabilidad del ajuste en la relación de dependencia entre las variables: Velocidad de Pulso Ultrasónico y Resistencia a Compresión (denominados también “V” o “Velocidad” y “R” o “Resistencia”, respectivamente). Este coeficiente permitió elegir el mejor modelo de aproximación, mediante el método de los mínimos cuadrados, dado que representa la razón entre la variación estimada y la variación total. Por definición:

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

6.1.1 MUESTRA

Como se mencionó anteriormente, se trabajó con 2 grupos de resultados, los que fueron producto de las pruebas en Laboratorio y a Escala Industrial, para ambos casos solo se tomaron los resultados de 7 y 28 días de edad. Inicialmente estos se analizaron por separado y luego en combinación, con el fin de encontrar los más altos Coeficientes de Determinación r^2 .

En las tablas contiguas se resumen dichos datos de Velocidad de Pulso Ultrasónico y de Resistencia a Compresión:

Tabla 6.01: Resultados de ensayos obtenidos en la etapa de Laboratorio

	Código de Mezcla Patrón	Edad de Ensayo (días)	Velocidad de pulso promedio (m/s)	f'c promedio (kg/cm ²)
HUSO 57	M1 - 0.5 H57	7	4620	399
	M2 - 0.7 H57	7	4510	256
	M3 - 0.9 H57	7	4070	136
	M1 - 0.5 H57	28	4880	452
	M2 - 0.7 H57	28	4560	311
	M3 - 0.9 H57	28	4290	186
HUSO 67	M4 - 0.5 H67	7	4410	382
	M5 - 0.7 H67	7	4070	211
	M6 - 0.9 H67	7	3840	126
	M4 - 0.5 H67	28	4560	434
	M5 - 0.7 H67	28	4320	270
	M6 - 0.9 H67	28	4140	166

Tabla 6.02: Resultados de ensayos obtenidos en la etapa de Escala Industrial

	Código de Mezcla	Edad de Ensayo (días)	Velocidad de pulso promedio (m/s)	f'c promedio (kg/cm ²)
HUSO 57	1100N57A	7	4070	140
	1140N57A	7	4320	178
	1175N57A	7	4110	157
	1210N57B	7	4260	217
	1245N57B	7	4360	229
	1280N57A	7	4270	246
	1100N57A	28	4340	171
	1140N57A	28	4460	215
	1175N57A	28	4380	197
	1210N57B	28	4480	265
	1245N57B	28	4560	307
	1280N57A	28	4560	298
HUSO 67	1175N67C	7	4210	186
	1210N67B	7	4110	188
	1245N67B	7	4170	222
	1280N67B	7	4260	263
	1350N67B	7	4420	303
	1175N67C	28	4470	242
	1210N67B	28	4380	244
	1245N67B	28	4320	276
	1280N67B	28	4550	323
	1350N67B	28	4520	402

6.1.2 SELECCIÓN DE DATOS

Para facilitar el manejo de los datos se presenta un cuadro con los códigos que permitirán identificar la selección o agrupación de datos a utilizar:

Tabla 6.03: Códigos asignados a selección de datos

Selección de datos	Código para designar selección de datos de:		
	Laboratorio	Escala Industrial	Laboratorio y Escala Industrial
Huso 57 - 7 días	A	A'	A''
Huso 57 - 28 días	B	B'	B''
Huso 67 - 7 días	C	C'	C''
Huso 67 - 28 días	D	D'	D''
Huso 57 - 7 y 28 días	E	E'	E''
Huso 67 - 7 y 28 días	F	F'	F''
Huso 57 y 67 - 7 días	G	G'	G''
Huso 57 y 67 - 28 días	H	H'	H''
Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	I	I'	I''

Se establecieron todas las combinaciones posibles agrupando los resultados que teníamos para los Husos 57 y 67 a las edades de 7 y 28 días, finalmente se combinaron las 4 variables a la vez.

6.1.3 DETERMINACION DEL MODELO DE AJUSTE DE TENDENCIA

Con el criterio anterior se realizó un análisis para determinar cuál de los modelos de curva de ajuste representa mejor la correlación entre Resistencia a Compresión y Velocidad de Pulso Ultrasónico de acuerdo a los la selección de datos establecida.

En las Tablas 6.04, 6.05 y 6.06 se muestran resúmenes de los valores de confiabilidad de cada selección de datos evaluados mediante los diferentes modelos de aproximación estadística, para Laboratorio, Escala Industrial y la integración de los datos de ambos. Destacamos los códigos E, F e I y trabajamos sobre ellos porque se consideran los más representativos para los fines del estudio, en la práctica es factible identificar las variables que los distinguen y además denotan altos coeficientes de determinación como agrupación de datos.

Tomando el Coeficiente de Determinación r^2 , como criterio para juzgar el nivel de ajuste de los diferentes modelos matemáticos, se encontró que las curvas de aproximación más representativas para la relación de las variables estudiadas fueron: la **Exponencial** y la **Cúbica**; en las tablas y gráficas contiguas se muestra el resultado del análisis efectuado.

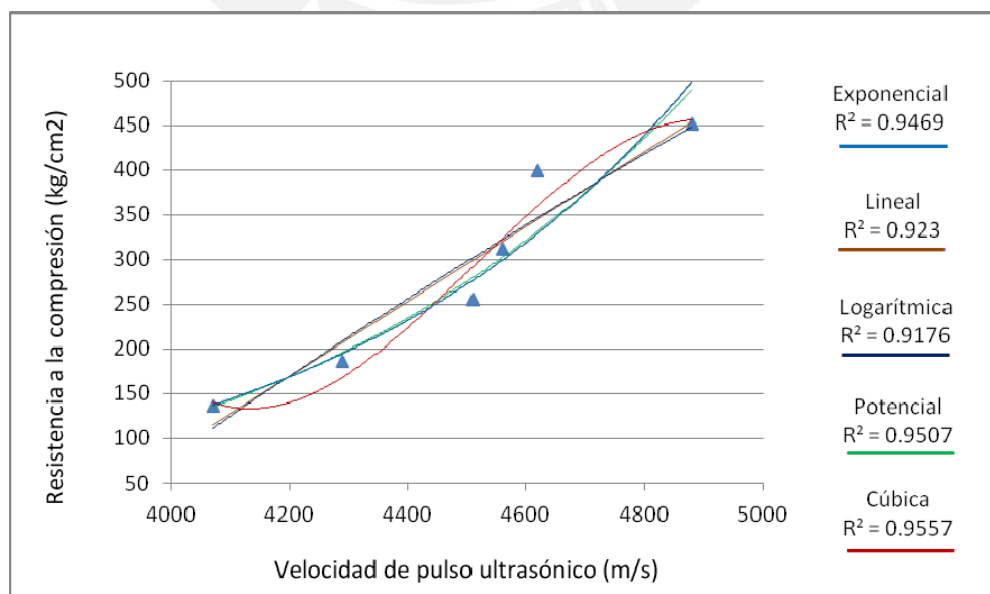
A) Análisis con Resultados de Ensayo en Laboratorio

