

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

Curvas de relación de la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño.

Para optar el Título profesional de

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

Bachiller: Cristhian Germán Saucedo Abanto

Asesor: Miguel Ángel Mosqueira Moreno

Cajamarca – Perú

2017

COPYRIGHT © 2017 by
CRISTHIAN GERMÁN SAUCEDO ABANTO

Todos los derechos reservados

...Mi objetivo, mi gran meta, mi Norte

Agradecimientos

Esta tesis no se hubiera completado sin la ayuda de todos los que, directamente o indirectamente, estuvieron involucrados en mi trabajo y satisfactoriamente contribuyeron para su conclusión. Entre los diferentes apoyos, quisiera expresar mi gratitud a:

- Dr. Miguel Mosqueira, mi asesor. Por su exigencia, apoyo y confianza como amigo para desarrollar esta investigación.
- A mis amigos del grupo de investigación Engineering & Heritage por ayudarme durante las pruebas, y por su constante apoyo.
- Al Laboratorio de Estructuras de la PUCP, por la disponibilidad de sus instalaciones y equipos, al Sr. Javier, Erick y Alfredo por su colaboración durante las pruebas mecánicas.

Y finalmente quisiera hacer un especial agradecimiento a mi familia:

- A mis padres por su apoyo e insistencia constante para motivarme a desarrollar y escribir esta investigación. En ningún momento dudaron que podía sacar esto adelante.
- A ti mi Andrea, una vez más estas en otro paso importante en mi desarrollo profesional. Por tus ánimos del día a día y por ser mi motivación para hacer un buen trabajo en el tiempo planeado.

Resumen

La propiedad más importante para medir la calidad del concreto es la resistencia a compresión. Sin embargo para poder conocer este valor se recurre a métodos tradicionales de ensayos a compresión uniaxial. En esta investigación se determinaron curvas de relación de la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño. Para ello fue planteada como hipótesis que la relación que existe entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido en concreto es exponencial. Se realizaron ensayos de ultrasonido en muestras de concreto siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C597 y se aplicaron ensayos de compresión uniaxial siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C39 inmediatamente después de los ensayos de ultrasonido en 140 muestras de concreto cabo en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Las muestras de concreto provinieron de diferentes proyectos de construcción de la ciudad de Lima, por lo que personalizan a una gran variabilidad debido a los diferentes diseños de mezclas, relaciones agua cemento, diferencias en agregados, utilización de aditivos, tiempo de curado, etc. Todas las muestras fueron cilindros de concreto de 0.15 m y 0.30 m de altura. Se logró determinar que la base de datos tuvo un rango de edad entre 7 y 58 días. Concretos con densidades entre los 2150 y 2600 Kg/m³ fueron evaluados. El fin estructural también incrementó la variabilidad de las muestras. En este estudio se ha confirmado que existe una relación exponencial entre la resistencia a compresión $F'c$ y la velocidad de onda del ultrasonido UPV del concreto. La expresión obtenida del análisis estadístico concuerda con investigaciones similares en donde el concreto presenta gran variabilidad. A pesar de que el coeficiente de regresión R^2 es de 0.446 este es similar a los encontrados en otros estudios. Además debido a la naturaleza y al origen de las muestras de concreto, estas presentaron una gran variabilidad. Por lo tanto, se estimaron curvas de confiabilidad al 90% de confianza. Se propone utilizar la ecuación $F'c = 2.779e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ como la correlación más adecuada para estimar $F'c$ en función UPV. Con ello, los valores calculados resultan siendo más conservadores que aquellos utilizados mediante las ecuaciones $F'c_{lower} = 1.820e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ ó $F'c_{upper} = 4.246e^{1.04UPV} Kg/cm^2$. Con estas relaciones se puede garantizar la resistencia a compresión mínima del concreto a partir de mediciones con ultrasonido.

Palabras clave: Ultrasonido, resistencia a compresión, curva de relación, concreto.

Abstract

The most important property for measuring the quality of concrete is the compressive strength. However, in order to know this value, traditional and destructive methods like compression test are used. In this research compression curves of the concrete ($F'c$) and the measured ultrasonic wave velocity were determined in concrete samples whose design characteristics are unknown. The hypothesis considered is that if the ultrasonic velocity in concrete increases, also uniaxial compressive strength rises with an exponential relationship. Ultrasound tests were performed on concrete samples following the specifications of ASTM C597 and uniaxial compression tests were performed following the procedures of ASTM C39 immediately after the ultrasonic tests on 140 concrete samples in the Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) structures laboratory. The concrete samples came from different construction projects in Lima city, which customized a great variability due to the different mixtures designs, water/cement ratios, differences in aggregates, use of additives, age, etc. All samples were concrete cylinders of 0.15 m and 0.30 m height. It was determined that the database had an age range between 7 and 58 days. Concretes with densities between 2150 and 2600 Kg / m³ were evaluated. The structural end also increases the variability of the samples. This study confirmed that there is an exponential relationship between the compressive strength $F'c$ and ultrasonic pulse velocity measured in concrete samples. The expression obtained from the statistical analysis agrees with similar research where concrete presents great variability. Although the regression coefficient R^2 0.446 can be considered low, other studies shared similar results. In addition, due to the nature and origin of the concrete samples, they presented great variability. Therefore, reliability curves were estimated at 90% confidence. It is proposed to use the equation $F'c = 2.779e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ as the most adequate correlation to estimate $F'c$ using UPV. Thus, calculated values prove to be more conservative than those calculated with equations $F'c_{lower} = 1.820e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ or $F'c_{upper} = 4.246e^{1.04UPV} Kg/cm^2$. With these relationships, the minimum compressive strength of the concrete can be guaranteed from ultrasonic measurements.

Key words: Ultrasound, compression test, relationship curve, concret.

Índice General

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Índice General	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	x

1 Capítulo I. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.1 Contextualización	1
1.1.2 Formulación del Problema.....	1
1.2 Justificación e importancia	1
1.2.1 Justificación científica	1
1.2.2 Justificación técnica práctica	2
1.2.3 Justificación institucional y personal.....	2
1.3 Delimitación de la Investigación	2
1.4 Limitaciones.....	2
1.5 Objetivos	2
1.5.1 Objetivo General.....	2
1.5.2 Objetivos Específicos	2
1.6 Organización de la Tesis	3
2 Capítulo II. Marco Teórico	4
2.1 Antecedentes teóricos	4
2.1.1 Internacionales.....	4
2.1.2 Nacionales	5
2.2 Bases teóricas.....	5
2.2.1 El concreto	5

2.2.2	Ensayos para determinar $F'c$ del concreto.....	13
2.2.3	Velocidad de pulso ultrasónico (UPV).....	23
3	Capítulo III. Marco metodológico	28
3.1	Hipótesis general.....	28
3.2	Definición de Variables	28
3.3	Operacionalización de los componentes de la hipótesis	28
3.4	Metodología.....	28
3.4.1	Método de investigación.....	28
3.4.2	Población, muestra y unidad de análisis	29
3.4.3	Técnicas e instrumentos de recopilación de información.....	29
3.4.4	Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	29
3.4.5	Equipos empleados	29
3.4.6	Matriz de consistencia metodológica	30
3.5	Aplicación de ensayos de resistencia a compresión y ultrasonido en muestras cilíndricas de concreto	31
3.5.1	Ensayos para el análisis de la relación entre la velocidad de onda ultrasónica y la resistencia a compresión.....	31
3.5.2	Aplicación de los ensayos de resistencia a compresión	32
3.5.3	Aplicación de la prueba de ultrasonido	32
4	Capítulo IV. Resultados y discusión.....	36
4.1	Geometría, edad y densidad de las muestras.	36
4.2	Resistencia a compresión.....	41
4.3	Medición de la velocidad de pulso ultrasónico.....	41
4.4	Resultados experimentales.....	46
4.5	Formulación para la evaluación en obra en especímenes de concreto.....	48
4.6	Relación experimental entre $F'c$ y UPV	48
4.7	Comparación y validación de la relación obtenida con otras investigaciones.	49
4.8	Límites recomendados para la evaluación de probetas de concreto en campo	50

5 Capitulo V. Conclusiones y Recomendaciones	52
5.1 Conclusiones	52
5.2 Recomendaciones	52
Referencias	53
Anexos	56
Panel fotográfico.....	57
Reportes de los resultados de los ensayos de ultrasonido	65
Reportes de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto. (Adaptado de Pasquel, 1996).....	6
Figura 2.2 Relación entre la resistencia y proporción agua cemento del concreto (Adaptado de Neville & Brooks, 2010).....	10
Figura 2.3 Influencia de la relación agregado/cemento en la resistencia del concreto (Adaptado Singh, 1958).....	11
Figura 2.4 Relación entre la resistencia a compresión y el logaritmo de porosidad de pasta de cemento. (Adaptado de Roy & Gouda, 1973)	12
Figura 2.5 Relación entre la resistencia a compresión y la relación gel/espacio. (Adaptado de Powers, T. C., 1958)	12
Figura 2.6 Ensayo de resistencia a compresión (a) configuración del ensayo (b) Diagrama de esfuerzos (c) Curva carga-deformación.....	15
Figura 2.7 Ensayo para obtener el módulo de elasticidad secante (a) configuración del ensayo (b) Curva esfuerzo-deformación.....	16
Figura 2.8 Ensayo para obtener la frecuencia longitudinal, transversal y torsional predominante.	17
Figura 2.9 Esquematación del ensayo para la obtención de las propiedades del concreto mediante GPR.....	18
Figura 2.10 Esquematación del ensayo de martillo de rebote para estimar la resistencia a compresión del concreto.	20
Figura 2.11 Relación entre la resistencia a compresión y el número de rebote sobre una superficie de concreto húmeda y seca	21
Figura 2.12 Representación esquemática de la prueba a la extracción.	21
Figura 2.13 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a extracción en cilindros estándar.....	22
Figura 2.14 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración de ensayo (b) Señal adquirida. .	23
Figura 2.15 Ondas de compresión llamadas ondas P que se producen en el ensayo de ultrasonido.	24
Figura 2.15 Tipos de configuraciones de ensayos de ultrasonido.	26
Figura 3.1 Equipos de medición (a) Ensayos a compresión (b) Prueba de ultrasonido.	30
Figura 3.2 Especímenes de concreto provenientes de diferentes obras de la ciudad de Lima.....	31
Figura 3.3 Ensayo a compresión en probetas de concreto (a) Configuración teórica (b) Prueba realizada en una probeta.	32

Figura 3.4 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración (b) Equipo empleado (c) medición de longitud (d) material acoplante (e) calibración del equipo (f) Medición del tiempo de propagación ultrasónico.....	33
Figura 3.5 Configuración de ensayo de ultrasonido utilizando el equipo Pundit Lab (+)	35
Figura 3.6 Registro adquirido por el transductor muestra que la onda ha tardado 70.6 us en atravesar el material.	35
Figura 4.1 Edad de rotura de las muestras de concreto.	36
Figura 4.2 Longitud en mm de las muestras de concreto.	36
Figura 4.3 Diámetro promedio en mm de las muestras de concreto.	37
Figura 4.4 Densidad de las muestras de concreto.....	37
Figura 4.5 Test de resistencia a compresión (a) .Prueba (b) Tipo de falla.....	41
Figura 4.6 Prueba de ultrasonido (a) registros ultrasónicos (b) configuración de ensayo y resultados.....	42
Figura 4.7 Resultados experimentales de resistencia a compresión.....	46
Figura 4.8 Resultados experimentales de las pruebas de ultrasonido	47
Figura 4.9 Histogramas de los resultados de las pruebas en las muestras de concreto (a) Resistencia a compresión (b) UPV	47
Figura 4.10 Relación entre los resultados de resistencia compresión (F'_c) y la velocidad de pulso ultrasónico (UPV).	48
Figura 4.11 Mejor ajuste calculado de las pruebas realizadas en las muestras de concreto.	49
Figura 4.12 La relación obtenida concuerda con otras investigaciones alrededor del mundo.	49
Figura 4.13 Análisis de regresión de la relación entre la resistencia a compresión F'_c y UPV del concreto (a) en MPa (b) en Kg/cm ²	50
Figura A.1 Arribo de las probetas de concreto a la PUCP.	57
Figura A.2 Medición del diámetro de las probetas de concreto.	57
Figura A.3 Vista en planta de la medición del diámetro de una muestra.	58
Figura A.4 Pesado de las probetas.....	58
Figura A.5 Acopio de probetas de concreto para realizar los ensayos de ultrasonido ..	59
Figura A.6 Equipo de ultrasonido	59
Figura A.7 Calibración del equipo de ultrasonido.	60
Figura A.8 Medición de longitud de las probetas.	60
Figura A.9 Aplicación de material acoplante a los transductores de ultrasonido.	61

Figura A.10 Ensayo de ultrasonido en la probeta.....	61
Figura A.11 Probetas de concreto listas para someter a compresión	62
Figura A.12 Máquina para realizar la prueba de resistencia a compresión.....	62
Figura A.13 Personal colaborador para realizar las pruebas de resistencia a compresión.	63
Figura A.14 Ensayo de resistencia a compresión en una probeta de concreto.....	63
Figura A.15 Probetas de concreto después de llevado a cabo los ensayos.....	64

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Principales componentes del cemento Portland y su composición en un cemento típico	6
Tabla 2.2. Tipos de cemento (Adaptado de ASTM C150, 2016).....	7
Tabla 2.3. Límites permisibles de sustancias disueltas en agua para concreto	8
Tabla 3.1. Componentes de la hipótesis	28
Tabla 3.2. Tipo de investigación en cada uno de los criterios de la metodología	28
Tabla 3.3. Matriz de consistencia metodológica	30
Tabla 4.1. Propiedades de las muestras de concreto: edad, longitud, diámetro y peso. .	37
Tabla 4.2. Resultados de pruebas de resistencia a compresión y ultrasonido	43
Tabla 4.3. Error calculado en muestras de concreto de 175, 210, 280 y 300 Kg/cm ²	51
Tabla A. 1 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 1 a 6.....	66
Tabla A. 2 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 7 a 19.....	67
Tabla A. 3 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 20 a 36.....	68
Tabla A. 4 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 37 a 53.....	69
Tabla A. 5 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 54 a 65.....	70
Tabla A. 6 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 66 a 79.....	71
Tabla A. 7 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 80 a 96.....	72
Tabla A. 8 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 97 a 110.....	73
Tabla A. 9 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 111 a 120.....	74
Tabla A. 10 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 121 a 133.....	75
Tabla A. 11 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 134 a 140.....	76

Capítulo I. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Contextualización

En los últimos años el sector de la construcción ha crecido considerablemente e impulsa el desarrollo de la economía del país. Los datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática reportan un crecimiento de 184 % en el Consumo Interno de Cemento en los últimos 10 años (INEI, 2015). Este incremento explica la mayor demanda del uso del concreto pues este material tiene excelentes cualidades como: resistencia, durabilidad y versatilidad.

En este gran desarrollo de la construcción un problema importante es conocer la calidad del concreto en obra. Si bien es cierto que los concretos se diseñan para cumplir las condiciones mínimas de resistencia existen factores como el proceso constructivo, el curado después del vaciado e incluso la mano de obra que afectan a la calidad de este material después de la construcción. La propiedad más importante para medir este parámetro en el concreto es la resistencia a compresión. Sin embargo para poder conocer este valor se recurre al método tradicional de ensayos de compresión uniaxial. Estos se caracterizan por ser destructivos, demandan una mayor cantidad de tiempo y originan un gasto a la hora de transportar las muestras a un laboratorio para su evaluación.

Existen diversas investigaciones que relacionan la resistencia a compresión y la velocidad medida con ultrasonido (Alexandre Bogas, et al., 2013), (Benaicha, et al., 2015), (Nik & Omran, 2013) Sin embargo estas investigaciones se realizaron considerando un diseño de mezclas en específico. El tipo de cemento, la influencia del tamaño de agregados, la relación agua/cemento y adiciones para mejorar la calidad del concreto son algunos de los parámetros que hacen de estos estudios casos particulares. Son pocas las investigaciones como las realizadas por Turgut (2004) o Nash't, et al (2005) que investigan si es posible obtener una relación entre la resistencia a compresión y la velocidad en muestras de concreto donde se desconocen las características de diseño.

1.1.2 Formulación del Problema

¿Cuál es la relación que existe entre la resistencia a compresión del concreto (F'_c) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño?

1.2 Justificación e importancia

1.2.1 Justificación científica

Obtener esta relación permitirá estimar aproximadamente la resistencia a compresión del concreto a partir de ensayos de ultrasonido en estructuras existentes de las cuales se desconocen o no se cuenta con la información de las propiedades del concreto empleado.

1.2.2 Justificación técnica práctica

El ultrasonido es una prueba no destructiva de fácil aplicación y que además se puede aplicar directamente in-situ. Esto permitirá evaluar en campo la resistencia a compresión del concreto y también servirá como parámetro de control de calidad y aseguramiento del material de manera que permitirá ahorrar tiempo y dinero evitando el traslado de probetas de concreto a un laboratorio o la extracción de diamantinas de estructuras existentes.

1.2.3 Justificación institucional y personal

El uso de metodologías innovadoras es necesario para determinar con mayor confiabilidad las características de los materiales de las estructuras. El ultrasonido es una técnica no invasiva que tiene facilidad de aplicación y puede ser repetitiva la cantidad de veces que sea necesaria. Por lo que explorar esta metodología en el estudio de materiales es beneficioso.

1.3 Delimitación de la Investigación

El presente estudio se limita a evaluar 140 muestras de concreto provenientes de diferentes construcciones de la ciudad de Lima en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Esta investigación permitirá determinar una expresión matemática entre la resistencia a compresión obtenida con ensayos de compresión uniaxial y la velocidad de la onda a través del concreto medido con ultrasonido.

1.4 Limitaciones

Debido a que las probetas evaluadas pertenecen a diversas obras de la ciudad de Lima y son trasladadas por los mismos propietarios, se desconoce su ubicación así como también los parámetros empleados en su diseño de mezclas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Determinar curvas de relación de la resistencia a compresión del concreto (F'_c) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño.

1.5.2 Objetivos Específicos

_Determinar la velocidad de ultrasonido en muestras de concreto siguiendo las especificaciones y metodología de la norma ASTM C597.

_Determinar la resistencia a compresión uniaxial de probetas de concreto siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C39.

1.6 Organización de la Tesis

La tesis está organizada en cinco capítulos de la siguiente manera

Capítulo 1: Comprende la introducción de la tesis, justificación, importancia, la delimitación y limitaciones, así como los objetivos general y específicos.

Capítulo 2: Se presenta un breve marco teórico explicativo acerca del concreto, los materiales que lo componen, la resistencia del concreto y los factores que intervienen en ella. Además se describen los ensayos tradicionales como el de resistencia a compresión e innovadores no destructivos como el ensayo de ultrasonido para determinar las propiedades del concreto.

Capítulo 3: En esta sección se plantea la hipótesis, las variables en estudio, la metodología empleada, la población y muestra en estudio así como los equipos empleados. Finalmente se desarrolla la matriz de consistencia metodológica de esta investigación.

Capítulo 4: Se muestra los resultados de la aplicación ensayos de resistencia a compresión y ultrasonido a las muestras. Además se realiza un análisis de los resultados obtenidos para determinar una relación entre la resistencia a compresión y la velocidad de onda ultrasónica en los especímenes de concreto. Se valida y compara la relación obtenida con las de otras investigaciones y se proponen límites de confianza para la evaluación de la resistencia a compresión de concreto en campo.

Capítulo 5: Se presentan las conclusiones de la tesis y se proponen recomendaciones para trabajos futuros que complementen esta investigación.

Capítulo II. Marco Teórico

Durante miles de años, la humanidad ha explorado la versatilidad de los materiales que se pueden moldear o moldear mientras que en un estado de plástico y luego endurecido en productos fuertes y duraderos (Lea, 1971). Al igual que cerámicas y yesos, los morteros de cal y los hormigones puzolánicos proporcionaron a los ingenieros materiales económicos para la producción de diversas estructuras utilitarias y estéticamente agradables. Los concretos modernos preservan estas virtudes antiguas, al tiempo que amplían considerablemente la gama de objetivos técnicamente alcanzables.

El concreto es un material altamente utilizado en la industria de la construcción por sus características. Los materiales que lo componen y los métodos para determinar sus propiedades como la resistencia son descritos en este capítulo.

2.1 Antecedentes teóricos

2.1.1 Internacionales

Desde los años 30, diversos investigadores en concreto se han interesado en determinar las propiedades del concreto. (Powers, 1938), (Obert, 1939), (Hornibrook, 1939) y (Thomson, 1940) emplearon técnicas no destructivas como las de vibración y sugirieron metodologías para realizar estas pruebas en laboratorio.

Luego en los años 40 en los EEUU se determinó que las propiedades elásticas de los materiales influían en la velocidad de propagación y que tal vez era independientes de la geometría. Ya en los años 50 se considera la medición de velocidad de ultrasonido como una alternativa no destructiva para evaluar la calidad del concreto. Leslie & Cheesman, (1949) desarrollaron exitosamente la técnica y se utilizó para diagnosticar el estado del concreto en presas. Casi en simultáneo, Jones (1948) desarrolló un método moderno y que se conoce actualmente donde se emplean transductores electro acústicos que ofrecen un mayor control sobre el tipo y la frecuencia de los pulsos generados para la prueba.

Recientemente Turgut (2004) determinó una relación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) usando núcleos de concreto extraídos de diferentes estructuras de concreto. Las muestras de estas construcciones tuvieron diferentes edades y no se tuvo información acerca de los diseños de mezclas de los concretos empleados.

Curvas exponenciales que relacionan la resistencia a compresión con la velocidad de ultrasonido también fueron determinadas por otros investigadores (Kheder, 1999) (Nash't, et al., 2005) (Trtnik, et al., 2009) (Turgut, 2004) (Del Rio, et al., 2004) (Raouf & Ali, 1983) (Jones, 1962). Los índices de correlación obtenidos en estos estudios se encuentran entre 0.42 y 0.80 dado que no tomaron en cuenta la composición del concreto.

2.1.2 Nacionales

A nivel nacional la investigación del uso de ultrasonido en concreto no ha sido muy desarrollada. Céspedes (2003) diseñó y elaboró concretos con resistencias de 175 y 210 Kg/cm² a los cuales aplicó ensayos de ultrasonido para estimar su resistencia a compresión a los 7 y 28 días. Determinó que si es mayor la edad de ensayo de los especímenes, aumenta también los valores de velocidad de ultrasonido y los valores de resistencia a compresión uniaxial. De la misma forma, si la relación agua/cemento disminuye, entonces incrementa la velocidad de ultrasonido y también la resistencia a compresión. Además comparó el tipo de agregado utilizado en la elaboración de los concretos. Agregados triturados generaron mayores velocidades de ultrasonido que los agregados de cantos rodados. Basándose en su estudio, Céspedes recomienda utilizar el método del ultrasonido en combinación con otros métodos para determinar la resistencia a compresión del concreto. También deduce que este método puede ser empleado para el control de calidad del concreto en obra.

En 2013, Ibarra y Valencia determinaron patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad del pulso ultrasónico en concretos de 100, 175 y 280 Kg/cm² variando la relación agua/cemento y el uso de los agregados. Realizaron ensayos a compresión y de ultrasonido a 3, 7, 14, 21 y 28 días de edad de las probetas de concreto. En esta investigación llegaron a la conclusión que existía una marcada relación entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido. Para los materiales empleados y diseños de mezclas ejecutados concluyeron que el mejor modelo de aproximación era el modelo cúbico.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El concreto

El concreto es un material el cual se obtiene de la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y en ocasiones aditivos. En una primera etapa el concreto es plástico, moldable y que luego adquiere rigidez con propiedades aislantes y resistentes lo que lo hace un material ideal para la construcción (Pasquel, 1996).

El poder dominar el uso del concreto conlleva a tener un profundo conocimiento de los materiales que lo componen y su interrelación. A esto se le debe agregar que las técnicas de producción, colocación, curado y mantenimiento son factores que también se deben controlar para obtener un buen producto final.

2.2.1.1 Componentes del Concreto

Este material está definido por cuatro componentes: cemento, agua, agregados, aditivos y aire. Si bien es cierto que los aditivos se consideran como un elemento opcional, en la actualidad estos constituyen un ingrediente normal en un diseño. En la Figura 2.1 se muestra un esquema con las proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto.

