

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS COMPARATIVO Y CORRELACIÓN DE LOS ENSAYOS:
ESCLERÓMETRO, ULTRASONIDO Y EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS,
PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y
MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

AUTORA: GALINDO REASCOS, KARINA ALEXANDRA

karina.galindo.r@hotmail.com

DIRECTOR: ING. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA, MBA

german.luna@epn.edu.ec

Quito, febrero 2022

DECLARACIÓN

Yo, **Karina Alexandra Galindo Reascos** declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

la Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Karina Alexandra Galindo Reascos

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación fue desarrollado por Karina Alexandra Galindo Reascos, bajo mi supervisión.

ING. GERMÁN LUNA, MBA
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la santísima Virgen por sus eternas bendiciones en mi vida, por la salud, pero sobre todo por brindarme sabiduría y fortaleza en los momentos más difíciles que he tenido que enfrentar para culminar mi carrera con éxito. A mis queridos padres Nelson y Rosita, por todo su cariño y apoyo incondicional, por inculcarme los mejores valores y estar siempre presentes celebrando mis éxitos. Papi a ti por ser esa persona a quien siempre he podido recurrir si necesito solucionar un problema, ya que por tu gran habilidad e ingenio sé que siempre encontrarás una solución y eso me hace sentir segura. Mami quiero agradecerte a ti de manera especial con todo mi corazón, por todos los esfuerzos que siempre hiciste por sacar adelante a nuestra familia, por ser mi mayor ejemplo de trabajo duro, superación y de que nunca es tarde para hacer lo que a uno realmente le apasiona y sobre todo por darme lo necesario para sacar adelante esta carrera, nada de esto hubiera sido posible sin ti.

A mis hermanas Tanya y Camila, por todo el cariño y los momentos compartidos y aunque no siempre lo demuestre las quiero demasiado y son muy importantes en mi vida. Cami quiero que sepas que tu llegada a nuestras vidas ha sido de las aventuras más bonitas que han podido pasarme además de los mayores aprendizajes que he tenido, desde entonces cada día he intentado ser la mejor versión de mí misma para que tengas un buen ejemplo a seguir y espero que esto sirva de inspiración para que recuerdes todo el potencial que tienes y que puedes ser todo lo que te propongas, que siempre estaré ahí para apoyarte y ayudarte en lo que necesites.

A mis abuelitos Elvita y Guillermo, por darme los mejores recuerdos de la infancia en aquel terrenito, los llevo siempre en el corazón, pero sobre todo a mi abuelita gracias por estar siempre orgullosa de lo que soy y por ser la mujer más amorosa y consentidora del mundo, sin duda es una parte fundamental en mi vida y me siento muy afortunada y bendecida por tenerla aún conmigo.

A mis primos: Ricky, Estefy, Bryan, Kevin, Rony, Kate, Isrra y mis queridos tíos: Richard, Karina, Sandro, Miriam, Carlin, por todas las risas compartidas y porque siempre me han demostrado el cariño y apoyo que una familia debe tener y hace de la nuestra una muy bonita. Pero de manera especial a mi tía Foshi por velar por mi familia y ese cariño tan especial que siempre nos da, mi eterno agradecimiento y siempre tendrá un lugar muy especial en mi corazón.

A mis tías Tere y Magdalena y a mis primos: Gisse, David, Andrés, Pedro, Kate y Dani por todo su cariño y siempre recibirme con los brazos abiertos en la tierra que quiero tanto. A mi tía Amandita un agradecimiento desde el fondo de mi corazón hasta el cielo, por haber sido una segunda madre cuando mis hermanas y yo más lo necesitamos y aunque me hubiera encantado poder disfrutar de su compañía por más tiempo sé que ahora está en un mejor lugar y desde allí nos envía sus bendiciones. A mis primas Anita y Elvita, aunque la vida nos unió de la manera más difícil imaginable sé que de ahora en adelante siempre podré apoyarme en ustedes cuando lo necesite al igual que ustedes en mí, las quiero muchísimo como a unas hermanas, gracias por todo chicas.

A mis amigos: Rita, Verito, Lupita, Richi, Daniel, Angie, Adrián, Javi por tantos años de amistad, por su cariño, apoyo y porque de una u otra forma estuvieron presentes durante este proceso. A Luis, por tu apoyo, tu cariño y todo lo compartido, eres muy especial para mí, la vida nos volvió a juntar y espero que podamos seguir compartiendo muchas cosas bonitas. A Alejandro, Saúl y Yadi, los hermanos que yo escogí, aunque me faltan palabras para expresar lo importantes que son en mi vida, gracias por tanto chicos, son las mejores personas que he conocido, los quiero demasiado.

A Meli, más que mi compañera de tesis mi gran amiga, gracias por siempre abrirme las puertas de tu casa, por tu sincero cariño y apoyo para que pudiéramos llevar a cabo este proyecto, lo logramos. Finalmente, gracias infinitas a la EPN por abrirme las puertas, a sus profesores por formarme de la mejor manera, al Ing. Luna por aceptar dirigir este proyecto y a todos esos ángeles en la tierra que me ayudaron para que este trabajo de titulación pudiera llevarse a cabo exitosamente.

DEDICATORIA

De una manera muy especial dedico este trabajo a mi madre en el cielo, este triunfo también es tuyo y aunque hoy no estés aquí para celebrarlo conmigo, espero que te sientas orgullosa de mí, gracias por todos los momentos compartidos, que tu bendición y guía nunca me falten. Te amo y te extraño mamá.

ÍNDICE

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	V
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4. ALCANCE.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	4
1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	5
1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	6
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. HORMIGÓN ARMADO.....	7
2.2. LA CONSTRUCCIÓN CON HORMIGÓN ARMADO EN EL ECUADOR	7
2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	8
2.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	9
2.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD	10
2.3.2.1. Strain Gage.....	12
2.4. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON EL PASO DEL TIEMPO	13

2.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	14
2.4.1.1. Cemento	14
2.4.1.2. Agua	15
2.4.1.3. Adiciones: cenizas volantes y humo de sílice	16
2.4.1.4. Relación agua/cemento	17
2.4.1.5. Parámetros térmico-ambientales:	18
2.4.1.6. Aditivos	20
2.5. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	21
2.5.1. ECUACIONES DE REGRESIÓN.....	22
2.5.1.1. Análisis de correlación	22
2.5.1.2. Análisis de regresión múltiple	23
2.5.1.3. Errores comunes en los análisis de regresión y correlación	23
2.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN EL HORMIGÓN	25
2.6.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	25
2.6.1.1. Martillo de rebote o Esclerómetro	25
2.6.1.2. Ultrasonido o Velocidad Sónica	28
2.6.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS	31
2.6.2.1. Extracción de núcleos.....	31
2.7. ESTUDIOS SIMILARES	36
2.7.1. PRIMER ESTUDIO.....	36
2.7.1.1. Equipo utilizado.....	36
2.7.1.2. Objeto de estudio	37
2.7.1.3. Ensayos	37
2.7.1.4. Parámetros mecánicos analizados	39
2.7.1.5. Análisis de resultados	43

2.7.2. SEGUNDO ESTUDIO.....	43
2.7.2.1. Equipo.....	44
2.7.2.2. Objeto de estudio.....	45
2.7.2.3. Ensayos.....	46
2.7.2.4. Parámetros mecánicos analizados.....	47
2.7.2.5. Análisis de resultados.....	50
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	52
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	52
3.1.1. SELECCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE ESTUDIO.....	52
3.1.1.1. Centro de Investigación de la Vivienda.....	53
3.1.1.2. Edificio Administrativo.....	55
3.1.1.3. Edificio de Química - Eléctrica.....	56
3.1.2. DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ARQUITECTÓNICA.....	58
3.1.2.1. Centro de Investigación de la Vivienda.....	58
3.1.2.2. Edificio Administrativo.....	58
3.1.2.3. Edificio de Química - Eléctrica.....	60
3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	62
3.2. ANÁLISIS DE MATERIALES.....	62
3.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	62
3.2.1.1. Centro de Investigación de la Vivienda.....	63
3.2.1.2. Edificio Administrativo.....	64
3.2.1.3. Edificio De Química - Eléctrica.....	65
3.2.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	65
3.3. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ESTUDIO...66	
3.4. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD MÍNIMA DE MUESTRAS A OBTENER.....	66
3.5. ENSAYOS.....	67

3.5.1. ESCLERÓMETRO.....	68
3.5.1.1. Procedimiento	68
3.5.2. ULTRASONIDO.....	69
3.5.2.1. Procedimiento	69
3.5.3. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN.....	72
3.5.3.1. Procedimiento	72
3.5.1.2. Obtención de la resistencia a la compresión.....	75
3.5.1.3. Obtención del módulo de elasticidad	76
3.6. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	77
3.6.1. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	77
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	82
4.1. ESCLERÓMETRO.....	82
4.1.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RELACIÓN DEL NÚMERO PROMEDIO DE REBOTE Y LA RESISTENCIA CILÍNDRICA	84
4.1.2. RESULTADOS GRÁFICOS DEL NÚMERO PROMEDIO DE REBOTE POR EDIFICIO	84
4.2. ULTRASONIDO.....	85
4.2.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RELACIÓN DISTANCIA RECORRIDA Y TIEMPO DE TRÁNSITO.....	86
4.2.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VELOCIDAD DE PULSO POR EDIFICIO.....	86
4.2.3. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE PULSO EXPERIMENTALES VS TEÓRICAS	89
4.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN.....	90
4.3.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN POR EDIFICIO	92

4.3.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS VS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN OBTENIDA CON ESCLERÓMETRO	94
4.4. MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN	95
4.4.1. RESULTADOS GRÁFICOS DEL ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN	97
4.4.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN EXPERIMENTALES VS TEÓRICOS	100
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	101
5.1. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	101
5.2. ESCLERÓMETRO	104
5.3. ULTRASONIDO	105
5.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN.....	106
5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD	107
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
6.1. CONCLUSIONES	109
6.2. RECOMENDACIONES.....	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXOS.....	120
ANEXO A PLANOS CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LA VIVIENDA.....	121
ANEXO B PLANOS EDIFICIO ADMINISTRATIVO	131
ANEXO C PLANOS EDIFICIO DE QUÍMICA - ELÉCTRICA.....	139
ANEXO D INFORMES DE LABORATORIO.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo de resistencia a la compresión de un cilindro de concreto	10
Figura 2. Curva esfuerzo-deformación	11
Figura 3. Paquete de Strain Gages	12
Figura 4. Strain Gages	13
Figura 5. Crecimiento de la resistencia del hormigón.....	14
Figura 6. Resistencia a la compresión de acuerdo con la relación a/c y el nivel de compactación	17
Figura 7. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función de la relación a/c	17
Figura 8. Cantidad de agua evaporada del hormigón en función de la humedad relativa ambiental, temperatura superficial del hormigón y velocidad del viento ...	19
Figura 9. Esquema de la relación entre el ensayo no destructivo y la resistencia a la compresión	21
Figura 10. Corte transversal del esclerómetro.....	26
Figura 11. Esclerómetro digital.....	26
Figura 12. Técnicas de medición en el ensayo de ultrasonido	29
Figura 13. Pachómetro	31
Figura 14. Relación diámetro del núcleo vs resistencia a la compresión	33
Figura 15. Distribución del agregado grueso a lo largo del radio de un cilindro estándar	35
Figura 16. Espécimen cúbico colocado en la máquina de ensayo	38
Figura 17. Ensayo del martillo de rebote Schmidt antes de la extracción de núcleos en un edificio existente.....	39
Figura 18. Relación entre el número de rebote y la resistencia de varios especímenes cúbicos de diferentes edades.....	40
Figura 19. Relación entre el número de rebote y la resistencia de hormigones de diferentes edades.....	41
Figura 20. Comparación de curvas obtenidas de edificios existentes y compañías manufactureras	42

Figura 21. Factores de corrección de resistencia para la prueba de rebote.....	42
Figura 22. Sistema operativo del martillo de rebote utilizado	44
Figura 23. Equipo de ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico (PUNDIT)	45
Figura 24. Ensayo de ultrasonido (izq.) y Ensayo de esclerómetro (der.) in situ...47	
Figura 25. Curva de correlación número de rebote/resistencia a la compresión...48	
Figura 26. Curva de correlación velocidad de pulso ultrasónico/resistencia a la compresión.....	49
Figura 27. Comparación de resultados de la prueba del Martillo de Rebote Schmidt con otros autores.....	50
Figura 28. Comparación de resultados de la prueba del Martillo de Rebote Schmidt con otros autores.....	51
Figura 29. Ubicación de la EPN	52
Figura 30. CIV- fachada frontal	54
Figura 31. CIV- fachada lateral.....	54
Figura 32. Edificio Administrativo - fachada frontal	55
Figura 33. Edificio Administrativo - fachada lateral.....	56
Figura 34. Edificio Química/Eléctrica - fachada frontal.....	57
Figura 35. Edificio Química/Eléctrica - fachada lateral	57
Figura 36. Martillo de rebote utilizado en el ensayo	68
Figura 37. Ensayo de rebote en una columna.....	69
Figura 36. Equipo utilizado en el ensayo de ultrasonido	70
Figura 39. Calibración del equipo utilizado en el ensayo de ultrasonido	70
Figura 40. Ensayo de ultrasonido – medición directa.....	71
Figura 41. Ensayo de ultrasonido – medición indirecta	71
Figura 42. Detección de la armadura de refuerzo	72
Figura 43. Extracción de núcleos de columnas, muros y vigas	73
Figura 44. Extracción de núcleos de losas	73
Figura 45. Núcleos extraídos.....	74
Figura 46. Núcleos cortados.....	74
Figura 47. Ensayo de resistencia a la compresión en la máquina universal	75

Figura 48. Ensayo de módulo de elasticidad.....	76
Figura 49. Software Minitab.....	77
Figura 50. Carga de datos en el software Minitab	78
Figura 51. Análisis estadístico con el software Minitab	78
Figura 52. Ventana – resumen gráfico	79
Figura 53. Informe de resultados.....	79
Figura 54. Análisis de datos – ensayo de esclerómetro	80
Figura 55. Análisis de datos – ensayo de ultrasonido	80
Figura 56. Análisis de datos – ensayo de compresión de núcleos	81
Figura 57. Rebote promedio vs Resistencia cilíndrica.....	84
Figura 58. Rebote promedio por edificio estudiado	84
Figura 59. Distancia recorrida vs Tiempo	86
Figura 60. Velocidad de pulso por edificio estudiado	86
Figura 61. Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas	89
Figura 62. Resistencia a la compresión por edificio estudiado.....	92
Figura 63. Variación de la resistencia a la compresión en núcleos vs esclerómetro.....	94
Figura 64. Curva esfuerzo-deformación muestra CEX-PP-1.....	97
Figura 65. Curva esfuerzo-deformación muestra CEX-PP-2.....	97
Figura 66. Curva esfuerzo-deformación muestra Muro 2 sept piso	98
Figura 67. Curva esfuerzo-deformación muestra Columna 1 piso1	98
Figura 68. Curva esfuerzo-deformación muestra Viga 1 quinto -2	99
Figura 69. Diagrama comparativo esfuerzo – deformación de las muestras ensayadas	99
Figura 70. Variación de los módulos de elasticidad experimentales vs teóricos .	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica	30
Tabla 2. Relaciones de longitud diámetro de núcleos de hormigón en función a su factor.....	32
Tabla 3. Factores de corrección de la resistencia cúbica obtenida en la prueba de rebote para concretos viejos	42
Tabla 4. Dosificación del hormigón	46
Tabla 5. Registro de ensayo de rebote y resistencia calculada - CIV	63
Tabla 6. Registro de núcleos extraídos y resistencia calculada - CIV	64
Tabla 7. Registro de ensayo de rebote y resistencia calculada – Edificio Administrativo.....	65
Tabla 8. Cantidad de muestras a obtener para los ensayos no destructivos y resistencia a la compresión	67
Tabla 9. Resultados del ensayo del esclerómetro.....	82
Tabla 10. (Continuación) Resultados del ensayo del esclerómetro.....	83
Tabla 11. Resultados del ensayo de ultrasonido.....	85
Tabla 12. Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas	87
Tabla 13. (Continuación) Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas	88
Tabla 14. Resultados del ensayo de compresión de núcleos	90
Tabla 15. (Continuación) Resultados del ensayo de compresión de núcleos	91
Tabla 16. Variación de la resistencia a la compresión de núcleos vs esclerómetro.....	93
Tabla 17. Resultados del ensayo de módulo de elasticidad.....	95
Tabla 18. (Continuación) Resultados del ensayo de módulo de elasticidad	95
Tabla 19. Variación de los módulos de elasticidad experimentales vs teóricos ..	96
Tabla 20. Intervalo de confianza – esclerómetro.....	101
Tabla 21. Intervalo de confianza – ultrasonido	101
Tabla 22. Intervalo de confianza – compresión de núcleos.....	101
Tabla 23. Datos dentro de los intervalos de confianza	102

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de analizar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de elementos de hormigón armado mediante los ensayos: esclerométrico, velocidad sónica y extracción de núcleos, para determinar correlaciones y porcentajes de variación.

Para lo cual se llevó a cabo una investigación de tipo experimental dividida en dos etapas; la primera con la toma de datos de los ensayos esclerométrico y velocidad sónica in situ, en las instalaciones del Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), el edificio compartido por las Facultades de Ingeniería Química y Agroindustria (FIQA) e Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE) y el Edificio Administrativo del campus de la Escuela Politécnica Nacional. Y la segunda, con la posterior extracción de núcleos en varios elementos previamente establecidos de los edificios mencionados, los cuales fueron ensayados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR).

Finalmente, se obtuvieron un total de 28 datos del ensayo de extracción de núcleos, 30 datos del ensayo de velocidad sónica, 24 datos del ensayo esclerométrico y 5 datos para módulo de elasticidad de las edificaciones de estudio. Los resultados de estos se recopilan y presentan en tablas y figuras, que muestran las diferencias existentes entre los ensayos no destructivos y destructivo realizados. La principal conclusión es que, en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón, la ecuación de correlación que daría resultados más confiables es aquella en la que se combinan los dos ensayos no destructivos (ecuación 16), puesto que tiene el menor error estándar, igual a 1.77 y su R^2 es igual a 0.9272, en comparación con las otras ecuaciones obtenidas, en las cuales se utiliza los resultados de estos ensayos de manera individual.

Palabras clave: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, hormigón, esclerómetro, ultrasonido.

ABSTRACT

This research work was carried out with the aim of analyzing the compressive strength and modulus of elasticity of reinforced concrete elements through the following tests: sclerometric, sonic velocity and core extraction, to determine correlations and percentages of variation.

For which an experimental type investigation divided into two stages was carried out; the first with the data collection of the sclerometric and sonic velocity tests in situ, in the facilities of the Housing Research Center (CIV for its acronym in Spanish), the building shared by the Faculties of Chemical Engineering and Agroindustry (FIQA for its acronym in Spanish) and Electrical and Electronic Engineering (FIEE for its acronym in Spanish) and the Administrative Building of the National Polytechnic School (EPN for its acronym in Spanish) campus. And the second, with the subsequent extraction of cores in several previously established elements of the buildings, which were tested at the Laboratory of Soil and Rock Mechanics (LEMSUR for its acronym in Spanish).

Finally, a total of 28 data from the core extraction test, 30 data from the sonic velocity test, 24 data from the sclerometric test and 5 data for the modulus of elasticity of the study buildings were obtained. The results of these are compiled and presented in tables and figures, which show the differences between the non-destructive and destructive tests carried out. The main conclusion is that, in the estimation of the compressive strength of concrete, the correlation equation that would give more reliable results is the one in which the two non-destructive tests are combined (equation 16), since it has the smallest error. standard, equal to 1.77 and its R^2 is equal to 0.9272, in comparison with the other equations obtained, in which the results of these tests are used individually.

Keywords: compressive strength, modulus of elasticity, concrete, sclerometer, ultrasound.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de titulación realizado en campo en las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional está dividido en seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. La introducción, en el cual se describe los antecedentes que sustentan al tema de investigación, el planteamiento del problema, los objetivos a cumplir, el alcance y la justificación para el desarrollo del trabajo.

Capítulo 2. El marco teórico, donde se engloba toda la teoría que sirve de base para la ejecución del presente trabajo. Se divide en conceptos fundamentales sobre el hormigón, sus propiedades mecánicas en estado endurecido: módulo de elasticidad y resistencia a la compresión simple, los factores de evolución y un método de predicción de la resistencia; los ensayos destructivos y no destructivos a realizar durante la etapa experimental. Así como la descripción del estado del arte en torno al tema.

Capítulo 3. Este capítulo corresponde a la metodología empleada, en el cual se detalla: sitios de estudio, características de los materiales que los componen, consideraciones previas a los ensayos y los procedimientos llevados a cabo para la obtención de la resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad, así como el software utilizado para el procesamiento de datos.

Capítulo 4. Este capítulo se enfoca en la presentación a manera de tablas y figuras, de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, tanto en campo como en laboratorio, conforme a la metodología descrita en el Capítulo 3.

Capítulos 5. Corresponde al análisis de resultados, en el cual se describen las particularidades encontradas en las tablas y figuras presentadas en el Capítulo 4.

Capítulos 6. Aquí se presenta las conclusiones y recomendaciones, que representan el epílogo de este trabajo.

Finalmente, se muestran las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados debido a su gran versatilidad y adaptabilidad a cualquier forma geométrica requerida para un elemento estructural, razón por la cual es preferido aún en aquellos países productores de acero a gran escala (Castro & Sánchez, 2019). “En nuestros países latinoamericanos, indudablemente el hormigón o concreto ocupa un primerísimo lugar en el desarrollo de la infraestructura urbana y rural” (Luna, 2014, p. 11).

Si al hormigón convencional se le adicionan varillas de acero se obtiene como resultado el hormigón o concreto armado. Esta combinación permite la construcción de diferentes elementos estructurales tales como: columnas, vigas, losas, etc. Las aplicaciones estructurales del hormigón armado sobrepasan a las de otros materiales de construcción (Castro & Sánchez, 2019). Día a día, en la profesión de ingeniería civil, es necesario conocer las propiedades, entre ellas la resistencia a la compresión simple y módulo de elasticidad, así como el comportamiento y la calidad del hormigón que se está utilizando en obra. De acuerdo con Villagómez (2017):

Tradicionalmente se ha evaluado la resistencia en sitio del hormigón por medio de cilindros curados en obra basados en la norma ASTM C31. Este ensayo destructivo es relativamente fácil de realizar en términos de muestreo, elaboración del espécimen y determinación de la resistencia. Por este motivo es el principal parámetro considerado por los códigos de diseño. Sin embargo, la resistencia de un cilindro curado en obra difícilmente representa la del hormigón en sitio porque es muy complicado lograr las mismas condiciones de colocación, compactación, terminado y curado. La resistencia a la compresión de cilindros curados en obra puede ser significativamente distinta. (p. 11)

Otro de los métodos (destructivos) de evaluación de la resistencia que más se realiza, es la obtención de núcleos cilíndricos de elementos estructurales, sin embargo, la desventaja de esta práctica es la reducción en la capacidad de carga de dichos elementos. Por el contrario, en cuanto a los métodos no destructivos para determinar la resistencia a compresión del hormigón, éstos presentan la principal ventaja de poder realizar muchas mediciones “in situ” a distintos elementos estructurales sin afectar la integridad de la estructura. Los más utilizados en el medio son el esclerómetro (ensayo del Martillo de Rebote Schmidt) y el ultrasonido (ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico), los cuales son una herramienta fundamental para además determinar la calidad del hormigón endurecido (Vallejo, 2017).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante toda la primera mitad del siglo XX, el hormigón armado ya se encontraba patentado en algunos países como material básico de construcción. Las estructuras de los edificios residenciales, educativos, etc. habitualmente metálicas o de madera, dejaban paso a este gris material que cumplía ampliamente, e incluso llegaba a superar las prestaciones de sus competidores, pues ya era posible la construcción de edificaciones con dimensiones y luces considerables (Martínez, 2021).

El hormigón es un material cuyas propiedades en estado endurecido mejoran con el tiempo, pues se van estabilizando y afianzando, por ejemplo, incrementa su resistencia de manera paulatina, disminuye sus deformaciones de manera asintótica, entre otras., razón por la cual, con los años se han desarrollado una serie de investigaciones para diversificarlo y proponer nuevos tipos de hormigones especialmente enfocados a nuevas aplicaciones constructivas. Sin embargo, la principal característica para clasificar los hormigones es su capacidad resistente a compresión (a partir de la cual se determina el módulo de elasticidad), ya que a la tracción no presenta un comportamiento significativo (Gómez, 2018).

Es por ello, por lo que, cuando existen dudas sobre aquella resistencia provocando incertidumbre respecto a la capacidad estructural de la construcción, se procede a realizar ensayos destructivos o no destructivos para verificar el material estructural que constituye el edificio nuevo o ya existente. De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo Estructuras de Hormigón Armado (NEC-SE-HM) (2015) “Los Ensayos No Destructivos (END) en el hormigón pueden estimar la resistencia del hormigón y son muy útiles para hacer comparaciones en una misma obra” (p. 94). Sin embargo, el hormigón armado al ser un material compuesto, sus diferentes componentes reaccionarán de diferente manera ante cada ensayo, posiblemente se evidenciará cambios físicos y en su composición, que alteren su comportamiento mecánico (Castro & Sánchez, 2019).

En el país hay muy poco conocimiento e información sobre las prácticas y procedimientos necesarios para elegir la técnica más adecuada; realizar los ensayos y mediciones de manera estandarizada, e interpretar los resultados, para predecir la resistencia a compresión del hormigón, del que está compuesto una estructura (Villagómez, 2017). Por lo mencionado anteriormente, es importante conocer la calidad del material utilizado en las construcciones, aún más cuando éstas son de importancia vital como una institución educativa, servicios públicos, entre otros.

Es así que, es necesario contar con una correlación que permita determinar ecuaciones para predecir las propiedades mecánicas de un hormigón dados los valores de uno u otro de los ensayos (destructivos y no destructivos) y que debería ser motivo de estudios complementarios como este.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de elementos de hormigón armado mediante los ensayos: esclerómetro, ultrasonido y extracción de núcleos, para determinar correlaciones y porcentajes de variación, de los resultados en ensayos no destructivos con relación a los ensayos destructivos.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un planteamiento experimental para determinar “in situ” y en laboratorio las propiedades mecánicas de elementos de hormigón armado mediante el uso de normas referentes al tema en análisis.
- Realizar ensayos no destructivos y posteriormente extraer núcleos en elementos estructurales de las edificaciones de estudio para obtener la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto.
- Determinar ecuaciones, para predecir el comportamiento del hormigón ante ensayos destructivos y no destructivos, mediante la correlación de los resultados obtenidos de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

1.4. ALCANCE

Este proyecto de investigación pretende analizar, cualitativa y cuantitativamente los ensayos no destructivos (esclerómetro, ultrasonido) y destructivos (extracción de núcleos), en elementos estructurales de hormigón armado de edificaciones existentes, para obtener una ecuación que los correlacione y sea de utilidad en futuros estudios de reforzamiento estructural. Las estructuras en estudio se encuentran dentro de las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional y corresponden al Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), el edificio compartido por la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria (FIQA) e Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE) y el Edificio Administrativo, los cuales tienen 23, 41 y 49 años respectivamente.

1.5. JUSTIFICACIÓN

1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En las construcciones civiles, es importante conocer las propiedades, comportamiento y calidad del hormigón que se ha utilizado en obra. Aydin y Saribiyik (2010) en su estudio titulado “Correlación entre la prueba del martillo de rebote Schmidt y ensayo destructivo de compresión para concretos en edificios existentes” asegura que el uso del martillo de rebote en edificios existentes puede ser utilizado para estimar la resistencia a compresión del hormigón, siempre y cuando sean empleadas las calibraciones y factores de corrección requeridos para hormigones viejos, además de que dicha prueba puede reducir o bien eliminar el

número de núcleos a extraer de una estructura si se usan apropiadamente las curvas de calibración.

Adicionalmente Shariati et al. (2011) en su investigación titulada “Evaluación de la resistencia a compresión de estructuras de concreto reforzado mediante pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y martillo de rebote Schmidt”, concluyen que el método del número de rebote (esclerómetro) es el más eficiente para predecir la resistencia del concreto bajo ciertas condiciones, además de que una combinación de las dos pruebas produce resultados más confiables en la estimación de dicha resistencia cuyos valores se acercan más a los valores verdaderos.

Por otro lado, existen otros autores que han llevado a cabo trabajos de investigación comparando ensayos destructivos y no destructivos mediante la elaboración de elementos estructurales tipo vigas en laboratorio, sin embargo; los resultados no son favorables, debido a que dichos elementos no presentan las mismas solicitaciones que al estar construidos en campo. Es así como, este proyecto surge con el propósito principal de profundizar en la interpretación de los resultados de los ensayos: esclerómetro, ultrasonido y extracción de núcleos realizados sobre el hormigón en estructuras con un hormigón calificado como viejo, y así recolectar suficiente información de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad alcanzada, para luego hallar las correlaciones existentes del ensayo destructivo con cada uno de los ensayos no destructivos que se realizará.

1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Mediante el método propuesto en la ASCE 41-17 (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings) y conforme a lo indicado en las normas ASTM e INEN; se llevará a cabo los ensayos “in situ” en la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria (FIQA), Edificio Administrativo y el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV). Mientras que en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA) se llevarán a cabo los ensayos destructivos, los resultados obtenidos permitirán recoger parámetros técnicos que facilitarán la interpretación de las propiedades del hormigón endurecido. Se procederá a analizar los datos obtenidos “in situ” y en el

laboratorio, con el fin de hallar la variación existente entre todos los ensayos que se han planteado evaluarlos y compararlos (Castro & Sánchez, 2019).

1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

De acuerdo con Carrillo y González (2004), cuando se lleva a cabo una modelación matemática como parte de la evaluación estructural de una edificación, se asumen las propiedades de los elementos que la conforman, si aquellos valores concuerdan con los reales, los resultados se acercarán aún más al comportamiento real de la estructura. Pero si esto no sucede, y los valores ingresados no concuerdan con la calidad real de los materiales, se estará perdiendo gran parte del trabajo que representa una modelación. Por lo tanto, se deben obtener los valores correctos de las características de los materiales de los elementos estructurales de la edificación de interés, para con ello realizar una modelación lo más cercana posible a la realidad.

