



**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingeniería y Tecnologías de Información

Escuela de Ingeniería Civil

Licenciatura en Ingeniería Civil

Trabajo final de graduación para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil,
modalidad tesis

**DESARROLLO DE UN PROTOCOLO PARA DETERMINAR LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN TUBERIAS DE CONCRETO
POR MEDIO DE ULTRASONIDO**

Autor: Giovanni Gerardo Quesada Víquez

Tutor: Ing. Minor Murillo Chacón

Lector: M.Sc. Andrés Reyes Bonilla

Heredia, 03 de septiembre del 2021



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: “***Desarrollo de un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido.***”, por el (la) estudiante: Giovanni Gerardo Quesada Víquez, fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de **Ingeniería Civil** de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en **Ingeniería Civil**:

Minor Murillo Chacón

Tutor

Andrés Reyes Bonilla

Lector

Giovanni Arguedas Morales

Representante



COMITÉ ASESOR

Ing. Minor Murillo Chacón

Tutor

Ing. Andrés Reyes Bonilla

Lector

Ing. Giovanni Arguedas Morales

Representante

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL TUTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACION

Heredia, 25 de agosto de 2021

Sres. Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Desarrollo de un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido", elaborado por el estudiante: Giovanni Gerardo Quesada Víquez, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente:

Firmado digitalmente por MINOR
EDUARDO MURILLO CHACON
(FIRMA)

Fecha: 2021.08.25 13:13:14 -06'00'

Ing. Minor Murillo Chacón

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACION

Heredia, 25 de agosto de 2021

Sres. Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Desarrollo de un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido", elaborado por el estudiante: Giovanni Gerardo Quesada Víquez, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente:

ANDRES
REYES
BONILLA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ANDRES REYES
BONILLA (FIRMA)
Fecha: 2021.08.26
10:47:09 -06'00'

Ing. Andrés Reyes Bonilla

UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
ESCUELA: INGENIERÍA CIVIL

Heredia, 9 de setiembre de 2021

CARTA DE REVISIÓN FILOLÓGICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACION

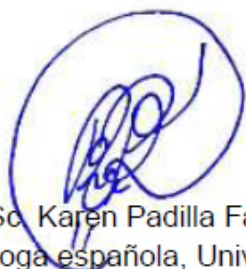
Señores y señoras Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación.

A quien corresponda:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación *Desarrollo de un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido*, elaborado por el sustentante Giovanni Gerardo Quesada Víquez, para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Corregí el trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros puntos relacionados con el campo filológico. Además, se han realizados los ajustes correspondientes al formato APA 7ª Edición, al lenguaje inclusivo; así como a la coherencia y cohesión de la propuesta. Desde ese punto de vista, considero que está listo para ser presentado como Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Civil; por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Se suscribe de ustedes, cordialmente,



M. Sc. Karen Padilla Fallas
Filóloga española, Universidad de Costa Rica
Código 05560
ACFIL 345

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Giovanni Gerardo Quesada Víquez

De la Carrera / Programa:

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

Con el trabajo de tesis "Desarrollo de un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido", para optar por el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil.

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) **25** del mes **agosto** de año **2021** a las **12:018 pm**. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores

Según orden de mención al inicio de ésta carta:

GIOVANNI
GERARDO
QUESADA
VIQUEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente
por GIOVANNI
GERARDO QUESADA
VIQUEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.08.25
12:19:37 -06'00'

Agradecimientos

Primero que nada, quiero darle infinitas gracias a Dios, a mis padres Jeiner Quesada Alfaro y mi madre Viria Víquez Jiménez, quienes me han ayudado de una forma tan increíble que no podría explicar, es una meta que me propuse, que no ha sido fácil después de tantos años, y que en este año se concluye.

A mi gran compañera de vida, Ana Yansi Castro Castro, por ayudarme a cuidar de gran forma a nuestros hijos y apoyarme en todo momento, los sacrificios realizados para yo poder aportar un mayor tiempo en la ejecución de este trabajo, a mis dos hijos Monserrath Quesada Castro y Thiago Quesada Castro que fueron y serán mi motor de vida, que me impulsan a seguir adelante y no desistir en los momentos difíciles; quiero decirles que no desistan nunca en sus sueños, ya que la educación es el mejor medio para cumplirlos.

También deseo agradecer a mi hermano José Raúl Quesada, quien me ayudó a no desistir en la conclusión de esta meta.

Quiero agradecerle a la Empresa LGC Ingeniería de Pavimentos, a los Ingenieros Luis Guillermo Chavarría y el Ingeniero Amed Aldi Bolaños, así como todas las personas colaboradoras que ayudaron en el proceso de desarrollo de este trabajo de investigación, este trabajo se logra de manera satisfactoria gracias al aporte de los equipos necesarios y los permisos.

Quiero agradecer de gran forma a los ingenieros Mainor Murillo Chacón y al Ing. Andrés Reyes Bonilla por permitirme ser parte de un gran equipo de trabajo, además me ayudaron en todo momento, a todos mis profesores Universitarios, las personas colaboradoras de la Empresa Productos de concreto, en especial al Ingeniero Manfred Ramírez Castro que, de una u otra manera, aportaron un granito de arena para que se lograra a cabalidad la realización de este trabajo.

A todos los compañeros de Universidad que conocí y que me ayudaron a salir adelante en este proyecto, tras muchos momentos de traspasadas y sacrificios y que, después de tantos años de estudio, el día de hoy se concluye.

Resumen

En el presente trabajo, se pretende contribuir en la elaboración de un protocolo de evaluación en el concreto endurecido mediante la técnica de ultrasonido, se utilizaron equipos de alta tecnología como lo son el Proceq Pundit PL-200 y PL-200PE para mejorar y modernizar el sistema de evaluación del concreto.

Se contó con el apoyo de la Empresa LGC Ingeniería de Pavimentos, y Productos de concreto PC para el desarrollo del protocolo de evaluación, de manera oportuna, brindaron los equipos y materiales para los diferentes análisis en tuberías de concretos secos de bajo asentamiento a fin de determinar las velocidades de onda mediante las pruebas experimentales y la resistencia del concreto mediante la técnica de ultrasonido.

Los ensayos ejecutables en el concreto pueden ser de dos tipos:

- Destructivos: Se denomina ensayo destructivo a los que determinan la resistencia del concreto por medio de la rotura de probetas o de piezas de concreto.
- No destructivos: Se denomina ensayo no destructivo del concreto a los que permiten conocer la calidad del concreto sin destruir o afectar a la estructura interna del elemento en estudio.

El desarrollo del protocolo de evaluación mediante la técnica de ultrasonido ASTM C597 se determinó por medio de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico del concreto y la correlación con los resultados de las pruebas experimentales obtenidas de la resistencia a la compresión uniaxial según la norma ASTM C39, la resistencia a la compresión en núcleos de concreto mediante ASTM C42, y el ensayo de las tres aristas mediante la ASTM C497. A partir de los ensayos mencionados, se planteó, como propuesta final, una correlación entre los diferentes resultados obtenidos.

Adicional a lo indicado en el párrafo anterior, la determinación del grado de afectación que se puede presentar en la resistencia del concreto es parte de los análisis, a partir de dos tipos de escenarios presentados.

- Cilindros de concretos curados en patio de almacenaje.
- Cilindros de concretos curados en condiciones normadas.

La tubería utilizada es de 1200 mm de diámetro; debido a que, en la Empresa PC, la producción se encuentra en mayor escala para la obtención de los objetos de ensayo.

El tipo de tubería a utilizar presenta características definidas como:

- Diámetro 1200 mm.
- Espesor pared 144,3 mm.
- Longitud 2,5 m.
- Resistencia de concreto a la compresión mínima de 44,1 MPa.
- Tubería tipo C76 (presenta acero de refuerzo).
- Tubería tipo hincada.

Estas tuberías de concreto presentan acero de refuerzo y es un concreto seco, con el mismo, se desarrollaron los cilindros para evaluar la resistencia a la compresión y determinar la correlación entre los resultados de ultrasonido y resistencia a la compresión uniaxial.

Este proyecto incita el uso de los equipos de ultrasonido para investigar el comportamiento de los concretos y poder realizar un análisis estadístico comparativo entre los resultados de medición de equipos convencionales y el ultrasonido, cuyos equipos son utilizados para determinar la resistencia del concreto.

El concreto se elabora en la planta de Productos de Concreto PC. De este concreto, se cuenta con la fundamentación teórica básica para la investigación debido a la confidencialidad de la Empresa.

Abstract

In this paper it is intended to contribute to the development of an evaluation protocol in hardened concrete, using the ultrasound technique, high-tech equipment such as the Proceq Pundit PL-200 and PL-200PE are used to improve and modernize the concrete evaluation system.

For the development of the evaluation protocol, it has the support of the Company LGC Engineering of Pavements and PC Concrete Products, which provide for the research in a timely manner, the equipment and materials for the different analyses in pipes of dry concretes of low settlement and thus manage to determine the wave velocities through the experimental tests and to determine by means of the ultrasound technique the resistance of the concrete.

Executable tests on concrete can be of two types:

- Destructive: Destructive testing is those who determine the strength of concrete by breaking specimens or concrete parts.
- Non-destructive: Non-destructive testing of concrete is what allows to know the quality of the concrete without destroying or affecting the internal structure of the element under study.

The development of the evaluation protocol using the ultrasound technique ASTM C597, is determined by means of the results of ultrasonic pulse rate of the concrete and the correlation with the results of the experimental tests obtained from the resistance to uniaxial compression according to the ASTM C39 standard, the resistance to compression in concrete nuclei by ASTM C42 and the test of the three edges by the ASTM C497, from the aforementioned tests, perform as a final proposal, a correlation between the different results obtained from the aforementioned tests.

In addition to what was mentioned in the previous paragraph, part of the analysis is the determination of the degree of affectation that the concrete can present in its resistance through two types of scenarios presented.

- Concrete cylinders cured in storage yard.
- Concrete cylinders cured under standard conditions.

The pipe used is 1200 mm in diameter, because in the PC Company, production is on a larger scale for obtaining the tests.

The type of pipe to be used has characteristics defined as:

- Diameter 1200 mm
- Wall thickness 144.3 mm
- Length 2.5 m
- Concrete resistance to minimum compression of 44,1 MPa
- Pipe type C76 (presents reinforcing steel)
- Inflated pipe

These concrete pipes have reinforcing steel and is a dry concrete. From the same concrete cylinders are developed to evaluate compress strength and determine the correlation between ultrasound results and uniaxial compression resistance.

This project encourages the use of ultrasound equipment to investigate the behavior of concrete and to be able to perform a comparative statistical analysis between the measurement results of conventional equipment and ultrasound that are equipment used for the determination of the resistance of concrete.

The concrete is made in the PC Concrete Products plant. This specific has the basic theoretical basis for the research due to the confidentiality of the Company.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Alcances y Limitaciones	5
1.5.1 Alcances.....	5
1.5.2 Limitaciones	6
1.6 Impacto.....	6
1.7 Hipótesis.....	7
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
2.1 Concretos secos	8
2.2 Tubería C76 diámetro 1200 mm	10
2.3 Consistómetro Vebe	11
2.4 Tipos de curado del concreto	13
2.4.1 Curado en Pilas controladas	13
2.4.2 Curado en Patio de almacenaje.....	15
2.5 Técnicas para la medición de la resistencia del concreto.....	16
2.5.1 Métodos destructivos	16
2.5.1.1 Método de resistencia a compresión.....	16
2.5.1.2 Método extracción de núcleos de concreto.....	18
2.5.1.3. Método de ensayo prueba de tracción indirecta.....	19
2.5.1.4. Método de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas.....	20
2.5.1.5. Prueba de flexión.....	21
2.5.2. Métodos no destructivos.....	22
2.5.2.1 Esclerómetro.....	22
2.5.2.2 Ensayo de penetración.....	23
2.5.2.3 Equipo de ultrasonido.....	24
2.5.3 Ventajas que presentan los equipos de ultrasonido	25

2.5.4 Desventajas y problemas que presentan los equipos de ultrasonido	26
2.5.5 Equipo ultrasonido Pundit PL-200 PE.....	27
2.5.5.1 Método y análisis Escaneo A.....	28
2.5.5.2 Método y análisis de Escaneo B.	29
2.5.5.3 Medición con Pundit PL-200 PE.	29
2.5.6 Medición con Pundit PL-200.....	30
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO	34
3.1. Enfoque y método de investigación	34
3.2. Enfoque cuantitativo	34
3.3. Técnicas de muestreo	35
3.3.1 Población	35
3.3.2 Muestra	37
3.3.3 Confiabilidad de la muestra.....	37
3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	40
3.4.1. Método de prueba estándar para determinar la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria (ASTM C1170)	42
3.4.2. Práctica estándar para la preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra (ASTM C31).....	45
3.4.3. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través de concreto (ASTM C597)	48
3.4.4. Método de ensayo para la resistencia a la compresión de especímenes de concreto (ASTM C39).....	53
3.4.5. Métodos de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas (ASTM C497)	55
3.4.6. Método de ensayo para la obtención de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto (ASTM C42).....	57
3.5. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos.....	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
4.1. Resultados	63
4.1.1. Densidad del concreto mediante tiempo Vebe	63
4.1.2. Determinación de velocidad de pulso V mediante ultrasonido	63
4.1.3. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto	68
4.1.4. Métodos de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas.....	72

4.1.5. Método de ensayo para la obtención de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto	80
4.2. Análisis de resultados.....	89
4.2.1. Correlación de Resistencia a la Compresión vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	90
4.2.2. Correlación entre ensayo Tres Aristas vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico	94
4.2.3. Curva de Desarrollo de Resistencia.....	95
4.2.4. Condiciones de curado normado vs. condiciones curado en patio de almacenaje	96
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y HALLAZGOS.....	99
5.1 Conclusiones	99
5.2 Recomendaciones.....	99
5.3 Hallazgos.....	100
ANEXOS	101
Anexo A. Muestreo de concreto hidráulico	101
Anexo B. Equipos de medición.....	102
Anexo C. Caracterización del agregado fino 4,8 mm	103
Anexo D. Caracterización del agregado fino 7,9 mm.....	104
Anexo E. Caracterización del agregado grueso 16,0 mm	105
Anexo F. Caracterización del agregado grueso 19,0 mm	106
Anexo G. Certificado del cemento.....	107
Anexo H. Certificado del Aditivo	108
Anexo I. Ultrasonido a los especímenes	109
Anexo J. Resistencia a la Compresión Uniaxial de Especímenes.....	110
Anexo K. Resultados de ultrasonido.....	111
Anexo L. Informe LanammeUCR I-0895-2021.....	112
Anexo M. Falla núcleos de concreto con capeo.....	113
Anexo N. Modelo de Análisis SAP 2000v.22.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
GLOSARIO	118

Índice de figuras

Figura 1	<i>Consistómetro Vebe</i>	12
Figura 2	<i>Cámara de curado de concreto</i>	14
Figura 3	<i>Cilindros de concreto en patio de almacenaje</i>	15
Figura 4	<i>Equipo de protección personal</i>	16
Figura 5	<i>Máquina automática ensayo compresión uniaxial</i>	17
Figura 6	<i>Tipos de fractura</i>	18
Figura 7	<i>Extracción de núcleos de concreto</i>	19
Figura 8	<i>Ensayo tracción indirecta</i>	20
Figura 9	<i>Ensayo de aplastamiento en la tubería</i>	20
Figura 10	<i>Ensayo a flexión de vigas de concreto</i>	22
Figura 11	<i>Esclerómetro</i>	23
Figura 12	<i>Sistema de medición sonda Windsor</i>	24
Figura 13	<i>Equipo de ultrasonido</i>	25
Figura 14	<i>Equipo de ultrasonido Pundit PL-200 PE</i>	28
Figura 15	<i>Tipos de transmisión de ondas ultrasónicas</i>	30
Figura 16	<i>Calibración de transductores Proceq Pundit PL-200</i>	31
Figura 17	<i>Parámetros de evaluación calidad ultrasónica</i>	33
Figura 18	<i>Alcances que puede tener un estudio cuantitativo</i>	35
Figura 19	<i>Cilindros de concreto</i>	36
Figura 20	<i>Equipo de ultrasonido Proceq</i>	40
Figura 21	<i>Máquina de falla PC</i>	41
Figura 22	<i>Consistómetro Vebe</i>	43
Figura 23	<i>Peso del material</i>	44
Figura 24	<i>Moldeo de cilindros de concreto en mesa vibratoria</i>	45
Figura 25	<i>Identificación de especímenes de concreto</i>	46
Figura 26	<i>Cámara de curado del concreto</i>	47
Figura 27	<i>Curado de cilindros en patio de almacenaje</i>	48
Figura 28	<i>Transductor proceq 54 kHz</i>	50
Figura 29	<i>Ultrasonido cilindros de concreto</i>	51
Figura 30	<i>Programa proceq</i>	52
Figura 31	<i>Gel lubricante, acoplamiento de transductores</i>	53

Figura 32	<i>Máquina de resistencia a la compresión de PC</i>	54
Figura 33	<i>Sellos de calibración</i>	55
Figura 34	<i>Ensayo tres aristas Lanamme</i>	56
Figura 35	<i>Análisis de núcleos de concreto</i>	59
Figura 36	<i>Calibración equipo de ultrasonido</i>	60
Figura 37	<i>Sellos de calibración</i>	60
Figura 38	<i>Medición de especímenes con vernier</i>	61
Figura 39	<i>Vaselina de acople par de transductores</i>	64
Figura 40	<i>Anotación de altura en equipo Proceq</i>	64
Figura 41	<i>Medición, diámetro de los especímenes</i>	68
Figura 42	<i>Identificación de puntos de ensayo</i>	72
Figura 43	<i>Equipo de detección de acero de refuerzo</i>	73
Figura 44	<i>Medición de espesor de tubería</i>	73
Figura 45	<i>Calibración y ultrasonido transductor pulso eco</i>	74
Figura 46	<i>Programa Proceq PL-Link</i>	76
Figura 47	<i>Determinación del Módulo de Elasticidad y Razón de Poisson</i>	76
Figura 48	<i>Calibración y ultrasonido a tubería con transductores 54 kHz</i>	77
Figura 49	<i>Sección de extracción de núcleos en acero de refuerzo tubería 1200 mm</i> .	81
Figura 50	<i>Extracción de núcleos de concreto</i>	82
Figura 51	<i>Extracción de núcleos de concreto de 50.8 y 63.5 mm</i>	82
Figura 52	<i>Máquina de refrentado de caras de núcleos</i>	83
Figura 53	<i>Ultrasonido núcleos de concreto</i>	84
Figura 54	<i>Resistencia a la compresión núcleos de concreto</i>	84
Figura 55	<i>Factores de corrección núcleos de concreto ACI 214.4R-03</i>	87
Figura 56	<i>Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 1 día</i>	91
Figura 57	<i>Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 7 días</i>	92
Figura 58	<i>Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 28 días</i>	93
Figura 59	<i>Resistencia a la compresión vs. ultrasonido</i>	95
Figura 60	<i>Condiciones normadas vs. Curado en Patio de almacenaje</i>	96
Figura 61	<i>Condiciones climatológicas Mayo – Julio 2021</i>	97

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Tubos con acero de refuerzo ASTM C76</i>	11
Tabla 2	<i>Medidas de consistencia equipo Vebe</i>	13
Tabla 3	<i>Matriz de ensayos</i>	39
Tabla 4	<i>Plan de ensayos</i>	42
Tabla 5	<i>Densidad del concreto</i>	63
Tabla 6	<i>Ultrasonido a cilindros de concreto edad 1 día</i>	65
Tabla 7	<i>Ultrasonido a cilindros de concreto edad 7 días</i>	66
Tabla 8	<i>Ultrasonido a cilindros de concreto edad 28 días</i>	67
Tabla 9	<i>Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 1 día</i>	69
Tabla 10	<i>Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 7 días</i>	70
Tabla 11	<i>Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 28 días</i>	71
Tabla 12	<i>Ultrasonido pulso eco</i>	75
Tabla 13	<i>Ultrasonido transductores 54 kHz</i>	78
Tabla 14	<i>Ensayo de tres aristas</i>	78
Tabla 15	<i>Ultrasonido núcleos de concreto</i>	85
Tabla 16	<i>Factores de corrección de resistencia para la relación longitud / diámetro</i> . 86	
Tabla 17	<i>Condiciones ambientales y relación L / D</i>	86
Tabla 18	<i>Resistencia a la compresión núcleos de concreto</i>	88
Tabla 19	<i>Resistencia a la compresión núcleos de concreto, almohadillas de neopreno</i> 88	
Tabla 20	<i>Resistencia a la compresión núcleos de concreto, capeo con azufre</i>	89
Tabla 21	<i>Relación Tres Aristas vs. Velocidad de Pulso Ultrasonico</i>	95
Tabla 22	<i>Promedio de condiciones de curado</i>	97

Índice de ecuaciones

Ecuación 1..... 38
Ecuación 2..... 44
Ecuación 3..... 48
Ecuación 4..... 68
Ecuación 5..... 77
Ecuación 6..... 78
Ecuación 7..... 79
Ecuación 8..... 79
Ecuación 9..... 79
Ecuación 10..... 80
Ecuación 11..... 87

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la República de Costa Rica, se cuenta con laboratorios públicos y privados que contienen tecnologías para el análisis del concreto hidráulico, entre las cuales existe la técnica de ultrasonido. Esta tecnología permite evaluar la uniformidad del concreto a partir de la propagación de pulsos longitudinales y ondas de esfuerzos.

Entre los laboratorios que cuentan con estas tecnologías, se encuentra Lanamme “Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales”, fundado en 1951 como una institución del estado para ayudar a garantizar la calidad de las construcciones; también existen laboratorios privados como LGC Ingeniería de Pavimentos SA, que es un laboratorio de control de calidad y análisis de materiales que fue fundado por el Ing. Luis Guillermo Chavarría Bravo en el año 2001, con el fin de brindar servicios de consultoría.

El laboratorio LGC cuenta con equipo de ultrasonido de última generación, para el análisis del concreto hidráulico, por tanto, lo suministra como ayuda para la ejecución de este proyecto, colaboración que es de suma importancia.

En este laboratorio, se cuenta con equipos de alta tecnología que ayudan a determinar y analizar los procesos constructivos, como parte de la innovación del Laboratorio se adquieren los equipos de la Marca Proceq estilo Pundit PL-200 y el Pundit PL-200PE, ambos determinan una evaluación del concreto hidráulico endurecido por medio de ondas de ultrasonido.

En Costa Rica, existen varios tipos de entidades para el análisis de materiales, estas surgieron a raíz de las necesidades que presentan las empresas constructoras, y debido a disposiciones generales que el Gobierno de la República implementa. En la construcción de infraestructura, se enfatiza en la creación de códigos y estándares de calidad, como ejemplo se puede mencionar la creación del CR-2010, Código Sísmico, entre otros; que son disposiciones que van en constante crecimiento de mejora debido a las particularidades y deficiencias que presentan y que se mejoran con el paso de los años.

Estos equipos, ayudan a la mejora continua en los procesos constructivos, y generan un aporte a la ciudadanía costarricense.

Como parte de la historia de Proceq, es posible indicar que:

Proceq fue fundada el 8 de abril de 1954 en Zúrich, Suiza. El fundador Antonio Brandestini ya era reconocido entre los contratistas de ingeniería como uno de los tres cofundadores de BBR Network que, en aquel entonces, era y actualmente todavía es el grupo líder mundial de expertos de ingeniería de construcción.

El primer producto principal fue el martillo de rebote Original Schmidt, patentado por el físico Ernst O. Schmidt, quien colaboró con Proceq gracias a la reputación de integridad y calidad de producción de Brandestini. (Proceq, 2021, párrs. 1-2)

Acerca de las investigaciones realizadas por el profesor Sokolov e historia del ultrasonido, parte durante la primera guerra mundial e indica que:

En 1929 el profesor S. Sokolov descubre que las vibraciones ultrasónicas pueden penetrar en grandes espesores de metal y ser transmitidas por alambres a grandes distancias. Entonces pensó que podrían utilizarse para descubrir imperfecciones en los metales. Esto llevo a idear un instrumento que denominó defectoscopio. Aplicó su aparato al estudio de las cualidades estructurales de los metales y el temple de los aceros. También lo utilizó para revelar la presencia de objetos contenidos en bloques opacos de material. (Pellicer Llopis s. f, p. 26)

El desarrollo y base de la tecnología de ultrasonido en el análisis del concreto hidráulico es de suma importancia, debido a que permite encontrar uniformidades en el concreto a partir de estas tecnologías, como parte del desarrollo que exhibe, se indica que.

El método del ultrasonido fue desarrollado por primera vez en Canadá por Leslie y Cheesman entre los años 1945 y 1949; de la misma forma en que también fue utilizado por Jones y Gatfield en Gran Bretaña, prácticamente al mismo tiempo. Fue empleado con mucho éxito desde la década de los años 60 del siglo pasado para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas. En general, ASTM tiene hoy entre sus especificaciones a la ASTM C597 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete), reglas para el uso del método del pulso ultrasónico desde el año 1967; asimismo en la reglamentación británica, ha publicado también recomendaciones para la medida de la velocidad de pulsos de ultrasonido en el concreto.

El método del pulso ultrasónico se basa en un fenómeno físico muy bien conocido, la propagación de ondas en un medio material; fenómeno que puede tornarse complejo cuando el medio de propagación es heterogéneo. Este hecho implica diferentes fases que componen al material, con diferentes propiedades elásticas relativas a la propagación de ondas; heterogeneidad que representa una limitación en el conocimiento de la forma del frente de onda, así como también en el camino seguido por la onda. Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante, ondas superficiales o de Rayleigh, y las ondas de Lamb. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio en que se propagan, de forma que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material. Cada tipo de onda se caracteriza por su dirección, su velocidad y la energía transportada. Las diferentes velocidades de estas ondas se relacionan y dependen de los parámetros intrínsecos al material: módulo dinámico elástico, coeficiente de Poisson, módulo dinámico de cizalladura o de Coulomb G , y densidad. El método de ultrasonido se basa entonces en la teoría de la propagación de las ondas compresionales en un medio infinito, homogéneo, isotrópico y elástico. (Quintana, 2016, p. 33)

1.2 Planteamiento del problema

El problema radicó en la necesidad de desarrollar un protocolo de evaluación para el análisis de concretos secos utilizados en la fabricación de tuberías de concreto por medio de ultrasonido, debido a la falta de especificaciones nacionales encaminadas a la valoración de estructuras por medio de equipos de alta tecnología, y evitar los ensayos destructivos para minimizar la contaminación ambiental.

El proyecto consistió en el estudio de técnicas y resultados de forma intensiva para presentar un protocolo de evaluación, esta se ejecuta en tuberías de concreto bajo la especificación ASTM C76 “Especificación estándar para alcantarillas, desagües pluviales y tuberías de alcantarillado de concreto armado” elaboradas con concretos de bajo asentamiento y que cuentan con acero de refuerzo.