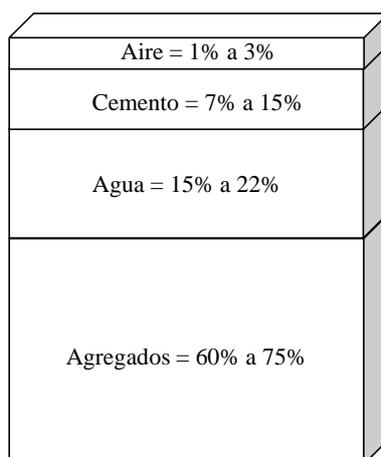


Figura 2.1 Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del concreto.
(Adaptado de Pasquel, 1996)

Cemento

Los antiguos romanos utilizaron el concreto basados en cemento hidráulico, un material que endurece con el agua. Hoy en día no se utiliza el cemento romano sino el cemento moderno que fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 como cemento Portland (Neville & Brooks, 2010). Este nombre es debido a que en su fabricación se utilizan materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales asociados con sílice, alúmina y óxido de hierro. Dichos componentes son calentados a altas temperaturas que forman escorias y luego son molidas. Las características de los componentes del cemento se explican a mejor detalle en la norma ASTM C150 (2016).

Los componentes principales del cemento son cuatro y se presentan en la Tabla 2.1 junto con la abreviatura de sus formulas. Las abreviaturas son: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$.

En 1955, Bogue presentó las ecuaciones para el cálculo de la composición potencial del cemento portland. En la misma tabla se muestran los porcentajes calculados para un cemento típico. El C_3S y C_2S son los mayores componentes con valores aproximados de 54.1% y 16.6% respectivamente. Ambos son los mas importantes y causantes de la resistencia de la pasta hidratada de cemento. El C_3S es el causante de la resistencia inicial y tiene mucha importancia en el calor de hitratación. En cambio el C_2S define la resistencia a largo plazo y su incidencia es menor en el calor de hidratación.

Tabla 2.1. Principales componentes del cemento Portland y su composición en un cemento típico

Componente	Composición Oxida	Abreviatura	Composición calculada (%)
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	54.1
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	16.6
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10.8
Aluminoferrato	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	9.1

El C₃A favorece la combinación de cal y sílice durante la elaboración del cemento pero contribuye poco o nada a su resistencia. Además cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por sulfatos se produce sulfoaluminato de calcio con propiedades expansivas y puede causar resquebrajamientos.

En pequeñas cantidades se encuentra presente el C₄F y no influye significativamente en el comportamiento del cemento. Sin embargo reacciona con el yeso para formar sulfoferrita de calcio y puede acelerar la hidratación de los silicatos.

El cemento tiene también componentes menores que se refieren a su cantidad y no necesariamente a su importancia tales como MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O y Na₂O. Son de importancia los dos últimos, el óxido de potasio y óxido de sodio respectivamente. Conocidos como álcalis se sabe que reaccionan con algunos agregados lo cual causan desintegración del concreto.

Cuando se hidrata el C₃A y del C₃S se da comienzo al proceso de fraguado del cemento que viene a ser la pérdida de plasticidad que sufre la pasta de cemento. Se refiere al cambio del estado fluido al estado rígido de la pasta. Durante este proceso la pasta comienza a endurecer y desarrollar su resistencia. Estas reacciones generan calor por lo que aumentan la temperatura de la pasta y se denomina calor de hidratación.

Comercialmente para asegurar la durabilidad de concreto en diversas condiciones se han desarrollado diferentes tipos de cementos para usos específicos. En la Tabla 2.2 se describen brevemente los tipos de cemento que son utilizados en la actualidad.

Tabla 2.2. Tipos de cemento (Adaptado de ASTM C150, 2016).

Cemento	Descripción
Tipo I, IA	De uso general, cuando específicas propiedades especiales no son requeridas.
Tipo II, 2A	Cemento con moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo II(MH), II(MH)A	Moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación.
Tipo III, IIIA	Para utilizar cuando se desea un desarrollo rápido de resistencia.
Tipo IV	Cuando se requiere bajo calor de hidratación.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a los sulfatos.

Nota: El sufijo A indica que se ha añadido incorporadores de aire.

Agua

El agua es fundamental en la preparación del concreto. Tiene gran relación con la resistencia, la trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido. Las impurezas que contenga el agua pueden afectar el endurecimiento del cemento, su resistencia, ocasionar manchas en la superficie y hasta corroer el acero de refuerzo.

La norma ASTM C1602 (2012) considera que el agua potable es apta para elaborar concreto y no es necesario probarla según los requerimientos que especifica. Para fuentes de agua no potable o si se utilizan aguas combinadas, se deben realizar pruebas de

resistencia de compresión de cubos utilizando el agua dudosa y compararlos con muestras usando agua potable. La diferencia de resistencia a 7 días no debe ser mayor al 10%.

La norma peruana NTP 339.088 (2014) recomienda los límites permisibles para el agua en la elaboración de concreto y curado que se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Límites permisibles de sustancias disueltas en agua para concreto

Sustancias disueltas	Valor máximo permisible (ppm)
Sólidos en suspensión	5000
Materia orgánica	3
Alcalinidad	1000
Sulfato	600
Cloruros	1000
PH	5 a 8

Agregados

El agregado ocupa casi las tres cuartas partes del volumen del concreto, por lo que su calidad es de suma importancia. Las propiedades de los agregados pueden afectar a la resistencia, durabilidad y desempeño del concreto.

Las propiedades mecánicas más importantes a tener en cuenta son la adherencia, resistencia, dureza y resistencia al desgaste. Los agregados de superficie áspera y angular proveen mayor adhesión y resistencia a compresión. La resistencia del agregado condiciona la resistencia del concreto y se debe evaluar directa o indirectamente para optimizar la calidad del producto final. La dureza se define como la resistencia del agregado al fallar por impacto y el valor de la abrasión proporciona la resistencia al desgaste. (Neville & Brooks, 2010)

La norma ASTM C33 (2016) permite evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados para la fabricación del concreto.

Aditivos

Son las sustancias que se añaden a la mezcla de concreto con el fin de modificar sus propiedades para un uso en específico. Los aditivos suelen variar las características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del concreto (Pasquel, 1996).

El uso de aditivos permite mejorar las siguientes características del concreto: trabajabilidad, retardar o acelerar el tiempo de fraguado, acelerar el desarrollo de resistencia inicial, modificar el calor de hidratación, reducir la exudación, incrementar la durabilidad, reducir la permeabilidad, disminuir la segregación, reducir la contracción, incrementar la adherencia con concretos existentes y con el refuerzo.

Los aditivos empleados en las mezclas de concreto deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C494 (2016).

2.2.1.2 Resistencia del concreto

La resistencia es considerada como la característica de mayor importancia del concreto. También de manera indirecta se puede inferir la calidad del concreto ya que está fuertemente relacionado con la estructura de la pasta cemento.

En la evaluación de la resistencia es importante tener en cuenta que hay una presencia de grietas, discontinuidades y poros así como las grietas que pueden tener los agregados. Otro factor a considerar y que influye en la resistencia es la relación agua/cemento que está relacionada con la porosidad del concreto endurecido.

La resistencia es una habilidad para resistir esfuerzos de cuatro tipos: compresión, tracción, flexión y corte. Se conoce que el concreto tiene una alta resistencia a los esfuerzos de compresión y muy baja para la tracción. Por lo que evaluar la resistencia a compresión simple es la propiedad de mayor importancia.

2.2.1.3 Naturaleza de la resistencia del concreto

La asociación colombiana de productores de concreto (ASOCRETO, 2010) explica que debido a su naturaleza, su fabricación y componentes que lo conforman, el concreto es una masa endurecida y heterogénea cuya resistencia depende de los siguientes factores:

- _Resistencia de la pasta endurecida
- _Resistencia propia de las partículas de agregado
- _Adherencia entre la pasta y los agregados

La resistencia de la pasta hidratada se origina cuando el cemento en contacto con el agua se hidrata y forma una masa semicristalina llamada gel. Con el transcurso del tiempo el gel adquiere resistencia la cual será mayor a medida que se incremente el grado de hidratación.

La resistencia de las partículas del agregado está en función de sus propiedades. Éstas están bien definidas y son independientes del tiempo. Por lo general los agregados son más resistentes que la pasta salvo los agregados livianos o el gel de concretos de alta resistencia.

La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento se produce durante el proceso de hidratación con la cohesión de sus superficies. La zona de contacto, conocida como interface agregado-matriz, es la fase más importante del concreto que establece el enlace crítico y normalmente se constituye en el elemento más débil de la masa endurecida.

2.2.1.4 Factores que inciden en la resistencia del concreto

En general, se considera como factores que influyen en la resistencia del concreto a: relación agua/cemento, grado de compactación, edad y temperatura. Sin embargo existen otros factores como se habló anteriormente que afectan a la resistencia, estos son: la relación agregado/cemento, la calidad del agregado (gradación, textura superficial, forma, resistencia y rigidez) y el tamaño máximo del agregado. Aunque la porosidad es también uno de los factores principales que influyen en la resistencia, en la práctica ingenieril es difícil de medir y de calcular ya que el grado de hidratación no se determina fácilmente.

Relación agua/cemento, grado de compactación y edad

La relación agua/cemento es la cantidad de agua en masa (sin considerar el agua absorbida por los agregados) sobre la cantidad de cemento en masa.

A mayor contenido de agua en el mezclado, mayor será la cantidad de agua que no se combina con el cemento y por consiguiente la pasta será más porosa y la resistencia del concreto disminuirá.

En la construcción ordinaria no es posible expulsar todo el aire del concreto por lo que incluso en el concreto totalmente compactado existen algunos vacíos de aire atrapado. Abram en 1918 considera que a una compactación total, una temperatura normal y antigüedad determinada, la resistencia puede considerarse como inversamente proporcional a la relación agua/cemento. Esta es la llamada ley de Abrams y en la Figura 2.2 se muestra lo establecido y los efectos de una compactación parcial en la resistencia.

En la figura se observa que a menor relación agua/cemento, mayor es la resistencia, sin embargo con relaciones bajas la mezcla es muy seca y difícil de compactar quedando porosa al punto en que la resistencia comienza a decrecer. Si se utiliza una compactación con vibrador se pueden utilizar relaciones agua/cemento menores que las empleadas que utilizando la compactación manual.

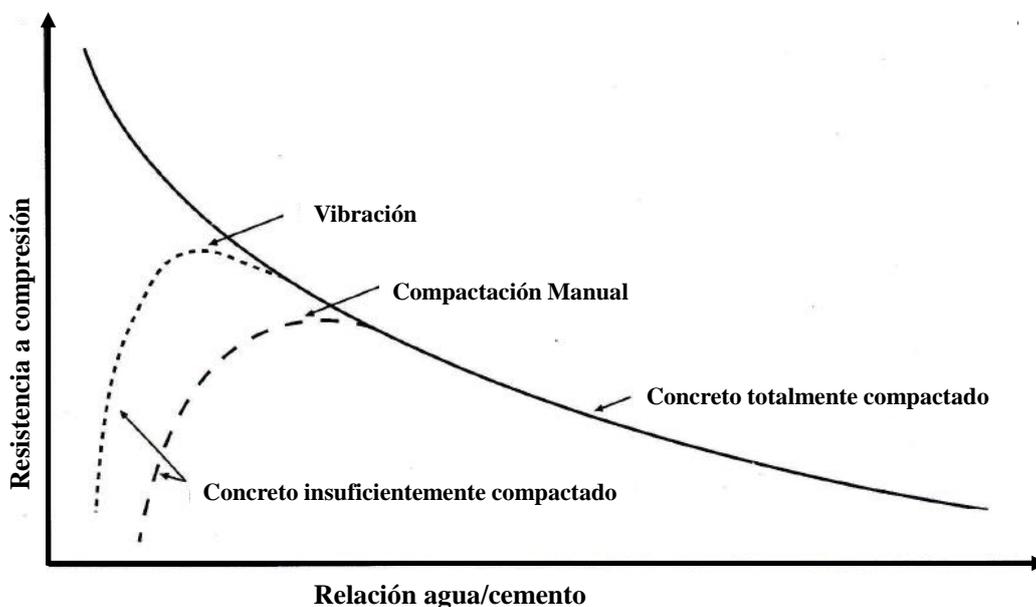


Figura 2.2 Relación entre la resistencia y proporción agua cemento del concreto (Adaptado de Neville & Brooks, 2010)

Características de los agregados

Por la textura y forma para una misma relación agua/cemento, los agregados con textura rugosa o de forma granular muestran una mayor resistencia en comparación con los agregados lisos o redondeados. Sin embargo con igual contenido de cemento los primeros demandan mayor cantidad de agua para lograr una determinada manejabilidad y por ello el efecto neto sobre la resistencia no varía de forma apreciable (ASOCRETO, 2010)

La granulometría del agregado influye de gran manera ya que si es continua, permite elaborar mezclas de alta compactad que presentan una mayor densidad y por lo tanto desarrollan mayores resistencias.

La misma resistencia y rigidez propia que presentan los agregados también influyen en la resistencia del concreto. De igual manera el tamaño del agregado influye en la resistencia ya que se ha demostrado que para concretos de alta resistencia, a mayor resistencia requerida, menor deberá ser el tamaño máximo del agregado.

La influencia del agregado en el concreto se muestra en la Figura 2.3. En ella Singh (1958) explica que si la pasta de cemento representa una pequeña cantidad del volumen del concreto, es decir una relación agregado/cemento elevado, entonces la porosidad es baja y por lo tanto la resistencia es alta.

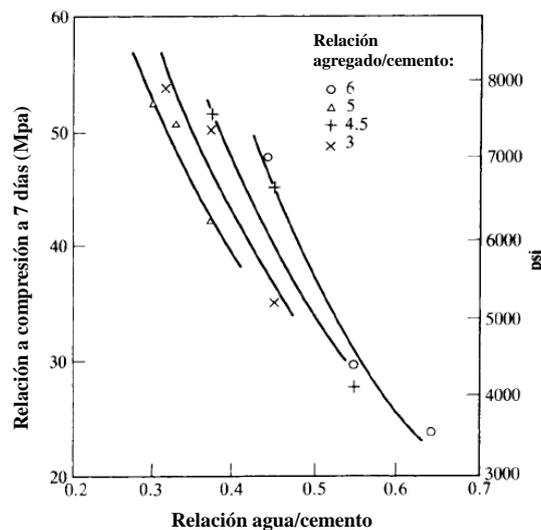


Figura 2.3 Influencia de la relación agregado/cemento en la resistencia del concreto (Adaptado Singh, 1958)

Efecto de la porosidad

Por efecto de la hidratación, el agua de mezcla adopta una de tres formas: agua combinada, agua de gel o agua capilar. El agua que reacciona con los productos de hidratación del cemento se le considera como agua no evaporable o agua combinada. El agua retenida o absorbida en la superficie de los hidratos se le denomina agua de gel y se localiza en los poros gel que son muy pequeños. Finalmente el agua capilar es la que se encuentra atrapada en los poros capilares que son el producto residual después del proceso de hidratación.

Roy & Gouda en 1973 muestran la relación entre porosidad y resistencia en pastas de cemento (Ver Figura 2.4) en las que obtuvieron resistencias extremadamente altas, aplicando una presión elevada para lograr una buena compactación con relaciones agua/cemento muy bajas.

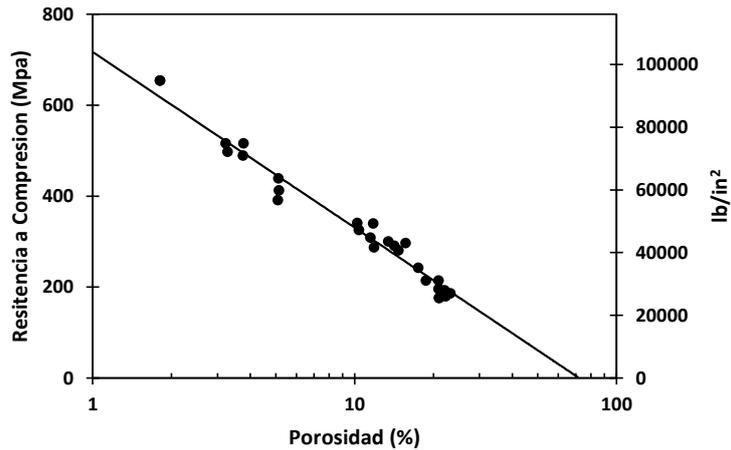


Figura 2.4 Relación entre la resistencia a compresión y el logaritmo de porosidad de pasta de cemento. (Adaptado de Roy & Gouda, 1973)

Relación gel/espacio

La relación gel espacio es también un parámetro alternativo que permite estimar la porosidad. Se define como la razón de volumen de gel cemento respecto a la suma de volúmenes de gel cemento y poros capilares.

También esta relación puede emplearse para estimar la relación mínima de agua/cemento requerida para que el gel de cemento pueda ocupar el espacio disponible, es decir para una relación gel/espacio = 1.

En 1958, Powers muestra que existe una relación tipo potencial entre la resistencia a compresión y la relación gel/espacio. En la Figura 2.5 se puede apreciar que determinó una relación del tipo $F_c = Ax^b$ donde x es la relación gel/espacio, A y b son constantes que dependen del tipo de cemento, además A representa la resistencia máxima del gel cuando $x = 1$.

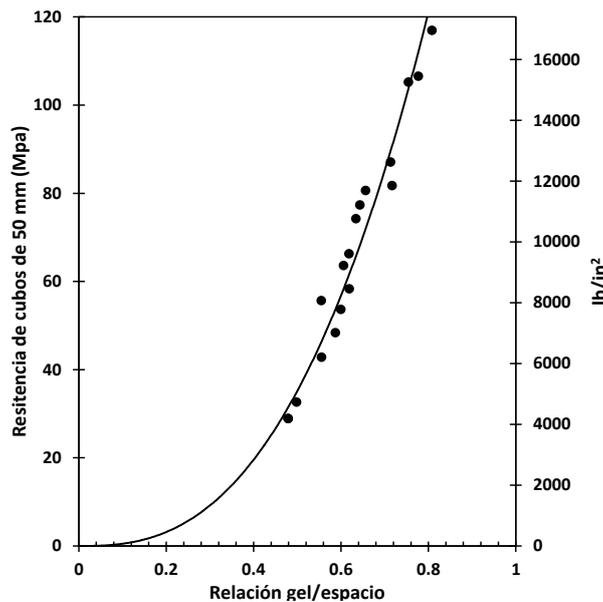


Figura 2.5 Relación entre la resistencia a compresión y la relación gel/espacio. (Adaptado de Powers, T. C., 1958)

2.2.2 Ensayos para determinar F'_c del concreto

La propiedad más común del concreto que es medida por ensayos es la resistencia. Son tres razones principales que explican esto. Primero, la resistencia del concreto indica su capacidad para resistir cargas en las aplicaciones estructurales si son en tensión, compresión, corte o combinaciones de estas. Segundo, las pruebas de resistencia son fáciles de ejecutar. Finalmente, diversas correlaciones se pueden determinar entre la resistencia y otras propiedades del concreto que son medidas con pruebas más complicadas. (Lamond & Pielert, 2006)

A continuación se describirán algunos de los métodos más usados para para determinar la resistencia a compresión del concreto así como metodologías innovadoras no invasivas que también permiten determinar esta propiedad.

2.2.2.1 Ensayos destructivos

Método estándar para obtener la Resistencia a la compresión del concreto de probetas cilíndricas (ASTM C39, 2015).

En este ensayo una carga de compresión axial es aplicada en cilindros moldeados o en extracciones por diamantina. El valor de la resistencia a compresión es la relación entre la carga máxima y el área de la sección transversal de la probeta de concreto. Este parámetro es una propiedad física del concreto y se expresa en Mpa o en Kg/cm^2 .

Conocer la resistencia a compresión es importante ya que se emplea para verificar que el concreto cumple con las especificaciones de diseño del proyecto. También este valor se puede emplear para determinar la calidad del material o para estimar la resistencia de ciertos elementos estructurales durante el proceso constructivo de una ejecución de una obra.

Para entender mejor los requerimientos que solicitan las diferentes normas en las pruebas de resistencia a compresión, Lamond & Pielert (2006) explican algunos factores que afectan los resultados:

Efectos del espécimen y condiciones de borde: La norma ASTM C39 establece que la perpendicularidad de los especímenes no debe ser mayor a 0.5° y que las caras planas deben tener una máxima pendiente de 0.05 mm. El propósito es lograr una transferencia uniforme de la carga a través del espécimen. Superficies irregulares pueden generar concentraciones locales de esfuerzos incluso si las caras han sido preparadas usando capping. En general los especímenes que no cumplan los requerimientos causan valores bajos en ensayos de resistencia, y el grado de reducción es mayor en concretos de alta resistencia.

Efectos del tamaño del espécimen: Comúnmente es aceptado que al incrementar el tamaño de las muestras, la resistencia a compresión medida y la variación de los resultados disminuye. Además la magnitud de los efectos del tamaño disminuye con el incremento del diámetro.

Efectos de la relación diámetro – tamaño del agregado: Diversas investigaciones reportan que los resultados más satisfactorios fueron con especímenes cuya relación

diámetro – tamaño del agregado fue de dos. Por lo que se recomienda una relación mínima de 3 a 1.

Efectos de la relación largo – diámetro: Se ha llegado a comprobar que las medidas de resistencia incrementan conforme la relación largo – diámetro disminuye. Esto se atribuye al efecto de las restricciones en el borde debido a la fricción entre los cabezales de la máquina a compresión y el borde de las muestras. A medida que la relación largo diámetro disminuye, una mayor porción del espécimen se encuentra en un estado de compresión triaxial. La norma ASTM C39 recomienda que las muestras tengan una relación de 2.

Efectos de la humedad del espécimen: Los especímenes tienen de 5-20% menos resistencia a compresión cuando son ensayados bajo una condición de humedad que cuando son testeados en una condición seca. La mayor resistencia en especímenes secos es atribuida al aumento de la resistencia de los enlaces secundarios en la estructura de la pasta. A medida que las muestras se secan, la superficie exterior tiende a encogerse induciendo una compresión lateral en el interior del espécimen lo que incrementa su aparente resistencia a compresión. Una muestra que esté húmeda en la región externa tendrá una resistencia más baja.

Efecto de la velocidad de carga: La resistencia medida en especímenes de concreto incrementa conforme la velocidad de la carga aumenta. Se cree que la dependencia de la resistencia última sobre la velocidad de carga está relacionada con los mecanismos de fluencia y microfisuración. Para evitar este efecto, la norma ASTM C39 recomienda realizar la prueba utilizando una velocidad de carga de 0.25 ± 0.05 MPa/s.

Los especímenes moldeados deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C31 para determinar su resistencia a compresión. El ensayo se realiza con especímenes cilíndricos que tienen dos tipos de dimensiones estándar: Probetas de 6" x 12" (150 mm x 300 mm) o probetas de 4" x 8" (100 mm x 200 mm). El diámetro medido en cualquier punto del espécimen no deberá variar en más del 2% con respecto a otra medición individual del mismo espécimen. De la misma forma, las superficies de contacto no uniformes o que posean inclinaciones deberán ser trabajadas conforme a lo que especifica la norma.

La norma ASTM C39 establece que 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.

El procedimiento consiste en medir dos veces el diámetro de la probeta a ensayaren el tramo central y con mediciones perpendiculares entre sí. Con el promedio obtenido de estas mediciones se podrá calcular el área de la sección transversal del espécimen. A

continuación se colocará la probeta en la máquina de ensayo. Previamente, se verificará que las superficies de contacto, tanto de la probeta como de la máquina de ensayo se encuentren limpias. Además, es importante asegurar que no existan excentricidades en las probetas ensayadas, lo cual se logra alineando los ejes de la probeta con el eje de carga de la máquina compresora. Finalmente se aplicará la carga a una velocidad constante de modo que los esfuerzos aumenten en un ratio de 0.25 ± 0.05 MPa/s, hasta alcanzar el fallo de la probeta. Es importante también registrar el tipo de falla de la probeta para tener una noción de que la prueba se realizó correctamente.