Es así como, la importancia del presente estudio radica en dar a conocer el estado actual de las edificaciones antes mencionadas en términos de sus propiedades mecánicas, así como los resultados obtenidos mediante ensayos no destructivos y destructivos realizados sobre el hormigón, para luego compararlos y encontrar la dispersión que existe entre los resultados por medio de las distintas pruebas que se realizará. Además, este resultado servirá para los procesos de evaluación sísmica de edificaciones, y poder disponer de datos reales que alimenten los softwares de simulación y evaluación estructural.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. HORMIGÓN ARMADO

Uno de los materiales más usados en la construcción es el hormigón, el cual resulta de la mezcla en proporciones adecuadas de varios componentes como son: cemento, agregado grueso (ripio), agregado fino (arena), agua, y aditivos, conforme a lo obtenido en la dosificación diseñada, con o sin aditivos, los cuales pueden mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la mezcla, entre ellos están: reductores de agua, plastificantes, aceleradores, mejoradores de adherencia, entre otros (Cagua & Nates, 2017).

La mezcla de dichos componentes forma una piedra artificial, cuya característica principal es una gran resistencia a la compresión, por lo que es ampliamente usado en estructuras de todo tipo, sin embargo, su resistencia a tracción es reducida alrededor del 10% de la $f'c$. Es por ello por lo que la utilización de no menos que una cuantía mínima de acero en forma de barras corrugadas cumple la misión de absorber los esfuerzos de tracción y cortante a los que está sometida la estructura, esta unión es conocida como hormigón armado o reforzado (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015).

2.2. LA CONSTRUCCIÓN CON HORMIGÓN ARMADO EN EL ECUADOR

La construcción con hormigón armado en el Ecuador tiene sus inicios en los 50, el mismo que ocupó de inmediato el mercado hasta la actualidad. “En el Ecuador prevalece la influencia tecnológica norteamericana, de tal forma que nuestro actual código de construcciones es prácticamente una traducción del norteamericano” (Correa & Machado, 2012, p. 2).

El hormigón armado tiene un amplio uso en la construcción, ya que se lo puede utilizar para diferentes fines como, por ejemplo: instituciones educativas, multifamiliares, edificios de todo tipo, caminos, presas, puentes, obras industriales, etc., su implementación en sistemas de mampostería ya existentes se realiza de tal manera que se pueda obtener una estructura más elaborada y resistente. Generalmente; solo las casas de los sectores acomodados son en realidad de hormigón armado, ya que sus ocupantes poseen los recursos para pagar profesionales que cumplan tanto en el diseño como en la construcción, con las normas mínimas establecidas por el código correspondiente (Correa & Machado, 2012).

2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

La calidad del hormigón, así como sus propiedades mecánicas, dependen en gran medida tanto de la naturaleza, como de las proporciones de cada uno de sus componentes presentes en la mezcla; así como de otros factores ambientales tales como la humedad y temperatura, durante la elaboración y fraguado (Yancha, 2013).

Luego de su proceso de fabricación el hormigón presenta dos estados fundamentales. El estado fresco o plástico, durante el cual tiene facilidad de poder moldearse para su adaptación a los encofrados previstos, una vez colocado en dicho encofrado el cemento comenzará a reaccionar químicamente con el agua generando calor y dando origen a un nuevo compuesto en un proceso denominado fraguado, al final del tiempo de fraguado el hormigón deja de ser una pasta y adquiere el estado de hormigón endurecido. Si además de un buen colado del hormigón fresco y un buen curado posterior, los materiales con que se fabricó la mezcla tienen una buena calidad, sus propiedades tales como: la resistencia a los cambios de congelamiento, impermeabilidad, resistencia al desgaste y principalmente sus propiedades mecánicas, serán óptimas (Yancha, 2013).

De acuerdo con Estrada y Vivanco (2019):

Las propiedades mecánicas de los materiales deben obtenerse de los planos de diseño, especificaciones técnicas, TDR'S y otros documentos disponibles para el edificio existente. Cuando estos documentos no proporcionen información adecuada para cuantificar las propiedades del material, dicha información se complementará con pruebas de materiales basadas en resistencia a la compresión del hormigón y resistencia máxima de los refuerzos de acero. (p. 17)

2.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Cuando el hormigón se utiliza con fines estructurales, la resistencia a la compresión simple es la propiedad más importante en su estado endurecido, debido a que es la capacidad del material de soportar la mayor carga de servicio hasta la falla. La resistencia a la compresión es la relación de la carga máxima de ruptura a compresión dividida para el área de la sección transversal del espécimen, generalmente se representa como f'_c y cuyas unidades son Kg/cm^2 o Mpa (Cagua & Nates, 2017).

Existen hormigones denominados de baja resistencia cuyos valores de f'_c van desde los 170 [Kg/cm^2], un valor por debajo de los 210 [Kg/cm^2] que es el mínimo utilizado en viviendas (el cual suele llegar hasta los 280 [kg/cm^2]), por el contrario, existen hormigones de alta resistencia, cuyos f'_c superan los 350 [kg/cm^2] y son utilizados en casos especiales en los cuales el diseño así lo requiere. El procedimiento estándar de determinación de la resistencia a la compresión del hormigón se lo realiza mediante el ensayo de probetas cilíndricas que cumplen una relación altura: diámetro de 2:1, las cuales son sometidas a carga hasta la rotura en una máquina de carga universal, conforme se indica en la Figura 1.



Figura 1. Ensayo de resistencia a la compresión de un cilindro de concreto
Fuente: (Portland Cement Association, 2004)

2.3.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

El concreto no es un material elástico, ya que si a un espécimen se lo somete a esfuerzos de compresión crecientes hasta lograr que éste falle y si para cada nivel de esfuerzo se registra la deformación unitaria del material, se podría dibujar una curva que relaciona dichos parámetros. Uno de los factores que tienen influencia tanto en la resistencia a la compresión como en el módulo de elasticidad del concreto, es la relación agua/cemento, pues a menor valor de ésta, mayor será la resistencia y por ende el módulo de elasticidad se irá incrementando (Sánchez et al., 2020). El módulo de elasticidad se determina mediante la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria como lo que se habló anteriormente.

De acuerdo con el ACI 318-19 (2019) el módulo de elasticidad es igual a la pendiente de una línea trazada desde un punto sin esfuerzo o esfuerzo nulo hasta un punto con un esfuerzo igual al 45% de la resistencia a la compresión, utilizando la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto. Sin embargo, la ASTM C469 (2014) dispone que el módulo de elasticidad sea determinado utilizando el 40% de la resistencia a la compresión.

El módulo de elasticidad es un parámetro muy importante para el análisis de las estructuras de concreto ya que se lo utiliza para el cálculo de la rigidez de los elementos estructurales. De acuerdo con la Norma ASTM C469 (2014): “Los valores de módulo de elasticidad obtenidos con control de carga o velocidad de aplicación de carga son usualmente menores que los módulos derivados de una aplicación rápida de carga (como cargas dinámicas o sísmicas) y usualmente mayores cuando son obtenidos por aplicación lenta de carga o de duración extendida” (p. 1).

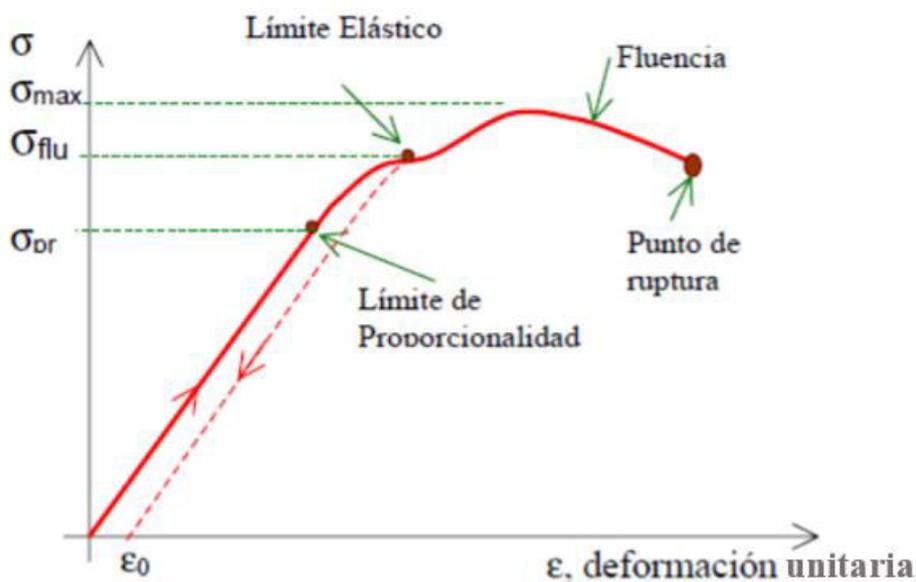


Figura 2. Curva esfuerzo-deformación

Fuente: (Soto & Marín, 2019)

De acuerdo con el ACI 318-19 (2019) el módulo de elasticidad para concretos de peso volumétrico normal (que varía de 2200 hasta 2400 kg/m³) que puede ser determinado de manera estimada mediante la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$$

Ecuación 1

Donde:

f'_c = Resistencia a la compresión del concreto en MPa.

2.3.2.1. Strain Gage

Los strain gages o galgas extensiométricas en español, fueron inventados en 1938 por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge, son un tipo de conductores eléctricos, utilizados para medir una serie de magnitudes tales como: presión, carga, torque, deformaciones, esfuerzos, entre otros. El strain gage metálico que es el que se usa más comúnmente, consiste en un cable muy fino que sigue un patrón sinuoso, sujeto a una película aislante igual de fina denominada “carrier”, la cual se adhiere de manera directa mediante un adhesivo al objeto del cual se desea estudiar su deformación (Giraldo & Delgado, 2019). Es una manera muy efectiva de determinar el módulo de elasticidad de un elemento de concreto en laboratorio, puesto que, al estar adherido a éste, a medida que se le va aplicando carga en una máquina de compresión universal y se va deformando, también lo hace la lámina.



Figura 3. Paquete de Strain Gages

Fuente: elaboración propia

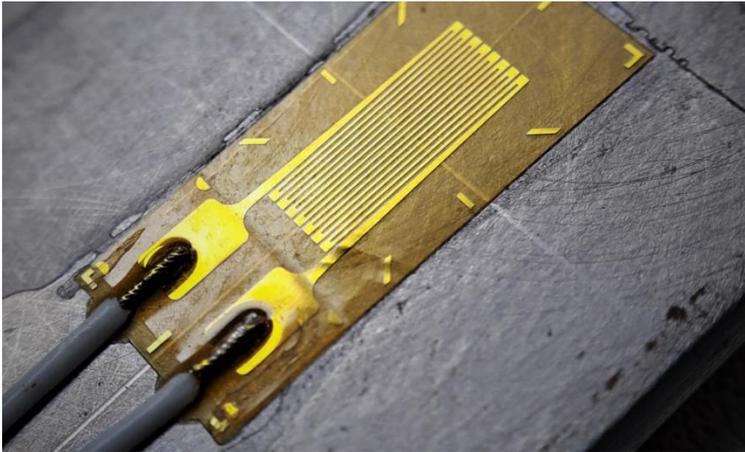


Figura 4. Strain Gages
Fuente: elaboración propia

2.4. EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON EL PASO DEL TIEMPO

Existen numerosos factores a los que está sometido el hormigón; tanto en el momento de su fabricación, en la puesta en obra, como a lo largo de su vida útil, que influyen en el desarrollo de su resistencia a la compresión como se detallará más adelante. Sin embargo; Carrasco (2020) afirma que los más predominantes son: la cantidad de agua, la cantidad de cemento y por ende la relación agua/cemento (a/c), así como la cantidad de agregado, la cantidad de aditivo (si es que se lo incluye en la mezcla) y el tiempo que se tarda desde la fabricación del hormigón hasta su colocación en la obra.

Como es sabido, a medida que pasa el tiempo, la resistencia del hormigón irá creciendo y pese a que esta propiedad puede medirse a diferentes edades, es a los 28 días el valor que más interesa y que caracteriza al material, ya que posterior a dicha edad, la evolución o crecimiento de la resistencia es realmente lento y se presenta de manera asintótica (Cagua & Nates, 2017).

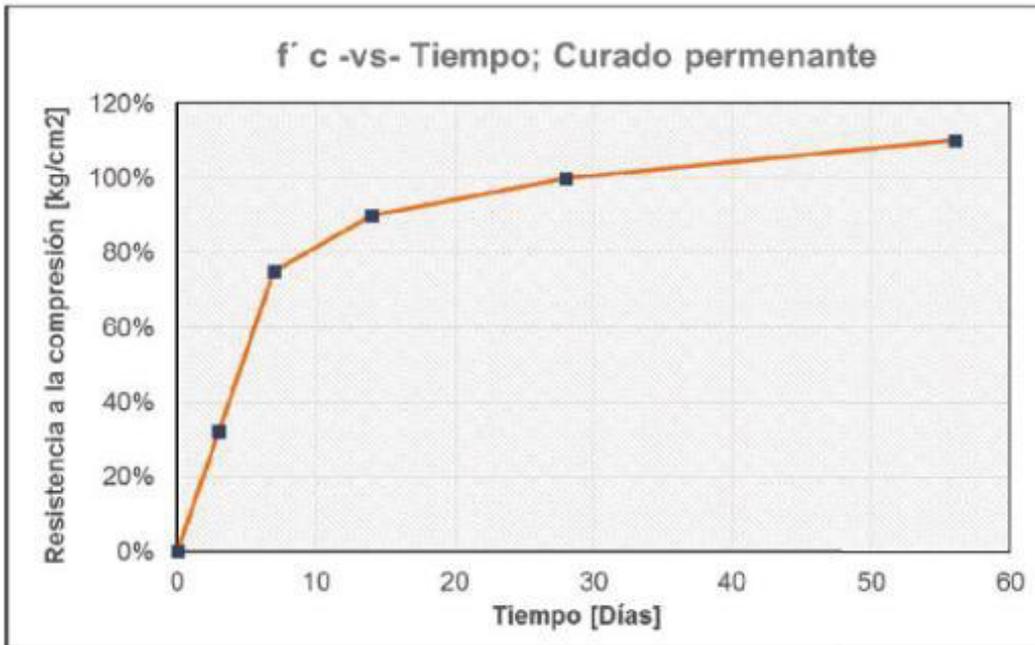


Figura 5. Crecimiento de la resistencia del hormigón

Fuente: (Luna, 2014)

2.4.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

2.4.1.1. Cemento

El cemento es el componente del hormigón encargado de unir toda la masa y mantenerla compacta para que sea capaz de cumplir su función estructural. De acuerdo con Cánoves (2013) las propiedades del cemento que influyen en el desarrollo de la resistencia del hormigón son:

- **Finura:** la velocidad de adquisición de resistencias del hormigón depende mucho de la velocidad de hidratación del cemento, la cual puede aumentar mientras más fino sea éste, ya que se produce una mayor superficie específica de contacto del cemento con el agua y así la velocidad de hidratación es mayor, principalmente a edades tempranas del hormigón.

- Compuestos alcalinos del Clinker y SO_3 : tanto el Na_2O y K_2O (óxidos metálicos alcalinos) poseen una gran atracción por el SO_3 , por lo que, si entre los compuestos del cemento se encuentra una suficiente cantidad de este último, se cristalizará como sulfato alcalino, además de que la forma de las partículas de SO_3 influirá en la cantidad de agua necesaria para llevar a cabo la hidratación del cemento. Aquello significa que será fácil y rápidamente soluble en el agua y por ende acelera rápidamente el desarrollo de resistencias a corto plazo en el hormigón, pero en contraposición la disminuye a edades de 28 días.
- Cal libre del Clinker: aquellos cementos con bajas concentraciones de cal, es decir, con contenidos entre el 0.5% y 3%, ayudan al aumento de las resistencias últimas, debido a que a menor contenido de cal es mayor el contenido de silicato combinado; sin embargo, esto también ocasiona que se incrementen los tiempos de curado. En otras palabras, un incremento del 1% en el nivel de cal, se traduce en la reducción de la resistencia a los 28 días de aproximadamente 15.3 kg/cm^2 (1.5 MPa).
- Composición de los componentes del Clinker (C_3S y C_3A): el contenido de C_3S en el cemento tiene una relación directa con el desarrollo de la resistencia del hormigón a las edades de 1, 2 y 7 días, mientras que a los 28 días lo que influye en la resistencia es la microestructura del Clinker y el contenido de impurezas en éste. Por ejemplo, un incremento del 10% de C_3S en la composición del cemento incrementaría en 35.7 kg/cm^2 (3.5 MPa) y 50.9 kg/cm^2 (5 MPa) las resistencias a las edades de 2 y 7 días respectivamente.

2.4.1.2. Agua

La calidad del agua utilizada en la mezcla del hormigón es muy importante en el desarrollo de su resistencia. La norma NTE INEN 2617:2012 define los requisitos que debe tener el agua que se va a utilizar en la mezcla. Esta calidad “depende de parámetros como el contenido de cloruros, hidratos de carbono, sulfatos y sustancias disueltas, como también de compuestos orgánicos no solubles. Estas impurezas pueden producir manchas superficiales (eflorescencias), disminución de resistencia del hormigón y corrosión de las armaduras” (Cánoves, 2013, p. 27).

De acuerdo con Cánoves (2013) los parámetros del agua que influyen en el desarrollo de la resistencia del hormigón son:

- El agua rica en CO_2 , al ser un buen disolvente puede alterar los carbonatos presentes en el cemento y transformarlos en bicarbonatos, y por consiguiente puede producir disminución en la resistencia del hormigón.
- El agua con contenido de iones de sulfato SO_4 , presenta una gran capacidad de reacción con los aluminatos de calcio produciendo una sal conocida como *Sal de Candlot*, la cual es altamente peligrosa ya que puede producir la destrucción del hormigón como consecuencia de su expansión cuando éste entre en contacto con el ambiente.
- El agua mineral, de igual manera puede producir expansiones en el hormigón dependiendo de las sales que contenga (álcalis, Litio, Sodio, Potasio, etc.).
- El agua lluvia con una alta cantidad de sustancias ácidas afecta al endurecimiento del hormigón imposibilitando una adecuada generación de la resistencia.
- Las sustancias orgánicas no disueltas presentes en el agua modifican la microestructura del hormigón, generando una pérdida de la resistencia.

2.4.1.3. Adiciones: cenizas volantes y humo de sílice

A los compuestos químicos que forman el cemento, se les puede adicionar cenizas volantes (compuestas por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y otros componentes minoritarios), las cuales pueden formar hormigones con mayor docilidad, lo que permite relaciones agua/cemento más bajas, y con un reducido calor de hidratación del hormigón debido a un menor contenido de cemento. Además, dichos hormigones también presentan mejor durabilidad, menos porosidad, se mantiene el proceso de hidratación constante (al producirse una reacción puzolánica entre el óxido de sílice y el hidróxido de calcio, se obtiene como resultado silicato tricálcico, sustancia muy reactiva en el proceso de hidratación del cemento) y mejor resistencia frente a diferentes ambientes (Cánoves, 2013).

Por otro lado, si a la mezcla del cemento se le adiciona humo de sílice: aumenta la cohesividad, lo que produce una disminución de la trabajabilidad e incremento en la cantidad de agua de amasado, por lo que los hormigones con este compuesto presentan menor asentamiento. Esto sin descuidar la disminución en la segregación del hormigón, ya que al rellenar los huecos que usualmente se forman en el hormigón fresco se evita la pérdida de agua por exudación (Cánoves, 2013).

2.4.1.4. Relación agua/cemento

Al disminuir la cantidad de agua de la mezcla, se reduce la porosidad y esto genera un aumento de la resistencia.

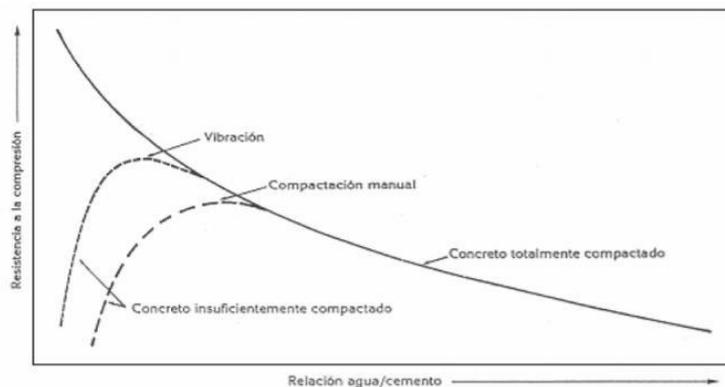


Figura 6. Resistencia a la compresión de acuerdo con la relación a/c y el nivel de compactación

Fuente: (Toirac, 2019)

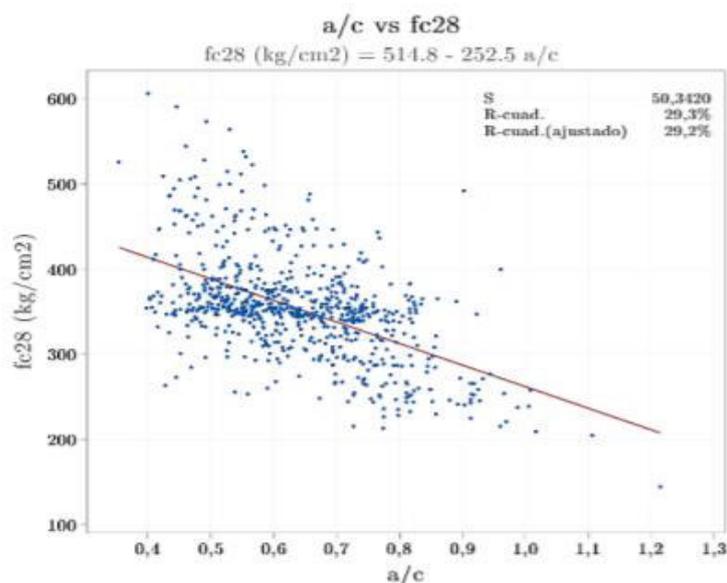


Figura 7. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función de la relación a/c

Fuente: (Carrasco, 2020)

Toirac (2019) afirma que el calculista debe fijar la resistencia de diseño del hormigón guardando una concordancia con la máxima relación a/c, ya que será más fácil el hormigonado cumpliendo con la resistencia requerida (lo que se controla con las muestras que se toman) que cumpliendo con la relación a/c, ya que este último parámetro no es comprobable de manera inmediata como ocurre con la resistencia, sino hasta que se realizan ensayos de porosidad, capilaridad, etc., y eso si la estructura comienza a mostrar problemas patológicos.

2.4.1.5. Parámetros térmico-ambientales:

De acuerdo con Cánoves (2013) los parámetros propios del ambiente que influyen en el desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón son: la temperatura, radiación solar y el viento, así:

- **Temperatura:** la temperatura es un factor de influencia en la cinética de hidratación, debido a que provoca cambios en la solubilidad de los componentes del cemento, y esto provoca cambios en la composición de los elementos que intervienen en la hidratación. Generalmente, una temperatura alta incrementa la velocidad de hidratación a edades tempranas del hormigón, y el desarrollo de la resistencia a edades posteriores a partir de ese punto frecuentemente se ve reducido.

Cuando incrementa la temperatura también incrementa la velocidad de evaporación, esto puede reducir la cantidad de agua libre lo que puede retrasar la velocidad e hidratación e inclusive en algunos casos puede llegar a pararla por completo, influyendo directamente en el desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón.

- **Radiación solar:** cualquier material dejado a la intemperie durante el día aumenta su temperatura como resultado de la radiación solar a la que ha sido expuesta su superficie y por el contrario durante la noche ese calor se pierde debido a que esa radiación es emitida hacia los alrededores. Este

fenómeno puede afectar a los agregados que se encuentran a la intemperie y por consiguiente al hormigón fresco o de edades tempranas.

La radiación solar sobre el hormigón produce un incremento de su temperatura, lo cual supone problemas al hormigón tanto en su estado fresco como en el endurecido, ya que existirá una excesiva evaporación de agua y por ende daños posteriores.

- Velocidad del viento: la velocidad del viento afecta a las propiedades del hormigón en estado fresco, ya que influye en la evaporación del agua. También tiene influencia en la resistencia y la durabilidad del hormigón, ya que la hidratación del cemento no es completa lo que conlleva a una disminución de las propiedades mecánicas y de la impermeabilidad del hormigón.

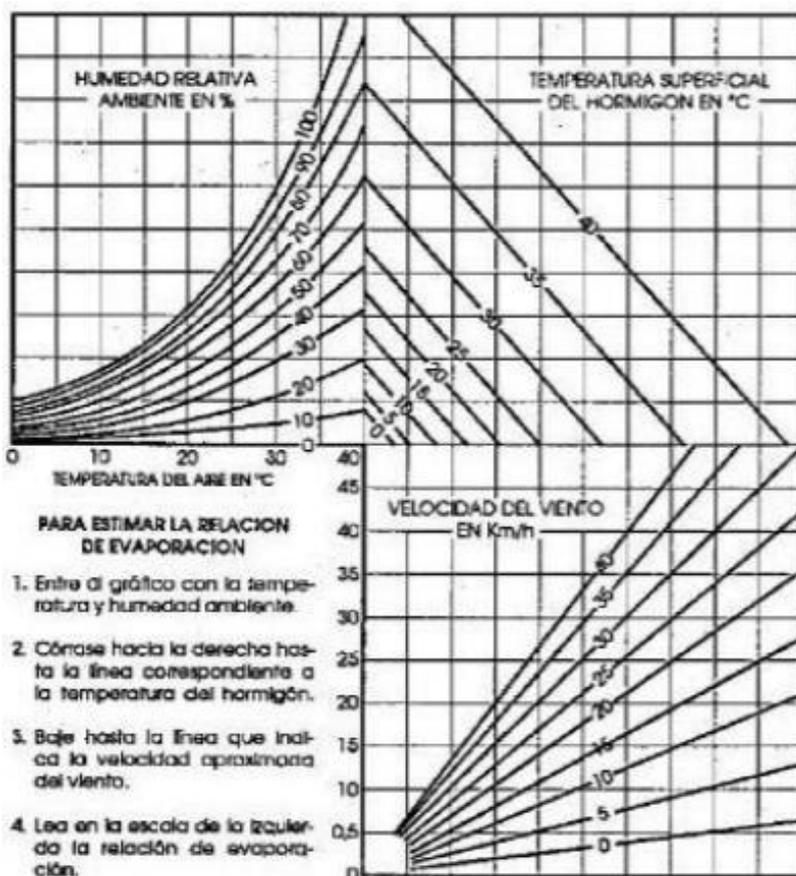


Figura 8. Cantidad de agua evaporada del hormigón en función de la humedad relativa ambiental, temperatura superficial del hormigón y velocidad del viento
Fuente: (American Concrete Institute, 1991)

2.4.1.6. Aditivos

Existen varios tipos de aditivos que pueden ser añadidos a la mezcla del hormigón: retardantes de fraguado, reductores de agua (plastificantes), simples o de alta actividad, cada uno con una función específica en función de su composición química, pero con una cosa en común, producir efectos sobre las etapas de inducción y aceleración del proceso de hidratación del hormigón, aumentando o disminuyendo dichas etapas en un determinado tiempo.

Los aditivos retardantes, generalmente desarrollarán resistencias después de los 28 días más elevadas que el hormigón convencional; sin embargo, si se excede la dosificación, dicho aditivo puede llegar a inhibir el fraguado, o por el contrario puede invertirse su función y convertirse en acelerante. Los aditivos superplastificantes incrementan la trabajabilidad y bombeabilidad del hormigón, así como producen mayor resistencia a cualquier edad en comparación a cuando no se usa aditivos en la mezcla.

Los aditivos acelerantes y anticongelantes, Como sus nombres lo indican, son aquellos que: aceleran el inicio del fraguado, liberan más rápidamente el calor de hidratación y aceleran el endurecimiento del hormigón (Sika). Además, permiten que el hormigón sea desencofrado y expuesto a condiciones adversas como cargas o hielo, en un menor intervalo de tiempo. Un aditivo estabilizador tiene influencia en la hidratación del cemento, de modo que el hormigón puede permanecer en estado plástico el tiempo que se necesite, pero cabe aclarar que se diferencia del aditivo retardante por el tiempo que se puede controlar las reacciones en las partículas cementantes.

Por su parte, los aditivos inhibidores de corrosión, que realmente deberían llamarse retardantes de corrosión más no inhibidores, logran que este proceso se retrase de manera que la vida útil de la estructura de hormigón armado se duplique o hasta triplique. La corrosión es un fenómeno que debe ser controlado, debido a que ocasiona una serie de esfuerzos al interior del hormigón, que luego de un tiempo terminan descascarando el recubrimiento del acero de refuerzo (Sika).

2.5. PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Un método sencillo para elaborar un modelo de predicción parte de: elaborar especímenes tanto para los ensayos no destructivos como para el ensayo destructivo de compresión, los cuales deben recibir un curado lo más parecido posible al empleado en la estructura; o bien de extraer núcleos si se trata de una estructura existente. Una vez hayan alcanzado la edad necesaria, estos especímenes elaborados en laboratorio serán sometidos a los ensayos no destructivos y posteriormente al ensayo destructivo de compresión; de no tener especímenes, pero sí núcleos extraídos el procedimiento será el mismo. En el procesamiento de datos, la variable independiente son los resultados promedios de los ensayos no destructivos y la variable dependiente son los resultados promedios de la resistencia a la compresión (Villagómez, 2017).

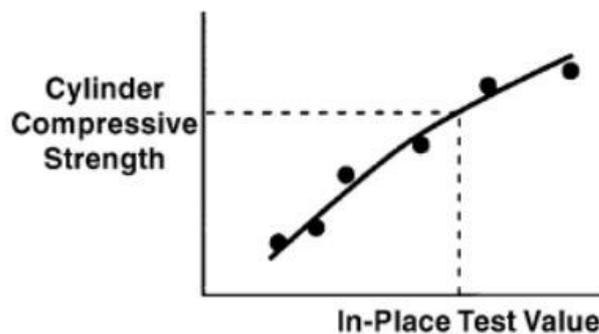


Figura 9. Esquema de la relación entre el ensayo no destructivo y la resistencia a la compresión

Nota. Tomado del (ACI Committee 228, 2003). Fuente: (Villagómez, 2017)

A partir de estos datos se realiza un análisis de regresión buscando la función con mayor correlación. La confiabilidad de las predicciones se encuentra limitada por la incertidumbre y variabilidad causadas por el método de ensayo, el entorno, la variabilidad de los materiales, la interpretación de los datos y el error humano. Se debe considerar que la exactitud de los modelos disminuye conforme aumenta la resistencia por lo que no es recomendable utilizar modelos fuera del rango de resistencias en el que fueron creados. (Villagómez, 2017, p. 17)

Al combinar varios ensayos no destructivos se busca: comparar resultados obtenidos por distintos métodos a manera de verificación, mapear rápidamente las zonas que necesitan un estudio más minucioso y mejorar tanto la confiabilidad como la precisión del modelo de predicción con respecto a aquel en el cual se han utilizado los métodos no destructivos por separado, por lo que, en caso de que un cambio en una de las propiedades del hormigón produzca efectos en la toma de datos de cada ensayo, se reducirían los errores (Villagómez, 2017).