La falta de experiencias con el uso de este tipo de tecnologías provoca que se cuente con deficiencia en los análisis, es importante implementar diferentes estudios para ayudar a minimizar el uso de ensayos no destructivos, así disminuir la contaminación y mantener la integridad de la estructura que se encuentre en análisis.

Uno de los principales problemas que presentan los equipos de ultrasonido es la falta de reconocimiento del acero de refuerzo, que puede generar una desviación en los resultados y, con ello, emitir un criterio erróneo.

A raíz del problema, se decidió realizar varios tipos de pruebas que contaran con diferentes escenarios, en donde los equipos Pundit PL-200 y el Pundit PL-200PE se utilizaron para determinar el grado de afectación, las pruebas efectuadas se analizaron de forma minuciosa y detallada para garantizar la validez de la prueba.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un protocolo para determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de ultrasonido.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a la compresión en tuberías elaboradas en concretos secos de bajo asentamiento, mediante la tecnología de ultrasonido y ASTM C497.
- Analizar, por medio ultrasonido y el método ASTM C39, la resistencia a la compresión de cilindros de concreto elaborados según ASTM C1170.
- Evaluar el desarrollo de resistencia a la compresión de núcleos de concreto extraído de las tuberías mediante ASTM C42, de acuerdo a las normas ASTM C597 y C39.
- Comparar los resultados de las diferentes metodologías de análisis para concretos secos con el fin de desarrollar un protocolo de evaluación.

1.4 Justificación

En Costa Rica, se presentan diversas técnicas para la evaluación del concreto hidráulico endurecido. El método más utilizado es el de resistencia a la compresión uniaxial de cilindros de concreto mediante la ASTM C39, utilizando comúnmente los moldes de 10 cm x 20 cm y de 15 cm x 30 cm, lo cual es un ensayo destructivo.

Otra de las formas de evaluación del concreto es por medio del esclerómetro, mediante la norma ASTM C805M “Método de prueba estándar para el número de rebote de concreto endurecido” el cual efectúa un ensayo no destructivo, pero con un margen de error mayor que el de resistencia a la compresión.

La técnica de ultrasonido puede lograr, de manera satisfactoria, la evaluación del concreto hidráulico, y obtener un mejor análisis de evaluación que no provoca desechos de concreto, con lo que disminuiría considerablemente el uso de la resistencia a la compresión uniaxial.

Es importante mencionar que estas técnicas ayudaron a determinar, con mayor acierto, la evaluación de concretos en donde se contaba con accesos difíciles como túneles o edificios, en donde la separación entre ambos fuera mínima, el equipo Pundit PL-200 PE permitió analizar este tipo de estructuras.

El desarrollo de este protocolo promueve a los diferentes laboratorios públicos y privados del país a adquirir nuevas tecnologías de evaluación y fomentar el interés en medios de valoración accesibles, rápidas y eficaces para el examen del concreto hidráulico.

Parte de los estudios fue comparar la resistencia a la compresión, y al ultrasonido, para determinar la veracidad de los resultados e investigar las posibles relaciones entre los dos métodos.

En Costa Rica, las experiencias previas con estas tecnologías son débiles debido al costo elevado de los equipos ultrasónicos; a la fecha, no se han desarrollado protocolos de evaluación por medio del equipo Pundit PL-200 y Pundit PL-200 PE. En este contexto, el presente estudio buscó establecer un modelo para desarrollar el protocolo de evaluación, el objetivo fue mejorar las técnicas de análisis desde el punto de vista funcional.

En Costa Rica, no existen especificaciones para la evaluación del concreto a través de estas técnicas que, a su vez, no cuentan con indicadores o parámetros de calidad que se deban cumplir a la hora de analizar una estructura en un proyecto determinado.

1.5 Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

- Se cuenta con el aporte del concreto hidráulico cuando se ejecuta el proceso de fabricación de tubería C76 en diámetro de 1200 mm hincado, para la obtención de cilindros de concreto.
- Se cuenta con el aporte de equipo de última generación, para realizar la medición ultrasónica a las tuberías y cilindros de concreto.

- Se envía, mediante el apoyo de la empresa PC, la tubería a LanammeUCR, para la ejecución del ensayo de las tres aristas ASTM C497.
- Todas las pruebas de ensayo se ejecutan en la Empresa PC, a excepción del ensayo ASTM C497.
- La actividad comprendió el desarrollo de un modelo para mejorar la evaluación del concreto hidráulico endurecido, se presentó como una nueva metodología de análisis.

1.5.2 Limitaciones

- Se está supeditado al proceso de producción y ejecución de tubería de concreto por parte de la empresa Productos de Concreto.
- Se cuenta con equipos de laboratorio que pueden presentar imprevistos y fallas mecánicas a la hora de la ejecución de las pruebas, tales como:
 - Máquina de ensayo a compresión.
 - El consistómetro Vebe.
 - El equipo de ultrasonido.
 - Extractora de núcleos.
 - Equipo de detección de acero.
 - Higrómetro.
- La falta de personal capacitado en el país sobre las técnicas y usos de equipos de evaluación del concreto hidráulico endurecido mediante pruebas de ultrasonido.
- Falta de determinación por medio del equipo Pundit PL-200 y PL200PE para el reconocimiento del acero de refuerzo, y la afectación que pudiere presentarse al correlacionar la resistencia a la compresión y los datos del equipo.

1.6 Impacto

Se esperaba que la investigación presentara un impacto positivo económico y social para los laboratorios públicos y privados de este país, el desarrollo de esta investigación fomentó el uso de tecnologías nuevas que ayudaran a la conservación del medio ambiente y la mejora de la evaluación del concreto hidráulico en las diferentes e importantes estructuras del país.

Se promueve el desarrollo de esta metodología para obtener resultados más rápidos y eficaces en sitio, que ayudan a una correcta y rápida respuesta del desempeño y calidad del concreto, lo cual es un impacto bastante oportuno para las empresas, a fin de tomar las decisiones necesarias según los resultados obtenidos.

1.7 Hipótesis

Debido a la falta de análisis de ultrasonido en tuberías de concreto en el país, el trabajo de investigación cumplió con la hipótesis para implementar un sistema de evaluación y una mejora continua del concreto hidráulico, utilizado en la fabricación de tuberías elaboradas con concretos secos de bajo asentamiento, a fin de ayudar a obtener parámetros de evaluación que determinaran, más ágil y eficazmente, las características que presentaba el concreto del elemento en estudio.

Los concretos secos de bajo asentamiento presentaban una baja trabajabilidad, lo que provocó que se generaran alteraciones en la homogeneidad del concreto, el ensayo de ultrasonido permitió determinar estas características y presentar el grado de uniformidad con el objetivo de establecer un criterio característico del concreto

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este contexto, de una manera desarrollada, se plantea la descripción de todos los aspectos técnicos utilizados en el proyecto, la intención principal es plantear ideas claras y explicativas de los diferentes ensayos y técnicas de laboratorio, como herramientas aclaratorias para que la persona lectora adquiera una idea clara de lo planteado en el presente trabajo.

2.1 Concretos secos

Los concretos secos son utilizados comúnmente en el país para la elaboración de diferentes elementos estructurales tipo prefabricados, los concretos secos se definen como:

El concreto seco vibro compactado es un material que por sus características de rápido desmoldeo, permite la elaboración de una amplia gama de productos prefabricados, como bloques, adoquines, tuberías, entre otros. Existen muchos estudios sobre las características mecánicas de estos elementos, sin embargo, existen muy pocos, inclusive a nivel internacional, que correlacionen estas características con la estructura interna del material y el porqué de su comportamiento.

El concreto seco vibro-compactado es una mezcla de cemento Pórtland, agregados, agua, y en algunos casos, aditivos y adiciones. La literatura menciona que la relación A/C para estos concretos puede estar por debajo de 0,4 (Paakkinen, 1986); sin embargo, esto no es del todo cierto, pues la cantidad de agua en la mezcla depende de la superficie específica de los agregados. La conformación de concreto seco vibro-compactado se consigue sometiendo la mezcla a vibración mecánica y presión, obligando a las partículas del material a acomodarse dentro de la formaleta; por esta razón la mezcla debe ser lo suficientemente rígida como para permitir su consolidación y desmoldeo, pero también debe ser tan húmeda que permita una adecuada distribución de la pasta a través de la masa de los elementos durante las operaciones de mezclado y vibrado. (Hincapié y Montoya, 2005, p. 2)

Como parte de las particularidades que presentan las mezclas elaboradas con concretos secos se destaca:

Este tipo de mezcla, tiene la particularidad de requerir energía adicional para su compactación y consolidación respectivamente, de modo que, se hace evidente que hablamos de procesos productivos altamente industrializados. Dicho tema es de suma importancia como material de apoyo didáctico y de consulta para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

Las empresas de elementos prefabricados de mayor incidencia en nuestro país; Estructuras de Concreto y Productos de Concreto a saber, poseen sistemas productivos vibro-compactados y extruidos respectivamente como parte de sus alternativas de mercado. (Zúñiga y Martínez, 2002, p. 2)

Dentro de las características que presentan los concretos prefabricados, se mencionan las siguientes:

- Sistemas que utilizan tecnología muy avanzada y menor cantidad de mano de obra, tanto en la parte productiva como en la fase del montaje.
- Reducción en los tiempos de ejecución que inciden directamente en los costos de mano de obra y maquinaria.
- Versatilidad en los sistemas y elementos que ofrecen.

Los elementos prefabricados elaborados en procesos extruidos o vibro compactados son una alternativa dentro del sector constructivo en poder de las constructoras y prefabricadoras más importantes en nuestro medio.

Los concretos de asentamiento nulo (mezclas secas) son muy empleados en la prefabricación, con un mínimo de plasticidad, que pueden no tener ningún asentamiento en el Cono de Abrams, por lo cual este tipo de ensayo no es de utilidad. En algunos casos, puede resultar útil la prueba con el Consistómetro Vebe. Para su colocación en moldes o encofrados, estos concretos requieren alta energía de vibración o compactación, con vibradores externos o con mesas vibratorias, y en ocasiones con tapas sobre los encofrados, en las que se colocan vibradores adosados. Como se suelen necesitar altas resistencias, estos concretos de prefabricación requieren elevadas cantidades de cemento y agregados limpios, duros y de buena graduación. En cuanto a las características de fabricación de este tipo de concreto, se pueden mencionar las siguientes: es recomendable el uso de cementos de bajo calor de hidratación; el uso de puzolanas y adiciones activas; los agregados tienen

requisitos de gradación menos exigentes que los del concreto convencional, e inclusive se permite que el contenido de finos no plásticos, puede ser hasta del 10%. (Zúñiga y Martínez, 2002, pp. 5-6)

2.2 Tubería C76 diámetro 1200 mm

Como parte del desarrollo del trabajo, en la modalidad de tesis, se decide trabajar con la tubería C76, con un diámetro de 1200 mm clase V de tipo hincado, debido a que, en la empresa PC, se encuentran en la elaboración a gran escala de este tipo de tubería, de cuyas especificaciones de detalla lo siguiente:

Estos tipos de tuberías se elaboran siguiendo las normas ASTM C76 / AASHTO M170, son aptas para situaciones donde se necesitan mayores diámetros y resistencia estructural que la C14 que no cuenta con acero de refuerzo.

La tubería C76 tiene la capacidad de soportar grandes rellenos y/o tránsito de vehículos pesados, sus principales usos son:

1. Alcantarillas en carreteras.
2. Alcantarillas de aguas pluviales.
3. Colectores de aguas negras, pluviales y de desechos industriales.
4. Situaciones donde la falla estructural puede poner en riesgo la vida humana.

De estos tipos de tuberías se fabrican en cinco clases diferentes, denominadas clase I, II, III, IV y V, siendo la más usual la clase III, mientras que las clases restantes se fabrican bajo pedido (Productos de concreto, 2018, p. 1).

En esta investigación se optó por trabajar con la tubería C76 en diámetro de 1200 mm, debido a que es una tubería que se elabora en mayor medida, de la cual se obtuvo una mayor cantidad de muestras para la ejecución de los ensayos efectuados, las características que presentan las tuberías se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1*Tubos con acero de refuerzo ASTM C76*

Tubos con acero de refuerzo ASTM C76				
Requerimientos físicos y dimensionales de las tuberías C76				
Clase	Carga de grieta	Carga última	Diámetro mínimo	Diámetro máximo
	N/m/mm	N/m/mm	mm	mm
I	40	60	1500	2700
II	50	75	300	2700
III	65	100	300	2700
IV	100	150	300	2100
V	140	140	300	1800

Nota: La resistencia está dada en Newtons por m lineal de tubería por mm de diámetro.

La carga de grieta es la que produce una grieta de 0,3 mm de ancho en 30 cm de largo.

Fuente: Productos de concreto SA.

Según la (tabla 1), un uso particular de los tubos ASTM C76 es en situaciones donde la falla estructural puede poner en riesgo la vida humana o la propiedad (las tuberías de concreto reforzado aún después de haber fallado, retienen su forma y no colapsan). (Productos de concreto, 2018, p. 1)

2.3 Consistómetro Vebe

Equipo estructurado bajo la norma ASTM C1170 “Métodos de prueba estándar para determinar la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria”, como parte de sus componentes se indican:

Dentro de sus partes principales podemos mencionar, mesa vibratoria, contenedor simple, cono de revenimiento, plato plástico y una vara graduada con un peso superpuesto. La prueba de consistencia permite determinar el tiempo de vibrado en segundos requerido para que el cono de concreto cambie de forma. Este tiempo es directamente proporcional a la energía utilizada en la muestra a compactar. En mezclas muy secas, este método es extremadamente sensitivo para diferencias de consistencia. (Zúñiga y Martínez, 2002, pp. 6-7)

Como parte del procedimiento de moldeo, se señala:

Este tipo de concreto se compacta dentro de un molde y se miden asentamientos, el molde se levanta de manera vertical, limpio de concreto, y se coloca un disco transparente sobre la parte superior del concreto y con cuidado se baja hasta que entra en contacto con el concreto, se determina la magnitud del asentamiento del concreto. Se pone en marcha la mesa vibratoria y se mide el tiempo que tarda la cara inferior del disco transparente en cubrirse con la pasta (tiempo Vebe). (Ángeles Silva, 2014, p. 7)

Figura 1
Consistómetro Vebe



Fuente:UTEST, s. f.

Tabla 2*Medidas de consistencia equipo Vebe*

Medidas de consistencia equipo Vebe	
Descripción de consistencia	Equipo Vebe (s)
Extrema- seca	32-18
Muy denso	18-10
Denso	10-5
Denso – plástica	5-3
Plástica	3-0
Fluida	---

Fuente: ACI 2.3.1 (a). Del ACI 211.1-74.

2.4 Tipos de curado del concreto

Como parte del desarrollo investigativo, se presentan dos tipos de escenarios que son de vital importancia para los análisis de curado del concreto, los cuales son:

- Curado en condiciones normadas.
- Curado en patio de almacenaje.

2.4.1 Curado en Pilas controladas

Parte importante luego del moldeo de los especímenes es el curado del concreto. Este parámetro es de vital importancia para ganancia de resistencia $f'c$ con el paso del tiempo.

Los elementos curado y protección del concreto se definen como:

La cura y protección de los especímenes moldeados tanto en su estado fresco como endurecido, son importantes para que no se vean afectados los resultados de resistencia obtenidos a partir del ensayo de los mismos. Cabe destacar que en la etapa de curado los especímenes de concreto desarrollan la resistencia con el tiempo, y este desarrollo de resistencia depende mucho del proceso de hidratación del cemento dentro de la masa de concreto. Si se cuenta con un curado apropiado, el cemento puede hidratarse continuamente y desarrollar la reacción química que genera la resistencia con el tiempo. Si el curado es deficiente, el cemento no se hidrata adecuadamente y la resistencia de diseño es probable que no se llegue a alcanzar. Igual que con el moldeo, existen estándares establecidos para realizar protecciones y curados apropiados a los especímenes. Para el caso de los

especímenes moldeados en campo, estos parámetros se especifican en la norma ASTM C31. En esta norma, se indican las condiciones de humedad relativa y temperatura que se deben controlar para generar las condiciones ambientales apropiadas para que los especímenes moldeados de concreto, desarrollen la resistencia requerida para la aceptación de un concreto muestreado en obra. Estas condiciones se deben tomar en cuenta tanto en la etapa del curado inicial como en la etapa del curado final. (González y Sandi, 2011, p. 7)

Figura 2

Cámara de curado de concreto



Fuente: *Curado de cilindros de concreto para ensayo de compresión*, por IBSLAB, s. f.

Como parte del curado inicial en los especímenes cilíndricos de concreto se resalta que: En cuanto al curado inicial la norma indica que se debe proteger el espécimen de pérdida de humedad en los moldes por un máximo de 48 horas, por medio de la colocación de bolsas plásticas cubriendo la superficie del espécimen, colocando tapas plásticas, o bien cuando las condiciones son muy adversas (altas temperaturas o climas muy secos), se puede proteger colocando arena húmeda o arpillera húmeda alrededor del molde. Para esta etapa se recomienda utilizar un higrómetro junto a los especímenes de concreto recién moldeados, para monitorear la temperatura durante este período.

Curado final indica lo siguiente:

El curado final es el que la norma clasifica de dos maneras: curado en campo o curado estándar. El curado en campo, se realiza para verificar cuándo retirar la formaleta, para determinar el momento en que se puede poner en uso la estructura, comparaciones con el curado estándar, entre otros.

El curado estándar es el que se realiza bajo las condiciones establecidas por la norma. En este caso, se debe mantener húmedo el espécimen en todo momento hasta que se realice el ensayo de compresión. Esta condición es la más sencilla de conseguir en el laboratorio, pues resulta más complejo establecer una relación entre la condición seca al aire y la resistencia. En este caso, la humedad relativa y la temperatura son las condiciones que se controlan. Cuando se requiere aceptar la resistencia del concreto en la obra, los especímenes deben ser curados de manera estándar. (González y Sandi, 2011, pp. 7-8)

2.4.2 Curado en Patio de almacenaje

Como parte de la investigación, se presenta el escenario de curado de los especímenes de concreto hidráulico en el patio de almacenaje; el objeto de ensayo es determinar el grado de afectación en la pérdida o ganancia de resistencia a la compresión mediante la ASTM C39.

Los cilindros de concretos asociados se acomodan a la par del tubo para asemejar las mismas condiciones.

Figura 3

Cilindros de concreto en patio de almacenaje



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.5 Técnicas para la medición de la resistencia del concreto

2.5.1 Métodos destructivos

Durante este procedimiento, se debe contar con los equipos de seguridad necesarios para realizar las pruebas de resistencia a la compresión uniaxial, parte de estos equipos son los lentes, casco, guantes y zapatos de seguridad, con el fin de salvaguardar la integridad del personal que ejecuta la prueba; ya que se puede llegar a sufrir severos daños a la integridad humana de no acatar estas disposiciones.

Figura 4

Equipo de protección personal



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción, s. f., p. 5.

2.5.1.1 Método de resistencia a compresión. La resistencia a la compresión se explica de la siguiente manera:

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm^2 , MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada f'_c para una estructura determinada.

Los resultados de las pruebas de resistencia se obtienen a partir de la elaboración de cilindros, se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, permitiendo programar las

operaciones de construcción, tales como remoción de formaletas o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura.

Los cilindros sometidos a ensayo de aceptación y control de calidad, se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en probetas curadas de manera estándar según la norma ASTM C31 Práctica Estándar para Elaborar y Curar Probetas de Ensayo de Concreto en Campo.

Para estimar la resistencia del concreto en sitio, la norma ASTM C31 fórmula procedimientos para las pruebas de curado en campo. Las probetas cilíndricas se someten a ensayo de acuerdo con la ASTM C39, Método Estándar de Prueba de Resistencia a la Compresión de Probetas Cilíndricas de Concreto.

Un resultado de prueba es el promedio de por lo menos 2 pruebas de resistencia curadas de manera estándar o convencional, elaboradas con la misma muestra de concreto, y sometidas a ensayo a la misma edad. (Cemex, 2019, párrs. 1-6)

Es muy importante tomar en cuenta que los resultados de resistencia a la compresión se encuentran asociados a la máquina de compresión, debido a que se debe encontrar en condiciones óptimas y con los debidos certificados de calibración para obtener resultados confiables y certeros.

Figura 5

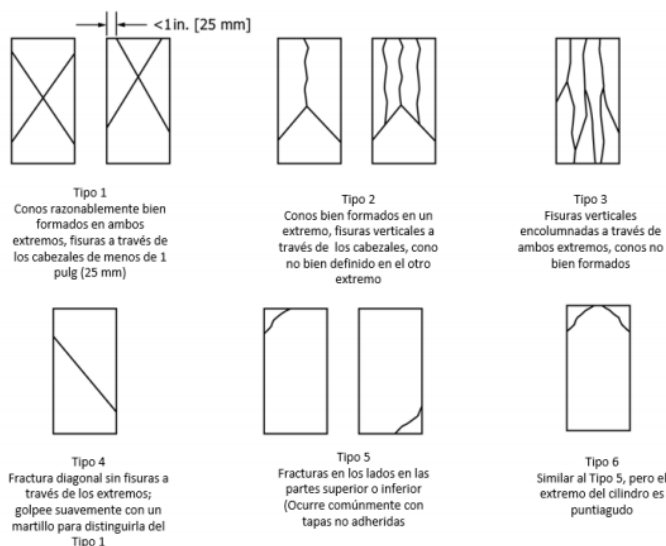
Máquina automática ensayo compresión uniaxial



Fuente: Test Mak, s. f.

Parte del resultado final de la resistencia a la compresión uniaxial es la determinación del tipo de fractura que puede presentar el cilindro, puesto que existen diversas formas las cuales se detallan en la siguiente imagen.

Figura 6
Tipos de fractura



Nota. De *Norma Técnica Guatemalteca*, por Comisión Guatemalteca de Normas, 2017.

2.5.1.2 Método extracción de núcleos de concreto. Este método permite realizar una evaluación al concreto hidráulico a partir de la extracción de núcleos a la estructura que se encuentre en análisis o que presente un criterio de duda en el resultado de compresión del cilindro de concreto, como parte de su procedimiento de análisis y extracción, se destaca:

En este ensayo se aplica a la extracción de núcleos cilíndricos de concreto obtenidos a partir de estructuras existentes. Este núcleo se ensaya a compresión para determinar la resistencia del concreto de la estructura...

... La resistencia de los núcleos de concreto depende del grado de humedad al que está sometido, de la orientación hacia el cual fue extraído, de la ubicación del núcleo. En general no existe una relación estandarizada entre la resistencia del núcleo de concreto y la resistencia de los especímenes curados bajo el método estándar...

... En la zona donde será extraído el núcleo se procede a determinar la distribución de acero de refuerzo, de manera que en el momento de la perforación no se atraviese

ninguna barra. El taladro se coloca de manera perpendicular a la superficie donde será extraído el núcleo y se inicia el proceso de corte. Una vez extraído el núcleo, este se mide y se registra cualquier particularidad que esté presente.

... en el laboratorio se procede a cortar los extremos del núcleo de manera que su longitud cumpla con una relación 2 a 1 con el diámetro. El espécimen se acondiciona por cinco días antes de que se realice el ensayo a compresión. (Lanamme, s. f., p. 1)

Figura 7

Extracción de núcleos de concreto



Fuente: Moreno, 2015.

2.5.1.3. Método de ensayo prueba de tracción indirecta. Este método de ensayo se presenta bajo la norma ASTM C496 “Método de prueba estándar para dividir la resistencia a la tracción de probetas cilíndricas de concreto”, en este ensayo se define la resistencia a tracción de la siguiente forma:

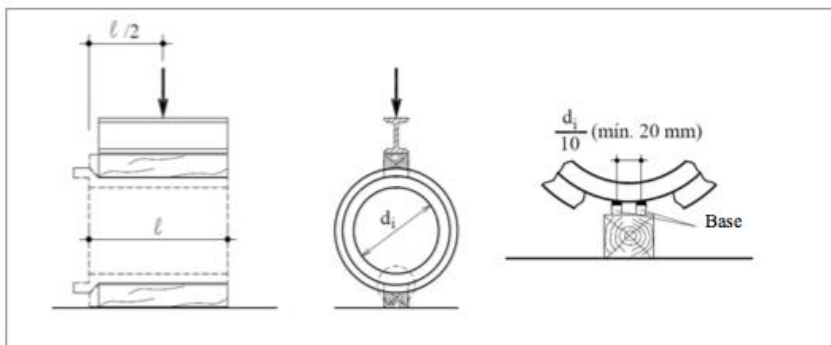
La resistencia a la tracción por rotura es generalmente mayor que la resistencia a la tracción directa y menor que la resistencia a la flexión (módulo de ruptura).

La resistencia a la tracción por división se utiliza en el diseño de elementos estructurales de hormigón ligero para evaluar la resistencia a la corte proporcionada por el hormigón y para determinar la longitud de desarrollo del refuerzo. (ASTM C496 International, 2017, párrs. 3-4)

Figura 8*Ensayo tracción indirecta*

Fuente: Amador, s. f.

2.5.1.4. Método de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas. Este ensayo se ejecuta bajo la norma ASTM C497, y se presenta como un ensayo destructivo debido a que, a la hora de realizarlo, se da un aplastamiento al tubo, se le generan diferentes tipos de grietas lo cual provoca que la tubería no se vuelva a utilizar.

Figura 9*Ensayo de aplastamiento en la tubería*

Fuente: Akasaki, 2016.

Sobre una parte del procedimiento que describe este tipo de ensayo, y el cual se ejecuta en el LanammeUCR se menciona lo siguiente:

Este ensayo permite determinar la resistencia a la compresión de tuberías de concreto de hasta 210 cm de diámetro. Se reporta la resistencia a la compresión, para tubería reforzada, también se reporta la carga la cual produce una grieta de 0,3 mm de espesor y 30 cm de largo. Se coloca la tubería sobre un apoyo en toda la longitud el cual tiene un canaleta con dos franjas de apoyo sobre una base rígida. Se coloca en el extremo superior otro apoyo en toda la longitud efectiva de la tubería. Por medio de una viga de carga rígida y de un gato hidráulico se aplica la carga al espécimen hasta generar la carga de grieta de 0,3 mm en la tubería con refuerzo y hasta la falla en los casos con y sin refuerzo. Este método de ensayo permite obtener la información necesaria para clasificar tuberías de concreto reforzado y no reforzado según las especificaciones nacionales INTE 16-11-01-08 e INTE 16-11-04-08. (LanammeUCR, s. f.)

2.5.1.5. Prueba de flexión. Este ensayo se ejecuta bajo la norma ASTM C78 “Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión de concreto (utilizando una viga simple con carga en el tercer punto), lo especificado en la norma describe que:

Este método de ensayo se utiliza para determinar la resistencia a la flexión de las muestras preparadas y curadas de acuerdo con los métodos de ensayo y prácticas estandarizadas. Los resultados se calculan y se reportan como el módulo de ruptura. Para el mismo tamaño de la muestra, la resistencia determinada variará si hay diferencias en la preparación de la muestra, el procedimiento de curado, la condición de humedad en el momento de la prueba y si la viga se moldeó o se aserró a su tamaño. El módulo de ruptura medido generalmente aumenta a medida que disminuye el tamaño de la muestra...