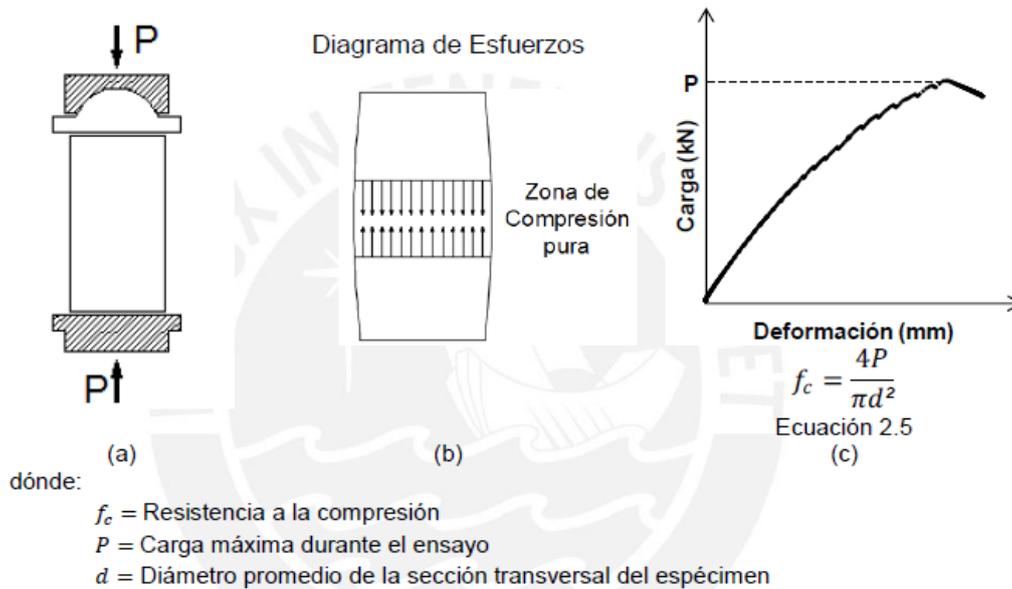


Figura 2.6 Ensayo de resistencia a compresión (a) configuración del ensayo (b) Diagrama de esfuerzos (c) Curva carga-deformación.

Método estándar para calcular el Módulo de Elasticidad Estático y el Ratio de Poisson del concreto en Compresión (ASTM C469, 2010).

Este ensayo permite obtener una relación entre el esfuerzo y la deformación, así como una relación entre la deformación longitudinal y transversal de un espécimen de concreto. En este ensayo, mientras se aplica una carga de compresión axial, se mide la deformación local del espécimen haciendo uso de deformímetros orientados en las dos direcciones principales de la probeta. La Figura 2.5, muestra la configuración del ensayo, así como la curva típica de esfuerzo - deformación.

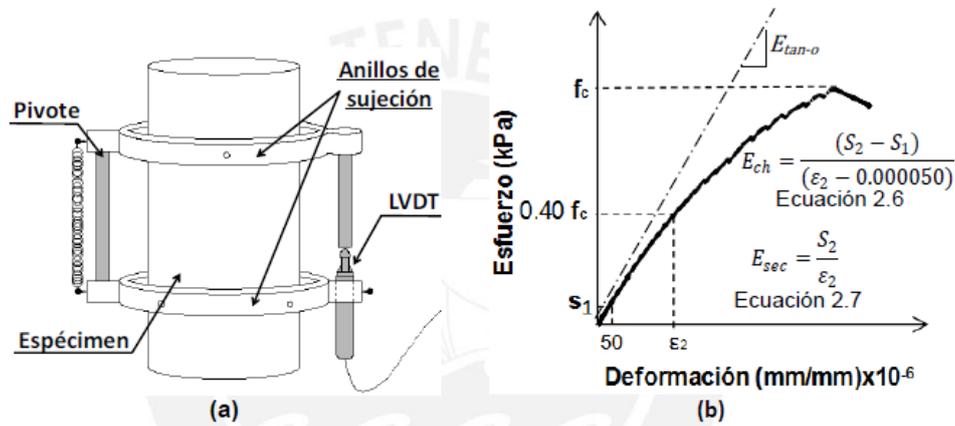
a. Especimen, equipos y procedimiento de ensayo.

Las probetas requeridas para este ensayo deben tener las mismas consideraciones y tolerancias que las estipuladas en ASTM C39 (ASTM, 2015) descrita previamente.

La máquina que aplicará la carga debe ser capaz de imponer una fuerza a una velocidad y magnitud especificadas. Así mismo debe tener las mismas consideraciones especificados en la ASTM C39 (ASTM, 2015).

Para determinar la deformación axial en la parte central de la probeta (donde los efectos de borde ya no tienen incidencia) se podrá hacer uso de un transductor diferencial de

variación lineal (LVDT). En la sección diametralmente opuesta, se colocará un pivote. Durante la aplicación de la carga, la longitud del pivote permanecerá constante, mientras que el LVDT irá registrando la deformación externa del espécimen. Se asume que la deformación correspondiente al espécimen es aproximadamente la mitad de la registrada por el LVDT.



dónde:

- E_{sec} = Módulo de elasticidad secante
- E_{ch} = Módulo de elasticidad de cuerda
- E_{tan-o} = Módulo de elasticidad tangente inicial
- S_2 = esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga última
- S_1 = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas
- ϵ_2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S_2

Figura 2.7 Ensayo para obtener el módulo de elasticidad secante (a) configuración del ensayo (b) Curva esfuerzo-deformación.

La longitud efectiva del LVDT no deberá de ser menor a 3 veces el tamaño máximo del agregado, ni mayor a dos tercios de la altura del espécimen. En caso de que el coeficiente de Poisson sea requerido, se necesitará de un extensómetro adicional, el cual deberá medir las deformaciones transversales. La precisión del LVDT debe ser de al menos 0.5 millonésimas.

Durante la realización del ensayo, se debe mantener constante la humedad natural como la temperatura del espécimen. A continuación, se acoplará el marco de medición al espécimen que se desea ensayar, hecho esto se colocará el espécimen en la máquina de carga y se asegurará que los ejes de carga coincidan con el centro del espécimen para evitar excentricidades. Una vez que fijado el espécimen, se realizará una pre-carga preliminar a fin de que la probeta se asiente en los apoyos y que los deformímetros den lecturas consistentes. Finalmente, se aplicará la carga de forma continua. Los bloques de carga tendrán una velocidad aproximada de 1 mm/min, y el ratio de aplicación de carga debe ser constante a una velocidad menor a los 250 kPa/s.

2.2.2.2 Ensayos no destructivos

Método estándar para obtener la frecuencia de resonancia longitudinal, transversal, y torsional en especímenes de concreto (ASTM C215, 2008).

Los ensayos de resonancia por impacto descritos en esta norma, consisten en la estimación de frecuencias de resonancia en prismas o cilindros de concreto de los modos: longitudinal, transversal y torsional. Este método permite hallar el módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el módulo de rigidez dinámico (G_d). La Tabla 2.4 muestra el esquema del ensayo para probetas cilíndricas y prismáticas.

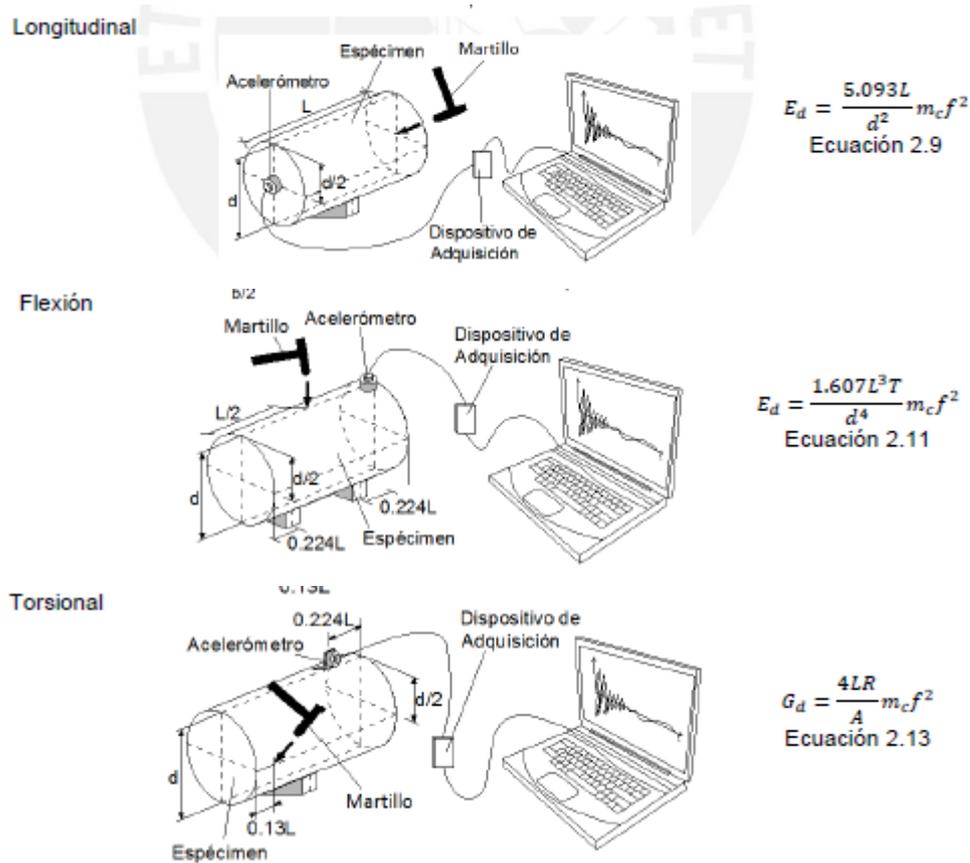


Figura 2.8 Ensayo para obtener la frecuencia longitudinal, transversal y torsional predominante.

a. Especímen, equipos y procedimiento.

Los especímenes deberán seguir los procedimientos de mezclado y curado de acuerdo a ASTM C31 (ASTM, 2015) en caso se realicen en campo, para especímenes de laboratorio estos deberán estar acorde a ASTM C192 (ASTM, 2014). Para núcleos perforados, la norma utilizada para el ensayo será ASTM C42 (ASTM, 2013). Los elementos de concreto que se ensayen bajo esta metodología podrán tener formas prismáticas o cilíndricas siempre y cuando el ratio largo-longitud transversal máxima, se encuentre entre 2 y 5.

El espécimen se colocará sobre un apoyo que le permita vibrar libremente. Dependiendo del modo de vibración a analizar, podrá haber uno o dos puntos de contacto entre el

espécimen y el apoyo. Para excitar la probeta en cualquier de sus modos de vibración se hará uso de un martillo. Este dispositivo podrá estar hecho de metal o de plástico rígido, y debe ser capaz de producir un impacto capaz de excitar a la probeta en un tiempo corto.

El elemento que medirá el movimiento del espécimen consistirá en un acelerómetro piezoeléctrico y tendrá una frecuencia operativa que oscile al menos entre 100 Hz y 10000 Hz. Este acelerómetro registrará las señales de movimiento de forma análoga.

Finalmente se requiere de un dispositivo de adquisición de datos (DAQ), el cual debe ser capaz de registrar la data del acelerómetro y convertirla en señales digitales que puedan ser analizadas y almacenadas en un computador. Este equipo deberá complementarse con un software que permita ajustar la frecuencia de muestro.

Ground Penetration Radar (GPR)

El Georadar o Ground Penetration Radar (GPR), es ampliamente utilizado para la caracterización física y mecánica de materiales sub-superficiales. Algunas de sus aplicaciones geotécnicas son: determinar la estratigrafía del suelo, ubicar la profundidad de la napa freática o del estrato resistente, o la identificación de cavidades o rupturas en estratos inferiores. Más recientemente, sus aplicaciones se vienen utilizando en la evaluación de proyectos de infraestructura como presas y puentes para la localización y detección de anomalías en el concreto o en el refuerzo, y en menor medida para la caracterización mecánica del concreto en términos de resistencia.

Este método se basa en que la velocidad y amplitud de las ondas electromagnéticas (EM-wave), dependen de las propiedades di-eléctricas del material que atraviesan (permitividad dieléctrica, conductividad y permeabilidad magnética). En Lai et al. (2009) se establecen relaciones entre la permitividad dieléctrica real (ϵ'), el nivel de energía de onda (EWL) y la resistencia a la compresión en concretos hechos con agregados normales y livianos (ver Tabla 2.7). La Figura 2.11 obtenida de Lai et al. (2009) muestra el esquema del ensayo junto con las ecuaciones de ϵ' y EWL.

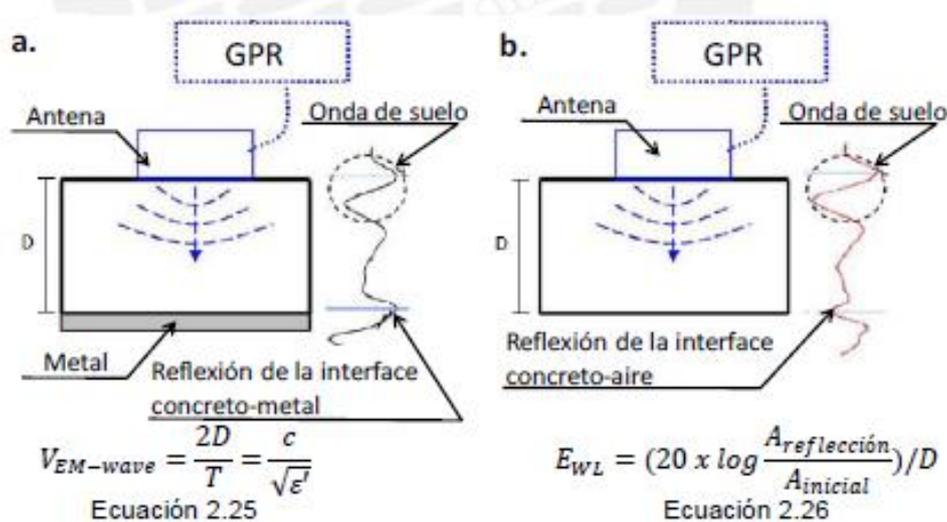


Figura 2.9 Esquematación del ensayo para la obtención de las propiedades del concreto mediante GPR.

Tabla 2.7. Relaciones entre f_c , y ϵ' ; y E_{WL} y f_c propuestas por Lay et al. (2009).

Relación entre f_c , y ϵ'			Relación entre E_{WL} y f_c			
$\epsilon' = \alpha(f_c^{-\beta})$			$E_{WL} = \gamma \ln(f_c) - \phi$			
Ecuación 2.27			Ecuación 2.28			
Concreto	Peso Volumétrico	Ratio (a/c)	α	β	γ	ϕ
Liviano	1625 kg/m ³	0.35	20.5	0.1247	65.9	162.9
Liviano	1714 kg/m ³	0.38	22.5	0.1364	112.7	345
Liviano	1798 kg/m ³	0.34	24.7	0.1559	109.7	374
Liviano	1724 kg/m ³	0.32	31.6	0.2192	147	540.5
Liviano	1739 kg/m ³	0.28	33.6	0.2189	162.6	627.3
Normal	2289 kg/m ³	0.57	17.9	0.1074	34.6	75
Normal	N/A	0.51	16	0.0907	12.8	5.1
Normal	2298 kg/m ³	0.48	13.6	0.0646	12.3	2.8

El GPR se viene utilizando recientemente para la caracterización mecánica del concreto; por ende, aún no existe restricciones o especificaciones sobre las dimensiones que debe cumplir el espécimen. Lai et al. (2009) utilizó probetas cúbicas de 100 mm de lado, y "losas" de 200 mm x 200 mm x 150 mm. El GPR utilizado, consistía de un radar mono-estático equipado con una antena de un 1GHz de capacidad.

El procedimiento es sencillo, se debe acoplar la antena del georadar sobre el concreto. Seguidamente se empezarán a emitir las EM-wave. Para la obtención de T_i (tiempo de viaje de la onda) se registrará el tiempo en que la onda tarda en ir hasta la base del espécimen y volver a la antena. Además, es importante registrar la forma de la EM-wave. Este procedimiento se realizara para los casos a y b; es decir, uno cuando haya un metal bajo el elemento de concreto y otro cuando este se encuentre apoyado directamente en el suelo.

Tal como se describe en la Ecuación 2.25, basta contar con los valores de D y T, para obtener ϵ' , ya que c (velocidad de la luz) es un parámetro conocido. Por otro lado; para la obtención de EWL se requiere de pasos adicionales. Primero se deberá reconocer las reflexiones máximas negativas y positivas para el caso a y el caso b. Luego se procederá a restar estas reflexiones (a - b), finalmente se medirá el valor de Areflección, el cual representa la primera amplitud positiva obtenida de la resta. $A_{inicial}$ corresponde a la máxima amplitud de suelo en donde se apoya el espécimen.

Rebound Hammer Test

Se han hecho muchos intentos de crear pruebas no destructivas, pero muy pocas de ellas han sido realmente exitosas. Un método para el que se ha encontrado aplicación práctica dentro de un campo limitado es la prueba del martillo de rebote, desarrollada por Ernst Schmidt. También se conoce como la prueba de martillo de impacto o Esclerómetro.

La prueba está basada en el principio de que el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie sobre la que golpea la masa. En la prueba del martillo de rebote, una masa impulsada por un resorte tiene una cantidad fija de energía que se le imprime al extender el resorte hasta una posición determinada; esto se logra presionando el émbolo contra la superficie del concreto que se quiere probar. Al liberarlo, la masa rebota del

émbolo que aún está en contacto con el concreto y la distancia recorrida por la masa, expresada como porcentaje de la extensión inicial del resorte, es lo que se llama número de rebote y es señalado por un indicador que corre sobre una escala graduada. El número de rebote es una medida arbitraria, ya que depende de la energía almacenada en el resorte y del volumen de la masa.

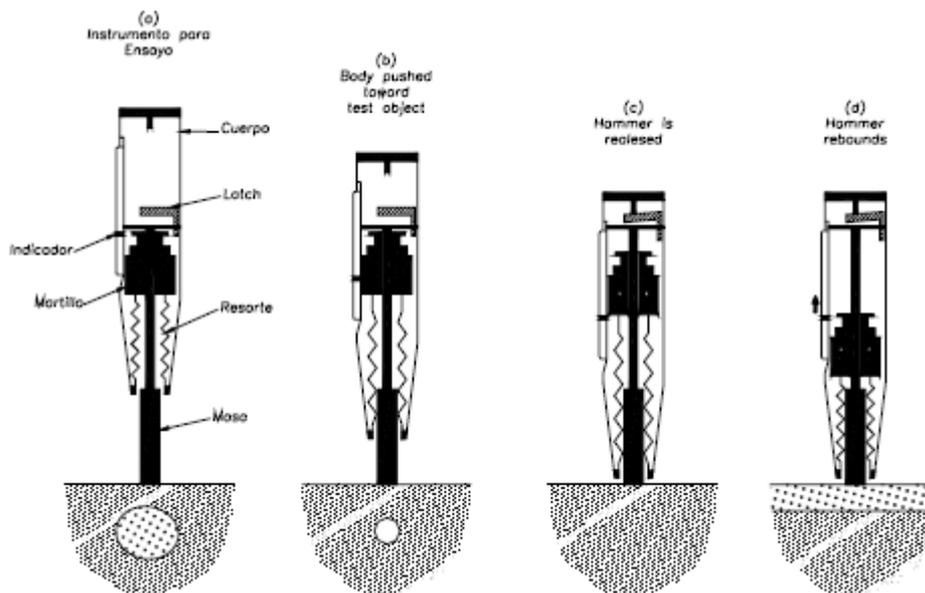


Figura 2.10 Esquematación del ensayo de martillo de rebote para estimar la resistencia a compresión del concreto.

El martillo tiene que utilizarse sobre una superficie plana, de preferencia cimbrada; por lo tanto, no es posible probar concreto de textura abierta. Las superficies llanadas deben frotarse hasta que queden lisas. Cuando el concreto a prueba no forma parte de una masa mayor, debe sujetarse firmemente, pues los golpes durante la prueba pueden dar como resultado una disminución del número de rebote registrado.

La prueba es sensible a variaciones locales en el concreto; por ejemplo una partícula grande de agregado inmediatamente debajo del émbolo daría como resultado un número de rebote anormalmente elevado; por el contrario, la presencia de un vacío en el mismo lugar daría un resultado demasiado bajo. Por esta razón, es recomendable tomar 10 o 12 lecturas bien distribuidas en el área puesta a prueba y considerar un valor promedio como representativo del concreto. El error estándar de la media es más elevado que cuando la resistencia se determina mediante la prueba de compresión, pero el ahorro en esfuerzo, tiempo y costo es considerable.

El émbolo siempre debe estar en posición normal respecto a la superficie del concreto a prueba, pero la posición del martillo respecto a la vertical afecta el número de rebote. Esto se debe a la acción de la gravedad sobre el recorrido de la masa en el martillo. Así pues, el número de rebote de un piso será menor que el de una viga peraltada, y las superficies inclinadas y verticales rendirán valores intermedios.

La prueba determina, en realidad, la dureza de la superficie del concreto y, aunque no existe una relación especial entre la dureza y resistencia del concreto, puede determinarse relaciones empíricas para concretos similares curados de tal manera, que tanto las superficies probadas con el martillo y las regiones centrales, cuya resistencia es lo importante, tengan la misma resistencia. Los cambios que afectan sólo a la superficie del concreto, tales como el grado de saturación en la superficie o la carbonización, serían engañosos en lo que respecta a las propiedades del concreto dentro de la estructura. (Ver Figura 2.11).

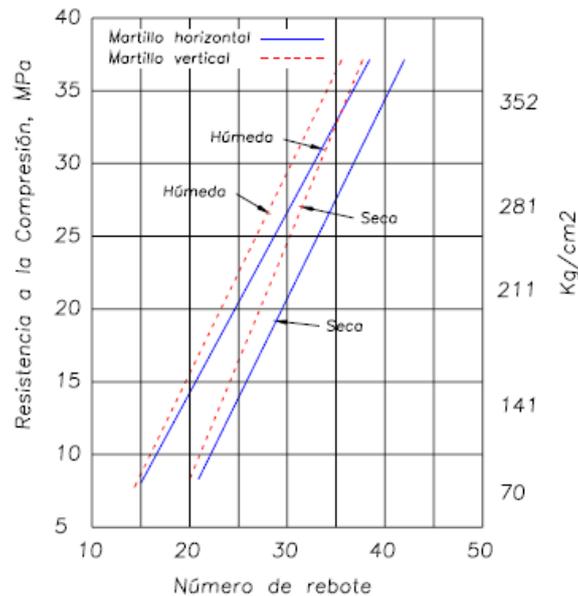


Figura 2.11 Relación entre la resistencia a compresión y el número de rebote sobre una superficie de concreto húmeda y seca

Pull out test

Es una prueba que mide, mediante un ariete de tensión, la fuerza requerida para desprender una varilla de acero, con un extremo de mayor sección transversal previamente empotrada generalmente de 25 mm de diámetro (véase Figura 2.12). Durante la operación se extrae un cono de concreto y la fuerza requerida para ello está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto original. La norma ASTM C 900 prescribe el método de prueba, pero aún no se dispone de información adecuada sobre la confiabilidad de la prueba.

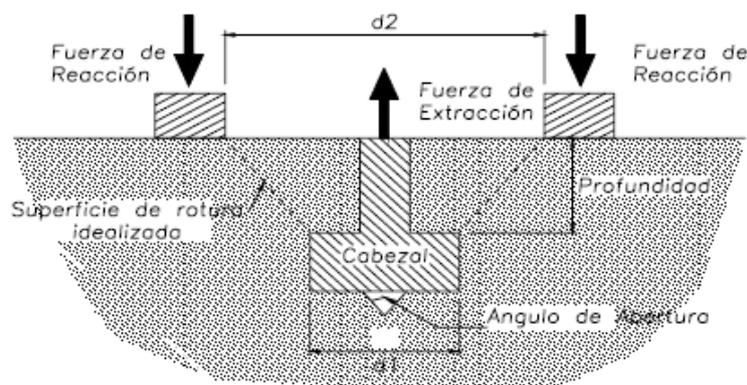


Figura 2.12 Representación esquemática de la prueba a la extracción.

No obstante, en Dinamarca, la prueba de extracción (conocida comercialmente como Lok-test) ha sido aplicada exitosamente.

Debido a su forma, la varilla de acero se arranca adherida a un trozo de concreto, éste último de forma troncocónica. La resistencia a la extracción se calcula como la relación de la fuerza de extracción con el área idealizada del cono truncado. En realidad, el concreto está sometido a tensión y a cortante, pero según Malhotra la resistencia a la extracción calculada se aproxima mucho a la resistencia al cortante del concreto.

La relación de la resistencia a la extracción con la resistencia a la compresión disminuye ligeramente al incrementarse el nivel de resistencia, pero para una resistencia dada, es independiente de la edad (Ver Figura 2.13).