2.5.1. ECUACIONES DE REGRESIÓN

2.5.1.1. Análisis de correlación

Los análisis de correlación son herramientas estadísticas utilizadas para describir qué tanto se relaciona una variable con otra(s). Generalmente el análisis de correlación está ligado a un análisis de regresión y con ello es posible explicar qué tan bien la línea de regresión predice los cambios de la variable dependiente. Sin embargo, esto no significa que los análisis de correlación no puedan llevarse a cabo solos. Es por ello por lo que los profesionales en estadística han desarrollado dos indicadores para describir la correlación existente entre las variables de interés, estos son: *el coeficiente de determinación* y *el coeficiente de correlación* (Levin et al., 2004).

El coeficiente de determinación se denota por r^2 , es la principal forma de medir la fuerza o grado de relación entre la variable dependiente y la(s) independiente(s) y debido a que para la determinación de las funciones de regresión se utiliza una muestra de puntos o datos, este coeficiente también es denominado coeficiente de determinación muestral. Mientras que el coeficiente de correlación es la segunda manera de medir la correlación entre las variables, se denota por r y es igual a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación muestral (Levin et al., 2004).

2.5.1.2. Análisis de regresión múltiple

Cuando se utiliza más de una variable independiente para el estudio de la variable dependiente y con ello intentar aumentar la precisión de la estimación, el análisis adquiere el nombre de “análisis de regresión múltiple y correlación”. La ventaja de este tipo de análisis es la posibilidad de utilizar más información disponible, ya que en algunas ocasiones la correlación entre dos variables no es suficiente para obtener una ecuación cuya estimación sea lo suficientemente confiable y con mayor precisión (Levin et al., 2004). Cuando se desea relacionar tres variables, como en este estudio, en el cual se busca encontrar una ecuación de correlación entre la resistencia a la compresión del concreto o el módulo de elasticidad con el número de rebote del ensayo esclerométrico y la velocidad sónica del ensayo de ultrasonido, se debe presentar una ecuación que adopte la forma de la ecuación 2 presentada a continuación:

$$\hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2$$

Ecuación 2

Donde:

\hat{Y} = valor estimado correspondiente a la variable dependiente

a = ordenada en Y

X_1 y X_2 = valores de las dos variables independientes

b_1 y b_2 = pendientes asociadas con X_1 y X_2 respectivamente

2.5.1.3. Errores comunes en los análisis de regresión y correlación

Es importante resaltar que este tipo de análisis de regresión y correlación deben ir acompañados de una adecuada forma de utilización e interpretación de los resultados, puesto que en ese caso pueden resultar muy útiles en la toma de decisiones, caso contrario pueden derivar en predicciones inexactas y mala toma de decisiones. Razón por la cual a continuación se mencionan algunos de los errores más comunes que suelen cometerse en el uso de los análisis de regresión y correlación, con el fin de tenerlos presentes y no caer en ellos en el desarrollo de esta investigación (Levin et al., 2004).

- **Extrapolación más allá del rango de datos observados:** Este es uno de los errores más comunes que se cometen y se refiere a la suposición de que la línea de estimación puede ser aplicada en cualquier intervalo de valores. Esto quiere decir que, aun cuando una determinada relación se cumpla satisfactoriamente para un determinado intervalo de puntos de la muestra, puede existir una relación muy diferente para otro intervalo de datos.
“Una ecuación de estimación es válida sólo para el mismo rango dentro del cual se tomó la muestra inicialmente” (Levin et al., 2004, p. 551).
- **Causa y efecto:** Otro de los errores en los cuales se puede caer, es el suponer que un cambio en una variable ha sido ocasionado por el cambio en otra variable. Esto es porque los análisis de regresión y correlación no determinan de ninguna manera la causa y el efecto de un suceso, al contrario, lo que se obtiene son estimaciones de cómo se relacionan aquellas variables.
- **Uso de tendencias anteriores para estimar tendencias futuras:** Cuando se recurre al uso de datos históricos para la estimación de las ecuaciones de regresión, es necesario evaluar la validez de los datos, puesto que las condiciones pueden cambiar con el paso del tiempo y una o más de las suposiciones utilizadas y de las cuales depende el análisis de regresión pueden cambiar o perder vigencia.
- **Descubrimiento de relaciones cuando no existen:** Este error suele darse cuando en ciertas ocasiones las personas encuentran una relación entre variables que realmente no tienen un punto o un vínculo en común, por lo tanto, como en cualquier otro análisis estadístico, debe conocerse las limitaciones del método que se esté aplicando, además de no dejar de lado el uso del sentido común, para evitar dar como resultado conclusiones injustificadas.

2.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN EL HORMIGÓN

2.6.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

La determinación de la resistencia a compresión del hormigón mediante ensayos no destructivos se ha utilizado como una técnica para: identificar zonas deterioradas que podrían necesitar de otro tipo de ensayos complementarios, evaluar estructuras existentes que hayan sufrido algún daño y monitorear el desarrollo de la resistencia del hormigón en construcciones nuevas. Principalmente para decidir el momento oportuno para: retirar las cimbras, desencofrar, finalizar el curado, o de estar planificado aplicar las fuerzas de postensado (Villagómez, 2017).

2.6.1.1. Martillo de rebote o Esclerómetro

El ensayo del esclerómetro o martillo de rebote Schmidt, fue desarrollado en el año de 1950 con el diseño del primer esclerómetro por parte de Ernst Schmidt quien lo patentó precisamente bajo el nombre de *Schmidt* y desde entonces es uno de los ensayos no destructivos más utilizados para medir la dureza de una superficie de una manera fácil y rápida mediante la determinación del número de rebote, para con ello verificar la homogeneidad del hormigón y estimar su resistencia (Hernández et al., 2017).

Adicionalmente, el ensayo esclerométrico ofrece la posibilidad de estimar la evolución del hormigón a través de la delimitación de zonas deterioradas o de baja calidad, todo ello sin necesidad de tener que destruir el elemento estructural de interés, por lo que, al no ser un ensayo invasivo no se altera la resistencia o funcionalidad de la edificación y se puede tomar medidas tanto de manera horizontal como vertical sin ninguna dificultad sobre cualquier superficie lisa (Hernández et al., 2017). Su realización se encuentra regulada por la norma ASTM C805M-18 (última versión de esta norma), denominada: “Método Estándar del Número de rebote en concreto endurecido”, en la cual se recalca que esta prueba por sí sola no es suficiente para determinar la aceptación o rechazo del hormigón en cuestión (ASTM International, 2018).

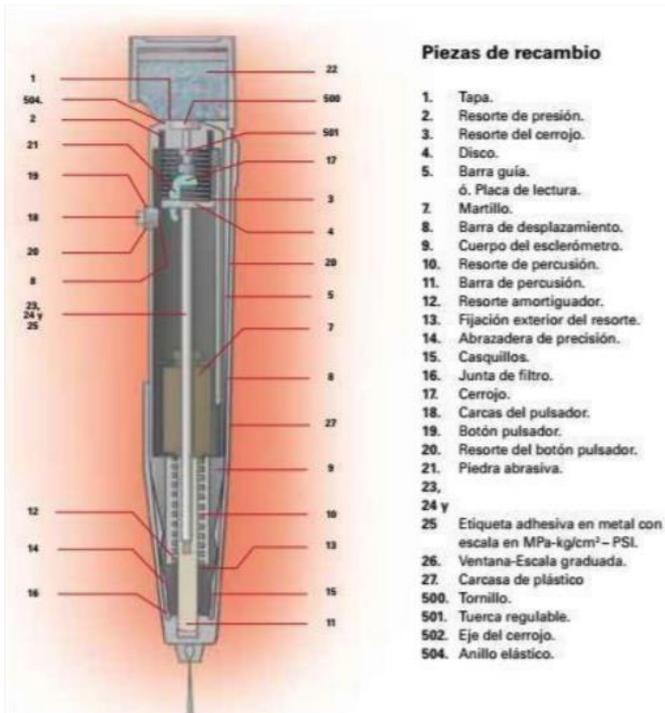


Figura 10. Corte transversal del esclerómetro

Fuente: (Siancas, 2021)

Actualmente, con la tecnología en constante evolución, ya es posible contar con el esclerómetro digital, el cual de manera automática permite estimar la resistencia a la compresión de hormigón, por medio del cálculo automático de la media, mediana, el número de rebote (R) y la resistencia a la compresión, como se indica en la Figura a continuación (Figura 11).



Figura 11. Esclerómetro digital

Fuente: (Hernández et al., 2017)

Preparación de la superficie de ensayo: Antes de comenzar la prueba es necesario cerciorarse que la superficie que será ensayada esté libre de pintura, polvo o cualquier otro material que no sea el hormigón, caso contrario el número de rebote se verá afectado. Adicionalmente, hay que tener en cuenta que, tanto para los hormigones con más de 6 meses, como con texturas rugosas, húmedas y en proceso de carbonatación se debe realizar un pulido superficial hasta una profundidad de 5mm; mientras que para concretos calificados como viejos, por su dureza se deberá pulir hasta 10mm de profundidad, para posteriormente efectuar las mediciones (Siancas, 2021).

Consideraciones del ensayo: De acuerdo con la ASTM C805M-18 (2018) al momento de realizar el ensayo esclerométrico es imperativo tener presentes las siguientes consideraciones para obtener resultados más certeros:

- El ensayo puede ser realizado de manera tanto horizontal como vertical; sin embargo, la posición normal del martillo es horizontal, ya que al ponerlo verticalmente la gravedad ejerce influencia sobre éste, derivando en valores de rebote más altos si el instrumento se encuentra hacia abajo y más bajos si por el contrario este se encuentra hacia arriba, mientras que si se lo utiliza formando un ángulo con la horizontal se obtendrán valores intermedios.
- El martillo debe ser apoyado firmemente con el émbolo perpendicular a la superficie y la presión se incrementará de manera progresiva hasta que el martillo impacte, sólo entonces se deberá tomar la lectura.
- Los martilleos deben realizarse a una distancia de por lo menos 2.5cm.
- Se deberá tomar un mínimo de 10 lecturas para trabajar con el resultado promedio.
- Aquellas lecturas que se alejen en más de 5 unidades del promedio deberán ser desechadas y se determina un nuevo promedio con las restantes; mientras que, si existen más de 3 lecturas que difieran en 6 unidades de aquel primer promedio, se descartarán todas las lecturas y el ensayo deberá repetirse.

- Las características del hormigón, tales como la presencia de vacíos o agregados gruesos influyen en los resultados, disminuyendo o incrementando los valores. Por lo que, este ensayo no es recomendado cuando en el hormigón existe la presencia de agregados con tamaños mayores a 2" o cuya resistencia es menor a 140 kg/cm².

2.6.1.2. Ultrasonido o Velocidad Sónica

Este ensayo no destructivo permite obtener datos cualitativos del hormigón, de manera que a través de la emisión de pulsos de ondas entre el elemento de interés y dos transductores (un transmisor y un receptor), es posible conocer información acerca de la homogeneidad, humedad, porosidad, separación de los agregados y por supuesto una estimación de la resistencia a la compresión del material (Porrás et al., 2019).

Su realización se encuentra regulada por la norma ASTM C597, denominada: "Método de prueba estándar para la velocidad de pulso a través del concreto", en la cual se indica que la velocidad de pulso ultrasónico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V = L/T$$

Ecuación 3

Donde:

L = Distancia entre los transductores, medida de centro a centro en metros,

T = Tiempo de tránsito de la señal en segundos.

Adicionalmente, la ASTM C597 indica que la velocidad obtenida (la cual se expresa en m/s), está directamente relacionada con: la densidad, el módulo dinámico de elasticidad y el módulo dinámico de Poisson del hormigón endurecido, por lo que se pueden obtener esos otros parámetros mediante la siguiente ecuación:

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

Ecuación 4

Donde:

E = Módulo dinámico de elasticidad

μ = Módulo dinámico de Poisson

ρ = Densidad

Tipos de medición: De acuerdo con Siancas (2021), este ensayo puede llevarse a cabo mediante tres maneras o técnicas:

- **Medición directa:** Consiste en colocar los transductores en caras opuestas, por lo que la trayectoria de la señal está bien definida y los resultados se obtienen con la mayor sensibilidad, por lo que se recomienda que se aplique esta técnica siempre que las condiciones así lo permitan.
- **Medición indirecta:** Esta técnica se emplea cuando la otra cara es inaccesible, por lo que los transductores se ubican en la misma cara, por lo que los resultados realmente indicarán la realidad del hormigón en la capa cercana a la superficie y no serán representativos a niveles más profundos. Adicionalmente, ya que la trayectoria de la señal está menos definida que en la medición directa, la longitud que se utiliza en el cálculo de la velocidad no debe ser considerada la distancia de centro a centro de los transductores y debe ser corregida mediante alguno de los métodos disponibles en la literatura.
- **Medición semidirecta:** Consiste en la toma de datos empleando trayectorias diagonales, por lo que la distancia real entre centros de los transductores deberá ser obtenida mediante el teorema de Pitágoras por tratarse de un valor en diagonal.

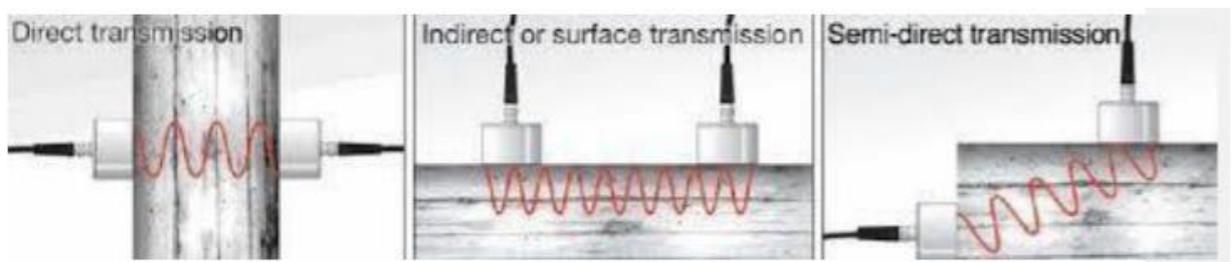


Figura 12. Técnicas de medición en el ensayo de ultrasonido

Fuente: (Siancas, 2021)

Preparación de la superficie de ensayo: De acuerdo con Siancas (2021), el ensayo puede ser llevado a cabo ya sea en núcleos, cilindros o elementos estructurales, siempre y cuando se tomen en cuenta las siguientes consideraciones al momento de seleccionar los puntos donde se realizarán las mediciones:

- La superficie de los puntos donde se llevará a cabo el ensayo deberá estar libre de rugosidades, huecos, fisuras o similares que pudieran interferir en la realización de la prueba.
- Si la superficie en cuestión es rugosa, previo al ensayo se deberá lijarla y nivelarla.
- Se recomienda que los puntos de medición no se encuentren localizados sobre o cercanos a las barras de acero de refuerzo, puesto que éstas también influyen en los resultados obtenidos.
- Los puntos de medición deben ser tomados de preferencia de manera aleatoria, pues esto dará una muestra más representativa de la calidad del concreto; sin embargo, mientras más grande sea la muestra, será mayor la cantidad de resultados obtenidos y con ello el espectro de comparación.

De acuerdo con E. Vidaud e I. Vidaud (2016), una vez que se han obtenido los valores de velocidad en el ensayo de ultrasonido, se puede categorizar al concreto conforme a lo indicado en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1.

Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

Condición	Velocidad [m/s]
Excelente	> 4575
Bueno	3660 < V < 4575
Regular a dudosa	3050 < V < 3660
Pobre	2125 < V < 3050
Muy pobre	< 2125

Fuente: adaptado de Vidaud y Vidaud (2016)

2.6.2. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

2.6.2.1. Extracción de núcleos

Detección de barras: Previo a la extracción de núcleos o cualquier otro ensayo destructivo en estructuras de hormigón armado, una actividad esencial que debe llevarse a cabo, es la ubicación de las barras de refuerzo. De hecho, esta actividad también suele ser requerida de manera preliminar en otro tipo de investigaciones no destructivas, tales como: comprobación del estado de estructuras nuevas o análisis de corrosión. El escaneo se lo realiza mediante el Profoskopeo también conocido como Pachómetro, el cual permite determinar la ubicación de las varillas longitudinales y transversales en los elementos de hormigón, así como la profundidad del concreto de recubrimiento, con el fin de evitar que el acero de refuerzo sea perforado o se extraigan pedazos de este junto con los núcleos (Siancas, 2021).



Figura 13. Pachómetro

Fuente: elaboración propia

Consideraciones del ensayo: El ensayo de extracción de núcleos se encuentra regulado por la norma ASTM C42M (2020), de acuerdo con la cual se deben considerar ciertos factores antes de que estos especímenes sean ensayados a compresión, comenzando con la obtención de la mayor cantidad de información disponible como: edad, tipo de curado, tipo de elemento estructural, entre otros. Otro punto importante que considera la norma es la dirección de extracción del testigo, la cual puede ser horizontal o vertical, en vista de que esto influye en los resultados que se obtendrán.

En cuanto al tamaño de los núcleos, la norma indica que cuando estos son extraídos de elementos estructurales como losas o paredes, el tamaño ideal debe ser de 94mm de diámetro o 2 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso utilizado, pero en vista de que en ocasiones se desconoce aquella información o por las condiciones del elemento se dificulta extraer testigos de tales dimensiones, no se impide la extracción de núcleos más pequeños, siempre y cuando el diámetro no sea menor a 50mm (ASTM International, 2020).

Los ensayos de resistencia a la compresión en los especímenes extraídos se los lleva a cabo conforme la norma ASTM C39 (2021), en la cual los resultados se verán afectados además por la relación longitud/diámetro de éstos, que como se mencionó anteriormente debe guardar una relación de 2 a 1, por lo que cuando ésta no se cumple se debe tomar un factor de corrección de los indicados en la Tabla 2, el cual deberá ser considerado en los resultados finales de la resistencia a la compresión. Adicionalmente, se deberá tener en cuenta que la norma sugiere el ensayo de por lo menos 3 muestras, cuyas edades no deben ser menores a 14 días.

Tabla 2.

Relaciones de longitud diámetro de núcleos de hormigón en función a su factor

Relación (L/D) Longitud/diámetro	Factor de corrección de esfuerzo
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1	0.87

Fuente: elaboración propia con base en datos de ASTM C39 (2020)

Relación diámetro del núcleo/resistencia a la compresión: Carrillo y González (2004) en su investigación acerca de este tema, determinaron que la resistencia a la compresión de un núcleo extraído de hormigón no es la verdadera resistencia que se obtendría de por ejemplo un cilindro estándar de 15x30cm (6"x12"). Dicha investigación demostró además que aquellos núcleos cuyos diámetros se encuentren en un rango entre 56 mm y 63 mm reflejan de una mejor manera la resistencia real del concreto.

Mientras que para los diámetros que se encuentran fuera de ese rango, es necesario realizar una corrección a la resistencia obtenida utilizando un factor de corrección, el cual se obtiene en función de factores como: el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso, la resistencia a la compresión del núcleo obtenida en el laboratorio y el diámetro de éste, para obtener un valor más cercano a la resistencia real, la cual finalmente es asumida como la de un cilindro estándar.

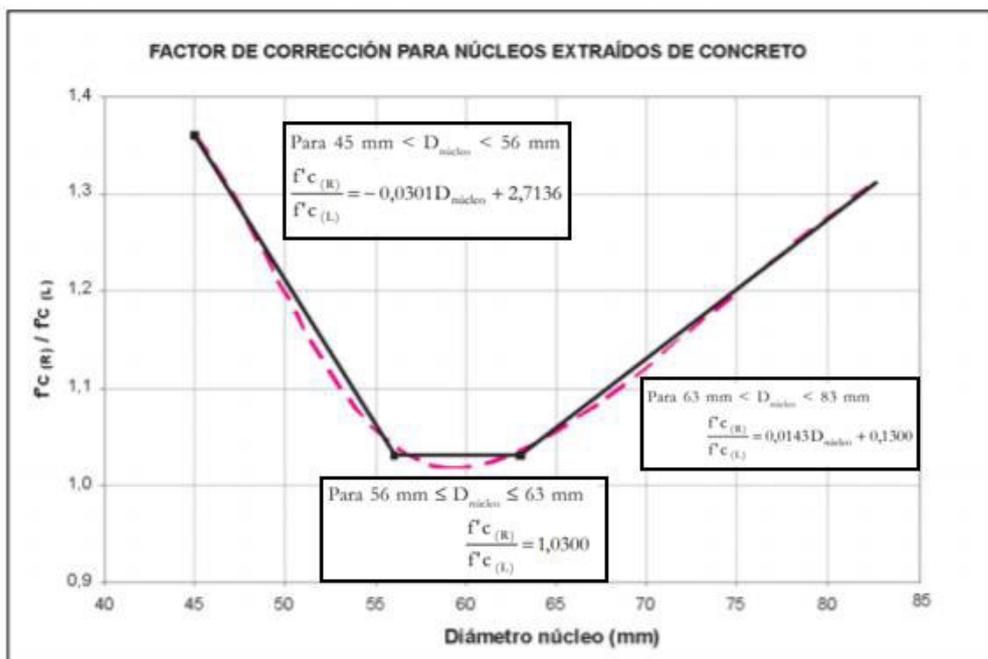


Figura 14. Relación diámetro del núcleo vs resistencia a la compresión

Fuente: (Carrillo & González, Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural, 2004)

De acuerdo con Carrillo y González (2004), el resultado de resistencia a la compresión que se obtendrá en laboratorio de los núcleos extraídos depende en gran medida de la homogeneidad y anisotropía del concreto, que son el resultado de la distribución de las partículas de agregado fino y grueso que conforman la mezcla, ya sea en vigas, columnas u otros. Si el diámetro del núcleo está entre los 45mm ($\approx 1.75''$) y 56 mm ($\approx 2.2''$), la diferencia en la resistencia obtenida puede ser de hasta 36.1%, precisamente porque en una muestra tan pequeña no se tendrá una buena homogeneidad de la mezcla, lo que hace prever que la resistencia a la compresión será realmente la de algunos, pero no de todos los componentes del concreto.

Si el núcleo tuviera 56mm de diámetro, la diferencia de resistencia a la compresión sería del 3%. Por lo tanto, existe una tasa de disminución de la resistencia de 3%/mm de diámetro, la cual empieza a reducirse a partir de los 56mm. En cambio, para el rango de diámetros comprendido entre los 63mm y 83mm, la tasa de disminución de resistencia es de 1,43%/mm de diámetro, la cual empieza a aumentar a partir de los 63mm (Carrillo & González, Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural, 2004).

En la Figura 15 puede apreciarse como en la parte central de la matriz cementante existe una mejor distribución de las partículas gruesas y finas de los agregados; lo que significa que en esa parte del recipiente la mezcla es homogénea, lo que permite obtener la resistencia real del hormigón. Todo lo contrario, a lo que sucede en los extremos, por ejemplo, un cilindro, donde la distribución de las partículas no es uniforme, obteniéndose valores de resistencia que no concuerdan con la realidad, esta particularidad se conoce como fenómenos de frontera. "Por lo tanto, cuando se extrae un núcleo de un elemento estructural, éste se debe obtener del centro del elemento para poder captar la homogeneidad de la mezcla y, así, su resistencia real" (Carrillo & González, 2004, pp. 24-25).

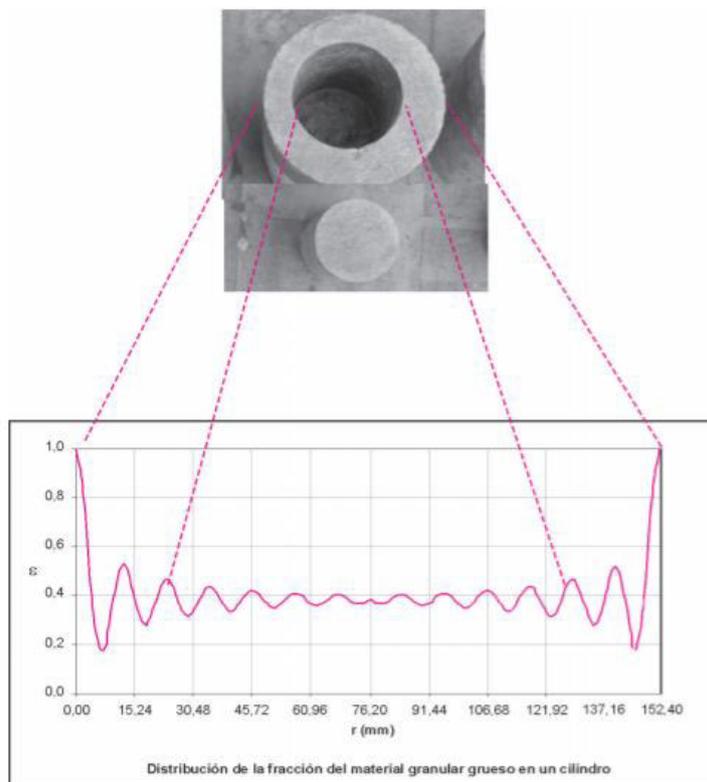


Figura 15. Distribución del agregado grueso a lo largo del radio de un cilindro estándar

Fuente: (Carrillo & González, Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural, 2004)

En la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de concreto reforzado hay una gran incertidumbre acerca del diámetro adecuado que se debe utilizar para determinar la resistencia a la compresión desde núcleos extraídos, los diámetros que se utilizan típicamente son de 2", 2.5", 3" y 3.5" aunque no exista un argumento técnico o científico para sustentar la utilización de estos diámetros. Aquellos núcleos que no reflejan la resistencia real del concreto, probablemente sea porque con sus diámetros no se ha cumplido las condiciones de frontera, por lo cual, en esos casos será necesario extraer núcleos con diferentes diámetros, a fin de conseguir una distribución más homogénea de los materiales (Carrillo & González, Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural, 2004).

2.7. ESTUDIOS SIMILARES

2.7.1. PRIMER ESTUDIO

En el año 2010, la Facultad de Educación Técnica de la Universidad de Sakarya en el Campus Adapazari de Turquía, presentó un estudio titulado “Correlación entre la prueba del martillo de rebote Schmidt y ensayo destructivo de compresión para concretos en edificios existentes”. En este estudio se determinó una correlación entre el ensayo no destructivo del martillo de rebote Schmidt y el ensayo destructivo de resistencia a la compresión simple, basándose en que existe una relación teórica entre la resistencia a la compresión del hormigón y el número de rebote del martillo. Además, se extrajo un determinado número de núcleos cilíndricos de cada una de las estructuras de concreto reforzado estudiadas, así como se obtuvieron datos de especímenes cúbicos elaborados y posteriormente ensayados a las edades de 28 y 90 días (Aydin & Saribiyik, 2010).

Una estructura existente que se investigará in situ por tener dudas en su calidad de construcción puede ser bastante antigua, en este caso, Aydin y Saribiyik (2010) afirman que es posible estimar la resistencia a la compresión del hormigón que la conforma si se establece una correlación entre el número de rebote obtenido del ensayo del martillo de rebote Schmidt con la resistencia obtenida de la extracción de núcleos. Además, que estas curvas de correlación pueden verse afectadas por: la relación agua/cemento, el tipo de agregado, el tamaño máximo del agregado grueso y por supuesto el cemento utilizado en la elaboración del concreto.

2.7.1.1. Equipo utilizado

La prueba del Martillo de Rebote Schmidt es comúnmente usada alrededor del mundo para estimar la resistencia del hormigón; debido a que es rápida, de fácil ejecución, simple, portátil, de bajo costo y sobre todo no destructiva. El tipo de martillo utilizado en la prueba afecta los resultados que se obtendrán. El ensayo se realizó de acuerdo con lo descrito en las normas: ASTM C805 (1993), BS 1881: Parte 202 (1986) y TS 3260 (1978) (Aydin & Saribiyik, 2010).

2.7.1.2. Objeto de estudio

Esta investigación proporciona diferentes factores de corrección para varios hormigones de estructuras existentes. Los factores de corrección fueron obtenidos comparando la resistencia a compresión de diferentes pruebas con el martillo de rebote. Los especímenes usados para obtener aquellos factores estuvieron conformados por, como ya se mencionó anteriormente, núcleos de estructuras existentes de concreto reforzado y especímenes cúbicos elaborados en laboratorio, para estos últimos se utilizó cemento portland ordinario y agregados de canteras locales o piedra caliza triturada (Aydin & Saribiyik, 2010).

2.7.1.3. Ensayos

Martillo de rebote o esclerómetro: Este ensayo comenzó con la cuidadosa selección y preparación de la superficie de concreto a ser ensayada, una determinada cantidad de energía es aplicada mediante el impacto del martillo sobre la superficie de prueba, la prueba fue realizada de forma perpendicular al elemento, debido a que el ángulo de inclinación del martillo afecta los resultados, así como el grado de saturación, carbonatación, temperatura, preparación y acabado de la superficie. Después del impacto, el número de rebote debe ser anotado, el proceso debe ser repetido por lo menos 10 veces para cada área ensayada.

Los especímenes cúbicos fueron curados durante 28 y 90 días y posteriormente secados con un paño limpio para obtener una superficie seca en sus caras opuestas que iban a ser ensayadas. Estos especímenes fueron sometidos a una carga de 7 NM/m² como se aprecia en la Figura 16, posteriormente accionando el martillo de rebote es suministrada una determinada cantidad de energía, conforme a lo indicado en las normas ASTM C 805 (1993) y TS 3260 (1978) (Aydin & Saribiyik, 2010).