... Los resultados de este método de ensayo podrán utilizarse para determinar el cumplimiento de las especificaciones o como base para la proporción de mezclas, la evaluación de la uniformidad de la mezcla y el control de las operaciones de colocación mediante vigas aserrados. Se utiliza principalmente en pruebas de concreto para la construcción de losas y pavimentos. (ASTM C78 International, 2021, párrs. 1, 3)

Figura 10

Ensayo a flexión de vigas de concreto



Nota. De *ASTM C78 Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón*, por Instron, s. f.

<https://bit.ly/3yVTeje>

2.5.2. Métodos no destructivos

2.5.2.1 Esclerómetro. Es uno de los ensayos no destructivos que comúnmente se utilizan para determinar la resistencia del concreto hidráulico, es un equipo que se vuelve muy práctico por sus condiciones de tamaño y uso, se basa en la norma ASTM C805 “Método de prueba estándar para el número de rebote de hormigón endurecido”, este método se describe como:

Este método de ensayo es aplicable para evaluar la uniformidad del concreto, para delinear las variaciones en la calidad del concreto a lo largo de una estructura y para estimar la resistencia si se desarrolla una correlación... Para una mezcla de concreto dada, el número de rebote se ve afectado por factores como el contenido de humedad de la superficie de ensayo, el tipo de material de forma o el tipo de acabado utilizado en la construcción de la superficie que se va a ensayar, la distancia vertical desde el fondo de una colocación de concreto y la profundidad de carbonatación. Estos factores deben ser considerados en la interpretación de los números de rebote.

Diferentes instrumentos del mismo diseño nominal pueden dar números de rebote que difieren de una a tres unidades. Por lo tanto, las pruebas deben hacerse con el mismo instrumento con el fin de comparar los resultados. Si se va a utilizar más de un instrumento,

realice pruebas comparativas en una gama de superficies típicas de concreto para determinar la magnitud de las diferencias que cabe esperar en las lecturas de los diferentes instrumentos.

Las relaciones entre el número de rebotes y la resistencia del hormigón proporcionadas por los fabricantes de instrumentos se utilizarán únicamente para proporcionar indicaciones de resistencia relativa del concreto en diferentes lugares de una estructura. Para utilizar este método de ensayo para estimar la resistencia, es necesario establecer una relación entre la resistencia y el número de rebote para un concreto y un aparato dados. Establecer la relación correlacionando los números de rebote medidos en la estructura con las fuerzas medidas de los núcleos tomados de las ubicaciones correspondientes. (ASTM C805 International, 2018, párrs. 2-4)

Figura 11
Esclerómetro



Nota. De *Los martillos de ensayos originales para evaluar la resistencia a la compresión y la homogeneidad*, por Proceq, s. f. <https://bit.ly/2VtZjG4>

2.5.2.2 Ensayo de penetración. Como parte del proceso de análisis de la resistencia del concreto, se detalla el procedimiento a continuación:

Este método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia del concreto endurecido a la penetración por una sonda o aguja de acero. Este método es aplicable para la evaluación de la uniformidad del concreto y para delimitar zonas de baja calidad o de concreto deteriorado en las estructuras. Como se indica en la norma ASTM C803 el ensayo consiste en un dispositivo impulsor accionado con pólvora que suministra una cantidad

conocida de energía a una sonda o aguja de acero. La resistencia a la penetración se determina in situ, ya sea con la medición de las longitudes expuestas de las sondas que han sido introducidas en el concreto o por la medición de la profundidad del orificio creado por la penetración de la sonda o aguja de acero. Para estimar la resistencia del concreto en la estructura aplicando este método, es necesario establecer una correlación entre la resistencia a la penetración del concreto utilizando un aparato determinado y la resistencia a compresión del concreto obtenido de núcleos extraídos de la estructura o de especímenes elaborados en la obra. También se debe considerar que para una mezcla de concreto determinada, los resultados del ensayo pueden ser afectados por la rugosidad de la superficie formada por el tipo de formaleta (Madera o metal), la dureza y el tipo del agregado utilizado. En la norma ASTM C803 se describen el equipo que consiste en el dispositivo impulsor, sonda de acero, aguja de acero, instrumento de medición y el dispositivo de colocación. (ICCG, 2018, p. 3)

Figura 12
Sistema de medición sonda Windsor



Fuente: Cotecno, 2020.

2.5.2.3 Equipo de ultrasonido. El método de análisis por ultrasonido tiene como base un fenómeno físico que es el medio de propagación de ondas en un ambiente material, tal hecho puede llegar a tornarse complejo cuando hay medios de propagación heterogéneos, este proyecto buscó, de forma investigativa, analizar las tuberías de concreto C76 de 1200 mm de diámetro y realizar

las comparativas de resultados presentes en el concreto entre diversos equipos y métodos para desarrollar un protocolo, así como determinar la resistencia a la compresión en tuberías de concreto, utilizando la técnica de ultrasonido.

Este equipo trabaja por medio de emisión de pulsos ultrasónicos que permiten ubicar fisuras y uniformidades en el concreto, logrando identificar oportunamente la necesidad de reparación en lugares que se requieran, además, es un método muy práctico para realizar los análisis de calidad del concreto hidráulico por medio de esta técnica.

Figura 13

Equipo de ultrasonido



Nota. De *Medidor ultrasónico portátil Pundit Lab+*, por Dirimpex, s. f. <https://bit.ly/3hfGUVa>

2.5.3 Ventajas que presentan los equipos de ultrasonido

Como parte de las ventajas presentes mediante la técnica de VPU (Velocidad Pulso Ultrasónico), se logra determinar que es una herramienta muy útil para definir la calidad del concreto endurecido. Es un método que, día a día, ha ido incrementando sus aplicaciones en el campo de la tecnología del concreto como una alternativa de ensayo no destructivo, además, bajo la norma ASTM C597, consigna la metodología y exigencias para aplicar el método del pulso ultrasónico. La reglamentación británica también ha publicado algunas recomendaciones para medir la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto, como parte de las ventajas de utilizar VPU están:

- 1) Cualquiera que sea el medio de propagación de las ondas, se necesita una única medida para obtener un valor representativo. Es decir, la dispersión de este ensayo resulta muy

baja. Es un ensayo con elevada confiabilidad y fácil de realizar, garantiza repetitividad y versatilidad.

- 2) Varios de los autores consideran que, aunque este ensayo no permite evaluar directamente la resistencia del concreto, correlacionando las medidas ultrasónicas con la resistencia a partir de una combinación del método con calibración en laboratorio, podría ofrecerse una estimación de la resistencia característica del concreto ensayado con una precisión de $\pm 20\%$.
- 3) El método se basa en un fenómeno físico reconocido, el cual efectúa la propagación de ondas en un medio material, puede tornarse complejo cuando el medio de propagación es heterogéneo. Este hecho implica diferentes fases que componen al material, con diferentes propiedades elásticas relativas a la propagación de ondas, heterogeneidad que representa una limitación en el conocimiento de la forma del frente de onda, así como también en el camino seguido por ella.
- 4) Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de ondas, y la velocidad de estas depende de las propiedades elásticas del medio en que se propagan, de manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, es posible estimar las propiedades elásticas del medio, las cuales se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material. (Quintana, 2016, p. 33)

2.5.4 Desventajas y problemas que presentan los equipos de ultrasonido

Los equipos de ultrasonido son equipos muy sofisticados, pero pueden presentar problemas que afectan o alteran las lecturas de medición que emiten los ultrasonidos, se debe tener un importante y adecuado cuidado a la hora de realizar las mediciones, dentro de los factores que afectan las mediciones se dan:

- 1) En el campo de actuación del pulso que emiten los transductores de ultrasonido tienen forma cónica, el eco se recibe como respuesta a la reflexión del sonido e indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra en el cono acústico y en ningún momento especifica la localización angular del mismo lo que provoca una incertidumbre angular en la medida de ultrasonido.

- 2) La energía acústica que se refleja por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie, para la obtención de una reflexión difusa el tamaño de las irregularidades debe ser comparable a la longitud de onda del ultrasonido incidente.
- 3) El factor ambiental influye en las ondas de ultrasonido debido a que se mueven por medio de un material que es el aire, la densidad del aire depende de la temperatura afectando de manera considerable la velocidad de propagación de la onda, en términos resumidos la temperatura afecta la capacidad de detección, se debe tomar en cuenta los valores de temperatura ambiente por medio de un termómetro debidamente calibrado y certificado para tener un control más preciso del factor ambiental cuando se ejecutan las pruebas.
- 4) Uno de los factores más comunes son los que presentan falsos ecos, se dan en el caso de que la onda del transductor se refleje en varias superficies antes que la onda vuelva a incidir en el transductor. (Rodríguez y Aboune, 2015, p. 2-3)

2.5.5 Equipo ultrasonido Pundit PL-200 PE

El equipo de ultrasonido pulso eco presenta tecnología de punta que, dentro de sus principales características, ayudan a efectuar mediciones en donde las condiciones de acceso son muy difíciles, parte de lo que menciona el manual de funcionamiento de este equipo se describe:

Este método se realiza a través de la propagación de pulsos de ondas longitudinales ultrasónicas en el concreto que permiten determinar las propiedades del concreto hidráulico, este equipo de medición determina la calidad del concreto, utilizando como medio el análisis de forma por medio de las ondas y parámetros de transmisión junto con el tiempo de tránsito de las ondas se determina la uniformidad del concreto.

El equipo cuenta con un transductor pulso eco el cual se debe de comprobar para el correcto funcionamiento del equipo, para esto se cuenta con una placa de calibración y comprobación, cuando se realiza la comprobación del equipo se muestra un gráfico el cual indica el par de transductores que serán comprobados (se encuentran resaltados en color azul) luego se procede a presionar el equipo de ensayo de contacto Pulso Eco como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 14

Equipo de ultrasonido Pundit PL-200 PE



Nota. De *Manual equipo Pundit PL-200 PE*, por LGC Ingeniería Pavimentos SA, 2020.

Cuando el par de transductores se torna de color verde es una señal de que la calibración del par de transductores se realizó de manera correcta y exitosa, este procedimiento se debe realizar para cada par de transductores que presenta el equipo, si en alguna parte de la comprobación de los transductores falla el test de lectura se puede repetir antes de continuar para obtener datos precisos y certeros. (Manual Proceq Pundit PL-200 PE, 2015, p. 8)

El equipo de ultrasonido pulso eco cuenta con dos sistemas de análisis que son el método de análisis de escaneo A y método de análisis de escaneo B, en el presente trabajo de investigación se indica el funcionamiento de los dos métodos, pero no serán contemplados, debido a que únicamente se busca la velocidad de pulso (m/s) y el tiempo de transmisión de la onda (μ s) medido, utilizando el equipo de Pulso Eco.

Los dos métodos de funcionamiento mencionados son descritos de la siguiente manera:

2.5.5.1 Método y análisis Escaneo A. Este es uno de los métodos de análisis y escaneo que brinda el equipo de ultrasonido, se define como:

Este método de análisis se utiliza cuando se necesita una lectura rápida para un espesor de losa que se desee conocer, la función de habilitar puerta en este método de escaneo lo que busca es el eco correcto en una sección específica, se usan modos de medición, distancia, velocidad de pulso y exploración de área, otro aspecto a considerar y

con el que cuenta el equipo son los filtros los cuales permiten filtrar los ruidos no deseados esto para identificar el eco correcto más fácilmente, la desactivación de los filtros permiten ver los datos sin procesar, para la exploración del área que se desee comprobar de deben ejecutar cuadrículas y espaciamientos en los sentidos X y Y para luego realizar el ajuste de la cantidad de mediciones en la dirección que se esté analizando el resultado. (Manual Proceq Pundit PL-200 PE, 2015, pp. 8-9)

2.5.5.2 Método y análisis de Escaneo B. Como se describió en el método de Escaneo A, el equipo cuenta con otro sistema de escaneo, el de tipo B que se describe a continuación:

Dentro de los elementos de mando de pantalla de medición se debe de ajustar el voltaje del transmisor, para obtener mejores resultados iniciales se debe de iniciar con voltajes bajos del transmisor y un ajuste bajo de ganancias, aumentar el voltaje hasta obtener un nivel de señal estable, las velocidades de pulso típicas en ondas transversales para concreto hidráulico se encuentran en el rango de 2000 a 2500 m/s, el modo de medición del equipo es el tiempo entre el transmisor y el receptor, luego se debe de introducir la velocidad de pulso de forma automática para obtener una estimación, el resultado obtenido es el espesor de la losa o la distancia al objeto ensayado.

El tema principal como objeto de estudio es la velocidad de pulso que se puede generar en el concreto por medio del Pundit PL-200PE, para realizar este análisis debemos de obtener una medición de espesor del espécimen, el resultado obtenido será el tiempo de transmisión y la velocidad de pulso, para la evaluación del espesor de revestimiento en túneles se debe de realizar una cuadrícula de medición de 80 cm. (Manual Proceq Pundit PL-200 PE, 2015, pp. 9-12)

2.5.5.3 Medición con Pundit PL-200 PE. Parte del procedimiento de medición con este equipo, se resume en los siguientes párrafos:

El equipo permite realizar la medición con irregularidades en la superficie de hasta 7 mm por lo cual no es necesario alisar la superficie. Al realizar la calibración del equipo se pueden obtener resultados más exactos, esto se obtiene realizado una medición de velocidad de pulso en alguna sección de la estructura con un espesor conocido y alternativamente se puede realizar la estimación automática de velocidad de pulso también como objeto de calibración.

Los transductores del equipo Pulso Eco emite ondas transversales a una frecuencia de 50 kHz. Dependiendo de la velocidad de pulso, varia la longitud de onda quedando a disposición de la velocidad de pulso el reconocimiento o no reconocimiento de partículas, ya que podrían llegar a ser invisibles.

El equipo permite como objeto de medición penetraciones máximas o mínimas que dependen de la calidad del concreto y de la cantidad de acero de refuerzo que se presente en la muestra de análisis, típicamente el rango de medición máximo va desde los 50 cm hasta los 100 cm, por lo general la dimensión lateral mínima debe ser dos veces el espesor del objeto, esto es necesario debido a que si el objeto de análisis es muy estrecho las reflexiones de las paredes laterales interfieren en el eco de la pared posterior. (Manual Proceq Pundit PL-200 PE, 2015, p. 16)

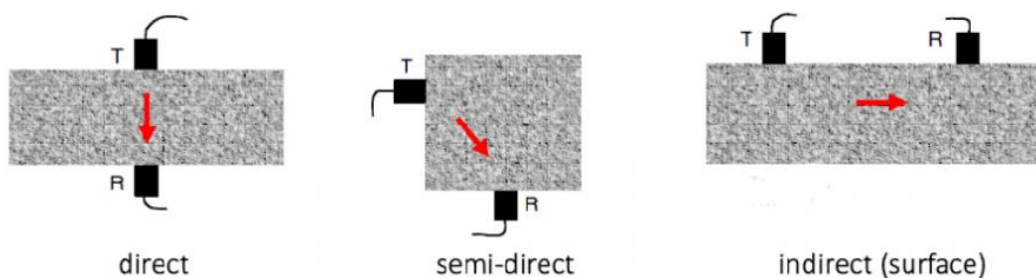
2.5.6 Medición con Pundit PL-200

Adicional al equipo de medición Pundit PL-200 PE, se cuenta con el equipo de medición Pundit PL-200.

Este equipo a diferencia del PE, contiene un par de transductores que permiten la ejecución de pruebas de manera directa, semidirecta e indirecta.

Figura 15

Tipos de transmisión de ondas ultrasónicas



Nota. De *Pruebas ultrasónicas en hormigón*, por blogger Incosuma, 2017. <https://bit.ly/3zWjKu5>

De estos métodos de medición presentados en la figura 13, se destaca que el método de transmisión directa es el método que ayuda al proceso de esta investigación a obtener una mayor transferencia de energía por el tipo de método, por lo cual, se obtienen resultados más satisfactorios en comparación con los demás métodos descritos los cuales son de manera semi directa e indirecta.

Parte del procedimiento de medición con el equipo Pundit PL-200 se describe de la siguiente manera:

Este equipo contiene características muy similares a las del Pundit PL-200PE la diferencia radica en que el medio de medición se realiza conectando un par de transductores que contiene el equipo con una frecuencia de 54 kHz cada uno, el equipo por medio de este método permite el uso de transductores no estandarizados de hasta 500 kHz.

El medio para realizar la comprobación del correcto funcionamiento del equipo se efectúa por medio de un bloque de calibración que contiene el equipo de fábrica, se colocan los dos transductores necesarios y el bloque de calibración en medio de los transductores, inmediatamente se procede a introducir en el equipo el valor de calibración ($t_{cal}:25,4\mu s$) luego presionar firmemente ambos transductores contra el bloque de calibración continuando dando inicio al incono de puesta a cero del equipo, si la calibración es exitosa se visualizará en la pantalla un mensaje que indica “Zeroig succeeded) que significa puesta a cero exitosa de este modo se realiza la correcta calibración del equipo. (Manual Proceq Pundit PL-200, 2014, p. 8, 9)

Figura 16

Calibración de transductores Proceq Pundit PL-200



Fuente: Elaboración propia, 2021.

El rango de medición que proporciona este equipo es aproximadamente 800 μs , que corresponde a una longitud de recorrido de hasta 3 m en concreto normal; para realizar

mediciones de largo alcance, se recomienda utilizar una resolución de medición máxima de 1 μ s.

En la frecuencia de repetición del pulso se pueden seleccionar de diferentes formas desde 5 hasta 40 Hz (mediciones por segundo).

Se debe de ajustar las unidades del equipo a unidades métricas y seleccionar la unidad de amplitud en decibelios para la obtención de la señal recibida, es muy importante seleccionar la unidad para correlaciones de resistencia a la compresión del equipo y para la obtención del resultados, se debe de seleccionar el tiempo de transmisión de velocidad de pulso, la distancia de los transductores de debe de ajustar al objeto de ensayo, una vez ejecutadas las pruebas se procede a realizar la anotación de los resultados en una tabla donde tenemos el número de muestra, la fecha de moldeo, la fecha de ensayo la longitud del elemento en estudio el tiempo medido por el equipo en (μ s) y la velocidad en (m/s). (Manual Proceq Pundit PL-200, 2014, pp. 8-9)

Existe una relación directa entre los resultados de μ s y m/s debido a que, si se obtienen tiempos (μ s) mayores, habrá velocidades menores, lo cual indica que el concreto se encuentra menos homogéneo que uno que presente tiempos menores, por ende, las velocidades son mayores; el trabajo de investigación realizó las comparativas de medición desde los resultados obtenidos de los diferentes ensayos, entre los cuales se puede mencionar: ensayo a la compresión simple en cilindros y núcleos de concreto, ensayo de las 3 aristas, medición Pundit PL-200 PE y mediciones con Pundit PL-200, es muy importante señalar que se efectuaron mediciones en condiciones de curado distintas de las cuales, es decir:

- ✓ Curado en patio de almacenaje.
- ✓ Curado en piletas con condiciones controladas.

El análisis de resultados aplicados a estos dos tipos de escenarios busca verificar la posible afectación de la resistencia a compresión.

Este tipo de equipo produce ondas de tipo P, en el presente caso, para la determinación del módulo de elasticidad del concreto, era necesaria la obtención de este tipo de onda.

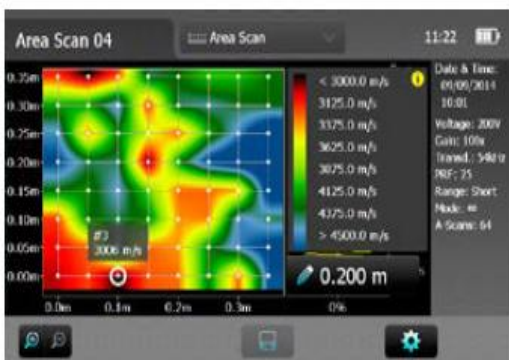
Como parte de las indicaciones en los modos de medición del equipo, se indica lo siguiente: La detección de la onda localiza en inicio del Eco de onda transversal que es percibida por un débil componente de onda P el cual es detectado por medio de un modo automático de un disparo, para este ensayo se requiere que el par de transductores se encuentren

debidamente alineados para obtener una señal intensa y obtener excelentes resultados caso contrario si el par de transductores se encuentran desalineados se obtienen señales débiles que afectan la veracidad de los resultados, como medio de ensayo se necesita la utilización de un gel lubricante para el acoplamiento especial de las ondas transversales de lo contrario si no se utiliza el gel las ondas transversales no podrán ser transmitidas en el espécimen que se encuentre bajo análisis. (Manual Proceq Pundit PL-200, 2014, p. 14)

En la figura 17, se muestran las clasificaciones del concreto según su velocidad ultrasónica.

Figura 17

Parámetros de evaluación calidad ultrasónica



> 4'500 m/s: Excelente
 3'500 – 4'500 m/s: Buena
 3'000 – 3'500 m/s: Mediana
 < 3'000 m/s: Dudosa

Fuente: Manual equipo Pundit PL-200 PE, 2015.

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

Este apartado detalla, los ensayos necesarios para determinar la resistencia del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión bajo la norma ASTM C39, y la utilización de la técnica de ultrasonido bajo la norma ASTM C597.

Se desarrollaron dos tipos de escenarios: los que constan de la elaboración cilindros de concreto que se curan bajo condiciones controladas, y los cilindros que se curan bajo condiciones reales en patios de almacenaje. Estos tipos de escenarios permitieron establecer de una correlación entre la resistencia a la compresión uniaxial, ultrasonido, ensayo de las tres aristas y la extracción y compresión de núcleos de concreto.

3.1. Enfoque y método de investigación

La propuesta del trabajo se determinó de manera evaluativa y presentó un carácter cuantitativo, este permitió correlacionar los diferentes resultados a fin de desarrollar un protocolo de evaluación en tuberías elaboradas con concretos secos, a través de la técnica de ultrasonido, con equipos de alta generación.

3.2. Enfoque cuantitativo

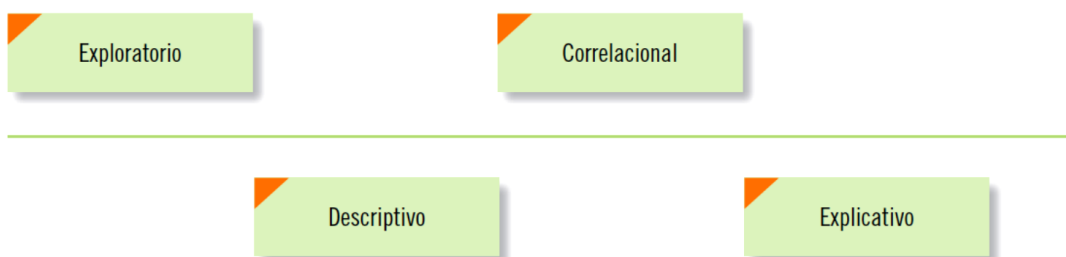
La investigación del proyecto fue de carácter cuantitativo, debido a que, para alcanzar los objetivos planteados, se debían de realizar una serie de pruebas experimentales y recopilación de datos numéricos.

Se obtuvieron resultados por medio de la utilización de diferentes equipos para la medición de la resistencia del concreto hidráulico, con el fin de evaluar el desempeño de los concretos secos para la elaboración de tuberías tipo C76 con un diámetro de 1200 mm de tipo hincado, con la finalidad de lograr desarrollar un protocolo de evaluación utilizando la técnica de ultrasonido.

El enfoque cuantitativo presenta cuatro alcances distintos, se presentan como recurso de Metodología de la Investigación 5^{ta} Edición, y se presenta en la siguiente figura:

Figura 18

Alcances que puede tener un estudio cuantitativo



Fuente: Sampieri et al., 2010.

El alcance del proyecto se definió como exploratorio, debido a que el objetivo es la determinación de la resistencia del concreto en tuberías de concreto C76 en diámetro de 1200, tipo V, por medio de la técnica de ultrasonido, es un tema que cuenta con pocos estudios relacionados en el país.

3.3. Técnicas de muestreo

Como parte de las técnicas de muestreo a implementar, se moldearon y curaron los cilindros de concreto bajo la norma ASTM C31, posterior a la ejecución de la norma ASTM C39 de los cilindros de concreto, se ejecutó el ensayo de VPU, a los cilindros que contaran con la edad de trabajo requerida (1, 7 y 28 días).

El ensayo de las tres aristas bajo la norma ASTM C497 se realizó de manera supeditada a la Empresa PC, debido al alto costo que implicaba el ensayo. Se pretendía el análisis de dos especímenes para este tipo de ensayo, anterior a este se ejecutó el ultrasonido a través del par de transductores y el Pulso Eco, para la determinación de su velocidad ultrasónica, seguidamente, se ejecutó el ensayo ASTM C497. Seguido del ensayo en la tubería, se procedió con la extracción de diez núcleos de concreto utilizando una broca con un diámetro de 50,8 mm, y cuatro núcleos de concreto de 63,5 mm en la parte central de la tubería, para la ejecución de los ensayos ASTM C597 y ASTM 39.

3.3.1 Población

En este apartado, se utilizaron 2 escenarios para determinar el grado de variabilidad que puede presentar el concreto en condiciones de curado distintas. Como parte de esas condiciones

de curado, se consideró la condición de curado en patio y la condición de curado en condiciones controladas.

Como parte de las condiciones de curado, se moldearon ocho cilindros de concreto, de los cuales cuatro se instalaron en el mismo sector en donde se ubica la tubería, con el fin de optar por las mismas condiciones de curado; por último, cuatro se sometieron al proceso de inmersión en cámaras de curado para obtener las condiciones idóneas de curado.

Como procedimiento de análisis, se ensayaron 80 cilindros de concreto y 14 núcleos que fueron obtenidos después de efectuado el ensayo de tres aristas. La extracción de núcleos se distribuyó en el centro de la tubería debido al alto contenido de acero de refuerzo que se presenta en doble malla, lo que dificulta la extracción de los núcleos al tubo. Todos los especímenes (cilindros de concreto) se analizaron antes del ensayo de compresión, por medio de VPU, las edades son, 1 día, 7 días y 28 días, en donde el concreto a 28 días alcanza la resistencia más elevada. Adicional a los cilindros se analizó una tubería por medio de ASTM C597, utilizando el par de transductores y la tecnología pulso eco.

Figura 19
Cilindros de concreto



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.3.2 Muestra

Como parte de la investigación, las muestras se mantuvieron constantes y no hubo una variación en la población, el trabajo buscó la correlación entre los siguientes ensayos:

- Velocidad de Pulso Ultrasónico ASTM C597.
- Resistencia a la compresión ASTM C39.
- Ensayo de las tres aristas ASTM C497.
- Obtención de núcleos ASTM C42.

Como parte de los análisis, también se indagó por el grado de afectación que pudieran presentar las diferentes condiciones de curado, las cuales constaban de condiciones normadas y condiciones ambientales en patio.