Tabla 6.04: Valores de confiabilidad en base a datos de Laboratorio

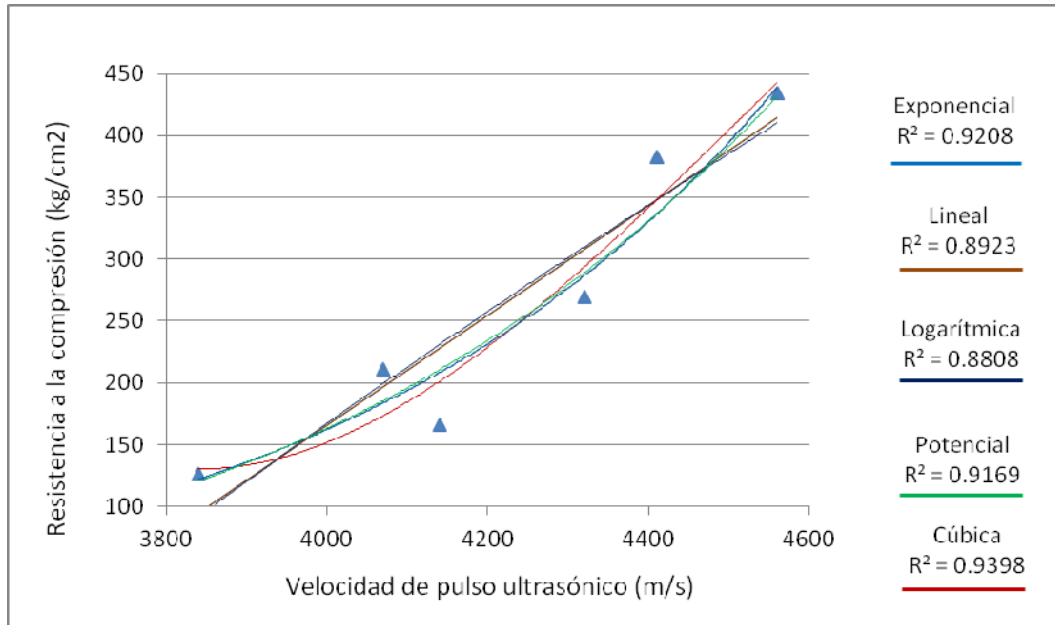
Código	Selección de Datos de Laboratorio	Obtención de r^2 con modelos de regresión estadística				
		Exponencial	Lineal	Logarítmica	Potencial	Cúbica
A	Huso 57 - 7 días	0.9464	0.8593	0.8522	0.9417	1.0000
B	Huso 57 - 28 días	0.9805	0.9998	1.0000	0.9853	1.0000
C	Huso 67 - 7 días	0.9951	0.9935	0.9900	0.9974	1.0000
D	Huso 67 - 28 días	0.9923	0.9977	0.9963	0.9945	1.0000
E	Huso 57 - 7 y 28 días	0.9469	0.9230	0.9176	0.9507	0.9557
F	Huso 67 - 7 y 28 días	0.9208	0.8923	0.8808	0.9169	0.9398
G	Huso 57 y 67 - 7 días	0.7963	0.7571	0.7556	0.7979	0.7623
H	Huso 57 y 67 - 28 días	0.8158	0.8277	0.8341	0.8266	0.8645
I	Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	0.8088	0.7855	0.7812	0.8125	0.8048

En la Tabla 6.04 la aproximación para los códigos A, B, C y D fue realizada solo con 3 datos, resulta ser una muestra poco representativa para aseverar que la predicción de variables pueda ser perfecta, observamos en especial para el modelo de regresión Cúbica que se obtiene un valor de Confiabilidad igual a 1.0 lo cual no significa precisamente que haya una correlación exacta, por lo mismo restamos importancia a los resultados de estos códigos.

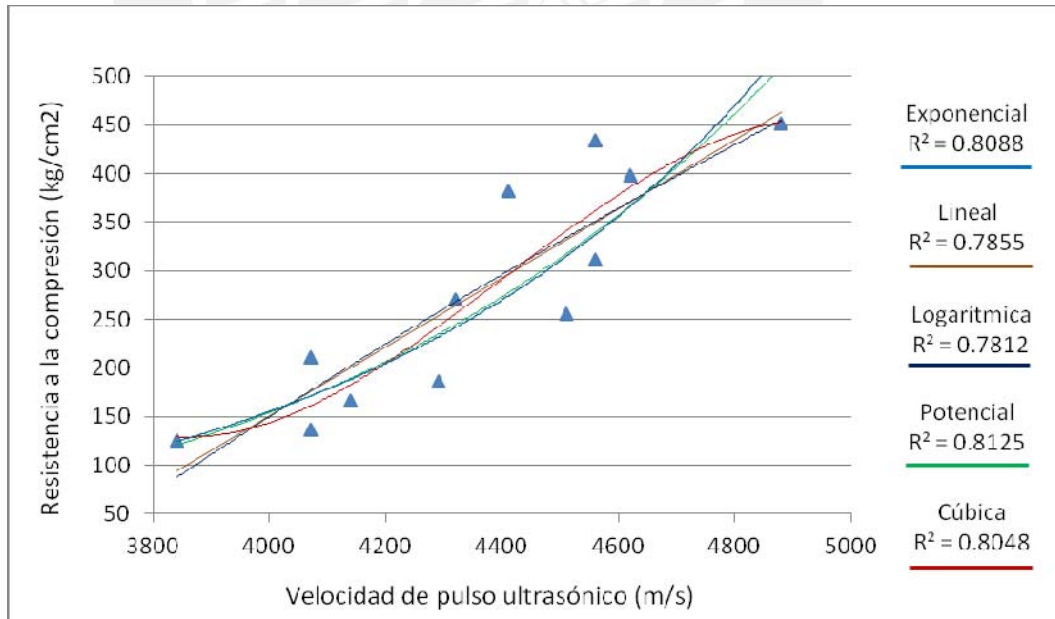
Gráfica 6.01: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos E de Laboratorio



Gráfica 6.02: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos F de Laboratorio



Gráfica 6.03: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos I de Laboratorio