No es necesario llevar la prueba de la extracción hasta su término; es posible que baste con aplicar una fuerza determinada a la varilla empotrada y, si no se desprende, suponer que existe la resistencia dada.

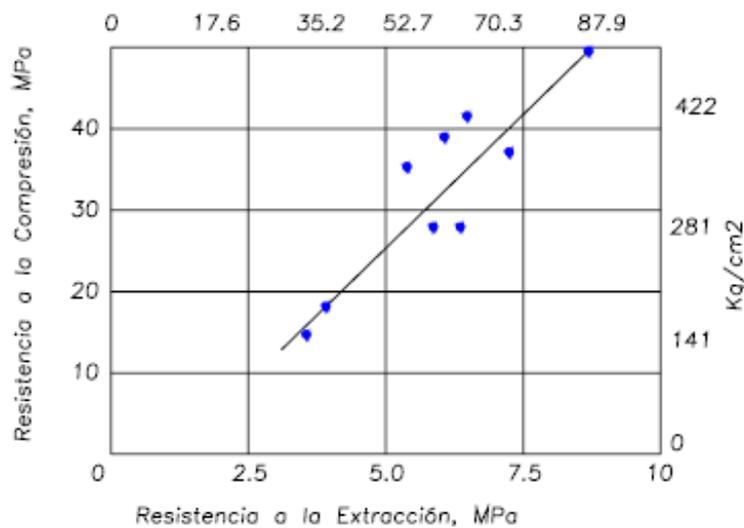


Figura 2.13 Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a extracción en cilindros estándar.

De acuerdo con Malhotra la prueba de extracción es superior a la prueba del martillo de Schmidt y a la de resistencia a la penetración, pues la de extracción implica mayor volumen y mayor profundidad de concreto. El aspecto negativo es que hay la necesidad de reparar el concreto. Además, las varillas para la prueba deben situarse antes del vaciado, por lo que la prueba debe ser planeada de antemano. Recientemente se ha intentado desarrollar una prueba de extracción empleando un elemento de acero fijado en un agujero taladrado en el concreto endurecido.

Están proliferando las pruebas que implican la remoción de un fragmento del concreto. En la prueba de desprendimiento es posible determinar la resistencia del concreto a la flexión en una sección transversal circular paralela a la superficie del concreto. La sección está formada por un tubo endurecido en el concreto fresco. Se utiliza un gato para aplicar una fuerza transversal al elemento que se va a romper. Se ha obtenido una buena correlación con el módulo de ruptura, pero la resistencia al desprendimiento es más

elevada. Se asegura que esta prueba es particularmente útil en concreto joven, pero la variabilidad es considerable. Asimismo, hay dificultades para introducir el tubo en la mezcla rígida.

Un logro de los ingleses es una prueba de extracción en la que se emplea un ancla de cuña sometida a torsión; la torsión máxima parece estar relacionada con la resistencia a la compresión del concreto.

2.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)

2.2.3.1 Bases teóricas

La prueba de ultrasonido es un ensayo no destructivo, el cual permite medir la velocidad de propagación de una onda en un material así como detectar la existencia de defectos internos. En este ensayo, una onda con un contenido de frecuencias mayor a 20kHz es producida por un transductor ultrasónico. La onda viaja a través del material y finalmente es detectado por un receptor como se muestra en la Figura 2.14a. El camino que recorre la onda provee de información acerca del elemento el cual se está ensayando. Específicamente, la velocidad de la onda está en función de las propiedades del material tales como módulo de elasticidad, densidad y módulo de poisson (Krautkramer & Krautkramer, 1990).

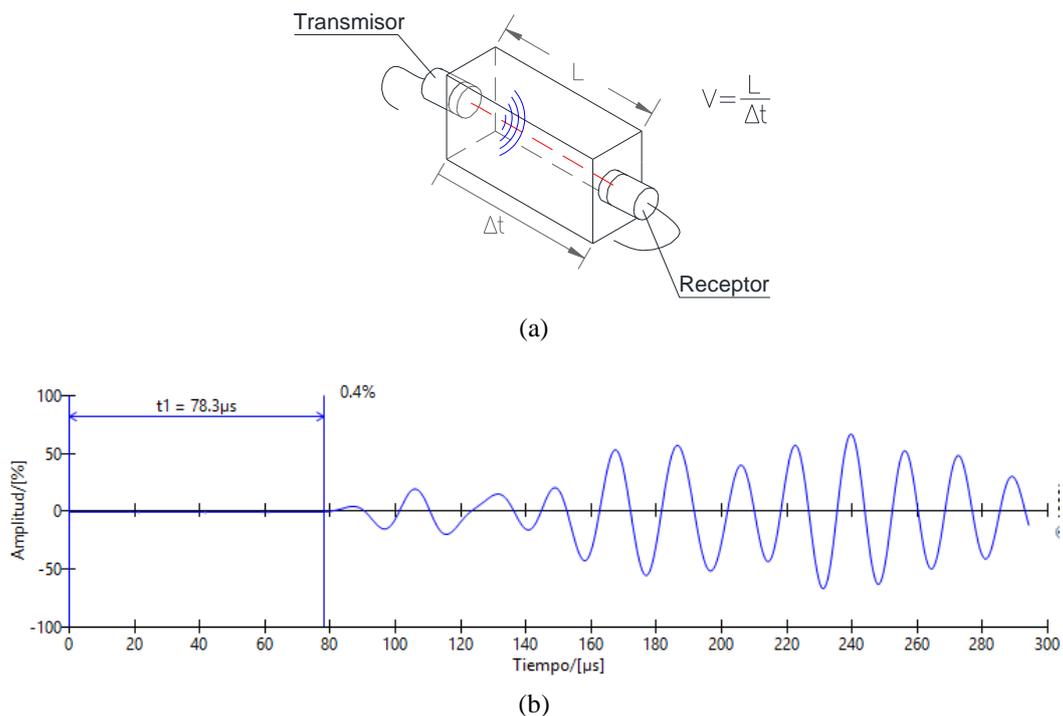


Figura 2.14 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración de ensayo (b) Señal adquirida.

La propagación de ondas mecánicas producidas por un pulso ultrasónico a través de un material estudia principalmente las ondas longitudinales conocidas como ondas P u ondas de compresión. Este tipo de onda desplaza las partículas del material a lo largo de la dirección de propagación de la onda.

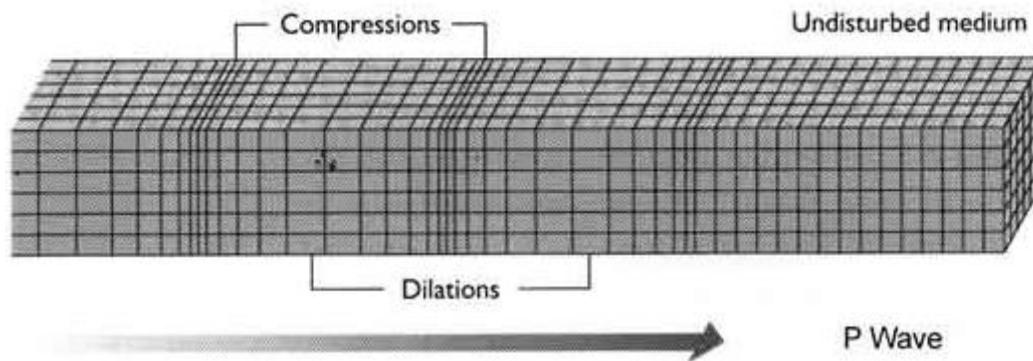


Figura 2.15 Ondas de compresión llamadas ondas P que se producen en el ensayo de ultrasonido.

La velocidad de pulso ultrasónico (UPV por sus siglas en inglés) se calcula dividiendo la longitud de recorrido entre el tiempo que toma en llegar al receptor en el extremo opuesto (Ver Figura 2.14b), tal como se muestra en la ecuación (2.1).

$$UPV = \frac{L}{t} \quad (2.1)$$

En la ecuación (1) UPV representan la velocidad de propagación a través del material de la onda P en $[m/s]$. La longitud de recorrido está representada por L en $[m]$, mientras que t es el tiempo en $[s]$ que demora en atravesar la onda el material. Complementariamente, la ecuación (2.2) considera que la onda P atraviesa un sólido elástico isotrópico y por lo tanto es posible establecer una relación de la velocidad con el módulo de elasticidad dinámico, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990). En estas ecuaciones el módulo de elasticidad dinámico (E_d) está expresado en $[N/m^2]$, la densidad (ρ) en $[kg/m^3]$ y el módulo de Poisson (ν) es adimensional.

$$UPV = \sqrt{\frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.2)$$

Determinar de manera precisa el tiempo de propagación de la onda es de vital importancia en el ensayo de ultrasonido. Cuando este tiempo es hallado de forma manual existe un grado de incertidumbre en el punto exacto de llegada de la onda ultrasónica. Existen casos particulares donde es posible considerar diferentes estimaciones del tiempo de arribo de la onda en la señal adquirida (Granja, 2011). Por lo tanto el tiempo de propagación varía en función de la experiencia y conocimiento del operador ya que la elección del punto exacto se lleva a cabo de manera subjetiva (Viana da Fonseca, et al., 2009)

La amplitud de la onda es mayor cuando atraviesa un material con menor cantidad de defectos. Si se combinan las mediciones de velocidad y amplitud de la onda se puede incrementar la sensibilidad de la técnica ultrasónica para detectar heterogeneidades (Liang, et al., 2013).

Este método se puede usar principalmente para pruebas de control de calidad e inspección in situ en estructuras de concreto. 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 repetitividad.

Las pruebas de ultrasonido en concreto deben seguir las recomendaciones de la norma ASTM C597 la que establece el tipo de equipo a utilizar así como también los requerimientos de las muestras de concreto a evaluar.

A partir de la documentación consultada y conociendo los tres grandes grupos de las aplicaciones de los ultrasonidos, a continuación se detallan las aplicaciones típicas en diferentes campos:

- En procesos industriales como: comunicaciones, navegación y pesca, química, biología, soldadura, mecanizado, colada-modelo.
- Utilizadas en control de calidad, para ensayos de: defectología, metrología y caracterización.
- En construcciones navales y metálicas, para el control de productos semielaborados, y de uniones.
- En la industria metalúrgica, para el control de productos fundidos, forjados y laminados, como por ejemplo: chapas, tubos y alambres.
- En comunicaciones, para el control de material rodante, aeronáutico y vías de comunicación (raíles).
- En instalaciones de potencia, para inspección de recipientes solicitados por presión y temperaturas elevadas.
- En la industria química, para la inspección de instalaciones susceptibles de ser atacadas por sustancias químicas.

2.2.3.2 Factores que afectan a los Ultrasonidos

Los métodos ultrasónicos son afectados por algunos factores, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- Contacto entre superficies del hormigón y transductores. Debe haber un íntimo contacto acústico; las superficies moldeadas, en general no presentan problemas y si presentan alguna rugosidad, se puede eliminar frotando con piedra de pulir. Los transductores deben apretarse contra el hormigón y, para mejorar el contacto, se suele colocar una película de vaselina entre hormigón y transductor.
- Longitud del recorrido. Debido a la heterogeneidad del hormigón y, para evitar sus efectos, es conveniente que el recorrido sea más bien extenso. Para un mismo hormigón, se han encontrado diferencias de velocidad de propagación, al medir distintos espesores.
- Humedad del hormigón. En general, la velocidad de propagación del sonido en el hormigón aumenta a medida que su contenido de humedad es mayor, ya que la velocidad del sonido en el agua es mayor que en el aire.

- Armaduras metálicas. Las armaduras metálicas presentes en el hormigón, afectan considerablemente las medidas de velocidad, debido a que en el acero, la velocidad de propagación puede ser hasta 2 veces mayor que en el hormigón.

2.2.3.3 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.

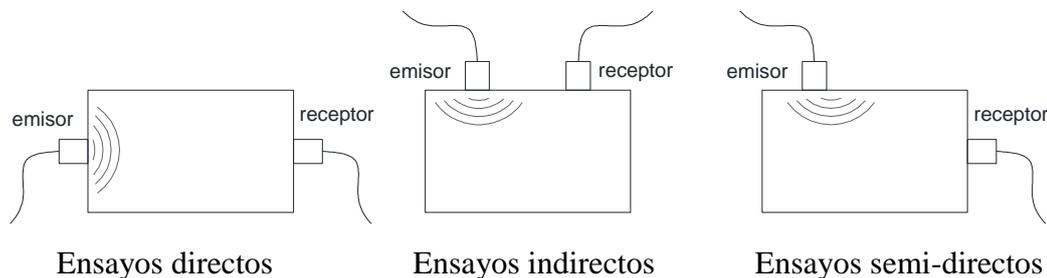


Figura 2.16 Tipos de configuraciones de ensayos de ultrasonido.

2.2.3.4 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.

2.2.3.5 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.

2.2.3.6 Ventajas y desventajas

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.

Como ventaja podemos mencionar que el equipo es de 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.

Capítulo III. Marco metodológico

3.1 Hipótesis general

La relación que existe entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido en concreto es exponencial.

3.2 Definición de Variables

Variable Independiente: Velocidad de onda ultrasónica

Variable dependiente: Resistencia a Compresión

3.3 Operacionalización de los componentes de la hipótesis

Tabla 3.1. Componentes de la hipótesis

Tipo de Variable	Variable	Definición conceptual	Indicadores	Índice
Independiente	Velocidad de onda Ultrasónica	Rapidez con la que una onda generada por un transductor ultrasónico atraviesa el material hasta llegar al receptor de ultrasonido.	Tiempo de propagación de Onda	Km/s
Dependiente	Resistencia a compresión	Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.	Fuerza de rotura	Mpa

3.4 Metodología

3.4.1 Método de investigación

Tabla 3.2. Tipo de investigación en cada uno de los criterios de la metodología

Criterio	Tipo de investigación
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque teórico metodológico	Cuantitativa
Objetivos (alcances)	Experimental
Fuente de datos	Primaria Mixta
Control en el diseño de la prueba	Experimental
Temporalidad	Transversal (sincrónica)

3.4.2 Población, muestra y unidad de análisis

3.4.2.1 Población

La población de estudio fue un conjunto de especímenes de concreto provenientes de diferentes obras de la ciudad Lima que llegaron al laboratorio de estructuras de la PUCP para realizar ensayos de compresión uniaxial.

3.4.2.2 Muestra

La muestra estuvo compuesta por 140 especímenes de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño

3.4.2.3 Unidad de análisis

Probeta de concreto de 6"x12".

3.4.3 Técnicas e instrumentos de recopilación de información

Este trabajo se enfoca en evaluar el concreto producido en diferentes obras de la ciudad de Lima por medio de ensayos de ultrasonido.

Para determinar la velocidad de propagación de las ondas del concreto se realizaron ensayos de ultrasonido siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597.

Para determinar la resistencia a compresión del concreto se realizaron ensayos de compresión uniaxial siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C39.

3.4.4 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

La información cuantitativa que se obtuvo de las variables de estudio de las diferentes muestras de concreto fue procesada mediante métodos estadísticos como la determinación de promedios, análisis de varianza, límites de confianza, etc. Para lo cual se empleó programas computarizados como Microsoft Excel y SPSS, con los que se obtuvieron los resultados y gráficas representativas.

3.4.5 Equipos empleados

Las pruebas a compresión fueron por control de fuerza a una velocidad de 4 KN/s siendo el equipo utilizado para la aplicación de la carga un modelo ACCU-TEK™ Touch 500 con una capacidad máxima de 1500 KN fabricado por ELE International tal como se muestra en la Figura 3.1a.

Para los ensayos ultrasónicos se utilizó el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo se tiene una aproximación en el tiempo de 0.5 μ s. Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda P. Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597 (2016) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro (Ver Figura 3.1b).



(a)



(b)

Figura 3.1 Equipos de medición (a) Ensayos a compresión (b) Prueba de ultrasonido.

3.4.6 Matriz de consistencia metodológica

En la siguiente matriz se describen los procesos y componentes del proyecto de investigación. Con esto se determina el nivel de consistencia metodológica para esta investigación.

Tabla 3.3. Matriz de consistencia metodológica

Curvas de relación de la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño.

Formulación del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Fuente	Metodología
Pregunta general ¿Cuál es la relación que existe entre la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño?	Objetivo general Determinar curvas de relación de la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) y la velocidad de onda medida con ultrasonido en muestras de concreto de las cuales se desconoce sus características de diseño.	La relación que existe entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonido en concreto es exponencial.	Variable Independiente Velocidad de onda Ultrasonica (Km/s)	Tiempo de propagación de Onda	Ensayo de UPV	Experimental
			Variable Dependiente: Resistencia a compresión (Mpa)	Fuerza de rotura		

3.5 Aplicación de ensayos de resistencia a compresión y ultrasonido en muestras cilíndricas de concreto

En concreto la velocidad de la onda (UPV) depende principalmente de su módulo de elasticidad y este está estrechamente relacionado con la resistencia a compresión ($F'c$). Sin embargo esta relación no es única, depende principalmente del diseño de mezclas, tipos de agregados y tipo de cemento usado (Neville, 1996). Es por eso que existen estudios donde se determinan relaciones de $F'c$ y UPV en casos particulares como adiciones (Benaicha, et al., 2015) (Nik & Omran, 2013), concretos ligeros (Alexandre Bogas, et al., 2013), o concretos de alta resistencia (Del Río, et al., 2004). Otros autores han propuesto expresiones donde se desconoce información alguna del concreto por lo que estas expresiones permiten evaluar in situ la resistencia a compresión del concreto de una manera rápida y con cierto grado de confiabilidad (Nash't, et al., 2005) (Trtnik, et al., 2009) (Turgut, 2004).

Esta investigación propone evaluar la resistencia a compresión de concreto a partir de ensayos de ultrasonido. Obtener expresiones empíricas que permitan estimar $F'c$ usando UPV serán de gran utilidad a la hora de evaluar preliminarmente construcciones de concreto.

3.5.1 Ensayos para el análisis de la relación entre la velocidad de onda ultrasónica y la resistencia a compresión.

3.5.1.1 Descripción de especímenes

Ensayos a compresión y de ultrasonido en 140 muestras de concreto fueron llevados a cabo en el laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Las muestras de concreto provinieron de diferentes proyectos de construcción de la ciudad de Lima, por lo que personalizan a una gran variedad de diseños de mezclas, condiciones de curado y edad. Todas las muestras fueron cilindros de concreto de 0.15 m y 0.30 m de altura aproximadamente. La Figura 3.2 muestra algunos de los especímenes ensayados.



Figura 3.2 Especímenes de concreto provenientes de diferentes obras de la ciudad de Lima

3.5.2 Aplicación de los ensayos de resistencia a compresión

La caracterización mecánica a compresión en concreto se realizó con ensayos de compresión uniaxial ejecutados siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C39 (2015). Todas las muestras fueron cilindros de concreto no reforzado con diámetro de 0.15 m y 0.30 m de altura. Los cilindros fueron ensayados usando capas de neopreno en la parte superior e inferior tal como especifica la norma ASTM C1231 (2015). Las pruebas fueron por control de fuerza a una velocidad de 4 KN/s siendo el equipo utilizado para la aplicación de la carga un modelo ACCU-TEK™ Touch 500 con una capacidad máxima de 1500 KN fabricado por ELE International. En la Figura 3.3 se muestra la configuración teórica y real de esta prueba.

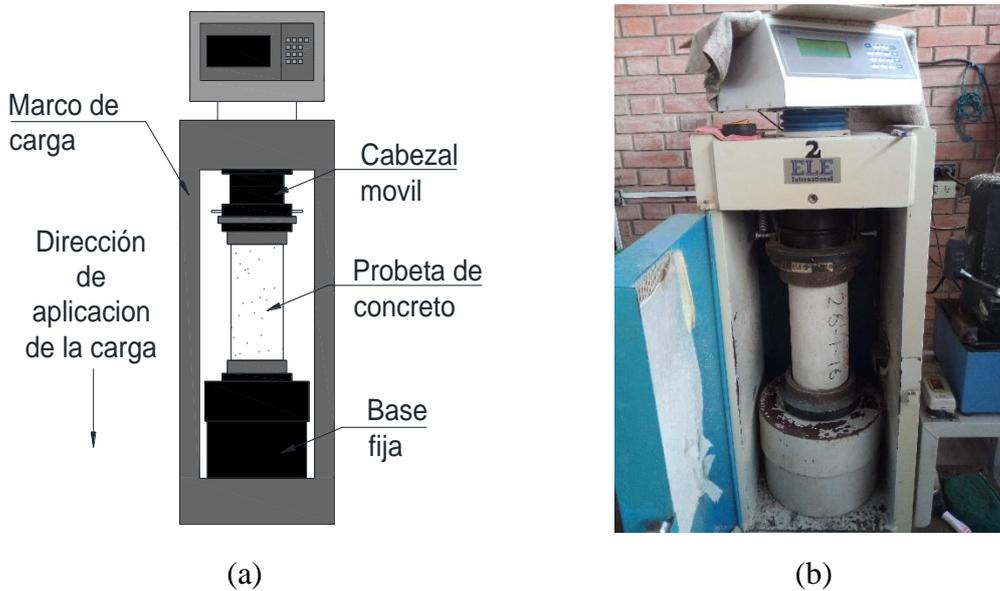


Figura 3.3 Ensayo a compresión en probetas de concreto (a) Configuración teórica (b) Prueba realizada en una probeta.

3.5.3 Aplicación de la prueba de ultrasonido

Los ensayos de Velocidad de Pulso Ultrasonico (UPV) fueron ejecutados en todas las muestras de concreto. La configuración y procedimiento de la prueba se observa en los esquemas de la Figura 3.4. Las pruebas de UPV se realizaron instantes antes de las pruebas a compresión y de esta manera hacer comparables estas mediciones. Los especímenes de concreto fueron pesados y medidas antes de los ensayos de UPV. Esta prueba fue realizada conforme a las especificaciones de la norma ASTM C597 (2016). El equipo usado fue el portable ultrasonic non-destructive digital indicator tester, Pundit Lab. En este método un pulso ultrasónico es generado y transmitido a la superficie del concreto a través de un transductor emisor. El tiempo que le toma al pulso en atravesar el material es medido por el transductor receptor en el lado opuesto. Transductores con una frecuencia de 54 kHz fueron utilizados para generar el pulso y medir el tiempo de propagación. Este valor se calculó con una precisión de 0.1 μ s utilizando el software PunditLink (Proceq, 2012). Cinco registros de tiempo fueron tomados de cada espécimen de concreto para después ser promediados. Finalmente la velocidad de propagación en el

material es la relación entre la longitud recorrida y el tiempo de fase medida entre el transductor de emisión y. Además material acoplante a base de agua fue usado para asegurar la estabilidad de las mediciones.