Figura 16. Espécimen cúbico colocado en la máquina de ensayo

Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

Se impactó cada una de las caras opuestas de los cubos hasta obtener 24 lecturas, para poder ilustrar la sensibilidad del ensayo ante la presencia de agregados y huecos inmediatamente debajo del émbolo de carga. El número de rebote promedio y la desviación estándar fueron calculadas utilizando las ecuaciones 5 y 6 respectivamente:

$$fa = \frac{f1 + f2 + \dots + fn}{n}$$

Ecuación 5

$$S = \sqrt{\frac{(f_1 - fa)^2 + (f_2 - fa)^2 + \dots + (f_n - fa)^2}{n}}$$

Ecuación 6

Donde:

fa = Promedio del número de rebotes

fi = Número de rebotes

n = Número total de impactos

S = Desviación estándar.

Ensayo de compresión simple a los núcleos extraídos: Las muestras de núcleos de 75mm de diámetro fueron extraídas de manera horizontal de los elementos de hormigón, para determinar la correlación con la prueba del martillo de rebote Schmidt. Los elementos estructurales de hormigón fueron ensayados para obtener su número de rebote, previo a la extracción de los núcleos (Figura 17), de acuerdo con el procedimiento para ensayos destructivos indicado en la norma TS 10465 (1992) para obtener la resistencia a compresión del hormigón (Aydin & Saribiyik, 2010).



Figura 17. Ensayo del martillo de rebote Schmidt antes de la extracción de núcleos en un edificio existente

Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

2.7.1.4. Parámetros mecánicos analizados

Resumen de resultados de la prueba de esclerómetro en los especímenes cúbicos: Una vez que los especímenes cúbicos fueron ensayados para obtener su número de rebote, se les siguió aplicando carga hasta la falla, los resultados se muestran en la Figura 18.

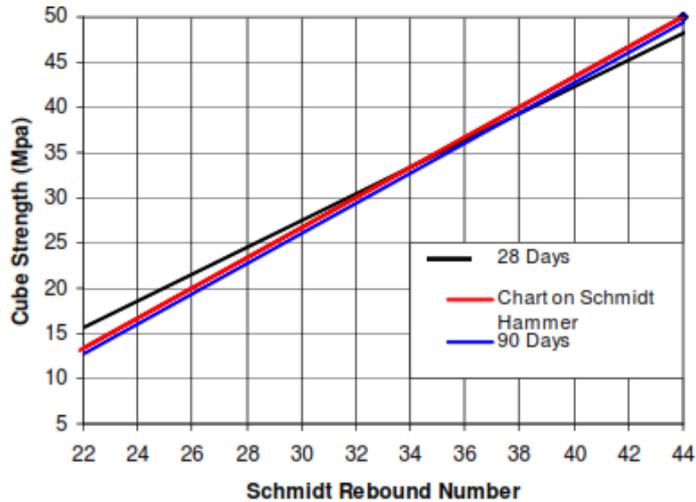


Figura 18. Relación entre el número de rebote y la resistencia cúbica de varios especímenes de diferentes edades
Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

Para el caso de los especímenes de 28 días, R^2 es igual a 0.856 y la ecuación correspondiente es:

$$y = 11.612A - 52.033$$

Ecuación 7

Por otro lado, para los especímenes de 90 días, R^2 es 0.9449 y su ecuación es:

$$y = 16.674A - 238.31$$

Ecuación 8

Donde:

y = Resistencia cúbica del hormigón, Mpa

A = Número de rebote

Resumen de resultados de la prueba de esclerómetro en los núcleos:

Se desconocen tanto las propiedades de la mezcla del hormigón como las edades de los edificios de los cuales se extrajeron los núcleos, los cuales podrían estar entre 1 a 40 años. Los resultados de la prueba se muestran en la Figura 19, cuya curva obtenida con R^2 igual a 0.8618, tiene la ecuación:

$$y = 15.424A - 269.53$$

Ecuación 9

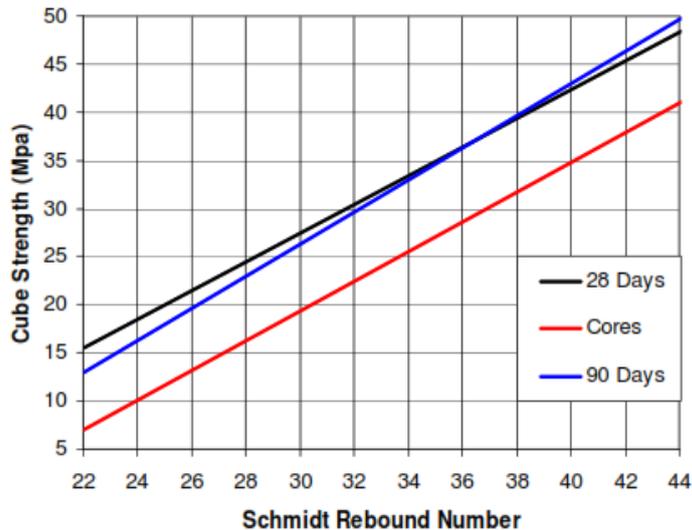


Figura 19. Relación entre el número de rebote y la resistencia cúbica de hormigones de diferentes edades
Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

Las gráficas demostraron que los valores de la resistencia cúbica del hormigón de los especímenes de 28 y 90 días muestran valores relativos más altos que los núcleos para el mismo número de rebote, dando lugar a un error para los usuarios de equipos de ensayos no destructivos.

Comparación de resultados de pruebas in situ para hormigones viejos:

En la Figura 20 se puede apreciar que las curvas obtenidas son casi paralelas; sin embargo, han demostrado diferente resistencia a la compresión para el mismo número de rebote. La curva que representa a una compañía manufacturera mostró valores más altos para concretos viejos, además fue necesario utilizar factores de corrección para transformar intervalos de resistencia obtenidos de la prueba del martillo de rebote, los cuales se muestran en la Tabla 3 para 8 intervalos de resistencia para concretos con edades mayores a 90 días. Se sugiere utilizar el rango de factores de corrección entre 0.50 – 0.80 para los valores de resistencia cúbica como se muestra en la Figura 19 (Aydin & Saribiyik, 2010).

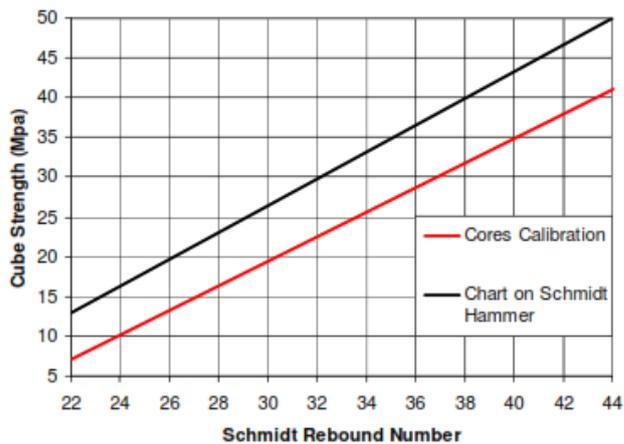


Figura 20. Comparación de curvas obtenidas de edificios existentes y compañías manufactureras

Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

Tabla 3.

Factores de corrección de la resistencia cúbica obtenida en la prueba de rebote para concretos viejos

Intervalo de resistencia MPa	Factor de corrección
<10	0.51
10 - 15	0.62
15 - 20	0.67
20 - 25	0.72
25 - 30	0.75
30 - 35	0.78
35 - 40	0.80
40 - 45	0.81
45 - 50	0.82

Fuente: elaboración propia con base en datos de Aydin y Saribiyik (2010)

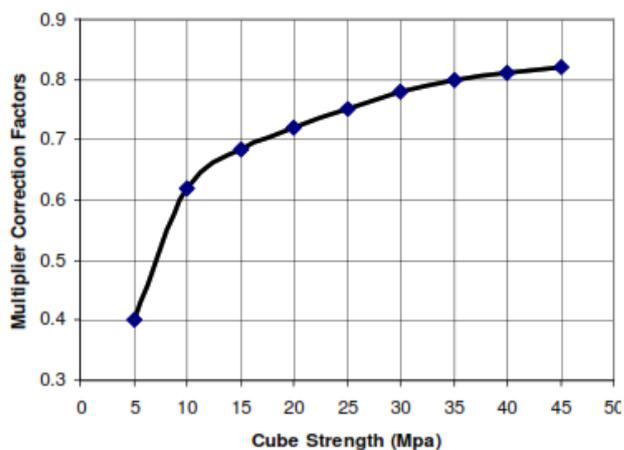


Figura 21. Factores de corrección de resistencia para la prueba de rebote

Fuente: (Aydin & Saribiyik, 2010)

2.7.1.5. Análisis de resultados

Una vez que se ha llevado a cabo la etapa experimental en esta investigación Aydin y Saribiyik (2010) llegaron a las siguientes conclusiones:

- En vista de que ante el mismo número de rebote se han obtenido diferentes resistencias cúbicas, para concretos viejos se recomienda utilizar los factores de corrección que van desde 0.50 a 0.80.
- En estructuras existentes de concreto reforzado, la prueba del martillo de rebote Schmidt puede verse influenciada por: características de la mezcla de concreto, carbonatación de la superficie, condiciones de humedad de la estructura, tasa de endurecimiento y tipo de curado.
- El ensayo no destructivo del martillo de rebote Schmidt puede ser utilizado para realizar estimaciones de la resistencia a la compresión del concreto y gracias a ello reducir la cantidad de núcleos que se extraerán de las estructuras. Sin embargo, será necesario contar con curvas adecuadas de correlación, para que incluso pueda prescindirse de la extracción de núcleos in situ.

2.7.2. SEGUNDO ESTUDIO

En el año 2011, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Malaya en Kuala Lumpur-Malasia, presentó un estudio titulado “Evaluación de la resistencia a compresión de estructuras de concreto reforzado mediante pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y martillo de rebote Schmidt”. En dicha investigación se buscó predecir la resistencia a compresión del hormigón en una estructura ya existente, mediante el uso de análisis de regresión, que permitieran determinar una comparación y relación entre la resistencia del hormigón obtenida de ensayos destructivos (extracción de núcleos) y los resultados estimados de los ensayos no destructivos (velocidad de pulso ultrasónico y martillo de rebote Schmidt) realizados “in situ” (Shariati et al., 2011).

2.7.2.1. Equipo

Martillo de rebote o esclerómetro: Se utilizó un martillo de rebote tipo Schmidt, el cual incluye un pistón con resorte con masa de acero (Figura 20) como se explica en el Código Británico (BS1881 parte 202, 1986) (Shariati et al., 2011).

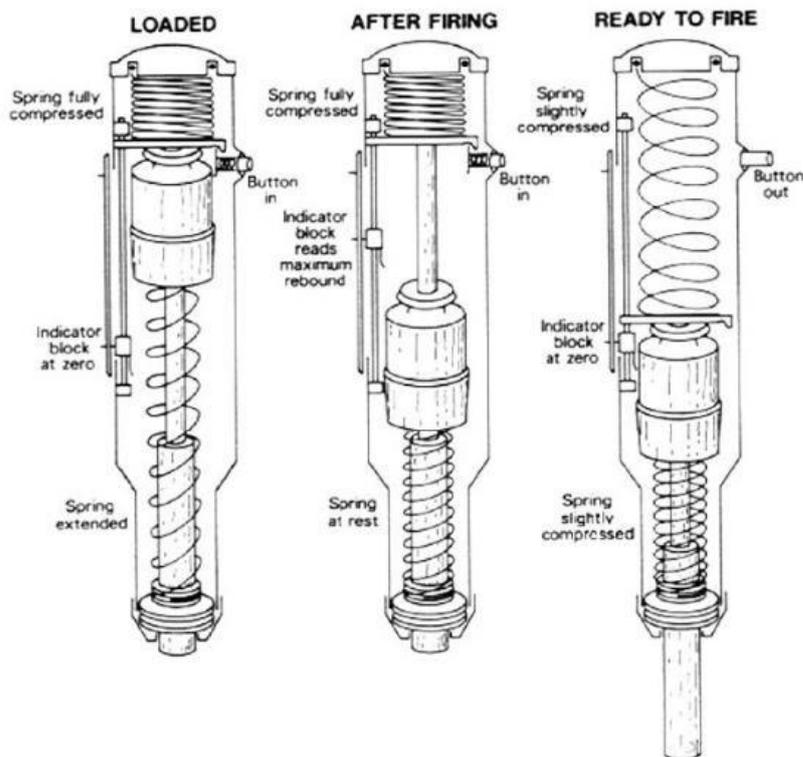


Figura 22. Sistema operativo del martillo de rebote utilizado
Fuente: (Shariati et al., 2011)

Velocidad de pulso ultrasónico o ultrasonido: Se utilizó un equipo más conocido por sus siglas en inglés (PUNDIT); conformado por un transductor, un receptor y un indicador que muestra el tiempo que se demora en viajar la señal del transductor al receptor (Shariati et al., 2011).



Figura 23. Equipo de ensayo de Velocidad de Pulso Ultrasónico (PUNDIT)

Fuente: (Shariati et al., 2011)

En este estudio, se utilizó el método directo de medición para columnas, el método semidirecto para vigas y el método indirecto para losas. Además, es importante recalcar que el último método de medición es adecuado para la evaluación de la calidad del concreto, ya que de acuerdo con la ecuación 10, la velocidad de pulso depende del módulo de elasticidad más no de la forma del concreto (Shariati et al., 2011).

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Ecuación 10

Donde:

E = Módulo de elasticidad, kg/cm²

ρ = Densidad del concreto, kg/cm³

2.7.2.2. Objeto de estudio

La compañía constructora, a cargo del edificio en estudio y conforme a lo estipulado en la normativa (M523 parte 2, 1993), elaboró la estructura utilizando una “dosificación estándar diseñada para especificar criterios de producción y cumplimiento para suministro de concreto premezclado en Malasia”, el cual fue adoptado del código británico (BS5328, 1976) (Shariati et al., 2011, p. 216).

Tabla 4.
Dosificación del hormigón

Ingrediente	Cemento (Kg/m ³)	Agregado grueso (Kg/m ³)	Agregado fino (Kg/m ³)	Agua (Kg/m ³)	Retardante (ml/m ³)	Super plastificante (ml/m ³)
Cantidad	390	1020	805	195	1150	2305

Fuente: elaboración propia con base en datos de (Shariati et al., 2011).

2.7.2.3. Ensayos

Ensayo de compresión simple: Se elaboraron especímenes cúbicos de 150 mm por lado, a manera de probetas patrón para registro de la resistencia del hormigón. Para la realización del ensayo, se utilizaron especímenes endurecidos a intervalos de 1, 3, 7 y 14 días, dos muestras por cada edad respectiva y posteriormente fueron sometidos a una velocidad de carga de 13.5 kN/s, en los cálculos se usó el resultado promedio para cada resistencia (Shariati et al., 2011).

Martillo de rebote o esclerómetro: Se tomaron 36 lecturas en columnas, 18 en vigas y 24 en losas. Las lecturas fueron tomadas en posición horizontal tanto para vigas como para columnas y en posición vertical para losas, conforme indica el Código Británico (BS1881 parte 202, 1986). El número de rebote medio y la resistencia media obtenida del ensayo de compresión de los especímenes ensayados proporcionaron los datos para poder construir una curva de correlación entre ambos ensayos (Shariati et al., 2011).

Velocidad de pulso ultrasónico o ultrasonido: Como se había mencionado anteriormente, para la realización de este ensayo; en columnas se utilizó el método directo de medición, realizándolo entre caras opuestas del elemento y obteniendo 12 lecturas, para vigas se utilizó el método semidirecto en caras adyacentes obteniendo 36 lecturas y para losas mediante el método indirecto se obtuvieron 20 lecturas. Cada uno de los elementos de interés fueron ensayados de acuerdo con lo descrito en el Código Británico (EN 12504-4, 2004) (Shariati et al., 2011).

De igual manera que con el ensayo del esclerómetro, la resistencia media obtenida en esta prueba y la resistencia media obtenida del ensayo de compresión de los especímenes ensayados, proporcionaron los datos para poder construir una curva de correlación entre ambos ensayos (Shariati et al., 2011).

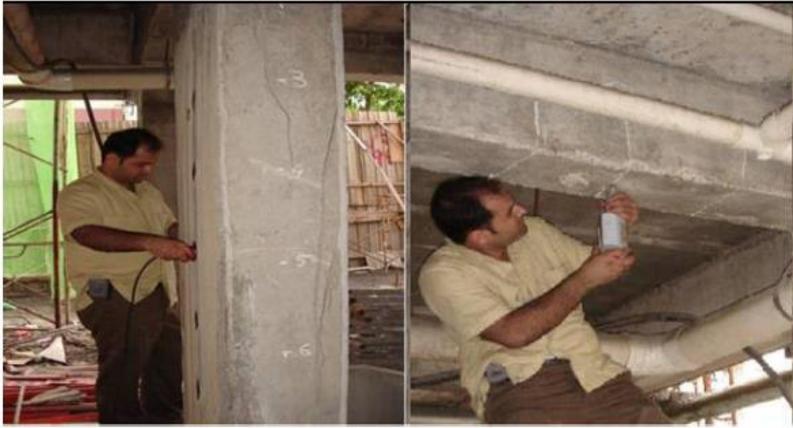


Figura 24. Ensayo de ultrasonido (izq.) y Ensayo de esclerómetro (der.) in situ
Fuente: (Shariati et al., 2011)

2.7.2.4. Parámetros mecánicos analizados

Se dibujaron curvas de correlación para cada prueba realizada utilizando análisis de regresión. La relación de correlación entre cada uno de los ensayos y la resistencia a compresión del hormigón obtenida de los especímenes cúbicos se representa utilizando el resultado promedio tanto del número de rebote como de la velocidad de pulso ultrasónico vs la resistencia a la compresión de cada elemento (Shariati et al., 2011).

Resumen de resultados de la prueba de martillo de rebote: Al observar la Figura 25, la línea delgada de color negro representa la relación entre el número de rebote y la resistencia a la compresión, la cual a su vez está representada por la siguiente ecuación:

$$f_c(R) = 1.7206R - 26.595$$

Ecuación 11

Donde:

R = Número de rebote

El número de datos utilizados en la correlación es 18. R^2 quiere decir que la línea negra representa al 93.6% de los datos, lo cual indica una significativa correlación. El intervalo de predicción de la resistencia del 95% es bastante estrecho ($f_c \pm 4.42$ Mpa). El error estándar es = 2.1024.

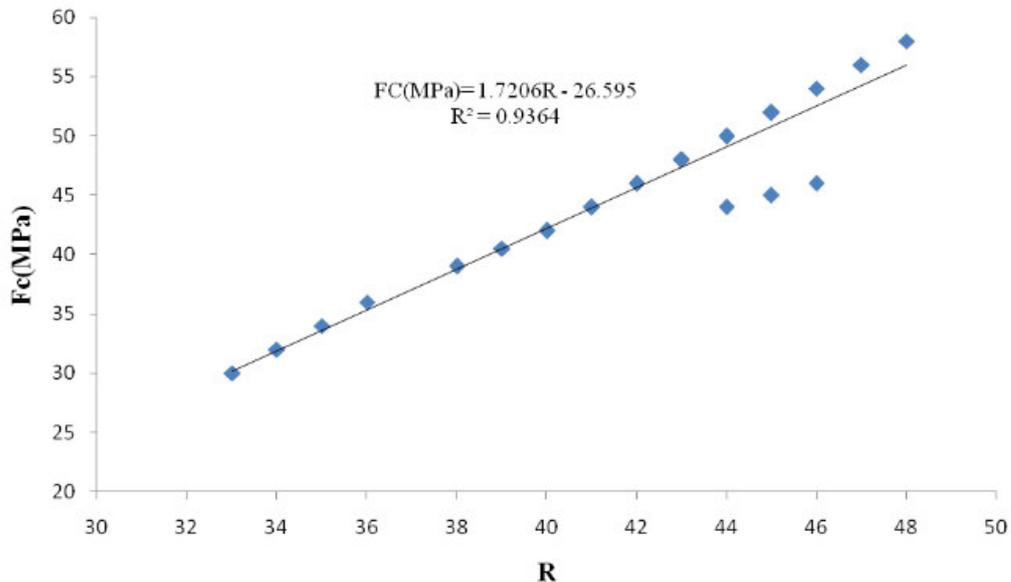


Figura 25. Curva de correlación número de rebote/resistencia a la compresión
Fuente: (Shariati et al., 2011)

Resumen de resultados de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico:

Al observar la Figura 26, La línea delgada de color negro representa la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, la cual a su vez está representada por la siguiente ecuación:

$$f_c(V) = 15.533V - 34.35$$

Ecuación 12

Donde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico

El número de datos utilizados en la correlación es 18. R^2 quiere decir que la línea negra representa al 91.9% de los datos, lo cual indica una significativa correlación, aunque menor que el caso anterior. El intervalo de predicción de la resistencia del 95% es bastante más ancho que el anterior ($f_c \pm 11.39$ Mpa). El error estándar es = 3.3746. Además, cabe recalcar que, la curva de correlación velocidad de pulso ultrasónico/resistencia a la compresión no siempre será una línea recta, ya que también puede ser polinómica de segundo grado.

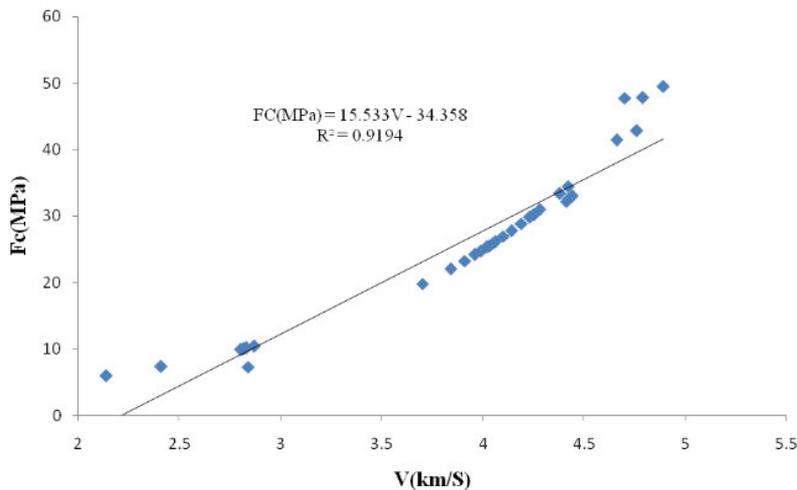


Figura 26. Curva de correlación velocidad de pulso ultrasónico/resistencia a la compresión

Fuente: (Shariati et al., 2011)

Resumen de resultados de un análisis combinado: Adicionalmente a las pruebas realizadas de manera independiente, se realizó una prueba combinando los dos tipos de ensayos no destructivos. En este caso se utilizó una múltiple regresión para predecir la resistencia a compresión, los resultados mostraron una significativa correlación entre los ensayos no destructivos y el ensayo de compresión (Shariati et al., 2011).

La resistencia a la compresión puede ser predicha de la combinación de los ensayos martillo de rebote y velocidad de pulso ultrasónico, usando la ecuación 13. Con $R^2 = 0.95$, $n = 18$, error estándar = 1.8491 y el intervalo de predicción del 95% bastante estrecho ($f_c \pm 3.7$ MPa):

$$f_c(V) = -173.04 + 4.07V^2 + 57.96V + 1.31R$$

Ecuación 13

Donde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico, km/s.

R = Número de rebote

2.7.2.5. Análisis de resultados

El ensayo del martillo de rebote Schmidt (SRH) presenta una mejor correlación con el ensayo de compresión que el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (UPV). Mientras que el modelo de regresión obtenido de la combinación de los dos ensayos no destructivos es más preciso y cercano que los resultados experimentales obtenidos de las pruebas individuales (Shariati et al., 2011).

Comparación con otros trabajos publicados: La curva de correlación para predecir la resistencia a la compresión del hormigón obtenida en esta investigación, es superior a la de otros autores consultados (Figuras 27 y 28). La curva de correlación del ensayo SRH está casi cerca de la curva de calibración presentada por el fabricante, pero la curva del ensayo UPV es la más alejada de la provista por el fabricante. El efecto de diferentes características del hormigón como las proporciones de agregados, relación agua/cemento, curado, podría ser la causa de esta diferencia y no significa menos confianza en este método (Shariati et al., 2011).

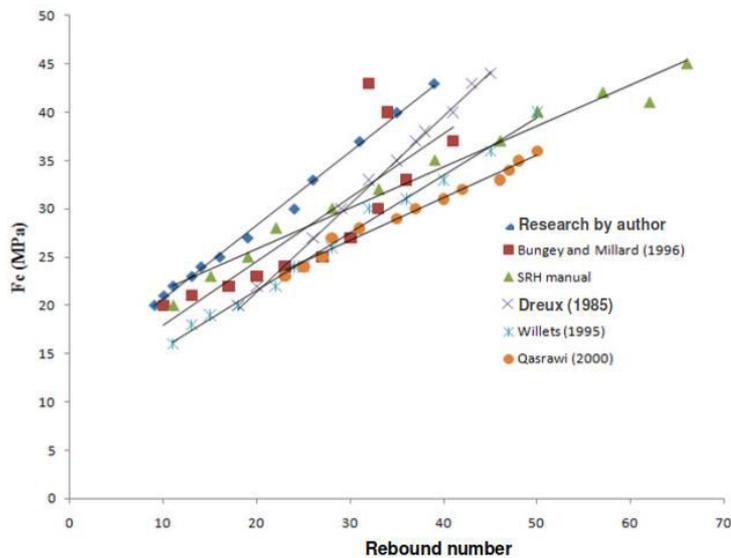


Figura 27. Comparación de resultados de la prueba del Martillo de Rebote Schmidt con otros autores

Fuente: (Shariati et al., 2011)

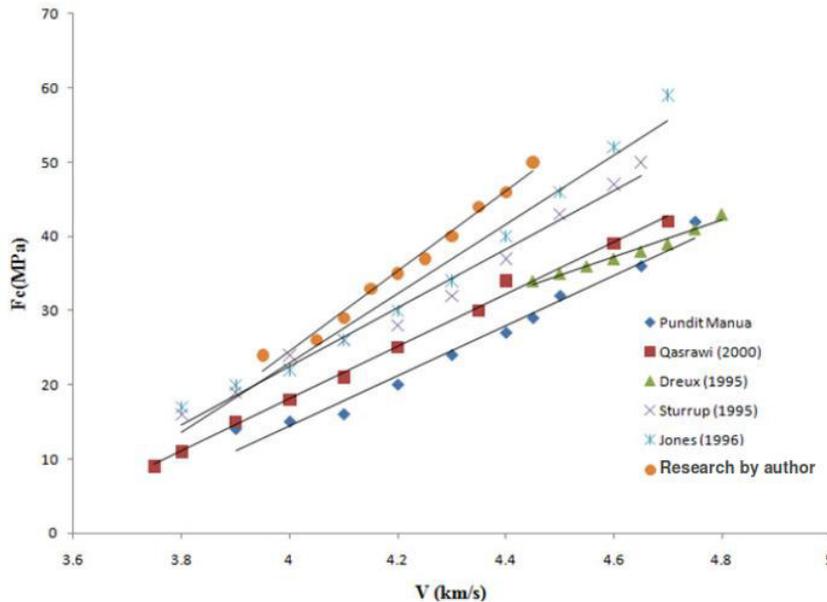


Figura 28. Comparación de resultados de la prueba de velocidad sónica con otros autores

Fuente: (Shariati et al., 2011)

Conclusiones: Una vez que se ha llevado a cabo la etapa experimental en esta investigación Shariati et al. (2011) llegaron a las siguientes conclusiones:

- El ensayo del número de rebote parece ser el método más competente para predecir la resistencia a la compresión del hormigón si se lo compara con el ensayo de velocidad ultrasónica, a pesar de que las curvas de correlación demostraron que para mezclas de hormigón habituales no es apropiado utilizar cualquiera de estos métodos de manera individual si se desea obtener una estimación más precisa de la resistencia. Sin embargo, se recomienda que el ensayo de rebote se lo lleve a cabo siempre y cuando se disponga de una adecuada tabla de calibración específica.
- La combinación de ensayos produce resultados más confiables en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón, los cuales están más cerca de los valores reales que cuando se realizó los ensayos de manera individual. Por lo tanto, el modelo de regresión resultante de la combinación de los ensayos podría ser utilizado de manera segura en el campo de la ingeniería.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El Campus Politécnico “José Rubén Orellana Ricaurte” de la Escuela Politécnica Nacional, se encuentra ubicado en el sector centro-oriental de la ciudad de Quito, en la parroquia La Floresta, cuya entrada principal está ubicada en la calle Ladrón de Guevara E11-253, colindante al Coliseo General Rumiñahui.



Figura 29. Ubicación de la EPN
Fuente: Google Maps

3.1.1. SELECCIÓN DE LOS EDIFICIOS DE ESTUDIO

Para la determinación de ecuaciones de correlación entre ensayos destructivos y no destructivos para predecir la resistencia a compresión del hormigón, que se adapten a las condiciones de ensayo en este proyecto se escogió: el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), el edificio compartido por las Facultades de Ingeniería Química y Agroindustria (FIQA) e Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE) que de aquí en adelante se nombrará únicamente como Edificio de Química-Eléctrica y el Edificio Administrativo del campus de la Escuela Politécnica Nacional, los cuales tienen 23, 41 y 49 años respectivamente.

Estos edificios fueron seleccionados con el objetivo de determinar las características mecánicas y calidad de su material de construcción predominante, el hormigón armado; debido a que en los estudios anteriores analizados en el capítulo 2 se determinó que las propiedades mecánicas de este material son diferentes cuando se las obtiene in situ en una construcción existente, que cuando se las obtiene mediante la elaboración de especímenes en laboratorio.

3.1.1.1. Centro de Investigación de la Vivienda

Este centro está conformado por planta baja y planta alta, es una estructura de hormigón armado la cual se caracteriza por contar con una losa de carga y muros de reacción de gran potencia geométrica.

Ante la carencia de espacios para realizar investigaciones experimentales en el ámbito de la Ingeniería Estructural, se formó el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) encargado de la evaluación experimental de procesos de construcción relacionados con la vivienda. Su creación fue posible gracias al programa BID-Fundacyt-EPN, con la dirección del Ingeniero Patricio Placencia en 1999. (Escuela Politécnica Nacional, s.f., p. 1)

Se lo diseñó en el año de 1994 cuyos planos arquitectónicos y estructurales aún se encuentran disponibles de manera digital y física en la Dirección de Planificación de la Escuela Politécnica Nacional, por lo que no se puede considerar a esta edificación como una construcción informal.