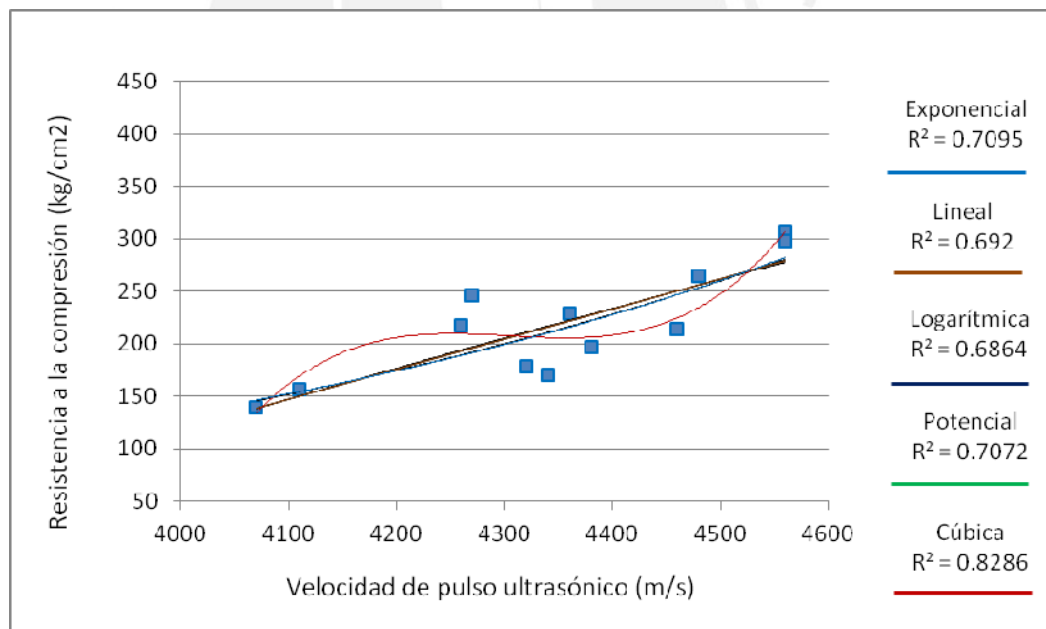


B) Análisis con Resultados de Ensayo a Escala Industrial

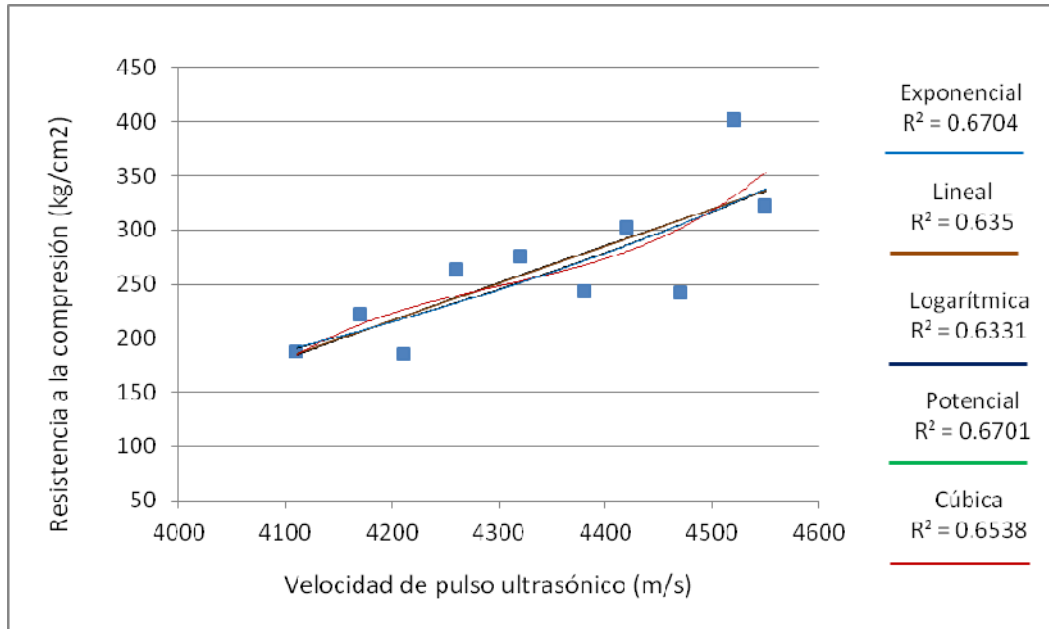
Tabla 6.05: Valores de confiabilidad en base a datos de Escala Industrial

Código	Selección de Datos de Escala Industrial	Obtención de r^2 modelos de regresión estadística				
		Exponencial	Lineal	Logarítmica	Potencial	Cúbica
A'	Huso 57 - 7 días	0.6413	0.5940	0.5981	0.6457	0.7051
B'	Huso 57 - 28 días	0.9492	0.9429	0.9417	0.9491	0.9490
C'	Huso 67 - 7 días	0.7568	0.7988	0.7980	0.7568	0.8253
D'	Huso 67 - 28 días	0.3498	0.3526	0.3496	0.3463	0.5808
E'	Huso 57 - 7 y 28 días	0.7095	0.6920	0.6864	0.7072	0.8286
F'	Huso 67 - 7 y 28 días	0.6704	0.6350	0.6331	0.6701	0.6538
G'	Huso 57 y 67 - 7 días	0.5797	0.5773	0.5777	0.5819	0.7106
H'	Huso 57 y 67 - 28 días	0.4554	0.4295	0.4271	0.4530	0.6251
I'	Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	0.5766	0.5477	0.5449	0.5779	0.6017

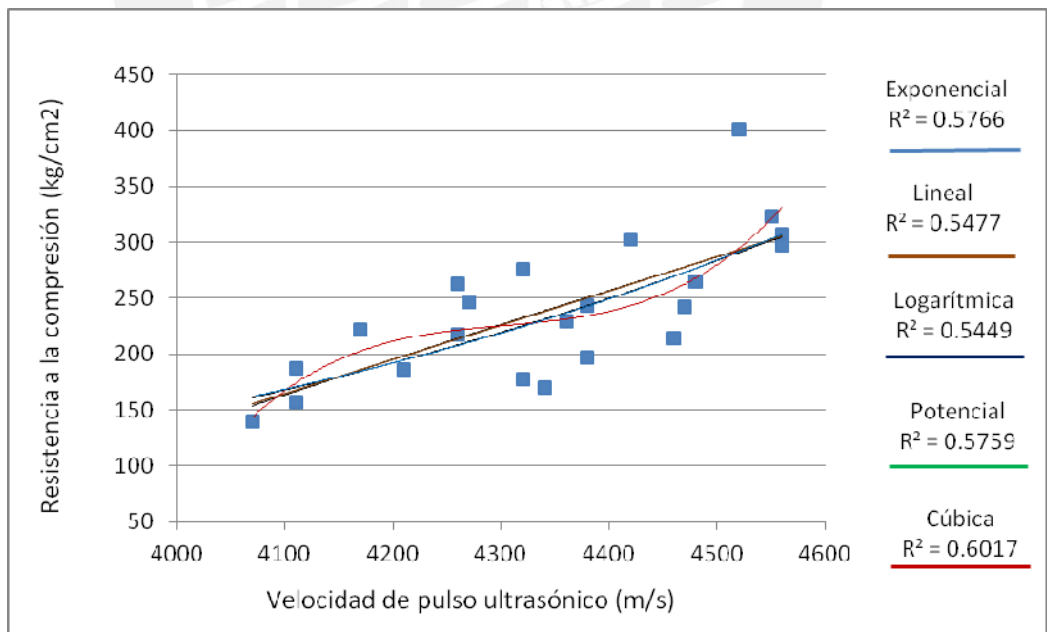
Gráfica 6.04: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos E' de Escala Industrial



Gráfica 6.05: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos F' de Escala Industrial



Gráfica 6.06: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos I' de Escala Industrial

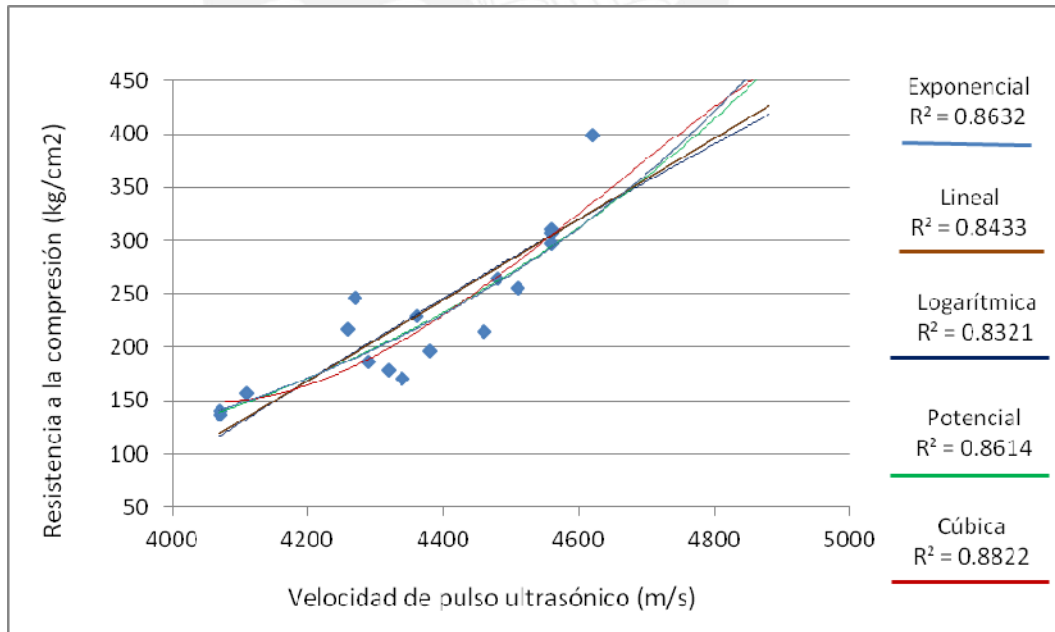


C) Análisis con Integración de Resultados de Ensayos en Laboratorio y a Escala Industrial