Se cuenta con 80 especímenes cilíndricos de concreto y 14 núcleos de concreto, que se obtuvieron a partir de los diferentes muestreos a tuberías de concreto C76 clase V de 1200 mm de tipo hincado, debidamente seleccionados e identificados para la ejecución de los ensayos. La cantidad de pruebas ejecutadas cumple con la necesidad de resultados probabilísticos para desarrollar el protocolo de evaluación.

3.3.3 Confiabilidad de la muestra

Como parte de la cantidad de especímenes de análisis, se determina la confiabilidad de los resultados para la seguridad de los datos obtenidos en el trabajo investigativo.

Para obtener una confiabilidad de los resultados, se procedió con el análisis del nivel de confianza, el cual debió ser mayor al 95%.

La confiabilidad de la muestra depende del margen de error, lo cual presenta un margen permisible en cuanto a la población de análisis en estudio, ese margen determina una seguridad estadística en cuanto a las pruebas, a fin de asegurar la confiabilidad de las pruebas, se definieron variables importantes en la investigación como:

- Margen de error: 1,00%.
- Nivel de confianza: 99,00%.
- Población: 94 muestras.

Estos valores se evalúan considerando la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$n = \frac{N * Z^2 * p * (1 - p)}{(N - 1)e^2 + Z^2 * p * (1 - p)}$$

Donde:

- n: tamaño de la población requerida.
- N: tamaño de la población a estudiar.
- Z: valor obtenido de la tabla de distribución normal según el nivel de confianza.
- p: desviación estándar (al no conocerse en el análisis, este permite considerar un 50% para la desviación).
- e: porcentaje de error.

Obtenidas las variables, se calcula para:

- N= 94
- Z= 2,585 para un 99% de confianza
- p= 0,5%
- e= 1%

$$n = \frac{94 * 2,585^2 * 0,5 * (1 - 0,5)}{(94 - 1)0,01^2 + 2,585^2 * 0,5 * (1 - 0,5)} = \mathbf{93}$$

El resultado del análisis para “n” indicó que era preciso obtener una población mínima requerida de 93 muestras para lograr un nivel de confianza de un 99%, según lo cual, el número planteado de muestras para el presente análisis cumplía con lo requerido.

En la tabla 3 se indica la matriz de ensayos requeridos:

Tabla 3
Matriz de ensayos

Identificación de tubería 1200 mm tipo C76 Clase V	Cantidad de cilindros de 15 cm x 30 cm				Ensayos a realizar (cilindros)	Ensayos a efectuar (Tubería de concreto 28 días)
	Curado en patio de almacenaje	Edad de ensayos	Curado en piletas controladas	Edad de ensayos (días)		
270	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
273	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
275	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
281	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
282	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
292	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
294	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	Ultrasonido transductores Ultrasonido Pulso Eco Ensayo 3 aristas Núcleos de concreto Resistencia a la compresión
297	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
301	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -
302	4	1,7,28	4	1,7,28	Ultrasonido transductores Resistencia a la compresión	- - -

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La tabla anterior contiene la distribución de muestreos y la cantidad de especímenes a analizar, estos presentaban edades de ensayos a 1, 7 y 28 días, respectivamente.

Se analizaron diez tubos, para cada uno de ellos se obtuvieron 4 cilindros de concreto utilizando condiciones de curado controladas, y cuatro cilindros de concreto para curado en patio de almacenaje.

Adicional a los cilindros y supeditados a las necesidades de la empresa PC, se propusieron dos tubos para ejecutar un proceso más detallado de las pruebas mencionadas en la tabla 6, que constaban de:

- ✓ Resistencia a compresión de cilindros bajo condiciones normadas ASTM C39
- ✓ Resistencia a la compresión de cilindros curados en condiciones ambientales, patio
- ✓ Ultrasonido mediante transductores ASTM C597
- ✓ Ultrasonido Pulso Eco ASTM C597
- ✓ Ensayo de las tres aristas ASTM C497
- ✓ Obtención, ultrasonido y resistencia a la compresión de 14 núcleos de concreto obtenidos en la parte central de la tubería.

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Como parte de las técnicas e instrumentos para la recolección de datos del trabajo de investigación, se menciona el apoyo de la empresa LGC Ingeniería de Pavimentos, la cual facilitó el equipo de ultrasonido de la marca Proceq estilo Pundit PL 200 y PL 200 Pulso Eco para lograr determinar velocidades de onda.

Figura 20

Equipo de ultrasonido Proceq



Fuente: Manual Proceq LGC Ingeniería de Pavimentos, 2020.

Se contó con el apoyo de la empresa Productos de concreto (PC), la cual facilitó las instalaciones para los diferentes ensayos; además, cuenta con personal altamente calificado, esta institución se encuentra en busca de la innovación y la mejora continua, enfocada en la fabricación de elementos de concreto que cumplan con todos los requerimientos, como empresa se encuentran certificados bajo las normativas INTECO, que son reconocidas a nivel mundial.

Como parte de los equipos principales de apoyo para la ejecución de las pruebas, se destaca: el Consistómetro Vebe, Mesa Vibratoria de Moldeo de cilindros, Máquina de Resistencia a la Compresión de la marca Controls y la Máquina para la ejecución del ensayo de las tres aristas, etc.

Figura 21
Máquina de falla PC



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como parte del programa de ensayos de laboratorio a realizar, se adjunta el detalle con las normativas ASTM “American Society for Testing and Materials”, las cuales fueron de suma importancia para la ejecución de las pruebas y la obtención de resultados que garantizaran confiabilidad.

En la tabla 4 se detalla en orden la ejecución de los ensayos realizados.

Tabla 4*Plan de ensayos*

Ensayos a realizar	Normativa ASTM
Método de prueba estándar para determinar la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria	ASTM C1170
Práctica normalizada para la preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra	ASTM C31
Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través de concreto	ASTM C597
Método de ensayo para la resistencia la compresión de especímenes de concreto	ASTM C39
Métodos de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas	ASTM C497
Método de ensayo para la obtención de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto	ASTM C42

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.1. Método de prueba estándar para determinar la consistencia y densidad del concreto compactado con rodillo utilizando una mesa vibratoria (ASTM C1170)

Como parte de la determinación y consistencia del concreto compactado con rodillo se utiliza la mesa vibratoria proporcionada por la empresa PC, la cual presenta las siguientes características.

- Mesa Vibratoria.
- Frecuencia de 60 Hz.
- Sobrecarga de 9 kg.
- Temporizador de análisis de 15 s por capa (3 capas).

Figura 22
Consistómetro Vebe



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como indica la norma ASTM C1170, se describe el método como:

Este método de prueba se utiliza para determinar la consistencia del concreto utilizando una mesa vibratoria y una sobrecarga para determinar la densidad de la muestra de concreto consolidado. Este método de prueba es aplicable al concreto recién mezclado, preparado tanto en el laboratorio como en el campo, que tiene un tamaño máximo nominal de agregado de 50 mm o menos. Si el tamaño máximo nominal del agregado es mayor de 50 mm, el método de prueba es aplicable solo cuando se realiza en la fracción que pasa el tamiz de 50 mm.

Este método de ensayo, destinado a ser utilizado en ensayos de concreto compactado con rodillo, puede ser aplicable para ensayar otros tipos de concreto, tales como agregados tratados con cemento y mezclas similares al suelo cemento. (ASTM C1170 International, 2020, párr. 1)

Por medio de este proceso, se obtiene la densidad del concreto luego de realizar el método según lo indicado y aplicando la ecuación 2:

Ecuación 2

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde:

- ✓ d: Densidad.
- ✓ m: Masa.
- ✓ v: Volumen.

El volumen del molde utilizado es de 0.00888 m³.

Luego de realizar el moldeo en cada tubo, se procedió a pesar el material en una balanza, de esta forma se obtuvo la densidad del material.

Figura 23

Peso del material



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.2. Práctica estándar para la preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra (ASTM C31)

Como procedimiento de ensayo, se realizó el moldeo de cilindros de concreto seco de los cuales constan de cuatro probetas para efectuar la resistencia a la compresión ASTM C39 a 1, 7 y 28 días.

Figura 24

Moldeo de cilindros de concreto en mesa vibratoria



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se realizó el moldeo utilizando cilindros de 10 cm x 20 cm, a los cuales se les comprobó que cumplieran con lo establecido, se utilizó una mesa vibratoria a una frecuencia de 60 Hz.

Se hace el moldeo en 3 capas, cada una con un tiempo de 15s, con el fin de obtener el menor margen de error posible.

Seguidamente del proceso de moldeo, al siguiente día se procedió a determinar la nomenclatura establecida para la identificación de los especímenes de concreto, esta que se detalla de la siguiente manera:

- a) 273: Número de control consecutivo de fabricación de la tubería.

- b) N: Cilindro de concreto curado de forma normalizada según ASTM C 31.
- c) P: Cilindro de concreto curado en patio de almacenaje.
- d) N1, N2, N3, N4, P1, P2, P3, P4: Consecutivo después de la letra, identifica el día de ensayo del cilindro ejemplo: N1 a 1 día, N2 a 7 días, N3 y N4 a 28 días.

Figura 25

Identificación de especímenes de concreto



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Este método de identificación de la muestra garantizó que cada espécimen contara con una única identificación, para evitar una posible confusión de la población y muestra que en análisis. Luego de cumplir con el tiempo de curado, se procedió a desmoldear cada uno de los especímenes y se sometieron al proceso de inmersión, de forma tal que quedarán completamente cubiertos, esto con el objetivo de que cumplieran con el proceso establecido por la ASTM C 31 y se contara con condiciones de curado normado.

Figura 26*Cámara de curado del concreto*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como parte del proceso comparativo, se realizó el tipo de curado de los cilindros de concreto de la misma forma que el elemento estructural. Los cilindros se ubicaron a un costado de la tubería con el objetivo de establecer que el proceso de curado fuera lo más igualitario posible. Después de haber cumplido un lapso de 24 h en los moldes de 15 cm x 30 cm, según lo establecido en la ASTM C31, se procedió con el desmoldeo de los cilindros, y se trasladaron al patio de almacenaje con los cuidados respectivos.

Los cilindros de concreto se mantuvieron en el patio de almacenaje hasta que cumplieran con los días de ensayo establecidos; es decir, 1, 7 y 28 días, luego se trasladaron al laboratorio para ejecutar la prueba de VPU por medio de la ASTM C597 y la resistencia a la compresión mediante la ASTM C39.

Figura 27*Curado de cilindros en patio de almacenaje*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.3. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través de concreto (ASTM C597)

Parte fundamental del trabajo de investigación fue la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico en concretos secos.

Como parte del entendimiento del proceso para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico, es posible mencionar que:

La velocidad de pulso, V , de las ondas de tensión longitudinales en una masa de concreto está relacionada con sus propiedades elásticas y su densidad, de acuerdo con la siguiente relación:

Ecuación 3

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde:

- E : módulo de elasticidad
- μ : relación de poisson
- ρ : densidad

Este método de prueba es aplicable para evaluar la uniformidad y la calidad relativa del concreto. Es un método que indica la presencia de huecos y grietas, a su vez, evalúa la efectividad de las reparaciones de tales fisuras. También es aplicable para indicar cambios en las propiedades del concreto y en el levantamiento de estructuras, igualmente, estimar la severidad del deterioro o agrietamiento. Si se usa para monitorear cambios en la condición a lo largo del tiempo, las ubicaciones de prueba deben marcarse en la estructura para garantizar que las pruebas se repitan en las mismas posiciones.

El grado de saturación del concreto afecta la velocidad del pulso, y este factor debe ser considerado al evaluar los resultados de la prueba. Además, la velocidad del pulso en el concreto saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

La velocidad de pulso en el concreto saturado puede ser hasta un 5% más alta que en el concreto seco, además, es independiente de las dimensiones del objeto de prueba, siempre que las ondas reflejadas desde los límites no compliquen la determinación del tiempo de llegada del pulso transmitido directamente. La dimensión mínima del objeto de prueba debe exceder la longitud de onda de las vibraciones ultrasónicas.

Por ejemplo, la longitud de onda de las vibraciones es igual a la velocidad del pulso dividida por la frecuencia de las vibraciones. Por ejemplo, para una frecuencia de 54 kHz y una velocidad de pulso de 3500 m / s, la longitud de onda es $3500/54000 = 0,065$ m.

Según lo mencionado en el párrafo anterior, para el análisis de la tubería de concreto se obtuvieron velocidades de pulso promedio de 4513 m / s y se utilizaron los transductores de 54 kHz; aplicando la fórmula, dio como resultado $4513/54000 = 0,084$ m, lo cual cumple el criterio de la dimensión mínima de objeto de ensayo, ya que los cilindros cuentan con una longitud promedio de 0.303 m y los núcleos un promedio de 0.084 m para los de 50,8 mm de diámetro y de 0.126 m para los de 63,5 mm de diámetro.

La exactitud de la medición depende de la capacidad del operador para determinar con precisión la distancia entre los transductores y del equipo, para calcular con rigor el tiempo de tránsito del pulso. La intensidad de la señal recibida y el tiempo de tránsito medido se ven afectados por el acoplamiento de los transductores a las superficies del concreto. Se debe aplicar suficiente agente de acoplamiento y presión a los transductores para asegurar tiempos de tránsito estables. La

fuerza de la señal recibida también se ve afectada por la longitud del recorrido y por la presencia, así como el grado de agrietamiento o deterioro en el concreto ensayado.

Si las circunstancias lo justifican, se puede establecer una relación velocidad-resistencia (o velocidad-módulo) mediante la determinación de la velocidad del pulso y la resistencia a la compresión o módulo de elasticidad en varias muestras de concreto. Esta relación puede servir como base para la estimación de la resistencia o módulo de elasticidad, mediante pruebas adicionales de velocidad de pulso en ese concreto. Al consultar ACI 228.1R 4, se obtiene orientación sobre los procedimientos para desarrollar y utilizar dicha relación.

Los equipos de prueba disponibles en el momento de la investigación limitaron las longitudes de la trayectoria a aproximadamente 50 mm como mínimo, y 15 m como máximo; dependiendo, en parte, de la frecuencia e intensidad de la señal generada. El límite superior de la longitud del camino dependió de las condiciones de la superficie y de las características del concreto interior que se investigaba. Se podía usar un preamplificador en el transductor receptor para aumentar la longitud máxima de la ruta que por probar. La longitud máxima de la trayectoria se calculó por medio de transductores de frecuencias de resonancia relativamente bajas (20 a 30 kHz) a fin de minimizar la atenuación de la señal en el concreto. La frecuencia de resonancia del conjunto del transductor determinó la frecuencia de vibración en el concreto para las trayectorias más cortas, en las cuales, la pérdida de señal no es el factor determinante.

Figura 28

Transductor proceq 54 kHz



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Debido a que la velocidad del pulso en el acero es hasta el doble que, en el concreto, la velocidad del pulso medida en las proximidades del acero de refuerzo será mayor que en el concreto simple de la misma composición. Si es posible, evite las mediciones cerca del acero en paralelo a la dirección de propagación del pulso. (ASTM C597 International, 2016)

El procedimiento de análisis de ultrasonido se implementó en los cilindros de concreto a edades de 1, 7 y 28 días, por medio de la selección de los cilindros según la nomenclatura establecida, se procedió a analizar cada uno de los especímenes utilizando un voltaje de 300 V y una ganancia de 50x, con ello se diseñó una gráfica óptima en amplitud y tiempo.

Figura 29

Ultrasonido cilindros de concreto



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Antes de proceder a ejecutar el análisis de VPU, se realizó la medición a cada uno de los especímenes en aspectos tales como:

- Longitud del cilindro.
- Diámetro 1.
- Diámetro 2.

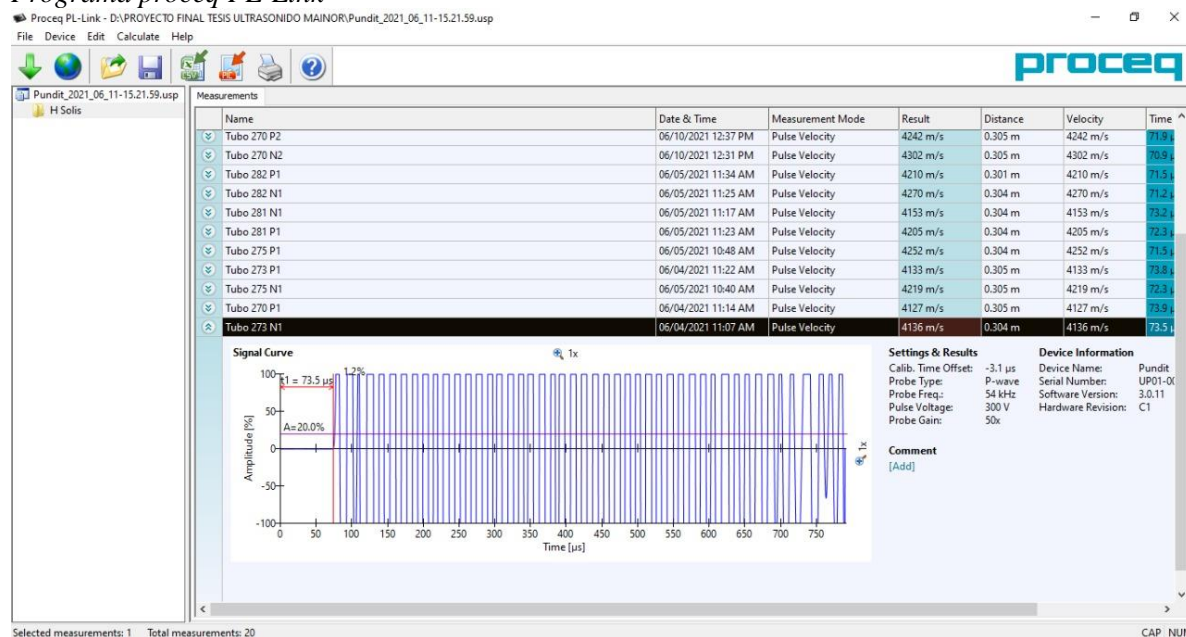
La longitud del cilindro fue indispensable debido a que era necesario anotar sobre cada uno en el equipo, para lograr determinar el tiempo de arribo de la onda en (μs), y la velocidad de pulso ultrasónico en (m/s).

La aplicación de la ecuación 2 no fue necesaria debido a que el equipo mediante cada ensayo de ultrasonido determinó la velocidad de pulso V de manera directa.

El equipo contó con la capacidad de almacenar y analizar cada una de las muestras de ensayo mediante el programa Proceq PL-Link, en donde se visualizaba el nombre del espécimen analizado, la fecha y a hora de análisis, el resultado de velocidad de pulso, la distancia, el tiempo de arribo de la onda y la gráfica donde indica el porcentaje de amplitud y el tiempo en microsegundos, entre otros, por ejemplo:

Figura 30

Programa proceq PL-Link



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos de la implementación de Proceq, 2021.

Un componente importante tomado en consideración antes de la ejecución de cada uno de los análisis, fue el uso de un gel lubricante que permitió un adecuado acoplamiento entre los transductores y el elemento en estudio con miras a obtener resultados satisfactorios. El gel lubricante recomendado y aplicado es de tipo viscoso, se trataba de evitar que líquidos debido a que se podía presentar un acople inconsistente entre el elemento y los transductores; además de que generaría alteraciones en los resultados de ultrasonido.

Para los análisis, se utilizó un mismo tipo de gel lubricante en todas las pruebas del trabajo de investigación.

Figura 31

Gel lubricante, acoplamiento de transductores



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.4. Método de ensayo para la resistencia a la compresión de especímenes de concreto (ASTM C39)

Después de ejecutar la prueba ASTM C597, se procedió con la ejecución del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de concreto hidráulico bajo la norma ASTM C39, el cual se describe de la siguiente manera:

Se debe tener cuidado en la interpretación de la importancia de las determinaciones de la resistencia a la compresión por este método de prueba, ya que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto hecho de materiales dados. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y la forma de la muestra, el procesamiento por lotes, los procedimientos de mezcla, los métodos de muestreo, moldeado, fabricación y las condiciones de edad, temperatura y humedad durante el curado.

Este método de prueba se utiliza para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Los resultados de este método de prueba se utilizan como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación de concreto; determinación del cumplimiento de especificaciones; control para evaluar la efectividad de los aditivos; y usos similares. (ASTM C39 International, 2021)

Cada uno de los especímenes de concreto se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión en la máquina de la marca *Controls* suministrada por la empresa PC, misma que se muestra en la siguiente figura.

Figura 32

Máquina de resistencia a la compresión de PC

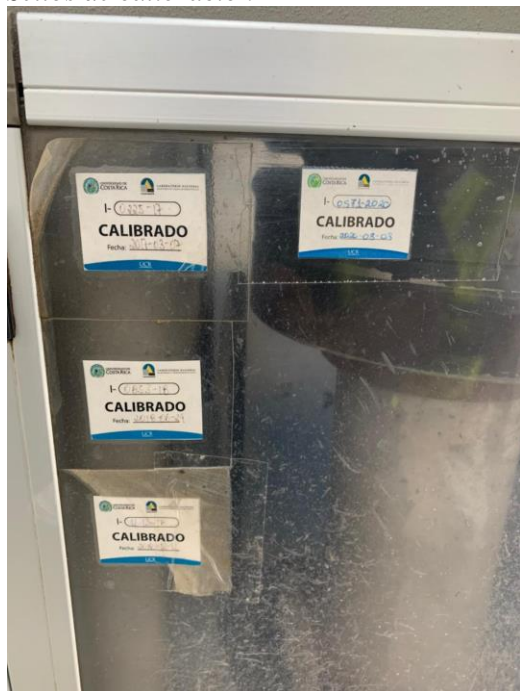


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Es importante destacar que tal artefacto suministrado por PC contaba con los respectivos certificados de calibración elaborados por el laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR, s. f.), el cual se encuentra acreditado bajo la normativa ASTM E4, según lo indicado en los certificados de calibración; la fecha de la próxima calibración se ejecutaría hasta el 03 de agosto del 2021, lo cual evidencia que el equipo estaba debidamente calibrado para la ejecución de los ensayos.

Durante dicha ejecución de los ensayos de resistencia a la compresión, se utilizaron almohadillas de neopreno suministradas por la empresa PC como parte del proceso establecido en la norma ASTM C39.

En la ejecución del ensayo de resistencia a la compresión de núcleos de concreto, se ejecutó un proceso de pulido de caras para obtener una planicidad adecuada antes de la ejecución del ensayo, debido a que no se utilizaron las almohadillas de neopreno en este proceso, la empresa PC disponía del equipo necesario para efectuar el pulido o refrentado de caras.

Figura 33*Sellos de calibración*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.5. Métodos de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas (ASTM C497)

Este método de ensayo proporciona la aceptación de pruebas de calidad en estructuras de concreto prefabricado, como secciones de pozo, tejas y tuberías de concreto; sobre lo mencionado en la norma ASTM C497 International (2020), se destaca que:

Estos métodos de prueba cubren las pruebas de producción y aceptación de tuberías de concreto, secciones de pozo y tejas. Las pruebas incluyen procedimientos para evaluar la resistencia al aplastamiento por carga externa, la parte superior de la losa plana, la resistencia del núcleo, la absorción, la hidrostática, la permeabilidad, el paso de la boca de inspección, el cilindro, el lubricante de la junta, el corte de la junta, la alcalinidad y las mediciones de la junta. Aparte de los procedimientos, esta norma también detalla la importancia el uso y el aparato de prueba requerido. (párr. 1)

Como parte del alcance de la norma ASTM C497, se rescata que:

Estos métodos de prueba cubren las pruebas de tubería de concreto, secciones de caja de concreto, secciones de pozo y baldosas. Los métodos de prueba descritos se utilizan en pruebas de producción y pruebas de aceptación para evaluar las propiedades previstas en las especificaciones. (párr. 3)

Los métodos de prueba utilizados en el trabajo investigativo, y mencionados en esta norma, son los siguientes:

- ✓ Resistencia al aplastamiento de carga externa.
- ✓ Fuerza del núcleo.

Si alguna muestra de ensayo falla debido a razones mecánicas tales como falla del equipo de prueba o preparación inadecuada de la muestra, se debe desechar y tomar otra muestra. (párrs. 5, 7)

De las pruebas mencionadas, la prueba de resistencia al aplastamiento por carga externa se definió como la prueba a utilizar, como parte del desarrollo del proyecto investigativo. La prueba se llevó a cabo en el Lanamme en calidad de sede central de la ejecución de la prueba.

Figura 34

Ensayo tres aristas Lanamme



Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.4.6. Método de ensayo para la obtención de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto (ASTM C42)

Lo mencionado en la norma ASTM C42 describe el procedimiento para la extracción y análisis de núcleos perforados que indica:

Este método de prueba proporciona procedimientos estandarizados para obtener y probar probetas para determinar la resistencia a la compresión, a la tracción por división y a la flexión del concreto en el lugar.

Generalmente, las muestras de prueba se obtienen cuando existen dudas sobre la calidad del concreto en el lugar debido a resultados de prueba de baja resistencia durante la construcción o signos de deterioro en la estructura. Otro uso de este método es proporcionar información de resistencia en estructuras más antiguas.

La resistencia del concreto se ve afectada por la ubicación del concreto en un elemento estructural, y el concreto en la parte inferior tiende a ser más fuerte que el concreto en la parte superior. La resistencia del núcleo también se ve afectada por la orientación del núcleo en relación con el plano horizontal del concreto colocado, y la resistencia tiende a ser menor cuando se mide en paralelo al plano horizontal, estos factores se deben considerar al planificar las ubicaciones para obtener muestras de concreto y al comparar los resultados de las pruebas de resistencia.

La resistencia del concreto medido mediante pruebas de núcleos se ve afectada por la cantidad y distribución de humedad en la muestra en el momento de la prueba. No existe un procedimiento estándar para acondicionar una muestra que asegure que, en el momento de la prueba, estará en la misma condición de humedad que el concreto en la estructura. Los procedimientos de acondicionamiento de humedad en este método de prueba están destinados a proporcionar condiciones de humedad reproducibles que minimicen las variaciones dentro del laboratorio y entre laboratorios y para reducir los efectos de la humedad introducida durante la preparación de la muestra.

La resistencia a la compresión medida de un núcleo generalmente será menor que la de un cilindro estándar correspondiente debidamente moldeado, curado y probado a la

misma edad, sin embargo, para un concreto dado, no existe una relación única entre las resistencias de estos dos tipos de probetas. La relación se ve afectada por muchos factores, como el nivel de resistencia del concreto, los historiales de temperatura y humedad en el lugar, el grado de consolidación, la variabilidad de un lote a otro, las características de resistencia-ganancia del concreto, la condición del aparato de extracción de núcleos, y el cuidado empleado en la extracción de núcleos.

Se dispone de un procedimiento para estimar la resistencia equivalente del cilindro a partir de una resistencia del núcleo medida.