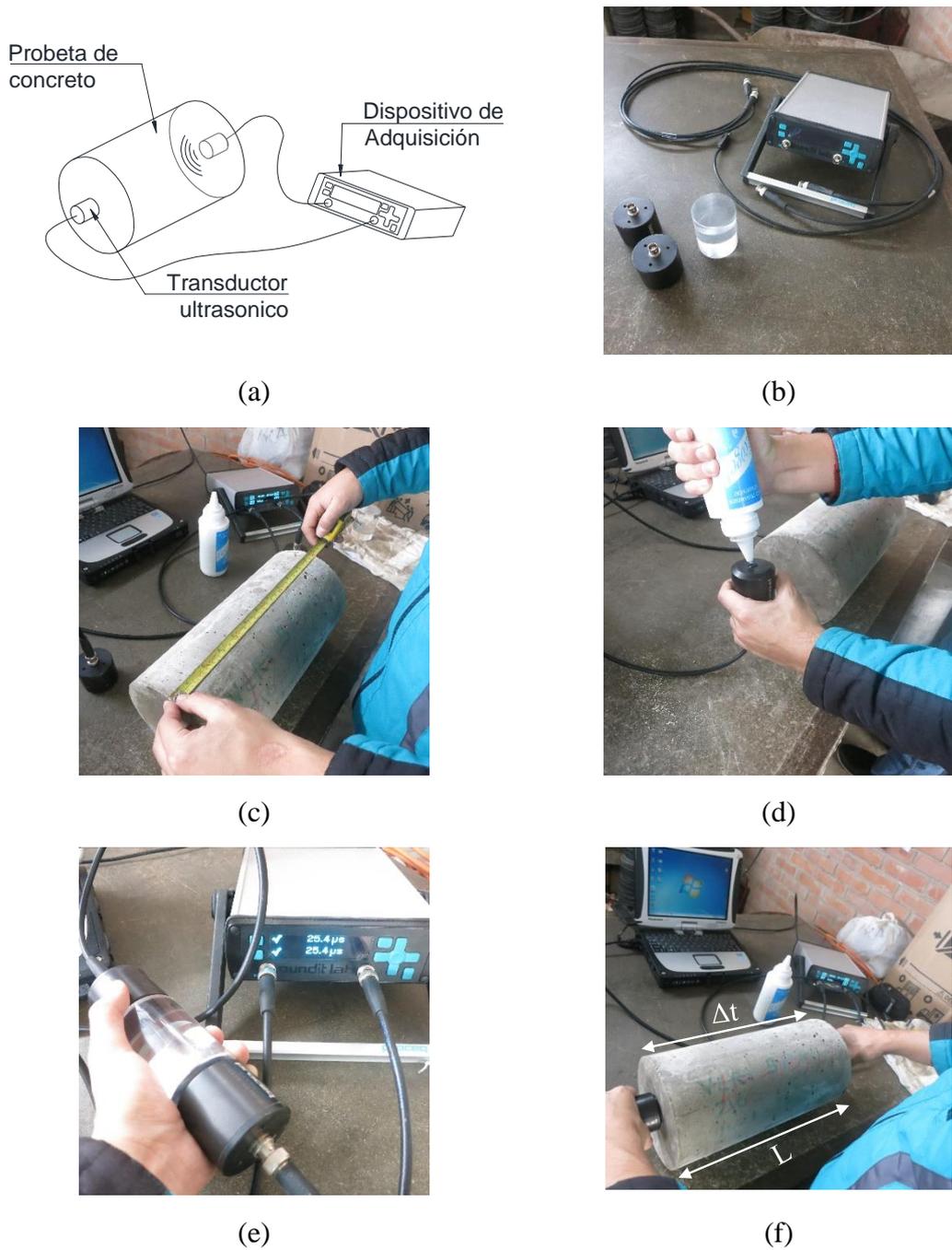


Figura 3.4 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración (b) Equipo empleado (c) medición de longitud (d) material acoplante (e) calibración del equipo (f) Medición del tiempo de propagación ultrasónico.

El equipo utilizado para medir la velocidad de pulso ultrasónico fue el Pundit Lab(+) (Proceq, 2012) A continuación se describe la operatividad del equipo tomando figuras de su manual de utilización.

Básicamente la distancia (longitud de recorrido) entre los transductores deberá medirse del modo más preciso posible. Será sumamente importante asegurar el acoplamiento

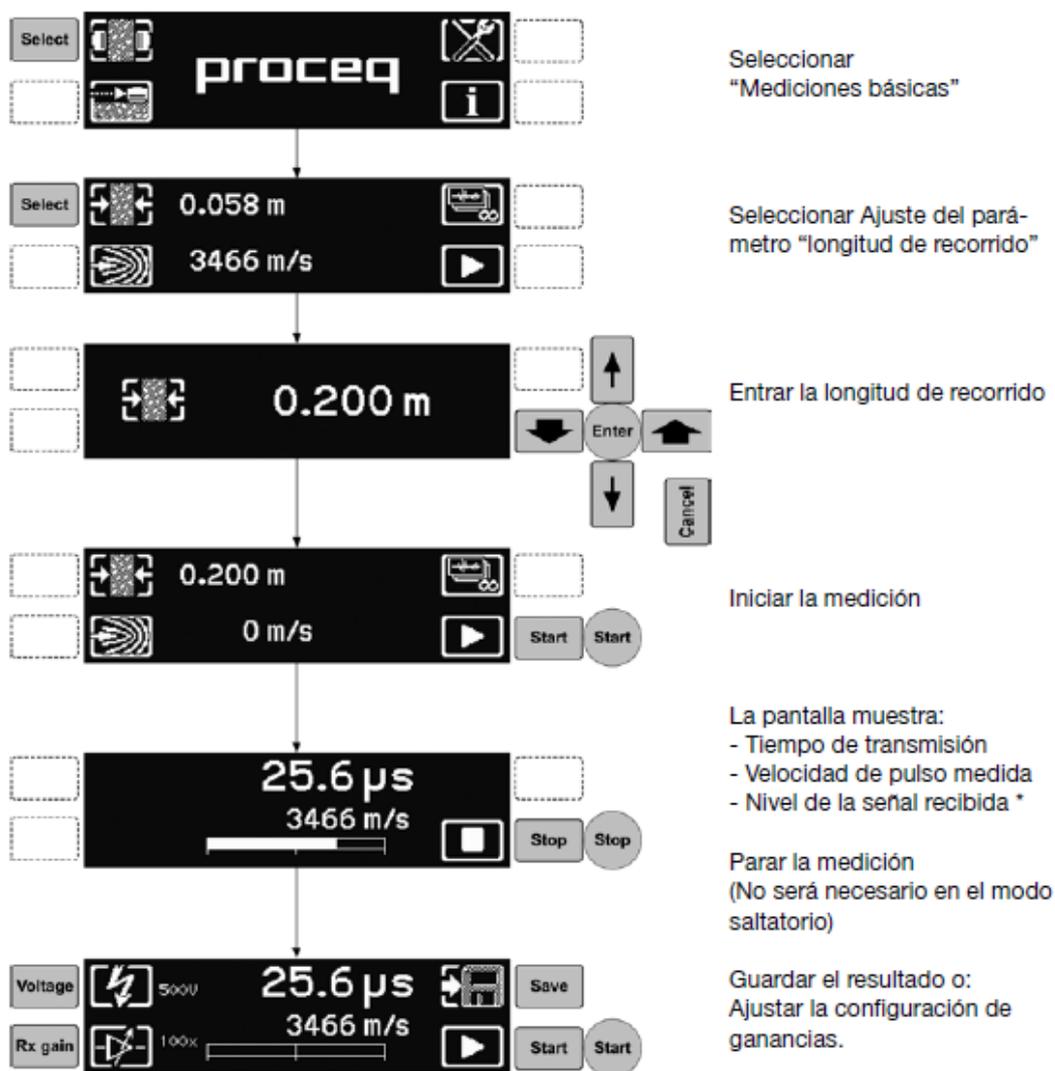
acústico adecuado de los transductores con la superficie ensayada. Deberá aplicarse una capa delgada de acoplador a los transductores y a la superficie ensayada. En algunos casos podrá ser necesario preparar la superficie alisándola.

Barras afectarán la medición ultrasónica ya que la señal se desplazará más rápidamente a través de la barra que a través del hormigón. Se deberá determinar la ubicación de las barras usando un detector de barras tal como el Profoscope de Proceq y posicionar los ensayos ultrasónicos de tal manera que las mismas se omitan.

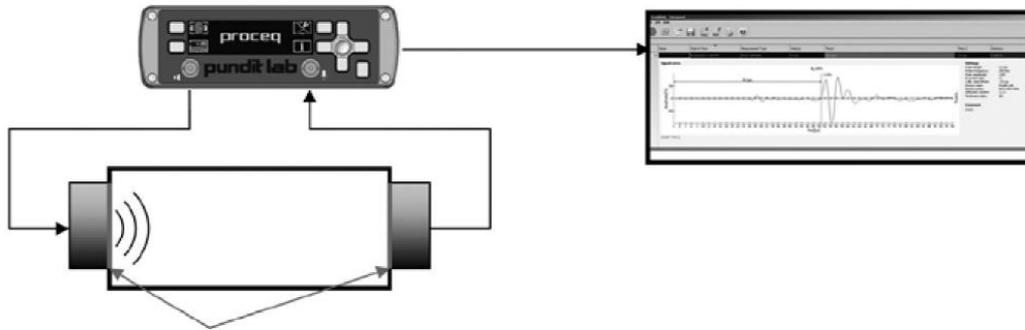
El procedimiento de medición estándar será:

- Aplicar el acoplador.
- Posicionar los transductores.
- Ejecutar la medición.
- Reposicionar los transductores (sólo para mediciones compuestas).
- Guardar el resultado.

Para medir la velocidad de pulso se deben realizar los siguientes pasos en el equipo de ultrasonido:



La configuración de la toma del tiempo que tarda en atravesar el material en estudio se muestra a continuación. Como se observa, el transductor de la parte derecha inicia el tiempo de medición y el transductor izquierdo adquiere la llegada de la onda en la cara opuesta y ordena al equipo almacenar la información.



Ejecución de mediciones con los transductores de ondas

Figura 3.5 Configuración de ensayo de ultrasonido utilizando el equipo Pundit Lab (+)

Para determinar el tiempo de viaje se utiliza la señal adquirida por el equipo. La onda llega al extremo opuesto del material cuando la señal presenta un cambio de amplitud brusco, esto es producto de las vibraciones que detecta el transductor cuando llega la onda ultrasónica como se observa en la siguiente figura.

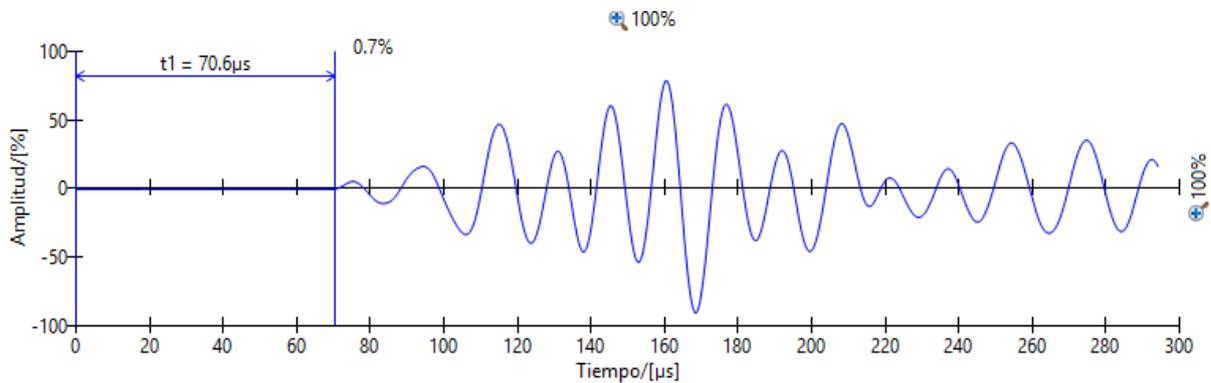


Figura 3.6 Registro adquirido por el transductor muestra que la onda ha tardado 70.6 us en atravesar el material.

Capítulo IV. Resultados y discusión

En esta sección se describen las características geométricas, densidad y edad de los especímenes de concreto así como los resultados de la aplicación de los ensayos de resistencia a compresión y la medición de velocidad de pulso ultrasónico.

4.1 Geometría, edad y densidad de las muestras.

Debido a la naturalidad de la procedencia de las muestras, estas están sujetas a diferentes diseños de mezclas, condiciones de curado y edad. Se logró determinar que la base de datos tuvo en rango de edad entre 7 y 58 días. En la Figura 4.1 se muestran los datos de la edad de rotura de todas las muestras.

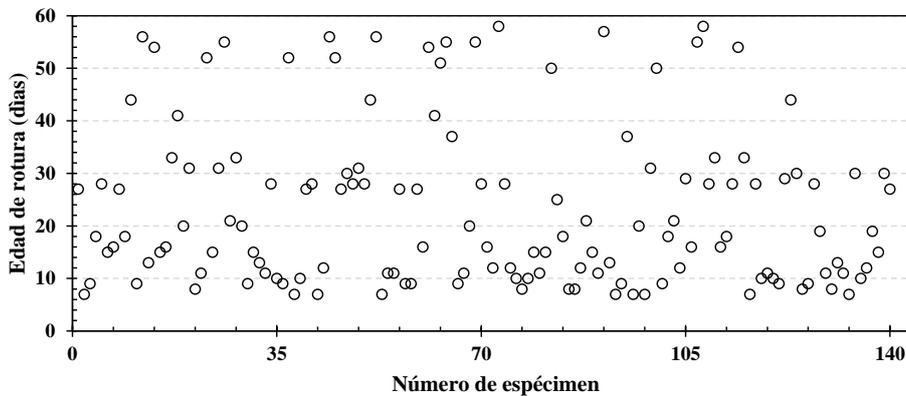


Figura 4.1 Edad de rotura de las muestras de concreto.

Las características geométricas de longitud y diámetro de las muestras de concreto se muestran en las Figura 4.2 y Figura 4.3 respectivamente. El diámetro de todas las probetas es en promedio de aproximadamente 150 mm con una desviación estándar de 2.4 mm. La longitud promedio fue de 300 mm y una desviación estándar de 4.4 mm. En ambos casos el coeficiente de varianza fue menor al 2%.

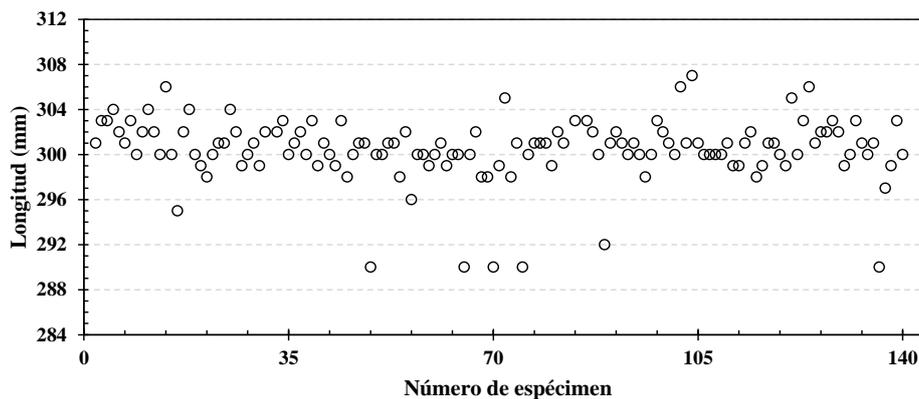


Figura 4.2 Longitud en mm de las muestras de concreto.

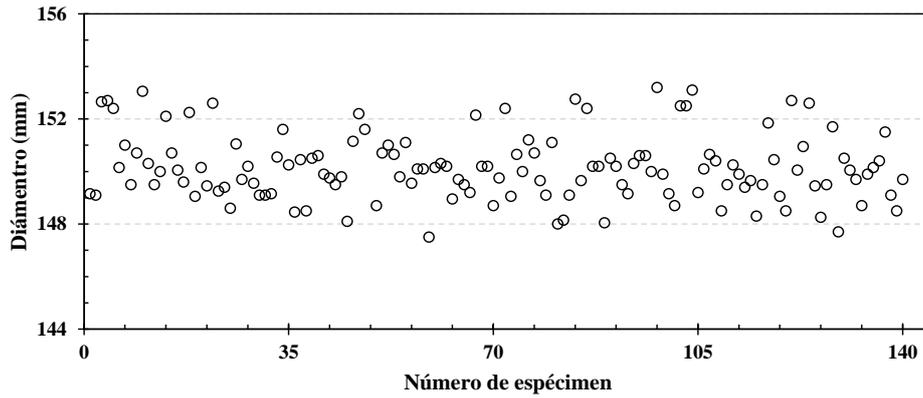


Figura 4.3 Diámetro promedio en mm de las muestras de concreto.

Las muestras fueron pesadas antes de cada ensayo por lo que se determinó su densidad en base a la norma ASTM D7263 (2009). En la Figura 4.4 se muestra la gran variabilidad en términos de densidad. Concretos con densidades entre los 2150 y 2600 Kg/m³ fueron evaluados.

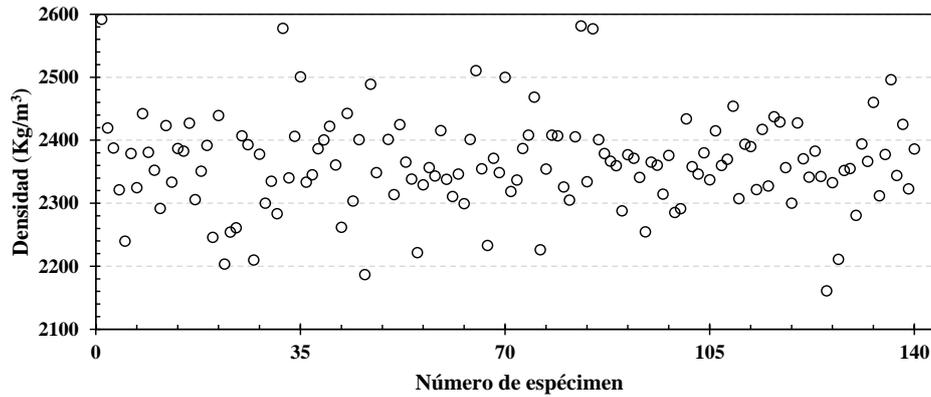


Figura 4.4 Densidad de las muestras de concreto.

En resumen en la Tabla 4.1 se muestran las características de las probetas de concreto ensayadas. Se debe mencionar la gran variabilidad que presentan las probetas ya que son procedentes de diferentes proyectos de la ciudad de Lima.

Tabla 4.1. Propiedades de las muestras de concreto: edad, longitud, diámetro y peso.

Nº	Nombre de Probeta	Edad (días)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (Kg/m ³)
1	cal.04 22.06.15 ByLL	28	301	149.40	2261
2	cal.03 22.06.15 ByLL	28	301	149.15	2291
3	cal.03 20.06.15 ByLL	28	298	149.80	2338
4	cal.04 20.06.15 ByLL	28	301	149.40	2322
5	cal.02 11.07.15 ByLL	9	300	149.75	2262
6	cal.01 11.07.15 ByLL	9	301	149.25	2254
7	598175	58	298	148.30	2327
8	598183	58	297	151.50	2344
9	598188	57	300	148.70	2401

Continuación Tabla 4.1. Propiedades de las muestras de concreto: edad, longitud, diámetro y peso.

Nº	Nombre de Probeta	Edad (días)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (Kg/m3)
10	598256	56	300	149.15	2341
11	598254	56	300	150.70	2314
12	598252	56	302	150.45	2345
13	598342	54	301	149.50	2307
14	598337	54	300	150.00	2314
15	598340	54	299	151.10	2326
16	598405	52	300	149.90	2312
17	598408	52	300	150.10	2357
18	598409	52	301	149.20	2337
19	598443	51	301	150.70	2354
20	3-techo-210-20-7-15	11	301	150.65	2365
21	2-placa-210-23-07-15	8	304	150.30	2292
22	1-placa-210-23-07-15	8	300	150.10	2343
23	10-0338-2	9	303	149.70	2366
24	9-0338-1	9	303	151.70	2352
25	8-0337-2	9	301	151.00	2425
26	7-0337-1	9	302	153.05	2352
27	6-0336-2	9	301	151.85	2429
28	5-0336-1	9	303	152.40	2401
29	4-0325-4	29	301	151.60	2349
30	0324-3	30	303	152.70	2321
31	0324-4	30	301	152.50	2346
32	0325-3	29	303	149.80	2303
33	4-Techo-210	11	300	150.65	2360
34	5-Cimiento-210	28	300	149.70	2386
35	6-cimiento-210	28	300	149.05	2392
36	vigas 18-07-15	16	303	153.20	2376
37	SOTI-LAS3-90	37	300	149.20	2355
38	S-P23C12-90	50	300	149.05	2300
39	P2-LAS1-106	20	299	149.10	2335
40	P2-LAS1-105	20	292	148.05	2359
41	53B02006M	44	295	150.05	2427
42	53B02006K	44	299	149.50	2443
43	columnas 18-07-15	16	303	151.60	2406
44	columnas 18-07-15	16	302	155.70	2374
45	vigas 18-07-15	16	301	152.20	2489
46	158LC034	55	301	149.65	2408
47	258LC034	55	298	150.20	2371
48	258LC034	55	300	149.70	2401
49	258LC034	55	299	147.50	2415
50	53B0200615	44	298	149.45	2439
51	358LC057	10	299	149.10	2425
52	358LC057	10	299	150.60	2422
53	358LC057	10	301	150.15	2377

Continuación Tabla 4.1. Propiedades de las muestras de concreto: edad, longitud, diámetro y peso.

Nº	Nombre de Probeta	Edad (días)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (Kg/m ³)
54	Mur55p3	27	305	152.70	2370
55	g.106Scimienro C.V	10	307	153.10	2380
56	g.107.Scimienro C.V	10	306	152.10	2387
57	lo553p3	27	303	152.65	2388
58	004-173-3	27	301	148.70	2460
59	004-173-2	27	300	150.10	2415
60	004-173-1	27	300	148.50	2454
61	004-186-24	11	299	150.25	2394
62	004-186-23	11	302	150.20	2379
63	004-186-22	11	301	149.10	2407
64	004-185-21	12	300	148.70	2434
65	004-185-20	12	299	149.90	2390
66	falso piso	25	302	152.15	2233
67	sobrecimiento 2 p	28	300	152.60	2203
68	sobrecimiento 1 p	28	300	151.15	2186
69	004-195	9	302	149.65	2417
70	004-195	9	280	149.10	2581
71	004-196	7	280	149.15	2578
72	004-196 14	7	290	174.55	1819
73	004-196 15	7	280	149.15	2592
74	53LMU100815	7	280	149.65	2577
75	26LMU100815	7	290	150.00	2468
76	26LMU100815	7	290	149.50	2511
77	26LMU100815	7	300	150.05	2394
78	004-195	9	290	148.70	2500
79	53mc110715	37	290	150.40	2496
80	Pu12-22	18	300	150.20	2378
81	Pu11-21	18	300	150.20	2367
82	P16-20	28	296	149.55	2329
83	P14-19	28	302	151.10	2221
84	P13-18	28	299	149.75	2319
85	P11-17	28	301	150.30	2311
86	P10-16	31	302	149.50	2211
87	P9-15	31	302	149.10	2283
88	P7-14	31	299	150.15	2246
89	P6-13	31	300	151.20	2226
90	P3-12	33	302	149.90	2285
91	P4-11	33	301	150.50	2288
92	P2-10	41	301	149.55	2300
93	P1-9	41	302	149.60	2306
94	PU26-8	11	298	150.20	2348
95	PU25-7	11	299	150.20	2346
96	PU23-6	11	298	149.05	2387
97	Valico SAC - Placas y columnas-280	7	301	150.65	2408

Continuación Tabla 4.1. Propiedades de las muestras de concreto: edad, longitud, diámetro y peso

Nº	Nombre de Probeta	Edad (días)	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (Kg/m3)
98	Valico SAC - Placas y columnas-280	7	302	151.05	2393
99	Valico SAC - Placas y columnas-280	8	300	150.70	2381
100	Valico SAC - Placas y columnas-280	8	303	150.95	2383
101	Valico SAC - Techos-210	30	302	150.55	2340
102	Valico SAC - Techos-210	30	302	150.15	2379
103	CC Los Girasoles - Techo - 210	11	302	150.20	2377
104	CC Los Girasoles - Techo - 210	11	300	150.70	2383
105	CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	12	303	149.50	2442
106	CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	12	303	150.50	2401
107	G.E Calzaduras Mimosas 2 (RoJo)	15	300	148.95	2299
108	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	299	149.70	2210
109	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	301	149.45	2161
110	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	301	150.30	2255
111	Vaciado 4	20	300	150.15	2338
112	Vaciado 3	20	300	150.00	2333
113	Vaciado 2	27	300	150.05	2341
114	Vaciado 1	27	299	150.50	2280
115	469-A	50	304	152.40	2240
116	548	8	304	152.25	2351
117	547	8	305	152.40	2337
118	544	13	306	152.60	2343
119	543	13	306	152.50	2358
120	535A	15	303	152.75	2334
121	P.1.02 08-8-15	18	302	149.50	2423
122	p 102	18	301	149.10	2420
123	p 102	18	299	149.50	2437
124	p 104	15	298	148.10	2401
125	p 104	15	304	148.60	2407
126	P.104 11 5	15	302	147.70	2355
127	c15 T 02	13	302	148.00	2305
128	c15 T 02	13	303	148.50	2323
129	c15 T 01	21	300	148.50	2386
130	c15 T 01	21	301	148.45	2333
131	c15 T 01	21	302	148.25	2332
132	mae	33	301	148.15	2405
133	mae 1 s 7	33	299	148.50	2427
134	PU 53 - TECH 1 PS1	10	300	150.25	2500
135	PU 54 - TECH 1 PS1	10	301	151.00	2325
136	PU 50 - M11 PS1	12	301	149.90	2361
137	PU 30 - PL 3-50T	19	300	150.40	2370
138	PU 29 - PL 3-50T	19	301	150.45	2357
139	PU 37 - TECH-50TS1	16	298	150.60	2360
140	PU 38 - TECH-50TS1	16	300	150.60	2365

El fin estructural también incrementa la variabilidad de las muestras. En la mayoría de los especímenes se logró identificar su procedencia estructural como son techos, placas,

cimientos, vigas, columnas y pisos. Por lo tanto las muestras de concreto presentan gran variabilidad debido a los diferentes diseños de mezclas, relaciones agua cemento, diferencias en agregados, utilización de aditivos, tiempo de curado, etc.