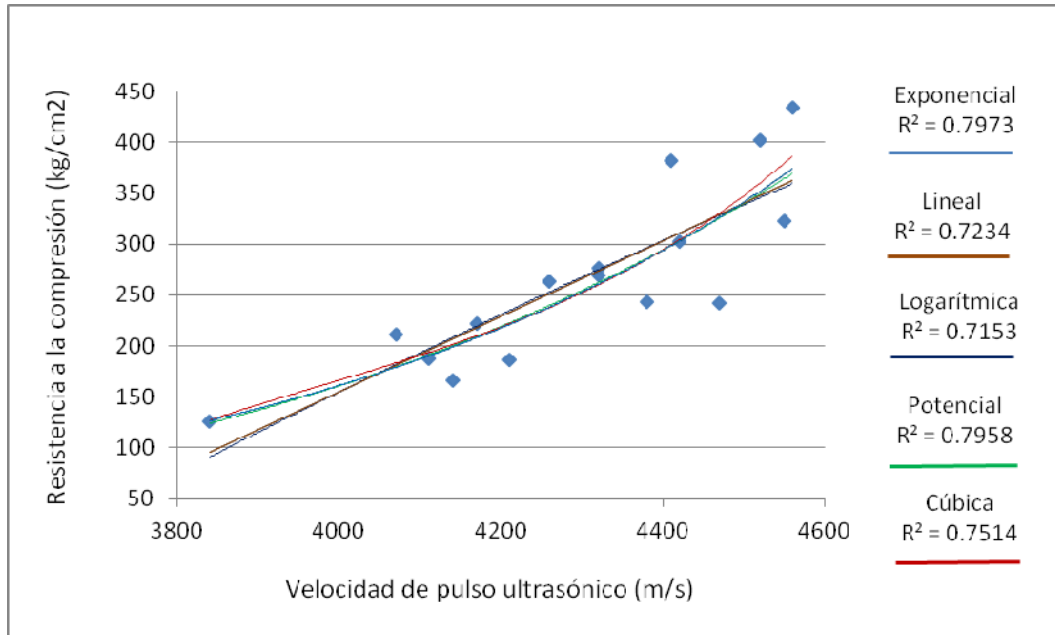
Tabla 6.06: Valores de confiabilidad en base a Integración de datos de Laboratorio y Escala Industrial

Código	Selección de Datos de Laboratorio y Escala Industrial	Obtención de r^2 modelos de regresión estadística				
		Exponencial	Lineal	Logarítmica	Potencial	Cúbica
A"	Huso 57 - 7 días	0.8609	0.8217	0.8148	0.8602	0.9489
B"	Huso 57 - 28 días	0.9203	0.9613	0.9606	0.9260	0.9848
C"	Huso 67 - 7 días	0.8666	0.7977	0.7876	0.8634	0.8556
D"	Huso 67 - 28 días	0.7336	0.6734	0.6699	0.7335	0.7993
E"	Huso 57 - 7 y 28 días	0.8632	0.8433	0.8321	0.8614	0.8822
F"	Huso 67 - 7 y 28 días	0.7973	0.7234	0.7153	0.7958	0.7514
G"	Huso 57 y 67 - 7 días	0.7252	0.6873	0.6791	0.7232	0.7107
H"	Huso 57 y 67 - 28 días	0.6527	0.6533	0.6511	0.6555	0.6748
I"	Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	0.7112	0.6750	0.6663	0.7101	0.6958

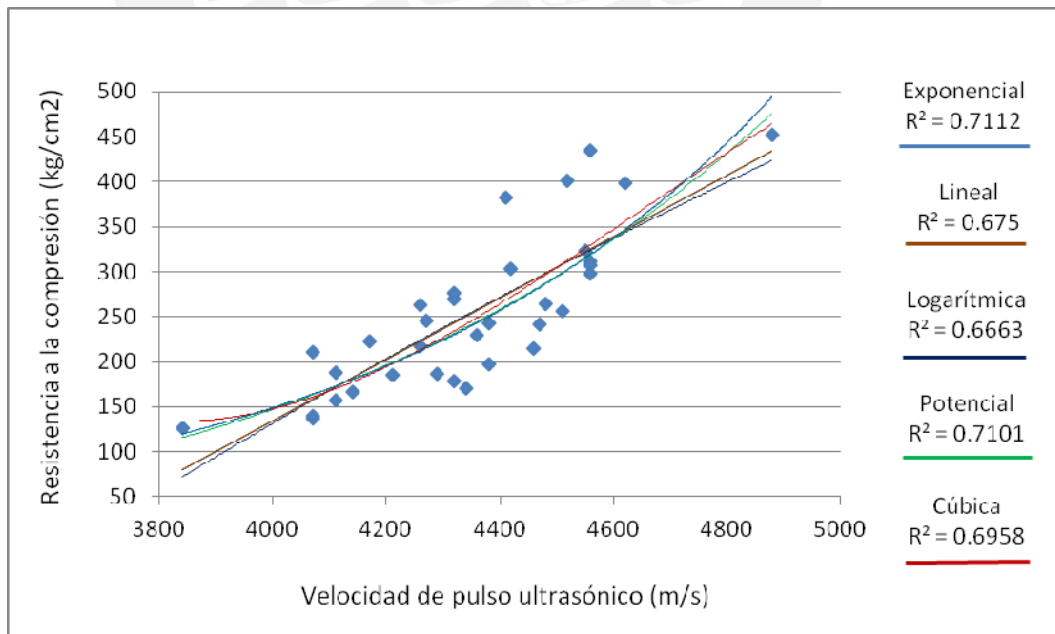
Gráfica 6.07: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos E" de Integración de Laboratorio y Escala Industrial



Gráfica 6.08: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos F'' de Integración de Laboratorio y Escala Industrial



Gráfica 6.09: Curvas de ajuste de tendencia y confiabilidad (r^2) para la selección de datos I'' de Integración de Laboratorio y Escala Industrial



Los Coeficientes de Determinación (r^2) obtenidos, para cada modelo de regresión estadística, confirman una marcada dependencia entre la Resistencia a

Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasónico, como se mencionó, sobre todo en el caso de las curvas **Exponencial** y **Cúbica**, destacando las combinaciones de la selección de datos E y F resaltadas en las tablas y representadas en las gráficas. En el próximo subcapítulo se descarta la selección de datos I, para análisis detallados, dado que, por las características que la conforman, se comprueba que no tiene un grado de confianza conveniente para representar la correlación entre las variables de estudio; en el cierre del siguiente punto se sustenta este razonamiento.