Figura 30. CIV- fachada frontal
Fuente: elaboración propia



Figura 31. CIV- fachada lateral
Fuente: elaboración propia

3.1.1.2. Edificio Administrativo

Es un edificio de hormigón armado, conformado por diez plantas, cuya estructura consta de un sistema de pórticos con losas planas (vigas banda) y mampostería de ladrillo artesanal sin refuerzos. Se lo construyó en el año de 1972 bajo la dirección de un ingeniero civil externo; sin embargo, la obra fue supervisada por un departamento de construcción y mantenimiento con el que contaba la institución en ese entonces, por lo que no se puede considerar a esta edificación como una construcción informal. Actualmente se tiene disponible los registros físicos de los planos tanto arquitectónicos como estructurales en la Dirección de Planificación de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 32. Edificio Administrativo - fachada frontal
Fuente: elaboración propia



Figura 33. Edificio Administrativo - fachada lateral
Fuente: elaboración propia

3.1.1.3. Edificio de Química - Eléctrica

El edificio compartido por las Facultades de Ingeniería Química y Agroindustria e Ingeniería Eléctrica está conformado por un subsuelo, planta baja y siete pisos altos, es uno de los más grandes del Campus, se encuentra ubicado en la calle Andalucía entre Mena Caamaño e Isabel La Católica. Es una estructura de hormigón armado con un sistema aporticado con losas alivianadas y mampostería no reforzada compuesta de ladrillo artesanal. Se lo construyó en el año de 1980 bajo un diseño arquitectónico y estructural del cual se tiene disponible los registros digitales y físicos en la Dirección de Planificación de la Escuela Politécnica Nacional, por lo que no se puede considerar a esta edificación como una construcción informal.



Figura 34. Edificio Química/Eléctrica - fachada frontal
Fuente: elaboración propia



Figura 35. Edificio Química/Eléctrica - fachada lateral
Fuente: elaboración propia

3.1.2. DESCRIPCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ARQUITECTÓNICA

3.1.2.1. Centro de Investigación de la Vivienda

- **Planta Baja (N. +0.00)**

La planta baja posee un área de 313.30 (m²), donde se puede encontrar un espacio destinado para almacenamiento de materiales, dos bodegas una grande y otra más pequeña, un cuarto de instrumentación, un centro de cómputo, baños y gradas y además de una losa de reacción utilizada para ensayos mecánicos en gran escala.

- **Planta Alta (N. +3.20)**

La planta alta posee un área de 116.58 (m²), donde se encuentra un pequeño espacio de recepción-cafetería para los visitantes, las oficinas de los asistentes técnicos, así como la oficina del jefe del centro, una terraza, baños y gradas.

Los planos en los cuales se puede observar la distribución arquitectónica y funcional en las losas de este centro constan en el Anexo A.

3.1.2.2. Edificio Administrativo

- **Subsuelo (N. +1.01)**

El subsuelo posee un área de 1.219,40 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección de Gestión de Información y Procesos, el club de Periodismo, el Centro de Datos CERN TIER III, baños y ascensores.

- **Planta Baja (N. +5.09)**

La planta baja posee un área de 1.398,66 (m²), donde se encuentran la Biblioteca General de la Universidad, el Hemiciclo Politécnico (auditorio), baños y ascensores.

- **Primera Planta (N. +9.17)**

La primera planta posee un área de 1.167,73 (m²), donde se encuentran el Rectorado, el Vicerrectorado de Docencia, el Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social, el Consejo Politécnico (auditorio), las oficinas de tesorería y secretaria general, baños y ascensores.

- **Segunda Planta (N. +13.25)**

La segunda planta posee un área de 470 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección Financiera, oficinas de Asesoría Jurídica, baños y ascensores.

- **Tercera Planta (N. +16.65)**

La tercera planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección de Talento Humano, oficinas de la Dirección de Relaciones Institucionales, baños y ascensores.

- **Cuarta Planta (N. +20.05)**

La cuarta planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección de Planificación, el Departamento de Fiscalización de construcciones, oficinas del Departamento de Ciencias Sociales, baños y ascensores.

- **Quinta Planta (N. +23.45)**

La quinta planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección de Talento Humano (archivo), el Departamento de Matemáticas (oficinas de profesores y archivo), Laboratorio de Tecnologías de la Información, baños y ascensores.

- **Sexta Planta (N. +26.85)**

La sexta planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran las oficinas de la Dirección de Docencia (UDC, Unidad de Desarrollo Curricular), el Departamento de Matemáticas (aulas, centro de cómputo y una oficina), baños y ascensores.

- **Séptima Planta (N. +30.25)**

La séptima planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran las oficinas del Departamento de Matemáticas, baños y ascensores.

- **Octava Planta (N. +33.65)**

La octava planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran la Asociación de Estudiantes de la Carrera de Matemáticas, el Club de Andinismo, las Oficinas de Profesores del Departamento de Matemáticas, baños y ascensores.

- **Novena Planta (Terraza) (N. +37.05)**

La novena planta posee un área de 398,40 (m²), donde se encuentran una Estación Astronómica perteneciente al Observatorio Astronómico de Quito (con Telescopios Robóticos, año 2008) y un cuarto de máquinas.

Los planos en los cuales se puede observar la distribución arquitectónica y funcional en las losas de este edificio constan en el Anexo B.

3.1.2.3. Edificio de Química - Eléctrica

- **Subsuelo (N. -4.35)**

El subsuelo tiene un área de 313 (m²), donde se encuentran aulas y la oficina del presidente de la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica.

- **Planta baja (N. +1.12)**

La planta baja tiene un área de 1612.5 (m²), donde se encuentran el Club de Robótica, la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, la Federación de Estudiantes Politécnicos del Ecuador (FEPE), la oficina del Consejo Estudiantil Politécnico (CEP), la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Electrónica y Control de Procesos Industriales, el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI), baños y ascensores.

- **Primera planta (N. +5.50)**

La primera planta tiene un área de 1372.69 (m²), donde se encuentran la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, el Laboratorio de Tecnología Textil, varias aulas, baños y ascensores.

- **Segunda planta (N. +9.75)**

La segunda planta tiene un área de 1372.30 (m²), donde se encuentran el Departamento de Procesos (Laboratorio de Bioingeniería y Laboratorio de Alimentos), aulas, bodegas, oficinas de profesores, baños y ascensores.

- **Tercera planta (N. +14.00)**

La tercera planta tiene un área de 1372.00 (m²), donde se encuentran el Laboratorio de Investigación de Procesos, la secretaría del Subdecanato y Pregrado, laboratorios de computación, aulas, oficinas de profesores, baños y ascensores.

- **Cuarta planta (N. +18.25)**

La cuarta planta tiene un área de 1371.53 (m²), donde se encuentra el Área de Cerámica (Departamento de materiales – Laboratorio de termodinámica), Laboratorio de Físico – Química, bodegas, aulas, baños y ascensores.

- **Quinta planta (N. +22.55)**

La quinta planta tiene un área de 1372.21 (m²), donde se encuentra el Laboratorio de Análisis Instrumental, el Laboratorio de petróleos, el Laboratorio de Combustibles Aceites lubricantes (LACBAL), oficinas, aulas, bodegas, baños y ascensores.

- **Sexta planta (N. +26.75)**

La sexta planta tiene un área de 1371.54 (m²), donde se encuentra la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Química, el Laboratorio de Instrumentación, Laboratorios FIEE-ECC, la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería Química, baños y ascensores.

- **Séptima planta (N. +31.00)**

La séptima planta tiene un área de 1371.60 (m²), donde se encuentra los Laboratorios de investigación (Redes de Telecomunicaciones, Televisión Digital, Inalámbricos), la Unidad de Mantenimiento Electrónico (UME), las oficinas de la Unidad de Apoyo al Politécnico Emprendedor (UAPE), un centro de cómputo, una pequeña bodega, aulas, oficinas de profesores, baños y ascensores.

- **Terraza (N. +35.25)**

En la terraza se encuentra el Laboratorio de Antenas.

Los planos en los cuales se puede observar la distribución arquitectónica y funcional en las losas de este edificio constan en el Anexo C.

3.1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

Como se mencionó anteriormente, todos los edificios de estudio son estructuras de carácter formal que fueron diseñadas bajo la supervisión de profesionales. Para la obtención de los planos estructurales de los edificios de estudio se realizó una solicitud a la Dra. Patricia León, directora del Departamento de Planificación de la Escuela Politécnica Nacional, para que esta dependencia ubicada en el cuarto piso del Edificio Administrativo facilitara una copia de dichos planos, los cuales se encuentran en los Anexos A, B y C, donde se puede observar el cálculo y diseño estructural.

Era necesario el disponer de los planos estructurales de los edificios de estudio, para la selección de los puntos idóneos de donde se obtendrían posteriormente núcleos para la determinación de las propiedades mecánicas del hormigón como parte de los ensayos propuestos en este proyecto de investigación, además se realizaron visitas de reconocimiento a los sitios y finalmente se optó por escanear con el pachómetro los elementos tipo columnas, vigas y muros previo a la obtención de las muestras, para ubicar los aceros y así no afectar el reforzamiento de dichos elementos.

3.2. ANÁLISIS DE MATERIALES

Cuando se desea conocer a detalle las propiedades de los materiales que conforman una estructura, como el hormigón, es necesario llevar a cabo pruebas que permitan tal caracterización. Es así como, de acuerdo con lo estipulado en las Normas ASCE/SEI 41-17 (2017) Y ASTM (correspondientes a cada uno de los ensayos de interés), se llevaron a cabo tanto ensayos destructivos como no destructivos, ajustándose a las condiciones de los edificios de estudio y evitando afectar en la mayor medida posible la condición actual de las estructuras.

3.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

El CIV, el Edificio Administrativo y el Edificio de Química Eléctrica de la EPN, en su totalidad están contruidos de hormigón armado. A continuación, se presentan los resultados de ensayos previos realizados a estos edificios, mismos que dan una idea de cómo ha sido la evolución del concreto del que están compuestos a lo largo de estos años.

3.2.1.1. Centro de Investigación de la Vivienda

Según los planos obtenidos, la resistencia de diseño del hormigón al momento de la construcción fue de 230 kg/cm²; sin embargo, con el pasar de los años esa resistencia debió haber aumentado considerablemente. En el año 2020 como parte del proyecto de titulación denominado “Análisis de estado de La estructura existente del Centro de Investigación de la Vivienda - CIV y diseño estructural de La ampliación del muro de reacción e infraestructura del CIV”, se realizó en primera instancia la prueba del esclerómetro en columnas, vigas, muro, además de la losa de reacción de la planta baja, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.
Registro de ensayo de rebote y resistencia calculada - CIV

RESUMEN DE RESULTADOS							
N °	ELEMENTO	SECCIÓN	UBICACIÓN (ELEVACIÓN RELATIVA)	REPETICIONES	DIRECCIÓN IMPACTO (°)	RESISTENCIA	
						MPa	(kg/cm ²)
1	Viga	V20x30	3-4	---	0	28.31	288.71
2	Viga	V20x40	3-4 PA	---	0	23.83	243.02
3	Columna	C25x40	Eje 3-PA	6	0	23.97	244.42
4	Columna	C25x40	Eje4-PA	5	0	21.13	215.43
5	Viga	V25x40	CD-P2	---	0	16.44	167.64
6	Columna	C40x60	Eje 2-PB-Lx	---	0	26.89	274.22
7	Muro 1	e=60 cm	Eje 2	1	0	20.46	208.65
8	Muro 2	e=60 cm	Eje E	2	0	22.47	229.13
9	Losa de Reacción	e=80 cm	---	---	-90	55.97	570.78
10	Viga	V20x40	PD-Ejes 5-6	3	-90	21.08	214.95
11	Viga	V20x40	P5-BC	---	90	16.62	169.46
12	Losa	h=25 cm	Nivel +5,6-P2	4	90	15.23	155.28
13	Columna	C40x40	Eje E-P6	7	0	19.28	196.56
14	Losa de Reacción	e=80 cm	---	---	90	40.23	410.22
15	Muro 1	e=60 cm	Eje 2	1	0	24.66	251.44
16	Muro 2	e=60cm	Eje E	2	0	23.56	240.23
17	Viga	V20x40	PD-Ejes 5-6	3	-90	25.64	261.42
18	Viga	V20x40	PC-Ejes 5-6	---	-90	27.95	285.06
19	Losa	h=25 cm	Nivel +5,6-P2	4	-90	26.86	273.87
20	Columna	C25x40	Eje4-PA	5	0	25.63	261.35
21	Columna	C25x40	Eje 3-PA	6	0	24.66	251.44
22	Columna	C40x40	Eje E-P6	---	0	24.24	247.22
23	Columna	C40x40	Eje E-P6	7	0	21.53	219.52
PROMEDIO (kg/cm²)				255.65			

Fuente: elaboración propia con base en datos de (Morillo & Toapanta, 2020)

Adicionalmente, se ensayó a compresión simple 13 núcleos extraídos de columnas (5), vigas (6), muro (1) e inclusive de la losa de reacción (1), cuyos resultados fueron los siguientes:

Tabla 6.*Registro de núcleos extraídos y resistencia calculada - CIV*

RESUMEN DE RESULTADOS								
N.º	NUMERACIÓN EN NÚCLEOS	ELEMENTO	SECCIÓN	N.º PISO/ UBICACIÓN	EJES	PÓRTICO	RESISTENCIA	
							MPa	(kg/cm ²)
1	1	Losa de Reacción	h=80 cm	Planta Baja	LR-E1/Eje B	---	46.8	478
2	2	Viga	V20x40	2	Ejes 5-6	PD	35.4	361
3	3	Viga	V20x40	1	Ejes 5-6	PD	22.0	225
4	4	Muro	h=60 cm	Terraza	Eje E	PE	28.8	294
5	5	Columna	C25x40	2	Eje 3	PA	22.8	232
6	6-1	Viga	V20x30	2	Ejes 3-4	PA	30.0	306
7	6-2	Viga	V20x30	2	Ejes 3-4	PA	34.0	346
8	7	Viga	V20x40	1	Ejes 3-4	PA	32.6	333
9	8	Columna	C25x40	1	Eje 3	PA	22.8	233
10	9	Columna	C25x40	1	Eje 4	PA	28.6	292
11	10	Columna	C40x40	1	Eje D	PD	25.4	258
12	11	Viga	V20x40	1	Ejes E-F	P6	22.4	229
13	12	Columna	C40x40	2	Eje 5	PF	15.4	156
PROMEDIO (kg/cm²)						287.92		

Fuente: elaboración propia con base en datos de (Morillo & Toapanta, 2020)

3.2.1.2. Edificio Administrativo

Según los planos obtenidos, la resistencia de diseño del hormigón al momento de la construcción fue de 280 kg/cm²; sin embargo, con el pasar de los años esa resistencia debió haber aumentado considerablemente. En un proyecto de titulación realizado en el año 2007, bajo la dirección del Ing. Patricio Placencia, denominado “Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica y Diseño del Reforzamiento Estructural del Edificio Administrativo de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador”, se realizó la prueba del esclerómetro en algunas columnas e inclusive a uno de los muros de ascensores, para conocer un valor aproximado de la resistencia a la compresión, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 7.*Registro de ensayo de rebote y resistencia calculada – Edificio Administrativo*

RESUMEN DE RESULTADOS						
No.	DESCRIPCIÓN	N.º REBOTES	DIRECCIÓN IMPACTO (°)	REBOTE PROMEDIO	RESISTENCIA CILÍNDRICA (kg/cm²)	DISPERSIÓN DE VALORES (kg/cm²)
1	COLUMNA G13, SUBSUELO 1	10	0	47	462	67.62
2	COLUMNA F13, SUBSUELO 1	10	0	39	334	62.59
3	COLUMNA F'16, SUBSUELO 1	10	0	44	412	66.39
4	COLUMNA F22, SUBSUELO 1	10	0	45	428	66.80
5	COLUMNA G22, SUBSUELO 1	10	0	44	412	66.39
6	COLUMNA F'19, SUBSUELO 1	10	0	34	261	58.92
7	MURO ASCENSORES, SUBSUELO 1	10	0	43	396	65.70
PROMEDIO (kg/cm²)				386.43		

Fuente: elaboración propia con base en datos de (Loor, 2017)

3.2.1.3. Edificio De Química - Eléctrica

Según los planos obtenidos, la resistencia de diseño del hormigón al momento de la construcción fue de 210 kg/cm², pero como se detalló anteriormente, con el pasar de los años esa resistencia debió haber aumentado considerablemente. Sin embargo, a la fecha aún no se han realizado estudios de la condición estructural de esta facultad, por lo que no se han llevado a cabo ensayos destructivos o no destructivos previos a la realización de este trabajo que den una idea de la evolución de las propiedades del concreto en la edificación.

3.2.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Carrillo et al. (2007) afirman que, para un concreto de peso normal, su módulo de elasticidad debe ser determinado de manera experimental, partiendo de las curvas esfuerzo-deformación que se obtienen al ensayar un grupo representativo de especímenes cilíndricos. En cuanto a los edificios de estudio, no se cuenta con información de respaldo acerca del valor de sus módulos de elasticidad respectivos.

3.3. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ESTUDIO

De acuerdo con la ASCE 41-17 (2017), para una estructura existente, las propiedades mecánicas de sus materiales deben ser obtenidas de los planos, especificaciones y cualquier otra documentación disponible. Sin embargo, cuando estos documentos no proporcionen el soporte adecuado, dicha información requerida deberá ser complementada con pruebas basadas principalmente en la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón. Estrada y Vivanco (2019) acotan que además es importante especificar los métodos de ensayo destructivos y no destructivos que se llevarán a cabo para la determinación in situ de las propiedades mecánicas de los materiales, de tal manera que la toma de datos y de muestras para su posterior análisis en laboratorio se realice “en componentes de resistencia primaria a la fuerza sísmica y en las regiones con menos tensión” (p. 28).

3.4. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD MÍNIMA DE MUESTRAS A OBTENER

Para realizar la comparación de los ensayos esclerómetro y ultrasonido con el ensayo destructivo de extracción y compresión de núcleos, era necesario determinar en primer lugar la cantidad de núcleos que se iban a extraer, puesto que, para manejar una misma cantidad de datos, el número de núcleos extraídos sería el mismo número de puntos en los que previamente se tomarían las lecturas de los ensayos no destructivos. En cuanto a la cantidad de núcleos a ser extraídos, la Norma ASCE 41-17 (2017) en su sección 10.2.2.4.2.2, establece lo siguiente:

1. Para elementos de concreto cuya resistencia especificada de diseño es conocida, se obtendrá un mínimo de tres núcleos por cada piso de la estructura, 306 m^3 de volumen de concreto, o 930 m^2 de superficie de área; o bien
2. Para elementos de concreto cuya resistencia especificada de diseño no es conocida, se obtendrá un mínimo de seis núcleos por cada piso de la estructura, 306 m^3 de volumen de concreto, o 930 m^2 de superficie de área.

Conforme a lo anteriormente indicado y utilizando los planos arquitectónicos de los cuales se obtuvieron las áreas útiles por planta de cada uno de los edificios de estudio, se realizaron los cálculos pertinentes para conocer la cantidad de núcleos que se deberían extraer, dando como resultado un total de 68 muestras necesarias. Sin embargo, considerando que en esos mismos puntos se debía previamente realizar los ensayos no destructivos (esclerómetro y ultrasonido) era una cantidad bastante considerable de ensayos que tomaría un mayor tiempo y cantidad de recursos realizar, y ya que no se está realizando una evaluación estructural como tal de las edificaciones, sino una comparación de los ensayos mencionados se decidió junto con las autoridades pertinentes reducir la cantidad de muestras al 50%, para generar el menor daño y ocasionar la menor molestia en dependencias de uso.

Tabla 8.

Cantidad de muestras a obtener para los ensayos no destructivos y resistencia a la compresión

		CANTIDAD DE MUESTRAS A OBTENER			
Ensayo	Edificio	ELEMENTO ESTRUCTURAL			
		Columna	Viga	Muro	Losa
Esclerómetro, ultrasonido, extracción y compresión de núcleos	Centro de Investigación de la Vivienda	3	3	-	-
	Edificio Administrativo	8	-	4	4
	Edificio de Química - Eléctrica	2	1	3	-
TOTAL:		28			
Módulo de elasticidad	Edificio de Química - Eléctrica	3	1	1	-
TOTAL:		5			

Fuente: elaboración propia

3.5. ENSAYOS

Para llevar a cabo pruebas en el hormigón que incluyan la extracción de núcleos estándar; previo a la perforación, se debe ubicar de manera no destructiva las barras de acero de refuerzo, para con ello determinar la ubicación que tendrán las extracciones y que éstos no dañen o perforen la armadura. La resistencia obtenida del núcleo será la equivalente resistencia a la compresión in situ, mediante la utilización de un procedimiento aprobado por las respectivas normativas vigentes (American Society of Civil Engineers, 2017).

3.5.1. ESCLERÓMETRO

3.5.1.1. Procedimiento

- El martillo utilizado fue un *Concrete Test Hammer R-7500*, el cual en primer lugar se comprobó que se encontrara calibrado mediante la utilización de un yunque provisto para el efecto,



Figura 36. Martillo de rebote utilizado en el ensayo
Fuente: elaboración propia

- Se preparó la superficie de ensayo de manera que ésta se encontrara completamente lisa,
- Finalmente se colocó el esclerómetro de manera perpendicular, horizontal o perpendicular al elemento estructural escogido y se tomó como mínimo 10 lecturas para trabajar con el número de rebote promedio.



Figura 37. Ensayo de rebote en una columna
Fuente: elaboración propia

3.5.2. ULTRASONIDO

3.5.2.1. Procedimiento

- El equipo utilizado fue un *Ultrasonic Wave Non-Destructive Concrete Model N° ESI/P-10*. En primer lugar, se aplicó agente de acoplamiento tipo gel en los extremos de la barra calibradora y las superficies de contacto de los transductores. Una vez que el equipo estuvo energizado, se presionó los transductores con firmeza contra los extremos de la barra hasta que el tiempo de tránsito se mostró estable en la pantalla. Adicionalmente, fue necesario verificar que el tiempo de tránsito mostrado coincida con el valor marcado en la barra calibradora, lo que se denomina ajuste al “tiempo cero”.



Figura 38. Equipo utilizado en el ensayo de ultrasonido
Fuente: elaboración propia

- A continuación, se verificó el estado de la superficie en el punto de evaluación, se aseguró la suficiente cantidad del agente de acoplamiento y ubicó los transductores sobre la superficie. Dependiendo de la ubicación de los elementos estructurales de estudio las mediciones se realizaron de manera directa o indirecta.



Figura 39. Calibración del equipo utilizado en el ensayo de ultrasonido
Fuente: elaboración propia



Figura 40. Ensayo de ultrasonido – medición directa
Fuente: elaboración propia



Figura 41. Ensayo de ultrasonido – medición indirecta
Fuente: elaboración propia

3.5.3. EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN

3.5.3.1. Procedimiento

- Una vez revisados los planos estructurales de los edificios de estudio y seleccionados los lugares menos invasivos de las estructuras, se procedió a ubicar las barras de refuerzo mediante la utilización del Pachómetro.



Figura 42. Detección de la armadura de refuerzo

Fuente: elaboración propia

- Identificados los aceros de refuerzo se montó el equipo de extracción, conformado por una máquina extractora y una broca diamantada, con la cual se extrajeron los núcleos de 2" o 5cm. Algunas extracciones se llevaron a cabo en losas con el equipo en posición vertical, mientras que para las extracciones en columnas, muros y vigas fue necesario utilizar expansores de anclaje en los elementos estructurales para soporte de la máquina extractora en posición horizontal.



Figura 43. Extracción de núcleos de columnas, muros y vigas
Fuente: elaboración propia



Figura 44. Extracción de núcleos de losas
Fuente: elaboración propia



Figura 45. Núcleos extraídos

Fuente: elaboración propia

- En vista de que los núcleos extraídos midieron 5cm de diámetro, pero más de 10 cm de longitud, fue necesario prepararlos cortando su longitud sobrante para cumplir la relación longitud: diámetro de 2 a 1 y finalmente fueron ensayados a compresión simple en una máquina universal del Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas de la Facultad de Ingeniería Civil de la EPN.



Figura 46. Núcleos cortados

Fuente: elaboración propia

3.5.1.2. Obtención de la resistencia a la compresión

- Previo a la rotura de los especímenes, conforme lo indica la norma ASTM C617 (2016) éstos deben ser refrentados o capeados en sus extremos superior e inferior, ya sea con una pasta de yeso de alta resistencia o lo que se usa más comúnmente un mortero de azufre, con un espesor de aproximadamente 3mm. Para lo cual se necesitó un equipo especial compuesto por: el plato de refrentado, dispositivos de alineación y el recipiente calentador de la mezcla, puesto que calentarla a flama abierta es peligroso ya que podría encenderse o sobrecalentarse. Una vez colocado el mortero de azufre en los especímenes, se debe permitir su endurecimiento un tiempo aproximado de 2 horas para proceder con el ensayo.
- Una vez se ha endurecido el capping, se tomaron las medidas finales de los núcleos (mínimo 3 diámetros y 3 longitudes, para trabajar con los valores promedios), posteriormente se los colocó en la máquina de compresión universal para ser sometidos a una carga uniforme hasta la rotura, se registró la máxima carga soportada, así como el modo de falla.



Figura 47. Ensayo de resistencia a la compresión en la máquina universal
Fuente: elaboración propia

3.5.1.3. Obtención del módulo de elasticidad

- Los núcleos de ensayo tuvieron que ser refrentados bajo el mismo procedimiento que para el ensayo de resistencia a la compresión. Una vez se ha endurecido el capping, se tomaron las medidas finales de los núcleos (mínimo 3 diámetros y 3 longitudes, para trabajar con los valores promedios). A continuación, fue necesario en pegar un strain gage en cada núcleo utilizando el super pegante de secado rápido, teniendo cuidado de no afectar su integridad.
- Se colocó cada uno de los núcleos en la máquina de compresión universal y se acoplaron los terminados del strain gage a los contactos del puente eléctrico que registraría las deformaciones.
- Finalmente, centrado y ajustado el núcleo en la máquina universal se procedió a darle carga hasta la falla y se registraron tanto las cargas como sus deformaciones asociadas para poder graficar la respectiva curva esfuerzo-deformación y determinar los módulos de elasticidad asociados.



Figura 48. Ensayo de módulo de elasticidad
Fuente: elaboración propia

3.6. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

3.6.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio de los diferentes ensayos llevados a cabo, se realizó el procesamiento de estos mediante el software Minitab.

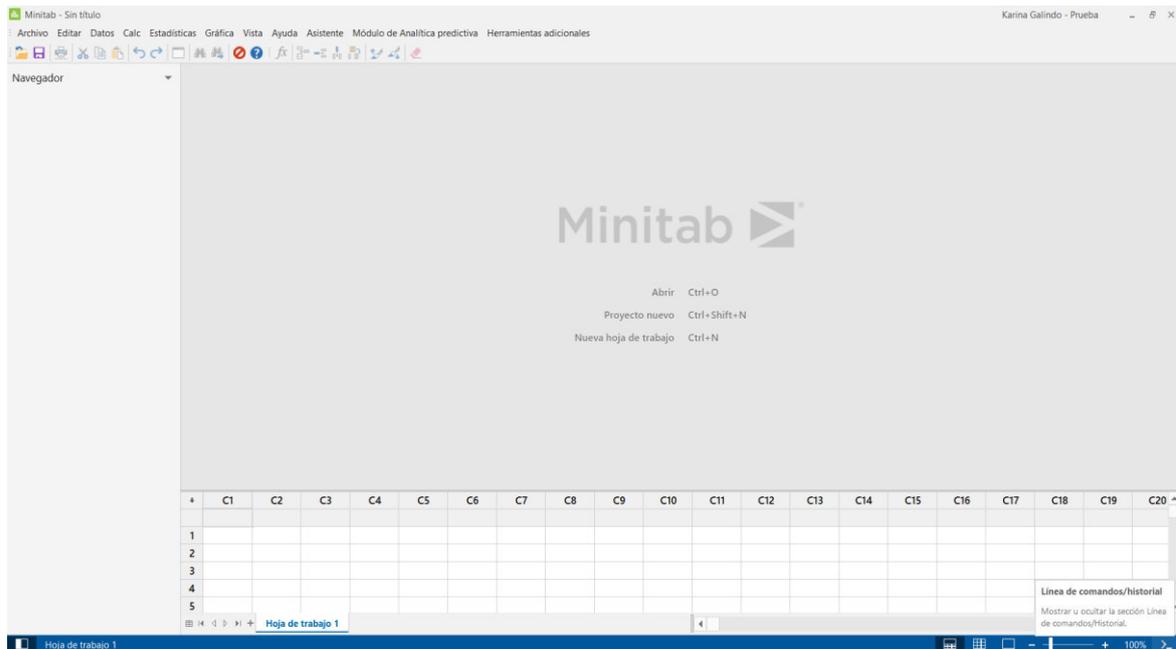


Figura 49. Software Minitab

Fuente: elaboración propia

Se observó en los datos obtenidos en los ensayos de esclerómetro, ultrasonido y compresión de núcleos algunos valores atípicos, es decir, o muy altos o muy bajos con respecto al resto de ellos, por lo que se estableció un intervalo de confianza de datos del 95% con respecto a la media, para obtener un rango de valores válidos y descartar aquellos que se encontraran por fuera de éste. Cabe aclarar que adicionalmente se realizaron pruebas con el 90% y el 98% de nivel de confianza; sin embargo, los resultados no diferían mucho entre sí, por lo que se decidió trabajar con el 95%. El procedimiento que se realizó fue el siguiente:

- Se copiaron los datos en la hoja de trabajo, como se muestra en la Figura 50.