4.2 Resistencia a compresión

La máxima fuerza aplicada P y el tipo de falla fueron registrados. Finalmente, haciendo uso de la carga P y el área A de cada espécimen, se utilizó la ecuación (4.1) para obtener la resistencia a la compresión.

$$F'c = \frac{P}{A} MPa \quad (4.1)$$

El tipo de falla se identifica conforme a la norma ASTM C39 (2015) siendo los tipos que se muestran en la Figura 4.5b.

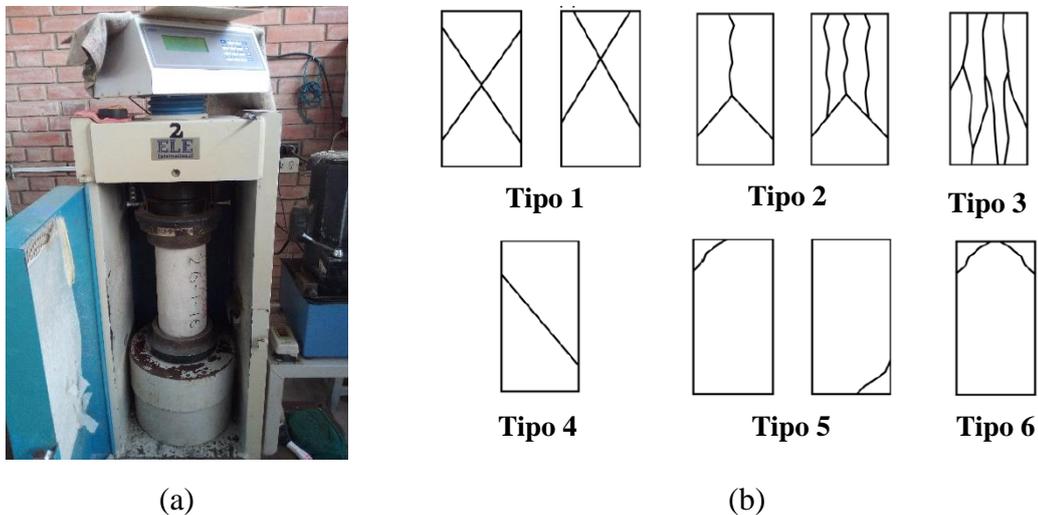


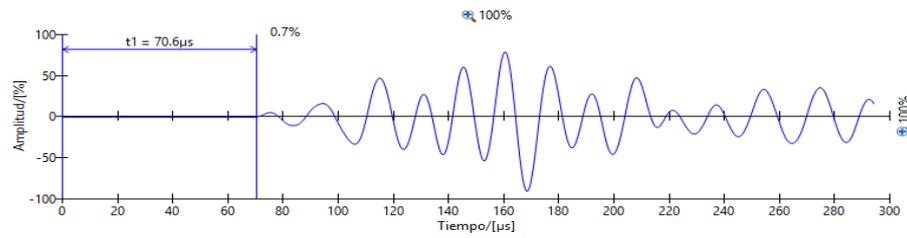
Figura 4.5 Test de resistencia a compresión (a) .Prueba (b) Tipo de falla

De las 140 muestras ensayadas, se registró una carga de rotura máxima y mínima de 864.1 KN y 90 KN siendo las resistencias $F'c$ calculadas de 48.6 MPa (495.6 Kg/cm²) y 5.1 MPa (52 Kg/cm²) respectivamente.

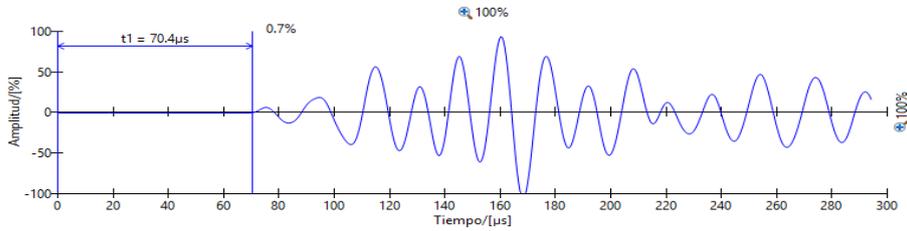
4.3 Medición de la velocidad de pulso ultrasónico

En la Figura 4.6 se presenta como ejemplo los registros obtenidos de una muestra de concreto de 303 mm de longitud. El tiempo de viaje (Δt) fue determinado de forma manual al inicio de cada señal usando el software PunditLink (Proceq, 2012). En esta probeta el promedio del tiempo de viaje fue de 70.5 μs con un CV de 0.3%. La velocidad calculada usando la ecuación (4.2) fue de 4.295 Km/s.

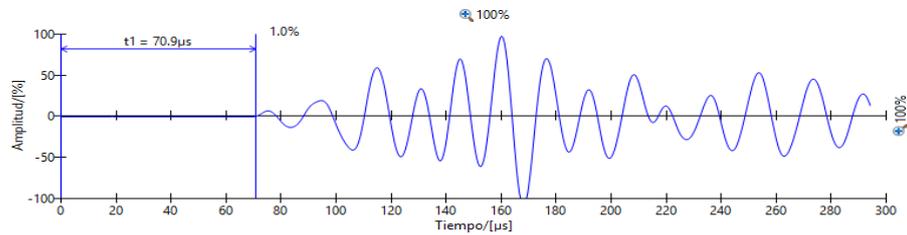
$$UPV = \frac{L}{\Delta t} Km/s \quad (4.2)$$



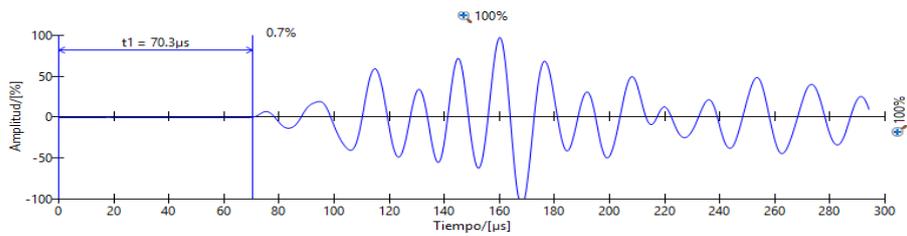
$$\Delta t = 70.6 \mu s$$



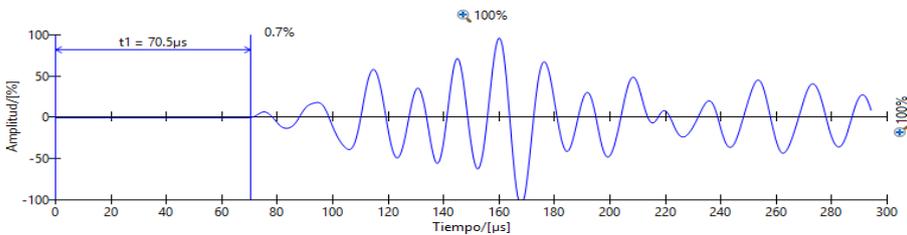
$$\Delta t = 70.4 \mu s$$



$$\Delta t = 70.9 \mu s$$



$$\Delta t = 70.3 \mu s$$



$$\Delta t = 70.5 \mu s$$

(a)



$$\overline{\Delta t} = 70.5 \mu s$$

$$CV = 0.3 \%$$

$$UPV = 4.295 \text{ Km/s}$$

(b)

Figura 4.6 Prueba de ultrasonido (a) registros ultrasónicos (b) configuración de ensayo y resultados.

En la Tabla 4.2 se muestran la fuerza aplicada para la rotura de cada probeta, el tipo de falla, la resistencia a compresión calculada, la medición del tiempo de propagación y la velocidad ultrasónica para cada probeta.

Tabla 4.2. Resultados de pruebas de resistencia a compresión y ultrasonido

N°	Nombre de Probeta	Edad (días)	P (KN)	F'c (Mpa)	Tipo de falla	Δt (us)	UPV (km/s)
1	cal.04 22.06.15 ByLL	28	401.2	22.8	3	73.14	4.115
2	cal.03 22.06.15 ByLL	28	400.5	22.9	2	73.48	4.096
3	cal.03 20.06.15 ByLL	28	399.7	22.7	4	68.92	4.324
4	cal.04 20.06.15 ByLL	28	402.1	22.8	4	69.40	4.337
5	cal.02 11.07.15 ByLL	9	398.7	22.7	4	79.62	3.768
6	cal.01 11.07.15 ByLL	9	400.2	22.9	1	77.94	3.862
7	598175	58	505.8	29.3	3	68.60	4.344
8	598183	58	570.5	31.6	2	66.76	4.449
9	598188	57	732.2	42.2	2	64.92	4.621
10	598256	56	496.6	28.4	3	68.60	4.373
11	598254	56	717.2	40.2	3	67.24	4.462
12	598252	56	864.1	48.6	5	65.80	4.590
13	598342	54	414.7	23.6	3	68.10	4.420
14	598337	54	472.3	26.7	3	68.78	4.362
15	598340	54	493.1	27.5	2	70.68	4.230
16	598405	52	486.2	27.6	3	70.34	4.265
17	598408	52	487.3	27.5	2	69.80	4.298
18	598409	52	544.0	31.1	5	67.22	4.478
19	598443	51	472.5	26.5	3	69.12	4.355
20	3-techo-210-20-7-15	11	318.4	17.9	2	68.38	4.402
21	2-placa-210-23-07-15	8	396.3	22.3	1	71.26	4.266
22	1-placa-210-23-07-15	8	414.3	23.4	3	72.18	4.156
23	10-0338-2	9	346.9	19.7	1	71.12	4.260
24	9-0338-1	9	379.2	21.0	2	71.02	4.266
25	8-0337-2	9	398.5	22.3	1	70.92	4.244
26	7-0337-1	9	392.3	21.3	2	71.42	4.229
27	6-0336-2	9	601.9	33.2	2	68.48	4.395
28	5-0336-1	9	541.5	29.7	3	67.68	4.477
29	4-0325-4	29	539.7	29.9	3	68.80	4.375
30	0324-3	30	590.9	32.3	3	69.48	4.361
31	0324-4	30	517.0	28.3	2	69.48	4.332
32	0325-3	29	540.1	30.6	1	68.08	4.451
33	4-Techo-210	11	379.6	21.3	5	70.80	4.237
34	5-Cimiento-210	28	458.2	26.0	1	67.98	4.413
35	6-cimiento-210	28	390.2	22.4	2	69.29	4.330
36	vigas 18-07-15	16	416.4	22.6	2	70.62	4.291
37	SOTI-LAS3-90	37	394.5	22.6	2	70.50	4.255
38	S-P23C12-90	50	371.7	21.3	2	73.04	4.107
39	P2-LAS1-106	20	235.6	13.5	2	73.56	4.065
40	P2-LAS1-105	20	227.0	13.2	5	73.14	3.992
41	53B02006M	44	609.4	34.5	2	62.90	4.690
42	53B02006K	44	541.3	30.8	2	65.36	4.575

Continuación de Tabla 4.2. Resultados de pruebas de resistencia a compresión y ultrasonido

N°	Nombre de Probeta	Edad (días)	P (KN)	F'c (Mpa)	Tipo de falla	Δt (us)	UPV (km/s)
43	columnas 18-07-15	16	403.8	22.4	2	68.50	4.423
44	columnas 18-07-15	16	415.1	21.8	2	70.92	4.258
45	vigas 18-07-15	16	435.2	23.9	2	67.62	4.451
46	158LC034	55	622.2	35.4	2	66.18	4.548
47	258LC034	55	653.8	36.9	3	65.86	4.525
48	258LC034	55	686.3	39.0	3	66.10	4.539
49	258LC034	55	657.7	38.5	2	65.72	4.550
50	53B0200615	44	594.4	33.9	3	65.72	4.534
51	358LC057	10	541.2	31.0	3	65.42	4.571
52	358LC057	10	515.0	28.9	1	65.96	4.533
53	358LC057	10	546.9	30.9	5	66.36	4.536
54	Mur55p3	27	431.7	23.6	4	70.06	4.353
55	g.106Scimienro C.V	10	332.4	18.1	5	71.88	4.271
56	g.107.Scimienro C.V	10	331.6	18.3	1	70.56	4.337
57	lo553p3	27	464.7	25.4	2	66.14	4.581
58	004-173-3	27	620.8	35.7	2	65.48	4.429
59	004-173-2	27	618.7	35.0	3	64.30	4.510
60	004-173-1	27	608.8	35.2	1	64.18	4.674
61	004-186-24	11	562.1	31.7	5	65.70	4.551
62	004-186-23	11	566.7	32.0	4	66.90	4.514
63	004-186-22	11	585.8	33.6	5	66.28	4.541
64	004-185-21	12	597.3	34.4	2	66.12	4.537
65	004-185-20	12	579.1	32.8	4	66.40	4.503
66	falso piso	25	280.4	15.4	4	81.98	3.684
67	sobrecimiento 2 p	28	390.2	21.3	2	80.52	3.726
68	sobrecimiento 1 p	28	423.3	23.6	5	76.00	3.947
69	004-195	9	537.1	30.5	5	66.56	4.537
70	004-195	9	486.9	27.9	2	66.78	4.193
71	004-196	7	414.7	23.7	3	67.72	4.135
72	004-196 14	7	468.9	19.6	1	67.38	4.304
73	004-196 15	7	487.1	27.9	1	67.38	4.156
74	53LMU100815	7	449.0	25.5	5	69.06	4.054
75	26LMU100815	7	449.0	25.4	4	70.46	4.116
76	26LMU100815	7	495.0	28.2	5	68.34	4.244
77	26LMU100815	7	431.0	24.4	5	70.08	4.281
78	004-195	9	543.1	31.3	4	66.64	4.352
79	53mc110715	37	618.6	34.8	5	65.04	4.459
80	Pu12-22	18	382.7	21.6	3	71.84	4.176
81	Pu11-21	18	364.3	20.6	2	71.64	4.188
82	P16-20	28	497.2	28.3	5	69.76	4.243
83	P14-19	28	539.4	30.1	3	69.28	4.359
84	P13-18	28	512.8	29.1	2	66.26	4.513

Continuación de Tabla 4.2. Resultados de pruebas de resistencia a compresión y ultrasonido

N°	Nombre de Probeta	Edad (días)	P (KN)	F'c (Mpa)	Tipo de falla	Δt (us)	UPV (km/s)
85	P11-17	28	559.6	31.5	3	68.48	4.395
86	P10-16	31	491.2	28.0	3	73.66	4.100
87	P9-15	31	481.2	27.6	2	72.02	4.193
88	P7-14	31	520.4	29.4	2	71.40	4.188
89	P6-13	31	509.2	28.4	3	71.44	4.199
90	P3-12	33	440.2	24.9	2	73.08	4.133
91	P4-11	33	437.8	24.6	3	70.24	4.285
92	P2-10	41	313.5	17.8	2	72.20	4.169
93	P1-9	41	368.1	20.9	2	70.52	4.283
94	PU26-8	11	362.5	20.5	2	72.74	4.097
95	PU25-7	11	336.1	19.0	2	72.74	4.111
96	PU23-6	11	400.6	23.0	3	70.46	4.229
97	Valico SAC - Placas y columnas-280	7	527.0	29.6	2	66.46	4.529
98	Valico SAC - Placas y columnas-280	7	538.6	30.1	4	67.32	4.486
99	Valico SAC - Placas y columnas-280	8	551.2	30.9	1	66.46	4.514
100	Valico SAC - Placas y columnas-280	8	561.1	31.4	4	66.20	4.577
101	Valico SAC - Techos-210	30	452.1	25.4	5	65.94	4.580
102	Valico SAC - Techos-210	30	425.8	24.0	5	67.08	4.502
103	CC Los Girasoles - Techo - 210	11	396.0	22.3	2	67.56	4.470
104	CC Los Girasoles - Techo - 210	11	413.5	23.2	4	67.90	4.418
105	CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	12	390.5	22.2	5	68.46	4.426
106	CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	12	441.8	24.8	4	66.82	4.535
107	G.E Calzaduras Mimosas 2 (RoJo)	15	141.0	8.1	2	73.06	4.106
108	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	90.0	5.1	5	81.46	3.671
109	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	114.5	6.5	4	84.32	3.570
110	G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	15	195.2	11.0	3	72.72	4.139
111	Vaciado 4	20	365.0	20.6	2	71.28	4.209
112	Vaciado 3	20	398.7	22.6	3	70.66	4.246
113	Vaciado 2	27	251.6	14.2	3	71.98	4.168
114	Vaciado 1	27	391.3	22.0	2	68.74	4.350
115	469-A	50	364.9	20.0	2	74.10	4.103
116	548	8	587.7	32.3	2	69.62	4.367
117	547	8	641.5	35.2	3	70.02	4.356
118	544	13	356.3	19.5	2	70.74	4.326
119	543	13	351.8	19.3	3	70.44	4.344
120	535A	15	285.2	15.6	5	71.84	4.218
121	P.1.02 08-8-15	18	580.7	33.1	3	69.00	4.377
122	p 102	18	562.0	32.2	2	65.31	4.609
123	p 102	18	580.8	33.1	3	72.26	4.138
124	p 104	15	565.2	32.8	2	68.89	4.326
125	p 104	15	638.1	36.8	3	69.06	4.402

Continuación de Tabla 4.2. Resultados de pruebas de resistencia a compresión y ultrasonido

N°	Nombre de Probeta	Edad (días)	P (KN)	F'c (Mpa)	Tipo de falla	Δt (us)	UPV (km/s)
126	P.104 11 5	15	495.4	28.9	2	68.98	4.378
127	c15 T 02	13	367.2	21.3	5	69.94	4.318
128	c15 T 02	13	327.9	18.9	3	71.67	4.228
129	c15 T 01	21	318.8	18.4	2	70.58	4.250
130	c15 T 01	21	410.3	23.7	2	66.60	4.520
131	c15 T 01	21	426.7	24.7	2	68.76	4.392
132	mae	33	474.7	27.5	3	76.09	3.956
133	mae 1 s 7	33	472.6	27.3	3	70.89	4.218
134	PU 53 - TECH 1 PS1	10	357.3	20.2	1	71.72	4.183
135	PU 54 - TECH 1 PS1	10	327.5	18.3	5	70.58	4.265
136	PU 50 - M11 PS1	12	425.4	24.1	2	71.62	4.203
137	PU 30 - PL 3-50T	19	394.5	22.2	1	69.72	4.303
138	PU 29 - PL 3-50T	19	399.9	22.5	2	68.40	4.401
139	PU 37 - TECH-50TS1	16	354.4	19.9	5	71.52	4.167
140	PU 38 - TECH-50TS1	16	330.1	18.5	4	70.68	4.245

4.4 Resultados experimentales

Un total de 140 muestras cilíndricas de concreto fueron ensayadas en el laboratorio de estructuras de la PUCP. Se obtuvo la velocidad y resistencia a compresión en cada una de las muestras de concreto. En la Figura 4.7 y Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a compresión y de UPV respectivamente. Se observa que existe una gran variabilidad que está justificada por la procedencia de las muestras ya descrito anteriormente.

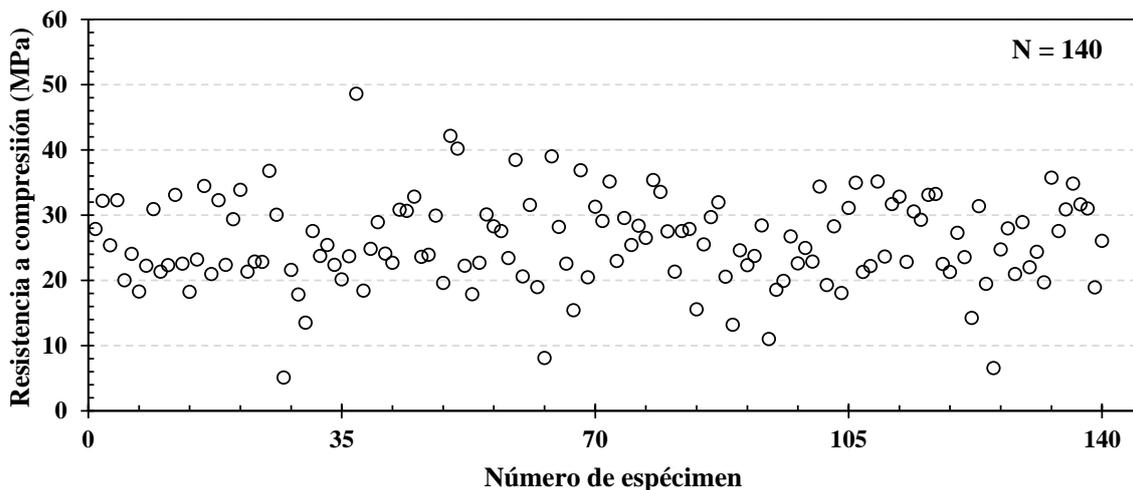


Figura 4.7 Resultados experimentales de resistencia a compresión

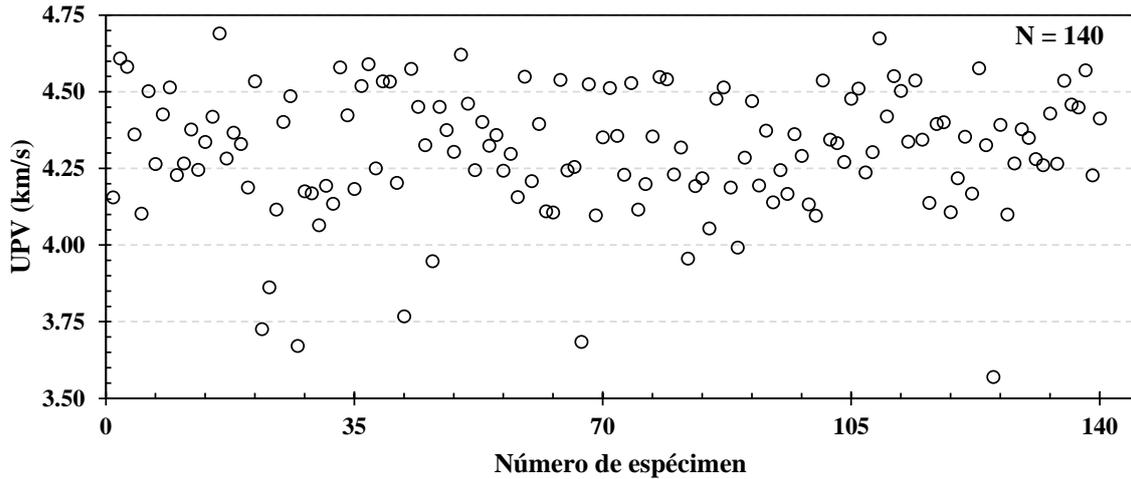


Figura 4.8 Resultados experimentales de las pruebas de ultrasonido

Al iniciar el análisis estadístico de una serie de datos, y después de la etapa de detección y corrección de errores, un primer paso consiste en describir la distribución de las variables estudiadas y, en particular, de los datos numéricos. Además de las medidas descriptivas correspondientes, el comportamiento de estas variables puede explorarse gráficamente de un modo muy simple.

Tanto los resultados de $F'c$ como UPV presentan una distribución normal tal y como se muestra en la Figura 4.9. Esto es importante ya que los datos se acercan al promedio y por consiguiente se considera que los resultados son válidos para el análisis del fenómeno que se quiere estudiar. Determinar una correlación entre $F'c$ y UPV.