6.2 OBTENCIÓN DE LOS PORCENTAJES RESIDUALES

Es preciso desarrollar un análisis de los Porcentajes Residuales para los dos modelos de aproximación elegidos, con énfasis en la selección de datos E y F, es decir, se requiere identificar el error en la estimación de la Resistencia a Compresión entre lo esperado y lo realmente obtenido, mediante la aplicación de la ecuación de tendencia estructurada para cada selección de datos (con ayuda del Programa de análisis estadístico "R"), a fin de elegir cuál de los modelos es el que provee mayor grado de confianza y por ende representa mejor la correlación entre la Resistencia a Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Se muestra la estructura genérica de las ecuaciones de tendencia a trabajar:

Ecuación de Tendencia Exponencial	$R = e^{(a+bV)}$
-----------------------------------	------------------

Ecuación de Tendencia Cúbica	$R = a + b(V - \bar{V}) + c(V - \bar{V})^2 + d(V - \bar{V})^3$
------------------------------	--

En donde:

R = Resistencia a Compresión estimada con la ecuación de tendencia

V = Velocidad de Pulso Ultrasónico obtenida en ensayos

a, b, c y d = coeficientes de la ecuación

\bar{V} = promedio de las Velocidades de Pulso Ultrasónico con las que se obtuvo la ecuación de tendencia

Para cada caso se determinaron los coeficientes de la ecuación con el Programa "R" (software libre para aplicación de estadística informática), empleando para ello los datos correspondientes a cada Selección de datos. Con ello la Resistencia a Compresión estimada (**Resistencia estimada**) es obtenida al ingresar a la

ecuación con el valor de Velocidad de Pulso Ultrasónico registrado en los ensayos previos (**Velocidad medida**), finalmente el **Porcentaje Residual** se hallará al calcular la diferencia entre la Resistencia registrada en los ensayos previos (**Resistencia real**) y la Resistencia estimada expresada en porcentaje respecto de la Resistencia real.

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

Con las definiciones anteriores se presentan las siguientes tablas donde se detallan las diferencias porcentuales, resaltando los valores máximos, para los datos que conforman cada selección.

6.2.1 ANÁLISIS CON MODELO DE APROXIMACIÓN EXPONENCIAL

Ecuación de Tendencia E	$R = e^{(-1.569643+0.001595V)}$
--------------------------------	---------------------------------

Tabla 6.07: Porcentajes Residuales, para selección de datos E (Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Laboratorio

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm ²)	Resistencia real (kg/cm ²)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje Residual (%)
4620	330	399	69	17%
4510	277	256	-21	-8%
4070	137	136	-1	-1%
4880	500	452	-48	-11%
4560	300	311	11	4%
4290	195	186	-9	-5%

Ecuación de Tendencia F

$$R = e^{(-2.0172122+0.0017766V)}$$

Tabla 6.08: Porcentajes Residuales, para selección de datos F
(Huso 67 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Laboratorio

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)
4410	336	382	46	12%
4070	184	211	27	13%
3840	122	126	4	3%
4560	439	434	-5	-1%
4320	286	270	-17	-6%
4140	208	166	-42	-25%

Ecuación de Tendencia E'

$$R = e^{(-0.4480986+0.0013355V)}$$

Tabla 6.09: Porcentajes Residuales, para selección de datos E'
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4070	147	140	-7	-5%
4320	205	178	-27	-15%
4110	155	157	2	1%
4260	189	217	28	13%
4360	216	229	13	6%
4270	191	246	55	22%
4340	210	171	-40	-23%
4460	247	215	-32	-15%
4380	222	197	-25	-13%
4480	253	265	11	4%
4560	282	307	25	8%
4560	282	298	16	5%

Ecuación de Tendencia F'	$R = e^{(-0.0558167+0.0012921V)}$
--------------------------	-----------------------------------

Tabla 6.10: Porcentajes Residuales, para selección de datos F'
(Huso 67 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm ²)	Resistencia real (kg/cm ²)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje Residual (%)
4210	218	186	-32	-17%
4110	191	188	-4	-2%
4170	207	222	15	7%
4260	232	263	31	12%
4420	286	303	17	6%
4470	305	242	-63	-26%
4380	271	244	-28	-11%
4320	251	276	25	9%
4550	338	323	-15	-5%
4520	325	402	76	19%

Ecuación de Tendencia E''	$R = e^{(-1.1743937+0.0015040V)}$
---------------------------	-----------------------------------

Tabla 6.11: Porcentajes Residuales, para selección de datos E''
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos integrando resultados
de Laboratorio y Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm ²)	Resistencia real (kg/cm ²)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje Residual (%)
4620	322	399	77	19%
4510	273	256	-17	-7%
4070	141	136	-4	-3%
4070	141	140	-1	-1%
4320	205	178	-27	-15%
4110	149	157	7	4%
4260	187	217	30	14%
4360	218	229	12	5%
4270	190	246	56	23%
4880	476	452	-24	-5%
4560	294	311	17	6%
4290	196	186	-10	-5%
4340	211	171	-41	-24%
4460	253	215	-39	-18%
4380	224	197	-27	-14%
4480	261	265	4	2%
4560	294	307	13	4%
4560	294	298	4	1%

Ecuación de Tendencia F''	$R = e^{(-0.9267880+0.0015022V)}$
---------------------------	-----------------------------------

Tabla 6.12: Porcentajes Residuales, para selección de datos F''
(Huso 67 - 7 y 28 días) obtenidos integrando resultados
de Laboratorio y Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm ²)	Resistencia real (kg/cm ²)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje Residual (%)
4410	298	382	84	22%
4070	179	211	32	15%
3840	127	126	-1	-1%
4210	221	186	-35	-19%
4110	190	188	-2	-1%
4170	208	222	14	6%
4260	238	263	25	10%
4420	303	303	0	0%
4560	374	434	61	14%
4320	261	270	9	3%
4140	199	166	-33	-20%
4470	326	242	-84	-35%
4380	285	244	-42	-17%
4320	261	276	15	6%
4550	368	323	-45	-14%
4520	352	402	50	12%

6.2.2 ANÁLISIS CON MODELO DE APROXIMACIÓN CÚBICA

Ecuación de Tendencia E	$R=2.782*10^2+6.347*10^{-1}*(V-4488.33)+1.132*10^{-4}*(V-4488.33)^2-1.468*10^{-6}*(V-4488.33)^3$
-------------------------	--

Tabla 6.13: Porcentajes Residuales, para selección de datos E
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Laboratorio

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4620	360	399	38	10%
4510	292	256	-36	-14%
4070	140	136	-4	-3%
4880	456	452	-4	-1%
4560	324	311	-12	-4%
4290	168	186	18	10%

Ecuación de Tendencia F	$R=2.407*10^2+5.129*10^{-1}*(V-4223.33)+4.115*10^{-4}*(V-4223.33)^2-4.567*10^{-7}*(V-4223.33)^3$
-------------------------	--

Tabla 6.14: Porcentajes Residuales, para selección de datos F
(Huso 67 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Laboratorio +

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4410	348	382	34	9%
4070	173	211	38	18%
3840	130	126	-4	-3%
4560	443	434	-8	-2%
4320	294	270	-24	-9%
4140	201	166	-35	-21%

Ecuación de Tendencia E'	$R=2.057*10^2-1.565*10^{-2}*(V-4347.5)+8.836*10^{-4}*(V-4347.5)^2+6.719*10^{-6}*(V-4347.5)^3$
--------------------------	---

Tabla 6.15: Porcentajes Residuales, para selección de datos E'
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4070	135	140	5	4%
4320	207	178	-29	-16%
4110	169	157	-13	-8%
4260	209	217	8	4%
4360	206	229	24	10%
4270	209	246	37	15%
4340	206	171	-35	-21%
4460	225	215	-10	-5%
4380	206	197	-9	-5%
4480	235	265	30	11%
4560	307	307	1	0%
4560	307	298	-9	-3%

Ecuación de Tendencia F'	$R=2.576*10^2+2.371*10^{-1}*(V-4341)+3.945*10^{-4}*(V-4341)^2+3.186*10^{-6}*(V-4341)^3$
--------------------------	---