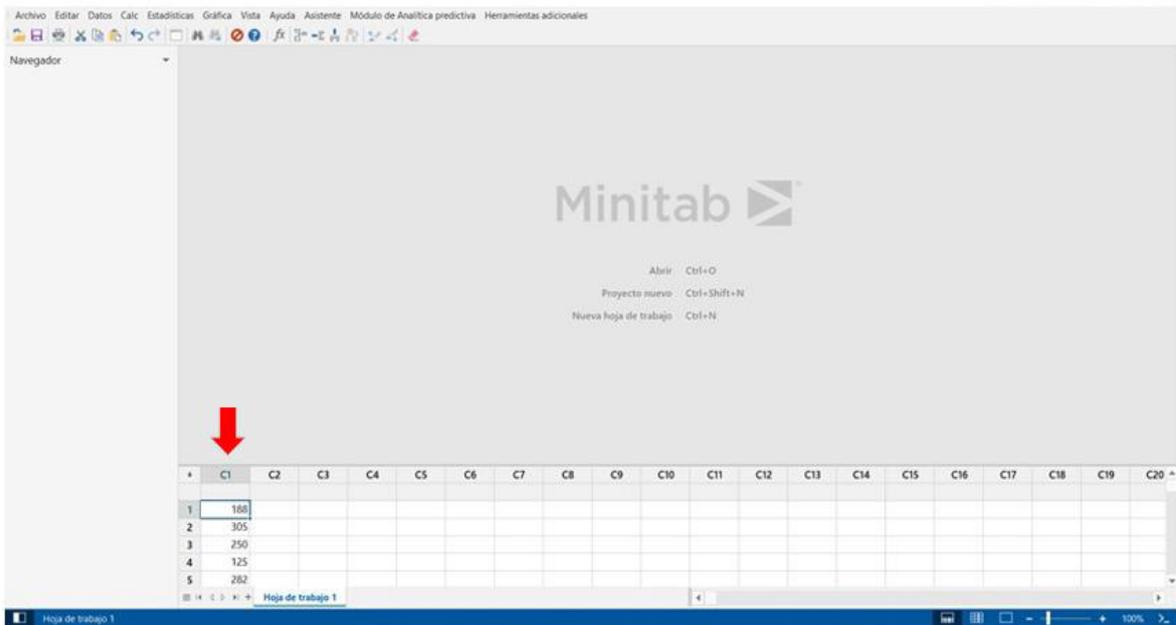


Figura 50. Carga de datos en el software Minitab
Fuente: elaboración propia

- En la barra de menús se escogió la opción “Estadísticas” > “Estadísticas básicas” > “Resumen gráfico”, como se muestra en la Figura 51.



Figura 51. Análisis estadístico con el software Minitab
Fuente: elaboración propia

- Una vez escogida la opción “Resumen gráfico” se desplegó una ventana como se muestra en la Figura 52, en la cual se deben seleccionar las columnas con los datos a los que se quiere aplicar el análisis, además de que se define el nivel deseado que para este caso fue del 95% y se acepta.



Figura 52. Ventana – resumen gráfico
Fuente: elaboración propia

- Una vez aceptado se despliega en pantalla un informe de resultados en torno a los datos ingresados, en el cual se puede apreciar: la media, mediana, valores mínimo y máximo, intervalos de confianza, entre otros, que pueden ser configurados para que se desplieguen o no en el informe según sea el caso. El proceso se repitió para cada uno de los grupos de datos de interés, que representan a uno de los ensayos realizados (esclerómetro, ultrasonido, resistencia a la compresión de núcleos, módulo de elasticidad).

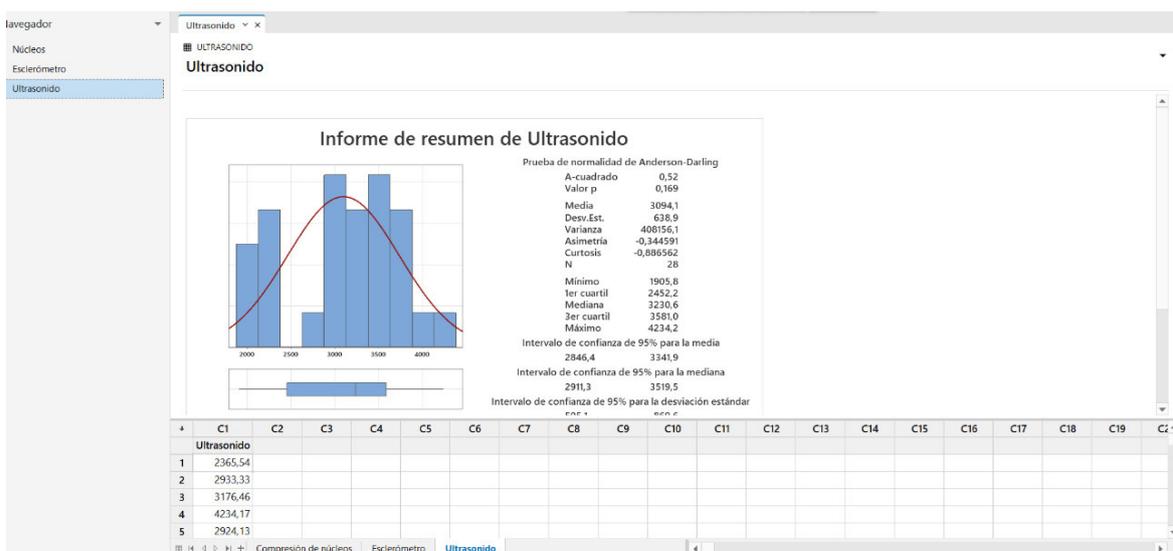


Figura 53. Informe de resultados
Fuente: elaboración propia

- Minitab ofrece la posibilidad de editar los atributos del informe como su título, tipo de letra, etc., para finalmente ser exportado como una imagen.

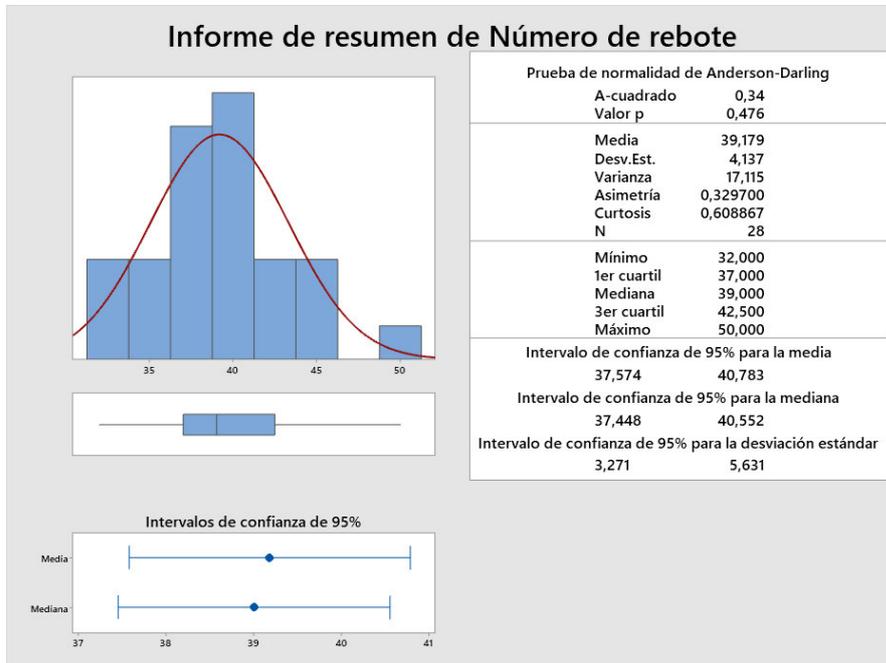


Figura 54. Análisis de datos – ensayo de esclerómetro

Fuente: elaboración propia

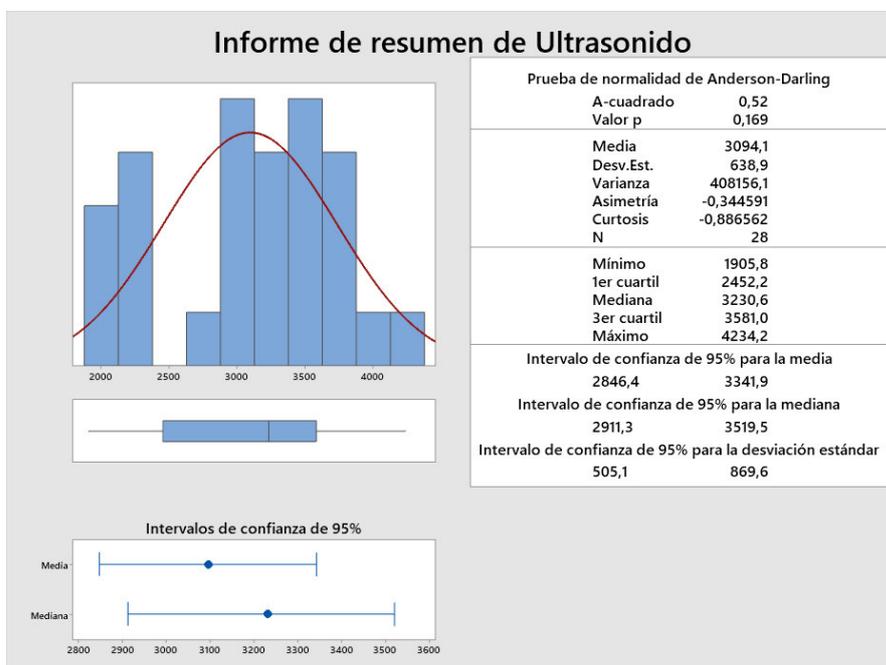


Figura 55. Análisis de datos – ensayo de ultrasonido

Fuente: elaboración propia

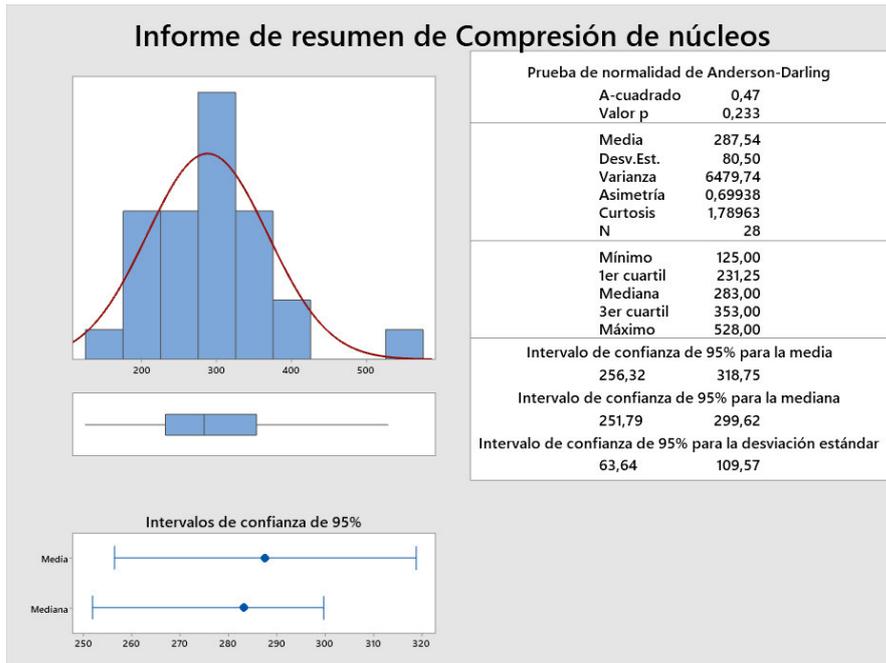


Figura 56. Análisis de datos – ensayo de compresión de núcleos
Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presenta tablas y graficas de los resultados totales obtenidos de los ensayos esclerométrico, velocidad sónica y compresión de núcleos. Dando paso al capítulo 5 con los resultados ya validados.

4.1. ESCLERÓMETRO

Tabla 9.

Resultados del ensayo del esclerómetro

UBICACIÓN	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN IMPACTO	REBOTE PROMEDIO	RESISTENCIA CILÍNDRICA (kg/cm ²)
CIV	Columna 1	C1-5A	0	37	294
CIV	Columna 2	C2-4A	0	38	305
CIV	Columna 3	C3-4A	0	40	334
CIV	Viga 1	V1-A (4-5)	0	32	233
CIV	Viga 2	V2-A (3-4)	0	38	305
CIV	Viga 3	V3-A (3-4)	0	32	236
Q-E	Columna 1	C1-1P planta baja	0	40	337
Q-E	Columna 2	C2-7P séptimo piso	0	41	349
Q-E	Muro1	M1-7P séptimo piso	0	43	372
Q-E	Muro 2	M2-7P séptimo piso	0	38	307
Q-E	Columna Exterior 1	Colm exterior	0	39	321
Q-E	Viga 1	V1-5P quinto piso	90°	41	299

Fuente: elaboración propia

Tabla 10.*(Continuación) Resultados del ensayo del esclerómetro*

UBICACIÓN	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN IMPACTO	REBOTE PROMEDIO	RESISTENCIA CILÍNDRICA (kg/cm ²)
ADM	Muro 1	Gradas Acceso Bibliot	0	43	371
ADM	Muro 2	Gradas Acceso Bibliot	0	43	371
ADM	Columna 1	Exteriores gradas Pb	0	36	290
ADM	Columna 2	Exteriores gradas Pb	0	44	389
ADM	Losa 7	Losa Piso 7	0	35	273
ADM	Losa 5	Losa Piso 5	0	36	288
ADM	Losa 4	Losa Piso 4	0	44	383
ADM	Losa 3	Losa Piso 3	0	37	300
ADM	Muro 3	Muro Exteriores Pb	0	39	323
ADM	Columna 3	Exteriores Pb	0	45	396
ADM	Columna 4	Exteriores Pb	0	50	471
ADM	Columna 5	Columna Exteriores Pb	0	39	324

Fuente: elaboración propia

4.1.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RELACIÓN DEL NÚMERO PROMEDIO DE REBOTE Y LA RESISTENCIA CILÍNDRICA

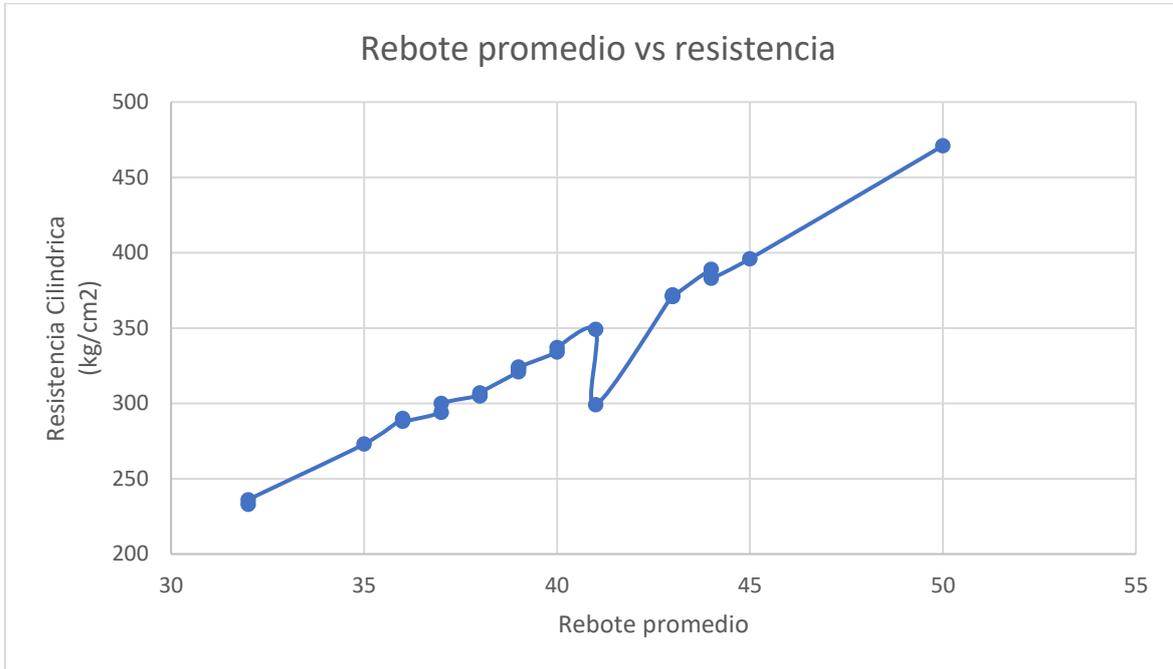


Figura 57. Rebote promedio vs Resistencia cilíndrica
Fuente: elaboración propia

4.1.2. RESULTADOS GRÁFICOS DEL NÚMERO PROMEDIO DE REBOTE POR EDIFICIO

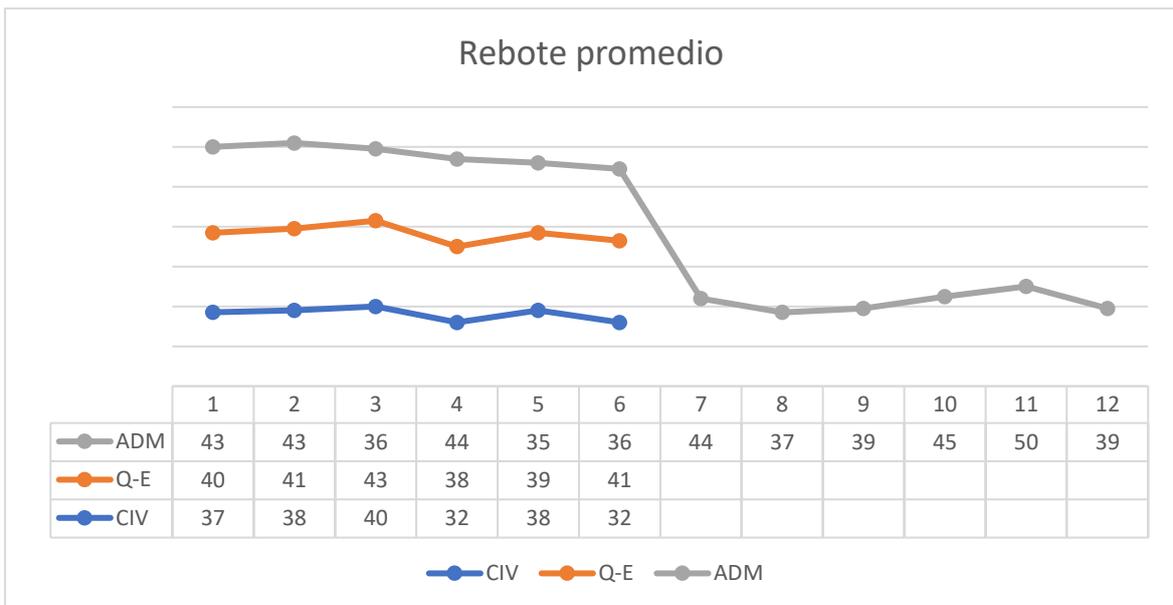


Figura 58. Rebote promedio por edificio estudiado
Fuente: elaboración propia

4.2. ULTRASONIDO

Tabla 11.

Resultados del ensayo de ultrasonido

EDIFICIO	ELEMENTO	UBICACIÓN	TIPO DE ENSAYO	TIEMPO (μs)	SEPARACION DE SENSORES (cm)	DISTANCIA RECORRIDA (cm)	VELOCIDAD (m/s)	CONDICIÓN DEL HORMIGÓN
CIV	Columna 1	C1-5A	Directo	191.50	45.30	45.3	2365.54	Pobre
CIV	Columna 2	C2-4A	Paralelo	72.80	15.10	21.35	2933.33	Pobre
CIV	Columna 3	C3-4A	Paralelo	53.20	11.00	15.56	2924.13	Pobre
CIV	Viga 1	V1-A (4-5)	Paralelo	51.20	11.50	16.26	3176.46	Regular a Dudosa
CIV	Viga 2	V2-A (3-4)	Paralelo	33.40	10.00	14.14	4234.17	Bueno
CIV	Viga 3	V3-A (3-4)	Paralelo	47.20	10.00	14.14	2996.22	Pobre
Q-E	Muro 1	M1-7P-1	Directo	39.10	9.00	9.00	2301.79	Pobre
Q-E	Columna 2	C2-7P-1	Directo	32.50	7.00	7.00	2153.85	Pobre
Q-E	Columna 2	C2-7P-2	Directo	38.20	9.00	9.00	2356.02	Pobre
Q-E	Muro 1	M1-7P-2	Directo	37.40	7.80	7.80	2085.56	Muy Pobre
Q-E	Viga 1	V1-5P-1	Directo	33.80	6.90	6.90	2041.42	Muy Pobre
Q-E	Muro 2	M2-7P-2	Directo	46.70	8.90	8.90	1905.78	Muy Pobre
Q-E	Muro 2	M2-7P-1	Directo	44.10	8.90	8.90	2018.14	Muy Pobre
Q-E	Viga 1	V1-5P-2	Directo	43.40	9.10	9.10	2096.77	Muy Pobre
ADM	Muro 1	Gradas acceso biblioteca	Paralelo	33.70	8.50	12.02	3567.01	Regular a Dudosa
ADM	Muro 2	Gradas acceso biblioteca	Paralelo	39.00	8.00	11.31	2900.95	Pobre
ADM	Columna 1-1	Exteriores gradas planta baja	Paralelo	36.50	7.00	9.90	2712.19	Pobre
ADM	Columna 1-2	Exteriores gradas planta baja	Paralelo	32.70	8.50	12.02	3676.09	Bueno
ADM	Muro 3-1	Exteriores gradas planta baja	Directo	29.10	9.00	9.00	3092.78	Regular a Dudosa
ADM	Muro 3-2	Exteriores gradas planta baja	Directo	27.00	9.00	9.00	3333.33	Regular a Dudosa
ADM	Columna 3-1	Exteriores gradas planta baja	Directo	27.40	9.00	9.00	3284.67	Regular a Dudosa
ADM	Columna 3-2	Exteriores gradas planta baja	Directo	27.30	9.00	9.00	3296.70	Regular a Dudosa
ADM	Columna 4-1	Exteriores gradas planta baja	Directo	26.20	8.90	8.90	3396.95	Regular a Dudosa
ADM	Columna 4-2	Exteriores gradas planta baja	Directo	23.10	9.00	9.00	3896.10	Bueno
ADM	Losa 3	Piso 3	Directo	15.80	6.10	6.10	3860.76	Bueno
ADM	Losa 4	Piso 4	Directo	23.80	9.10	9.10	3823.53	Bueno
ADM	Losa 5	Piso 5	Directo	24.00	8.40	8.40	3500.00	Regular a Dudosa
ADM	Losa 7	Piso 7	Directo	19.80	7.00	7.00	3535.35	Regular a Dudosa
ADM	Columna 2-1	Exteriores planta baja	Directo	25.10	9.00	9.00	3585.66	Regular a Dudosa
ADM	Columna 2-2	Exteriores planta baja	Directo	24.70	9.00	9.00	3643.72	Regular a Dudosa

Fuente: elaboración propia

4.2.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RELACIÓN DISTANCIA RECORRIDA Y TIEMPO DE TRÁNSITO

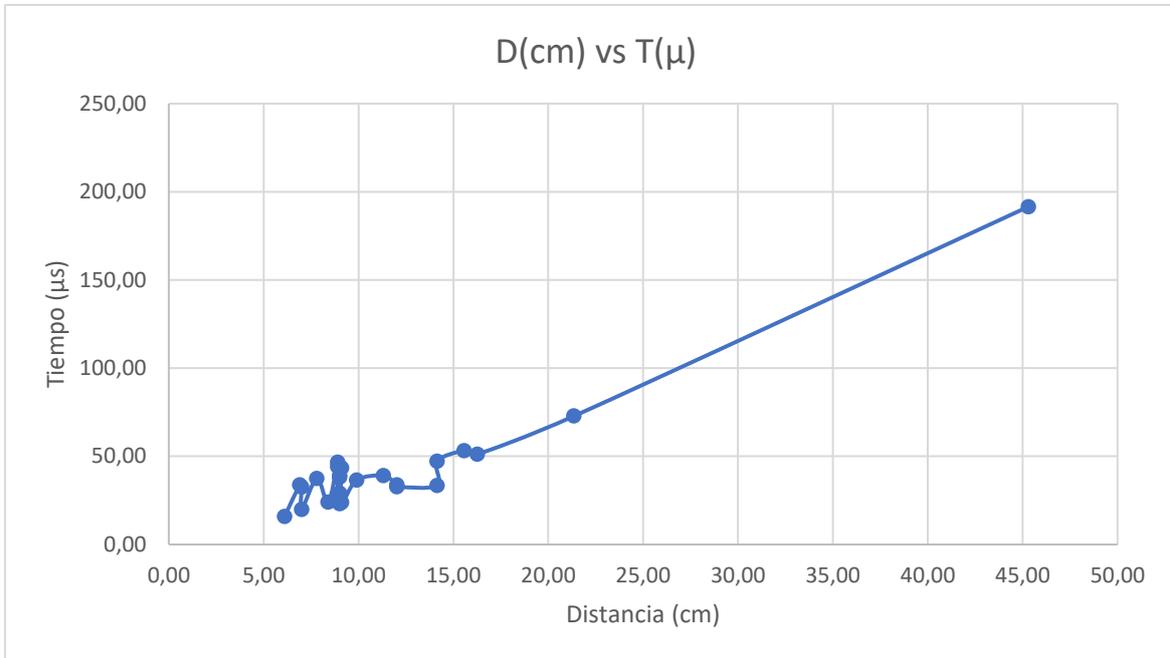


Figura 59. Distancia recorrida vs Tiempo
Fuente: elaboración propia

4.2.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VELOCIDAD DE PULSO POR EDIFICIO

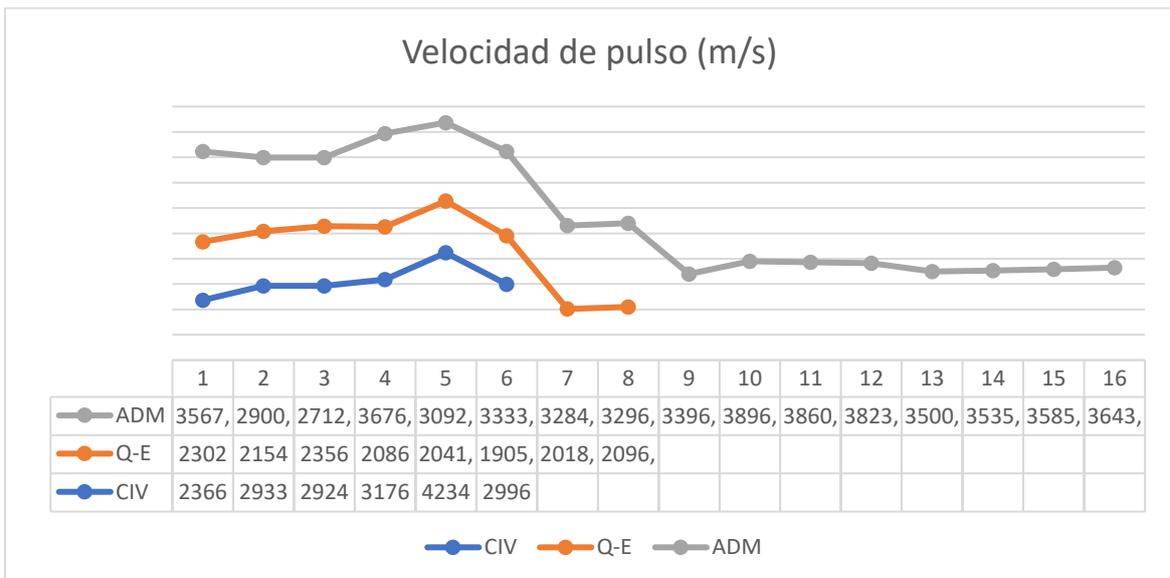


Figura 60. Velocidad de pulso por edificio estudiado
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 12 se muestra la velocidad de pulso obtenida de manera experimental mediante el ensayo de ultrasonido y la velocidad teórica que fue calculada utilizando la ecuación (4) propuesta por ASTM C597, para la comparación y obtención de un porcentaje de variación entre estas velocidades. Por lo que, previo a esto, se calculó el módulo de elasticidad del concreto por la ecuación (1) propuesta por el ACI 318-19.

Tabla 12.

Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas

EDIFICIO	ELEMENTO	CÓDIGO	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²)	PESO ESPECÍFICO (kg/cm ³)	VELOCIDAD EXPERIMENTAL (m/s)	VELOCIDAD TEÓRICA* (m/s)	% DE VARIACIÓN
CIV EPN	Columna	C1-5A	205784,66	0,206	2365,54	101,03	2241%
CIV EPN	Columna	C2-4A	262110,24	0,262	2933,33	114,02	2473%
CIV EPN	Viga	V1-A (4-5)	237303,46	0,237	3176,46	109,48	2802%
CIV EPN	Viga	V2-A (3-4)	167798,89	0,168	4234,17	93,34	4436%
CIV EPN	Columna	C3-4A	252033,70	0,252	2924,13	112,31	2504%
CIV EPN	Viga	V3-A (3-4)	225625,55	0,226	2996,22	109,26	2642%
Q-E	Muro 1	M1-7P-1	256902,23	0,257	2301,79	115,49	1893%
Q-E	Columna 1	C1-7P-1	256902,23	0,257	2153,85	115,49	1765%
Q-E	Columna 2	C2-7P-2	250239,85	0,250	2356,02	107,63	2089%
Q-E	Columna Exterior 1	Colum exterior	220066,18	0,220	2085,56	104,95	1887%
Q-E	Muro 2	M2-7P-2	235875,34	0,236	1905,78	108,65	1654%
Q-E	Viga 1	V1-5P-2	207962,33	0,208	2096,77	102,02	1955%

Fuente: elaboración propia

Nota: * Obtenido mediante la ecuación (1) propuesta por el ACI 318-19

Tabla 13.*(Continuación) Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas*

EDIFICIO	ELEMENTO	CÓDIGO	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²)	PESO ESPECÍFICO (kg/cm ³)	VELOCIDAD EXPERIMENTAL (m/s)	VELOCIDAD TEÓRICA (m/s)	% DE VARIACIÓN
ADM	Muro 1	M1	284764,15	0,285	3567,01	120,47	2861%
ADM	Muro 2	M2	246612,99	0,247	2900,95	113,69	2452%
ADM	Columna	C1-N1	252480,18	0,252	2712,19	110,44	2356%
ADM	Columna	C1-N2	239194,35	0,239	3676,09	110,41	3229%
ADM	Columna	C2-N1	291410,20	0,291	3284,67	121,32	2608%
ADM	Columna	C2-N2	281982,02	0,282	3296,70	117,74	2700%
ADM	Columna	C3-N1	255583,65	0,256	3396,95	114,66	2863%
ADM	Columna	C3-N2	254700,80	0,255	3896,10	113,42	3335%
ADM	Columna	C4-N1	288301,73	0,288	3585,66	119,06	2912%
ADM	Columna	C4-N2	344866,52	0,345	3643,72	131,38	2673%
ADM	Muro	M3-N1	221087,37	0,221	3092,78	108,67	2746%
ADM	Muro	M3-N2	206331,23	0,206	3333,33	103,50	3121%

Fuente: elaboración propia

4.2.3. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE PULSO EXPERIMENTALES VS TEÓRICAS

Con base en los valores obtenidos en las Tablas 12 y 13 se obtuvo la siguiente Figura 61, donde se puede visualizar la diferencia de obtener la velocidad de pulso ultrasónico del concreto de manera experimental (in situ) y de manera teórica, a través de una ecuación que relaciona el módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson del concreto.

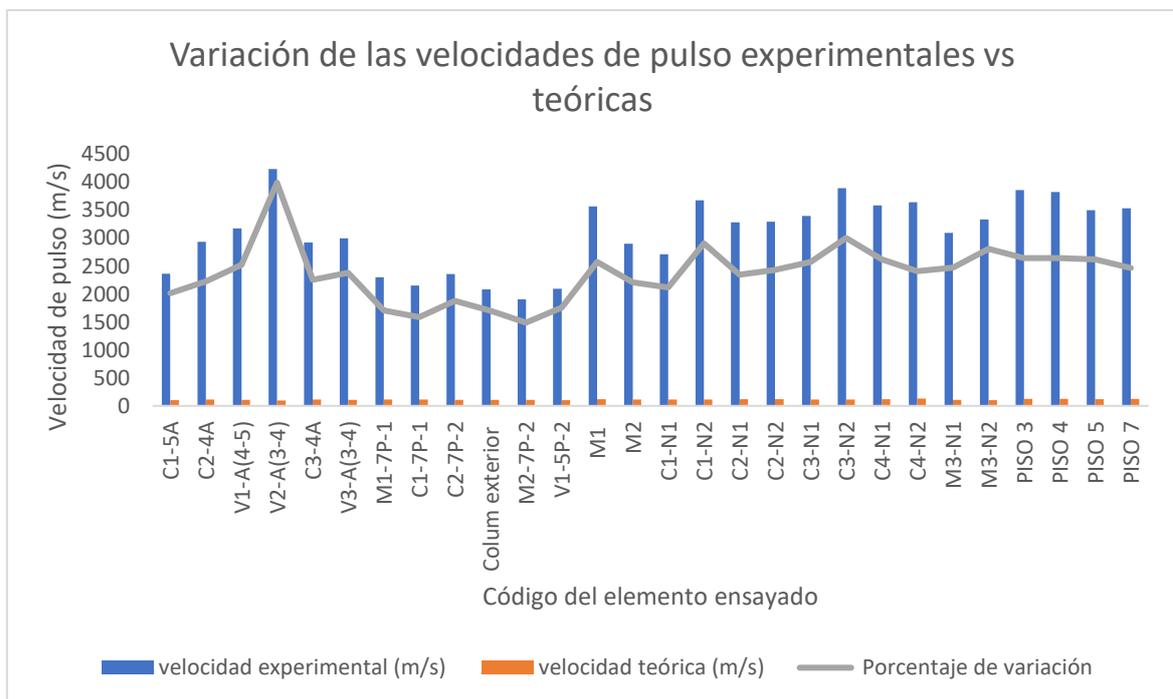


Figura 61. Variación de las velocidades de pulso experimentales vs teóricas
Fuente: elaboración propia

4.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN

Tabla 14.

Resultados del ensayo de compresión de núcleos

CÓDIGO	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN	DIÁMETRO (mm)	LONGITUD INICIAL (mm)	LONGITUD REFRENTADA (mm)	L/D	ÁREA TRANSVERSAL (mm ²)
C1-5A	Columna	Columna 1	CIV EPN	50	100	103	2.06	1963
C2-4A	Columna	Columna 2	CIV EPN	50	100	102	2.04	1963
V1-A (4-5)	Viga	Viga 1	CIV EPN	50	100	104	2.08	1963
V2-A (3-4)	Viga	Viga 2	CIV EPN	50	98	102	2.04	1963
C3-4A	Columna	Columna 3	CIV EPN	50.8	100	103	2.03	2023
V3-A (3-4)	Viga	Viga 3	CIV EPN	50.6	100	104	2.06	2003
M1	Muro	Muro 1 gradas	ADM	43.8	91	95	2.17	1503
M2	Muro	Muro 2 gradas	ADM	43.6	92	96	2.20	1486
C1-N1	Columna	Columna 1 Ext	ADM	43.8	91	95	2.17	1503
C1-N2	Columna	Columna 1 Ext	ADM	43.8	91	95	2.17	1521
C2-N1	Columna	Columna 2 Ext	ADM	43.8	90	94	2.15	1521
C2-N2	Columna	Columna 2 Ext	ADM	44.4	90	94	2.12	1555
C3-N1	Columna	Columna 3 Ext	ADM	44	90	94	2.14	1521
C3-N2	Columna	Columna 3 Ext	ADM	44.2	90	94	2.13	1521
C4-N1	Columna	Columna 4 Ext	ADM	44.2	90	94	2.13	1521
C4-N2	Columna	Columna 4 Ext	ADM	44.2	90	94	2.13	1538
M3-N1	Muro	Muro 3 Ext	ADM	44.2	90	94	2.13	1538
M3-N2	Muro	Muro 3 Ext	ADM	44.2	90	94	2.13	1538
PISO 3	Losa	Losa Piso 3	ADM	44	61	65	1.48	1521
PISO 4	Losa	Losa Piso 4	ADM	44.2	90	94	2.13	1538
PISO 5	Losa	Losa Piso 5	ADM	44.2	84	88	1.99	1538
PISO 7	Losa	Losa Piso 7	ADM	44	70	74	1.68	1521
C2-7P-1	Columna	Columna 2 -N1	Q-E	44.6	70	74	1.66	1555
C2-7P-2	Columna	Columna 2-N2	Q-E	44.4	89	93	2.09	1555
M1-7P-2	Muro	Muro 1-N2	Q-E	44.6	78	82	1.84	1555
M2-7P-2	Muro	Muro 2 -N2	Q-E	44.6	90	94	2.11	1555
M1-7P-1	Muro	Muro 1-N1	Q-E	44.4	89	93	2.09	1538
V1-5P-1	Viga 1	Viga 1-N1	Q-E	44.4	70	74	1.67	1555

Fuente: elaboración propia

Tabla 15.*(Continuación) Resultados del ensayo de compresión de núcleos*

CÓDIGO	CARGA MÁXIMA CORREGIDA		TIPO DE FALLA	PESO ESPECÍFICO (kg/m ³)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CORREGIDA (kg/cm ²)	FECHA DE EXTRACCIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD
	(kN)	(t)			(MPa)	(kg/cm ²)				
C1-5A	36.2	3.69	Tipo 4	2240	18.4	188	188	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
C2-4A	58.8	5.99	Tipo 3	2240	29.9	305	305	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
V1-A (4-5)	48.1	4.9	Tipo 2	2200	24.5	250	250	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
V2-A (3-4)	24.1	2.46	Tipo 3	2140	12.3	125	125	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
C3-4A	56.1	5.72	Tipo 2	2220	27.7	282	282	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
V3-A (3-4)	44.4	4.53	Tipo 3	2100	22.2	226	226	26/2/2020	4/3/2021	>28 días
M1	53.00	5.41	Tipo 3	2140	35.3	360	360	25/6/2021	30/6/2021	>28 días
M2	39.4	4.01	Tipo 4	2140	26.5	270	270	25/6/2021	30/6/2021	>28 días
C1-N1	41.8	4.26	Tipo 4	2400	27.8	283	283	25/6/2021	30/6/2021	>28 días
C1-N2	37.7	3.84	Tipo 2	2220	24.9	254	254	25/6/2021	30/6/2021	>28 días
C2-N1	56	5.71	Tipo 4	2220	37	377	377	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
C2-N2	53.6	5.47	Tipo 2	2220	34.6	353	353	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
C3-N1	43.1	4.39	Tipo 3	2180	28.4	290	290	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
C3-N2	43.2	4.4	Tipo 2	2120	28.2	288	288	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
C4-N1	55.3	5.64	Tipo2	2300	36.2	369	369	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
C4-N2	79.3	8.09	Tipo 4	2180	51.8	528	528	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
M3-N1	32.7	3.33	Tipo 3	2200	21.3	217	217	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
M3-N2	28.4	2.9	Tipo 2	2260	18.5	189	189	30/6/2021	5/7/2021	>28 días
PISO 3	62.9	6.42	Tipo 2	2160	39.4	402	385	28/6/2021	5/7/2021	>28 días
PISO 4	53.1	5.41	Tipo 2	2200	34.6	353	353	28/6/2021	5/7/2021	>28 días
PISO 5	42.8	4.36	Tipo 3	2260	27.8	283	283	28/6/2021	5/7/2021	>28 días
PISO 7	55.8	5.69	Tipo 4	2220	36	367	358	28/6/2021	5/7/2021	>28 días
C2-7P-1	47.2	4.82	Tipo 3	2080	29.5	301	293	4/11/2021	10/11/2021	>28 días
C2-7P-2	42.2	4.31	Tipo 3	2140	27.3	278	278	4/11/2021	10/11/2021	>28 días
M1-7P-2	45.2	4.6	Tipo 3	2020	29	296	293	4/11/2021	10/11/2021	>28 días
M2-7P-2	37.7	3.85	Tipo 4	1980	24.2	247	247	4/11/2021	10/11/2021	>28 días
M1-7P-1	32.6	3.33	Tipo 2	2080	21.1	215	215	4/11/2021	10/11/2021	>28 días
V1-5P-1	30.7	3.13	Tipo 3	2040	19.3	197	192	4/11/2021	10/11/2021	>28 días

Fuente: elaboración propia

4.3.1. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN POR EDIFICIO

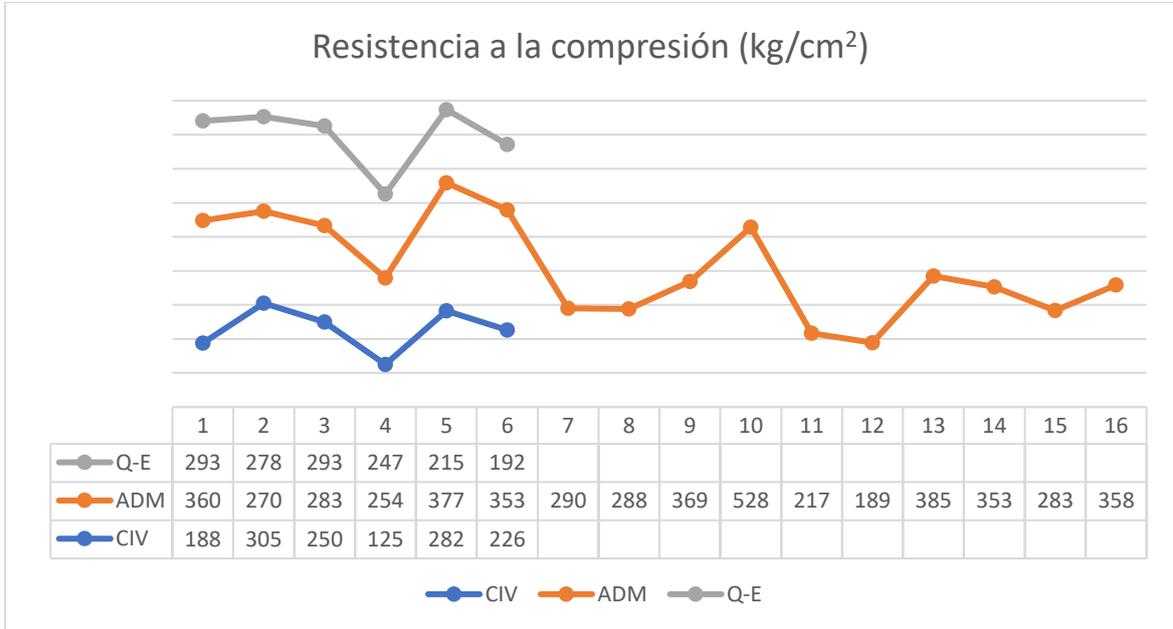


Figura 62. Resistencia a la compresión por edificio estudiado
 Fuente: elaboración propia

Tabla 16.*Variación de la resistencia a la compresión de núcleos vs esclerómetro*

EDIFICIO	ELEMENTO	CÓDIGO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS (kg/cm ²)	ESCLERÓMETRO (RESISTENCIA CILÍNDRICA) (kg/cm ²)	PORCENTAJE DE VARIACIÓN
CIV EPN	Columna	C1-5A	188	294	56%
CIV EPN	Columna	C2-4A	305	305	0%
CIV EPN	Viga	V1-A (4-5)	250	334	34%
CIV EPN	Viga	V2-A (3-4)	125	233	86%
CIV EPN	Columna	C3-4A	282	305	8%
CIV EPN	Viga	V3-A (3-4)	226	236	4%
Q-E	Muro 1	M1-7P-1	293	372	27%
Q-E	Columna 1	C1-7P-1	293	337	15%
Q-E	Columna 2	C2-7P-2	278	349	26%
Q-E	Columna Exterior 1	Colum exterior	215	321	49%
Q-E	Muro 2	M2-7P-2	247	307	24%
Q-E	Viga 1	V1-5P-2	192	299	56%
ADM	Muro 1	M1	360	371	3%
ADM	Muro 2	M2	270	371	37%
ADM	Columna	C1-N1	283	290	2%
ADM	Columna	C1-N2	254	290	14%
ADM	Columna	C2-N1	377	389	3%
ADM	Columna	C2-N2	353	389	10%
ADM	Columna	C3-N1	290	396	37%
ADM	Columna	C3-N2	288	396	38%
ADM	Columna	C4-N1	369	471	28%
ADM	Columna	C4-N2	528	471	12%
ADM	Muro	M3-N1	217	323	49%
ADM	Muro	M3-N2	189	323	71%
ADM	Losa	PISO 3	385	300	28%
ADM	Losa	PISO 4	353	383	8%
ADM	Losa	PISO 5	283	288	2%
ADM	Losa	PISO 7	358	273	31%

Fuente: elaboración propia

4.3.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS VS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN OBTENIDA CON ESCLERÓMETRO

Con base en los valores obtenidos en la Tabla 16 se obtuvo la siguiente Figura 63, donde se puede visualizar la diferencia de obtener la resistencia a la compresión del concreto, extrayendo y ensayando núcleos y por medio del ensayo de esclerómetro.

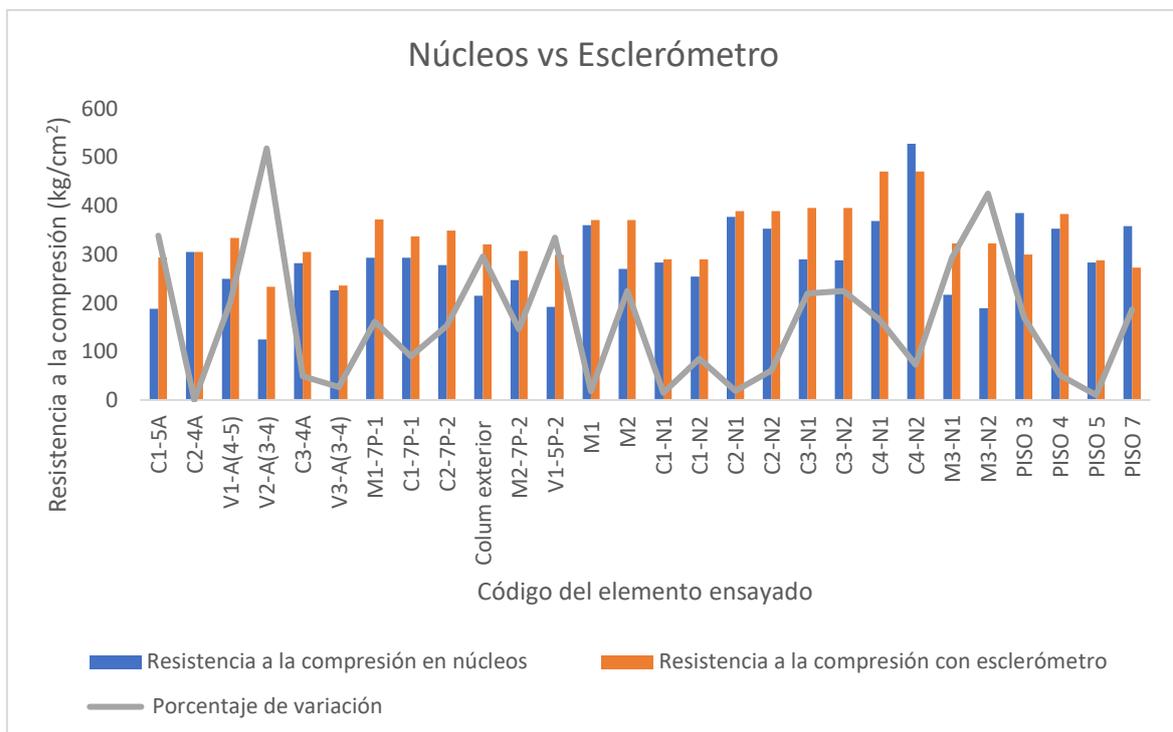


Figura 63. Variación de la resistencia a la compresión en núcleos vs esclerómetro
Fuente: elaboración propia

4.4. MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN

Tabla 17.

Resultados del ensayo de módulo de elasticidad

MÓDULO DE ELASTICIDAD						
INFORMACIÓN			CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA			
UBICACIÓN	ELEMENTO	MUESTRA	DIÁMETRO (D) (mm)	ALTURA (L) (mm)	PESO (g)	PESO UNITARIO (g/cm ³)
Q-E	Columna	CEX-PP-1	44.40	90	295.3	2.12
Q-E	Columna	CEX-PP-2	44.20	90	303.9	2.20
Q-E	Muro	Muro 2 sept piso	44.60	90	273.8	1.95
Q-E	Columna	Columna 1 piso1	44.40	90	297.9	2.14
Q-E	Viga	Viga 1 quinto -2	44.20	90	287.8	2.08

Fuente: elaboración propia

Tabla 18.

(Continuación) Resultados del ensayo de módulo de elasticidad

MÓDULO DE ELASTICIDAD							
MUESTRA	ÁREA (mm ²)	RELACIÓN L/D	CARGA MÁXIMA (kN)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	40% DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	CURVA ESFUERZO- DEFORMACIÓN
CEX-PP-1	1548.3	2.03	44.57	20298	28.79	11.51	Figura 47
CEX-PP-2	1534.39	2.04	68.59	26453	44.70	17.88	Figura 48
Muro 2 sept piso	1562.28	2.02	40.46	19574	25.90	10.36	Figura 49
Columna 1 piso1	1548.30	2.03	47.89	20727	30.93	12.37	Figura 50
Viga 1 quinto -2	1534.39	2.04	50.58	22192	32.96	13.03	Figura 51

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 19 se muestra los módulos de elasticidad obtenidos de manera experimental utilizando strain gages y los módulos teóricos que fueron calculados utilizando la ecuación (1) propuesta por el ACI 318-19, para la comparación y obtención de un porcentaje de variación entre estos valores.

Tabla 19.

Variación de los módulos de elasticidad experimentales vs teóricos

UBICACIÓN	ELEMENTO	MUESTRA	MÓDULO DE ELASTICIDAD EXPERIMENTAL (MPA)	MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO (MPA)	% DE VARIACIÓN
Q-E	Columna	CEX-PP-1	20298	25218,47	24,24%
Q-E	Columna	CEX-PP-2	26453	31423,29	18,79%
Q-E	Muro	Muro 2 sept piso	19574	23919,26	22,20%
Q-E	Columna	Columna 1 piso1	20727	26138,93	26,11%
Q-E	Viga	Viga 1 quinto -2	22192	26983,08	21,59%

Fuente: elaboración propia

4.4.1. RESULTADOS GRÁFICOS DEL ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN



Figura 64. Curva esfuerzo-deformación muestra CEX-PP-1
Fuente: elaboración propia

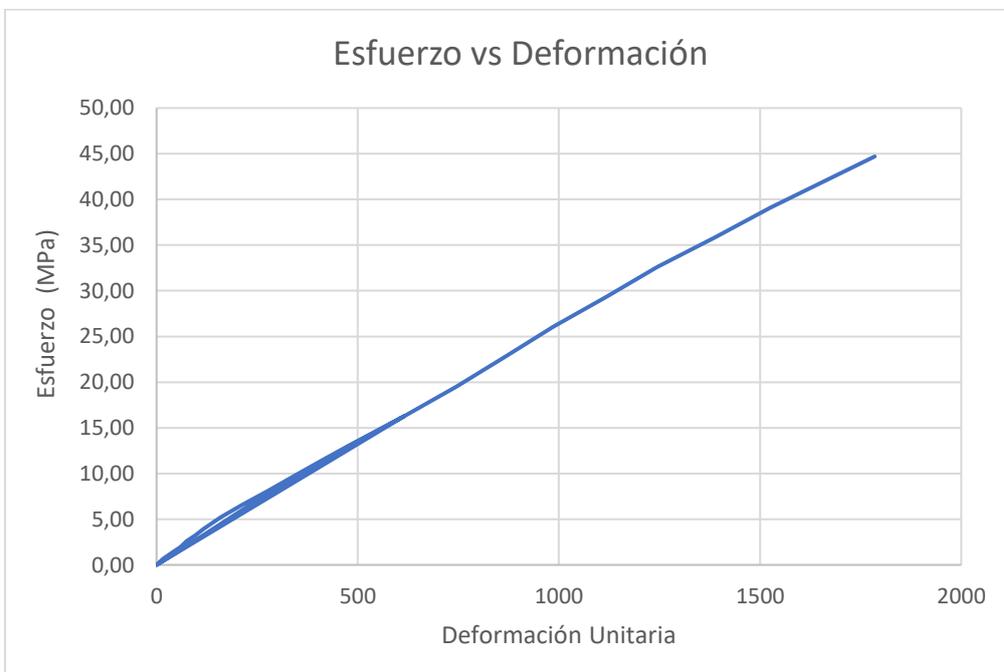


Figura 65. Curva esfuerzo-deformación muestra CEX-PP-2
Fuente: elaboración propia

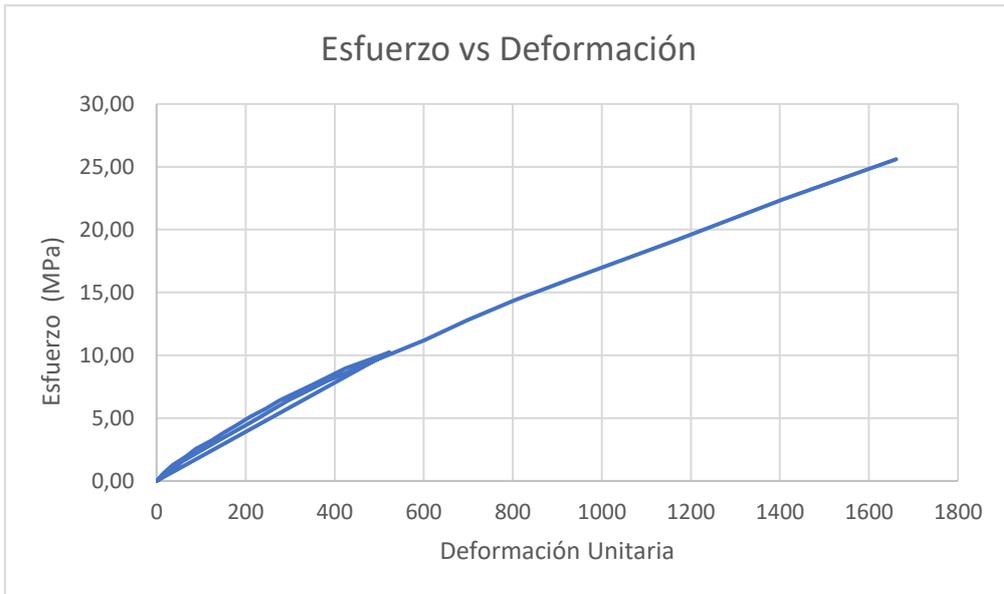


Figura 66. Curva esfuerzo-deformación muestra Muro 2 sept piso
Fuente: elaboración propia

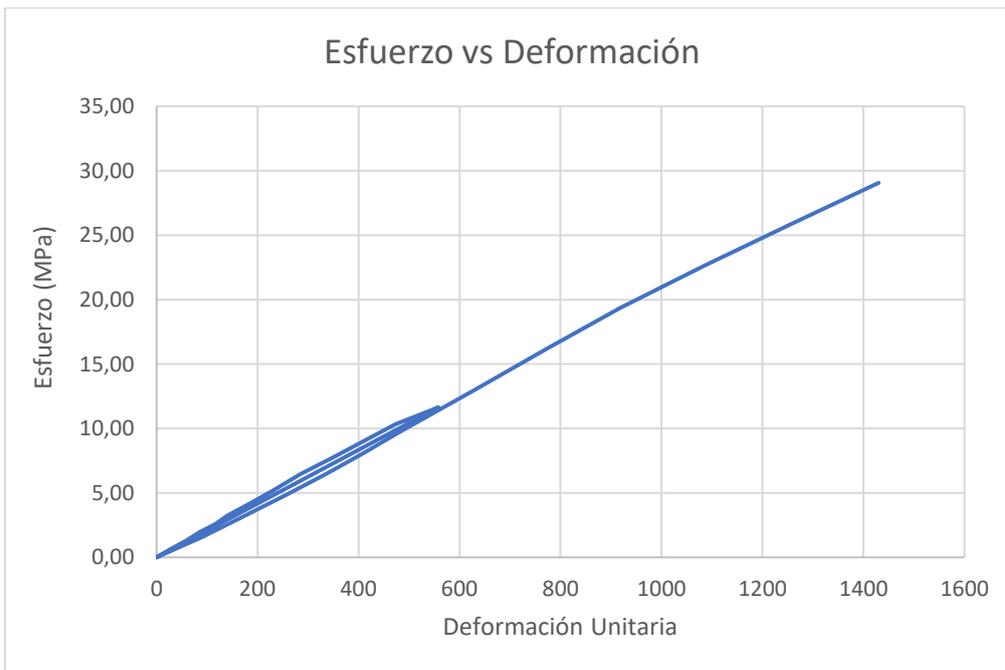


Figura 67. Curva esfuerzo-deformación muestra Columna 1 piso1
Fuente: elaboración propia

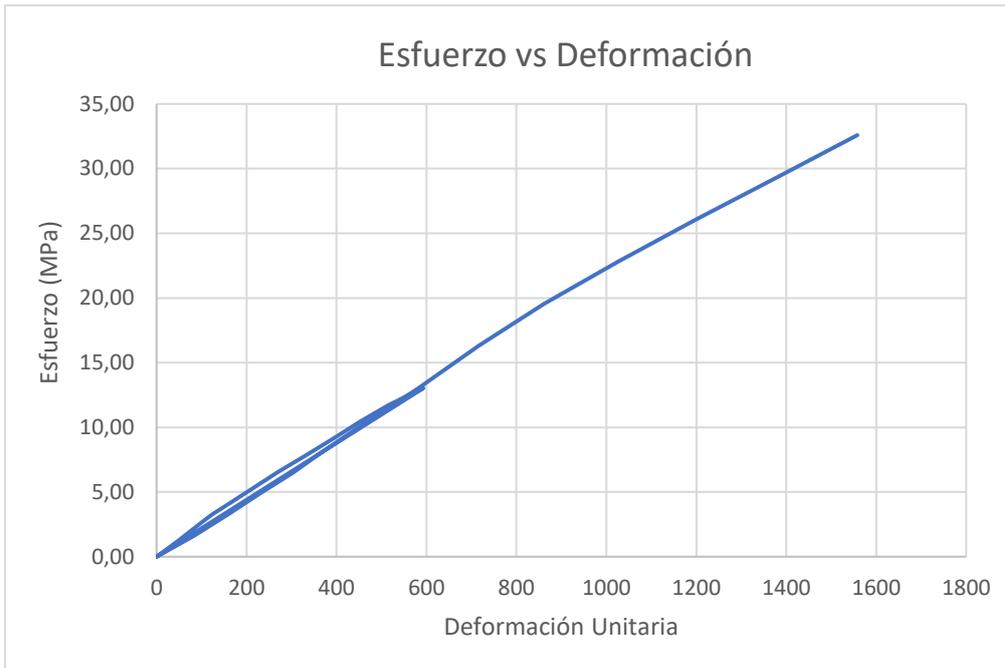


Figura 68. Curva esfuerzo-deformación muestra Viga 1 quinto -2
Fuente: elaboración propia

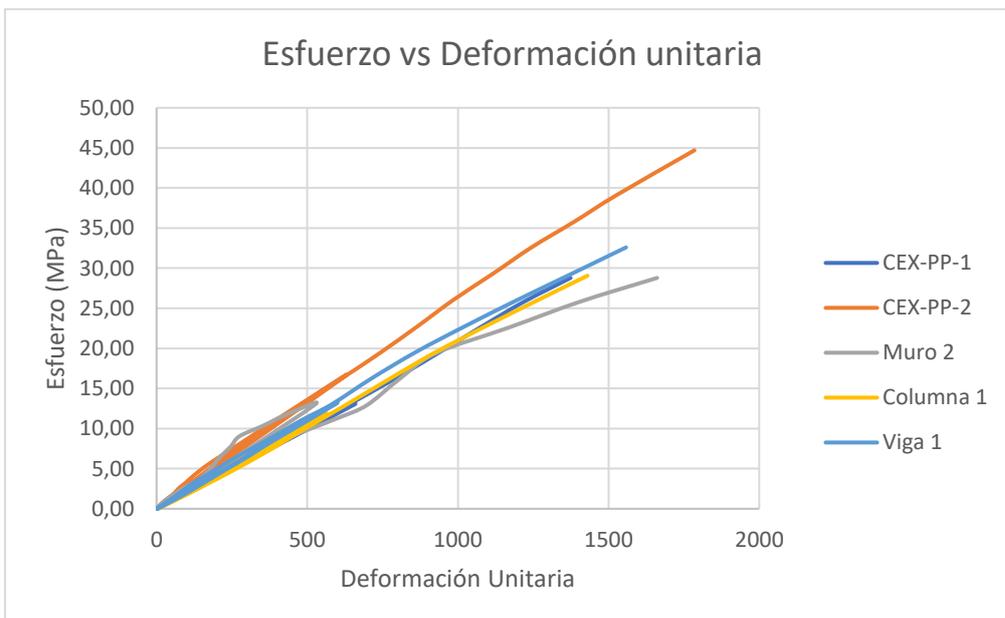


Figura 69. Diagrama comparativo esfuerzo – deformación de las muestras ensayadas
Fuente: elaboración propia

4.4.2. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN EXPERIMENTALES VS TEÓRICOS

Con base en los valores obtenidos en la Tabla 19 se ha preparado la siguiente Figura 70, donde se puede visualizar la diferencia de obtener el módulo de elasticidad del concreto mediante el ensayo de núcleos de hormigón y de manera teórica utilizando una ecuación.

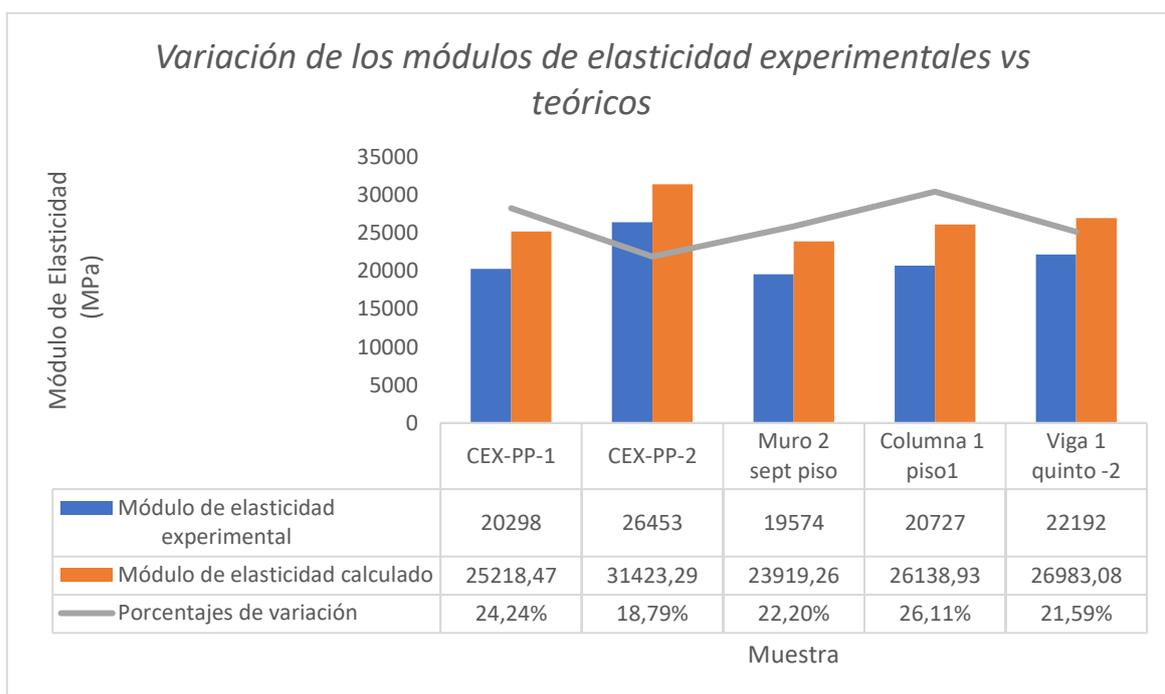


Figura 70. Variación de los módulos de elasticidad experimentales vs teóricos
Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

Una vez definidos los intervalos de confianza de 95% con respecto a la media de los datos conforme a lo indicado en las Figuras 54, 55 y 56; se procedió a descartar los datos que no se encontraban dentro de tales intervalos, dando como resultado lo siguiente:

Tabla 20.

Intervalo de confianza – esclerómetro

Esclerómetro (Número de rebote)	
Intervalo de confianza de 95%	
37,57	40,78

Fuente: elaboración propia

Tabla 21.

Intervalo de confianza – ultrasonido

Ultrasonido (velocidad, m/s)	
Intervalo de confianza de 95%	
2846,4	3341,9

Fuente: elaboración propia

Tabla 22.

Intervalo de confianza – compresión de núcleos

Compresión de Núcleos (resistencia a la compresión, kg/cm ²)	
Intervalo de confianza de 95%	
256,32	318,75

Fuente: elaboración propia

Como se pudo observar en las Tablas 20, 21 y 22, al aplicar los intervalos de confianza del 95% para cada uno de los grupos de datos de los ensayos realizados, se obtuvo como resultado rangos muy estrechos de valores, por lo que, al momento de la depuración de datos fue alto el número de estos que no entraban dentro de los rangos y por ende se los descartó. Obteniendo los siguientes valores finales que se muestran en la Tabla 23; 8 para el ensayo de esclerómetro, 9 para el ensayo de ultrasonido y 10 para compresión de núcleos.

Tabla 23.

Datos dentro de los intervalos de confianza

Datos en los intervalos de confianza de 95%		
Esclerómetro (número de rebote)	Ultrasonido (velocidad, m/s)	Compresión de núcleos (resistencia, kg/cm ²)
38	2933,33	305
40	3176,46	282
38	2924,13	293
40	2996,22	293
38	2900,95	278
39	3284,67	270
39	3296,70	283
39	3092,78	290
	3333,33	288
		283

Fuente: elaboración propia

Una vez conocidos los valores que, sí se encontraban dentro de los rangos de confianza establecidos, se realizó el análisis de regresión, obteniendo así las siguientes ecuaciones.

Para el caso de la correlación entre el número de rebote y la resistencia a la compresión, R^2 es igual a 0.814 y la ecuación correspondiente es:

$$y = 53 + 6R$$

Ecuación 14

Donde:

y = Resistencia a la compresión del hormigón, kg/cm²

R = Número de rebote

El número de datos utilizados en la correlación es 8. R^2 quiere decir que la ecuación representa al 81.4% de los datos validados, lo cual indica una significativa correlación entre estos dos ensayos. Siempre y cuando el número de rebote se encuentre comprendido entre 37.57 y 40.78 y la resistencia a la compresión se encuentre comprendida entre 256.32 kg/cm² y 318.75 kg/cm². El error estándar es 2.58199.

Para el caso de la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, R^2 es igual a 0.8374 y la ecuación correspondiente es:

$$y = 161.9 + 0.03946V$$

Ecuación 15

Donde:

y = Resistencia a la compresión del hormigón, kg/cm²

V = Velocidad de pulso ultrasónico, m/s

El número de datos utilizados en la correlación es 9. R^2 quiere decir que la ecuación representa al 83.74% de los datos validados, lo cual indica una significativa correlación entre estos dos ensayos. Siempre y cuando la velocidad sónica se encuentre comprendida entre 2846.4 y 3341.9 y la resistencia a la compresión se encuentre comprendida entre 256.32 kg/cm² y 318.75 kg/cm². El error estándar es 3.23387.

Para el caso de la correlación entre el número de rebote, velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, R^2 es igual a 0.9272 y la ecuación correspondiente es:

$$y = 175.6 + 0.0299V + 0.44R$$

Ecuación 16

Donde:

y = Resistencia a la compresión del hormigón, kg/cm²

V = Velocidad de pulso ultrasónico, m/s

R = Número de rebote

El número de datos utilizados en la correlación es 8. R^2 quiere decir que la ecuación representa al 92.72% de los datos validados, lo cual indica una significativa correlación entre estos dos ensayos. Siempre y cuando la velocidad sónica se encuentre comprendido entre 2846.4 y 3341.9, el número de rebote entre 37.57 y 40.78 la resistencia a la compresión se encuentre comprendida entre 256.32 kg/cm² y 318.75 kg/cm². El error estándar es 1.77090.

5.2. ESCLERÓMETRO

- Como se aprecia en la Figura 57, existe una relación directamente proporcional entre el número de rebote promedio y la resistencia a la compresión del concreto, ya que mientras mayor sea el primero también lo será la segunda. Sin embargo, esta relación depende en gran medida de la dirección de impacto del martillo sobre el elemento de estudio, ya que si se lo realiza a 90° (posición vertical), la resistencia disminuye considerablemente. Esto se puede apreciar de mejor manera si se compara los puntos “V1-5P quinto piso” y “C2-7P séptimo piso” del edificio de Química-Eléctrica (ver Tabla 9), los cuales reportaron un valor de rebote promedio idéntico de 41, aun así, la resistencia ensayada del primero fue 299 kg/cm² mientras que del segundo fue de 349 kg/cm², aproximadamente un 16.72% mayor, debido únicamente a que la dirección de impacto del primero fue a 90° y en el segundo a 0°.
- Lo anterior se corrobora, al comparar otro par de puntos con similar número de rebote promedio, como es el caso de “Exteriores gradas Pb” y “Losa Piso 4” del edificio Administrativo (ver Tabla 9), los cuales reportaron un valor de rebote promedio idéntico de 44 y sus resistencias ensayadas son similares 389 y 383 kg/cm² respectivamente, debido a que en ambos casos el ensayo se llevó a cabo de manera horizontal, es decir, con una dirección de impacto de 0°.

- Como se aprecia en la Figura 58, entre los tres edificios estudiados, el CIV reportó los valores más pequeños de número de rebote promedio con valores entre 32 y 40, siguiéndole Química – Eléctrica con valores entre 38 y 43 y finalmente el edificio Administrativo con valores entre 35 y 50. Tomando en cuenta que estos tienen 23, 41 y 49 años respectivamente, se puede observar que efectivamente a mayor edad del edificio mayores valores de rebote presenta el concreto endurecido.

5.3. ULTRASONIDO

- Como se aprecia en la Figura 59, en donde se graficó la relación entre la distancia entre los transductores del equipo de ensayo y el tiempo que se tardó la señal en viajar de un extremo al otro, los resultados del ensayo de ultrasonido se encuentran influenciados por varios factores, entre los cuales se puede mencionar precisamente la distancia entre los transductores, la cual depende de si el ensayo se realiza de manera directa, paralela o semidirecta y la condición del hormigón del elemento de estudio. Ya que si se compara los puntos “Columna 3-1, Exteriores gradas planta baja” y “Losa Piso 4” del edificio Administrativo, los cuales registraron un tiempo de tránsito de 27.40 y 23.80 μ s respectivamente, se puede observar que a pesar de que la distancia entre los transductores es similar en ambos puntos, es decir 9 y 9.10 cm, en el segundo caso la señal circuló con mayor facilidad entre el concreto y por ende se demoró menos. Esto puede deberse a la condición del concreto que forma este elemento, ya que se pudo observar mientras se realizaban los ensayos que las losas de este edificio son huecas.
- De acuerdo con la Tabla 1, en la cual se define una serie de rangos para categorizar la condición del concreto en función de la velocidad registrada en el ensayo de ultrasonido y tomando en cuenta los resultados presentados en la Figura 60, se puede apreciar que, el concreto del CIV se encuentra en una condición pobre en su mayoría, mientras que el edificio de Química – Eléctrica está entre pobre y muy pobre y el edificio administrativo en una condición de regular a dudoso, respectivamente.

- Con respecto a la variación de las velocidades de pulso experimentales vs las velocidades teóricas, que fueron obtenidas mediante una ecuación propuesta por la norma ASTM C597, se puede observar que en su mayoría los puntos se elevan drásticamente, como se puede observar en la Figura 61. Lo que significaría que, lo teórico no siempre refleja la realidad y que en este caso la ecuación para obtener la velocidad de pulso no considera una serie de factores con respecto al concreto, como su edad, modo de fabricación, entre otros.

5.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS DE HORMIGÓN

- Una vez obtenidos los resultados de resistencia a la compresión de cada uno de los edificios, se los agrupó en la Figura 62, en la cual se puede apreciar que no existe una relación muy bien definida entre la edad del concreto y la evolución de su resistencia y por el contrario ésta depende de otros factores tales como: su método de elaboración, la calidad de los agregados utilizados, su manipulación y puesta en obra, entre otros. Lo que explicaría por qué, al haber extraído dos núcleos de un mismo punto del edificio Administrativo, “C4-N1” y “C4-N2”, estos registraron resistencias de 369 y 528 kg/cm² respectivamente, cuando se esperarían que por tratarse del mismo elemento deberían estar conformados por la misma calidad de concreto. Sin embargo, se podría considerar que hubo dos fundiciones diferentes en tiempos diferentes para un mismo elemento en niveles consecutivos.
- Adicionalmente, es importante tomar en cuenta los grandes saltos en las resistencias registradas para un mismo edificio, como se observa en la Figura 62. Puesto que, esto pudo ser consecuencia de la ubicación de dónde fueron extraídos los núcleos, ya que, por motivos de facilidad en la instalación de equipos, éstos en su mayoría fueron extraídos de los puntos más bajos cuando se trataba de columnas y justamente ese punto no es el más recomendable por los estribos o segregación en la fundición.

- Al comparar las resistencias del concreto obtenidas mediante compresión de núcleos extraídos de diversos elementos y las arrojadas por el ensayo de esclerómetro, como se aprecia en la Figura 63, se puede observar que el porcentaje de variación de resultados entre estos dos ensayos se encuentra entre el 2 y el 86%, esto puede ser debido a un insuficiente control de calidad o la falta de éste en el proceso de fundición de los elementos estructurales, por lo que, el concreto pudo resultar no homogéneo. Además, si bien es cierto que el ensayo de esclerómetro dio como resultado valores de resistencias más altos, eso no quiere decir que esa sea la realidad y por lo tanto no deben tomarse aquellos datos como las resistencias verdaderas, ya que, entre los ensayos estudiados, la extracción y compresión de núcleos siempre es la primera opción que se escoge, por su nivel de precisión.

5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD

- Como se aprecia en la Figura 69, el núcleo “CEX-PP-2” (curva color naranja) presentó mejor comportamiento esfuerzo-deformación que el núcleo “CEX-PP1” (curva color azul) aun cuando los dos fueron extraídos del mismo punto del edificio Administrativo, lo que da una idea de cómo pueden variar las características del hormigón en un mismo elemento estructural por la calidad de fundición ya que no es homogénea y control de la obra.
- De la misma manera, para el edificio de Química-Eléctrica es posible ver en la Figura 69 que para las muestras “Muro 2” (curva color gris) y “Viga 1” (curva color celeste) existe una diferencia significativa de resultados de esfuerzo (264 kg/cm^2 vs 336 kg/cm^2) lo que indicaría que la deformación del hormigón se encuentra en función del elemento del cual es extraído el núcleo.

- Se obtuvieron resultados del módulo de elasticidad del concreto tanto experimentales como teóricos, con los cuales se realizó la gráfica de variación de éstos como se puede ver en la Figura 70. En el primer núcleo “CEX-PP-1” el módulo de elasticidad calculado es 24.24% mayor que el obtenido experimentalmente, en el segundo núcleo “CEX-PP-2” el módulo de elasticidad calculado es 18.79% mayor que el obtenido experimentalmente, en el tercer núcleo “Muro 2 sept piso “ el módulo de elasticidad calculado es 22.20% mayor que el obtenido experimentalmente, en el cuarto núcleo “Columna 1 piso 1” el módulo de elasticidad calculado es 26.11% mayor que el obtenido experimentalmente y para el quinto núcleo “Viga 1 quinto-2” el módulo de elasticidad calculado es 21.59% mayor que el obtenido experimentalmente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Una vez que se planteó el diseño experimental del trabajo de titulación se llevó a cabo las visitas de reconocimiento del lugar donde se trabajaría, para la selección de los puntos en los cuales se realizó la extracción de núcleos, ultrasonido y esclerómetro. Sin embargo, no se tomó en cuenta ciertas precauciones el momento de la ejecución en campo, como por ejemplo el sitio idóneo para la extracción de núcleos, o que una mala maniobra con la broca puede ocasionar debilitamiento en el elemento estructural y por lo tanto alterar el resultado final de las propiedades mecánicas del concreto.
- Se obtuvo como resultados para el edificio Administrativo un total de 16 núcleos, 12 datos del ensayo de rebote, 16 de ultrasonido y 2 muestras para el ensayo de módulo de elasticidad. Para el Centro de Investigación de la Vivienda se obtuvo 6 núcleos, 6 datos del ensayo de rebote y 6 de ultrasonido. Finalmente, para el edificio de Química-Eléctrica se obtuvo un total de 6 núcleos, 6 datos del ensayo de rebote, 8 de ultrasonido y 3 muestras para el ensayo del módulo de elasticidad. Obteniendo un total de 28 datos del ensayo de extracción de núcleos, 30 datos del ensayo de ultrasonido, 24 datos del ensayo de esclerómetro y 5 datos para módulo de elasticidad de las edificaciones de estudio.
- Una vez que se definieron los intervalos de confianza del 95% para cada uno de los ensayos realizados y en base a estos se descartaron los datos que no se ajustaban a tales intervalos, se obtuvo solamente 8 valores (de los 24 iniciales) del ensayo de esclerómetro, 9 de ultrasonido (de los 30 iniciales) y 10 de compresión de núcleos (de los 28 iniciales).

Con estos valores depurados se obtuvieron las ecuaciones de correlación 14, 15 y 16, de lo cual se concluye que, en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón, la ecuación de correlación que daría resultados más confiables es aquella en la que se combinan los dos ensayos no destructivos (ecuación 16), puesto que tiene el menor error estándar, igual a 1.77 y su R^2 es igual a 0.9272, en comparación con las otras ecuaciones obtenidas, en las cuales se utiliza los resultados de estos ensayos de manera individual.

- Se analizó los resultados de cada uno de los ensayos llevados a cabo, con lo cual se corroboró que el ensayo de extracción y compresión de núcleos es el que arroja los resultados más cercanos a la realidad en la determinación de la resistencia a la compresión del concreto. Se concluye que la correlación directa entre los ensayos puede ser mayor o menor en función de que cada uno de ellos está influenciado por diferentes factores como: los materiales utilizados y el modo de elaboración del concreto, la disposición (horizontal o vertical) del martillo en el ensayo de rebote, la presencia de vacíos en el concreto y el tipo de medición (directa, semidirecta o indirecta) en el ensayo de ultrasonido, entre muchos otros.
- De acuerdo con la norma ASTM C42, que regula el ensayo de extracción de núcleos, el diámetro mínimo de extracción es de 8.5 cm, sin embargo, por la disposición de los aceros en los elementos estructurales con alta cuantía de refuerzo de los edificios de estudio, resultaba imposible obtener núcleos de tales dimensiones y por ello únicamente se trabajó con muestras de 5 cm de diámetro, lo que influyó en la notable variación en los resultados obtenidos de resistencia a la compresión.
- Se tomó como antecedente los resultados obtenidos por Morillo y Toapanta (2020) de su estudio del Centro de Investigación de la Vivienda, en el cual obtuvieron que con el ensayo de esclerómetro la resistencia promedio del concreto en este sitio era igual a 255.65 kg/cm² (ver Tabla 5) y con la extracción y compresión de núcleos era igual a 287.92 kg/cm² (ver Tabla 6), mientras que en esta investigación se obtuvo que la resistencia promedio para este centro, con esos mismos ensayos era de 284.50 kg/cm² y 229.33 kg/cm² respectivamente.

Sin embargo, en la Tabla 5 se puede apreciar que en este centro se utilizaron dos tipos de hormigones para su construcción, lo que pudo haber provocado la dispersión en los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados. Finalmente, conociendo de los planos (Anexo A) que la resistencia de diseño fue de 230 kg/cm^2 , se concluye que efectivamente la evolución de la resistencia en el concreto del Centro de Investigación de la Vivienda fue mayor en sus primeros años, debido a que el desarrollo de esta propiedad es asintótico.

- De igual manera, se tomó como antecedente los resultados obtenidos por Loo (2017) de su estudio del Edificio Administrativo, en el cual obtuvo que con el ensayo de esclerómetro, la resistencia promedio del concreto en este sitio era igual a 386.43 kg/cm^2 (ver Tabla 7), mientras que en esta investigación se obtuvo que la resistencia promedio para este centro, con ese mismo ensayo era de 357.75 kg/cm^2 . Además, conociendo de los planos (Anexo B) que la resistencia de diseño fue de 280 kg/cm^2 , se concluye que, debido a su mayor edad en comparación con el Centro de Investigación de la Vivienda, 49 y 23 años respectivamente, el concreto si ha desarrollado de mejor manera su resistencia, pero forma similar esa evolución se dio en mayor medida en los primeros años de su elaboración.
- Se observó que, en ninguno de los núcleos ensayados en el laboratorio LEMSUR, los resultados obtenidos experimentalmente del módulo de elasticidad del hormigón son semejantes a los obtenidos teóricamente con la ecuación (1) propuesta el American Concrete Institute en el ACI 318-19 (2019). Claramente se observa en la Figura 70 que los resultados teóricos y experimentales del módulo de elasticidad presentan diferencias en porcentajes comprendidos entre el 18,79% y el 26.11%, esta variación en los resultados ocurre debido a que el módulo de elasticidad del hormigón puede cambiar según las propiedades de los agregados. Esto implica la necesidad de tener un conocimiento previo de las características de los agregados utilizados en la elaboración del hormigón de estudio.

- La ecuación (1) para el cálculo del módulo de elasticidad plantea que esta propiedad puede ser determinada en función de la resistencia a la compresión del hormigón; sin embargo, de acuerdo con los resultados de los ensayos realizados en laboratorio, se concluye que a pesar de que en los núcleos se incrementa la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad no aumentó significativamente.

6.2. RECOMENDACIONES

- En los edificios de estudio se extrajeron los núcleos para ser ensayados, tanto en vigas, como columnas, losas y muros. Sin embargo, no se los extrajo de los puntos idóneos, por lo que se recomienda tener en cuenta la importancia de la ubicación de los puntos de extracción, tomando en cuenta que para una viga lo recomendable es sacar las muestras de la parte central y no de los extremos, mientras que para columnas no se recomienda sacar los núcleos de la parte inferior, ya que en el momento del colado, el hormigón al llegar a este punto ya llega golpeado y esto puede influir en el desarrollo de sus propiedades mecánicas.
- Dado que, en el presente estudio los resultados obtenidos una vez depurados en función de los intervalos de confianza establecidos no fueron suficientes para realizar la adecuada correlación entre los ensayos, se recomienda complementar este trabajo realizando una mayor cantidad de lecturas, a fin de contar con una mayor base de datos que alimente el análisis de correlación.
- En vista de que ninguno de los ensayos empleados para determinar las propiedades mecánicas del hormigón presenta la misma facilidad de realización, la misma confiabilidad y los mismos costos, se recomienda que en aquellos sitios en los que por diferentes razones no se pueda extraer una cantidad significativa de núcleos, ésta se limita al mínimo establecido en las normas y el estudio se complemente con lecturas de ultrasonido o esclerómetro o bien una combinación de los dos, para al menos tener una idea de la homogeneidad del material.

- Al momento de realizar el ensayo de ultrasonido, se recomienda el cuidado en la posición de los transductores, pues el equipo es muy sensible hasta a la más mínima variación de posición, así como al estado de humedad del concreto, ya que la velocidad de pulso es mayor cuando éste se encuentra en estado húmedo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute. (1991). *ACI 305 Hot Weather Concreting*.
<https://fdocuments.ec/document/aci-305-traducido.html>
- American Concrete Institute. (2019). *ACI CODE 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
<https://doi.org/www.concrete.org>
- American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE 41-17. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.
- ASTM International. (2014). *ASTM C469/C469M-14e1 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
https://doi.org/10.1520/C0469_C0469M-14E01
- ASTM International. (2016). *ASTM C617/C617M-15 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*. https://doi.org/10.1520/C0617_C0617M-15
- ASTM International. (2018). *ASTM C805/C805M-18 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*.
https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18
- ASTM International. (2020). *ASTM C42/C42M-20 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*.
https://doi.org/10.1520/C0042_C0042M-20
- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- Aydin, F., & Saribiyik, M. (2010). Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings. *Scientific Research and Essays*, 5(13), 1644-1648.
<http://www.academicjournals.org/SRE>
- Cagua, B., & Nates, D. (2017). *Influencia del Potencial Hidrógeno (pH) y la concentración de Nitratos presentes en el agua de mezclado sobre el comportamiento Físico-Mecánico del Hormigón: Estudio en Laboratorio*.

- [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17062>
- Cánoves, J. (2013). *Evolución de la resistencia del hormigón de obra. Métodos de predicción a partir de los ensayos de control de la conformidad del hormigón.* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia], Riunet UPV.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30171/tesisUPV4023.pdf?sequence=1&is>
- Carrasco, J. (2020). *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador.* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia], Riunet UPV.
<http://hdl.handle.net/10251/155554>
- Carrillo, J., González, G., & Jiménez, M. (2007). Incidencia del diámetro de extracción de núcleos de concreto en el análisis de las derivas de estructuras aporticadas. *Dyna*, 74(152), 207-216.
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n152/a19v74n152.pdf>
- Carrillo, W., & González, G. (2004). Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural. *Escuela Colombiana de Ingeniería*(54), 17-25.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42386992/Correlacin_entre_el_dimetro_de_extraccin20160208-14055-10gaiwn.pdf?1454944017=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCorrelacion_entre_el_diametro_de_ext_racc.pdf&Expires=1639873138&Signature=Co5xV
- Carrillo, W., & González, G. (2004). Correlación entre el diámetro de extracción y las características del concreto en la auscultación estructural. *Escuela Colombiana de Ingeniería*(54), 17-25.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42386992/Correlacin_entre_el_dimetro_de_extraccin20160208-14055-10gaiwn.pdf?1454944017=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCorrelacion_entre_el_diametro_de_ext_racc.pdf&Expires=1639873138&Signature=Co5xV

- Castro, P., & Sánchez, D. (2019). *Análisis en laboratorio de los efectos en la resistencia a compresión y tracción de elementos estructurales de hormigón armado post afectación por altas temperaturas*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20173>
- Correa, M. B., & Machado, L. (2012). *Análisis comparativo económico estructural entre sistemas constructivos tradicionales y un sistema constructivo alternativo liviano*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4538>
- Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). *Centro de Investigación de la Vivienda: Quienes Somos*. Historia: <https://demostemas.epn.edu.ec/pruebasciv/index.php/quienes-somos>
- Estrada, K., & Vivanco, N. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica, análisis estructural y diseño del reforzamiento de una vivienda de tres pisos ubicada en el norte de Quito-Ecuador*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20314>
- Giraldo, D., & Delgado, D. (2019). *Determinación del módulo de elasticidad en concreto mediante calibres extensiométricos (STRAIN GAGES)*. [Tesis de pregrado, Universidad Libre], Repositorio Institucional Unilibre. <https://hdl.handle.net/10901/17861>
- Gómez, V. (2018). El hormigón: un mundo por descubrir. *Gremios(71)*, 2-3. http://www.tensegridad.es/Publications/El_Hormigon-Un_Mundo_Por_Descubrir_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf
- Hernández, J., Orozco, Á., Almanza, D., & Ramírez, J. (2017). Relación entre resistencia a compresión en cilindros de concreto y los rebotes con esclerómetro digital. *Ingeniare(22)*, 59-68. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/INGENIARE.22.1342>
- Levin, R., Rubin, D., Balderas, M., Del Valle, J. C., & Gómez, R. (2004). *Estadística para administración y economía* (Séptima edición ed.). Pearson Educación. https://www.academia.edu/9701898/Estad%C3%ADstica_para_Administrac

i%C3%B3n_y_Econom%C3%ADa_7ma_Edici%C3%B3n_Richard_I_Levin_and_David_S_Rubin

- Lloor, C. (2017). *Estudio de la vulnerabilidad sísmica y diseño del reforzamiento estructural del Edificio Administrativo de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18971>
- Luna, G. (2014). *Estudio del hormigón: guía didáctica para el diseño de mezclas*. Edicumbre.
- Martínez, J. (2021). *Hacia una construcción sostenible: análisis de soluciones constructivas para mejora de la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena], Repositorio Académico UPC. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/9650>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Estructuras de Hormigón Armado. NEC-SE-HM. En *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.
- Morillo, A., & Toapanta, C. (2020). *Análisis de estado de la estructura existente del Centro de Investigación de la Vivienda - CIV y diseño estructural de la ampliación del muro de reacción e infraestructura del CIV*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional], Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21540>
- Porras, C., Aguilar, M., & Puig, R. (2019). Casos de estimación de la resistencia a compresión del hormigón armado validando ecuaciones de regresión que combinan el empleo de ensayos no destructivos (NDT) con ensayos destructivos (DT) en Cuba. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 13(1), 1-15. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193958877008>
- Portland Cement Association. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. www.cement.org
- Sánchez, D., Chiliquinga, J., Flores, E., & Orosco, M. (2020). Módulo Estático de Elasticidad del Hormigón Fabricado con Agregados de la Mina de San Roque, Imbabura, Ecuador. *Revista Politécnica*, 46(1), 29-38. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v46n1/2477-8990-rpolit-46-01-29.pdf>

- Shariati, M., Sulong, H. R., Arabnejad, M. M., Shafigh, P., & Sinaei, H. (2011). Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests. *Scientific Research and Essays*, 6(1), 213-220. <https://doi.org/10.5897/SRE10.879>
- Siancas, D. (2021). *Determinación de la resistencia del concreto del pabellón 3A - de la I.E. 14787 Víctor Raúl Haya De la Torre, usando la diamantina, el esclerómetro y el equipo de ultrasonido*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Piura], Repositorio Institucional UNP. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2933>
- Sika. (s.f.). *Concreto. Aditivos para concreto*.
- Soto, M., & Marín, J. P. (2019). *Análisis del concreto con caucho como aditivo para aligerar elementos estructurales*. [Tesis de pregrado, Universidad Libre Seccional], Repositorio Digital Universidad Libre Seccional. <https://bit.ly/3u1tgJ4>
- Toirac, J. (2019). La resistencia a compresión del hormigón, condición necesaria pero no suficiente para el logro de la durabilidad de las obras. *Ciencia y Sociedad*, XXIV(4), 463-504. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87014516001>
- Vallejo, T. (2017). *Análisis comparativo de ensayos destructivos y no destructivos de hormigones de alta resistencia*. [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil], Repositorio de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/28535>
- Vidaud, E., & Vidaud, I. (2016). *Ultrasonido: Aplicación para la determinación del módulo de elasticidad dinámico*. <https://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/enero2016/tecnologia.pdf>
- Villagómez, L. (2017). *Predicción de la resistencia a la compresión del hormigón mediante métodos de ensayo no destructivo para hormigones convencionales en Pichincha, Ecuador*. [Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito], Repositorio Digital USFQ. <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5986/1/129201.pdf>
- Yancha, A. (2013). *Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ($f'_c=28$ MPa), fabricado con materiales de la*

mina San Ramón, ubicada en la parroquia de Mulaló en la Provincia de Cotopaxi y Cemento Chimborazo. [Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador], Repositorio Digital UCE.
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1657>