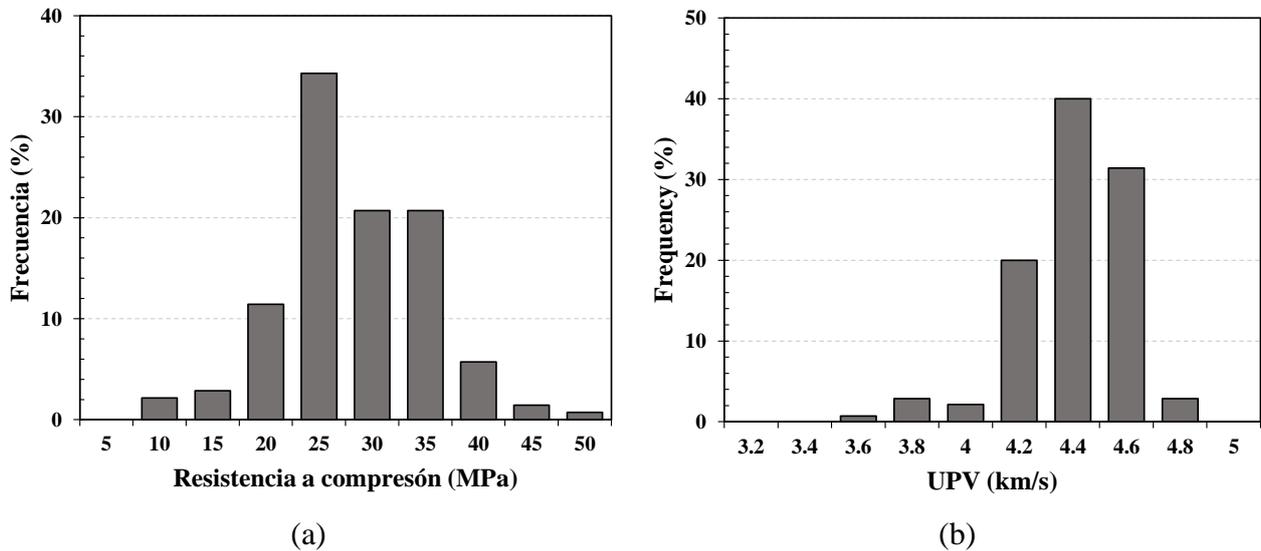


Figura 4.9 Histogramas de los resultados de las pruebas en las muestras de concreto (a) Resistencia a compresión (b) UPV

4.5 Formulación para la evaluación en obra en especímenes de concreto

El uso de técnicas ultrasónicas ha sido sugerido por muchos investigadores para la evaluación de la resistencia del concreto, su uniformidad, su endurecimiento, la obtención de su módulo de elasticidad y la presencia o ausencia de grietas en el interior del concreto. También esta técnica podría ser utilizada para determinar la calidad del concreto.

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en el programa experimental y además se presentan expresiones que podrían ser usadas para una predicción preliminar de $F'c$ en función de UPV en muestras de concreto.

Los ensayos de UPV tienen la ventaja de ser un método no destructivo de fácil aplicación para la estimación de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas que atraviesan el material. Los valores de velocidad obtenidos usando esta técnica pueden ser correlacionados con la resistencia a compresión del concreto ($F'c$) medida con ensayos de compresión directa como se muestra en la Figura 4.10. Esta figura muestra que en general la resistencia a compresión y la velocidad obtenida tienen alguna correlación donde se observa que al incremento de la velocidad resulta en valores altos de resistencia a compresión (Alexandre Bogas, et al., 2013) (Benaicha, et al., 2015). Los resultados muestran una dispersión considerable particularmente dado que las muestras de concreto provienen de diversos proyectos de construcción de Lima y por la variabilidad explicada anteriormente.

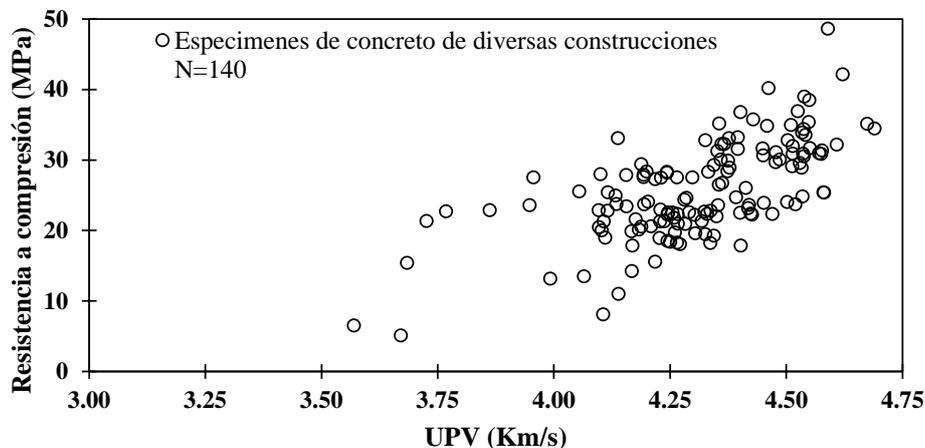


Figura 4.10 Relación entre los resultados de resistencia compresión ($F'c$) y la velocidad de pulso ultrasónico (UPV).

4.6 Relación experimental entre $F'c$ y UPV

Muchos investigadores han mostrado que la relación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso puede ser estimada por la siguiente relación exponencial:

$$F'c = A * e^{B*UPV} \quad (4.1)$$

Donde $F'c$ es la resistencia a compresión (Mpa), UPV es la velocidad de pulso ultrasónico (Km/s), A y B son constantes empíricas que dependen de las propiedades del material (Tharmaratnam & Tan, 1990) (Ravindrarajah, 1997).

Un análisis estadístico de regresión exponencial fue realizado para determinar el valor de las constantes A y B en concreto. En la Figura 4.11 la curva exponencial, la formula obtenida y el coeficiente de regresión (R^2) son presentados. Debido a la gran variabilidad que presentan las muestras de concreto, el valor de R^2 es de 0.446.

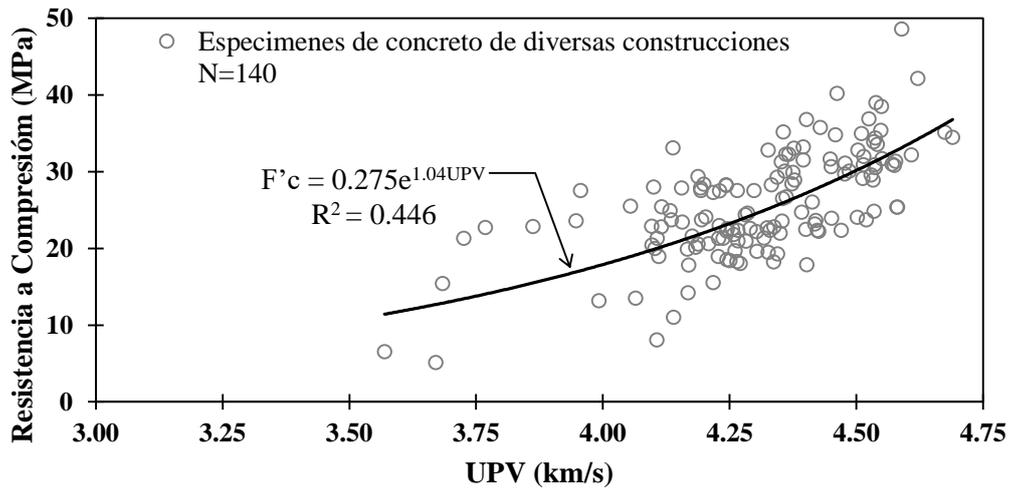


Figura 4.11 Mejor ajuste calculado de las pruebas realizadas en las muestras de concreto.

4.7 Comparación y validación de la relación obtenida con otras investigaciones

En la Figura 4.12 se presenta la curva exponencial de esta investigación así como también las encontradas por otros investigadores (Kheder, 1999) (Nash't, et al., 2005) (Trtnik, et al., 2009) (Turgut, 2004) (Del Rio, et al., 2004) (Raouf & Ali, 1983) (Jones, 1962). Los índices de correlación obtenidos en estos estudios también son bajos entre 0.42 y 0.80 dado que no tomaron en cuenta la composición del concreto. Como se observa los datos experimentales así como la relación encontrada concuerdan con otras investigaciones.

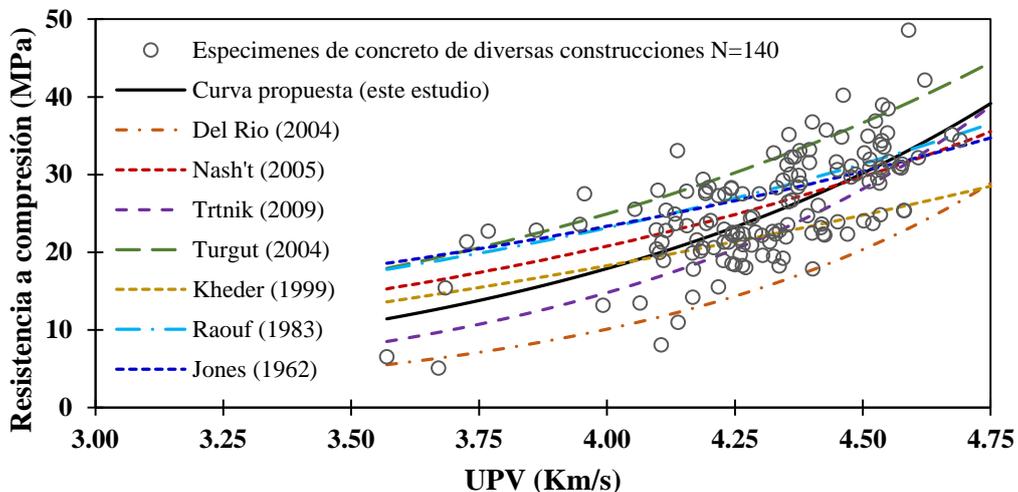


Figura 4.12 La relación obtenida concuerda con otras investigaciones alrededor del mundo.

4.8 Límites recomendados para la evaluación de probetas de concreto en campo

Basándose en la expresión determinada en este estudio y en los datos experimentales, un límite superior e inferior de confiabilidad fueron calculados considerando un nivel de confianza del 90%. Las ecuaciones para el mejor ajuste y los límites superior e inferior para un 90% de confianza son los siguientes:

$$F'c = 0.275e^{1.04UPV} \text{ MPa} \qquad F'c = 2.779e^{1.05UPV} \text{ Kg/cm}^2 \qquad (4.2)$$

$$F'c_{lower} = 0.180e^{1.05UPV} \text{ MPa} \qquad F'c_{lower} = 1.820e^{1.05UPV} \text{ Kg/cm}^2 \qquad (4.3)$$

$$F'c_{upper} = 0.419e^{1.04UPV} \text{ MPa} \qquad F'c_{upper} = 4.246e^{1.04UPV} \text{ Kg/cm}^2 \qquad (4.4)$$

La dispersión de los datos que se muestran en la Figura 4.13 es bastante amplia, pero es entendible ya que la base de datos experimental proviene de diversos proyectos de la ciudad de Lima, Perú lo que supone diferentes tipos de concreto, agregados, diseños de mezclas, w/c, aditivos y tiempo de curado. No obstante los límites de confiabilidad al 90% pueden ser usados para estimar de manera preliminar en campo la resistencia a compresión del concreto de una manera rápida y barata con ensayos de ultrasonido.

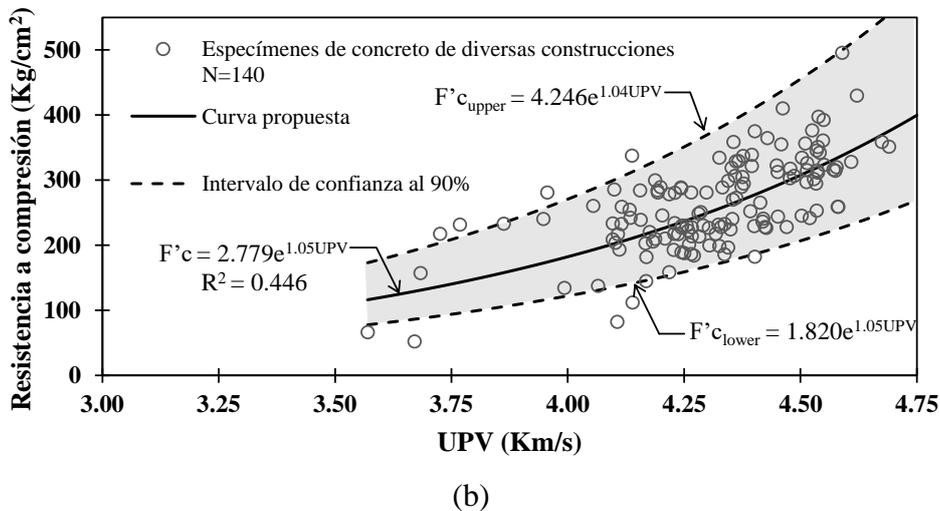
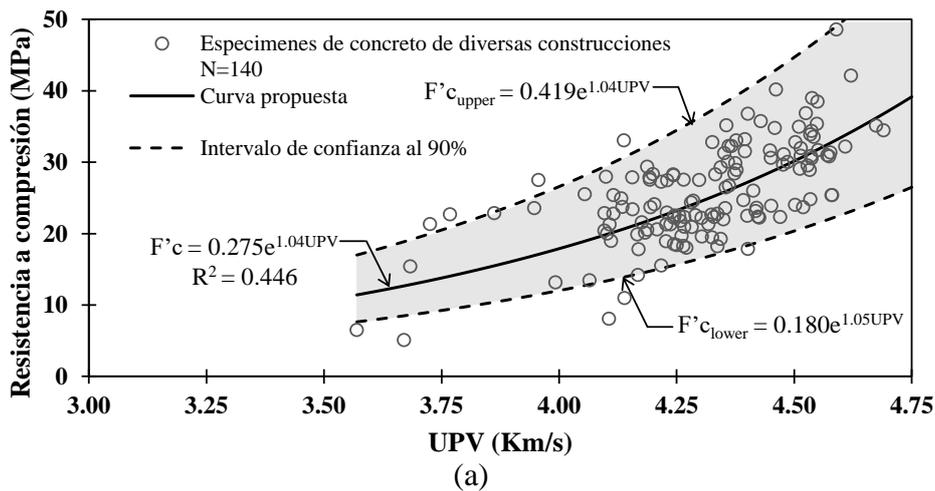


Figura 4.13 Análisis de regresión de la relación entre la resistencia a compresión $F'c$ y UPV del concreto (a) en MPa (b) en Kg/cm²

Se propone utilizar la ecuación 4.3 para estimar con un 90% de confiabilidad la resistencia a compresión mínima del concreto a partir de una medición de UPV. Es decir, si se obtiene un UPV de 4.25 km/s, el concreto tendría una resistencia mínima de 15.5 MPa (158.1 Kg/cm²). Si se utiliza el mejor ajuste calculado la resistencia a compresión sería de 23.8 MPa (242.4 Kg/cm²). A pesar de la diferencia de los valores se tendría la certeza del 90 % en que la resistencia a compresión esté dentro de estos valores. Eso sería muy beneficioso al realizar el control de calidad del concreto en una obra civil ya que el UPV es una técnica no destructiva y de uso rápido.

Se realizaron pruebas para determinar la resistencia a compresión a partir de ultrasonido en concretos de 175, 210, 280 y 300 Kg/cm². Se determinó el error para cada uno de estos concretos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3. Se observa que para las muestras ensayadas los errores relativos varían desde 3% hasta 13%, por lo que representan una aproximación aceptable a la hora de evaluar la resistencia a compresión.

Tabla 4.3. Error calculado en muestras de concreto de 175, 210, 280 y 300 Kg/cm²

Muestra	F'c de diseño	F'c de rotura	UPV en Km/s	F'c usando ec. 5.2	% error
1	175	233.4	4.359	265.4	13.7%
2	175	208.6	4.097	201.9	3.2%
2	210	244.8	4.339	260.1	6.2%
4	210	253.4	4.252	237.4	6.3%
5	280	300.1	4.579	333.9	11.3%
6	280	296.9	4.513	311.6	4.9%
7	300	351.4	4.552	324.8	7.6%
8	300	356.3	4.544	322.1	9.6%

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Existe una relación exponencial entre la resistencia a compresión $F'c$ y la velocidad de onda del ultrasonido UPV. La expresión obtenida del análisis estadístico concuerda con investigaciones similares en donde el concreto presenta gran variabilidad. A pesar de que el coeficiente de regresión R^2 es de 0.446 este es similar a los encontrados en otros estudios.

Debido a la naturaleza y al origen de las muestras de concreto, estas presentaron una gran variabilidad. Por lo tanto, se estimaron curvas de confiabilidad al 90% de confianza. Con la curva inferior se puede garantizar la resistencia a compresión mínima del concreto a partir de mediciones con ultrasonido.

Se propone utilizar la ecuación $F'c = 2.779e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ como la correlación más adecuada para estimar $F'c$ en función UPV. Con ello, los valores calculados resultan siendo más conservadores que aquellos utilizados mediante las ecuaciones $F'c_{lower} = 1.820e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ ó $F'c_{upper} = 4.246e^{1.04UPV} Kg/cm^2$.

Para realizar inspecciones rápidas de control de la calidad y el aseguramiento del material, pueden ser utilizados las ecuaciones $F'c_{lower} = 1.820e^{1.05UPV} Kg/cm^2$ y $F'c = 2.779e^{1.05UPV} Kg/cm^2$. Esto se lograría, comparando el UPV medido en campo con el UPV obtenido haciendo uso de la ecuación de $F'c_{lower}$ tomando como dato de entrada la resistencia a la compresión especificada en el diseño. La Ecuación $F'c_{lower}$ aseguraría que el valor real de $F'c$ sea mayor al $F'c$ estimado con un 90% de probabilidad. En el caso que el UPV medido en campo sea menor al calculado con $F'c_{lower}$ se aceptarían las velocidades medidas que sean mayores a la calculada con $F'c = 2.779e^{1.05UPV} Kg/cm^2$. Si la velocidad es menor a este último, los resultados encontrados deberían corroborarse con ensayos destructivos.

5.2 Recomendaciones

La relación preliminar entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión propuesta en esta investigación podría ser mejorada. En futuros trabajos se debe incrementar la base de datos y subdivida los resultados en función de parámetros adicionales como diseños de mezcla, variando la relación agua/cemento, el tipo de cemento, los agregados, la edad o influencia de aditivos. Además se debe someter las expresiones preliminares de esta investigación con resultados de campo (especímenes fabricados y curados en obra), determinando cómo influyen las condiciones de curado en los resultados y las estimaciones.

Este estudio podrá ser utilizado como antecedente en investigaciones que pretendan correlacionar la resistencia a la compresión o cualquier parámetro tradicional, con otras propiedades ligadas a métodos no destructivos. Se debe analizar más el uso del georadar, metodologías de vibración, etc y su aplicabilidad como alternativas que garanticen la calidad del concreto en obra, de forma más rápida, eficiente y económica.

Referencias

Alexandre Bogas, J., Glória Gomes, M. & Augusto Gomes, 2013. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, Volumen 53, pp. 962-972.

American Concrete Institute, 2011. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11)*. s.l.:ACI.

ASOCRETO, 2010. *Tecnología del concreto - Tomo 1 Materiales, Propiedades y Diseño de mezclas*. Tercera ed. Bogotá: Nomos Impresores.

ASTM C1231/C1231M-15, 2015. Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM C150, 2016. *Standar Specification for Portland Cement*. s.l.:s.n.

ASTM C1602, 2012. *Standar Specification for Mixig Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM C33, 2016. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. s.l.:s.n.

ASTM C39/C39M-15a, 2015. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM C494, 2016. *Standard Specification for Chemicar Admixtures for Concrete*. s.l.:s.n.

ASTM C597, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concret.

ASTM D7263, 2009. Standard test method for laboratory determination of density.

Benaicha, M., Jalbaud, O., Alaoui, A. H. & Burtschell, Y., 2015. Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Volumen 101, pp. 702-709.

Bogue, R. H., 1955. The chemistry of Portland cement. *LWW*, 79(4), p. 322.

Céspedes G., M. A., 2003. *Resistencia a la comprensión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido*. Piura: s.n.

Del Río, L. M. y otros, 2004. Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. *Ultrasonics*, 42(1), pp. 527-530.

Granja, J., 2011. *Experimental evaluation of the elastic modulus of cementitious materials at early ages*. University of Minho: MSc Thesis.

Hornibrook, . F. B., 1939. Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete. *ASTM Bull*, Volumen 101, p. 5.

Ibarra N., M. A. & Valencia E., G., 2013. *Estudio experimental para determinar patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en concreto simple*. Lima: s.n.

INEI, 2015. *Instituto nacional de estadística e informàtica*. [En línea] Available at: www.inei.gob.pe [Último acceso: 20 Junio 2016].

Jones, R., 1948. *The Application of Ultrasonic to the Testing of Concrete*. Research, London, 383.

Jones, R., 1962. *Non destructive testing of concrete.*, London: Cambridge.

Kheder, G. F., 1999. A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. *Materials and Structures*, 32(6), pp. 410-417.

Krautkramer, H. & Krautkramer, J., 1990. *Ultrasonic testing of materials*. Berlin: Springer Verlag.

Lamond, J. & Pielert, J., 2006. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials.*. West Conshohocken: PA: ASTM.

Lea, F. M., 1971. *The chemistry of cement and concrete.*. Tercera ed. New York: Chemical Publishing Co..

Leslie, J. R. & Cheesman, W. J., 1949. An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures.. *Journal of the American Concrete Institute*, 21(1), pp. 17-36.

Liang, R. et al., 2013. Nondestructive Evaluation of Historic Hakka Rammed. *Sustainability*, Volume 5, pp. 298-315.

Malhotra, V., 1976. *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*, Detroit: MI.

McCann, D. M. & Forde, M., 2001. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International*, 34(2), pp. 71-84.

Naik, T. R., Malhotra, V. M. & Popovics, J. S., 2003. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. En: *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. s.l.:CRC press, pp. 8-1 a 8-19.

Nash't, I. H., A'bour, S. H. & Sadoon, A. A., 2005. *Finding an Unified Relationship between Crushing Strength of Concrete and Non-destructive Tests*. Bahrain, s.n.

Neville, A. M., 1996. *Properties of concrete.*. New York: J. Wiley.

Neville, A. N. & Brooks, J., 2010. *Concrete Technology*. Second Edition ed. London: PEARSON.

Nik, A. S. & Omran, O. L., 2013. Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO₂ using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, Volumen 44, pp. 654-662.

NTP 339.088, 2014. *Agua de mezcla utilizada e la produccion de cemento Portland. Requisitos*. Lima: s.n.

Obert, L., 1939. Sonic method of determining the modulus of elasticity of building materials under pressure. En: *Proc. ASTM*. s.l.:Vol. 39, p. 987.

- Pasquel, E., 1996. *Tópicos de tecnología del concreto*. Segunda Edición ed. Lima: Serrano Ltda.
- Powers, T. C., 1958. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), pp. 1-6.
- Powers, T., 1938. Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations. En: *In Proceedings: American Society for Testing and Materials*. Vol.38: No. part II, p. 460.
- Proceq, 2012. *PunditLink V2.4*, s.l.: s.n.
- Raouf, Z. & Ali, Z. M., 1983. Assessment of Concrete Characteristics at an Early Age By Ultrasonic Pulse Velocity. *Journal of Bulding Research*, 2(1), pp. 31-44.
- Ravindrarajah, R. S., 1997. Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method. *NDT and E International*, 4(30), p. 260.
- Roy, D. & Gouda, G. R., 1973. Porosity- Strength Relation in Cementitious Materials with Very High Strengths.. *Journal of the American Ceramic Society*, 56(10), pp. 549-550.
- Singh, B. G., 1958. Specific surface of aggregates related to compressive and flexural strength of concrete. *In Journal Proceedings*, 54(4), pp. 897-907.
- Tharmaratnam, K. & Tan, B. S., 1990. Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 20(3), pp. 335-345.
- Thomson, W., 1940. Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method. *Proc. ASTM*, Volumen 40, p. 1113.
- Trtnik, G., Kavčič, F. & Turk, G., 2009. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, Volumen 49, pp. 53-60.
- Turgut, P., 2004. *Evaluation of the Ultrasonic Pulse Velocity Data coming on the Field*. Londres, s.n., p. 8.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. & Fahey, M., 2009. A Framework Interpretig Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, pp. 1-17.

Anexos

Panel fotográfico



Figura A.1 Arribo de las probetas de concreto a la PUCP.



Figura A.2 Medición del diámetro de las probetas de concreto.



Figura A.3 Vista en planta de la medición del diámetro de una muestra.