Tabla 6.16: Porcentajes Residuales, para selección de datos F'
(Huso 67 - 7 y 28 días) obtenidos en ensayos en Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4210	226	186	-40	-22%
4110	185	188	3	2%
4170	213	222	10	4%
4260	239	263	24	9%
4420	280	303	23	7%
4470	302	242	-59	-24%
4380	268	244	-24	-10%
4320	253	276	23	8%
4550	353	323	-30	-9%
4520	331	402	71	18%

Ecuación de Tendencia E''	$R=2.280*10^2+4.196*10^{-1}*(V-4394.44)+3.761*10^{-4}*(V-4394.44)^2-5.145*10^{-7}*(V-4394.44)^3$
---------------------------	--

Tabla 6.17: Porcentajes Residuales, para selección de datos E''
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos integrando resultados
de Laboratorio y Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm2)	Resistencia real (kg/cm2)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm2)	Porcentaje Residual (%)
4620	336	399	63	16%
4510	281	256	-25	-10%
4070	149	136	-13	-9%
4070	149	140	-10	-7%
4320	199	178	-21	-12%
4110	151	157	6	4%
4260	180	217	38	17%
4360	214	229	15	7%
4270	183	246	64	26%
4880	462	452	-10	-2%
4560	305	311	6	2%
4290	189	186	-3	-1%
4340	206	171	-36	-21%
4460	257	215	-42	-20%
4380	222	197	-25	-13%
4480	266	265	-2	-1%
4560	305	307	2	1%
4560	305	298	-8	-3%

Ecuación de Tendencia F''	$R=2.509*10^{-2}+3.723*10^{-1}*(V-4296.88)+4.244*10^{-4}*(V-4296.88)^2-4.438*10^{-7}*(V-4296.88)^3$
---------------------------	---

Tabla 6.18: Porcentajes Residuales, para selección de datos F''
(Huso 57 - 7 y 28 días) obtenidos integrando resultados
de Laboratorio y Escala Industrial

Velocidad medida (m/s)	Resistencia estimada (kg/cm ²)	Resistencia real (kg/cm ²)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje Residual (%)
4410	299	382	83	22%
4070	183	211	28	13%
3840	127	126	-1	-1%
4210	221	186	-36	-19%
4110	193	188	-6	-3%
4170	210	222	13	6%
4260	238	263	26	10%
4420	304	303	-1	0%
4560	386	434	48	11%
4320	260	270	10	4%
4140	201	166	-35	-21%
4470	330	242	-88	-36%
4380	285	244	-42	-17%
4320	260	276	16	6%
4550	380	323	-57	-18%
4520	360	402	41	10%

6.2.3 SOBREALORACIÓN Y SUBVALORACIÓN

Entre los resultados de los porcentajes residuales se observa que los mayores valores obtenidos fueron en algunos casos **positivos** y en otros **negativos**, es decir que la diferencia entre la Resistencia real y la Resistencia estimada (obtenida al aplicar la ecuación de tendencia correspondiente) fue **Subvalorada** y **Sobrevalorada**, respectivamente.

Para los porcentajes residuales obtenidos con los dos modelos de aproximación, se observa que el mayor valor de cada caso estudiado (resumen en Tablas 6.19 y 6.20) es mayoritariamente una estimación sobrevalorada, es decir que la Resistencia estimada mediante la aproximación es mayor a la real, por lo que se puede decir que estamos sobreestimando la resistencia del concreto. Incurrir en esta situación es un tema delicado, ya que llevaría a cometer un error grave, con el que podríamos aceptar un concreto que no cumpla con el requerimiento de Resistencia a Compresión necesario y el consecuente riesgo estructural; este punto se tomará en consideración para las conclusiones sobre el estudio.



Tabla 6.19: Porcentajes Residuales máximos de Sobrevaloración y Subvaloración para selección de datos E y F con aproximación Exponencial

Fuente de datos	Huso 57 - 7 y 28 días (E)				Huso 67 - 7 y 28 días (F)			
	Sobrevaloración		Subvaloración		Sobrevaloración		Subvaloración	
	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)
Laboratorio	-48	11%	69	17%	-42	25%	27	13%
Producción	-40	23%	56	22%	-63	26%	76	19%
Laboratorio y Producción	-41	24%	56	23%	-84	35%	84	25%

Tabla 6.20: Porcentajes Residuales máximos de Sobrevaloración y Subvaloración para selección de datos E y F con aproximación Cúbica

Fuente de datos	Huso 57 - 7 y 28 días (E)				Huso 67 - 7 y 28 días (F)			
	Sobrevaloración		Subvaloración		Sobrevaloración		Subvaloración	
	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)	Diferencia de Resistencia: real - estimada (kg/cm ²)	Porcentaje respecto a la Resistencia real (%)
Laboratorio	-36	14%	18	10%	-35	21%	38	18%
Producción	-35	21%	37	15%	-59	24%	71	18%
Laboratorio y Producción	-36	21%	64	26%	-88	36%	83	22%

6.2.4 PORCENTAJES RESIDUALES MÁXIMOS

En las Tablas 6.21 y 6.22 se muestran los resúmenes completos de las selecciones de datos evaluadas con cada modelo de aproximación: Exponencial, desarrollado anteriormente en Tablas 6.07 a la 6.12 y Cúbica, desarrollado anteriormente en Tablas 6.13 a la 6.18. Cada valor indicado representa el porcentaje residual máximo en valor absoluto.

Haciendo la comparación entre los porcentajes residuales de ambos modelos de aproximación observamos que la **Aproximación Cúbica** ofrece menores valores de diferencia entre la Resistencia real y la Resistencia estimada, por ende le conferimos un grado de confiabilidad mayor en cuanto a la correlación de las variables en estudio. Los porcentajes de diferencia para este modelo, en base a la selección de datos E y F, obtenidos experimentalmente, oscila entre 14% y 36%, mientras que para la selección de datos I se tiene porcentajes residuales entre 33% y 42% con el mismo modelo.

Tabla 6.21: Porcentaje residual máximo para la Aproximación Exponencial

Código	Selección de Datos	Porcentaje residual máximo obtenido de:		
		Laboratorio	Escala Industrial	Laboratorio y Escala Industrial
A	Huso 57 - 7 días	15%	23%	22%
B	Huso 57 - 28 días	7%	9%	13%
C	Huso 67 - 7 días	4%	18%	25%
D	Huso 67 - 28 días	5%	24%	31%
E	Huso 57 - 7 y 28 días	17%	23%	24%
F	Huso 67 - 7 y 28 días	25%	26%	35%
G	Huso 57 y 67 - 7 días	29%	33%	35%
H	Huso 57 y 67 - 28 días	25%	27%	32%
I	Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	84%	80%	39%

Tabla 6.22: Porcentaje residual máximo para la Aproximación Cubica

Código	Selección de Datos	Porcentaje residual máximo obtenido de:		
		Laboratorio	Escala Industrial	Laboratorio y Escala Industrial
A	Huso 57 - 7 días	0%	25%	21%
B	Huso 57 - 28 días	0%	10%	8%
C	Huso 67 - 7 días	0%	18%	20%
D	Huso 67 - 28 días	0%	20%	20%
E	Huso 57 - 7 y 28 días	14%	21%	26%
F	Huso 67 - 7 y 28 días	21%	24%	36%
G	Huso 57 y 67 - 7 días	35%	24%	38%
H	Huso 57 y 67 - 28 días	20%	28%	29%
I	Huso 57 y 67 - 7 y 28 días	33%	34%	42%

CAPITULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En base a los objetivos planteados al inicio y de acuerdo al estudio experimental desarrollado en los capítulos anteriores, se presentan las siguientes conclusiones relevantes:

- El Ensayo de Ultrasonido en el concreto resulta ser una prueba sencilla y rápida de realizar, sin embargo sus resultados están influenciados por varios factores internos (propios del material) y externos (propios de las condiciones de ensayo).
- Para la mayoría de casos estudiados (selección de datos), este método de ensayo no destructivo demostró tener altos Coeficientes de Determinación (r^2), que confirman una marcada dependencia entre la Resistencia a Compresión y la Velocidad de Pulso Ultrasónico, lo cual valida la primera hipótesis de la presente investigación. Considerando los resultados de Laboratorio y de Escala Industrial de la selección de datos E (Huso 57 – 7 y 28 días) y F (Huso 67 – 7 y 28 días), los valores de r^2 están comprendidos en un rango de: 0.63 a 0.96.
- Entre los modelos de aproximación estadística estudiados, el de mayor éxito, para representar los patrones de comportamiento de concretos con características similares a los del estudio, resultó ser el **modelo de aproximación Cúbica**. Su efectividad, medida por el error en la estimación de la Resistencia a Compresión (Porcentaje Residual) en base a la medición de la Velocidad de Pulso Ultrasónico, se detalla como sigue:
 - 1- En base a datos obtenidos en **Laboratorio** (condiciones controladas), el error resulta alrededor de **+/-14%**, al trabajar con concretos elaborados con el TMN 1" de agregado grueso, equivalente al **Huso 57**, aplicando la siguiente expresión:

$$R=2.782*10^2+6.347*10^{-1}*(V-4488.33)+1.132*10^{-4}*(V-4488.33)^2-1.468*10^{-6}*(V-4488.33)^3$$
 - 2- En base a datos obtenidos en **Laboratorio** (condiciones controladas), el error resulta alrededor de **+/-21%**, al trabajar con concretos elaborados

con el TMN 3/4" de agregado grueso, equivalente al **Huso 67**, aplicando la siguiente expresión:

$$R=2.407*10^2+5.129*10^{-1}*(V-4223.33)+4.115*10^{-4}*(V-4223.33)^2-4.567*10^{-7}*(V-4223.33)^3$$

- 3- En base a datos obtenidos en **Escala Industrial** (producción), el error resulta alrededor de **+/-21%**, al trabajar con concretos elaborados con el TMN 1" de agregado grueso, equivalente al **Huso 57**, aplicando la siguiente expresión:

$$R=2.057*10^2-1.565*10^{-2}*(V-4347.5)+8.836*10^{-4}*(V-4347.5)^2+6.719*10^{-6}*(V-4347.5)^3$$

- 4- En base a datos obtenidos en **Escala Industrial** (producción), el error resulta alrededor de **+/-24%**, al trabajar con concretos elaborados con el TMN 3/4" de agregado grueso, equivalente al **Huso 67**, aplicando la siguiente expresión:

$$R=2.576*10^2+2.371*10^{-1}*(V-4341)+3.945*10^{-4}*(V-4341)^2+3.186*10^{-6}*(V-4341)^3$$

- Se tiene una alternativa de estimación, si se desconociera el TMN del agregado grueso (entre **Huso 57 o Huso 67**) y la edad, en el caso de concretos obtenidos a **Escala Industrial**, donde el error resulta alrededor de **+/-34%**, aplicando la siguiente expresión:

$$R=2.294*10^2+1.129*10^{-1}*(V-4344.545)+6.210*10^{-4}*(V-4344.545)^2+4.870*10^{-6}*(V-4344.545)^3$$

- Se comprueba que la influencia del TMN del agregado grueso en la Velocidad de Pulso Ultrasónico se manifiesta directamente proporcional al tamaño del agregado, es decir, para un mismo valor de Resistencia a Compresión se tiene mayor Velocidad de Pulso Ultrasónico en un concreto con Huso 57 (TMN 1") respecto de uno con Huso 67 (TMN 3/4"); lo cual confirma una de las hipótesis de la presente investigación.
- Se comprueba que la influencia de la relación Agua/Cemento en la Velocidad de Pulso Ultrasónico es inversamente proporcional, es decir para una misma edad se tiene mayor Velocidad de Pulso Ultrasónico en un

concreto con $A/C = 0.5$ respecto de uno con $A/C = 0.9$; lo cual confirma otra de las hipótesis de la presente investigación.

- Basándonos en los cuadros de clasificación de la calidad del concreto, planteados por las investigaciones tanto de Leslie y Cheesman (Tabla 2.04) como de Agraval (Tabla 2.05), tenemos que los concretos utilizados son clasificados en las categorías de: “Bueno a Excelente” y “Bueno”, respectivamente.
- Aunque la experiencia pone en evidencia que el ensayo no destructivo estudiado constituye una herramienta útil para estimar la calidad del concreto endurecido (con cierto grado de confiabilidad), en ningún caso va a reemplazar al Ensayo de Resistencia a Compresión.

RECOMENDACIONES

- Para mayor precisión en la determinación del tiempo de propagación del Pulso Ultrasónico (obtenido con el equipo de Ultrasonido), se sugiere realizar 5 mediciones en cruz en la probeta cilíndrica, a manera de cubrir el área de la sección, de esta manera no solo se tendrá un punto como referencia representativa del espécimen en evaluación, tomando en cuenta que el material en estudio es anisotrópico.
- Si se trabajara con agregados y cementantes distintos a los estudiados, se sugiere replicar la experiencia sobre el concreto obtenido, de preferencia a Escala Industrial (muestreo sobre el tercio central de la carga del mixer), mejor aún si es el mismo concreto que se utiliza en la construcción de un proyecto determinado para hacer posteriormente verificaciones en obra.
- Considerar evaluaciones de testigos a más de 28 días (60 y/o 90 días por ejemplo), a fin de tener un respaldo para confirmar dudas o variaciones sobre resultados a edades posteriores de los controles habituales.
- Para mejorar el nivel de confianza y reducir el porcentaje de error en la estimación de la Resistencia a Compresión, se sugiere considerar un tamaño de muestra mayor en el análisis de datos, como mínimo evaluar 75 resultados (considerando que un resultado es el promedio del ensayo de

dos o tres probetas según el tamaño de probeta empleado), con ello se podrá hacer un análisis estadístico representativo y obtener resultados más consistentes.

- En base a trabajo práctico continuo, que complemente y confirme los resultados obtenidos, este estudio puede ser tomado como un documento técnico de referencia para que lo apliquen empresas e instituciones relacionadas con el ámbito de la construcción con concreto.



CAPITULO 8: LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En aras de mejorar la correlación obtenida, esperamos que el presente estudio pueda servir como referencia para generar futuras investigaciones, las cuales complementen y afinen el modelo de aproximación ya definido, al trabajar con otras variables influyentes en la estimación de la Resistencia a Compresión del concreto en base a la determinación de la Velocidad del Pulso Ultrasónico.

Conforme se hizo el desarrollo del trabajo experimental se presentaron algunas ideas para la ejecución de estudios futuros, que logren mayores avances en el control de calidad de los concretos mediante el empleo del equipo de Ultrasonido, se recomienda tomar en cuenta los puntos que se mencionan a continuación:

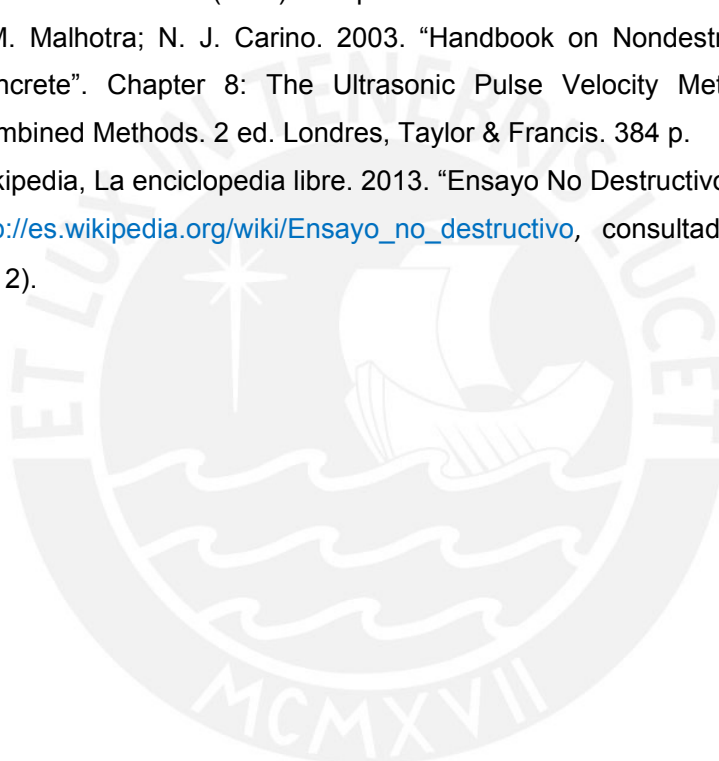
- Evaluación de la influencia del acero de refuerzo en la Velocidad de Pulso Ultrasónico.
- Evaluación de la influencia de la presencia de vacíos en la Velocidad de Pulso Ultrasónico (por ejemplo simulación de cangrejeras).
- Evaluación de la influencia de las condiciones de humedad del concreto en la Velocidad de Pulso Ultrasónico.
- Evaluación de la influencia de un proceso incompleto de curado en la Velocidad de Pulso Ultrasónico.
- Aplicación práctica del control de Velocidad de Pulso Ultrasónico en relación a la calidad del concreto durante la construcción.
- Localización y determinación de fisuras, vacíos, porosidad o defectos similares en estructuras de concreto.
- Monitoreo del cambio de las propiedades del concreto para una misma estructura en un tiempo prolongado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. Daniel Torrealva Dávila. 2007. "Reparación y Refuerzo de Estructuras de Concreto y Mampostería". Apuntes de Curso de Especialización organizado por el Capítulo ACI Perú. 130 p.
14. Edgardo Urtubey; Ricardo. Schiava; Miguel. Cárdenas. 2009. "Correlación de la resistencia a compresión entre rotura con prensa y ensayos de ultrasonido". Revista Hormigonar (Argentina), 6 (19): pp 36-40.
15. Enrique Pasquel Carbajal. 1997. "Tópicos de Tecnología del Concreto". 2 ed. Consejo Nacional del Colegio de Ingenieros del Perú. 374 p.
16. Enrique Rivva López. 2000. "Naturaleza y Materiales del Concreto". 1 ed. Perú. Capítulo Peruano ACI. 390 p.
17. Enrique Rivva López. 2010. "Diseño de Mezclas". 1 ed. Perú. Fondo editorial Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). 192 p

18. Humboldt. 1998. "Catálogo para ASTM C597 – Sistema de Ensayo de Velocidad de Pulso PUNDIT". (Disponible en: <http://humboltdemexico.com/>, consultado en diciembre 2011)
19. Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI (Perú). "Información Económica - Sector Construcción". (Disponible en: <http://www.inei.gob.pe/>, consultado en febrero 2013).
20. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores en Occidente (ITESO). 2011. "Principios de Ultrasonido y Aplicaciones". (Disponible en: <http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/ultrason.pdf>, consultado en octubre 2011).
21. International Atomic Energy Agency. 2002. "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures" Chapter 11: Ultrasonic Testing. Training Course Series No. 17 (Viena, Austria): pp. 100-112.
22. John H. Bungey; Stephen G. Millard; Michael G. Grantham. 2006. "Testing of Concrete in Structures". Chapter 3: Ultrasonic pulse velocity methods. 4 ed. Londres, Taylor & Francis. Pp 53-81.
23. José Luis Zúñiga F. (Gerente General). 2011 y 2012. "Información sobre equipos PROCEQ para ensayos no destructivos en concreto y el equipo ultrasónico de ensayos PUNDIT LAB". JLZ-Logística S.A.C. Lima 41, Perú. (Comunicación personal)
24. L. Peña; E. Vidaud. 2012. "Técnica para estimar la calidad del concreto endurecido". Revista Construcción y Tecnología en Concreto (Disponible en: <http://www.imcyc.com/revistacyt/nov11/arttecnologia.html>, consultado en octubre 2012).
25. Percy Pacheco Terzy. 2006. "Estudio de base para la determinación de las curvas de velocidad de propagación y su relación con las probables resistencias del concreto endurecido a partir de especímenes obtenidos de los mixers de UNICON". Informe para el Centro de Investigación Tecnológica del Cemento y el Concreto (CITEDEC). 109 p.
26. Ricardo A. Casali; Maria A. Caravaca; Carolina Acevedo; Julio C. Miño; Marcela Bizzotto; Roberto Torra. 2007. "Predicción de la Resistencia a la Compresión y Determinación de Propiedades Estructurales a partir de Ensayos no Destructivos". Ponencia presentada en IV Conferencia Panamericana de END organizada por AAENDE. Buenos Aires. 12 p.
27. Romel G. Solís; Éric I. Moreno; William R. Castillo. 2004. "Predicción de la Resistencia del Concreto con base en la Velocidad de Pulso Ultrasónico y un Índice de Calidad de los Agregados". Revista Ingeniería (México), 8 (2): pp 41-52.

28. Romel G. Solís; Julio Baeza. 2003. “Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto”. Revista técnica de la facultad de Ingeniería Universidad del Zulia (Venezuela), 26 (1).
29. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (México). “Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la velocidad de pulso – Método de Ultrasonido” (Norma NMX-C-275)
30. Steven Kosmatka; Beatrix Kerkhoff; William Panarese; Jussara Tanesi. 2004. “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”. 1 ed. México, editorial Portland Cement Association (PCA). 456 p.
31. V.M. Malhotra; N. J. Carino. 2003. “Handbook on Nondestructive Testing of Concrete”. Chapter 8: The Ultrasonic Pulse Velocity Method; Chapter 9: Combined Methods. 2 ed. Londres, Taylor & Francis. 384 p.
32. Wikipedia, La enciclopedia libre. 2013. “Ensayo No Destructivo”, (Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_no_destructivo, consultado en noviembre 2012).



ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 01.01	Cronograma - Etapa Preliminar
Anexo 01.02	Cronograma - Etapa I: Laboratorio
Anexo 01.01	Cronograma - Etapa II: Escala Industrial
Anexo 02	Informe de control de calidad del cemento
Anexo 03.01	Características físicas del agregado grueso (Huso 57)
Anexo 03.02	Características físicas del agregado grueso (Huso 67)
Anexo 04	Características físicas del agregado fino
Anexo 05	Hoja técnica del aditivo Polyheed 770R
Anexo 06	Hoja técnica del aditivo Plastiment TM27
Anexo 07.01	Diseño de mezcla patrón M1 - 0.5H57
Anexo 07.02	Diseño de mezcla patrón M2 - 0.7H57
Anexo 07.03	Diseño de mezcla patrón M3 - 0.9H57
Anexo 07.04	Diseño de mezcla patrón M4 - 0.5H67
Anexo 07.05	Diseño de mezcla patrón M5 - 0.7H67
Anexo 07.06	Diseño de mezcla patrón M6 - 0.9H67