En ausencia de los requisitos de resistencia del núcleo de un código de construcción aplicable o de otros documentos contractuales o legales que puedan regir el proyecto, el especificador de pruebas debe establecer en las especificaciones del proyecto los criterios de aceptación para las fortalezas del núcleo. En ACI 214.4-10 proporciona un ejemplo de criterios de aceptación para la resistencia del núcleo, que se utilizan para evaluar los núcleos tomados para investigar los resultados de las pruebas de baja resistencia de un cilindro curado estándar durante la construcción. Según ACI 214.4-10, el concreto representado por los núcleos se considera estructuralmente adecuado si la resistencia promedio de tres núcleos es al menos el 85% de la resistencia especificada y ninguna resistencia de un solo núcleo es inferior al 75% de la resistencia especificada.

El “especificador de las pruebas” al que se hace referencia en este método de prueba es la persona responsable del análisis o revisión y aceptación de los resultados de la prueba principal.

Para la investigación de los resultados de las pruebas de baja resistencia, ACI 214.4-10, define al especificador de las pruebas como el profesional de diseño autorizado o el funcionario de la construcción.

La resistencia aparente a la compresión del concreto medido por un núcleo, se ve afectada por la relación longitud-diámetro (L / D) del núcleo ensayado y esto debe tenerse en cuenta al preparar muestras de núcleos y evaluar los resultados de las pruebas. (ASTM C42 International, 2020, párrs. 1-10)

Figura 35*Análisis de núcleos de concreto*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.5. Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos fueron la parte siguiente de la investigación. En la recolección de datos, se utilizó la herramienta de Microsoft Excel, por ser ágil y versátil, en este programa se anotaron datos obtenidos en el laboratorio, por ejemplo, cifras importantes del trabajo investigativo, entre ellos ultrasonidos, resistencia a la compresión de cilindros de concreto, longitudes, diámetros, temperaturas, núcleos, etc. A partir de estos resultados, se procede con la creación de tablas y gráficos, recursos que, de manera analítica, ayudaron a determinar la comparativa de resultados entre los dos métodos de análisis (curado en patio de almacenaje, curado en pilas controladas).

Paso importante en el desarrollo del trabajo investigativo es la utilización de los instrumentos que indicaran características específicas de cada espécimen de ensayo, como equipos primordiales para la ejecución de los ensayos de laboratorio se incluyó la máquina de resistencia a la compresión, el equipo de ultrasonido, el higrómetro y el consistómetro Vebe. Estos equipos fueron de vital importancia para la obtención de datos; por tanto, requerían condiciones óptimas y los certificados de calibración vigentes, en los casos en que los equipos lo requirieran; por ejemplo,

la calibración del equipo de ultrasonido antes de ser utilizado como se muestra en la siguiente figura.

Figura 36
Calibración equipo de ultrasonido



Fuente: Elaboración propia, 2021.

También son destacables los sellos de calibración de la máquina de resistencia a la compresión, que es de vital relevancia para la obtención de resultados confiables y eficaces.

Figura 37
Sellos de calibración



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Otro de los equipos utilizados es el vernier, que se utilizó para efectuar las mediciones de los diámetros y las alturas en diferentes puntos de los cilindros de concreto analizados, esto con el fin de obtener datos con una mayor precisión y exactitud.

Figura 38

Medición de especímenes con vernier



Fuente: Elaboración propia, 2021.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de laboratorio efectuadas, mediante la recopilación de cifras en tablas generadas a partir de cada prueba.

Cada una de las muestras contó con su propio código de identificación con el objetivo de obtener los resultados según el tipo de tubería analizada, para determinar la calidad del concreto seco empleado en la fabricación de las tuberías.

El procedimiento de los ensayos se realizó en el orden estipulado en la tabla 4, en donde se detalla, mediante tablas de resultados, la densidad del concreto mediante el tiempo Vebe, la velocidad de pulso V mediante ultrasonido, la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, la resistencia al aplastamiento o ensayo de tres aristas (supeditado a empresa PC), y la extracción y análisis de núcleos de concreto.

Los resultados de los ensayos fueron la base para la creación de gráficos y tablas con los cuales se definió la resistencia a la compresión en tuberías de concreto por medio de la técnica de ultrasonido, lo que era el objetivo principal del trabajo de investigación.

Una vez sistematizados los datos mediante las tablas y gráficos, se procedió con el análisis de resultados descrito en el presente capítulo, se efectuó la correlación entre los resultados obtenidos de los cilindros de concretos curados en patio de almacenaje, y los que se sometieron a proceso de curado en condiciones normadas.

Adicional a lo mencionado en el párrafo anterior, todos los resultados se examinaron y correlacionaron para determinar la ganancia de resistencia con el paso del tiempo, a través de pruebas como ultrasonidos, ensayo de cilindros y núcleos a edades de 1, 7 y 28 días, tal cual se indica en la matriz de ensayos. Se calculó la ganancia de resistencia y la relación que existe entre todos los ensayos ejecutados para la creación del protocolo, además se determinó la resistencia de concretos secos en tuberías de 1200 mm de clase V tipo hincadas por medio de la técnica de ultrasonido.

4.1. Resultados

4.1.1. Densidad del concreto mediante tiempo Vebe

Como se menciona en la tabla 4 del plan de ensayos, se establece, mediante la norma ASTM C1170, la consistencia y densidad del concreto seco a través del tiempo Vebe.

Para todas las pruebas se registró la temperatura del concreto, y se trabajó con una misma frecuencia y volumen del molde. Los ensayos mencionados se ejecutaron para cada uno de los diez tubos analizados, los resultados se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 5

Densidad del concreto

Identificación de la muestra (Tubería)	Volumen Molde (m ³)	Peso Molde (kg)	Densidad (kg/m ³)	Tiempo Vebe (s)	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)
270	0,00888	21,4	2415	11,4	29,0	60
273	0,00888	21,5	2425	10,4	28,9	60
275	0,00888	21,6	2432	8,8	29,5	60
281	0,00888	21,6	2428	6,3*	28,0	60
282	0,00888	21,6	2436	8,4	31,0	60
292	0,00888	21,9	2462	14,7	29,0	60
294	0,00888	21,7	2441	12,5	31,0	60
297	0,00888	21,8	2452	13,5	30,0	60
301	0,00888	21,6	2435	12,9	29,0	60
302	0,00888	21,5	2424	11,5	31,0	60

Nota. *Este dato no será considerado para el análisis de resultados, por la amplia desviación.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.1.2. Determinación de velocidad de pulso *V* mediante ultrasonido

La velocidad de pulso por medio de ultrasonido se calculó a edades de 1, 7 y 28 días para todas las muestras a las que se les ejecutó el ensayo, para cada una de las estas se utilizó el mismo tipo de vaselina como agente acoplante entre los transductores de 54 kHz y el cilindro de concreto, con el fin de evitar una mayor incertidumbre en los resultados del proyecto.

Figura 39
Vaselina de acople par de transductores



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Antes de la ejecución de la velocidad de pulso ultrasónico se procedió con la medición de la altura y diámetros de cada uno de los cilindros de ensayo, debido a la necesidad de incluir el dato de altura en el equipo Proceq como se indica.

Figura 40
Anotación de altura en equipo Proceq



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Anotados los datos de cada uno de los cilindros, y según su nomenclatura establecida, se procede con el análisis de ultrasonido a diferentes edades para los cilindros curados en condiciones normadas (N) y los curados en el patio de almacenaje (P). Los ultrasonidos efectuados se ejecutan a las edades establecidas de 1, 7 y 28 días, en las siguientes tablas de ensayos se muestra los resultados para cada una de las tuberías analizadas.

Tabla 6

Ultrasonido a cilindros de concreto edad 1 día

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Distancia de análisis del cilindro (m)	Tiempo de arribo de onda (μ s)	Velocidad de Pulso transductores (m/s)
270 N1	3/6/21	4/6/21	10:05:00	0,303	73,7	4111
270 P1	3/6/21	4/6/21	10:05:00	0,305	73,9	4127
273 N1	3/6/21	4/6/21	11:21:00	0,304	73,5	4136
273 P1	3/6/21	4/6/21	11:21:00	0,305	73,8	4133
275 N1	4/6/21	5/6/21	10:00:00	0,305	72,3	4219
275 P1	4/6/21	5/6/21	10:00:00	0,304	71,5	4252
281 N1	4/6/21	5/6/21	13:26:00	0,304	73,2	4153
281 P1	4/6/21	5/6/21	13:26:00	0,304	72,3	4205
282 N1	4/6/21	5/6/21	14:30:00	0,304	71,1	4276
282 P1	4/6/21	5/6/21	14:30:00	0,301	71,5	4210
292 N1	16/6/21	17/6/21	9:15:00	0,303	69,3	4373
292 P1	16/6/21	17/6/21	9:15:00	0,303	68,9	4399
294 N1	16/6/21	17/6/21	9:40:00	0,303	68,3	4452
294 P1	16/6/21	17/6/21	9:40:00	0,303	70,0	4329
297 N1	16/6/21	17/6/21	11:00:00	0,304	69,0	4407
297 P1	16/6/21	17/6/21	11:00:00	0,304	68,8	4419
301 N1	17/6/21	18/6/21	13:30:00	0,304	71,4	4258
301 P1	17/6/21	18/6/21	13:30:00	0,304	71,9	4228
302 N1	17/6/21	18/6/21	14:00:00	0,303	71,7	4226
302 P1	17/6/21	18/6/21	14:00:00	0,304	71,6	4246

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 7*Ultrasonido a cilindros de concreto edad 7 días*

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Distancia de análisis del cilindro (m)	Tiempo de arribo de onda (μ s)	Velocidad de Pulso transductores (m/s)
270 N2	3/6/21	10/6/21	10:05:00	0,305	70,9	4302
270 P2	3/6/21	10/6/21	10:05:00	0,305	71,9	4242
273 N2	3/6/21	10/6/21	11:21:00	0,304	70,4	4318
273 P2	3/6/21	10/6/21	11:21:00	0,304	72,0	4222
275 N2	4/6/21	11/6/21	10:00:00	0,305	68,5	4453
275 P2	4/6/21	11/6/21	10:00:00	0,305	69,7	4376
281 N2	4/6/21	11/6/21	13:26:00	0,304	69,0	4406
281 P2	4/6/21	11/6/21	13:26:00	0,303	69,5	4360
282 N2	4/6/21	11/6/21	14:30:00	0,305	68,9	4427
282 P2	4/6/21	11/6/21	14:30:00	0,300	68,1	4405
292 N2	16/6/21	23/6/21	9:15:00	0,304	68,1	4464
292 P2	16/6/21	23/6/21	9:15:00	0,304	66,7	4558
294 N2	16/6/21	23/6/21	9:40:00	0,304	67,3	4517
294 P2	16/6/21	23/6/21	9:40:00	0,304	67,4	4510
297 N2	16/6/21	23/6/21	11:00:00	0,303	67,1	4516
297 P2	16/6/21	23/6/21	11:00:00	0,303	67,0	4522
301 N2	17/6/21	24/6/21	13:30:00	0,304	67,4	4510
301 P2	17/6/21	24/6/21	13:30:00	0,304	68,0	4471
302 N2	17/6/21	24/6/21	14:00:00	0,303	68,0	4456
302 P2	17/6/21	24/6/21	14:00:00	0,304	68,0	4471

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 8*Ultrasonido a cilindros de concreto edad 28 días*

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Distancia de análisis del cilindro (m)	Tiempo de arribo de onda (μ s)	Velocidad de Pulso transductores (m/s)
270 N3	3/6/21	1/7/21	10:05:00	0,304	69,0	4406
270 N4	3/6/21	1/7/21	10:05:00	0,304	68,0	4471
270 P3	3/6/21	1/7/21	10:05:00	0,304	68,2	4457
270 P4	3/6/21	1/7/21	10:05:00	0,304	68,4	4444
273 N3	3/6/21	1/7/21	11:21:00	0,304	68,3	4451
273 N4	3/6/21	1/7/21	11:21:00	0,303	68,0	4456
273 P3	3/6/21	1/7/21	11:21:00	0,304	67,4	4510
273 P4	3/6/21	1/7/21	11:21:00	0,304	67,9	4477
275 N3	4/6/21	2/7/21	10:00:00	0,304	66,4	4577
275 N4	4/6/21	2/7/21	10:00:00	0,304	67,1	4530
275 P3	4/6/21	2/7/21	10:00:00	0,303	65,6	4618
275 P4	4/6/21	2/7/21	10:00:00	0,300	65,2	4600
281 N3	4/6/21	2/7/21	13:26:00	0,304	66,7	4557
281 N4	4/6/21	2/7/21	13:26:00	0,303	67,1	4515
281 P3	4/6/21	2/7/21	13:26:00	0,304	67,6	4496
281 P4	4/6/21	2/7/21	13:26:00	0,304	67,5	4503
282 N3	4/6/21	2/7/21	14:30:00	0,300	66,1	4538
282 N4	4/6/21	2/7/21	14:30:00	0,303	66,7	4542
282 P3	4/6/21	2/7/21	14:30:00	0,302	67,4	4480
282 P4	4/6/21	2/7/21	14:30:00	0,304	67,2	4523
292 N3	16/6/21	14/7/21	9:15:00	0,304	65,7	4627
292 N4	16/6/21	14/7/21	9:15:00	0,304	65,9	4613
292 P3	16/6/21	14/7/21	9:15:00	0,303	65,8	4605
292 P4	16/6/21	14/7/21	9:15:00	0,304	65,8	4620
294 N3	16/6/21	14/7/21	9:40:00	0,302	65,6	4604
294 N4	16/6/21	14/7/21	9:40:00	0,303	65,9	4598
294 P3	16/6/21	14/7/21	9:40:00	0,304	66,2	4592
294 P4	16/6/21	14/7/21	9:40:00	0,302	65,7	4597
297 N3	16/6/21	14/7/21	11:00:00	0,303	66,0	4591
297 N4	16/6/21	14/7/21	11:00:00	0,301	65,4	4602
297 P3	16/6/21	14/7/21	11:00:00	0,302	65,6	4604
297 P4	16/6/21	14/7/21	11:00:00	0,303	65,7	4612
301 N3	17/6/21	15/7/21	13:30:00	0,304	67,4	4512
301 N4	17/6/21	15/7/21	13:30:00	0,304	66,4	4580
301 P3	17/6/21	15/7/21	13:30:00	0,302	65,3	4627
301 P4	17/6/21	15/7/21	13:30:00	0,305	66,6	4581
302 N3	17/6/21	15/7/21	14:00:00	0,303	66,6	4551
302 N4	17/6/21	15/7/21	14:00:00	0,304	66,9	4546
302 P3	17/6/21	15/7/21	14:00:00	0,303	66,9	4531
302 P4	17/6/21	15/7/21	14:00:00	0,304	66,2	4594

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.1.3. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto

Después de determinar la velocidad de pulso ultrasónico de los cilindros de concreto, se procedió a medir los diámetros con el vernier en dos puntos de la cara del cilindro, con miras a obtener el diámetro 1 y el diámetro 2 para, con ello, proceder con el cálculo del área necesaria para poder aplicar la fórmula de la ecuación 3.

Ecuación 4

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

- P: fuerza puntual que actúa en el cilindro, kg
- A: área del espécimen de ensayo, cm²

Figura 41

Medición, diámetro de los especímenes



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 9

Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 1 día

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Diámetro promedio (mm)	Área (mm ²)	Carga (Mpa)	Resistencia kg/cm ²
270 N1	3/6/21	4/6/21	10:05:00	151,55	18037,4	41,0	418
270 P1	3/6/21	4/6/21	10:05:00	152,77	18330,2	35,9	366
273 N1	3/6/21	4/6/21	11:21:00	152,08	18164,9	45,4	462
273 P1	3/6/21	4/6/21	11:21:00	152,75	18324,2	43,5	443
275 N1	4/6/21	5/6/21	10:00:00	152,24	18203,2	49,9	508
275 P1	4/6/21	5/6/21	10:00:00	152,58	18283,4	50,7	517
281 N1	4/6/21	5/6/21	13:26:00	151,90	18122,0	45,1	460
281 P1	4/6/21	5/6/21	13:26:00	152,74	18323,0	46,2	471
282 N1	4/6/21	5/6/21	14:30:00	150,68	17832,0	51,2	522
282 P1	4/6/21	5/6/21	14:30:00	152,75	18324,2	48,0	489
292 N1	16/6/21	17/6/21	9:15:00	152,75	18325,4	57,1	582
292 P1	16/6/21	17/6/21	9:15:00	151,78	18092,2	58,5	596
294 N1	16/6/21	17/6/21	9:40:00	152,95	18373,4	55,0	560
294 P1	16/6/21	17/6/21	9:40:00	153,00	18385,4	58,0	591
297 N1	16/6/21	17/6/21	11:00:00	152,03	18151,8	57,4	585
297 P1	16/6/21	17/6/21	11:00:00	153,05	18397,4	59,5	606
301 N1	17/6/21	18/6/21	13:30:00	152,15	18181,7	44,9	458
301 P1	17/6/21	18/6/21	13:30:00	153,00	18385,4	43,1	440
302 N1	17/6/21	18/6/21	14:00:00	152,90	18361,4	43,3	442
302 P1	17/6/21	18/6/21	14:00:00	152,08	18163,8	42,7	435

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 10*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 7 días*

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Diámetro promedio (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Carga (Mpa)	kg/cm ²
270 N2	3/6/21	10/6/21	10:05:00	152,73	18319,4	53,1	541
270 P2	3/6/21	10/6/21	10:05:00	152,04	18155,4	54,8	559
273 N2	3/6/21	10/6/21	11:21:00	151,70	18074,3	59,5	607
273 P2	3/6/21	10/6/21	11:21:00	152,03	18151,8	61,4	626*
275 N2	4/6/21	11/6/21	10:00:00	151,60	18049,3	62,5	637
275 P2	4/6/21	11/6/21	10:00:00	152,73	18320,6	60,9	621
281 N2	4/6/21	11/6/21	13:26:00	151,92	18125,6	59,7	609
281 P2	4/6/21	11/6/21	13:26:00	152,94	18371,0	60,7	619
282 N2	4/6/21	11/6/21	14:30:00	153,27	18449,1	64,0	653
282 P2	4/6/21	11/6/21	14:30:00	153,03	18392,6	59,5	607
292 N2	16/6/21	23/6/21	9:15:00	153,10	18408,2	67,3	686
292 P2	16/6/21	23/6/21	9:15:00	152,43	18247,5	74,9	764
294 N2	16/6/21	23/6/21	9:40:00	152,90	18361,4	69,8	712
294 P2	16/6/21	23/6/21	9:40:00	153,50	18505,7	69,4	707
297 N2	16/6/21	23/6/21	11:00:00	153,00	18385,4	67,9	693
297 P2	16/6/21	23/6/21	11:00:00	153,03	18391,4	73,8	753
301 N2	17/6/21	24/6/21	13:30:00	152,05	18157,8	60,3	615
301 P2	17/6/21	24/6/21	13:30:00	152,18	18187,6	61,8	630
302 N2	17/6/21	24/6/21	14:00:00	153,83	18584,2	59,5	606
302 P2	17/6/21	24/6/21	14:00:00	153,05	18397,4	60,3	615

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 11*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto 28 días*

Identificación de la muestra (Tubería)	Fecha de moldeo	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Diámetro promedio (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Carga (Mpa)	kg/cm ²
270 N3	3/6/21	1/7/21	10:05:00	151,94	18130,3	62,1	633
270 N4	3/6/21	1/7/21	10:05:00	153,35	18469,6	64,6	659
270 P3	3/6/21	1/7/21	10:05:00	152,36	18231,9	64,0	652
270 P4	3/6/21	1/7/21	10:05:00	153,07	18402,2	62,0	632
273 N3	3/6/21	1/7/21	11:21:00	153,13	18415,4	66,2	675
273 N4	3/6/21	1/7/21	11:21:00	153,34	18467,2	65,5	667
273 P3	3/6/21	1/7/21	11:21:00	152,99	18383,0	69,0	704
273 P4	3/6/21	1/7/21	11:21:00	153,21	18434,7	67,1	684
275 N3	4/6/21	2/7/21	10:00:00	153,20	18433,5	66,4	677
275 N4	4/6/21	2/7/21	10:00:00	153,23	18439,5	64,8	661
275 P3	4/6/21	2/7/21	10:00:00	152,86	18351,8	72,5	740
275 P4	4/6/21	2/7/21	10:00:00	153,27	18450,3	71,5	729
281 N3	4/6/21	2/7/21	13:26:00	153,23	18439,5	70,1	715
281 N4	4/6/21	2/7/21	13:26:00	153,05	18396,2	71,2	726
281 P3	4/6/21	2/7/21	13:26:00	152,58	18284,6	75,2	767
281 P4	4/6/21	2/7/21	13:26:00	153,35	18468,4	76,9	784
282 N3	4/6/21	2/7/21	14:30:00	153,07	18402,2	74,3	758
282 N4	4/6/21	2/7/21	14:30:00	153,61	18532,3	59,8	610
282 P3	4/6/21	2/7/21	14:30:00	153,47	18498,5	73,3	747
282 P4	4/6/21	2/7/21	14:30:00	152,35	18229,5	77,8	793
292 N3	16/6/21	14/7/21	9:15:00	151,41	18004,1	79,4	810
292 N4	16/6/21	14/7/21	9:15:00	152,73	18320,6	77,6	791
292 P3	16/6/21	14/7/21	9:15:00	152,75	18325,4	81,1	827
292 P4	16/6/21	14/7/21	9:15:00	153,23	18439,5	79,0	806
294 N3	16/6/21	14/7/21	9:40:00	152,86	18351,8	78,0	795
294 N4	16/6/21	14/7/21	9:40:00	152,07	18161,4	80,9	825
294 P3	16/6/21	14/7/21	9:40:00	152,68	18307,4	81,4	830
294 P4	16/6/21	14/7/21	9:40:00	153,43	18488,9	78,2	797
297 N3	16/6/21	14/7/21	11:00:00	152,66	18303,8	80,7	823
297 N4	16/6/21	14/7/21	11:00:00	152,87	18354,2	78,9	805
297 P3	16/6/21	14/7/21	11:00:00	153,49	18503,3	77,4	789
297 P4	16/6/21	14/7/21	11:00:00	154,06	18641,0	79,3	809
301 N3	17/6/21	15/7/21	13:30:00	152,91	18362,6	67,0	683
301 N4	17/6/21	15/7/21	13:30:00	152,95	18373,4	68,1	694
301 P3	17/6/21	15/7/21	13:30:00	151,70	18074,3	75,1	766
301 P4	17/6/21	15/7/21	13:30:00	153,42	18486,5	70,9	723
302 N3	17/6/21	15/7/21	14:00:00	151,86	18112,4	68,3	696
302 N4	17/6/21	15/7/21	14:00:00	152,74	18323,0	68,0	693
302 P3	17/6/21	15/7/21	14:00:00	152,88	18355,4	66,7	680
302 P4	17/6/21	15/7/21	14:00:00	153,20	18433,5	69,7	711

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.1.4. Métodos de prueba estándar para tuberías de concreto, secciones de cajas de concreto, secciones de pozo o baldosas

Como parte del proceso y análisis investigativo, se envió el tubo 294 al LanammeUCR a que se le efectuara el ensayo ASTM C497. Antes de enviar el tubo se procede a realizar ultrasonido al mismo mediante la utilización de los transductores y el pulso eco.

Se establece un sistema de marcas y orientación de medición para ejecutar las pruebas en diferentes puntos del elemento, como se muestran en las siguientes figuras.

Figura 42

Identificación de puntos de ensayo



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las mediciones de realizaron en la orientación de 1 a 2, y se estableció otro sistema de orientación en sentido de 3-4.

A fin de identificar los puntos de análisis, se utilizó un detector de acero de refuerzo, con el cual fue posible determinar únicamente seis sectores del elemento, debido a que el equipo sufrió una descomposición al momento de continuar verificando las ubicaciones del acero de refuerzo; por lo cual, de manera arbitraria, se vio la necesidad de implementar las pruebas con la única referencia de las ubicaciones de los puntos obtenidos.

Figura 43

Equipo de detección de acero de refuerzo

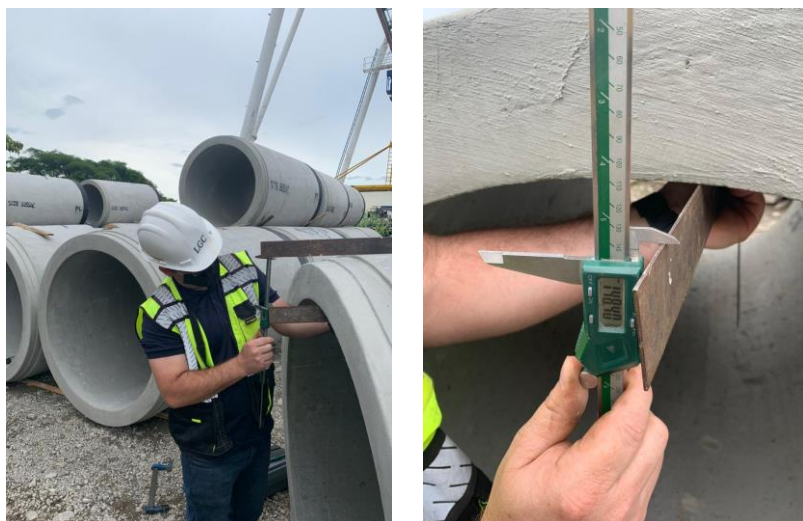


Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez identificados los puntos de ensayo, se procedió con la medición del espesor de la tubería por medio de unas escuadras en la parte interna y externa del tubo, para luego medir con un vernier y obtener un resultado más preciso, rubro que era sumamente necesario para la inclusión en el equipo de medición ultrasónico como parámetro de requisito.

Figura 44

Medición de espesor de tubería



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Luego de obtener el resultado de espesor de la tubería, se hizo la calibración del equipo, así como se incluyó el resultado del espesor para proceder a ejecutar de las pruebas por medio de, primero, la prueba con el transductor de pulso eco.

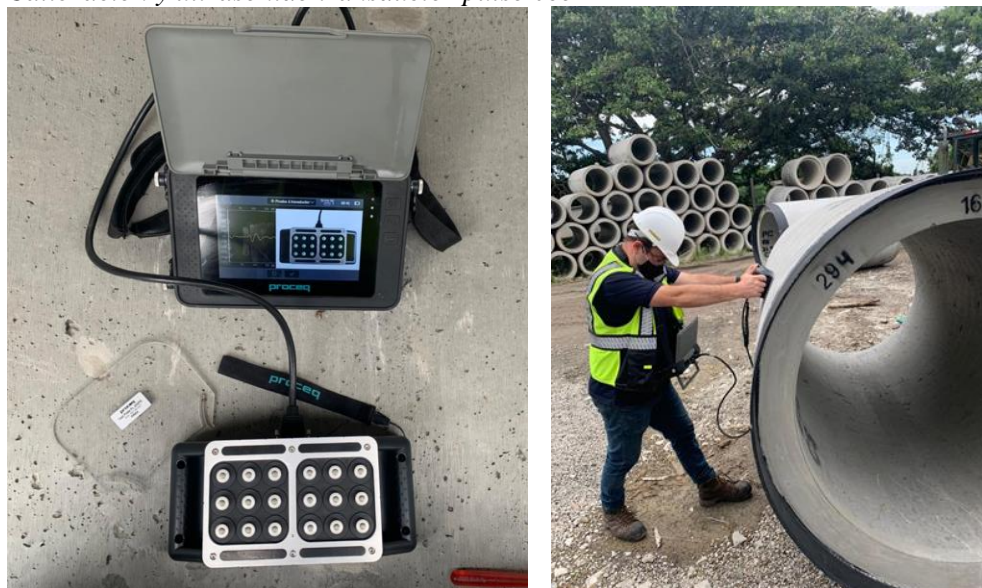
Antes de proceder con las mediciones, este tipo de transductor contaba con una placa de calibración para comprobar el correcto funcionamiento, al igual que los transductores de 54 kHz.

Una vez realizada la calibración y comprobación del correcto funcionamiento del transductor pulso eco, se procede a llevar a cabo las mediciones en los puntos ya identificados, mostrados en la figura 42.

Cada una de las pruebas se efectuó en el sentido de orientación mencionado, se estableció otro sistema de orientación para obtener una mayor cantidad de resultados que permitieran garantizar la representatividad de las pruebas, es necesaria la colaboración de una persona funcionaria de la empresa PC para la ejecución de estos ensayos, debido a que se contaba con poco tiempo de análisis antes de enviar la tubería al LanammeUCR.

En la siguiente imagen se detalla la calibración y medición de ultrasonido a la tubería de concreto identificada como 294, mediante la tecnología pulso eco, los resultados de las mediciones se presentan en la tabla 12.

Figura 45
Calibración y ultrasonido transductor pulso eco



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 12*Ultrasonido pulso eco*

Ultrasonido (Tubo 294)				
Fecha de ensayo	Orientación Medición 1-2	Velocidad Pulso Eco (m/s)	Orientación Medición 3-4	Velocidad Pulso Echo (m/s)
14/7/21	1-2	2260	3-4	2260
14/7/21	1-3	2226	3-5	2277
14/7/21	1-4	2209	3-6	2209
14/7/21	1-5	2226	3-7	2193
14/7/21	1-6	2260	3-8	2242
14/7/21	1-7	2193	3-9	2226
14/7/21	1-8	2176	3-10	2193
14/7/21	1-9	2161	3-11	2161
14/7/21	1-10	2161	3-12	2145
14/7/21	-	-	3-13	2145
14/7/21	-	-	3-14	2193

Fuente: Elaboración propia, 2021.

A partir de las mediciones ejecutadas con el equipo de ultrasonido Pulso Eco, se obtuvo una determinación del módulo de elasticidad del concreto y la razón de Poisson que se originó a partir de la obtención de las ondas S que presentaba el equipo de Pulso. Los resultados indicaron ondas de tipo P utilizando el par de transductores. A partir de la obtención de estos resultados, se incluyeron los datos en el programa Proceq PL-Link del equipo de ultrasonido, para la determinación de los parámetros mencionados.

Este cálculo del módulo de elasticidad y la razón de poisson se ejecutó únicamente para el tubo 294 al cual se le realizaron los tipos de mediciones necesarios para calcular estos parámetros; adicionalmente, fue necesario el conocimiento de la densidad del concreto que se desglosa en la tabla 5 de este documento.

En la siguiente figura, se muestra el proceso para obtener el módulo de elasticidad y la razón de poisson a través de la utilización del programa Proceq PL-Link

Figura 46
Programa Proceq PL-Link

Calculate Poisson's Ratio + E-Modulus

P-Wave Velocity (V_p): m/s

S-Wave Velocity (V_s): m/s

Poisson's ratio (ν):

Density of material (ρ): kg/m³

E-Modulus (E): MPa

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia, 2021, con datos obtenidos de la implementación del Programa Proceq PL-Link.

A partir de los resultados obtenidos de las ondas S mostrados en la tabla 12, y los resultados de las ondas P de la tabla 13, se determinó el promedio de todas las mediciones para cada tipo de onda, además, se incluyeron en la fórmula del programa. Adicional a ello, se incluyó el resultado de la densidad obtenida de la mezcla para la elaboración del tubo 294, el cual se presenta en la tabla 4; de esta manera, se obtuvieron los resultados presentados en la figura 47.

Figura 47
Determinación del Módulo de Elasticidad y Razón de Poisson

Calculate Poisson's Ratio + E-Modulus

P-Wave Velocity (V_p): m/s

S-Wave Velocity (V_s): m/s

Poisson's ratio (ν):

Density of material (ρ): kg/m³

E-Modulus (E): MPa

OK Cancel

Fuente: Elaboración propia, 2021 con datos obtenidos de la implementación del Programa Proceq PL-Link.

A partir de los resultados obtenidos mediante la utilización del programa, se procedió a comparar por medio de la aplicación de la fórmula teórica para calcular el módulo de elasticidad a partir de la siguiente ecuación.

Ecuación 5

$$E = 15\,100 * \sqrt{f'c}$$

$$E = 15\,100 * \sqrt{450 \frac{kg}{cm^2}} = 320\,319,37 \text{ kg/cm}^2 \text{ o } 31\,412,60 \text{ MPa}$$

El resultado con la aplicación de la ecuación 5 es de 320 319,37 kg/cm² o 31 412,60 MPa, utilizando la resistencia teórica de diseño para la elaboración de las tuberías, que es de 44,1 MPa, el resultado obtenido a través de la implementación del programa Proceq PL-Link es de 325 366,15 kg/cm² o 31 907,52 MPa lo cual es un indicativo de que el módulo de elasticidad teórico vs. programa Proceq PL-Link, presenta una diferencia de 494,9 MPa.

Seguidamente de efectuar las pruebas con el transductor de pulso eco, se procedió a realizar el cambio de equipo utilizando los transductores de 54 kHz, obteniendo los resultados presentados en la tabla 13.

Figura 48

Calibración y ultrasonido a tubería con transductores 54 kHz



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 13*Ultrasonido transductores 54 kHz*

Ultrasonido transductores 54 kHz (Tubo 294)				
Fecha de ensayo	Orientación Medición 1-2	Velocidad de Pulso transductores (m/s)	Orientación Medición 3-4	Velocidad Pulso transductores (m/s)
14/7/21	1-2	4654	3-4	4669
14/7/21	1-3	4568	3-5	4611
14/7/21	1-4	4611	3-6	4471
14/7/21	1-5	4728	3-7	4366
14/7/21	1-6	4684	3-8	4625
14/7/21	1-7	4253	3-9	4485
14/7/21	1-8	4392	3-10	4379
14/7/21	1-9	4596	3-11	4366
14/7/21	1-10	4444	3-12	4444
14/7/21	-	-	3-13	4315
14/7/21	-	-	3-14	4596

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Adicional a los resultados obtenidos en las tablas anteriores, por medio de ultrasonido se obtiene el resultado de ensayo de las tres aristas mediante la ASTM C497, el cual contiene los resultados presentados en el informe I-0895-2021, que se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 14*Ensayo de tres aristas*

Muestra No.	Fecha ensayo	Edad (días)	Diámetro (mm)	Longitud Efectiva	Espesor Promedio (mm)	Carga grieta (kN)	Carga grieta (kgf)	Carga falla (kN)	Carga falla (kgf)	Resistencia a grieta (N/m/mm)	Resistencia a falla (N/m/mm)
1223-2021	14/7/21	28	1200	2,50	144,3	462	47114	852	86903	154	284

Fuente: Informe LanammeUCR I-0895-2021.

De los resultados obtenidos de tabla 14, se efectuó una correlación de fórmulas para obtener la resistencia a la compresión del concreto a partir de ASTM C497; tal procedimiento se describe de la siguiente forma:

Ecuación 6

$$Mcr = Ms * fcr$$

Donde:

✓ Mcr: Momento de agrietamiento

- ✓ Ms: Módulo de sección
- ✓ fcr: Agrietamiento del concreto

Para el cálculo del módulo de sección, se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación 7

$$Ms = \frac{I}{c}$$

Donde:

- ✓ I: Inercia
- ✓ c: Centroide de la sección

Para el cálculo de la inercia de la tubería, se implementó:

Ecuación 8

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Donde:

- ✓ b: Base de la sección
- ✓ h: Espesor de la sección

Se procedió a diseñar el modelo en el programa SAP 2000 v.22, para la obtención de las fuerzas internas a partir de la carga externa que se aplica mediante ASTM C497, en donde se obtuvo lo siguiente:

- ✓ Momento: 489 485 kg-cm
- ✓ Carga axial: 24 002 kg

Con los datos obtenidos del programa SAP, se procedió a calcular la resistencia a la compresión sobre la base de ASTM C497, como se presenta en la siguiente ecuación:

Ecuación 9

$$fcr = \frac{Mcr}{Ms} + \frac{P}{(b * h)}$$

Donde:

- ✓ P: Carga axial aplicada (Programa SAP 2000 v.22)
- ✓ Ms: Modulo de sección
- ✓ Mcr: Momento (Programa SAP 2000 v.22)
- ✓ b: Base de la sección
- ✓ h: Espesor de la sección

El esfuerzo de agrietamiento para concretos de peso normal, se estableció a partir de:

Ecuación 10

$$f_r = k * \sqrt{f'_c}$$

Donde:

- ✓ f'c: Resistencia a la compresión del concreto
- ✓ k: Factor de agrietamiento del concreto se encuentra entre 2,0 y 3,2 según ACI 318-19

Obtenido el fcr de la ecuación 9, se despejó el valor de f'c de la ecuación 10, en donde se aplicó un factor k de 2,2 del cual se obtuvo un f'c de 81,2 MPa.

Para el valor de f'c obtenido a partir de la ecuación 10, se llevó a cabo un proceso de correlación entre la resistencia a la compresión del concreto hidráulico obtenido a partir de probetas de ensayo ASTM C39, sacando un valor de 79,6 MPa, lo cual se correlacionó con la resistencia obtenida a partir de ASTM C497 que fue de 81,2 MPa, dando el 98,0 % como resultado de correlación.

4.1.5. Método de ensayo para la obtención de núcleos perforados y vigas aserradas de concreto

El método de extracción y falla de núcleos extraídos de concreto se basa en la norma ASTM C42 y lo establecido en el ACI 214.4-10, que fue la guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto.

La extracción de núcleos se realizó el día 2021-07-15, tal proceso dio como resultado diez núcleos de concreto en el centro de la tubería en donde se contaba con una separación del acero entre ocho y diez centímetros, lo cual facilitaba la extracción de los núcleos en ese sector. En la

espiga y la campana, se contó con una separación de acero entre 4 y 6 cm, lo cual presentó una alta concentración de acero de refuerzo, a su vez, representó restringió la extracción en esos puntos. Toda la armadura compuesta contiene doble malla, la cual, de manera semi uniforme, dificultaba más la extracción de los mismos.

Figura 49

Sección de extracción de núcleos en acero de refuerzo tubería 1200 mm



Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la extracción de los núcleos se utilizó una broca de 50.8 mm en función del tamaño máximo nominal del agregado, y cuatro núcleos 63.5 mm, esto debido a la alta concentración de acero de refuerzo utilizado en la elaboración de la tubería, como se detalló en el apartado anterior.

Para la ejecución de las pruebas de extracción de núcleos de concreto, se contó con la colaboración de la empresa LGC, el cual suministró personal altamente calificado, con el equipo de seguridad, así como el utilizado en el proceso de extracción. Los equipos implementados son:

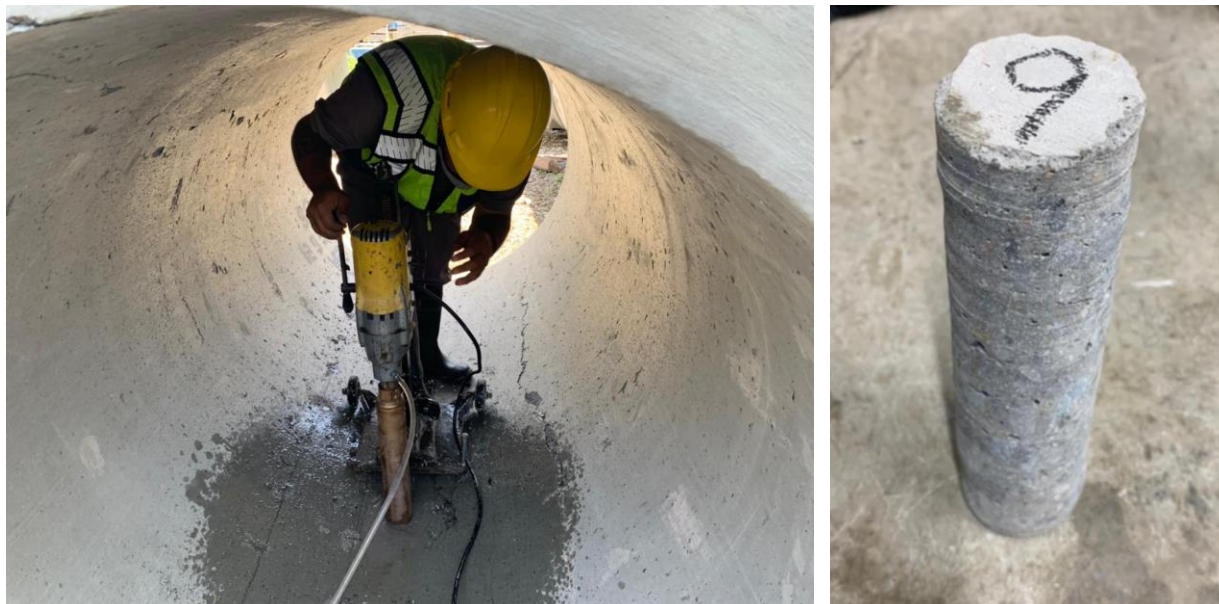
- ❖ Taladro saca núcleos.
- ❖ Broca 63.5 mm.
- ❖ Broca de 50.4 mm.
- ❖ Planta eléctrica.
- ❖ Recipiente de almacenamiento de agua.
- ❖ Manguera de acopio entre la extractora y estañón.
- ❖ Equipo de detección de acero de refuerzo.

- ❖ Equipo de seguridad y protección personal.

En la siguiente imagen se detalla el proceso de extracción de núcleos.

Figura 50

Extracción de núcleos de concreto



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los núcleos de concreto extraídos se identificaron y se guardaron en bolsas plásticas selladas, tal como se muestra en la figura 51.

Figura 51

Extracción de núcleos de concreto de 50.8 y 63.5 mm



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se dispuso de 48 h después de la extracción para efectuar el proceso de pulido o refrentado de caras, y se verificó que cumplieran con la relación L / D , y la planicidad de los mismos según lo establecido en la norma. Luego de efectuar este proceso, se volvieron a guardar en las bolsas plásticas por un lapso de tiempo de entre cinco a siete días como proceso de curado, antes de efectuar el ensayo de resistencia a la compresión ASTM C39.

Figura 52

Máquina de refrentado de caras de núcleos



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez transcurridos los cinco días que se establecieron desde el criterio profesional, se procedió a efectuar el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico ASTM C597 a todos los núcleos, seguidamente, se avanzó con el ensayo de resistencia a la compresión. No obstante, antes de efectuarlo, se determinó la temperatura y el porcentaje de humedad al momento de la falla, esto para aplicar los factores de corrección correspondientes establecidos en el ACI 214.4R-03.

Figura 53*Ultrasonido núcleos de concreto*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 54*Resistencia a la compresión núcleos de concreto*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 15*Ultrasonido núcleos de concreto*

Identificación de la muestra (núcleo)	Fecha de extracción	Fecha de rectificación de extremos (caras del núcleo)	Fecha de ensayo	Hora de ensayo	Distancia de análisis del núcleo (mm)	Tiempo de arribo de onda (μ s)	Velocidad de Pulso transductores (m/s)
1	15/7/21	16/7/21	21/7/21	11:56:00	91,4	19,5	4667
2	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:00:00	87,9	19,4	4536
3	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:02:00	88,9	19,3	4611
4	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:05:00	86,9	18,9	4603
5	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:08:00	84,5	18,4	4620
6	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:10:00	85,3	18,7	4545
7	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:15:00	80,1	17,2	4651
8	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:18:00	81,4	17,6	4602
9	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:22:00	79,1	17,1	4620
10	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:26:00	81,6	17,6	4659
11	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:34:00	124,2	27,0	4593
12	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:38:00	129,2	27,9	4624
13	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:43:00	125,7	27,2	4632
14	15/7/21	16/7/21	21/7/21	12:48:00	125,0	27,4	4562

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez ejecutado el ensayo de ultrasonido ASTM C597 se procedió a anotar los datos de humedad y temperatura respectivos para aplicar los factores de corrección que se establecen en el ACI 214.4-R-03.

Los resultados de la humedad y temperatura son necesarios para aplicar los factores de corrección mencionados en el ACI 214.4-R-03, a su vez, se hace mención del requisito que establece la norma ASTM C42 en relación con la longitud entre diámetro o relación (L / D). Estos requisitos son de carácter fundamental, ya que se encuentran establecidos en la norma y el ACI, la relación longitud, diámetro se logró luego de la obtención de los núcleos, ya que los mismos contaban con longitudes superiores, se procedió con el corte y ajuste de las longitudes para que los núcleos estuvieran en relaciones que no requirieran de la aplicación de un factor de corrección, como lo establece la norma.

Tabla 16

Factores de corrección de resistencia para la relación longitud / diámetro

L / D	ASTM C42 / C42M	BS 1881
2,00	1,00	1,00
1,75	0,98	0,97
1,50	0,96	0,92
1,25	0,93	0,87
1,00	0,87	0,80

Fuente: ACI 214.4R-03.

En la tabla 17 se hace mención a los resultados obtenidos antes de la ejecución del ensayo de resistencia a la compresión. Se hace referencia a las condiciones ambientales y las relaciones L / D respectivas de cada uno de los núcleos de concreto.

Tabla 17

Condiciones ambientales y relación L / D

Identificación del núcleo	Fecha de extracción	Diámetro promedio (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Temperatura (°C)	% Humedad	Relación (L / D)
1	2021-07-15	45,1	91,4	1599,6	28,0	53,0	2,03
2		45,3	87,9	1610,3	28,0	52,0	1,94
3		45,1	88,9	1599,6	28,1	52,0	1,97
4		45,5	86,9	1622,4	28,1	52,0	1,91
5		45,2	84,5	1603,9	28,1	52,0	1,87
6		45,4	85,3	1615,3	28,2	52,0	1,88
7		45,1	80,1	1594,0	28,4	50,0	1,78
8		45,3	81,4	1613,8	28,6	49,0	1,80
9		45,3	79,1	1608,2	28,8	49,0	1,75
10		45,1	81,6	1594,0	28,9	47,0	1,81
11		63,3	124,2	3147,0	29,1	47,0	1,96
12		63,3	129,2	3144,0	29,1	47,0	2,04
13		63,4	125,7	3153,0	29,3	46,0	1,98
14		63,4	125,0	3154,0	29,4	47,0	1,97

Fuente: Elaboración propia, 2021.

A partir de los resultados obtenidos, se procedió a aplicar los factores de corrección para los núcleos de concreto presentes en el ACI 214.4R-03 correspondientes a:

- ✓ Factor de relación l/d seco al aire.
- ✓ Factor diámetro del núcleo.
- ✓ Factor contenido de humedad del núcleo seco al aire.
- ✓ Daños debidos a la perforación.

En la figura 55, se presentan los diversos factores de corrección aplicables a los núcleos de concreto extraídos al tubo 294.

Figura 55

Factores de corrección núcleos de concreto ACI 214.4R-03

Table 8.1—Magnitude and accuracy of strength correction factors for converting core strengths into equivalent in-place strengths*

Factor	Mean value	Coefficient of variation V, %
<i>F_{ld}</i> : <i>l/d</i> ratio [†]		
As-received [‡]	$1 - \{0.130 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Soaked 48 h	$1 - \{0.117 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Air dried [‡]	$1 - \{0.144 - \alpha f_{core}\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$	$2.5 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
<i>F_{dia}</i> : core diameter		
50 mm (2 in.)	1.06	11.8
100 mm (4 in.)	1.00	0.0
150 mm (6 in.)	0.98	1.8
<i>F_{mc}</i> : core moisture content		
As-received [‡]	1.00	2.5
Soaked 48 h	1.09	2.5
Air dried [‡]	0.96	2.5
<i>F_d</i> : damage due to drilling	1.06	2.5

*To obtain equivalent in-place concrete strength, multiply the measured core strength by appropriate factor(s) in accordance with Eq. (8-1).

[†]Constant α equals $3(10^{-6})$ 1/psi for f_{core} in psi, or $4.3(10^{-4})$ 1/MPa for f_{core} in MPa.

[‡]Standard treatment specified in ASTM C 42/C 42M.

Fuente: ACI 214.4R-03.

Al aplicar los distintos factores de corrección y la ecuación 8.1 del ACI 214.4R-03, como se indica, se dan los resultados de resistencia a la compresión corregidos de los núcleos de concreto.

Ecuación 11

$$f_c = F_{l/d} F_{dia} F_{mc} F_d f_{core}$$

Al aplicar los distintos factores de corrección y la ecuación 5, se obtienen los resultados de resistencia a la compresión de núcleos de concreto corregidos, presentes en la tabla 18.

Tabla 18*Resistencia a la compresión núcleos de concreto*

Identificación del núcleo	Fecha de ensayo	Factor de corrección L / D seco al aire	Factor diámetro del núcleo	Factor de corrección por humedad seco al aire	Factor de corrección por daño en la extracción	Resistencia		Resistencia corregida	
						Carga (MPa)	kg/cm ²	Carga (MPa)	kg/cm ²
1	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	39,4	401	42,0	428
2	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	16,9	172	18,0	184
3	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	31,9	325	34,1	347
4	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	24,0	245	25,7	262
5	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	22,3	227	23,8	243
6	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	21,8	222	23,3	237
7	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	40,6	413	43,3	442
8	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	15,6	159	16,7	170
9	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	31,9	324	34,0	347
10	21/7/21	0,99	1,06	0,96	1,06	18,0	183	19,2	196
11	21/7/21	0,99	1,04	0,96	1,06	18,9	193	19,8	202
12	21/7/21	0,99	1,04	0,96	1,06	24,0	245	25,2	257
13	21/7/21	0,99	1,04	0,96	1,06	27,9	285	29,2	298
14	21/7/21	0,99	1,04	0,96	1,06	20,9	213	21,9	223

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Debido a la alta desviación que se presentó en los resultados de resistencia a la compresión en los núcleos por medio de la metodología de pulido, el día 2021-08-20 se decidió realizar la extracción de ocho núcleos adicionales de 50,4 mm, se implementó la metodología de falla de cuatro núcleos con almohadillas de neopreno y cuatro núcleos con capeo utilizando azufre, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 19*Resistencia a la compresión núcleos de concreto, almohadillas de neopreno*

Identificación del núcleo	Fecha de ensayo	Factor de corrección L / D seco al aire	Factor diámetro del núcleo	Factor de corrección por humedad seco al aire	Factor de corrección por daño en la extracción	Resistencia		Resistencia corregida	
						Carga (MPa)	kg/cm ²	Carga (MPa)	kg/cm ²
1	20/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	18,0	184	19,2	196
2	20/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	18,4	187	19,6	200
5	20/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	15,7	161	16,8	171
6	20/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	14,8	151	15,8	161

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 20*Resistencia a la compresión núcleos de concreto, capeo con azufre*

Identificación del núcleo	Fecha de ensayo	Factor de corrección L / D seco al aire	Factor diámetro del núcleo	Factor de corrección por humedad seco al aire	Factor de corrección por daño en la extracción	Resistencia		Resistencia corregida	
						Carga (MPa)	kg/cm ²	Carga (MPa)	kg/cm ²
3	26/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	35,1	358	37,5	383
4	26/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	32,7	333	34,9	356
7	26/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	35,1	358	37,5	382
8	26/8/21	0,99	1,06	0,96	1,06	31,0	316	33,1	337

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.2. Análisis de resultados

Una vez obtenidos todos los resultados presentados en el apartado 4.1, se analizan los resultados obtenidos. Estos resultados se mostrarán mediante gráficos, a través de un conjunto de datos de análisis, se ejecutó una evaluación para cada uno de los tipos de escenarios presentados, por ejemplo, los cilindros curados en patio de almacenaje, y los cilindros curados en condiciones normadas; adicional, los ultrasonidos ejecutados a cada una de las pruebas, cilindros de concreto, núcleos de concreto, el ensayo de las tres aristas ASTM C497.

Se analizaron los resultados de manera detallada y minuciosa a fin de ver la correlación entre el resultado de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, y los resultados de velocidad de pulso ultrasónico. Estos insumos se complementan con el ensayo de las tres aristas ASTM C497; por último, se ejecuta la extracción y ensayo de núcleos de concreto mediante ASTM C42.

El orden de ejecución de los ensayos comenzó con la obtención del tiempo Vebe ASTM C1170 para cada uno de los tubos analizados; seguidamente, se procedió con el moldeo mediante la mesa vibratoria para la elaboración de los cilindros de concreto ASTM C31 que iban a ser sometidos a condiciones de curado en patio de almacenaje y condiciones normadas. Los cilindros de concreto se sometieron al ensayo de ultrasonido ASTM C597 y, por último, se procedió con el ensayo de resistencia a la compresión ASTM C39.

Supeditados a las necesidades de PC, se determina durante el análisis el tubo 294, además se procede a efectuar el ultrasonido mediante la tecnología Eco y los transductores ASTM C597

para el elemento estructural terminado. Luego de ejecutar los análisis, se procedió con el envío al LanammeUCR para que se aplicara el ensayo de las tres aristas mediante ASTM C497.

Una vez que se ejecutó el ensayo de las tres aristas, se ubicó una sección de la tubería para realizar la extracción de núcleos de concreto ASTM C42, se avanzó con la ejecución del ensayo de ultrasonido a los núcleos; por último, se determinó la resistencia a la compresión.

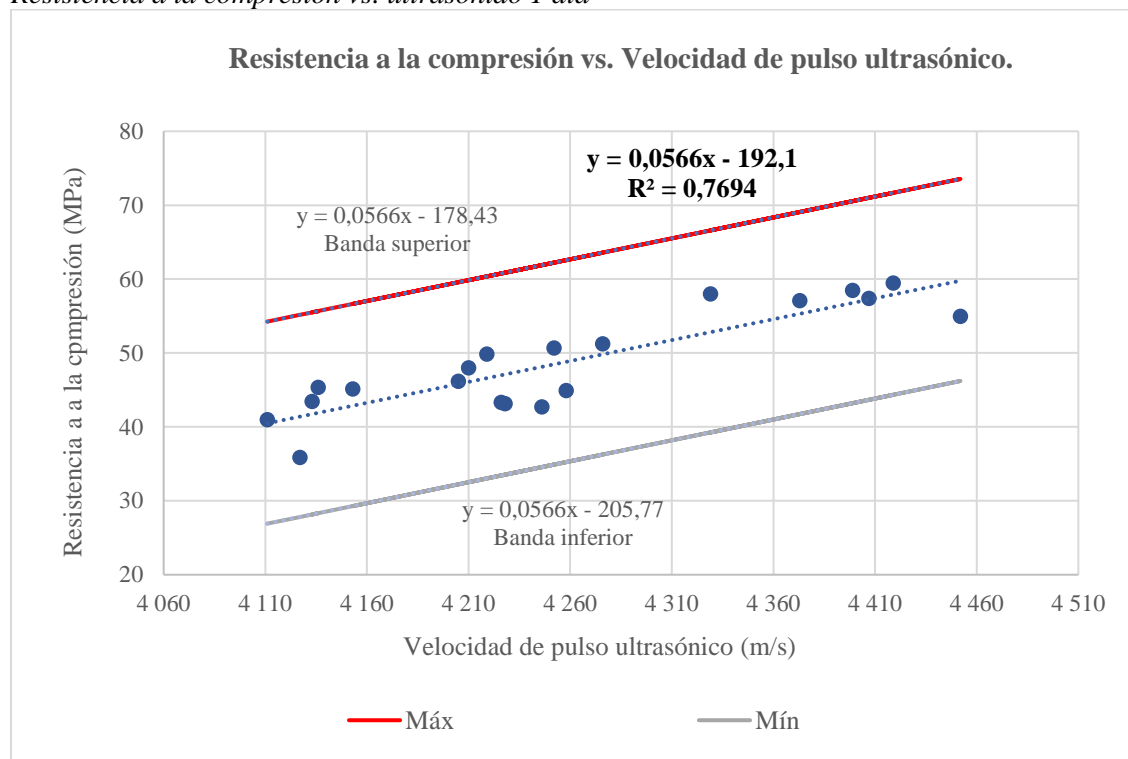
Todos los ensayos se ejecutaron en la empresa PC, siguiendo las normativas ASTM mencionadas, esto con el fin de garantizar una correcta ejecución de las pruebas.

4.2.1. Correlación de Resistencia a la Compresión vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico

Una vez obtenidos todos los resultados de resistencia a la compresión ASTM C39 y ultrasonido ASTM C597 a las diferentes edades, se procedió a determinar la relación que existe entre estos dos parámetros mediante una representación gráfica.

A partir de la gráfica representativa, se obtuvo una ecuación lineal que presentó un R^2 para cada uno de los días de ensayo establecidos, a los cuales se les aplicó dos desviaciones estándar para asegurar un 95 % de confianza al hecho de que los valores estuvieran dentro del rango estipulado.

La figura 56 es una representación gráfica de los resultados de resistencia a la compresión vs. Ultrasonido, obtenidos a la edad de 1 día, demostrando que los tales datos se encuentran dentro de las bandas establecidas.

Figura 56*Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 1 día*

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Al aplicar la fórmula de la ecuación lineal presentada en la figura, fue posible determinar la resistencia del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico con un 95 % de confianza al aplicar las dos desviaciones estándar en cada análisis estadístico de los datos.

Por ejemplo, si se deseaba conocer la resistencia a la compresión del concreto a 1 día sin la necesidad de utilizar métodos destructivos, se hacía ultrasonido mediante ASTM C597 al elemento estructural en estudio, utilizando el par de transductores a la edad de 1 día, se sustituía el valor de x por el resultado de ultrasonido obtenido en la ecuación, para terminar, se determinaba la resistencia aproximada del concreto, por ejemplo:

$$y = 0,0566x - 192,1$$

$$y = 0,0566*(4180) - 192,1 = 44,5 \text{ MPa}$$

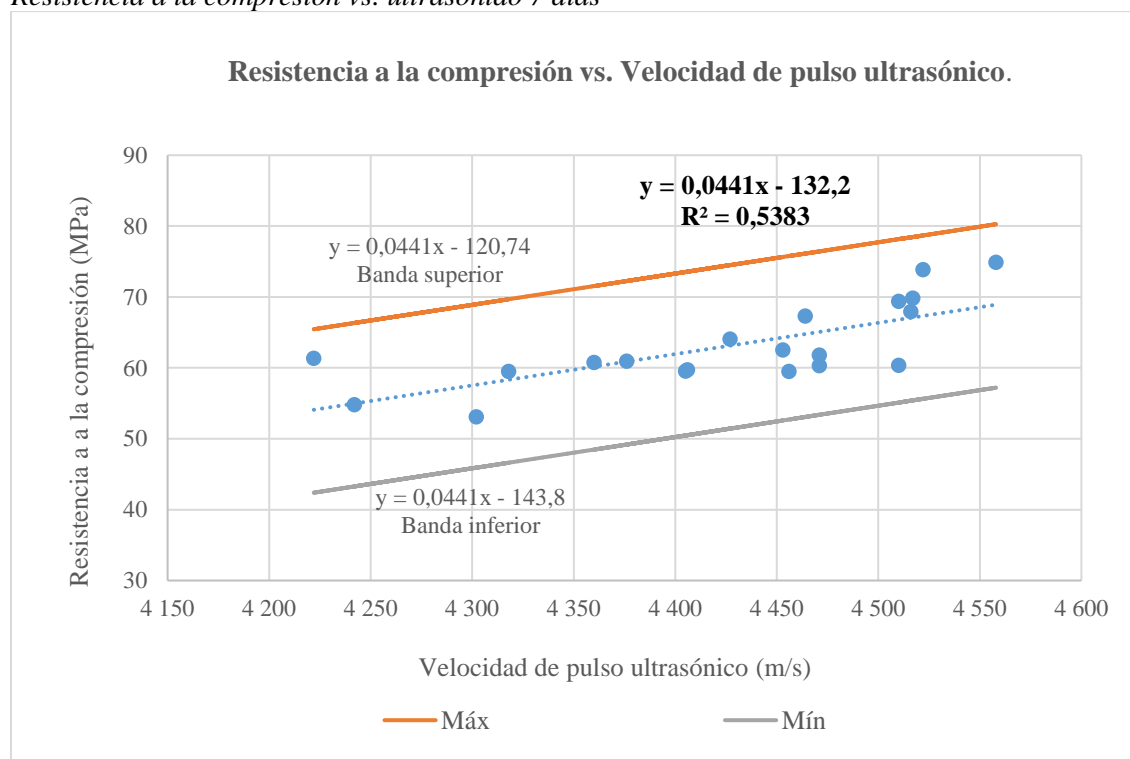
En el caso mencionado, para una velocidad de pulso ultrasónico de 4180 m/s obtenido en los análisis del elemento estructural mediante el uso de los transductores de 54 kHz, se encontró que el resultado de la resistencia a la compresión del elemento estructural es de 44,5 MPa,

asegurado con un 95 % confianza que el resultado obtenido se encuentra dentro de las bandas de análisis.

Para el análisis de evaluación a 7 días, se procedió con el mismo orden lógico demostrado en el apartado anterior, por medio del cual se obtiene una gráfica que presenta la ecuación lineal mostrada en la figura 57.

Figura 57

Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 7 días



Fuente: Elaboración propia, 2021.

En esta evaluación generada a partir de los resultados obtenidos a los 7 días, la resistencia a la compresión del concreto se presenta mediante un ejemplo que utiliza la nueva ecuación que, de igual manera, se ubica dentro del 95 % de confianza al utilizar las dos desviaciones estándar.

$$y = 0,0441x - 132,2$$

$$y = 0.0441*(4380) - 132.2 = 61,0 \text{ MPa}$$

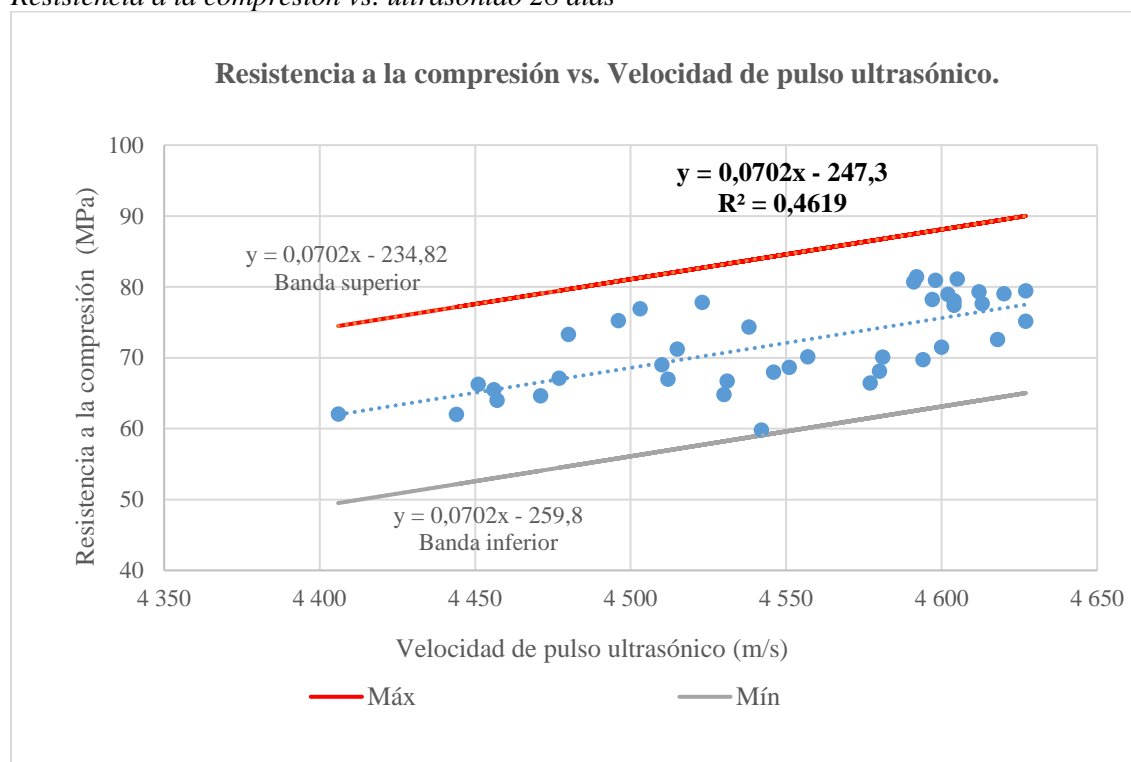
Para un resultado de 4380 m/s de velocidad de pulso ultrasónico ejecutado en la estructura a 7 días, se obtiene una resistencia a la compresión de 61,0 MPa.

Los resultados y gráficos logrados, presentados en las figuras 56 y 57, obedecen a una cantidad de resultados, un total de 20 especímenes de concreto hidráulico para la edad de 1 día y 20 especímenes obtenidos para la edad de 7 días.

Los resultados de los ensayos ejecutados a 28 días varían a 40 especímenes, debido a que, según lo establecido en la norma, se debían realizar dos especímenes de prueba como mínimo, a 28 días de 15 cm x 20 cm. Esta cantidad de ensayos representa la ecuación lineal, mostrada en la figura 58.

Figura 58

Resistencia a la compresión vs. ultrasonido 28 días



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Esta gráfica presenta la ecuación lineal a utilizar cuando se ejecutaron resultados de ultrasonido a tuberías de concreto seco a la edad de 28 días. Como ejemplo de la aplicación de la ecuación se presenta.

$$y = 0,0702x - 247,3$$

$$y = 0.0702 \cdot (4600) - 247,3 = 75,6 \text{ MPa}$$

Para un resultado de ultrasonido de 4600 m/s, se obtiene una resistencia de 75,6 MPa aplicando la ecuación presentada.

Como se presenta en las figuras 56, 57 y 58, todos los puntos de las relaciones entre resistencia a la compresión vs. ultrasonido a las edades de 1, 7 y 28 días, se encuentran dentro de las bandas establecidas que se generaron, a partir de la aplicación de las dos desviaciones estándar, con esto se asegura un margen de confianza ya que los valores obtenidos se encuentran en los rangos estipulados.

4.2.2. Correlación entre ensayo Tres Aristas vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico

Se obtiene el resultado de resistencia a la compresión a partir de ASTM C497 y del modelo SAP2000 v.22, utilizando la ecuación 10, da como resultado 81,2 MPa, en donde se utiliza un factor k de 2,2. La resistencia promedio de los cilindros a partir de ASTM C39 es de 79,6 MPa.

El rango establecido por el ACI 318 para el factor k es de 2,0 a 2,4, a partir de los resultados obtenidos se determinó una correlación entre ASTM C39 y ASTM C597, mediante un factor k de 2,2, se indicó una relación del 98,1 %, utilizando el factor k de 2,0, resulta una relación del 81,0 %; por último, con un factor k de 2,4 se obtuvo una relación del 85,7 %. Por tanto, en el presente trabajo de investigación se recomienda la utilización de un factor k de 2,2.

La relación establecida mediante ASTM C597, ejecutada la tubería en las secciones 1-2 y 3-4 del tubo 294, asociada al resultado de ultrasonido de los cilindros demuestran una relación del 98,9 % en la sección 1-2; en la sección 3-4, un 97,5 %; lo que demuestra una baja dispersión en los resultados de ultrasonido.

La relación establecida entre ASTM C497 y ASTM C597 es del 96,4 %, lo cual genera una alta correlación entre ambos métodos de ensayo, lo mencionado se describe en la tabla 21.

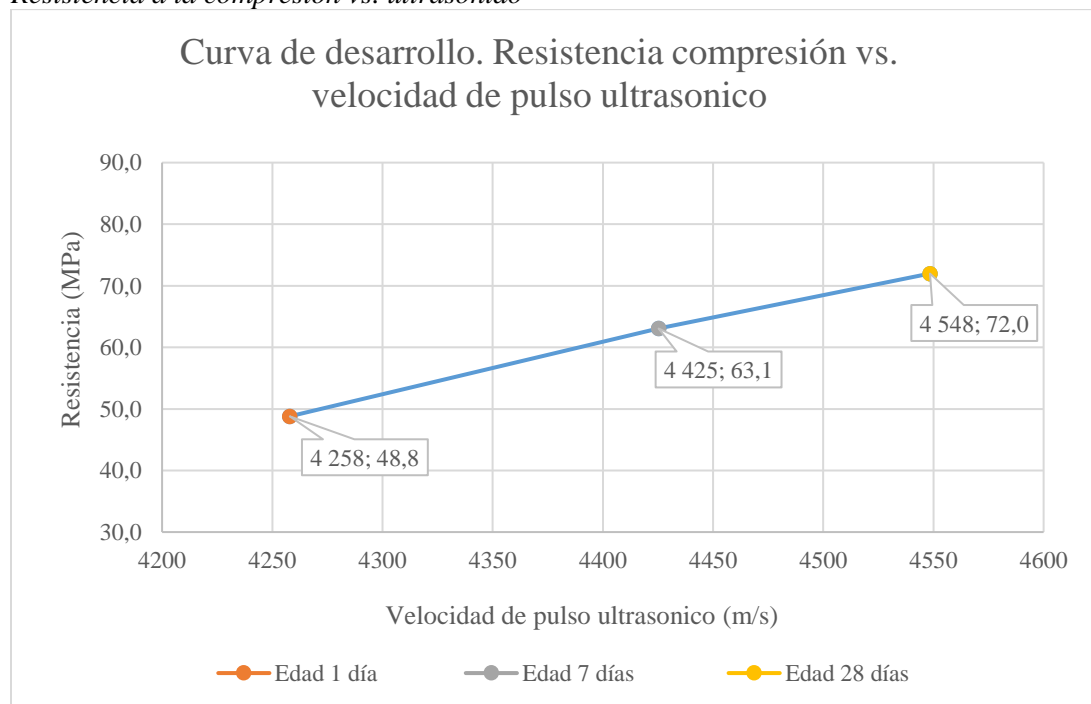
Tabla 21*Relación Tres Aristas vs. Velocidad de Pulso Ultrasónico*

Método de ensayo	Cilindros de concreto	Tubería de concreto	Factor de relación (%)
Resistencia a la compresión (MPa)	79,6	81,2	98,0 %
Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	4598	4516	98,2 %
Factor de relación Velocidad de Pulso Ultrasónico vs. Resistencia a la compresión	57,7	55,6	96,4 %

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.2.3. Curva de Desarrollo de Resistencia

Como parte de los resultados obtenidos por medio de los diferentes análisis, es posible mencionar la línea de tendencia a ganar resistencia a la compresión ASTM C39 del concreto hidráulico con el paso de los días, siendo una tendencia creciente de manera conjunta con los resultados de la velocidad de pulso ultrasónico ASTM C597.

Figura 59*Resistencia a la compresión vs. ultrasonido*

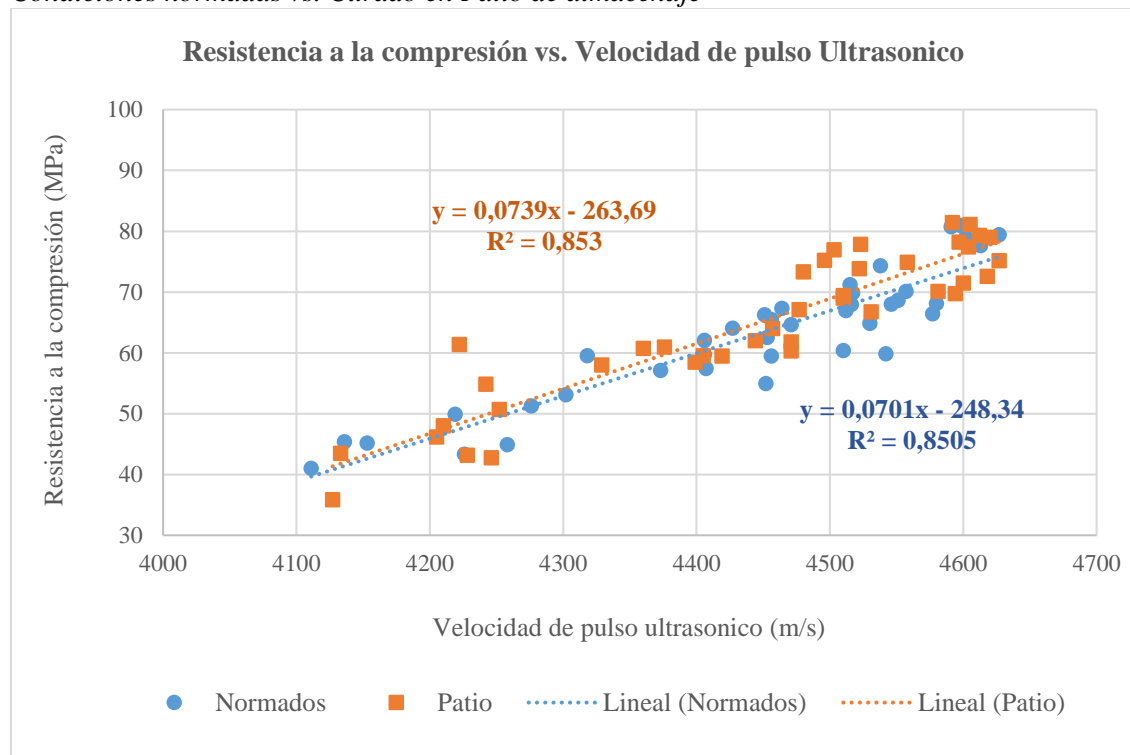
Fuente: Elaboración propia, 2021.

En detalle, la figura 59 presenta el promedio para cada una de las pruebas efectuadas, exponiendo el par ordenado de velocidad de pulso ultrasónico en (m/s) vs. resistencia a la compresión en (MPa), mostrando los diferentes periodos de medición ejecutados a 1, 7 y 28 días.

4.2.4. Condiciones de curado normado vs. condiciones curado en patio de almacenaje

Como parte de la investigación realizada, se presenta un gráfico en donde se comparan los resultados promedio de todos los cilindros de concretos curados en condiciones normadas, y los cilindros de concreto curados en el patio de almacenaje, la finalidad de las diferentes condiciones es la caracterización de la pérdida o ganancia de la resistencia del concreto vs. velocidad de pulso ultrasónico.

Figura 60
Condiciones normadas vs. Curado en Patio de almacenaje



Fuente: Elaboración propia, 2021.

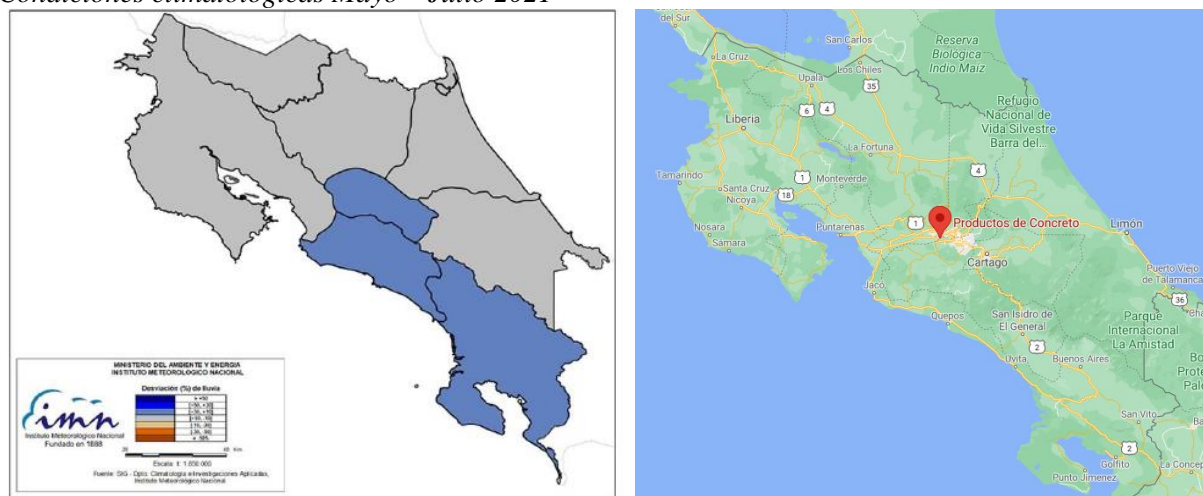
El gráfico de la figura 60 presenta un R^2 muy similar, esto es debido a la diferencia porcentual entre ambas condiciones, la cual se encuentra en el ámbito del 2,5% para la resistencia a la compresión y de apenas un 0,05% para la velocidad de pulso ultrasónico; en la tabla 21, se encuentran los promedios de los datos obtenidos en las diferentes condiciones de curado.

Tabla 22*Promedio de condiciones de curado*

Tipo de condición de curado	Resistencia a la compresión (MPa)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)
Normados	63,1	4446
Patio de almacenaje	64,7	4444

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Estos resultados son un indicativo de que el concreto en las condiciones de curado en patio de almacenaje no sufrió una afectación considerable, lo anterior se debe a las condiciones climatológicas presentes en la zona en la que se ejecutaron las pruebas, y que se dieron en el periodo comprendido del 03 de junio 2021 al 15 de julio 2021; generalmente, dichos meses son de época lluviosa, lo que ayudó considerablemente al proceso de curado de los cilindros que se encontraban en el patio de almacenaje.

Figura 61*Condiciones climatológicas Mayo – Julio 2021*

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2021.

Los colores presentes en el mapa de la figura 61, son un indicativo del escenario de sequedad o lluvia, cuanto más azul se indique en el mapa, es más lluvioso; cuanto más café, más seco; en comparación con el promedio, este es un indicativo de que las condiciones climatológicas favorecieron las condiciones de curado en el patio de almacenaje.

Como apartado final del proyecto de investigación, se definió el protocolo de evaluación para la tubería que se decidió analizar, ya que se debían considerar muchos factores para cada tipo de análisis, por ejemplo, el tipo de tubería, tipo de agregado, tipo de cemento, tipo de resistencia, tipo de aditivo, entre otros. Para cada análisis, se debía considerar todos los factores mencionados a fin de obtener las ecuaciones necesarias.

Se implementó el siguiente protocolo de evaluación para el análisis de la resistencia a la compresión por medio de ultrasonido en tuberías de concreto seco.

- Calibrar el equipo de ultrasonido en cada medición, con los bloques establecidos de fábrica.
- Identificar el tipo de mezcla de concreto a utilizar en la producción de tubería.
- Elaborar e identificar los cilindros de concreto mediante ASTM C1170 y ASTM C31.
- Ejecutar el ensayo bajo la norma ASTM C597 a los cilindros de concreto; seguidamente, ejecutar el ensayo ASTM C39.
- Identificar el acero de refuerzo en la tubería como elemento estructural.
- Analizar, mediante ASTM C597, la tubería en los puntos identificados por el profesional a cargo.
- Enviar la tubería al análisis, aplicando ASTM C497.
- Elaborar, mediante una ecuación lineal con dos desviaciones estándar, la relación entre resistencia a la compresión de cilindros vs. ultrasonido de cilindros.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y HALLAZGOS

5.1 Conclusiones

- Se logró determinar que la correlación entre el ensayo de ultrasonido ASTM C597 y la prueba de tres aristas, según ASTM C497, es de 96,4 %.
- La relación de ultrasonido ASTM C597 vs. la resistencia a la compresión ASTM C39 de los cilindros a 28 días, y preparados bajo la norma ASTM C1170, se representa mediante la ecuación $y = 0,0702x - 247,3$ que se encuentra dentro de las bandas establecidas, siendo la ecuación de la banda superior $y = 0,0702x - 234,8$, y la ecuación $y = 0,0702x - 259,8$ para la banda inferior; con las cuales se asegura un cumplimiento del 95 % de confianza en los resultados.
- No fue posible determinar una ecuación que relacionara el ensayo de ultrasonido ASTM C597 con la extracción de núcleos mediante ASTM C42, debido a que el equipo de producción de tuberías no compactó las mezclas de forma homogénea a lo largo de todo el elemento, lo cual generó relación de vacíos variables y fisuras aleatorias.
- Se logró desarrollar un protocolo para la evaluación de concretos secos en la elaboración de tuberías de concreto, mediante la técnica de ultrasonido con un 95 % de confianza al aplicar dos desviaciones estándar.

5.2 Recomendaciones

- Considerar la implementación de pruebas experimentales de relación con otros métodos de evaluación, como la prueba de rebote ASTM C805 y la prueba de penetración ASTM C403, con la técnica de ultrasonido.
- Realizar la ejecución de las pruebas en condiciones climatológicas secas, para determinar del grado de afectación en la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico en el concreto.
- Ejecutar un mínimo de tres pruebas de ultrasonido a cada probeta de ensayo, para la obtención de un promedio estadístico más confiable.
- Para lograr un mejor análisis de resultados, se recomienda la evaluación de diferentes tipos de tuberías y diseños de mezclas de concreto.
- Realizar más pruebas de ensayo ASTM C497, como miras a obtener una consistencia estadística más representativa.

5.3 Hallazgos

- Se tiene un impacto positivo sobre el ambiente en la reducción de desechos de concreto, mediante la utilización de la técnica de ultrasonido.
- La resistencia a la compresión de núcleos de concreto con diámetro de 50,8 mm no dio resultados favorables en resistencia a la compresión uniaxial, debido a la alta desviación en los resultados que se presentaron.
- Un posible factor que afecte la resistencia a la compresión de núcleos de concreto, es el tipo de curado que se implementa al elemento estructural.
- Realizar el coronamiento con azufre mantiene resultados con una dispersión baja en comparación con los otros métodos utilizados.

ANEXOS

Anexo A. Muestreo de concreto hidráulico



Anexo B. Equipos de medición

Anexo C. Caracterización del agregado fino 4,8 mm



INVESTIGACION Y DESARROLLO

PDC.LB.FO-21 CARACTERIZACION DE AGREGADO FINO

MATERIAL:	ARENA DE RIO 4,8 mm
IDENTIFIC:	GUAPILES
TÉCNICO:	Eduardo A C
FECHA:	15/6/2021

1- ANALISIS GRANULOMETRICO (ASTM C136)						Peso inicial (g)	873,8
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. Individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación	
						mín (%)	máx (%)
25,4	1 pulg.						
19,1	3/4 pulg.		0	0	100		
12,7	1/2 pulg.		0	0	100	100	100
9,5	3/8 pulg.		0	0	100	100	100
4,75	#4	0,0	0	0	100	80	100
2,36	#8	90,9	10	10	90	60	100
1,18	#16	210,4	24	34	66	40	85
0,6	#30	229,9	26	61	39	20	60
0,3	#50	183,5	21	82	18	10	45
0,15	#100	136,9	16	98	2	0	30
0,075	#200	5,4	1	98	2	0	18
0	Charola	16,4	2	100	0		
Total (g) =		873,4	M.F.= 2,85		Δ % de peso inicial: 0,0%		

2- GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION (ASTM C 128)

Peso muestra saturada superficie seca + recipiente =	740	g
Peso recipiente =	240	g
Peso muestra saturada superficie seca =	500	g
Peso picnómetro + D + agua =	947	g
Peso muestra secada al horno + recipiente =	741	g
Peso recipiente =	240	g
Peso muestra secada al horno =	501	g
Peso picnómetro + agua	639,1	g

Gravedad específica = G_{ss} =	2,61
--	-------------

Gravedad específica saturada superficie seca = G_{bss} =	2,60
--	-------------

Absorción = a% =	-0,2
-------------------------	-------------

3- HUMEDAD TOTAL (ASTM C 566)

Peso muestra original + recipiente =	1513,5	g
Peso recipiente =	550,5	g
Peso muestra original =	963	g
Peso muestra seca + recipiente =	1424,3	g
Peso recipiente =	550,5	g
Peso muestra seca	873,8	g

Humedad total = w% =	10,2
-----------------------------	-------------

4- PESO UNITARIO (ASTM C29)

	Suelto	Envarrillado
Peso unitario (kg/m³)	1510	1720

5- CONTENIDO DE MATERIALES MAS FINOS QUE LA MALLA #200 (ASTM C117)

Peso seco original de la muestra + recipiente =	1424,3	g
Peso recipiente =	550,5	g
Peso original de la muestra =	873,8	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	1407,9	g
Peso recipiente =	550,5	g
Peso seco de la muestra lavada =	857,4	g

% más fino que la malla #200 por lavado =	1,9
--	------------

Realizado:
Técnico Control de calidad

Revisado:
Coordinado Control de calidad

Aprobado:
Gerente de Ingeniería

Anexo D. Caracterización del agregado fino 7,9 mm



INVESTIGACION Y DESARROLLO

PDC.LB.FO-21 CARACTERIZACION DE AGREGADO FINO

MATERIAL: ARENA INDUSTRIAL 7,9 mm
 IDENTIFIC: GUAPILES
 TÉCNICO: EDUARDO A C
 FECHA: 15/6/2021

1- ANALISIS GRANULOMETRICO (ASTM C136) Peso inicial (g) 988,8

Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. Individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación	
						mín (%)	máx (%)
25,4	1 pulg.						
19,1	3/4 pulg.		0	0	100		
12,7	1/2 pulg.		0	0	100	100	100
9,5	3/8 pulg.		0	0	100	100	100
4,75	#4	60,3	6	6	94	80	100
2,36	#8	318,5	32	38	62	60	100
1,18	#16	200,7	20	59	41	40	85
0,6	#30	122,5	12	71	29	20	60
0,3	#50	90,9	9	80	20	10	45
0,15	#100	64,2	6	87	13	0	30
0,075	#200	42,8	4	91	9	0	18
0	Charola	90,1	9	100	0		
	Total (g) =	990,0	M.F.=	3,40		Δ % de peso inicial:	0,1%

2- GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION (ASTM C 128)

Peso muestra saturada superficie seca + recipiente =	848,8	g
Peso recipiente =	348,8	g
Peso muestra saturada superficie seca =	500	g
Peso picnómetro + D + agua =	947,1	g
Peso muestra secada al horno + recipiente =	828,9	g
Peso recipiente =	348,8	g
Peso muestra secada al horno =	480,1	g
Peso picnómetro + agua	638,7	g

$$\text{Gravedad específica} = G_{\text{mte}} = 2,51$$

$$\text{Gravedad específica saturada superficie seca} = G_{\text{base}} = 2,61$$

$$\text{Absorción} = a\% = 4,1$$

3- HUMEDAD TOTAL (ASTM C 566)

Peso muestra original + recipiente =	1570,3	g
Peso recipiente =	542,4	g
Peso muestra original =	1027,9	g
Peso muestra seca + recipiente =	1531,2	g
Peso recipiente =	542,4	g
Peso muestra seca	988,8	g

$$\text{Humedad total} = w\% = 4,0$$

4- PESO UNITARIO (ASTM C29)

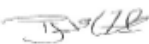
	Suelto	Envarillado
Peso unitario (kg/m ³)	1630	1830


5- CONTENIDO DE MATERIALES MAS FINOS QUE LA MALLA #200 (ASTM C117)

Peso seco original de la muestra + recipiente =	1531,2	g
Peso recipiente =	542,4	g
Peso original de la muestra =	988,8	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	1452,4	g
Peso recipiente =	542,4	g
Peso seco de la muestra lavada =	910,0	g

$$\% \text{ más fino que la malla \#200 por lavado} = 8,8$$

Realizado: 
 Técnico Control de calidad

Revisado: 
 Coordinado Control de calidad

Aprobado: 
 Gerente de Ingeniería

Anexo E. Caracterización del agregado grueso 16,0 mm



INVESTIGACION Y DESARROLLO

PDC.LB.FO-21 CARACTERIZACION DE AGREGADO GRUESO

MATERIAL: PIEDRA 16 mm
 IDENTIFIC: GUAPILES
 TÉCNICO: Eduardo A C
 FECHA: 15/6/2021

1- ANALISIS GRANULOMETRICO (ASTM C136) Peso inicial (g) 2614,7

Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. Individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación	
						mín (%)	máx (%)
25,4	1 pulg.				100	100	100
19,1	3/4 pulg.		0	0	100	100	100
12,7	1/2 pulg.	145,9	6	6	94	90	100
9,5	3/8 pulg.	726,8	28	33	67	40	70
4,75	#4	1812,2	62	95	5	0	15
2,36	#8	79,9	3	98	2	0	5
1,18	#16	11,7	0	98	2		
0,6	#30	0,0	0	98	2		
0,3	#50	0,0	0	98	2		
0,15	#100	0,0	0	98	2		
0,075	#200	22,4	1	99	1		
0	Charola	17,0	1	100	0		
Total (g) =		2615,9	M.F.= 6,20		Δ % de peso inicial: 0,0%		

2- GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION (ASTM C 127)

Peso muestra saturada superficie seca + recipiente =	3715	g
Peso recipiente =	553,5	g
Peso muestra saturada superficie seca =	3161,5	g
Peso muestra saturada sumergida en agua =	1985,0	g
Peso muestra secada al horno + recipiente =	3650	g
Peso recipiente =	553,5	g
Peso muestra secada al horno =	3096,5	g

Gravedad específica = G_{bc} = 2,63

Gravedad específica saturada superficie seca = G_{bss} = 2,69

Absorción = a% = 2,1

3- HUMEDAD TOTAL (ASTM C 566)

Peso muestra original + recipiente =	3249	g
Peso recipiente =	542,3	g
Peso muestra original =	2706,7	g
Peso muestra seca + recipiente =	3157	g
Peso recipiente =	542,3	g
Peso muestra seca =	2614,7	g

Humedad total = w% = 3,5

4- PESO UNITARIO (ASTM C29)

	Suelto	Envarillado
Peso unitario (kg/m^3)	1450	1610

5- CONTENIDO DE MATERIALES MAS FINOS QUE LA MALLA #200 (ASTM C117)

Peso seco original de la muestra + recipiente =	3157	g
Peso recipiente =	542,3	g
Peso original de la muestra =	2614,7	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	3142	g
Peso recipiente =	542,3	g
Peso seco de la muestra lavada =	2599,7	g

% más fino que la malla #200 por lavado = 0,6

Realizado:

Técnico Control de calidad

Revisado:

Coordinado Control de calidad

Aprobado:

Gerente de Ingeniería

Anexo F. Caracterización del agregado grueso 19,0 mm



INVESTIGACION Y DESARROLLO

PDC.LB.FO-21 CARACTERIZACION DE AGREGADO GRUESO

MATERIAL: PIEDRA 19 mm
 IDENTIFIC: GUAPILES
 TÉCNICO: EDUARDO A. C
 FECHA: 21/5/2021

1- ANALISIS GRANULOMETRICO (ASTM C136)						Peso inicial (g)	6297
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. Individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación min (%)	Especificación máx (%)
25,4	1 pulg.				100		
19,1	3/4 pulg.	0	0	0	100	90	100
12,7	1/2 pulg.	3061	49	49	51		
9,5	3/8 pulg.	2532,3	40	89	11	20	55
4,75	#4	526,6	8	97	3	0	15
2,36	#8	64,6	1	98	2	0	5
1,18	#16	24,3	0	99	1		
0,6	#30	0	0	99	1		
0,3	#50	0	0	99	1		
0,15	#100	0	0	99	1		
0,075	#200	46,2	1	100	0		
0	Charola	31	0	100	0		
Total (g) =		6286,0	M.F.=	6,80	Δ % de peso inicial:		-0,2%

2- GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION (ASTM C 127)

Peso muestra saturada superficie seca + recipiente =	6031,5	g
Peso recipiente =	554	g
Peso muestra saturada superficie seca =	5477,5	g
Peso muestra saturada sumergida en agua	3465,5	g
Peso muestra secada al horno + recipiente =	5940,5	g
Peso recipiente =	554	g
Peso muestra secada al horno =	5386,5	g

Gravedad específica = G_{ps} = 2,68Gravedad específica saturada superficie seca = G_{bss} = 2,72Absorción = $a\%$ = 1,7

3- HUMEDAD TOTAL (ASTM C 566)

Peso muestra original + recipiente =	7039,5	g
Peso recipiente =	549,5	g
Peso muestra original =	6490	g
Peso muestra seca + recipiente =	6846,5	g
Peso recipiente =	549,5	g
Peso muestra seca	6297	g

Humedad total = $w\%$ = 3,1

4- PESO UNITARIO (ASTM C29)

	Suelto	Envarillado
Peso unitario (kg/m ³)	1510	1610

5- CONTENIDO DE MATERIALES MAS FINOS QUE LA MALLA #200 (ASTM C117)

Peso seco original de la muestra + recipiente =	6846,5	g
Peso recipiente =	549,5	g
Peso original de la muestra =	6297	g
Peso seco de la muestra lavada + recipiente =	6805	g
Peso recipiente =	549,5	g
Peso seco de la muestra lavada =	6255,5	g
% más fino que la malla #200 por lavado =	0,7	

Realizado:
Técnico Control de calidad

Revisado:
Coordinador Control de calidad

Aprobado:
Gerente de Ingeniería

Anexo H. Certificado del Aditivo



CERTIFICADO DE ANALISIS

Toxement S.A por medio de este documento da constancia de conformidad al lote de fabricación referenciado, de acuerdo a los resultados obtenidos bajo procedimientos estandarizados del laboratorio.

Nombre de Producto: PLASTOL 7000

Código: 001774
 Número de Lote: BLC003807
 Fecha de Producción: 08.03.2021

Resultados reportados

Prueba	Especificación	Unidad	Resultado
Apariencia	Pass/Fail		PASS
Percent Solids	39-42 Percent (3 dec)	Percent (3 dec)	41.600
Densidad	1.06-1.1 kg/L	kg/L	1.090
Ph	5.6-7.6 ph units	ph units	7.00

Observaciones:

Fecha de Generación: 24.03.2021

ESTE CERTIFICADO ES EMITIDO ELECTRÓNICAMENTE Y TIENE VALIDEZ SIN FIRMA

Anexo I. Ultrasonido a los especímenes



Anexo J. Resistencia a la Compresión Uniaxial de Especímenes



Anexo K. Resultados de ultrasonido

Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
Tubo 301 P2	06/24/2021 2:20 PM	Pulse Velocity	4471 m/s	0.304 m	4471 m/s	68.0 μ s	1.00
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -3.2 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 300 V Probe Gain: 50x		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-004-0014 Software Version: 3.0.11 Hardware Revision: C1			
		Comment [Add]					
Tubo 292 N2	06/23/2021 9:30 AM	Pulse Velocity	4464 m/s	0.304 m	4464 m/s	68.1 μ s	1.00
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -3.1 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 300 V Probe Gain: 50x		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-004-0014 Software Version: 3.0.11 Hardware Revision: C1			
		Comment [Add]					
Tubo 270 N3	07/01/2021 12:08 PM	Pulse Velocity	4406 m/s	0.304 m	4406 m/s	69.0 μ s	1.00
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -3.1 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 300 V Probe Gain: 50x		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-004-0014 Software Version: 3.0.11 Hardware Revision: C1			
		Comment [Add]					
Tubo 282 N4	07/02/2021 2:51 PM	Pulse Velocity	4542 m/s	0.303 m	4542 m/s	66.7 μ s	1.00
Signal Curve 		Settings & Results Calib. Time Offset: -3.3 μ s Probe Type: P-wave Probe Freq.: 54 kHz Pulse Voltage: 300 V Probe Gain: 50x		Device Information Device Name: Pundit Serial Number: UP01-004-0014 Software Version: 3.0.11 Hardware Revision: C1			
		Comment [Add]					

Anexo L. Informe LanammeUCR I-0895-2021

 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	Informe de Ensayo	 LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS
Código: RC-080-v14 Válido desde 04/05/2021	Informe: I-0895-2021	ST: 0637-2021

1. Información del cliente:

Nombre: Productos de Concreto
Proyecto: Estudio de resistencia en tubería
Contacto: San Rafael de Alajuela, Alajuela.

2. Muestreos y métodos de ensayo:

Compresión y absorción de tubería de concreto (ASTM C497). (**)

(**) Muestreo o método de ensayo no acreditado.

3. Información de las muestras o especímenes de ensayo:

No. de identificación: Descripción:
 1223-2021 1 Tubo de concreto de 1200 mm de diámetro y 2.50 m de longitud. Identificado por el cliente como: hincado clase V, fecha de moldeo: 16-06-2021. Consecutivo #294.

Entregadas por: William Montero Villalobos

Fecha de recepción: 2021/07/14

Fecha de realización del ensayo: 2021/07/14

Lugar de realización del ensayo: LanammeUCR Sede Central

4. Información del muestreo:

Muestreo realizado por el cliente. Persona responsable de la muestra: William Montero Villalobos.

Código: RC-080-v14	Informe: I-0895-2021	ST: 0637-2021
--------------------	----------------------	---------------

5. Resultados:

Tabla 1. Resultados de compresión de tubería de concreto con refuerzo, muestra 1223-2021.

Muestra No.	Fecha Moldeo	Fecha Falt	Edad (días)	Diámetro (mm)	Longitud Efectiva (m)	Espesor Promedio (mm)	Carga grieta		Carga Falt		Resistencia a grieta	Resistencia a falta
							(kN)	(kgf)	(kN)	(kgf)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
1223-2021	2021/06/16	2021/07/14	28	1200	2.50	144.3	462	47114	852	86903	154	284

Nota: El espécimen cumple con los requisitos para tubería clase V según la norma INTE C376 ASTM C766

Aclaraciones:

- El presente informe de ensayo sólo ampara las mediciones reportadas en el momento y condiciones ambientales y de uso en que se realizó esta prueba, para las muestras indicadas en este informe.
- La fecha de emisión de este informe de ensayo corresponde con la fecha indicada en la firma digital de aprobación del Coordinador respectivo o su sustituto. Lo anterior no aplica para una emisión en físico de este documento.
- Este informe de resultados tiene validez únicamente en su forma íntegra y original.
- No se permite la reproducción parcial de este documento sin la autorización del Director del LanammeUCR.

Revisó:

Firmado digitalmente por FRANCISCO DAVID VILLALOBOS RAMIREZ (FIRMA)
 Fecha: 2021.07.16 15:16:57 -0600'

Ing. Francisco Villalobos Ramirez, M.Sc.
 Jefe Laboratorio de Estructuras

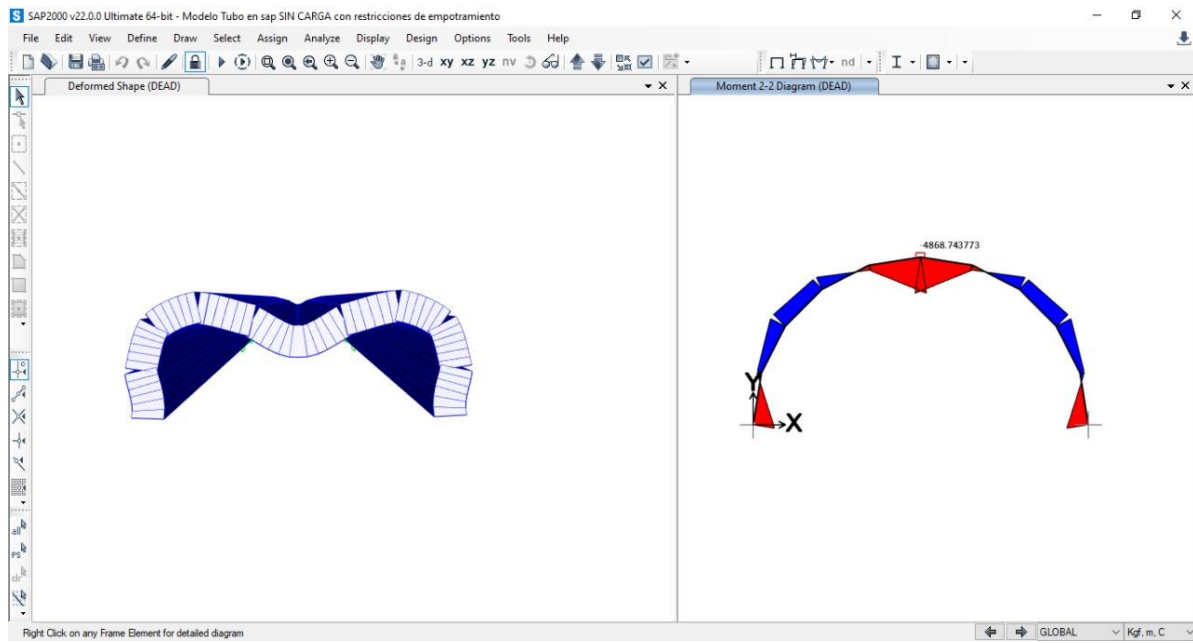
Aprobó:

Firmado digitalmente por LUIS CARLOS MESEGUER QUESADA (FIRMA)
 Fecha: 2021.07.19 07:53:30 -0600'

Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA
 Coordinador de Laboratorios
 Área de Construcción

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

Anexo M. Falla núcleos de concreto con capeo

Anexo N. Modelo de Análisis SAP 2000v.22

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akasaki, J., Fioriti, C., Queiroz, R., Fugii, A., y Pinheiro, J. (2016). Comportamiento de tubos circulares de hormigón simple producidos con adición de caucho de neumáticos. *Revista ingeniería de construcción*, 31(1). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000100003>
- Alejandro Moreno. (01 de junio de 2015). *La importancia de tomar muestras de concreto*. *Revista Noticreto* (115). Construcción y tecnología en concreto. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/junio2015/ingenieria.pdf>
- Amador, A. (s. f.). Ensayos a tracción directa. Más que ingeniería [Blog]. <https://masqueingenieria.com/blog/ensayos-a-traccion-indirecta-del-hormigon/>
- Ángeles, D. (2014). *Tecnología del concreto*. [Tesis de grado, Universidad Alas Peruanas]. Repositorio Academia.
- ASTM. (s. f.). *ASTM Catálogo de normas*. Consulta el 18 de agosto de 2021. <https://www.astm.org/catalog.html>
- CEMEX. (2019, 05 de abril). *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?* CEMEX. <https://bit.ly/3bp17ot>
- Centro de innovación tecnológica de materiales de construcción. (2017). *Ensayo de resistencia a la compresión*. <https://citemac.com/aseguramiento-y-control-de-calidad-en-obra/ensayo-de-resistencia-a-la-compresion/>
- Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción. (s. f.). Brochure corporativo. <https://citemac.com/wp-content/uploads/2017/05/brochure-corporativo-CITEMAC.pdf>
- Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía. (2017, 01 de diciembre). *Norma Técnica de Guatemala NTG41017 h1* [Archivo PDF]. https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2_concreto/NTG_41017_h1_ASTM_C39.pdf
- COTECNO. (2020). *Sistema de sondas Windsor*. Consulta el 18 de agosto de 2021. <https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/sistema-de-prueba-de-la-sonda-de-windsor/>
- DIRIMPEX. (s. f.). *Medidor ultrasónico portátil Pundit Lab+*. Consulta el 19 de agosto de 2021. <https://dirimpex.com/equipos/medidor-ultrasonico-portatil-pundit-lab/>

- Gonzales, G., Sandí, A. (2011, 29 de agosto). *Recomendaciones para obtener resultados confiables de resistencia de cilindros de concreto* [Archivo PDF]. [8390-11756-1-SM.pdf \(ucr.ac.cr\)](https://repositorio.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10784/17157/document%20-%202020-08-15T140446.782.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Hincapié, A. M, y Montoya, Y. J. (2005, 20 de enero). *La microestructura de los prefabricados de concreto*. Revista Universidad EAFIT, 41(140).
<https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17157/document%20-%202020-08-15T140446.782.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Blogger Incosuma (2017). Pruebas ultrasónicas en hormigón. *INCOSUMA Ingeniería de la Construcción*. <https://bit.ly/3zWjKu5> Instituto del cemento y del concreto de Guatemala.
- (2018). *Ensayos no destructivos para evaluación de la resistencia del concreto endurecido* [Archivo PDF].
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Pronostico climático FMS 2021* [Archivo PDF].
https://www.imn.ac.cr/documents/10179/29808/PerspClimCR_202104.pdf/9a43ebeb-106c-4849-abaa-49b69c1b3bb3
- Instron (s. f.). *ASTM C78 Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón*. <https://bit.ly/3yVTeje>
- Comisión Guatemalteca de Normas. (2017). Norma Técnica Guatemalteca.
https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2_concreto/NTG_41017_h1_ASTM_C39.pdf
- Laboratorio de concretos. (s. f.). *Cámara de curado de concreto* [Fotografía].
<https://www.ibslab.com.co/laboratorio-de-concretos/>
- Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales. (s. f.). *Compresión de tubería de concreto* [Archivo PDF]. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/6-estructuras/6.8-6.12.pdf>
- LGC Ingeniería Pavimentos SA. (2020). *Manual equipo Pundit PL-200 PE*. <https://bit.ly/2Vzd5aw>
- Moreno, A. (1 de junio de 2015). La importancia de tomar muestras de concreto: Variables que inciden en el análisis de resultados. *Construcción y Tecnología en concreto*.
<https://bit.ly/3l4J5vH>

- Pellicer Llopis, V. Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/35207/PROYECTO%20DEFINITIVO.pdf>
- Proceq. (s. f.). *Historia de Proceq-Una historia de 65 años de integridad, innovación y tecnología*. Proceq. <https://www.proceq.com/es/compania/historia/>
- Proceq. (s. f.). Los martillos de ensayos originales para evaluar las resistencia a la compresión y la homogeneidad. <https://bit.ly/2VtZjG4>
- Proceq (2015). *Manual de operación* [Archivo PDF]. proceq.com [Pundit PL-200PE Operating Instructions Spanish_high.pdf](#)
- Productos de concreto (s. f.). *Sistema de conducción Tubería de concreto* [Archivo PDF].
- Productos de Concreto. (2018) Sistema de conducción. Tubería de Concreto [Ficha técnica]. <https://bit.ly/3zTM6VX>
- Quintana, E. (s. f.). *Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico* [Archivo PDF]. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/enero2016/tecnologia.pdf>
- Rodríguez, J. G., Aubone, E., Mulet, J. (2015). *Prototipo de sonar ultrasónico* [Archivo PDF]. [Prototipo de Sonar Ultrasonico_2015 \(unsj.edu.ar\) Pag](#)
- Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México D.F: McGraw-Hill.
- TestMak. (s. f.). *Máquina automática para ensayo de compresión de serie HSF*. <https://www.testmak.com/es/Maquina-Automatica-para-Ensayo-de-Compresion-de-Serie-HSF>
- Utest. (s. f.) *Consistómetro Vebe*. <https://www.utest.com.tr/es/25956/Consist-metro-Vebe>
- Zúñiga, A. M, y M, C.O. (2002). *Implementación de metodología para el diseño de mezclas secas en elementos vibro-compactados*. [Tesis de grado, Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC.

GLOSARIO

1. **Concreto hidráulico:** Mezcla homogénea de agregados finos y gruesos con una determinada cantidad de cemento hidráulico y agua en algunos casos se utilizan aditivos.
2. **Aditivos para concreto:** Componentes de naturaleza orgánica que tiene como función modificar las propiedades físicas del concreto en estado fresco.
3. **Esclerómetro:** Equipo utilizado para la determinación de resistencia del concreto hidráulico.
4. **Frecuencia:** Numero de oscilaciones, vibraciones u ondas por una unidad de tiempo.
5. **Ultrasonido:** Parámetro para medición de la resistencia del concreto por medio de la velocidad V se expresa en m/s.
6. **Homogeneidad:** Mezcla de sustancias que exhiben composiciones de estructuras uniformes.
7. **Pulso:** Onda de presión que se emite en un determinado tiempo.
8. **Velocidad:** Magnitud física que relaciona la distancia y el tiempo para realizar un recorrido.
9. **Impacto:** Golpe violento que se genera entre dos objetos.
10. **Calibración:** Método de precisión que se logra mediante una muestra patrón antes de un determinado uso.
11. **Transductores:** Equipos que producen ondas de ultrasonido que rebotan en forma de Ecos, y que recibe los Ecos por medio del transductor.
12. **Correlación:** Es la forma numérica en la que la estadística logra la evaluación de una o más variables de resultados. Mide la dependencia de una variable con respecto a otra variable independiente.
13. **Gráficos:** Representación de resultados que presentan una relación entre sí, a través de figuras, signos o barras.
14. **Ensayo:** Es un medio que determina las características físicas o químicas de un elemento que se encuentre en estudio.
15. **VPU:** Velocidad de Pulso Ultrasónico.