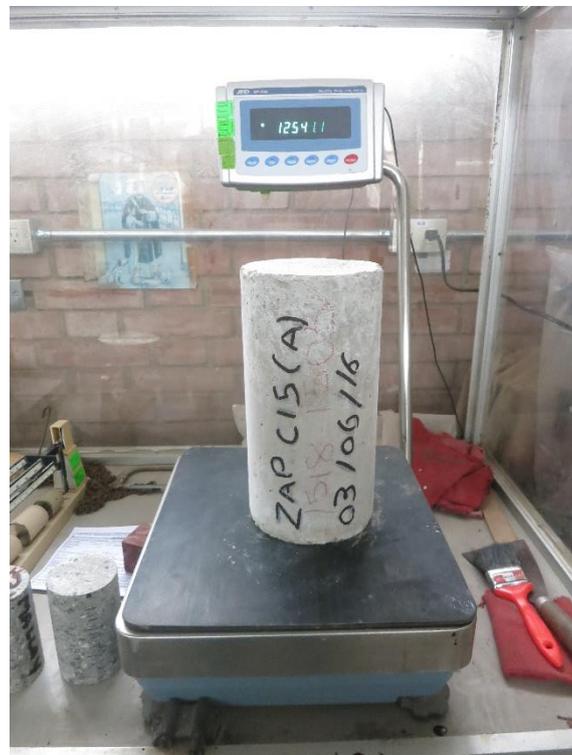


Figura A.4 Pesado de las probetas.



Figura A.5 Acopio de probetas de concreto para realizar los ensayos de ultrasonido



Figura A.6 Equipo de ultrasonido



Figura A.7 Calibración del equipo de ultrasonido.



Figura A.8 Medición de longitud de las probetas.



Figura A.9 Aplicación de material acoplante a los transductores de ultrasonido.

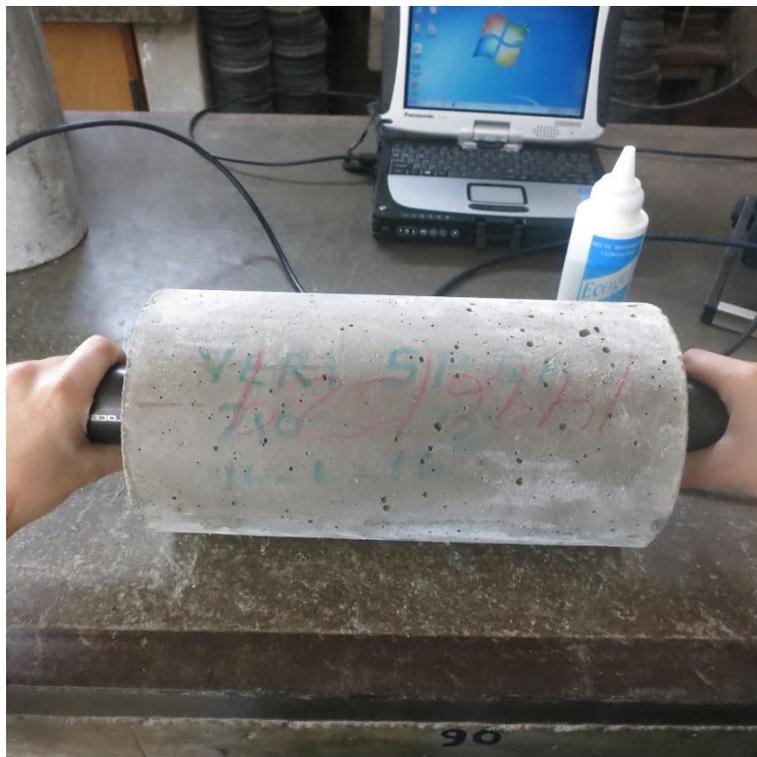


Figura A.10 Ensayo de ultrasonido en la probeta.



Figura A.11 Probetas de concreto listas para someter a compresión



Figura A.12 Máquina para realizar la prueba de resistencia a compresión.



Figura A.13 Personal colaborador para realizar las pruebas de resistencia a compresión.



Figura A.14 Ensayo de resistencia a compresión en una probeta de concreto.



Figura A.15 Probetas de concreto después de llevado a cabo los ensayos.

Reportes de los resultados de los ensayos de ultrasonido



Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Especimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 1 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 1 a 6.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
1	cal.04 22.06.15 ByLL	301	73.1	0.3	1	500	4.115
2	cal.03 22.06.15 ByLL	301	73.5	0.2	2	500	4.096
3	cal.03 20.06.15 ByLL	298	68.9	0.3	2	500	4.324
4	cal.04 20.06.15 ByLL	301	69.4	0.2	2	500	4.337
5	cal.02 11.07.15 ByLL	300	79.6	0.2	2	500	3.768
6	cal.01 11.07.15 ByLL	301	77.9	0.3	2	500	3.862





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 2 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 7 a 19.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
7	598175	298	68.6	0.3	2	500	4.344
8	598183	297	66.8	0.1	5	350	4.449
9	598188	300	64.9	0.5	1	500	4.621
10	598256	300	68.6	0.2	1	500	4.373
11	598254	300	67.2	0.5	1	500	4.462
12	598252	302	65.8	0.6	1	500	4.590
13	598342	301	68.1	0.4	1	500	4.420
14	598337	300	68.8	0.7	1	500	4.362
15	598340	299	70.7	0.5	1	500	4.230
16	598405	300	70.3	0.4	1	500	4.265
17	598408	300	69.8	1.4	1	500	4.298
18	598409	301	67.2	0.7	1	500	4.478
19	598443	301	69.1	0.2	2	500	4.355





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba	Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen:	Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición:	PunditLab+
Transductor:	54 kHz
Norma de ensayo:	ASTM C595-09
Solicitante:	Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 3 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 20 a 36.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
20	3-techo-210-20-7-15	301	68.4	0.3	1	500	4.402
21	2-placa-210-23-07-15	304	71.3	0.5	1	500	4.266
22	1-placa-210-23-07-15	300	72.2	0.4	1	500	4.156
23	10-0338-2	303	71.1	0.2	1	500	4.260
24	9-0338-1	303	71.0	0.5	1	500	4.266
25	8-0337-2	301	70.9	0.3	1	500	4.244
26	7-0337-1	302	71.4	0.4	1	500	4.229
27	6-0336-2	301	68.5	0.4	1	500	4.395
28	5-0336-1	303	67.7	0.3	2	500	4.477
29	4-0325-4	301	68.8	0.2	10	500	4.375
30	0324-3	303	69.5	0.2	1	500	4.361
31	0324-4	301	69.5	0.2	1	500	4.332
32	0325-3	303	68.1	0.3	1	500	4.451
33	4-Techo-210	300	70.8	0.3	1	500	4.237
34	5-Cimiento-210	300	68.0	0.6	1	500	4.413
35	6-cimiento-210	300	69.3	0.3	10	500	4.330
36	vigas 18-07-15	303	70.6	1.0	1	500	4.291





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen: Probetas de concreto de 12" x φ6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 4 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 37 a 53.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
37	SOTI-LAS3-90	300	70.5	0.8	2	500	4.255
38	S-P23C12-90	300	73.0	0.3	5	500	4.107
39	P2-LAS1-106	299	73.6	0.3	10	500	4.065
40	P2-LAS1-105	292	73.1	0.7	5	500	3.992
41	53B02006M	295	62.9	1.0	5	500	4.690
42	53B02006K	299	65.4	0.3	2	500	4.575
43	columnas 18-07-15	303	68.5	0.2	2	500	4.423
44	columnas 18-07-15	302	70.9	0.4	2	500	4.258
45	vigas 18-07-15	301	67.6	0.2	2	500	4.451
46	158LC034	301	66.2	0.2	2	500	4.548
47	258LC034	298	65.9	0.3	2	500	4.525
48	258LC034	300	66.1	0.0	2	500	4.539
49	258LC034	299	65.7	0.1	2	500	4.550
50	53B0200615	298	65.7	0.1	2	500	4.534
51	358LC057	299	65.4	0.2	2	500	4.570
52	358LC057	299	66.0	0.4	2	500	4.533
53	358LC057	301	66.4	0.4	2	500	4.536





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba	Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen:	Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición:	PunditLab+
Transductor:	54 kHz
Norma de ensayo:	ASTM C595-09
Solicitante:	Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 5 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 54 a 65.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
54	Mur55p3	305	70.1	0.4	2	500	4.353
55	g.106Scimienro C.V	307	71.9	0.2	2	500	4.271
56	g.107.Scimienro C.V	306	70.6	0.3	2	500	4.337
57	lo553p3	303	66.1	0.6	2	500	4.581
58	004-173-3	301	65.5	0.2	10	500	4.597
59	004-173-2	300	64.3	0.2	10	500	4.666
60	004-173-1	300	64.2	0.3	2	500	4.674
61	004-186-24	299	65.7	0.3	2	500	4.551
62	004-186-23	302	66.9	0.3	2	500	4.514
63	004-186-22	301	66.3	0.3	2	500	4.541
64	004-185-21	300	66.1	0.3	2	500	4.537
65	004-185-20	299	66.4	0.2	2	500	4.503





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 6 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 66 a 79.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
66	falso piso	302	82.0	0.5	10	500	3.684
67	sobrecimiento 2 p	300	80.5	0.9	10	500	3.726
68	sobrecimiento 1 p	300	76.0	0.5	20	500	3.947
69	004-195	302	66.6	0.4	2	500	4.537
70	004-195	280	66.8	0.3	2	500	4.193
71	004-196	280	67.7	0.2	2	500	4.135
72	004-196 14	290	67.4	1.1	2	500	4.304
73	004-196 15	280	67.4	0.5	2	500	4.156
74	53LMU100815	280	69.1	0.2	1	250	4.054
75	26LMU100815	290	70.5	0.8	2	500	4.116
76	26LMU100815	290	68.3	0.1	2	250	4.243
77	26LMU100815	300	70.1	0.6	1	125	4.281
78	004-195	290	66.6	0.3	2	500	4.352
79	53mc110715	290	65.0	0.5	2	500	4.459





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba	Laboratorio de Estructuras PUCP
Especimen:	Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición:	PunditLab+
Transductor:	54 kHz
Norma de ensayo:	ASTM C595-09
Solicitante:	Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 7 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 80 a 96.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
80	Pu12-22	300	71.8	0.3	1	500	4.176
81	Pu11-21	300	71.6	0.3	1	500	4.188
82	P16-20	296	69.8	0.1	2	500	4.243
83	P14-19	302	69.3	0.6	5	500	4.359
84	P13-18	299	66.3	0.7	5	500	4.513
85	P11-17	301	68.5	0.3	5	500	4.395
86	P10-16	302	73.7	0.2	5	500	4.100
87	P9-15	302	72.0	0.5	5	500	4.193
88	P7-14	299	71.4	0.2	5	500	4.188
89	P6-13	300	71.4	0.3	5	500	4.199
90	P3-12	302	73.1	0.1	50	500	4.132
91	P4-11	301	70.2	0.6	20	500	4.285
92	P2-10	301	72.2	0.5	10	500	4.169
93	P1-9	302	70.5	0.2	10	500	4.282
94	PU26-8	298	72.7	0.1	2	500	4.097
95	PU25-7	299	72.7	0.3	2	500	4.111
96	PU23-6	298	70.5	0.2	2	500	4.229





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba Laboratorio de Estructuras PUCP
Especimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 8 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 97 a 110.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
97	Valico SAC -280	301	66.5	0.4	2	500	4.529
98	Valico SAC -280	302	67.3	0.4	2	500	4.486
99	Valico SAC -280	300	66.5	0.3	2	500	4.514
100	Valico SAC -280	303	66.2	0.4	2	500	4.577
101	Valico SAC - Techos-210	302	65.9	0.2	2	500	4.580
102	Valico SAC - Techos-210	302	67.1	0.4	2	500	4.502
103	CC Los Girasoles - Techo - 210	302	67.6	0.7	2	500	4.470
104	CC Los Girasoles - Techo - 210	300	67.9	0.3	2	500	4.418
105	CC Los Girasoles - 280	303	68.5	0.2	2	500	4.426
106	CC Los Girasoles - 280	303	66.8	0.4	2	500	4.535
107	G.E Calz. Mimosas 2 (RoJo)	300	73.1	0.5	2	500	4.106
108	G.E Calz. Mimosas 2 (RoJo)	299	81.5	0.3	2	500	3.671
109	G.E Calz. Mimosas 2 (RoJo)	301	84.3	1.7	2	500	3.570
110	G.E Calz. Mimosas 2 (RoJo)	301	72.7	0.5	2	500	4.139





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Especimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 9 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 111 a 120.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
111	Vaciado 4	300	71.3	0.2	10	500	4.209
112	Vaciado 3	300	70.7	0.4	10	500	4.246
113	Vaciado 2	300	72.0	0.7	10	500	4.168
114	Vaciado 1	299	68.7	0.2	10	500	4.350
115	469-A	304	74.1	0.2	10	500	4.103
116	548	304	69.6	0.2	10	500	4.367
117	547	305	70.0	0.6	2	500	4.356
118	544	306	70.7	0.2	2	500	4.326
119	543	306	70.4	0.3	2	500	4.344
120	535A	303	71.8	0.9	2	500	4.218





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Espécimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 10 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 121 a 133.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
121	P.1.02 08-8-15	302	69.0	0.2	50	500	4.377
122	p 102	301	65.3	0.2	50	500	4.609
123	p 102	299	72.3	0.4	50	500	4.138
124	p 104	298	68.9	0.4	50	500	4.326
125	p 104	304	69.1	0.3	20	500	4.402
126	P.104 11 5	302	69.0	0.1	20	500	4.378
127	c15 T 02	302	69.9	0.2	20	500	4.318
128	c15 T 02	303	71.7	0.3	20	500	4.228
129	c15 T 01	300	70.6	0.3	20	500	4.250
130	c15 T 01	301	66.6	0.2	20	500	4.520
131	c15 T 01	302	68.8	0.2	20	500	4.392
132	mae	301	76.1	0.5	20	500	3.956
133	mae 1 s 7	299	70.9	0.5	20	500	4.218





Reporte de Ensayos de Ultrasonido (UPV)

Lugar de Prueba: Laboratorio de Estructuras PUCP
Especimen: Probetas de concreto de 12" x ϕ 6"
Equipo de medición: PunditLab+
Transductor: 54 kHz
Norma de ensayo: ASTM C595-09
Solicitante: Cristhian Saucedo Abanto

Resultados: Tabla A. 11 Resultados ensayos de ultrasonido muestra 134 a 140.

N°	Nombre de Probeta	Longitud (mm)	Δt (us)	CV %	Ganancia (.x)	Amplitud (Vlt)	Vp (km/s)
134	PU 53 - TECH 1 PS1	300	71.7	0.3	10	500	4.183
135	PU 54 - TECH 1 PS1	301	70.6	0.4	10	500	4.265
136	PU 50 - M11 PS1	301	71.6	0.5	2	500	4.203
137	PU 30 - PL 3-50T	300	69.7	0.2	5	500	4.303
138	PU 29 - PL 3-50T	301	68.4	0.2	5	500	4.401
139	PU 37 - TECH-50TS1	298	71.5	0.2	5	500	4.167
140	PU 38 - TECH-50TS1	300	70.7	0.2	5	500	4.244
141	PU 49 - M11 PS1	301	71.8	0.4	2	500	4.195



Reportes de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: _____		Nro de Orden _____			
Procedencia: _____					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
cal.04 22.06.15 ByLL	22/06	148.8	150	401.2	3
cal.03 22.06.15 ByLL	22/06	148.8	149.5	400.5	2
cal.03 20.06.15 ByLL	22/06	149.4	150.2	399.7	4
cal.04 20.06.15 ByLL	22/06	148.8	150	402.1	4
cal.02 11.07.15 ByLL	11/07	149.3	150.2	398.7	4
cal.01 11.07.15 ByLL	11/07	148.6	149.9	400.2	1

Solicitante: _____		Nro de Orden _____			
Procedencia: _____					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
598175	2/06	148.2	148.4	505.8	3
598183	2/06	151.8	151.2	570.5	2
598188	3/06	149.2	148.2	732.2	2
598256	4/06	149.2	149.1	496.6	3
598254	4/06	150.2	151.2	717.2	3
598252	4/06	150.1	150.8	864.1	5
598342	6/06	148.2	150.8	414.7	3
598337	6/06	149.2	150.8	472.3	3
598340	6/06	151.2	151	493.1	2
598405	8/06	150.8	149	486.2	3
598408	8/06	150.1	150.1	487.3	2
598409	8/06	148.2	150.2	544	5

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
598443	9/06	150.2	151.2	472.5	3
3-techo-210-20-7-15	20/07	151.2	150.1	318.4	2
2-placa-210-23-07-15	23/07	149.6	151	396.3	1
1-placa-210-23-07-15	23/07	150.2	150	414.3	3

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
10-0338-2	22/07	149.2	150.2	346.9	1
9-0338-1	22/07	152.2	151.2	379.2	2
8-0337-2	22/07	151.2	150.8	398.5	1
7-0337-1	22/07	153	153.1	392.3	2
6-0336-2	22/07	151.2	152.5	601.9	2
5-0336-1	22/07	152	152.8	541.5	3
4-0325-4	2/07	150.2	153	539.7	3
0324-3	1/07	153.2	152.2	590.9	3
0324-4	1/07	152	153	517	2
0325-3	2/07	152.8	146.8	540.1	1
4-Techo-210	20/07	150.2	151.1	379.6	5
5-Cimiento-210	3/07	150.2	149.2	458.2	1
6-cimiento-210	3/07	149	149.1	390.2	2
vigas 18-07-15	18/07	152.2	154.2	416.4	2

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
SOTI-LAS3-90	27/06	148.2	150.2	394.5	2
S-P23C12-90	14/06	149	149.1	371.7	2
P2-LAS1-106	14/07	149	149.2	235.6	2
P2-LAS1-105	14/07	148	148.1	227	5
53B02006M	20/06	150	150.1	609.4	2
53B02006K	20/06	149.2	149.8	541.3	2

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
columnas 18-07-15	18/07	152	151.2	403.8	2
columnas 18-07-15	18/07	155.2	156.2	415.1	2
vigas 18-07-15	18/07	151.2	153.2	435.2	2
158LC034	9/06	149.2	150.1	622.2	2
258LC034	9/06	150.1	150.3	653.8	3
258LC034	9/06	149.2	150.2	686.3	3
258LC034	9/06	149	146	657.7	2
53B0200615	20/06	148.9	150	594.4	3
358LC057	24/07	150	148.2	541.2	3
358LC057	24/07	150.2	151	515	1
358LC057	24/07	150.2	150.1	546.9	5
Mur55p3	8/07	153.4	152	431.7	4

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
g.106Scimienro C.V	25/07	152	154.2	332.4	5
g.107.Scimienro C.V	25/07	152.2	152	331.6	1
lo553p3	8/07	152.8	152.5	464.7	2
004-173-3	8/07	149.2	148.2	620.8	2
004-173-2	8/07	148.2	152	618.7	3
004-173-1	8/07	148.2	148.8	608.8	1
004-186-24	24/07	148.5	152	562.1	5
004-186-23	24/07	149.2	151.2	566.7	4
004-186-22	24/07	149	149.2	585.8	5
004-185-21	23/07	148.2	149.2	597.3	2
004-185-20	23/07	150	149.8	579.1	4

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
falso piso	23/07	152.2	152.1	280.4	4
sobrecimiento 2 p	20/07	153	152.2	390.2	2
sobrecimiento 1 p	20/07	151.2	151.1	423.3	5
004-195	8/08	149.2	150.1	537.1	5
004-195	8/08	149.2	149	486.9	2
004-196	10/08	148.2	150.1	414.7	3
004-196 14	10/08	150.2	198.9	468.9	1

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
P7-14	18/07	150.2	150.1	520.4	2
P6-13	18/07	150.2	152.2	509.2	3
P3-12	16/07	152	147.8	440.2	2
P4-11	16/07	149.2	151.8	437.8	3
P2-10	8/07	149	150.1	313.5	2
P1-9	8/07	151.2	148	368.1	2
PU26-8	7/08	150.1	150.3	362.5	2
PU25-7	7/08	150.1	150.3	336.1	2
PU23-6	7/08	148.9	149.2	400.6	3

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
Valico SAC - Placas y columnas-280	12/08	151.2	150.1	527	2
Valico SAC - Placas y columnas-280	12/08	150.2	151.9	538.6	4
Valico SAC - Placas y columnas-280	11/08	151.2	150.2	551.2	1
Valico SAC - Placas y columnas-280	11/08	151.8	150.1	561.1	4
Valico SAC - Techos-210	20/07	150.2	150.9	452.1	5
Valico SAC - Techos-210	20/07	150.2	150.1	425.8	5
CC Los Girasoles - Techo - 210	8/08	149.2	151.2	396	2
CC Los Girasoles - Techo - 210	8/08	151.2	150.2	413.5	4
CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	7/08	149.2	149.8	390.5	5

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
004-196 15	10/08	148.2	150.1	487.1	1
53LMU100815	10/08	149.2	150.1	449	5
26LMU100815	10/08	149.9	150.1	449	4
26LMU100815	10/08	149.2	149.8	495	5
26LMU100815	10/08	151.2	148.9	431	5

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
004-195	8/08	148.2	149.2	543.1	4
53mc110715	11/07	150	150.8	618.6	5
Pu12-22	31/07	150.1	150.3	382.7	3
Pu11-21	31/07	149.2	151.2	364.3	2

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
P16-20	21/07	149	150.1	497.2	5
P14-19	21/07	149.2	153	539.4	3
P13-18	21/07	149.2	150.3	512.8	2
P11-17	21/07	150.2	150.4	559.6	3
P10-16	18/07	149.2	149.8	491.2	3
P9-15	18/07	147.8	150.4	481.2	2

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
CC Los Girasoles - Placas y Columnas - 280	7/08	150.2	150.8	441.8	4
G.E Calzaduras Mimosas 2 (RoJo)	4/08	150	147.9	141	2
G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	4/08	148.5	150.9	90	5
G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	4/08	150	148.9	114.5	4
G.E Calzaduras Mimosa 2 (RoJo)	4/08	149	151.6	195.2	3

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
Vaciado 4	31/07	151.1	149.2	365	2
Vaciado 3	31/07	149.2	150.8	398.7	3
Vaciado 2	24/07	149.2	150.9	251.6	3
Vaciado 1	24/07	151.2	149.8	391.3	2

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
469-A	1/07	151.8	153	364.9	2
548	12/08	153	151.5	587.7	2
547	12/08	152	152.8	641.5	3
544	7/08	152	153.2	356.3	2
543	7/08	153	152	351.8	3
535A	5/08	151.6	153.9	285.2	5

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
P.1.02 08-8-15	8/08	147.9	151.1	580.7	3
p 102	8/08	149.2	149	562	2
p 102	8/08	149.2	149.8	580.8	3
p 104	11/08	147.2	149	565.2	2
p 104	11/08	148.2	149	638.1	3
P.104 11 5	11/08	147.2	148.2	495.4	2
c15 T 02	13/08	147.1	148.9	367.2	5
c15 T 02	13/08	149	148	327.9	3
c15 T 01	5/08	148.2	148.8	318.8	2
c15 T 01	5/08	147.8	149.1	410.3	2
c15 T 01	5/08	148.2	148.3	426.7	2
mae	24/07	148.5	147.8	474.7	3
mae l s 7	24/07	148.2	148.8	472.6	3

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
PU 53 - TECH 1 PS1	21/08	150.4	150.1	357.3	1
PU 54 - TECH 1 PS1	21/08	151.8	150.2	327.5	5
PU 50 - M11 PS1	19/08	148.2	151.6	425.4	2
PU 30 - PL 3-50T	12/08	149.8	151	394.5	1
PU 29 - PL 3-50T	12/08	150.1	150.8	399.9	2

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas:

FORMATO DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO LEDI-LAB-4.04

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
PU 37 - TECH-50TS1	15/08	152	149.2	354.4	5
PU 38 - TECH-50TS1	15/08	151	150.2	330.1	4
PU 49 - M11 PS1	19/08	149.8	149.2	416.5	3

Solicitante: -----		Nro de Orden -----			
Procedencia: -----					
Identificación de Probeta	Fecha de Vaciado	Diam 1. (mm)	Diam 2. (mm)	Carga (KN)	Tipo de Falla
VER ASR - 175	11/06	152.9	152.2	418.4	2
PU26-8 - 175	7/08	150.1	150.3	362.5	2
losa cisterna 210	10/06	149.5	150.0	422.9	4
Zap c15(13) -210	3/06	150.5	151.2	444.1	2
25698 280	1/06	151.0	151.0	527.1	3
P13-18-280	21/07	149.2	150.3	512.8	2
cisterna cim 300	30/06	152.0	152.0	625.4	2
26-CE-300	14/06	151.9	150.9	629.0	3

Ensayado por:

Página N°

Total de Probetas Acumuladas: