

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Determinación de características mecánicas de elementos de
concreto prefabricado mediante el empleo de ensayos no
destructivos**

Proyecto de graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

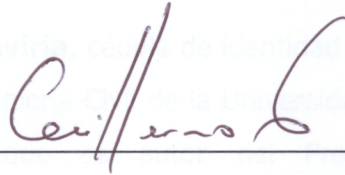
Sebastián Eusse Gaviria

Director de proyecto final de graduación:

Ing. Guillermo González Beltrán, PhD.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación



Ing. Guillermo González Beltrán, PhD

Director de Proyecto



Ing. Esteban Villalobos Vega, M.Sc.

Asesor



Ing. Guillermo Santana Barboza, PhD

Asesor

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2019, Agosto, 23

El suscrito, **Sebastián Eusse Gaviria**, cédula de identidad 117001152931, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A9288, manifiesta que es autor del Proyecto final de Graduación **Determinación de características mecánicas de elementos de concreto prefabricado mediante el empleo de ensayos no destructivos**, bajo la dirección del Doctor Guillermo González Beltrán, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mis padres que han estado en todo momento para apoyarme.

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mis padres, ya que sin la ayuda de ellos no podría haber llegado a estas instancias. Siempre han estado para apoyarme en cada momento de mi vida y gracias a ellos he podido llegar a ser una mejor persona. Igualmente quiero agradecer a mi hermano, que de igual forma siempre estuvo con disposición de ayudarme cuando más lo necesité. Es por esto y por muchas otras razones que quiero dedicarles este logro y todos los demás logros de mi vida.

A todos mis compañeros y amigos que formaron parte de este duro proceso universitario, ya que es gracias a ellos que me llevo muchas experiencias y buenos recuerdos.

A todo el personal del LanammeUCR, especialmente a los técnicos, ya que ellos fueron indispensables en el proceso de los ensayos experimentales llevados a cabo para el presente trabajo. De igual forma me gustaría agradecer a los integrantes de la Unidad de Puentes, los cuales me permitieron laborar como asistente durante casi tres años.

Finalmente agradecerle a las empresas CONCREprefa y Precasa, quienes me permitieron realizar los ensayos no destructivos a sus elementos, así como ir a los centros de producción para la confección de especímenes de concreto.

Índice

1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Importancia.....	2
1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema	3
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Delimitación del problema.....	7
1.5.1 Alcance.....	7
1.5.2 Limitaciones.....	7
1.6 Descripción de la metodología a usar.....	8
1.6.1 Investigación teórica.....	9
1.6.2 Realización de ensayos en laboratorio	9
1.6.3 Análisis de resultados	9
2. Marco teórico	10
2.1 Ensayos no destructivos	11
2.2 Esclerómetro Silverschmidt tipo L	11
2.3 Medidor de resistividad eléctrica Resipod	14
2.4 Medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab.....	16
2.5 Detector de barras de acero Elcometer 331 B.....	19
3. Esquema experimental.....	23
3.1 Ensayos no destructivos	26
3.1.1 Mediciones con el esclerómetro Schmidt.....	26
3.1.2 Mediciones de resistividad eléctrica	27
3.1.3 Mediciones de velocidad de onda por ultrasonido	29
3.1.4 Detector de metales	30
3.2 Ensayos destructivos	31
3.2.1 Ensayo de compresión de cilindros de concreto.....	31
3.2.2 Ensayo para determinar la resistencia en flexión de baldosas prefabricadas	32
3.2.3 Ensayo para determinar la resistencia en flexión de columnas prefabricadas	34

4.	Resultados	37
4.1	Ensayo 1 – Fabricante A	37
4.1.1	END	37
4.1.2	ED	39
4.2	Ensayo 1 – Fabricante B	41
4.2.1	END	41
4.2.2	ED	43
4.3	Ensayo 2 – Fabricante A	44
4.3.1	END	44
4.3.2	ED	46
4.4	Ensayo 2 – Fabricante B	48
4.4.1	END	48
4.4.2	ED	50
4.5	Detector de metales	52
4.5.1	Columnas	52
4.5.2	Baldosas	53
5.	Análisis de resultados.....	54
5.1	Resistencia a la compresión de cilindros de control	54
5.2	Esclerómetro Silverschmidt	55
5.3	Medidor de velocidad de onda por ultrasonido	60
5.4	Medidor de resistividad eléctrica	64
5.5	Detector de metales	66
5.6	Resistencia a la flexión	69
5.6.1	Valores reales	69
5.6.2	Valores estimados	70
6.	Conclusiones	73
7.	Recomendaciones.....	74
8.	Referencias bibliográficas	76

Índice de figuras

Figura 1. Sistema de construcción de columnas y baldosas de concreto prefabricado	1
Figura 2. Metodología a emplear en el proyecto	8
Figura 3. Componentes y mecanismo del esclerómetro Schmidt	12
Figura 4. Esclerómetro Silverschmidt tipo L	13
Figura 5. Medidor de resistividad resipod.....	14
Figura 6. Funcionamiento del medidor de resistividad Resipod	15
Figura 7. Medidor de velocidad de onda Pundit Lab.....	17
Figura 8. 1 – transductor de 150 kHz y 2 - transductor exponencial de 54 kHz	18
Figura 9. Detector de acero Elcometer 331	20
Figura 10. Método de inducción magnético.....	21
Figura 11. Cabeza de detección estrecha.....	21
Figura 12. Columna tipo 2A.....	23
Figura 13. Proceso de confección de cilindros de control.....	24
Figura 14. Espacio para curado de los cilindros.	24
Figura 15. Muestreo de baldosas del Fabricante A.	25
Figura 16. Muestra de columnas en el LanammeUCR.....	25
Figura 17. Formas de colocación de transductores para el equipo de velocidad de onda ..	29
Figura 18. Información mostrada en la pantalla del detector de metales	31
Figura 19. Máquina de compresión propiedad del LanammeUCR	32
Figura 20. Configuración utilizada para el fallo en flexión de baldosas.....	33
Figura 21. Configuración utilizada para la falla en flexión de columnas.....	34
Figura 22. Ubicación del acero de refuerzo en las baldosas ensayadas	53
Figura 23. Gráfico de resistencia real contra resistencia calculada.....	57
Figura 24. Resistencia real y calculada con respectivo % de error – Ensayo 1 Fabricante A	58
Figura 25. Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 2 Fabricante B	59
Figura 26. Gráfico de resistencia real contra resistencia calculada.....	62
Figura 27. Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 1 Fabricante A	63

Figura 28. Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 1 Fabricante B	64
Figura 29. Resultados promedio de resistividad para cada ensayo	65
Figura 30. Porcentajes de error de recubrimiento en columnas.....	67
Figura 31. Porcentajes de error de recubrimiento en baldosas.....	67
Figura 32. Estimación de capacidad en flexión para columnas con su % de error respectivo para cada ensayo.....	71
Figura 33. Estimación de capacidad en flexión para baldosas con su % de error respectivo para cada ensayo.....	72

Índice de cuadros

Cuadro 1. Información técnica del esclerómetro Silverschmidt tipo L	13
Cuadro 2. Información técnica del medidor de resistividad resipod	16
Cuadro 3. Dimensiones longitudinales mínimas de acuerdo con la frecuencia y velocidad de pulso.	17
Cuadro 4. Frecuencias recomendadas según el tamaño del agregado y la velocidad de pulso.....	18
Cuadro 5. Rangos de medición para sensor de esquina estrecha	22
Cuadro 6. Clasificación de la corrosión en relación con los valores de resistividad	28
Cuadro 7. Calidad del concreto de acuerdo a la velocidad de onda	29
Cuadro 8. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	37
Cuadro 9. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas	38
Cuadro 10. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	38
Cuadro 11. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas....	38
Cuadro 12. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas	39
Cuadro 13. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas ..	39
Cuadro 14. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control.....	39
Cuadro 15. Dimensiones promedio de las columnas	40
Cuadro 16. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas	40
Cuadro 17. Carga y momento resistente máximo en las columnas	40
Cuadro 18. Dimensiones promedio de las baldosas	40
Cuadro 19. Carga y momento resistente máximo en las baldosas	40
Cuadro 20. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	41
Cuadro 21. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	41

Cuadro 22. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	42
Cuadro 23. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas....	42
Cuadro 24. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas	42
Cuadro 25. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas..	42
Cuadro 26. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control.....	43
Cuadro 27. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas	43
Cuadro 28. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas	43
Cuadro 29. Carga y momento resistente máximo en las columnas.....	44
Cuadro 30. Dimensiones promedio de las baldosas	44
Cuadro 31. Carga y momento resistente máximo en las baldosas.....	44
Cuadro 32. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	45
Cuadro 33. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas	45
Cuadro 34. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	45
Cuadro 35. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas....	46
Cuadro 36. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas	46
Cuadro 37. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas..	46
Cuadro 38. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control.....	47
Cuadro 39. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas	47
Cuadro 40. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas	47
Cuadro 41. Carga y momento resistente máximo en las columnas.....	48
Cuadro 42. Dimensiones promedio de las baldosas	48
Cuadro 43. Carga y momento resistente máximo en las baldosas.....	48
Cuadro 44. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	49
Cuadro 45. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas	49

Cuadro 46. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas.....	49
Cuadro 47. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas	50
Cuadro 48. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas	50
Cuadro 49. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas ..	50
Cuadro 50. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control.....	51
Cuadro 51. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas	51
Cuadro 52. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas	51
Cuadro 53. Carga y momento resistente máximo en las columnas.....	52
Cuadro 54. Dimensiones promedio de las baldosas	52
Cuadro 55. Carga y momento resistente máximo en las baldosas.....	52
Cuadro 56. Mediciones con el detector de metales en las columnas.....	52
Cuadro 57. Mediciones con el detector de metales en las baldosas	53
Cuadro 58. Promedio de la falla en compresión de los cilindros de control de cada muestra	54
Cuadro 59. Estadísticas de la regresión	55
Cuadro 60. Estadísticas de la regresión para cada variable.....	56
Cuadro 61. Estadísticas de la regresión	60
Cuadro 62. Estadísticas de la regresión para cada variable.....	61
Cuadro 63. Estadísticas de la regresión	61
Cuadro 64. Estadísticas de la regresión para cada variable.....	61
Cuadro 65. Especificaciones técnicas para la armadura de acero	66
Cuadro 66. Resumen de momento máximo resistido por los elementos.....	70

Eusse Gaviria, Sebastián

Determinación de características mecánicas de elementos de concreto prefabricado mediante el empleo de ensayos no destructivos.

Proyecto de Graduación-Ingeniería Civil-San José. C.R.:

S. Eusse G., 2019

xvi, 77, [10]h, ils. col.- 20 refs.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación consiste en caracterizar elementos de concreto prefabricado, específicamente columnas y baldosas para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante ensayos no destructivos y correlacionar los resultados con los obtenidos mediante ensayos destructivos para verificar su aplicabilidad en campo.

Para realizar la caracterización se utilizó el esclerómetro Silverschmidt, medidor de velocidad de onda, medidor de resistividad y el detector de metales. Las mediciones realizadas con estos instrumentos se llevaron a cabo en el LanammeUCR a los elementos (columnas y baldosas) de dos fabricantes, para dos lotes diferentes de cada uno a los 28 días de haber sido confeccionados; además se realizaron los ensayos destructivos y no destructivos a cilindros de concreto de control elaborados con las mezclas correspondientes a cada lote.

Con los resultados de los ensayos se realizaron análisis estadísticos de los que se obtuvieron, para el caso del esclerómetro y el medidor de velocidad de onda, ecuaciones para estimar la resistencia del concreto; de las cuales se obtienen resultados confiables en cuanto a porcentajes de error en comparación con el valor real. Debido a la condición de los elementos, se descarta el uso del medidor de resistividad; y se proponen aplicaciones para el detector de metales.

**ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS; SISTEMA PREFABRICADO DE COLUMNAS Y BALDOSAS;
ESCLERÓMETRO; VELOCIDAD DE ONDA; DETECTOR DE METALES**

Ing. Guillermo González Beltrán, PhD
Escuela de Ingeniería Civil

1. Generalidades

1.1 Introducción

En el presente proyecto se busca determinar las siguientes propiedades de elementos prefabricados de concreto (Columnas y baldosas), la resistencia en compresión, la resistividad eléctrica, el diámetro del refuerzo, su ubicación y recubrimiento, mediante el uso de los siguientes equipos destinados a ensayos no destructivos: Esclerómetro Silverschmidt tipo L, medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab con transductores de 54 kHz y 150 kHz, medidor de resistividad eléctrica y detector de metales. La descripción y funcionamiento de cada uno de estos equipos se expondrá posteriormente.

El sistema de columnas y baldosas de concreto prefabricado al cuál se le realizan los diferentes ensayos, corresponde al utilizado principalmente para la confección de viviendas unifamiliares de un nivel, como el que se muestra en la figura 1.



Figura 1. Sistema de construcción de columnas y baldosas de concreto prefabricado

Fuente: Inprefa, 2019

Este proyecto surge debido a que en la actualidad solo hay normativa para determinar las propiedades previamente mencionadas en elementos prefabricados mediante métodos destructivos. Estos ensayos se aplican usualmente a elementos que forman parte de un lote de producción para determinar así sus propiedades y verificar que cumplan con los requerimientos de las normas INTE C131:2017 y C133:2017. Sin embargo, no son eficientes al evaluar elementos que ya forman parte de una estructura, ya que se deben remover los

elementos que se desean analizar, lo cual puede comprometer la integridad de la estructura, además del costo que implica la reparación posterior. Es por eso que nace la necesidad de emplear métodos no destructivos para determinar dichas propiedades, los cuales, como su nombre lo indica, no provocan daños a los elementos en estudio o al menos este es mínimo.

1.2 Importancia

El uso de sistemas prefabricados de columnas y baldosas horizontales ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, debido a que presentan grandes ventajas en comparación con los sistemas constructivos tradicionales como la mampostería o el concreto reforzado y entre las ventajas están, la facilidad constructiva, el ahorro en mano de obra y formaleta, así como la disminución del desperdicio generado usualmente en la industria de la construcción. Además de esto, debido al bajo costo que conlleva su uso, este sistema es una de las opciones más utilizadas en el país para la construcción de proyectos de vivienda de interés social.

Debido al incremento en el uso de este sistema constructivo, ha crecido considerablemente el número de pequeñas y medianas empresas que se dedican a fabricar y distribuir elementos de concreto prefabricado por todo el territorio nacional para la construcción de escuelas, viviendas unifamiliares y tapias para el cerramiento de propiedades. Sin embargo el hecho de que existan diversas empresas dedicadas a esta área implica que cada una elaborara estos productos de acuerdo con sus criterios técnicos y estándares de calidad.

Es por lo anterior que en el año 2013, el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) desarrolló la norma INTE 06-10-02 que corresponda a la "Norma para elementos prefabricados de concreto para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante el sistema de baldosas horizontales y columnas", la cual establece los requisitos mínimos, en cuanto a dimensiones y resistencia, que deben cumplir estos elementos.

Para el mes de febrero del año 2017 se publica la segunda edición de esta norma, en la cual se aplican cambios en cuanto a los aspectos normativos, métodos de muestreo y métodos experimentales. En esta nueva edición se hace una división con respecto a la norma original en dos partes, donde se tiene ahora una norma dedicada a los requisitos que deben cumplir los elementos prefabricados (INTE 06-10-02:2017) y la otra enfocada en los requisitos de los métodos de ensayo a ser aplicados en estos elementos (INTE 06-10-04:2017). En estas

normas se encuentran regulados los requisitos que deben cumplir y los métodos de ensayo destructivos a ser aplicados para determinar las propiedades tanto de las columnas como de las baldosas horizontales.

Actualmente, se cuenta con la nueva versión de ambas normas INTE C131:2017 (Elementos prefabricados de concreto para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante el sistema de baldosas horizontales y columnas. Requisitos) e INTE C133:2017 (Elementos prefabricados de concreto para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante el sistema de baldosas horizontales y columnas. Métodos de ensayo) respectivamente, que se utilizan en el presente trabajo de investigación; sin embargo, éstas no presentan cambios considerables en cuanto a la conceptualización respecto a sus versiones previas.

No obstante, como se mencionó previamente, estos métodos de ensayos no son eficientes para determinar las propiedades en elementos que ya forman parte de una estructura. Es por esto que es importante llevar a cabo un estudio que permita determinar si con el equipo actual utilizado en ensayos no destructivos en concreto reforzado se pueden estimar las características mecánicas de los elementos de concreto prefabricados del sistema de columnas y baldosas. De ser así, esto permitiría realizar mediciones in situ, lo cual se traduciría en un ahorro de tiempo debido a que no se deben llevar al laboratorio los elementos para hacer las pruebas y se obtendrían los resultados de manera eficiente. Además, se generaría un ahorro económico que está asociado a la reparación que conlleva extraer elementos para los ensayos destructivos y no se comprometería la integridad estructural del sistema.

1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

El uso de ensayos no destructivos para determinar características mecánicas en elementos estructurales de concreto ha sido ampliamente estudiado a nivel mundial, donde se tienen registros que datan desde 1934 en Alemania acerca de la determinación de la resistencia del concreto mediante el impacto de una masa específica, con una cantidad de energía estándar sobre una superficie de concreto. (Bungey, Millard, & Grantham, 2006)

Para los años 1940 se tienen los primeros registros en Estados Unidos de mediciones de velocidad de pulsos mecánicamente generados a través de concreto. Años después, en

Canadá y el Reino Unido se elaboraron estudios con transductores electro-acústicos, los cuales ofrecían un mejor control en el tipo y la frecuencia de los pulsos generados. A partir de estos estudios se comenzaron a desarrollar los equipos que utilizan el método del ultrasonido, los cuales son ampliamente utilizados en la actualidad para estimar diferentes parámetros en elementos concreto (Bungey, Millard, & Grantham, 2006). En esta área se tiene un estudio realizado en el 2004 por Solís de la Universidad Autónoma de Yucatán, que aproximó la resistencia del concreto a partir de la velocidad de onda y también estableció un índice de calidad de agregado y de distintas relaciones agua-cemento.

En lo que respecta al estudio de ensayos no destructivos en elementos de concreto en Costa Rica, se presentan dos investigaciones que son analizadas para el presente estudio, la primera elaborada en 1993 por Salas, que llevó a cabo ensayos en laboratorio, en los que utilizó el esclerómetro de Schmidt, la pistola Windsor, el equipo de velocidad ultrasónica y el detector de acero, para evaluar la relación agua-cemento, el tipo de agregado, la resistencia del concreto, además de estimar la ubicación del refuerzo. De acuerdo con los resultados obtenidos, Salas concluyó que en el caso del detector de metales las mediciones del recubrimiento son buenas, no obstante la determinación del diámetro es deficiente.

La siguiente investigación analizada se lleva a cabo en el año 2012, donde Barrantes llevó a cabo una nueva investigación utilizando el esclerómetro de Schmidt y el detector de acero, en la cual evaluó los elementos de concreto reforzado en condiciones de laboratorio como en campo. De este estudio Barrantes concluyó que el esclerómetro presenta menores porcentajes de error al aumentar la edad de los elementos, y en el caso del detector de metales, reafirma los resultados obtenidos por Salas (1993) en cuanto la confiabilidad del instrumento para determinar el diámetro del refuerzo.

En cuanto a estudios acerca de elementos prefabricados de concreto se tiene en primera instancia la investigación realizada por Calvo (Calvo, 1987), la cual buscó revisar de manera experimental los efectos de aplicar cargas fuera de su plano a paredes construidas mediante el sistema compuesto por columnas y baldosas, de donde concluyó que las baldosas funcionan como una losa semi-empotrada en la columna que disminuye la deformación lateral de las columnas.

Seguidamente González (González, 2005) llevó a cabo otro trabajo en el cual realizó una evaluación de la competencia estructural de los límites y recomendaciones del método

simplificado del capítulo de vivienda unifamiliar presente en el Código Sísmico de Costa Rica del 2002. El autor determinó que no existe suficiente certeza de la forma en que paredes construidas con este sistema se comportan en realidad y que las capacidades de las columnas podrían no ser suficientes de acuerdo con uno de los modelos analíticos aplicados.

Para el año 2012, Villalobos y Alfaro (Villalobos, F & Alfaro, J, 2012) llevaron a cabo una investigación en la cual se propusieron dos metodologías para el fallo de columnas prefabricadas de concreto, las cuales corresponden al ensayo de capacidad en flexión mediante cargas aplicadas en los tercios y el ensayo de capacidad en flexión en voladizo. Se concluyó que ambos ensayos se pueden utilizar para determinar la capacidad en flexión de las columnas prefabricadas de concreto con distribución uniforme del refuerzo.

Como se puede apreciar de la información previamente expuesta, si bien es cierto que se tienen estudios asociados tanto a los ensayos destructivos en elementos de concreto reforzado, como estudios acerca de elementos prefabricados de concreto; no fue sino hasta el 2013 que Quesada llevó a cabo la primera investigación de ensayos no destructivos en elementos prefabricados de concreto, específicamente columnas y baldosas para viviendas unifamiliares de un nivel. En esta investigación se utilizó el medidor de permeabilidad, el esclerómetro de Schmidt, el detector de metales y la determinación de la velocidad de onda por ultrasonido.

De esta investigación, Quesada concluyó que el esclerómetro Schmidt es el instrumento con mayor precisión para estimar la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo recomienda que se utilice un esclerómetro de baja energía de impacto.

En cuanto a las mediciones utilizando ultrasonido, debido a la configuración del acero en este tipo de sistema constructivo, la relación agua-cemento y el tipo de transductor utilizado, no se obtuvieron resultados congruentes. Para las mediciones del permeámetro se concluyó que no es posible utilizar este instrumento en este tipo de sistema constructivo debido a que el espesor en las baldosas y el ancho en las columnas no permite seguir las recomendaciones del fabricante para este instrumento.

Finalmente, para el detector de metales, el autor concluyó que con el equipo utilizado sí fue posible determinar la existencia y ubicación del refuerzo. No obstante, debido a las características de este sistema constructivo, no se obtuvieron resultados satisfactorios en las

mediciones del recubrimiento y diámetro de las varillas, por lo que recomienda que se utilicen cabezas de detección de baja intensidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar elementos de concreto prefabricado, específicamente columnas y baldosas para viviendas unifamiliares de un nivel, mediante ensayos no destructivos y correlacionar los resultados obtenidos con los resultados de ensayos destructivos para verificar su aplicabilidad en elementos de edificaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

- Definir un plan de muestreo para las columnas y baldosas de acuerdo al fabricante, así como de los cilindros de control asociados a estos elementos.
- Realizar pruebas de resistencia en compresión a los cilindros de control de cada mezcla de concreto de los elementos muestreados.
- Realizar ensayos no destructivos, que corresponde al uso del esclerómetro Silverschmidt, medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab, medidor de resistividad eléctrica Resipod, y el detector de metales, en las columnas, baldosas y los cilindros de control de concreto prefabricado de cada lote.
- Obtener el valor de la resistencia en flexión de las columnas y baldosas muestreadas mediante la aplicación de los ensayos destructivos especificados en la norma INTE C133:2017.
- Estimar la resistencia a la compresión del concreto a partir de los resultados obtenidos mediante el empleo de los ensayos no destructivos.

1.5 Delimitación del problema

1.5.1 Alcance

- Todos los ensayos, tanto los destructivos como los no destructivos se llevan a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Para la muestras se utilizan únicamente los elementos suministrados por dos fabricantes (A y B), junto con los cilindros de control asociados a cada una.
- Se realizan ensayos únicamente en columnas prefabricadas 3300 mm de longitud y 130 mm de ancho, y en baldosas prefabricadas de 1410 mm de longitud y 500 mm de ancho.
- Los ensayos no destructivos en las columnas y baldosas, así como la falla a flexión en estos elementos, se realiza a cada uno de los lotes que van a ser analizados; al igual que el ensayo para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de control de ambos fabricantes
- Se realizan dos ensayos completos por fabricante, los cuales corresponden a la aplicación de los ensayos destructivos y no destructivos

1.5.2 Limitaciones

- La instrumentación a utilizar se limita a aquella con la que cuenta el Lanamme, que corresponde al esclerómetro Silverschmidt tipo L, medidor de resistividad eléctrica Resipod, medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab y el detector de barras de acero Modelo 331 B.
- Tanto los ensayos destructivos como los no destructivos se realizan a edades tempranas, menores a los dos meses, por lo que los resultados y las relaciones que se obtengan van a reflejar el comportamiento de los elementos en este periodo, el cual es mucho menor que el tiempo que llevan construidas viviendas que utilizan este sistema prefabricado de columnas y baldosas.

1.6 Descripción de la metodología a usar

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1 que se presenta a continuación:

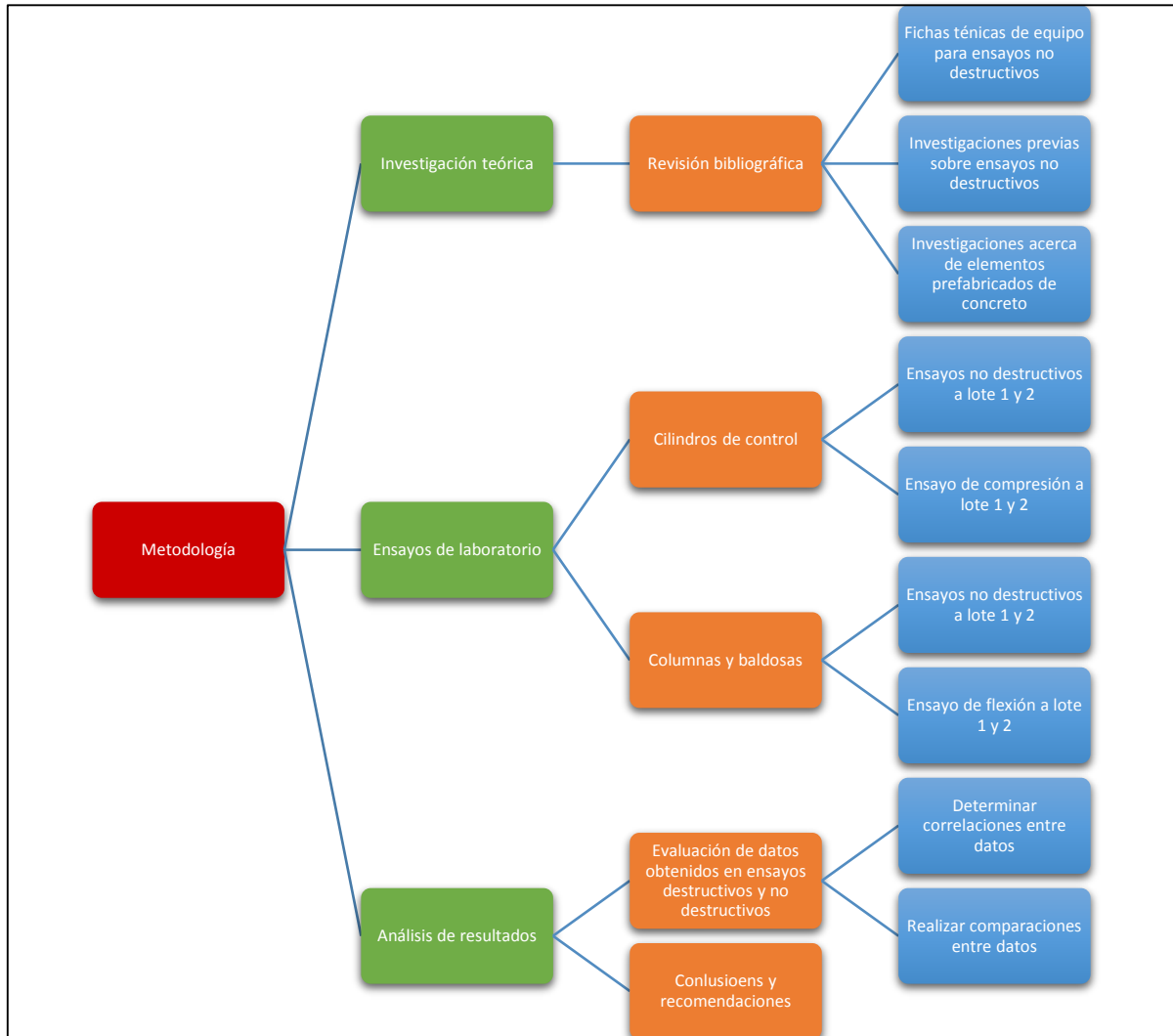


Figura 2. Metodología a emplear en el proyecto

Como se aprecia en la figura 2, la metodología se divide en tres etapas principales, que corresponde a la investigación teórica, la realización de ensayos en laboratorio y por último el análisis de los resultados obtenidos. A continuación se explican detalladamente cada una de las etapas.

1.6.1 Investigación teórica

En primera instancia se lleva a cabo una revisión bibliográfica, donde se buscan los antecedentes tanto teóricos como prácticos del problema que se pretende resolver. Se revisan los estudios acerca de ensayos no destructivos realizados por Salas (1993) y por Barrantes (2012), siendo el insumo principal la investigación realizada por Quesada (2013), ya que esta fue la primera en que se presenta un estudio acerca de ensayos no destructivos en elementos prefabricados.

Luego se realiza la consulta bibliográfica, específicamente las fichas técnicas de cada uno de los equipos de ensayos no destructivos a utilizar en la presente investigación, que corresponden al esclerómetro Silverschmidt tipo L (Proceq), medidor de resistividad eléctrica Resipod (Proceq), medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab (Proceq) y el detector de barras de acero Modelo 331 B (Elcometer). Se investiga el funcionamiento, los factores que pueden afectar los resultados, las limitaciones presentes en cada uno y se ajusta el equipo a los requisitos de los elementos prefabricados de concreto.

1.6.2 Realización de ensayos en laboratorio

En esta etapa se llevan a cabo tanto los ensayos destructivos como los no destructivos. El LanammeUCR lleva a cabo mensualmente ensayos destructivos a elementos prefabricados de múltiples fabricantes diferentes que contratan a esta entidad para realizar dichas pruebas, por lo que se consigue la autorización de dos de estas empresas para realizar los ensayos no destructivos en estos elementos. Se les solicita además a estas empresas que permitan llevar a cabo el muestreo de cilindros de concreto de control correspondientes a la fecha en que son colados los elementos que van a ser muestreados para la falla en el laboratorio.

Se realizan ensayos en dos lotes diferentes, que como se mencionó previamente, se llevan a cabo con un mes de separación. En estos ensayos se determina la resistencia a la compresión de los cilindros, la resistencia a la flexión de las columnas y baldosas, y se aplican los métodos no destructivos a cada uno de los elementos antes de ser fallados.

1.6.3 Análisis de resultados

En esta última etapa se analizan los resultados obtenidos de los ensayos destructivos y no destructivos, esto con el fin de encontrar relaciones entre los valores obtenidos para la

resistencia a compresión y la flexión de los elementos, y así determinar la factibilidad de aplicar los ensayos no destructivos en este tipo de elementos. Finalmente, se plantean las conclusiones y las recomendaciones pertinentes asociadas al uso de este tipo de ensayos en elementos prefabricados de concreto.

2. Marco teórico

Como se mencionó en la Sección 1.3 del presente trabajo, Quesada (2013) llevó a cabo la primera investigación de ensayos no destructivos en elementos prefabricados de concreto, para la cual utilizó el equipo con el que el LanammeUCR contaba en ese momento. Sin embargo, este equipo estaba enfocado a pruebas en elementos de concreto reforzado, por lo que muchas de las pruebas realizadas presentaron resultados poco congruentes, debido a que las columnas y baldosas de concreto prefabricado presentan dimensiones y configuraciones de acero considerablemente diferentes a las que se tienen en elementos típicos de concreto reforzado.

Para dicha investigación se utilizaron los instrumentos que se presentan a continuación:

- Esclerómetro "Original Schmidt" tipo N (Proceq).
- Medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab (Proceq) con transductores de 54 kHz y diámetro de contacto con superficie de 36,77 mm.
- Medidor de permeabilidad Torrent (Proceq).
- Detector de metales modelo 331 B (Elcometer) con una cabeza de detección de gran grosor.

Siguiendo las recomendaciones de la investigación de Quesada (2013), el LanammeUCR adquirió nuevos equipos, los cuales se podrían ajustar de mejor manera a las características propias de los elementos prefabricados de concreto. Es por esto que la presente investigación busca comprobar si con estos nuevos equipos se pueden establecer mejores correlaciones con la resistencia del concreto.

A continuación se expondrá la definición general de qué son los ensayos no destructivos. Seguidamente se presentan al lector los diversos equipos a ser utilizados en la realización de los ensayos experimentales, donde se busca dar a conocer el equipo en cuanto a sus especificaciones, funcionamiento y las variables que pueden afectar sus resultados.

2.1 Ensayos no destructivos

Se puede definir como ensayos no destructivos a ciertas pruebas a las que se somete un objeto para verificar su calidad o estado, sin que éste resulte dañado o inutilizado, una vez efectuados aquellos. Están basados en principios físicos y de su aplicación se obtienen los resultados necesarios para establecer un diagnóstico del estado de la calidad del objeto inspeccionado. Dichos resultados no se muestran de forma absoluta, sino que lo hacen con un lenguaje indirecto, lo que obliga a interpretarlos a partir de las indicaciones propias de cada método y en relación con los principios físicos en los que se basan, naturaleza del material y procesos de fabricación. (AEND, 2017)

En cuanto a la evaluación específica de elementos de concreto mediante el uso de ensayos no destructivos, existe una amplia variedad de métodos aplicables de acuerdo con las características que se deseen evaluar, los cuales se explican detalladamente en el capítulo tres del ACI 228.2R-13 (*Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*).

Para la presente investigación, se van a utilizar equipos que permiten evaluar diversas características; sin embargo, lo que se busca es correlacionar los resultados obtenidos con la resistencia del concreto. Con la excepción del medidor de resistividad, que se asocia de la velocidad de corrosión y el detector de barras de acero, ya que este se utiliza para determinar la configuración del acero, el recubrimiento y diámetro.

2.2 Esclerómetro Silverschmidt tipo L

El esclerómetro Schmidt es un martillo de rebote que se utiliza como uno de los métodos para medir la dureza superficial. Está compuesto esencialmente por el cuerpo del instrumento, el émbolo, el martillo (masa) y el resorte principal. Estos componentes se muestran en la figura 3.

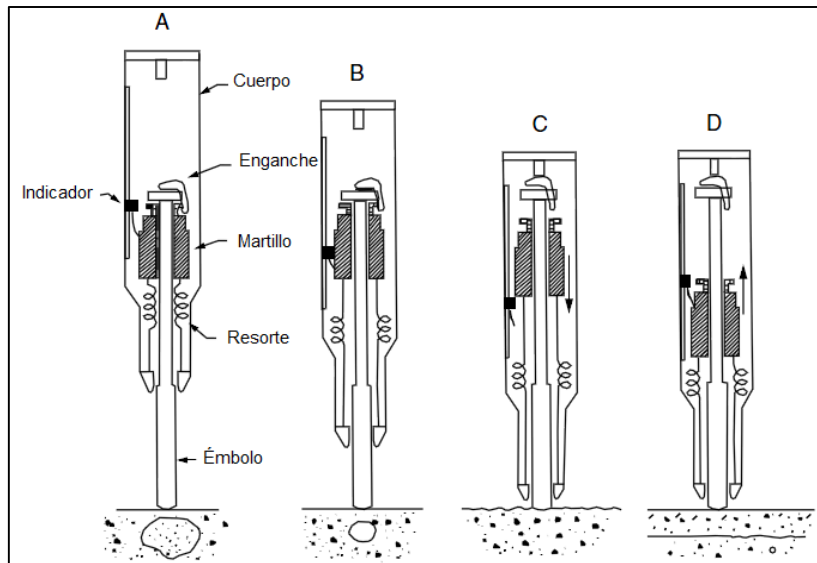


Figura 3. Componentes y mecanismo del esclerómetro Schmidt

Fuente: Malhotra (2004), editado por el autor

El funcionamiento usual del esclerómetro se muestra igualmente en la figura 3, donde en primera instancia se empieza a presionar el instrumento contra la superficie de concreto, lo cual provoca que los resortes que sujetan la punta del cuerpo y el martillo se empiecen a estirar (Figura 2B). Una vez que el émbolo es introducido completamente en el cuerpo, se desengancha el martillo, el cual, debido a los resortes, viaja hacia abajo hasta chocar contra la sección ancha del embolo (Figura 2C). Finalmente debido al rebote provocado por el choque del martillo, este desplaza el indicador que señala el índice esclerométrico o un número de rebote (Figura 2D). (Quesada, 2013).

El número de rebote se ve afectado por la fricción generada entre el émbolo y la barra guía, la influencia de la gravedad durante el recorrido, así como la velocidad relativa entre la unidad como tal y las piezas mecánicas. (Proceq Silverschmidt, 2017)

El esclerómetro Silverschmidt elimina estas variables mediante la determinación de un valor "Q" en lugar del tradicional valor de rebote. Este valor se obtiene midiendo la velocidad de impacto y de rebote inmediatamente antes y después del impacto. Lo que se hace es dividir la velocidad de rebote por la velocidad de llegada. Cabe recalcar que este valor no requiere corregirse según la dirección del impacto. (Proceq Silverschmidt, 2017)

Para la presente investigación se va a utilizar el esclerómetro Silverschmidt tipo L, que corresponde al modelo de baja energía de impacto, el cual es recomendado para cuando se tienen elementos con espesores menores de 100 mm. Este se muestra en la figura 4.



Figura 4. Esclerómetro Silverschmidt tipo L

Fuente: Proceq S.A (2017)

A continuación se exponen algunos de los datos técnicos asociados a este modelo:

Cuadro 1. Información técnica del esclerómetro Silverschmidt tipo L

Características	Modelo L
Energía de impacto	0,735 N·m
Alcance para resistencia a la compresión de concreto	10 - 100 MPa
Masa de martillo	135 g
Masa total	570 g
Número máximo de impactos por serie	99
Vida de la batería	>5000 impactos entre carga
Temperatura de servicio	De 0 a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	De -10 a 70 °C

Fuente: Proceq S.A (2017), editado por el autor

Es importante mencionar que, a pesar de que este equipo es ampliamente utilizado debido a la facilidad y bajo costo que conlleva su uso, los resultados obtenidos pueden no ser del todo confiables, por lo cual suele recomendarse como una guía para determinar zonas de bajas de resistencia, a las cuales posteriormente se les aplica métodos más confiables para la determinación de las características buscadas. Las mediciones con este equipo se ven afectadas por múltiples factores, entre los cuales se pueden citar:

- Tipo de agregado grueso
- Textura de la superficie
- Tamaño y forma de la superficie
- Edad del concreto

- Condiciones de humedad
- Carbonatación del concreto

2.3 Medidor de resistividad eléctrica Resipod

Este equipo sirve para medir la resistividad eléctrica en la superficie del concreto. La idea de esta medición es cuantificar las propiedades conductivas de la microestructura del concreto, lo cual es importante debido a que la durabilidad del concreto depende ampliamente de las propiedades de su microestructura, ya que si se tiene una estructura muy porosa es más permeable y por lo tanto reduce su durabilidad. (Layssi, Ghods, Alizadeh, & Salehi, 2015). En la figura 5 se muestra el equipo a ser utilizado en la presente investigación.



Figura 5. Medidor de resistividad resipod

Fuente: Proceq S.A (2017)

Este instrumento funciona bajo el principio de la sonda Wenner, el cual corresponde a una técnica de medición basada en el método de los cuatro puntos. En este método, la resistividad eléctrica superficial del concreto es medida utilizando cuatro electrodos, los cuales se localizan en línea recta e igualmente espaciados uno del otro, donde se aplica una corriente a los dos electrodos exteriores, la cual es transportada por iones presentes en el líquido de los poros, y se mide la diferencia de potencial entre los dos electrodos interiores. (Proceq resipod, 2017). Este funcionamiento se muestra gráficamente en la figura 6.

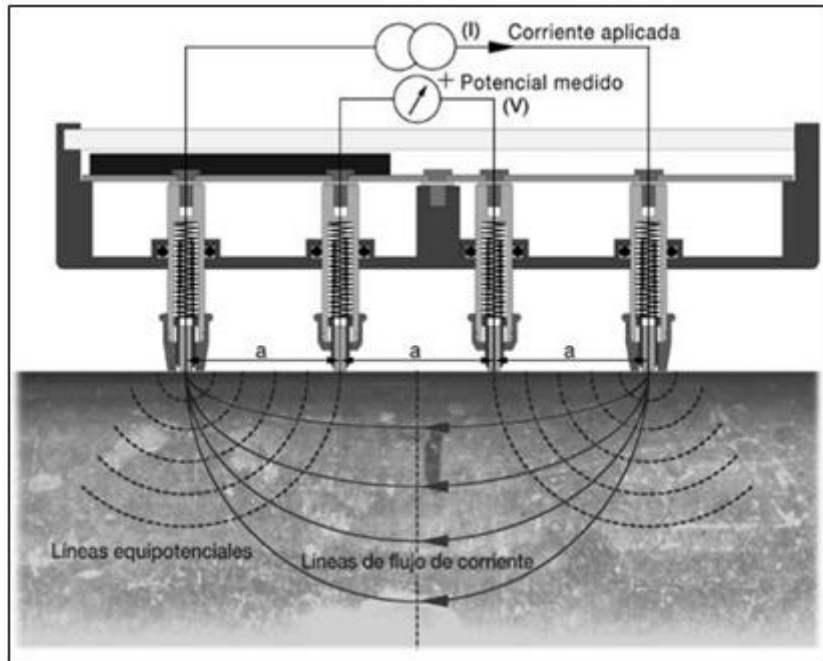


Figura 6. Funcionamiento del medidor de resistividad Resipod

Fuente: Proceq S.A (2017)

Existen dos modelos para este equipo, uno con separación de electrodos de 50 mm y otro con separación de 38 mm. Se debe tomar en cuenta que debido a la naturaleza no homogénea del concreto, se prefiere una distancia entre sondas más grande ya que esto permite un flujo más homogéneo de la corriente de medición. Sin embargo, este no siempre se pueda realizar de esta manera debido a que también se debe evitar la influencia del acero dentro del concreto, lo que conlleva a utilizar menor espaciamiento. (Proceq resipod, 2017)

Este equipo puede ser utilizado en diversas aplicaciones, como la estimación de la probabilidad de velocidad de corrosión del acero embebido dentro del concreto, y estimación de la permeabilidad mediante correlaciones.

Sin embargo, este equipo también puede ser influenciado por diferentes variables que pueden afectar los resultados de la medición si no son tomadas en consideración. Entre estas se pueden mencionar:

- El refuerzo dentro del concreto
- El tamaño del agregado grueso
- Temperatura del concreto
- El contenido de humedad

- Carbonatación

Por último, en el cuadro 2 se exponen algunos de los aspectos técnicos asociados a este equipo.

Cuadro 2. Información técnica del medidor de resistividad resipod

Características	Valores
Rango de medición	De 1 kΩcm a aprox. 1000 kΩcm (en dependencia de la distancia entre electrodos)
Frecuencia	40 Hz
Temperatura de servicio	De -10 a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	De -10 a 70 °C
Exactitud de medición de resistencia:	
Corriente nominal de 200 μA	±0,2 kΩcm ó ± 1% (el mayor)
Corriente nominal de 50 μA	±0,3 kΩcm ó ± 2% (el mayor)
Corriente nominal <50 μA	±2 kΩcm ó ± 5% (el mayor)

Fuente: Proceq S.A (2017), editado por el autor

2.4 Medidor de velocidad de onda por ultrasonido Pundit Lab

Con este equipo se busca medir mediante el método de ultrasonido el tiempo de tránsito y/o la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas a través del concreto. Esto se logra mediante un transductor que genera un pulso que recorre una determinada distancia, otro transductor recibe esta señal y, por medio de un circuito eléctrico se mide el tiempo de tránsito o propagación del pulso a través del material. La velocidad de este pulso, que depende de la densidad y características elásticas del material, se determina como el cociente entre la distancia o separación entre los transductores y el tiempo de tránsito para dicha distancia. (Malhotra & Carino, 2004) El equipo a ser utilizado en la presente investigación se muestra en la figura 7.



Figura 7. Medidor de velocidad de onda Pundit Lab

Fuente: Proceq S.A (2017)

Este equipo, aparte de medir la velocidad de pulso, puede ser utilizado para la evaluación de calidad y uniformidad en el concreto, medir la velocidad superficial, estimar la profundidad de grietas presentes en el concreto, determinar presencia de vacíos y estimar la resistencia a la compresión, lo que se puede lograr mediante curvas de conversión que se deben introducir al equipo. (Proceq Pundit Lab, 2017).

Como se mencionó previamente, este equipo hace uso de transductores para emitir el pulso a través del concreto, los cuales se pueden seleccionar entre una amplia gama de frecuencias que van desde 20 kHz hasta 250 kHz. Para seleccionar el transductor a utilizar, se deben considerar las dimensiones del elemento a ensayar debido a que la longitud de onda no debe ser menor que la longitud del recorrido, ya que de lo contrario el equipo podría detectar una reducción considerable en la velocidad del pulso; es por esto que para determinadas frecuencias y velocidades de onda, se tienen dimensiones laterales mínimas para el elemento que se desea ensayar. (Proceq Pundit Lab, 2017). Estas se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Dimensiones longitudinales mínimas de acuerdo con la frecuencia y velocidad de pulso.

Frecuencia (kHz)	Velocidad de pulso (m/s)		
	3500	4000	4500
24	146 mm	167 mm	188 mm
54	65 mm	74 mm	83 mm
150	23 mm	27 mm	30 mm

Fuente: Proceq S.A (2017), editado por el autor

Al ser el concreto un material no homogéneo debido a sus componentes, otro factor que se debe considerar al seleccionar el transductor, es el tamaño del agregado grueso, ya que este puede afectar la propagación del pulso ultrasónico. Si se desea reducir la influencia del agregado grueso en las mediciones, se debe elegir una frecuencia de tal modo que la longitud de onda sea por lo menos el doble del tamaño máximo del agregado. En cuadro 4 se presenta la frecuencia máxima recomendada que se debe seleccionar dependiendo del tamaño de agregado y la velocidad del pulso.

Cuadro 4. Frecuencias recomendadas según el tamaño del agregado y la velocidad de pulso

Velocidad de pulso (m/s)	3500			4000			4500		
Tamaño del agregado (mm)	8	16	32	8	16	32	8	16	32
Frecuencia máxima (kHz)	219	109	55	250	125	63	281	141	70

Fuente: Proceq S.A (2017), editado por el autor

En esta investigación, se utilizan dos tipos de transductores, el primero es de 150 kHz con diámetro de superficie de contacto de 22,27 mm y el segundo es un transductor exponencial de 54 kHz con un diámetro de superficie de contacto de 4 mm, el cual, debido a sus características, tiene ventajas para ensayos en elementos con alta densidad de acero y también cuando se cuenta con elementos con superficies rugosas o curvas. En la figura 8 se muestran ambos transductores en el orden mencionado.



Figura 8. 1 – transductor de 150 kHz y 2 - transductor exponencial de 54 kHz

Fuente: Proceq S.A (2017)

Finalmente, se mencionan diversos factores que se deben considerar a la hora de llevar a cabo ensayos con esta instrumentación, con el fin de obtener resultados confiables en cuanto a la característica que se desee estimar:

- Agregado grueso
- Tipo de cemento
- Relación agua-cemento
- Aditivos
- Edad del concreto
- Contacto de los transductores con la superficie del concreto
- Temperatura del concreto
- Humedad y condiciones de curado del concreto
- Acero de refuerzo

2.5 Detector de barras de acero Elcometer 331 B

Este equipo se utiliza para determinar el recubrimiento en elementos de concreto, detectar la ubicación del refuerzo y su diámetro. Más adelante se explica por qué la determinación de estos parámetros es importantes dadas las implicaciones que conlleva conocer sus valores.

El recubrimiento tiene un impacto considerable en los procesos que pueden llevar a la corrosión del refuerzo. La detección del refuerzo es útil para cuando se deben hacer perforaciones en los elementos de concreto reforzado o para llevar a cabo otros ensayos no destructivos, ya que de no conocer esta ubicación, se puede golpear el refuerzo con el instrumento para perforación, provocando daños en el instrumento o en la estructura, o se pueden ver afectadas las mediciones de los otros instrumentos de ensayos no destructivos debido a la presencia del refuerzo. (Sivasubramania, Jaya, Neelemegam, 2013)

En la figura 9 se muestra el equipo utilizado en la presente investigación:



Figura 9. Detector de acero Elcometer 331

Fuente: Elcoemeter S.A (2017)

El instrumento mostrado funciona mediante la tecnología de inducción magnética, en la cual se genera un campo magnético por medio de la bobina (configuración tubular de alambre conductor de flujo eléctrico enrollado) que se encuentran dentro del sensor inductivo (Ver figura 9), la cual al acercarse a un material conductor, como el acero de refuerzo, induce una corriente. El flujo magnético que se produce en los materiales ferromagnéticos altera las líneas del campo magnético generado y provoca que varíe el flujo magnético de la bobina. Esta variación del flujo genera un cambio en la inductancia de la bobina y este cambio es lo que se muestra en el indicador digital si se aleja o se acerca el sensor inductivo del material conductor. (Barrantes, 2012). Este método inductivo se muestra gráficamente en la figura 10.

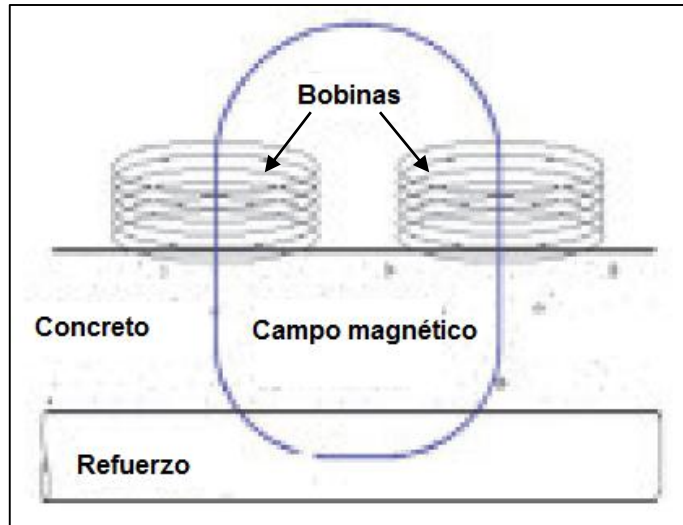


Figura 10. Método de inducción magnética

Fuente: Algernon, editado por el autor

Como se mencionó previamente, es el sensor inductivo, que contiene las bobinas, el que genera el campo magnético, por lo que dependiendo de las características del sensor, éste puede ser más especializado para ciertas circunstancias. Para la presente investigación se utiliza el sensor inductivo de detección estrecha, el cual se utiliza cuando la distancia entre el refuerzo es reducida, este inductor se muestra en la figura 11.



Figura 11. Cabeza de detección estrecha

Fuente: Elcoemeter S.A (2017)

En el cuadro 5 se presentan los rangos de medición correspondientes al sensor.

Cuadro 5. Rangos de medición para sensor de esquina estrecha

Cabeza de detección con esquina estrecha	
Elemento	Rango de medición
Barra de 40 mm	de 8 mm a 80 mm
Barra de 8 mm	de 5 mm a 60 mm

Fuente: Elcometer S.A (2017), editado por el autor

Entre los factores que pueden afectar las mediciones con este instrumento se encuentran:

- Tipo de acero
- Sección transversal de la varilla
- Forma y dirección de la superficie de concreto y las varillas
- Grupos de varillas
- Unión entre varillas
- Agregados del concreto
- Corrosión del acero

3. Esquema experimental

Como se mencionó en la Sección 1.6.2, para llevar a cabo tanto los ensayos destructivos, como los no destructivos, se utilizaron elementos muestreados de dos fabricantes. Se llevaron a cabo dos ensayos generales para cada muestra brindada por cada uno de los fabricantes, las cuales consisten en tres columnas y tres baldosas, lo que conllevó a un total de cuatro ensayos completos.

Es importante mencionar que las muestras de columnas analizadas corresponden al tipo 2A, esto de acuerdo a los tipos de columnas definidos en la norma INTE C131:2017. En la figura 12 se muestra descriptivamente este tipo de columna.

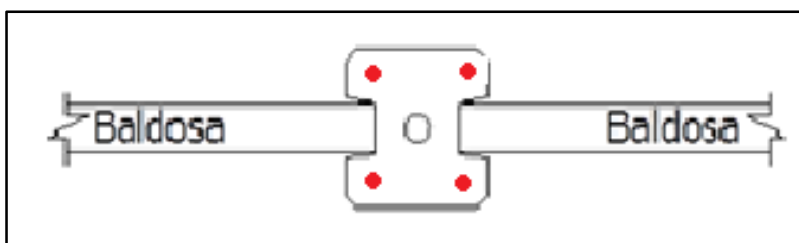


Figura 12. Columna tipo 2A

Fuente: INTE C131:2017

Como se puede apreciar de la figura anterior, el tipo de columna analizado se utiliza para colocar baldosas a ambos lados para dar continuidad. En la norma, el refuerzo utilizado en este tipo de columnas se muestra en el centro, no obstante, la configuración del refuerzo en las columnas ensayadas corresponde a varillas colocadas en cada esquina, las cuales se muestran en color rojo en la figura 12.

Para llevar a cabo correctamente el proceso de obtención de muestras, se coordinó con cada una de las empresas para establecer un día en que se fueran a fabricar columnas y baldosas. Una vez definida la fecha, se procedió a realizar la visita con un técnico del LanammeUCR para llevar a cabo un muestreo de cilindros, que consistía en confeccionar cuatro cilindros para la mezcla de concreto de las columnas y cuatro para la de baldosas. En la figura 13 se presenta una fotografía que muestra el proceso de confección de cilindros de control.



Figura 13. Proceso de confección de cilindros de control.

Una vez terminada la confección de cilindros de control, la cual se lleva a cabo de acuerdo con lo especificado en la norma ASTM C172-17 (Muestreo de concreto recién mezclado) y la ASTM C31-17 (Elaboración y curado en campo de especímenes de pruebas para concreto), éstos se dejan debidamente curando en la respectiva empresa, como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Espacio para curado de los cilindros.

Posteriormente, un técnico del LanammeUCR realiza el muestreo de las columnas y baldosas correspondientes a la fecha y lote del cual fueron realizados los cilindros de control. (Ver figura 15).



Figura 15. Muestreo de baldosas del Fabricante A.

Finalmente, las muestras, tanto de cilindros como de baldosas y columnas, se llevan al laboratorio para realizar los respectivos ensayos destructivos de control a los 28 días de haber sido elaborados. En la figura 16 se muestra un ejemplo de las muestras llevadas al LanammeUCR



Figura 16. Muestra de columnas en el LanammeUCR

3.1 Ensayos no destructivos

En la presente sección se describe brevemente el procedimiento que se llevó a cabo para tomar las mediciones con cada uno de los equipos evaluados, para mostrar cuales fueron algunos de los cuidados requeridos al momento de utilizar los equipos.

En lo que respecta a las mediciones, para el caso de las columnas, debido a que el refuerzo se encuentra en los bordes, se decide realizar las mediciones en la línea central del elemento a 150 mm de cada borde y en el centro geométrico del elemento. Para el caso del esclerómetro se distribuyen las diez mediciones a lo largo del elemento.

En cuanto a las baldosas, se utiliza el detector de metales para definir y marcar apropiadamente la ubicación del refuerzo, como se presenta posteriormente en la sección 4.5.2; una vez definida la cuadrícula de refuerzo, se seleccionaron los puntos que tuvieran menos imperfecciones para realizar los ensayos.

3.1.1 Mediciones con el esclerómetro Schmidt

Como se comentó en la Sección 2.2, uno de los equipos que se emplea en la presente investigación es el esclerómetro Silverschmidt tipo L, correspondiente al modelo de baja energía de impacto (0,735 N·m).

Se expone brevemente el procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo con el esclerómetro, el cual se realiza conforme a lo establecido en la norma ASTM C805-13. Los pasos que describe la norma se muestran a continuación:

1. Revisar que la superficie sobre la cual se realiza el ensayo no presente irregularidades, en caso de ser así, ésta debe ser tratada con piedra abrasiva.
2. Se debe empujar gradualmente el instrumento contra la superficie de prueba hasta que el martillo impacte. Luego del impacto, se procede a registrar el valor Q obtenido. Para cada superficie de prueba se deben tomar 10 lecturas y la distancia entre cada punto debe ser al menos de 25 mm.
3. En caso de que el área donde hubo un impacto del martillo se agriete, se debe revisar dicha área y desechar la lectura obtenida.

4. Por último, se debe revisar todas las lecturas obtenidas, donde se tienen que desechar las lecturas que difieran en seis unidades de la lectura promedio, y si dos o más lecturas son desechadas por este criterio, se debe realizar nuevamente la prueba.

Con base en este procedimiento, se llevaron a cabo los ensayos en los cilindros, las baldosas y las columnas. Cabe recalcar que para los cilindros se utilizó el procedimiento descrito por Barrantes (2012), en el que sugirió aplicar una carga de aproximadamente 15 % de la resistencia esperada para inmovilizar el espécimen de prueba antes de realizar el ensayo.

3.1.2 Mediciones de resistividad eléctrica

Para este ensayo, el equipo utilizado fue el expuesto en la Sección 2.3. El valor de resistividad se utiliza como un indicador de la velocidad de corrosión y por lo tanto de qué tan fácil es para un ión migrar de la zona anódica a la catódica cuando hay corrosión activa, por lo que una alta resistividad eléctrica del concreto indica una baja posibilidad y velocidad de corrosión del refuerzo y viceversa. Esto hace que sea importante evaluar y detectar a tiempo el nivel de riesgo o de afectación de las estructuras a la corrosión, ya que de esta forma se puede asegurar un correcto mantenimiento y por consiguiente, se puede extender la vida útil del concreto.

A continuación se presentan posibles clasificaciones para los valores de probabilidad y velocidad de corrosión según el índice de resistividad eléctrica. Esto debido a que no hay un acuerdo concreto entre todos los autores para esta clasificación.

Cuadro 6. Clasificación de la corrosión en relación con los valores de resistividad

Autor	Resistividad (kΩcm)	Clasificación de la corrosión
CEB-192	> 20	Velocidad de corrosión despreciable
	10 - 20	Velocidad de corrosión baja
	5 - 10	Velocidad de corrosión alta
	<5	Velocidad de corrosión muy alta
Vassie	> 12	Corrosión poco probable
	5 - 12	Corrosión probable
	<5	Corrosión casi segura
Schiesel & Raupach	> 20	Velocidad de corrosión lenta
	10 - 20	Velocidad de corrosión moderada/lenta
	5 - 10	Velocidad de corrosión alta
	<5	Velocidad de corrosión muy alta

Fuente: Badilla (2017)

En seguida se procede a exponer el procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo de resistividad, para el cual se siguieron las instrucciones proporcionadas por el manual de usuario.

1. En primera instancia se debe asegurar que la superficie donde se realice la prueba se encuentre limpia; además, previamente se debe de haber marcado el posicionamiento de la armadura de acero, en caso de que haya una presente.
2. Una vez que se tiene la superficie limpia, se debe asegurar que ésta se encuentre en condición de saturación superficial, ya que si el concreto se encuentra completamente seco, no se pueden realizar mediciones dado que la corriente es conducida por iones en el líquido de los poros.
3. Seguidamente, se deben sumergir los contactos en agua; esto se logra presionando los contactos contra el fondo de un recipiente con agua, para que de esta forma los depósitos de cada contacto se llenen parcialmente con agua
4. Finalmente se procede a colocar y presionar el instrumento contra la superficie de prueba, asegurando una buena conexión entre ambas partes, lo que permite obtener una medición fiable.

3.1.3 Mediciones de velocidad de onda por ultrasonido

El equipo utilizado para las mediciones de velocidad por propagación de onda es el descrito en la Sección 2.4. Este equipo, como se mencionó previamente, se puede utilizar para medir la longitud de tramos, medir la velocidad de onda, evaluar la uniformidad del concreto, así como estimar la profundidad de grietas en este.

De acuerdo con el estudio realizado por Malhotra (2004), se puede clasificar la calidad del concreto de acuerdo con el valor de velocidad de onda; en el cuadro 7 se presenta la relación mencionada.

Cuadro 7. Calidad del concreto de acuerdo a la velocidad de onda

Velocidad de onda (m/s)	Clasificación del concreto
$V > 4500$	Excelente
$4500 > V > 3500$	Óptima
$3500 > V > 3000$	Buena
$3000 > V > 2000$	Regular
$2000 > V$	Mala

Fuente: Carvalho, Macedo, Junior (2012), editado por el autor

Es importante mencionar que para este equipo hay tres tipos de colocación de los transductores, que corresponde a la colocación directa, siendo esta la ideal a utilizar, la semidirecta y la indirecta o superficial. Estas colocaciones se muestran de forma gráfica en la figura 17.

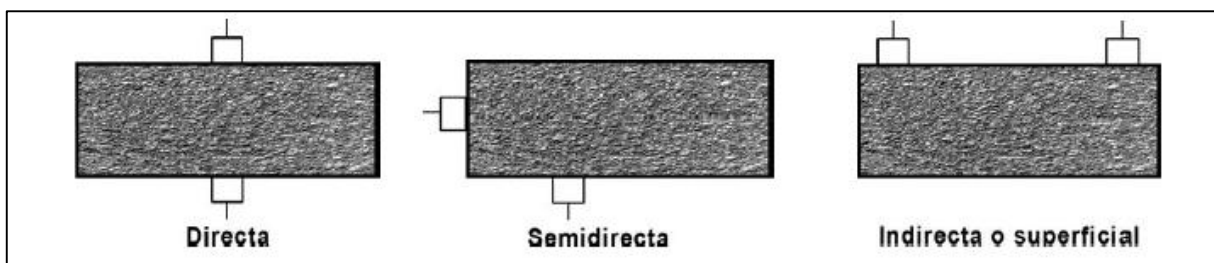


Figura 17. Formas de colocación de transductores para el equipo de velocidad de onda

Fuente: Proceq S.A (2017)

Para el presente trabajo se utilizaron dos de estas configuraciones, la directa para el caso de las mediciones en los cilindros de control, y la indirecta para las baldosas y columnas. Esto debido a que la configuración en campo de estos elementos, que principalmente es en casas,

no permite realizar mediciones directas, ya que los cables del equipo en la mayoría de los casos no permitirían tener un transductor adentro y otro afuera la casa. Tomando en consideración que la idea es eventualmente poder utilizar el equipo en campo para la evaluación de estos elementos, se decide utilizar la configuración mencionada.

Seguidamente, se procede a explicar brevemente el procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo en los diferentes elementos; este se realiza de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C597-16. Los pasos se exponen a continuación:

1. Lo primero que se debe hacer antes de utilizar el equipo es calibrarlo, esto se hace utilizando la varilla de calibración que incluye el equipo, la cual posee un valor de calibración establecido. Se procede a acoplar los conductores a la varilla utilizando el gel conductor, realizar la medición y el tiempo mostrado en el equipo debe coincidir con el establecido, de lo contrario se debe modificar manualmente.
2. Una vez calibrado, se procede a colocar el gel conductor en la superficie a evaluar, cabe recalcar que no se debe escatimar en el uso de este gel ya que se quiere tener el mejor acople acústico posible entre la superficie y los transductores, luego se presionan firmemente los transductores contra la superficie para realizar las respectivas mediciones. En caso de que la medición sea indirecta, se procede a reposicionar los transductores para la segunda medición.

3.1.4 Detector de metales

Para este último ensayo no destructivo, se utilizó el equipo presentado en la Sección 2.5, el cual se utiliza para determinar el posicionamiento y el recubrimiento de las varillas de acero dentro del concreto, así como su diámetro. El procedimiento que se emplea para llevar a cabo este ensayo es el siguiente:

1. Se sostiene el sensor despegado de cualquier superficie para iniciar las mediciones en cero.
2. Se coloca el sensor sobre la superficie de concreto y se procede a desplazar el sensor en línea recta, de tal forma que a medida que se desplaza el sensor, en la pantalla del instrumento se observa como los valores van cambiando hasta un punto en que el sensor va a estar lo más cerca posible del refuerzo, y es aquí cuando se procede a

tomar los datos del recubrimiento y el diámetro de acuerdo con lo mostrado en la pantalla. En la figura 18 se muestra un ejemplo de lo que se observa en la pantalla del equipo conforme se realizan las mediciones.

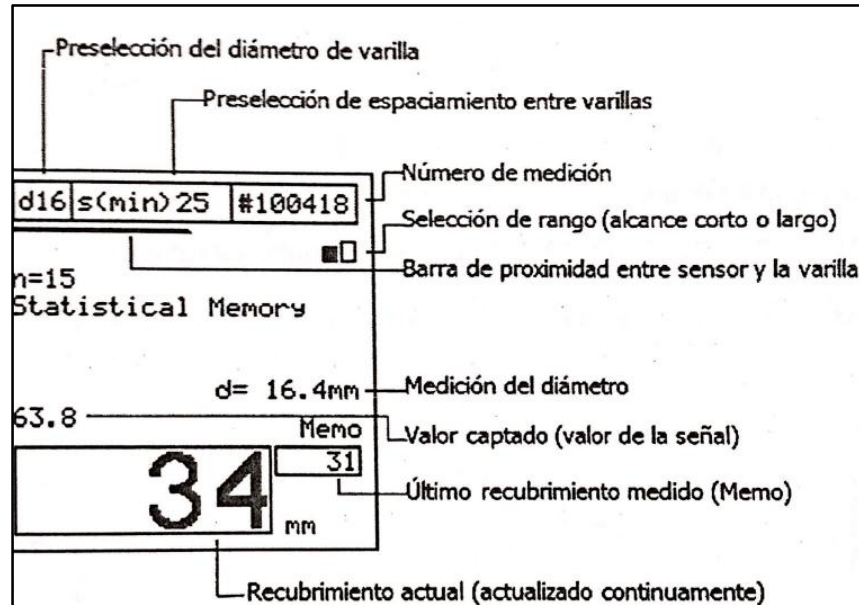


Figura 18. Información mostrada en la pantalla del detector de metales

Fuente: Elcoemeter S.A (2017)

3.2 Ensayos destructivos

3.2.1 Ensayo de compresión de cilindros de concreto

Este ensayo se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM C39-17, donde se utiliza un equipo hidráulico llamado máquina de compresión, el cual ejerce presión sobre el espécimen a una velocidad entre 0,20 y 0,30 MPa/s, hasta que se llega a la falla, registrando así el valor de resistencia máxima. Dicha máquina se muestra en la figura 19.



Figura 19. Máquina de compresión propiedad del LanammeUCR

Previo a la falla de los cilindros, se realiza la medición de los diámetros y la longitud de cada uno. Adicionalmente, es importante asegurar que ambas caras del espécimen sean paralelas, lo cual se puede lograr aplicando una capa delgada de mezcla de yeso y cemento o puliendo las superficies, esto para garantizar que la distribución de esfuerzos sobre las superficies en contacto con la máquina sea lo más uniforme posible.

3.2.2 Ensayo para determinar la resistencia en flexión de baldosas prefabricadas

Antes de llevar a cabo este ensayo, se deben realizar mediciones de las dimensiones, como lo son la longitud, ancho, espesor, traslapo y la masa al 0,1 kg más cercano. Una vez tomadas dichas mediciones, se lleva a cabo el procedimiento de falla, de acuerdo con lo establecido en la norma INTE C133:17. A continuación se presenta el procedimiento indicado en esta norma:

1. Las baldosas se deben colocar simplemente apoyadas sobre dos rodillos de acero, dejando una distancia libre de 50 mm entre el centro del punto de apoyo y el extremo de la baldosa. La carga se aplica a los tercios de la distancia entre apoyos. Esta configuración se muestra en la figura 20.

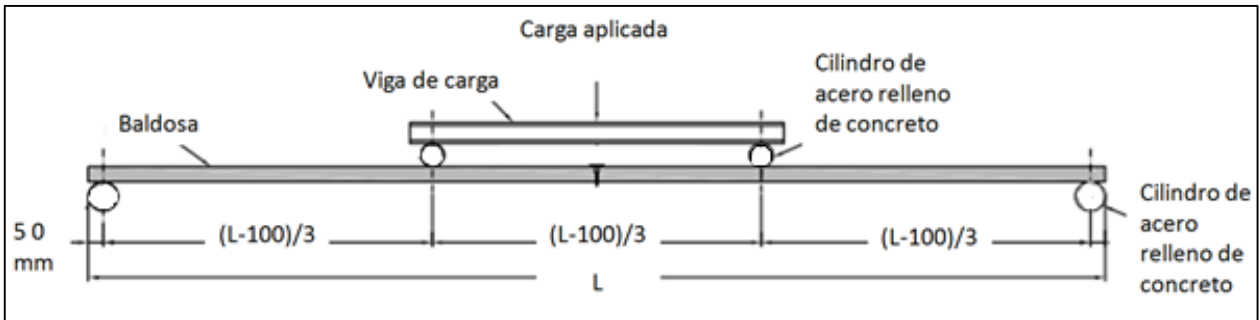


Figura 20. Configuración utilizada para el fallo en flexión de baldosas

Fuente: INTE C133 (2017)

2. Seguidamente, se deben marcar las líneas correspondientes a los tercios donde se aplica la carga; además se deben colocar bandas de hule con un ancho menor de 50 mm y un espesor mínimo de 75 mm, sobre las que se colocan los cilindros de carga.
3. Finalmente, se coloca la viga de carga y se procede con la fallo de la baldosa. Ésta es cargada mediante el uso de un gato hidráulico a una razón constante de 16 N/s hasta alcanzar los 1000 N. Una vez que se alcanza este valor o cuando no se registran incrementos de carga significativos, el ensayo se debe realizar procurando alcanzar la carga máxima en un tiempo de 1 min a 2 min.

Una vez concluido el ensayo previamente descrito, se procede a realizar los cálculos respectivos al momento resistente máximo (M_R), esto mediante el empleo de la ecuación 3-1:

$$M_R = \frac{P(L-0,1)}{6a} + \frac{w(L-0,1)^2}{8aL} \quad [3-1]$$

Donde

- L es el promedio de la longitud total de la baldosa expresada en m.
- P es la carga que se registra en los instrumentos de medición más el peso de los aparejos (equipo que se coloca sobre la baldosa) en N.

- W es el peso propio de la baldosa en N.
- a es el promedio del ancho de la baldosa en m.

3.2.3 Ensayo para determinar la resistencia en flexión de columnas prefabricadas

De igual forma que para la falla de baldosas, previo a realizar el ensayo, se deben tomar las mediciones de los especímenes, en lo que sería longitud, ancho, ancho interno, profundidad del canal y masa al 0,1 kg más cercano. La metodología de falla se lleva a cabo de acuerdo con lo estipulado en la norma INTE C133:17, como se describe a continuación:

1. Se debe empotrar la columna en su base en una longitud de $0,22 L$, siendo L la longitud total del elemento y esta debe ser colocada de forma horizontal. Se debe tomar en consideración que durante el montaje, la columna debe estar apoyada en dos puntos en todo momento para evitar un fisuramiento antes de iniciar la aplicación de la carga.
2. La deformación del elemento se mide en su parte superior, sobre la línea de acción de la fuerza aplicada, como se muestra en la figura 21.

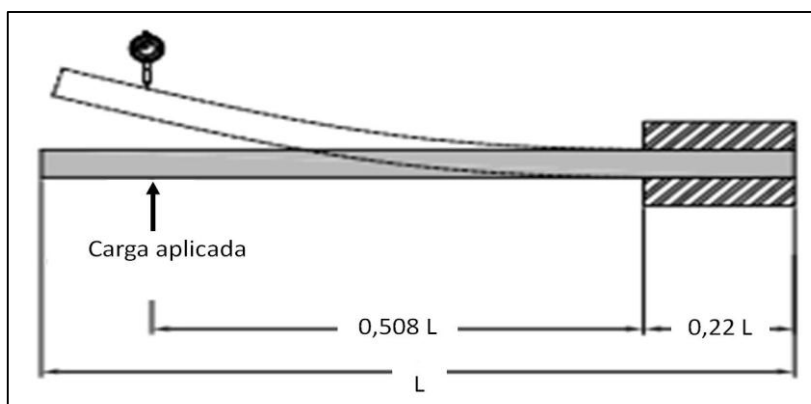


Figura 21. Configuración utilizada para la falla en flexión de columnas

Fuente: INTE C133 (2017)

3. Se procede a cargar la columna mediante un gato hidráulico a una razón de 16 N/s, realizando mediciones de desplazamientos cada 200 N hasta alcanzar 2200 N. Una vez alcanzado este valor, se continúa cargando, con la posibilidad de variar los intervalos en que se registran los desplazamientos, hasta que el elemento falle. Se considera falla cuando la carga máxima disminuye 20%.

Con los datos del valor de carga y el desplazamiento asociado, se procede a realizar los cálculos para obtener el momento de agrietamiento (M_{cr}) y el momento resistente máximo (M_R). En primera instancia, se calcula la rigidez inicial (k_i) de la columna (expresada en N/mm) mediante la siguiente ecuación 3-2.

$$k_i = \frac{200}{\Delta_{200}} \quad [3-2]$$

Donde

- Δ_{200} es el desplazamiento asociado a la carga de 200 N.

Seguidamente, se procede a calcular la rigidez elástica (k_n) de cada uno de los tramos subsiguientes, de acuerdo con la ecuación 3-3.

$$k_n = \frac{P_{(n+1)200} - P_{(n)200}}{\Delta_{(n+1)200} - \Delta_{(n)200}} \quad [3-3]$$

Donde

- $\Delta_{(n+1)200}$ es el desplazamiento asociado a la carga subsiguiente de 200 N.
- $P_{(n+1)200}$ es cada una de las cargas subsiguientes a 200N.

Posteriormente se debe calcular la diferencia porcentual para cada valor de k_n con respecto al valor de k_i según la ecuación 3-4.

$$\delta_n \% = \frac{k_i - k_n}{k_i} 100 \quad [3-4]$$

Donde el primer valor de n que genera un $\delta_n \% > 50\%$ se considera como la carga de grieta (P_{cr}). Una vez obtenido este valor, se utiliza la ecuación 3-5 para el cálculo de momento de agrietamiento.

$$M_{cr} = (P_{cr} - 0,03 w) 0,508 L \quad [3-5]$$

Donde

- L es la longitud total de la columna, expresada en m
- w es el peso propio de la columna, expresado en N

Finalmente se calcula el momento resistente máximo según la ecuación 3-6.

$$M_R = (P_{max} - 0,03 w) 0,508 L \quad [3-6]$$

Donde

- M_R es el momento resistente máximo en la base de la columna en un sistema equivalente en voladizo, expresado en N·m
- P_{max} es la carga máxima resistida por el espécimen en N.

4. Resultados

A continuación, se presentan los datos obtenidos de cada uno de los ensayos realizados, en el orden respectivo en que se llevaron a cabo. En cada uno de los ensayos se muestran los resultados de los ensayos no destructivos (END) y destructivos (ED), para los cilindros de control, las baldosas y las columnas prefabricadas. Finalmente se presentan los valores obtenidos con el uso del detector de metales.

4.1 Ensayo 1 – Fabricante A

4.1.1 END

En esta sección se exponen los primeros resultados obtenidos a partir de la aplicación de ensayos no destructivos en los especímenes del fabricante A, donde se presentan los valores de resistividad eléctrica, las velocidades de onda para el transductor exponencial de 54 kHz, así como el transductor de 150 kHz y por último el índice esclerométrico denominado valor Q. Los resultados se identifican por columna con la denominación R_i , que corresponde a una abreviación de la palabra resultado.

4.1.1.1 Cilindros de control

Cuadro 8. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	Columnas			
	R1	R2	R3	R4
1	5,6	5,7	5,5	5,8
2	5,8	5,9	6,2	5,8
3	5,7	5,8	6,1	6,1
4	5,6	5,7	6,0	5,9
	Baldosas			
1	6,3	6,1	6,1	6,1
2	6,3	6,1	6,0	5,9
3	6,0	6,1	6,0	6,2
4	6,2	6,0	5,9	6,0

Cuadro 9. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Columnas							
	Transductor exponencial de 54 kHz				Transductor de 150 kHz			
	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)
1	110,8	2707	112,6	2664	76,2	3937	75,7	3963
2	111,2	2697	112,2	2673	74,8	4010	74,4	4032
3	111,5	2690	110,8	2703	75,7	3963	75,3	3984
4	102,1	2938	101,2	2964	75,4	3978	74,8	4010
Baldosas								
1	112,5	2689	110,6	2730	75,7	3989	74,9	4032
2	108,7	2704	109,1	2694	73,4	4005	73,3	4010
3	110,8	2707	110,8	2707	76,2	3937	76,2	3937
4	111,1	2700	110,1	2724	75,2	3989	74,7	4016

Cuadro 10. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores Q									
	Columnas									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	35,0	38,5	34,0	39,0	40,0	39,5	39,0	39,0	41,0	38,5
2	37,5	38,0	36,5	42,0	35,5	41,0	38,5	35,5	41,0	39,5
3	37,5	39,0	36,0	38,5	41,5	39,5	39,0	41,5	38,5	37,5
4	37,0	38,0	38,0	38,0	38,5	37,0	40,0	36,5	39,0	36,0
Baldosas										
1	37,5	40,5	40,0	36,5	39,0	35,5	38,0	38,5	36,0	38,5
2	43,0	35,5	42,0	40,0	42,5	40,0	39,0	37,0	37,5	42,5
3	36,5	39,5	41,0	40,0	40,0	38,5	37,5	37,5	38,5	39,5
4	39,0	38,5	39,0	42,0	39,5	37,5	39,0	39,5	41,5	39,5

4.1.1.2 Columnas y baldosas

Cuadro 11. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores de resistividad eléctrica (k'Ω'cm)			
	R1	R2	R3	R4
1	7,6	8,7	8,0	9,4
2	7,2	9,4	8,1	7,8
3	7,7	7,4	7,3	7,3
Baldosas				
1	10,7	10,3	9,8	8,8
2	9,0	8,0	9,0	9,0
3	10,3	10,6	10,6	9,6

Cuadro 12. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Transductor exponencial de 54 kHz			Transductor de 150 kHz		
	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)
1	55,6	98,3	1756	19,1	37,6	4045
2	54,6	91,6	2027	20,7	39,0	4098
3	54,9	93,5	1943	19,1	38,1	3947
Baldosas						
1	50,3	90,4	1870	22	40,4	4076
2	52,6	85,1	2307	22	40,3	4098
3	49,4	84,0	2167	20	38,7	4010

Cuadro 13. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores Q									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	46,5	47,0	45,0	47,0	45,0	45,5	45,5	47,0	46,0	50,0
2	46,0	41,5	49,5	42,0	45,0	48,0	46,5	48,5	43,0	44,5
3	50,5	44,5	43,0	45,0	49,0	43,0	44,5	46,5	50,5	46,5
Baldosas										
1	34,0	34,0	37,5	34,5	40,5	36,5	39,5	36,5	35,5	34,0
2	35,0	36,0	35,5	33,0	33,5	34,5	39,5	38,5	40,0	36,0
3	35,5	35,5	35,0	34,0	35,0	38,5	39,5	35,0	38,0	38,5

4.1.2 ED

En esta sección se exponen los primeros resultados obtenidos para los especímenes del fabricante A, mediante la aplicación de ensayos destructivos, así como las respectivas mediciones que fueron mencionadas en la Sección 3.2 para cada tipo de espécimen analizado.

4.1.2.1 Cilindros de control

Cuadro 14. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control

Cilindros	Mediciones			Esfuerzo máximo MPa
	Columnas (mm)			
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	
1	3031,7	151,95	151,70	30,2
2	3034,2	151,30	151,60	27,5
3	3041,0	151,90	151,49	26,2
4	3039,3	157,97	151,24	25,9
Baldosas				
1	3048,0	151,34	151,68	27,6
2	3031,4	151,54	151,83	27,5
3	3039,1	151,92	151,52	25,6
4	3036,4	151,94	151,90	31,6

4.1.2.2 Columnas y baldosas

Cuadro 15. Dimensiones promedio de las columnas

Columnas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	Ancho interno del canal	Orificio para tirante	Peso propio (N)
1	3301	132,9	133,0	35,0	17,6	1054,2
2	3300	131,6	131,1	34,9	16,4	1034,6
3	3301	131,0	132,2	34,8	16,3	1086,1

Cuadro 16. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas

Carga (N)	Desplazamiento (mm)		
	C1	C2	C3
200	1,50	1,05	1,36
400	3,81	2,29	2,25
600	6,55	3,58	3,43
800	14,13	7,06	4,46
1000	18,30	11,84	8,03
1200	23,35	15,56	11,39
1400	27,07	19,84	16,41
1600	32,24	23,67	22,83
1800	37,00	27,81	25,40
2000	42,44	32,51	29,98
2200	50,31	39,46	34,13
2500	-	46,94	42,05
2800	-	-	49,87

Cuadro 17. Carga y momento resistente máximo en las columnas

Elemento	Carga agrietamiento	Carga máxima	Momento agrietamiento	Momento máximo	M_r/M_{cr}	Desplazamiento asociado a 800 N
C1	600	2902	953	4813	5,1	14,1
C2	600	2976	954	4937	5,2	7,1
C3	800	3087	1287	5122	3,9	4,5

Cuadro 18. Dimensiones promedio de las baldosas

Baldosas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho	Espesor	Altura llave superior	Altura de llave inferior	Peso propio (N)
1	1412,1	492,1	38,4	14,7	15,8	590,9
2	1412,1	492,2	3,82	13,9	13,3	592,8
3	1412,2	492,0	3,85	13,2	16,5	584,9

Cuadro 19. Carga y momento resistente máximo en las baldosas

Baldos	Peso aparejos (N)	Carga de falla (N)	M_r (N·m/m)
1	212,4	2424	1355
2	212,4	2279	1291
3	212,4	2261	1281

4.2 Ensayo 1 – Fabricante B

4.2.1 END

En esta sección se exponen los resultados obtenidos a partir la aplicación de ensayos no destructivos en los especímenes del fabricante B, , donde se presentan los valores de resistividad eléctrica, las velocidades de onda para el transductor exponencial de 54 Hz, así como el transductor de 150 Hz y por último el índice esclerométrico.

4.2.1.1 Cilindros de control

Cuadro 20. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	Columnas			
	R1	R2	R3	R4
1	8,3	8,2	8,1	8,1
2	9,8	9,5	9,5	9,6
3	8,0	8,5	7,9	7,8
4	9,8	9,1	9,4	8,8
Baldosas				
1	7,5	8,1	9	8,1
2	6,5	7,9	7,5	8
3	8,1	8,1	9	7,6
4	9,3	9	8,7	8,1

Cuadro 21. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Columnas							
	Transductor exponencial de 54 kHz				Transductor de 150 kHz			
	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)
1	114,0	2657	115,4	2625	78,7	3850	78,5	3859
2	115,4	2625	114,2	2657	78,1	3879	76,3	3971
3	114,7	2641	114,2	2653	79,1	3830	77,6	3904
4	113,4	2664	113,0	2681	76,7	3950	76,5	3960
Baldosas								
1	119,3	2539	119,7	2531	82,5	3675	82,3	3681
2	117,6	2576	118,2	2563	82,3	3681	82,3	3681
3	120,4	2516	120,9	2506	83,4	3633	83,8	3615
4	119,3	2539	119,2	2541	83,0	3650	82,6	3668

Cuadro 22. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores Q									
	Columnas									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	46,0	45,5	50,0	45,0	46,0	43,0	47,0	46,0	48,0	43,5
2	44,5	46,0	44,0	40,0	46,0	49,0	46,0	44,5	44,5	48,5
3	40,5	45,5	46,5	42,0	42,0	42,0	43,5	46,5	46,5	47,0
4	47,5	47,5	44,0	50,5	45,0	43,0	48,5	46,5	46,5	50,0
Baldosas										
1	39,0	37,5	41,5	41,5	43,0	37,0	38,5	43,0	39,0	40,0
2	39,0	36,0	42,0	35,0	36,5	39,5	43,0	42,0	40,0	37,0
3	38,5	41,5	41,0	44,5	43,0	40,0	41,5	40,5	40,5	41,5
4	36,5	39,0	42,5	38,0	40,0	38,0	38,5	37,0	39,0	41,0

4.2.1.2 Columnas y baldosas

Cuadro 23. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	R1	R2	R3	R4
1	6,6	6,6	6,2	6,6
2	7,6	7,5	6,6	6,8
3	7,0	7,5	7,1	6,6
Baldosas				
1	11,9	11,1	12,0	11,9
2	7,0	6,2	6,4	6,6
3	11,9	11,1	12,1	11,6

Cuadro 24. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Transductor exponencial de 54 kHz			Transductor de 150 kHz		
	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)
1	60,9	99,8	1928	24,4	42,6	4120
2	62,7	94,6	2351	24,5	43,1	4032
3	52,3	90,8	1948	24,0	42,5	4054
Baldosas						
1	51,8	86,8	2187	21,9	41,6	3807
2	53,6	87,2	2136	23,4	42,9	3846
3	54,9	95,9	1829	22,4	43,4	3571

Cuadro 25. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores Q									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	48,0	44,5	45,5	40,5	45,5	47,5	45,5	41,5	46,5	46,0
2	45,5	46,5	46,0	42,5	46,0	45,5	45,5	38,5	44,0	45,5
3	44,0	44,5	43,5	44,0	42,0	46,0	40,0	40,5	41,0	44,0
Baldosas										
1	42,0	38,5	41,5	35,5	38,0	38,5	35,5	35,5	37,5	38,5
2	36,5	34,5	36,5	36,0	34,5	34,5	37,0	34,5	36,0	34,0
3	36,5	35,5	42,5	38,5	38,0	37,5	38,0	37,0	35,0	38,5

4.2.2 ED

En esta sección se exponen los resultados obtenidos de los ensayos destructivos realizados a los especímenes del fabricante B, mediante la aplicación de ensayos destructivos, así como las respectivas mediciones para cada tipo de espécimen analizado.

4.2.2.1 Cilindros de control

Cuadro 26. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control

Cilindros	Mediciones (mm)			Esfuerzo máximo MPa
	Columnas			
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	
1	3035,0	153,37	153,25	30,5
2	3031,1	153,31	152,59	29,9
3	3025,8	151,76	152,62	28,5
4	3011,0	153,40	153,41	31,5
Baldosas				
1	3031,1	150,12	149,67	18,7
2	3028,3	151,58	152,23	18,3
3	3027,5	152,25	151,91	19,1
4	3043,0	152,68	151,89	17,7

4.2.2.2 Columnas y baldosas

Cuadro 27. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas

Columnas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho1	Ancho2	Ancho interno del canal	Orificio para tirante	Peso propio (N)
1	3305,0	137,7	133,7	36,2	17,6	1115,5
2	3303,3	133,2	131,7	34,9	16,4	1096,4
3	3299,1	132,8	131,7	35,2	16,3	1069,9

Cuadro 28. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas

Carga (N)	Desplazamiento (mm)		
	C1	C2	C3
200	1,38	1,08	1,07
400	3,16	2,23	2,20
600	4,93	3,64	3,44
800	6,65	5,00	4,62
1000	8,41	6,07	6,85
1200	12,26	8,36	8,72
1400	17,65	14,10	12,64
1600	22,52	18,06	19,45
1800	26,35	23,25	22,91
2000	30,61	28,63	29,31
2200	34,94	31,92	33,13
2600	45,87	41,35	44,12
3000	57,41	52,43	56,51
3400	74,90	80,55	71,62

Cuadro 29. Carga y momento resistente máximo en las columnas.

Elemento	Carga agrietamiento	Carga máxima	Momento agrietamiento	Momento máximo	M_r/M_{cr}	Desplazamiento asociado a 800 N
C1	1000	3795	1623	6315	3,89	6,6
C2	1000	3586	1623	5962	3,67	5,0
C3	800	3670	1287	6097	4,74	4,6

Cuadro 30. Dimensiones promedio de las baldosas

Baldosas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho	Espesor	Altura llave superior	Altura de llave inferior	Peso propio (N)
1	1412,1	491,9	38,1	14,3	15,6	581,5
2	1412,2	492,1	38,2	13,9	13,4	595,3
3	1411,9	492,3	38,5	13,4	16,2	592,3

Cuadro 31. Carga y momento resistente máximo en las baldosas

Baldos	Peso aparejos (N)	Carga de falla (N)	M_r (N·m/m)
1	263,9	2380	1375
2	263,9	2284	1296
3	263,9	2252	1334

4.3 Ensayo 2 – Fabricante A

4.3.1 END

En esta sección se exponen los resultados del segundo ensayo realizado en los especímenes del fabricante A mediante la aplicación de ensayos no destructivos, donde se presentan los valores de resistividad eléctrica, las velocidades de onda para el transductor exponencial de 54 Hz, así como el transductor de 150 Hz y por último el índice esclerométrico.

4.3.1.1 Cilindros de control

Cuadro 32. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	Columnas			
	R1	R2	R3	R4
1	6,4	6,5	6,5	6,4
2	6,8	6,8	6,4	6,8
3	6,6	6,5	6,4	6,2
4	6,3	6,4	6,5	6,2
Baldosas				
1	6,8	6,4	6,1	6,5
2	6,4	6,7	6,5	6,5
3	6,6	6,6	6,4	6,6
4	6,5	6,2	6,4	6,5

Cuadro 33. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Columnas							
	Transductor exponencial de 54 kHz				Transductor de 150 kHz			
	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)
1	109,2	2793	110,8	2752	75,3	4050	75,5	4039
2	111,6	2732	111,3	2740	75,0	4066	74,8	4077
3	111,1	2745	110,1	2770	75,5	4039	75,2	4055
4	111,9	2725	110,4	2762	75,5	4039	75,1	4061
Baldosas								
1	110,5	2760	110,9	2750	75,0	4066	74,8	4077
2	111,9	2725	112,9	2701	75,7	4029	75,8	4023
3	111,4	2737	110,8	2752	75,3	4050	75,7	4029
4	111,0	2747	110,2	2767	74,3	4099	74,3	4099

Cuadro 34. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores Q									
	Columnas									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	42,0	44,5	42,0	41,0	39,0	39,0	41,0	38,0	40,0	40,0
2	43,0	43,5	42,5	40,0	42,0	41,5	39,5	38,5	41,0	39,0
3	40,0	38,5	37,5	37,5	39,0	39,0	39,0	40,5	40,0	37,5
4	39,5	40,5	42,5	38,5	41,5	41,0	42,0	42,0	38,5	39,5
Baldosas										
1	38,5	39,5	37,5	42,5	43,5	38,0	35,5	38,5	35,5	40,0
2	38,0	38,0	43,0	42,0	39,0	35,5	39,0	35,0	39,5	37,5
3	40,0	37,0	39,5	39,0	40,5	42,5	39,5	43,0	39,0	40,0
4	38,5	40,5	39,5	40,5	38,0	37,0	41,5	41,0	39,5	42,0

4.3.1.2 Columnas y baldosas

Cuadro 35. Valores de resistividad obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	R1	R2	R3	R4
1	7,7	8,9	9,0	7,3
2	8,0	7,8	8,0	8,2
3	8,0	8,2	7,6	7,8
Baldosas				
1	11,6	10,2	9,6	10,5
2	9,9	12,0	9,3	8,8
3	9,3	9,4	12,0	10,6

Cuadro 36. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Transductor exponencial de 54 kHz			Transductor de 150 kHz		
	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)
1	60,1	99	1928	21,7	40,7	3968
2	60,6	99,3	1937	21,8	41,1	3886
3	60,2	98,5	1958	22,2	41,2	3947
Baldosas						
1	49,3	80,6	2396	20,0	39,3	3886
2	52,8	82,2	2551	22,4	41,7	3886
3	51,4	81,7	2459	20,6	39,2	4032

Cuadro 37. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores Q									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	45,5	46,5	45,0	47,5	46,0	48,0	43,5	43,5	47,0	50,0
2	43,0	48,5	43,0	42,0	46,5	47,0	43,5	46,5	43,5	44,5
3	44,5	46,5	42,5	43,0	49,0	47,0	49,5	44,5	47,5	46,0
Baldosas										
1	34,5	38,5	32,0	32,0	35,0	37,5	39,5	33,5	35,5	40,5
2	33,5	38,5	36,0	33,0	34,0	33,5	34,0	40,0	32,5	39,5
3	36,5	33,0	32,0	40,0	36,0	37,5	37,5	35,5	40,0	33,5

4.3.2 ED

A continuación se exponen los resultados obtenidos en el segundo ensayo para los especímenes del fabricante A, mediante el empleo de ensayos destructivos; se presentan además las respectivas mediciones para cada tipo de espécimen analizado.

4.3.2.1 Cilindros de control

Cuadro 38. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control

Cilindros	Mediciones (mm)			Esfuerzo máximo MPa
	Columnas			
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	
1	3054,9	152,16	151,61	35,9
2	3032,1	151,59	151,21	37,4
3	3031,2	151,53	151,64	37,3
4	3045,2	151,82	152,09	36,4
	Baldosas			
1	3047,6	151,79	151,77	33,7
2	3057,6	152,08	151,88	31,4
3	3053,8	151,51	151,66	34,5
4	3046,2	151,95	151,98	33,2

4.3.2.2 Columnas y baldosas

Cuadro 39. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas

Columnas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho1	Ancho2	Ancho interno del canal	Orificio para tirante	Peso propio (N)
1	3286,7	130,1	132,2	37,7	17,6	1068,9
2	3287,3	130,0	127,2	38,4	17,3	1052,3
3	3290,0	133,2	131,3	38,5	17,5	1092,5

Cuadro 40. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas

Carga (N)	Desplazamiento (mm)		
	C1	C2	C3
200	1,38	1,56	1,45
400	3,03	3,12	3,04
600	4,95	5,02	4,78
800	7,10	6,72	5,93
1000	9,55	9,07	7,27
1200	11,73	12,40	10,55
1400	13,62	17,82	13,94
1600	17,49	24,52	20,26
1800	21,74	29,60	24,27
2000	28,83	34,62	33,30
2200	33,24	46,44	45,14
2500	46,93	58,11	51,22
2800	61,39	71,46	63,26
3100	76,07	92,40	79,88
3400	97,02	-	99,56

Cuadro 41. Carga y momento resistente máximo en las columnas

Elemento	Carga agrietamiento	Carga máxima	Momento agrietamiento	Momento máximo	M_r/M_{cr}	Desplazamiento asociado a 800 N
C1	1400	3516	2283	5816	2,55	7,1
C2	1000	3220	1617	5324	3,29	6,7
C3	1000	3462	1617	5731	3,55	5,9

Cuadro 42. Dimensiones promedio de las baldosas

Mediciones (mm)					
Longitud	Ancho	Espesor	Altura llave superior	Altura de llave inferior	Peso propio (N)
141,0	494,3	38,7	14,1	17,6	618,8
141,3	494,0	37,8	13,3	16,7	576,6
141,2	497,1	38,1	12,6	15,3	565,8

Cuadro 43. Carga y momento resistente máximo en las baldosas

Baldos	Peso aparejos (N)	Carga de falla (N)	M_r (N·m/m)
1	219,3	2508	1396
2	219,3	2473	1370
3	219,3	2539	1387

4.4 Ensayo 2 – Fabricante B

4.4.1 END

A continuación se presentan los resultados del segundo ensayo realizado en los especímenes del fabricante B mediante la aplicación de ensayos no destructivos, donde se muestran los valores de resistividad eléctrica, las velocidades de onda para el transductor exponencial de 54 Hz, así como el transductor de 150 Hz y por último el índice esclerométrico.

4.4.1.1 Cilindros de control

Cuadro 44. Valores de resistividad obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	Columnas			
	R1	R2	R3	R4
1	4,3	4,3	4,0	4,3
2	4,3	4,1	4,2	4,1
3	4,3	4,3	4,2	4,4
4	4,3	4,3	4,2	4,4
Baldosas				
1	3,7	3,5	3,6	3,3
2	3,5	3,6	3,3	3,4
3	3,6	3,5	3,7	3,5
4	3,7	3,4	3,7	3,6

Cuadro 45. Valores de velocidad de onda obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Columnas							
	Transductor exponencial de 54 kHz				Transductor de 150 kHz			
	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	m/s	t2 (μs)	V (m/s)
1	111,9	2680	112,7	2661	75,5	3973	74,8	4010
2	112,9	2657	112,0	2678	74,9	4005	74,8	4010
3	110,4	2717	111,1	2700	75,2	3989	74,9	4005
4	112,1	2676	112,3	2671	74,9	4005	75,3	3984
Baldosas								
1	116,3	2579	117,2	2559	79,0	3797	79,0	3797
2	111,1	2745	111,0	2747	81,5	3742	81,0	3765
3	111,8	2728	111,0	2747	81,4	3746	81,1	3760
4	110,2	2767	110,1	2770	80,8	3774	80,7	3779

Cuadro 46. Valores esclerométricos obtenidos en los cilindros de control de columnas y baldosas

Cilindros	Valores Q									
	Columnas									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	43,0	40,5	39,5	40,0	43,5	42,5	39,0	41,5	45,0	40,5
2	42,5	42,0	45,5	40,0	44,0	42,0	44,5	41,0	44,5	42,5
3	43,0	44,5	43,0	46,0	45,0	40,0	45,5	45,5	45,0	40,5
4	43,5	46,5	45,0	45,0	43,5	46,0	44,5	45,5	42,5	44,5
Baldosas										
1	34,5	33,5	35,0	33,5	34,0	33,0	36,5	31,5	35,0	33,5
2	35,0	33,0	32,5	30,5	31,0	31,5	33,0	34,0	34,5	33,0
3	32,0	32,0	30,5	31,0	31,0	35,0	30,5	34,0	33,0	33,5
4	33,5	38,0	33,5	31,0	32,0	32,0	34,5	32,0	33,0	35,5

4.4.1.2 Columnas y baldosas

Cuadro 47. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores de resistividad eléctrica ($k \cdot \Omega \cdot cm$)			
	R1	R2	R3	R4
1	4,8	4,8	5,1	5,7
2	7,0	6,7	6,7	6,9
3	6,9	6,1	7,2	7,6
Baldosas				
1	13,3	13,6	13,4	13,0
2	8,0	7,7	7,9	8,4
3	6,7	6,4	7,5	6,4

Cuadro 48. Valores de velocidad de onda obtenida para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Transductor exponencial de 54 kHz			Transductor de 150 kHz		
	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)	t1 (μs)	t2 (μs)	V (m/s)
1	58,1	96,2	1968	22,8	42,0	3906
2	61,5	96,8	2124	21,5	40,5	3947
3	59,3	98,1	1932	21,7	40,6	3968
Baldosas						
1	51,7	85,8	2199	21,9	42,8	3588
2	53,3	86,2	2279	21,1	41,0	3768
3	51,3	83,8	2307	21,6	41,1	3846

Cuadro 49. Valores esclerométricos obtenidos para las columnas y baldosas ensayadas

Columnas	Valores Q									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	41,0	53,0	51,5	44,5	44,0	41,5	50,0	48,0	49,0	43,0
2	42,0	44,5	44,5	47,0	47,0	48,0	50,5	46,5	49,0	48,0
3	43,0	48,0	43,0	48,5	50,5	49,0	46,5	50,0	46,0	48,5
Baldosas										
1	38,0	38,5	40,5	38,0	36,5	40,0	37,0	36,0	35,5	38,0
2	33,0	36,0	35,5	35,5	34,5	38,0	35,5	34,5	36,0	35,5
3	38,5	34,5	33,5	34,0	37,0	33,0	35,5	35,5	35,5	33,5

4.4.2 ED

Finalmente se presentan los resultados obtenidos en el segundo ensayo para los especímenes del fabricante B, al aplicar los respectivos ensayos destructivos; se exponen además las mediciones para cada tipo de espécimen analizado

4.4.2.1 Cilindros de control

Cuadro 50. Dimensiones y valores de falla de los cilindros de control

Cilindros	Mediciones (mm)			Esfuerzo máximo MPa
	Columnas			
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	
1	3049,2	151,58	151,94	31,7
2	3052,0	152,12	151,89	33,2
3	3050,9	152,20	151,84	30,2
4	3051,0	151,94	151,85	31,6
	Baldosas			
1	3029,5	151,63	151,79	16,7
2	3053,4	151,66	151,74	17,4
3	3045,9	151,90	151,98	18,3
4	3043,1	151,92	152,04	18,2

4.4.2.2 Columnas y baldosas

Cuadro 51. Dimensiones promedio de las columnas ensayadas

Columnas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho 1	Ancho 2	Ancho interno del canal	Orificio para tirante	Peso propio (N)
1	3300,8	132,7	133,7	34,0	13,0	1084,6
2	3301,2	133,1	131,2	33,3	14,8	1073,8
3	3301,6	132,9	131,6	35,4	15,8	1023,8

Cuadro 52. Deformaciones asociadas a las cargas aplicadas en las columnas

Carga (N)	Desplazamiento (mm)		
	C1	C2	C3
200	1,46	1,74	1,48
400	2,48	3,41	2,94
600	4,00	5,51	4,25
800	6,13	8,16	7,96
1000	8,84	11,63	12,21
1200	14,44	18,57	18,07
1400	17,55	24,43	24,67
1600	25,55	29,70	28,08
1800	30,52	37,22	36,90
2000	42,65	43,80	49,46
2200	49,08	54,30	55,72
2500	55,26	64,03	69,34
2800	69,11	75,49	100,30
3100	95,61	96,18	-

Cuadro 53. Carga y momento resistente máximo en las columnas

Elemento	Carga agrietamiento	Carga máxima	Momento agrietamiento	Momento máximo	M_r/M_{cr}	Desplazamiento asociado a 800 N
C1	1000	3188	1622	5290	3,26	6,1
C2	1000	3245	1623	5388	3,32	8,2
C3	600	2842	955	4714	4,94	7,9

Cuadro 54. Dimensiones promedio de las baldosas

Baldosas	Mediciones (mm)					
	Longitud	Ancho	Espesor	Altura llave superior	Altura de llave inferior	Peso propio (N)
1	1411,2	495,5	38,1	14,2	14,6	582,0
2	1411,6	492,1	37,9	14,4	14,2	592,8
3	1411,0	492,3	38,6	15,0	16,3	568,3

Cuadro 55. Carga y momento resistente máximo en las baldosas

Baldos	Peso aparejos (N)	Carga de falla (N)	M_r (N·m/m)
1	219,3	2579	1426
2	219,3	2488	1383
3	219,3	2325	1311

4.5 Detector de metales

Como se mencionó al inicio de la presente sección, para este rubro se decidió utilizar un elemento aleatorio de cada ensayo para exponer los resultados. En primera instancia se presentan los resultados para las columnas y seguidamente se muestran los resultados de las baldosas.

4.5.1 Columnas

Para este tipo de elemento, como se mencionó previamente, se tomaron tres mediciones, dos de ellas aproximadamente a 150 mm de los extremos y una en el centro. De cada lectura se registra el recubrimiento y el diámetro de varilla (ϕ), esto de acuerdo con lo expuesto en la Sección 3.1.4. En el cuadro 56, el nombre de la columna se presenta de acuerdo con el número de columna analizado y a cuál ensayo pertenece.

Cuadro 56. Mediciones con el detector de metales en las columnas

Columna	Mediciones (mm)					
	Recubrimiento 1	$\phi 1$	Recubrimiento 2	$\phi 2$	Recubrimiento 3	$\phi 3$
2-Ensayo 1A	29	6,0	26	6,5	29	5,5
3-Ensayo 1B	29	5,5	32	6,0	27	6,0
1-Ensayo 2A	28	6,0	31	6,0	30	7,0
2-Ensayo 2B	26	7,0	26	6,0	27	6,5

4.5.2 Baldosas

En el caso de las baldosas, es importante mencionar que el instrumento fue utilizado en todos los especímenes para determinar de esta forma la ubicación del acero de refuerzo, tanto el refuerzo horizontal como el vertical, tal como se muestra en la figura 22.

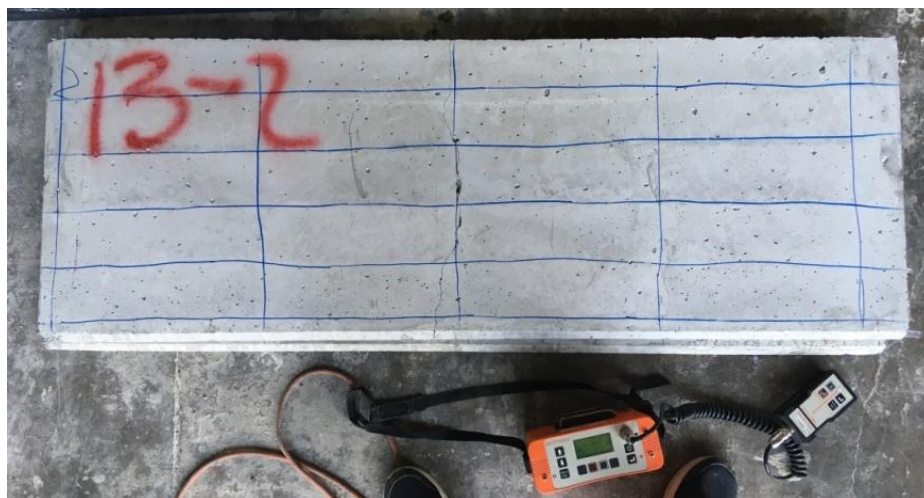


Figura 22. Ubicación del acero de refuerzo en las baldosas ensayadas

No obstante, para la presentación de resultados, al igual que para las columnas, se selecciona un espécimen al azar de cada ensayo, para mostrar el recubrimiento y el diámetro de varilla determinados con el equipo. Estos resultados se muestran en el cuadro 57, donde se nombran con letras las varillas que van a lo largo y con números las varillas a lo ancho del espécimen.

Cuadro 57. Mediciones con el detector de metales en las baldosas

Ubicación	Recubrimiento y diámetro (mm)							
	3-Ensayo1A		1-Ensayo1B		2-Ensayo2A		3-Ensayo2B	
	Rec 1	$\phi 1$	Rec 2	$\phi 2$	Rec 3	$\phi 3$	Rec 4	$\phi 4$
1	29	6,0	25	5,5	25	5,0	24	5,0
2	26	5,0	22	5,5	23	6,0	23	5,5
3	28	5,0	20	5,0	24	6,0	25	5,0
4	27	5,0	23	5,5	24	5,5	25	5,5
5	27	5,0	23	6,0	23	6,0	24	6,0
a	21	5,0	20	5,0	21	5,0	26	5,0
b	23	5,0	19	5,5	22	6,0	28	5,5
c	24	5,0	21	5,0	23	5,5	28	5,0
d	25	5,0	21	5,5	24	5,5	26	6,0
e	25	5,0	20	5,0	23	5,5	27	6,0

5. Análisis de resultados

5.1 Resistencia a la compresión de cilindros de control

Para determinar este parámetro, como se mencionó en la Sección 3.3, se utilizó la máquina de compresión, donde se fallaron especímenes de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, y se lleva a cabo, como se mencionó previamente, de acuerdo a la norma ASTM C 39-17. Dado que para cada ensayo se utilizaron cuatro cilindros tanto para mezcla de columnas como de baldosas, se cumple con el requerimiento del código ACI 318S-14 donde se indica que un ensayo a la resistencia debe ser el promedio de las resistencias de al menos dos especímenes de 150 mm por 300 mm o de al menos tres especímenes de 100 mm por 200 mm, las cuales deben ser preparadas con la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días o a la edad de ensayo establecida para la determinación de f'_c . (ACI 318S-14).

Para la comparación de los resultados obtenidos, el cuadro 58 muestra los valores promedio obtenidos en cada ensayo.

Cuadro 58. Promedio de la falla en compresión de los cilindros de control de cada muestra

Resultados		f'_c Columna (MPa)	f'_c Baldosa (MPa)
Fabricante A	Ensayo 1	28,1	27,5
	Ensayo 2	36,8	33,2
Fabricante B	Ensayo 1	30,1	18,5
	Ensayo 2	31,7	17,7

Como se puede apreciar del cuadro 58, hay una clara diferenciación entre la mezcla utilizada por el fabricante A y B para la confección de columnas y baldosas, donde se tiene que el Fabricante A utiliza una mezcla de resistencia similar para ambos elementos, mientras que el Fabricante B emplea una mezcla de mayor resistencia para las columnas.

Adicionalmente, se observa que para el Fabricante A, los resultados entre el ensayo 1 y el ensayo 2 presentan una diferencia de 24% en el caso de las columnas y un 17% para las baldosas, lo cual igualmente es un aspecto que influye las correlaciones con la resistencia.

5.2 Esclerómetro Silverschmidt

Para este ensayo es importante recalcar que todas las mediciones se realizaron bajo condiciones de laboratorio. La humedad, que es un factor que afecta directamente las mediciones con diferencias de hasta cinco unidades en el número de rebote, estaba controlada, adicionalmente se verificó que las superficies de los elementos no presentaran rugosidades o irregularidades que pudieran afectar las mediciones, ya que este tipo de imperfecciones son comunes en elementos prefabricados debido a que se elaboran dentro de moldes metálicos.

Dadas las características de esclerómetro utilizado, mencionadas en la Sección 2.2, no se tuvieron que realizar correcciones por el posicionamiento empleado en la toma de mediciones, lo cual presenta una clara ventaja para mediciones in situ.

Para llevar a cabo el análisis se utilizó la metodología de regresión lineal, donde se incluyeron las variables correspondientes al tipo de elemento, así como el fabricante, por lo que a cada resultado obtenido con el esclerómetro se le asocia el valor real de resistencia obtenido de los cilindros de control, el tipo de elemento y el fabricante; esto se muestra en el cuadro A1 de la sección de anexos. En el cuadro 59 se muestran los resultados obtenidos de la regresión.

Cabe recalcar que la variable correspondiente al fabricante en realidad está asociada a las características propias del concreto de cada fabricante, como lo serían el tipo de cemento, la relación agua/cemento, tipo de agregado, aditivos, etc. Sin embargo, dado que estas variables son propiedad intelectual de cada fabricante, se decide incluir una variable general que permita abarcar estos aspectos.

Cuadro 59. Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,843
Coeficiente de determinación R^2	0,710
R^2 ajustado	0,707
Error típico	3,493

Cuadro 60. Estadísticas de la regresión para cada variable

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-1,169	2,262	-0,517	0,606
Valor Q	0,570	0,058	9,794	5,92E-20
Elemento	5,166	0,456	11,340	3,08E-25
Fabricante	7,569	0,396	19,094	1,39E-54

De acuerdo con estos parámetros, se establece la ecuación 5-1 de la regresión:

$$f_{ck} = -1,17 + 0,57 Q + 5,17 \beta_1 + 7,57 \beta_2 \quad [5-1]$$

Donde

- f_{ck} resistencia en compresión.
- Q número de rebote.
- β_1 variable binaria correspondiente al elemento, 1 para columna y 0 para baldosa.
- β_2 variable binaria correspondiente al fabricante, 1 para Fabricante A y 0 para el fabricante B.

De los resultados presentados en el cuadro 59 y 60, se puede observar que de acuerdo con la regresión y según el coeficiente de valor Q obtenido, se tiene que si este valor incrementa en una unidad, la resistencia aumenta en 0,57 MPa.

Los otros coeficientes representan el efecto adicional del tipo de elemento y fabricante; para estos casos, al ser variables binarias, la referencia corresponde al que se le asigna el valor de cero, por lo que en el caso del fabricante, se tiene que el Fabricante A en promedio, aporta una resistencia adicional de 7,57 MPa con respecto al Fabricante B. De igual forma, para el tipo de elemento, donde se aprecia que las columnas tienen al menos 5,17 MPa más de resistencia en comparación con las baldosas.

Adicionalmente, un aspecto importante que se aprecia en el cuadro 60 es qué tan significativos son estos coeficientes. Esto se interpreta de acuerdo con los valores correspondientes al estadístico t o la probabilidad, ya que entre menor sea el valor de la probabilidad o entre mayor sea el valor del estadístico t, se puede decir que se rechaza la hipótesis nula de que estos coeficientes son cero, lo que implica que sí tienen un efecto en el

modelo calculado, y como se puede observar, todos los coeficientes tienen una probabilidad asociada sumamente baja.

Con la ecuación previamente mostrada se calcula el valor estimado de resistencia para cada uno de los valores Q; si se grafican los valores reales de resistencia contra los valores estimados, de tener una buena correlación, se debería obtener una línea de mejor ajuste de los datos cercana a los 45°, tal como se muestra en la figura 23.

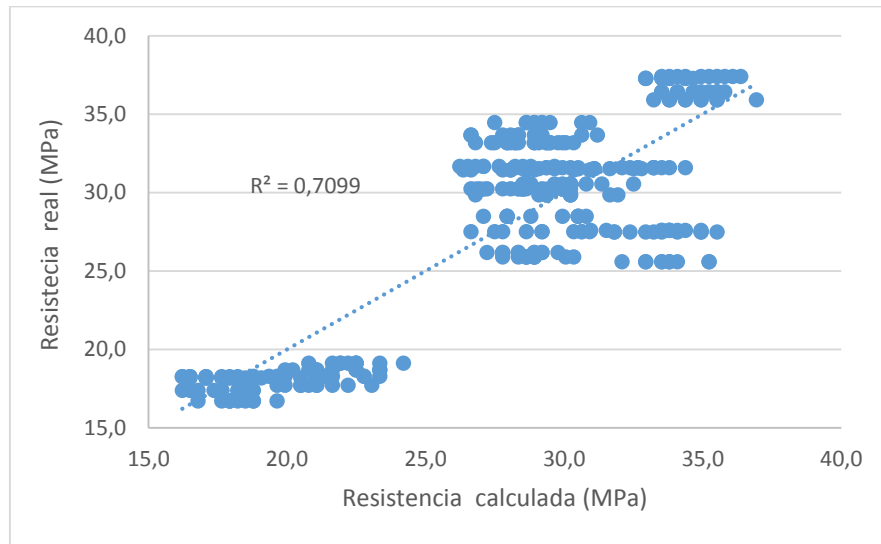


Figura 23. Gráfico de resistencia real contra resistencia calculada

Para tener un mejor criterio sobre el ajuste de los resultados, se calcularon los porcentajes de error correspondientes para cada ensayo, tal como se puede apreciar en el cuadro A1 de la sección de anexos. De acuerdo con Malhotra (2004), la precisión de la estimación de la resistencia a compresión en especímenes coronados, curados y ensayados bajo condiciones de laboratorio mediante esclerómetro debidamente calibrado se encuentra aproximadamente entre 15 % y 20 %, no obstante, en este caso la precisión aproximada de las estimaciones de resistencia del concreto en estructuras ronda el 25 %. Como ejemplo se presentan en la figura 24 los porcentajes de error obtenidos en el ensayo 1 del fabricante A.

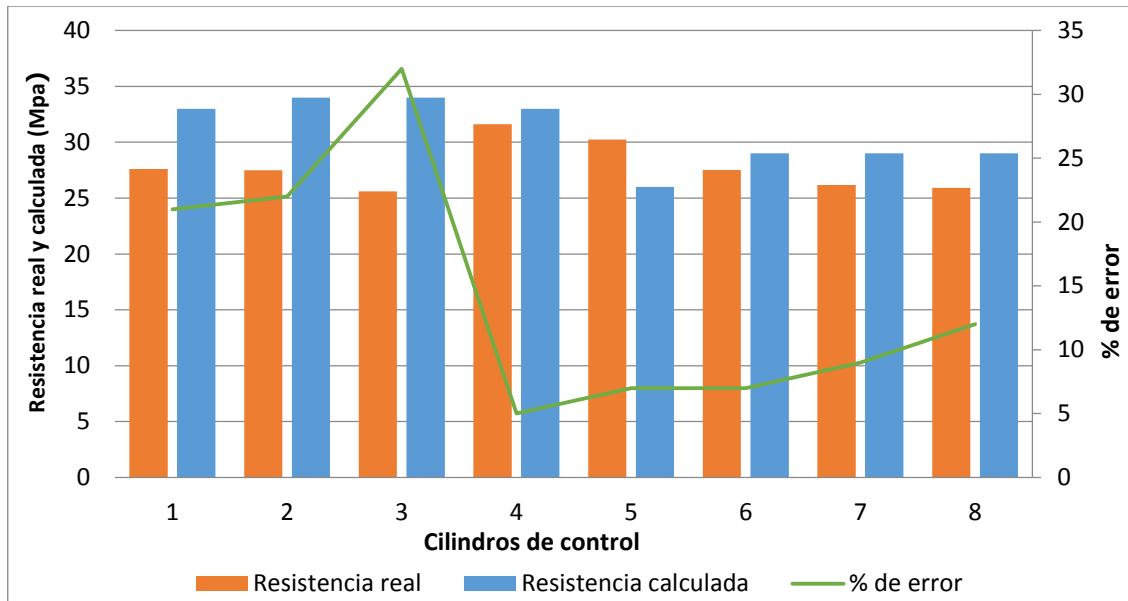


Figura 24. Resistencia real y calculada con respectivo % de error – Ensayo 1 Fabricante A

Se muestra este ensayo como ejemplo debido a que es el que presenta mayores porcentajes de error con respecto a la medición real. En la figura 24 se presentan la resistencia real y la calculada para cada cilindro, donde los primeros cuatro cilindros corresponden a la mezcla de columnas y los otros cuatro a la mezcla de baldosas; cabe recalcar que esta configuración se mantiene para todos los ensayos realizados. Se observa que los cilindros correspondientes a las columnas presentan un porcentaje de error mayor al de las baldosas; esto es debido a que de acuerdo al análisis de regresión, los valores de resistencia para el concreto de las columnas para este fabricante deberían ser mayores a los obtenidos mediante la falla.

El error promedio para todos los cilindros fue de 14 %, lo cual está claramente dentro del margen propuesto por Malhotra (2004) donde se deberían encontrar las estimaciones con el esclerómetro. El error máximo se da puntualmente en el cilindro tres de mezcla de columnas, donde se tiene un 32% de error, el cual sí se sale del parámetro comentado; no obstante, es el único entre todos los cilindros ensayados que presenta un porcentaje de error mayor de 25 %. Al ser un error puntual, este se puede asociar a fallos propiamente de carácter humano, como lo sería la confección o inclusive el transporte.

De igual forma este resultado era esperado si se toma en consideración el análisis realizado en la Sección 5.1, donde se observó que en el ensayo uno del fabricante A se obtuvieron resultados de resistencias menores que el promedio.

A manera de contraste, en la figura 25 se muestran los porcentajes de error del ensayo dos del fabricante B, ya que en este fue donde se obtuvo los menores porcentajes de error con respecto al valor real.

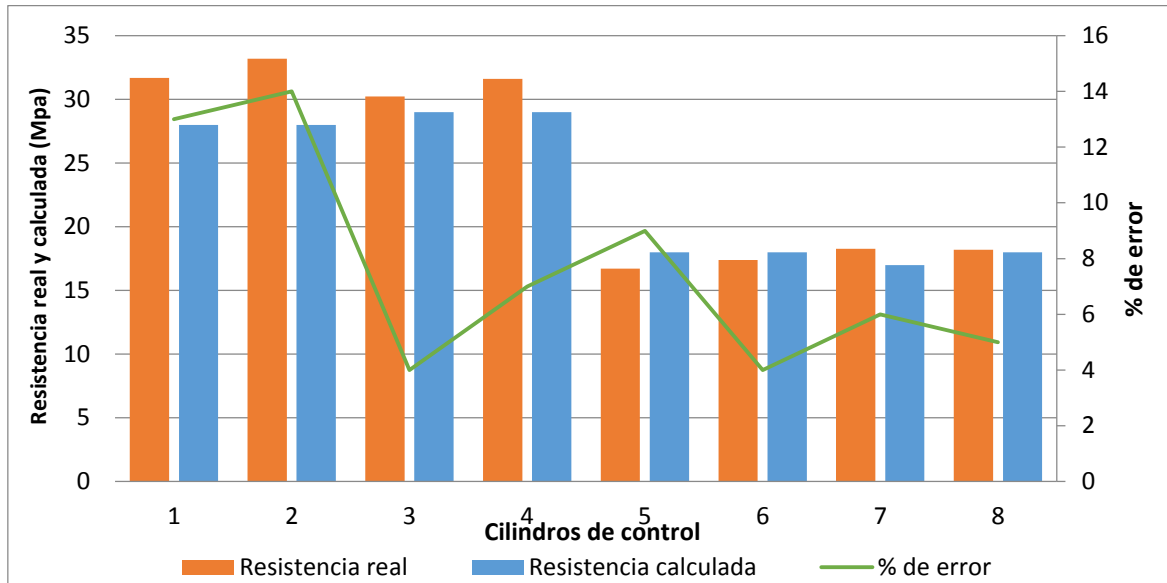


Figura 25.Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 2 Fabricante B

Se observa de la figura anterior que todas las estimaciones presentan valores cercanos al real, siendo el mayor porcentaje de error un 14 %, que está asociado a una diferencia de 5 MPa entre el valor real y el calculado, esto para el cilindro dos, que como se mencionó previamente, corresponde a la mezcla de columnas.

Si se toma en consideración un promedio del porcentaje de error para cada ensayo completo, que incluye las columnas y baldosas, se tiene que para el ensayo 1 y 2 del fabricante A los porcentajes de error son de 14 % y 10 % respectivamente; para el fabricante B estos corresponden a 10 % y 8 %. De acuerdo con estos porcentajes se considera que la estimación es satisfactoria.

5.3 Medidor de velocidad de onda por ultrasonido

Al igual que para el esclerómetro, la humedad, que es un factor que puede llegar a influir en gran medida las lecturas de velocidad de onda proporcionadas por el instrumento, fue controlada gracias a las condiciones de laboratorio en que se llevaron a cabo los ensayos. Es importante mencionar que las características propias de las mezclas de cada fabricante se desconocen por ser estas propiedades intelectuales de cada una. Adicionalmente es de notar que la longitud de trayectoria utilizada en todas las mediciones fue de 150 mm, que es recomendada dado el tipo de agregado presente para estos elementos.

Como se pudo apreciar de la sección 4, las mediciones de velocidad de onda tanto para columnas como para baldosas, varían en un rango entre 2500 m/s y 2900 m/s para el transductor de 54 kHz y de 3600 m/s a 4000 m/s para el transductor de 150 kHz, valores que igualmente son semejantes entre ambos fabricantes, lo anterior permite interpretar que alguna o ambas variables puede que no tengan una influencia considerable en el modelo de regresión que se plantea más adelante.

Con estas consideraciones se procede a llevar a cabo las correlaciones con los valores reales de resistencia en compresión en los cilindros de cada mezcla, mediante el método de regresión lineal. Al igual que con el esclerómetro, se incluyó las variables correspondientes al tipo de elemento, así como el fabricante, que se le asocian a cada resultado obtenido del valor real de resistencia obtenido de los cilindros de control. Esto se puede apreciar claramente en el cuadro A2 de la sección de anexos. Se presentan en el cuadro 61 y 62 los resultados de la regresión utilizando todas las variables.

Cuadro 61. Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,916
Coefficiente de determinación R²	0,839
R² ajustado	0,828
Error típico	2,692

Cuadro 62. Estadísticas de la regresión para cada variable

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-99,463	17,9583	-5,539	7,43E-07
54 kHz	-0,015	0,0053	-2,869	0,0057
150 kHz	0,042	0,0045	9,460	1,97E-13
Elemento	2,849	0,8286	3,439	0,0011
Fabricante	0,315	1,0691	0,295	0,7690

El análisis para estas variables se lleva a cabo similarmente al del esclerómetro, donde se puede apreciar por los valores de la columna de probabilidad, que la variable correspondiente al transductor del 150 kHz tiene un mayor impacto en el modelo que el de 54 kHz; adicionalmente y como era de esperarse, por lo mencionado previamente, el fabricante es el que tiene menor significancia en el modelo, lo cual implica que los resultados se ven más afectados por el tipo de elemento a ser analizado que por el fabricante.

Debido a que en la práctica, o sea en campo, la idea sería utilizar únicamente un transductor para obtener los resultados correspondientes, se decide llevar a cabo una nueva regresión pero con los resultados del transductor de 150 kHz, que como se mencionó anteriormente, es el que presenta mayor confiabilidad en el modelo. En el cuadro 63 y 64 se muestran los resultados estadísticos de la regresión.

Cuadro 63. Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,904
Coefficiente de determinación R²	0,817
R² ajustado	0,807
Error típico	2,850

Cuadro 64. Estadísticas de la regresión para cada variable

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	-123,034	16,903	-7,279	8,36E-10
150 kHz	0,038	0,004	8,520	6,38E-12
Elemento	2,795	0,877	3,187	0,0023
Fabricante	-0,317	1,107	-0,286	0,7757

De los resultados mostrados en los cuadros 63 y 64, se puede apreciar que el valor de R² disminuye levemente en comparación con el modelo donde se incluye el otro transductor, no

obstante, esta pérdida leve se compensa con la practicidad ganada a la hora de llevar a cabo el ensayo.

A partir de los parámetros mostrados en el Cuadro 64 se establece la Ecuación 5-2 de la regresión:

$$f_{ck} = -123,03 + 0,038 U + 2,795 \beta_1 - 0,317 \beta_2 \quad [5-2]$$

Donde

- f_{ck} resistencia en compresión.
- U valor de velocidad obtenida con el ultrasonido con transductor de 150 kHz.
- β_1 variable binaria correspondiente al elemento, 1 para columna y 0 para baldosa.
- β_2 variable binaria correspondiente al fabricante, 1 para Fabricante A y 0 Fabricante B.

Con esta ecuación se procede a calcular el valor estimado de resistencia para cada uno de los valores de ultrasonido. En la figura 26 se muestra el gráfico de resistencia real contra valor estimado para que se observe la línea de mejor ajuste a 45°, que se asocia a una correlación apropiada de los datos.

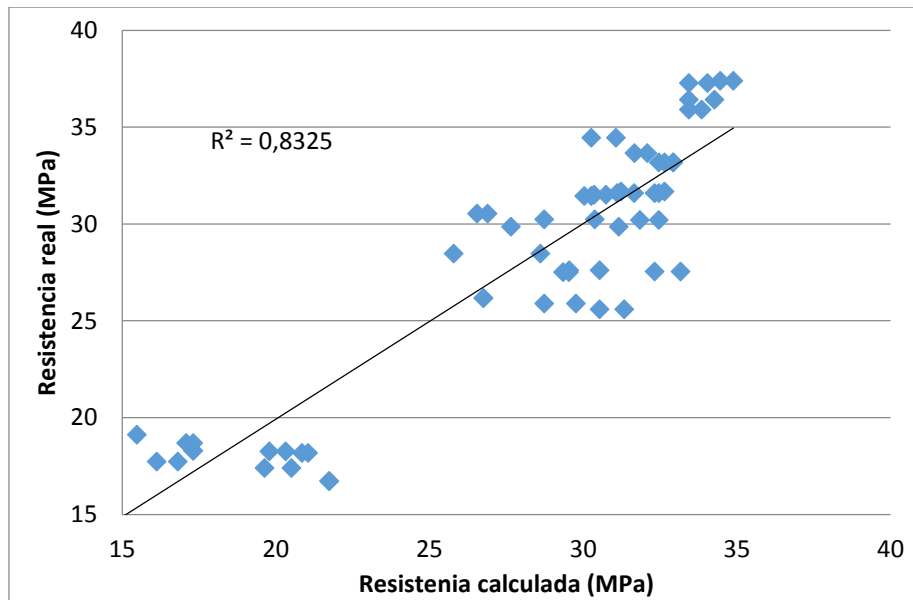


Figura 26. Gráfico de resistencia real contra resistencia calculada

De acuerdo con Malhotra, para este instrumento se pueden encontrar porcentajes de error entre 10 % para concretos con características conocidas y 100 % para concretos desconocidos. Considerando este aspecto, se procede a calcular los porcentajes de error para

todos los valores estimados con la ecuación obtenida del modelo de regresión. Para ejemplificar los resultados, se presentan en la figura 27 los porcentajes de error para el ensayo uno del fabricante A.

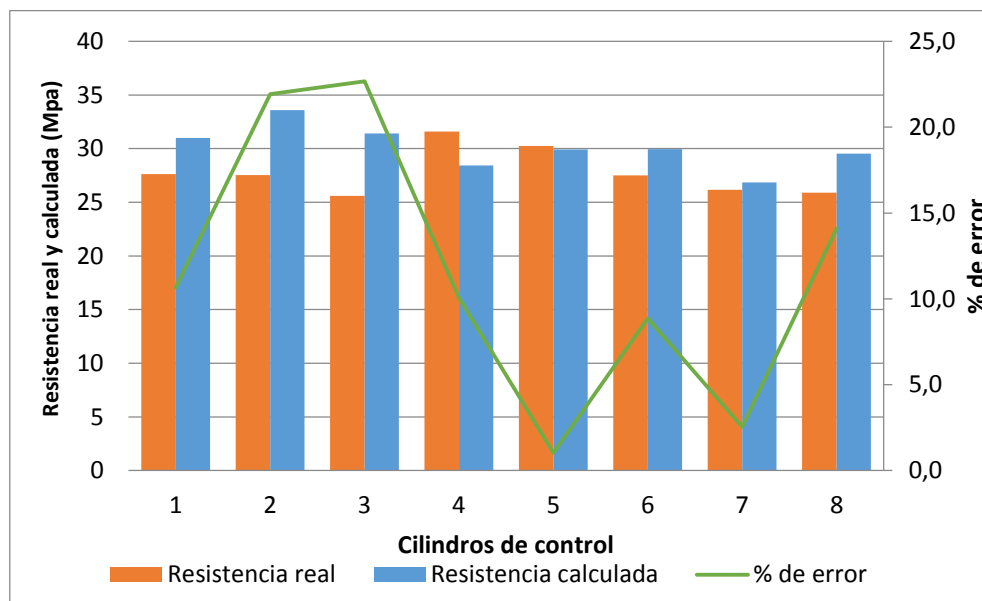


Figura 27. Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 1 Fabricante A

Se muestran los resultados de este ensayo debido a que fue donde se encontraron los mayores porcentajes de error respecto a la medición real, lo cual, como es de esperar, coincide con lo expuesto en la sección anterior para los resultados del esclerómetro. En este caso, se tiene que el error promedio de las estimaciones es de 11,5 %, con un error máximo de 22,7 % para el cilindro tres, que igualmente coincide con el cilindro que presentó mayor porcentaje de error en los resultados del esclerómetro, el cual, como se mencionó previamente, corresponde a la mezcla de columnas. Se puede apreciar que en la mezcla de baldosas se tienen porcentajes más bajos, siendo el mínimo de 1 % en el caso del cilindro cinco.

En la figura 28 se presentan las resistencias estimadas y los respectivos porcentajes de error correspondientes al ensayo uno del fabricante B, que es el caso donde se presentaron los menores porcentajes de error.

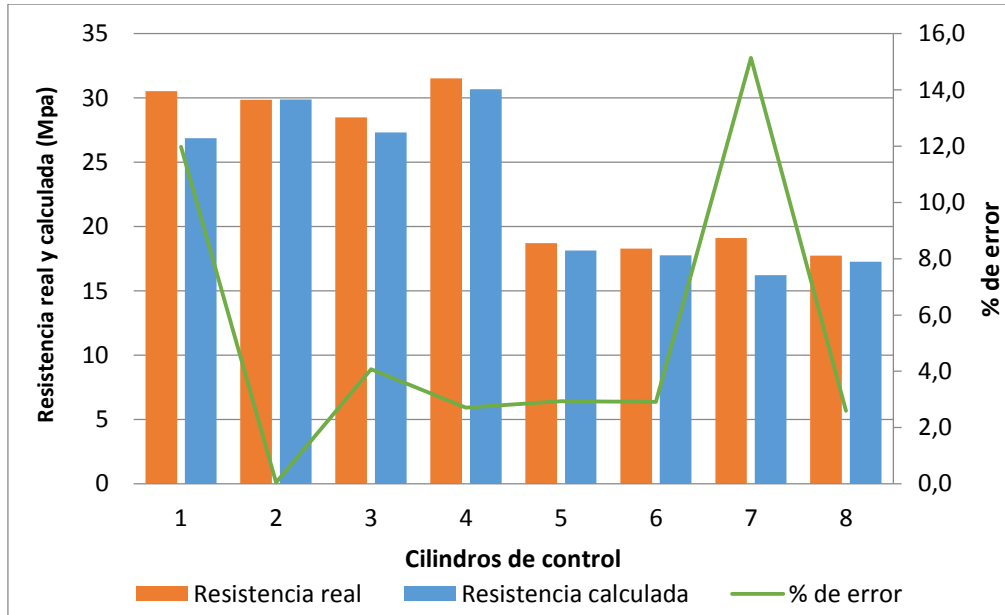


Figura 28. Resistencias calculadas con sus % de error respectivos – Ensayo 1 Fabricante B

Para el caso mostrado en la figura 28, se tiene un porcentaje de error promedio de las estimaciones de 5,3 %, con un máximo de 15 % en el caso del cilindro siete de la mezcla de las baldosas y un mínimo de 0 % para el cilindro dos de la mezcla de columnas.

Contando con el contraste entre el mejor y el peor ensayo en cuanto a porcentajes de error, se puede decir que se obtienen resultados satisfactorios con la ecuación obtenida del modelo de regresión, ya que se tiene una dispersión relativamente baja en las estimaciones individuales de cada espécimen.

5.4 Medidor de resistividad eléctrica

Las mediciones con este instrumento se llevaron a cabo en los elementos en una condición seca, ya que estos llevaban aproximadamente un mes de haber sido elaborados y fueron ubicados en lugares abiertos mientras llegaba el día de falla, lo cual es un aspecto a considerar dado que la humedad es una variable que tiene relación directa con las mediciones hechas con este instrumento.

A diferencia de los instrumentos presentados previamente, los resultados del medidor de resistividad no se plantean para estimar la resistencia en compresión del concreto, ya que como se mencionó previamente en la Sección 3.1.3, estos sirven principalmente como

indicadores de la velocidad de corrosión. Es por estas razones que no se plantea un modelo de estimación a partir de la regresión lineal de los datos.

Para este caso lo que se busca es, mediante el análisis de los resultados mostrados en la Sección 4, revisar en que rango se encuentran estos con respecto a los valores establecidos en el cuadro 6, donde se puede apreciar que a pesar de ser autores diferentes, se tiene una tendencia similar en cuanto a los rangos de clasificación.

En la figura 29 se muestra un gráfico de resultados promedio, donde se presentan los resultados para cada ensayo con la diferenciación entre columnas y baldosas para cada fabricante.

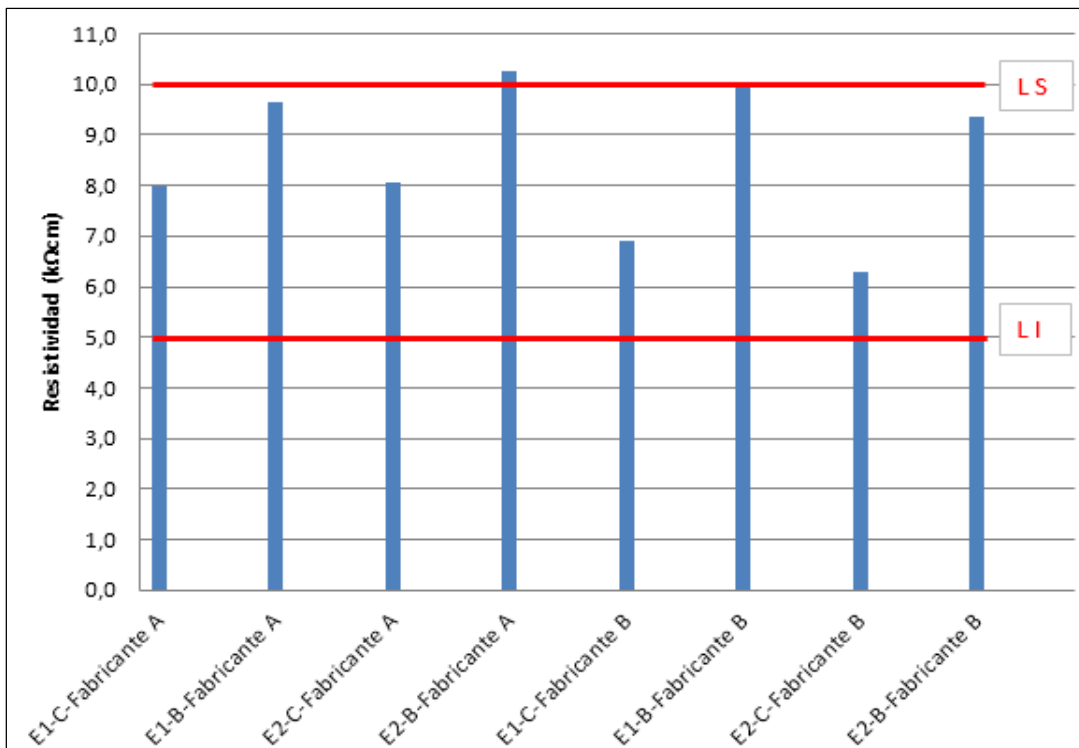


Figura 29. Resultados promedio de resistividad para cada ensayo

De la figura 29 se puede apreciar que la mayor parte de los resultados, tanto para columnas como para baldosas de ambos fabricantes, se encuentra en el rango de 5 k·Ω·cm a 10 k·Ω·cm, donde solo las baldosas del segundo ensayo del fabricante A y las baldosas del primer ensayo del fabricante B tiene en promedio un valor igual o mayor que 10 k·Ω·cm. A partir de estos valores y considerando la clasificación del cuadro 6, estos elementos se encuentran en el rango de velocidad de corrosión probable.

No obstante, esta interpretación no es correcta debido a que los elementos no presentan una condición de corrosión activa, por lo que no se pueden asociar a una velocidad de corrosión probable. Tomando en consideración esta contradicción, se decide conservadoramente que estos resultados no presentan una interpretación física coherente para el presente trabajo.

5.5 Detector de metales

Como se mencionó en secciones anteriores, el empleo de este instrumento tiene como fin identificar la ubicación, así como determinar el diámetro y recubrimiento de la armadura de acero en los elementos prefabricados. Al tener la resistencia del concreto y las variables anteriores, se puede estimar a resistencia teórica en flexión de los elementos.

Las mediciones se realizaron de acuerdo con lo descrito en la Sección 4.5, de donde se obtuvo los resultados expuestos en los Cuadros 56 y 57, a partir de estos datos se procede a realizar una comparación con los valores reales obtenidos al cortar los elementos luego de haber sido fallados y con las especificaciones técnicas correspondientes al recubrimiento y diámetro, las cuales se presentan en el cuadro 65.

Cuadro 65. Especificaciones técnicas para la armadura de acero

Diámetro varilla de baldosas	4,11 mm
Diámetro varilla de columnas:	6,35 mm
Recubrimiento varilla baldosas:	16 mm tolerancia de ± 3 mm
Recubrimiento varilla columnas:	16 mm tolerancia de ± 3 mm

Utilizando los valores del Cuadro 65 como base comparativa para el recubrimiento, tanto para las columnas como para las baldosas, se determina el porcentaje de error a partir de los resultados obtenidos con el detector de metales y los valores reales. En la figura 30 se presentan gráficamente los resultados obtenidos para las columnas.

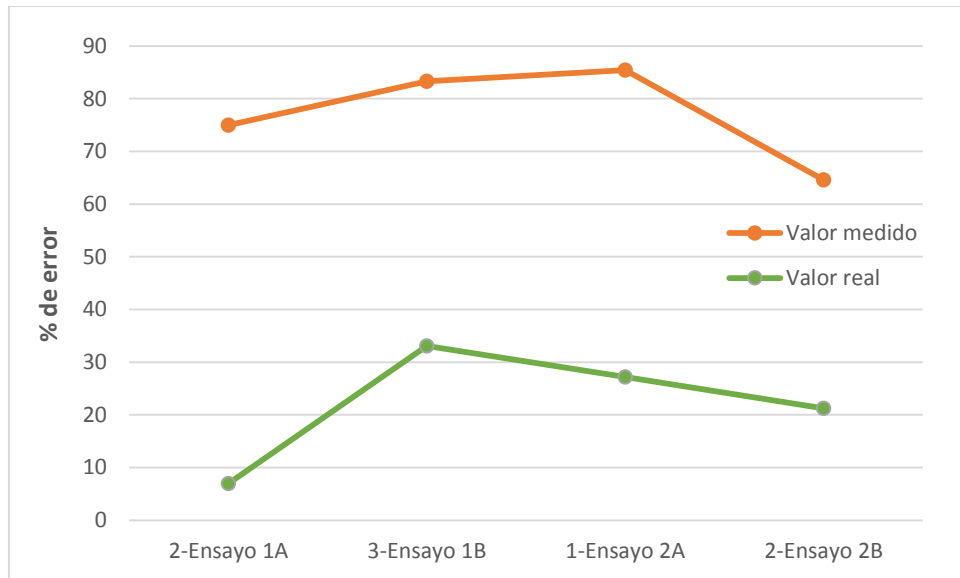


Figura 30. Porcentajes de error de recubrimiento en columnas

De la figura 30 se puede apreciar que los porcentajes de error del recubrimiento medido con el detector son en promedio de 77 %, mientras que el error promedio de las mediciones reales con respecto a la especificación es de 22 %.

En la figura 31 se muestran los resultados obtenidos para el porcentaje de error con respecto al recubrimiento en las baldosas.

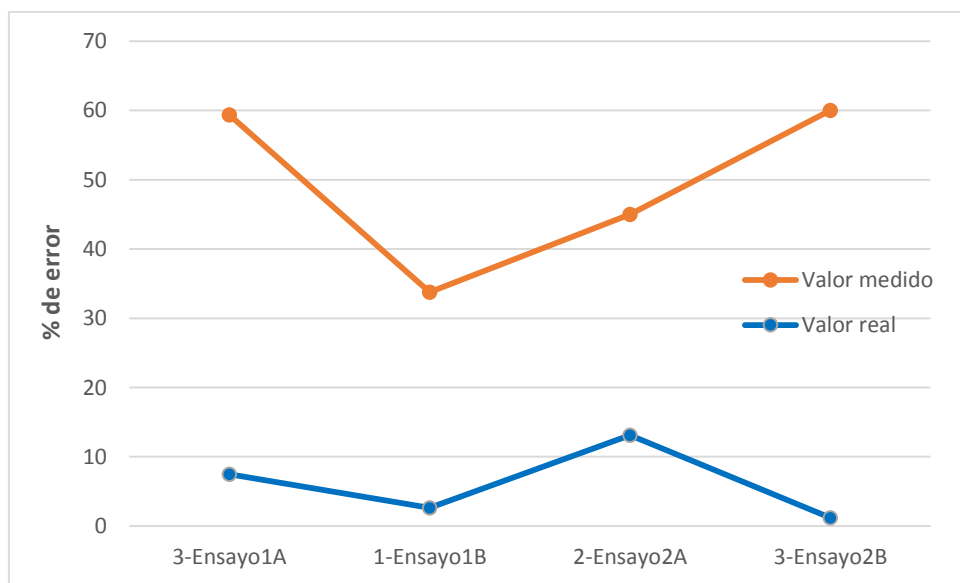


Figura 31. Porcentajes de error de recubrimiento en baldosas

Con respecto a las baldosas, en la figura 31 se observa que el porcentaje de error promedio de las mediciones realizadas con el detector de metales es de 50 %, mientras que para las mediciones reales el error promedio es de 6 %.

A partir de los resultados mostrados y de acuerdo con los porcentajes de error obtenidos, si bien es cierto que para las baldosas se obtienen valores menores de porcentaje de error en comparación con las columnas; queda claro que este instrumento no debe ser empleado para determinar los valores de recubrimiento de este tipo de elementos, esto debido a sus características particulares.

Es importante mencionar que, a pesar de que los resultados del porcentaje de error de los valores reales son menores a los medidos con el detector; estos igual presentan una variabilidad notable, especialmente en el caso de las columnas (ver figura 30), lo cual puede estar asociado directamente al proceso de confección.

Para la elaboración de las columnas, se colocan cuatro varillas, sostenidas en puntos específicos en las esquinas, dentro de un molde metálico, donde posteriormente se deposita el concreto; el proceso de colocación de concreto se lleva a cabo mientras se vibra mecánicamente el molde para el correcto acomodo del concreto. No obstante, al ser elementos esbeltos y las varillas de un diámetro pequeño; este proceso de vibrado afecta el acomodo interno de las varillas, generando así esta dispersión en el recubrimiento.

La elaboración de las baldosas lleva un proceso idéntico al de las columnas, pero al ser estas de menor tamaño y con una malla electro soldada, no se ven tan afectadas por el proceso vibratorio, lo cual se evidencia en la figura 31.

En cuanto a las mediciones del diámetro del refuerzo, para el caso de las columnas se obtiene un porcentaje de error promedio de 4,3 %, lo cual podría indicar que el tipo de sensor inductivo utilizado sí permite determinar el diámetro, sin embargo, dado el alto porcentaje de error del recubrimiento medido con el detector, así como la variabilidad en las mediciones reales, no se puede afirmar que ese porcentaje de error en el diámetro sea constante en todas las varillas de cada elemento, por lo que igual no se considera confiable para este tipo de mediciones.

Para las mediciones con las baldosas se tiene una situación particular con respecto al diámetro de las varillas, ya que el instrumento permite determinar un diámetro mínimo de 5 mm, y como se puede apreciar del Cuadro 65, el diámetro de las varillas en baldosas es de 4 mm, lo cual descarta la posibilidad de utilizar el instrumento para determinar el diámetro en estos elementos.

Si bien es cierto que el instrumento no resulta confiable para las mediciones de diámetro y recubrimiento en este tipo de elementos; este sí fue sumamente útil para determinar la ubicación de las varillas en las baldosas, como se muestra en la figura 22. El poder definir correctamente la ubicación del refuerzo es de gran ayuda ya que sirve como complemento para emplear los otros ensayos no destructivos, debido a que como se menciona en la Sección 2.1, de no conocer esta ubicación, se puede incurrir en el error de realizar mediciones sobre el refuerzo, lo cual afectaría los resultados obtenidos.

5.6 Resistencia a la flexión

5.6.1 Valores reales

Todas las pruebas de resistencia a la flexión realizadas en los elementos prefabricados se llevaron a cabo a los 28 días de edad y se realizaron según los procedimientos de falla establecidos en la norma INTE C133-2017, los cuales se encuentran descritos de forma resumida en la Sección 3.2.2 y 3.2.3.

En la norma INTE C131-2017, Sección 5, se exponen los requisitos mínimos de resistencia en flexión que deben cumplir los elementos prefabricados de concreto, donde se muestra que para las columnas, el momento mínimo requerido es de 3000 N·m y para las baldosas es de 1000 N·m/m. Adicionalmente, las columnas deben cumplir con una rigidez elástica mínima que permita alcanzar un desplazamiento menor de 10 mm al aplicar una carga de 800 N y la relación entre el momento máximo soportado por la columna y su respectivo momento de agrietamiento debe ser mayor de 1,2.

Como se puede apreciar de las Secciones 4.1.2, 4.2.2, 4.3.2 y 4.4.2, todas las baldosas cumplieron con la especificación de la resistencia mínima a la flexión. De igual forma todas las columnas cumplieron con los requisitos mínimos establecidos para la resistencia en flexión. No obstante, la columna uno del primer ensayo del Fabricante A no cumple el

requisito de desplazamiento mínimo, ya que para cuando se aplica la carga de 800 N, ésta se desplaza 14,3 mm. De acuerdo con la norma, el no cumplir con este requisito es una no conformidad crítica

En el cuadro 66 se muestra un resumen de los promedios obtenidos en cada ensayo para cada fabricante.

Cuadro 66. Resumen de momento máximo resistido por los elementos

Resultados		Columnas (N·m)	Baldosas (N·m/m)
Fabricante A	Ensayo 1	4957	1309
	Ensayo 2	5731	1384
Fabricante B	Ensayo 1	6125	1335
	Ensayo 2	5339	1368

Como se puede apreciar del cuadro 66, todos los resultados de resistencia están por encima del criterio mínimo establecido. Sin embargo, como era de esperarse, los resultados del ensayo 1 del Fabricante A están por debajo del promedio, lo cual va de la mano con los resultados expuestos en el Cuadro 58 para la falla de los cilindros correspondientes a este mismo ensayo, así como con los resultados expuestos para el ultrasonido y el esclerómetro, donde fue este mismo ensayo el que presentó los resultados de resistencia más bajos.

5.6.2 Valores estimados

En esta sección la idea general es comparar los resultados obtenidos en la sección anterior (resultados de capacidad en flexión reales) con los valores obtenidos mediante una estimación teórica, para de esta manera determinar qué tan confiables son los resultados obtenidos para la resistencia de concreto cuando se utilizan para determinar la capacidad en flexión de los elementos. Si bien es cierto que no se pudo determinar el recubrimiento y el diámetro del refuerzo con el detector, igual se re

Para este análisis, como se menciona previamente, se utilizan las estimaciones de la resistencia del concreto obtenidas al emplear las ecuaciones 5-1 y 5-2. Para el diámetro de varilla se utiliza el especificado por los fabricantes, mientras que para el recubrimiento se utilizan los valores reales; esto debido a que, como se expuso en la sección 5.5, los resultados del detector de metales presentan altos porcentajes de error, especialmente en las columnas. Este procedimiento se lleva a cabo tomando como base el hecho de que los elementos prefabricados de este tipo son relativamente estándar y con dimensiones

definidas, por lo que se decide realizar los cálculos a pesar de que los valores obtenidos con el detector de metales no se puedan usar en la práctica.

En la figura 32 se muestran los resultados obtenidos para la estimación de la capacidad en flexión de las columnas prefabricadas, con su respectivo porcentaje de error en comparación con el valor real.

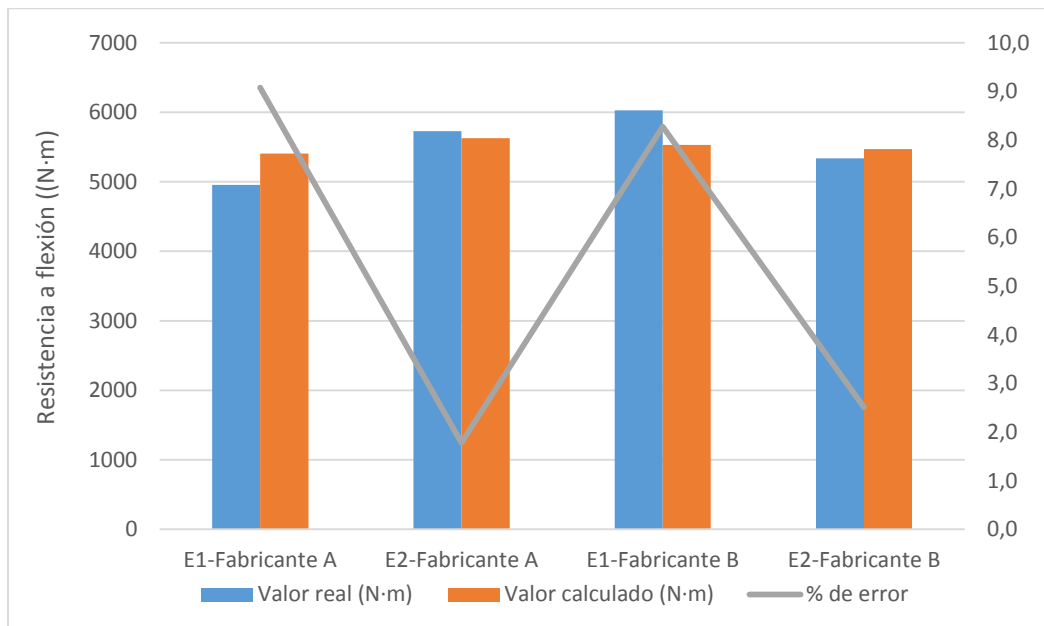


Figura 32. Estimación de capacidad en flexión para columnas con su % de error respectivo para cada ensayo

De la figura 32 se puede apreciar que los porcentajes de error que se obtienen en comparación con el valor real son relativamente bajos, siendo el máximo un 9 % para el ensayo uno del fabricante A y un mínimo de 2 % para el ensayo dos del fabricante A.

Para las baldosas, en la figura 33, se muestran los resultados obtenidos para la estimación de su capacidad en flexión, con su respectivo porcentaje de error en comparación con el valor real.

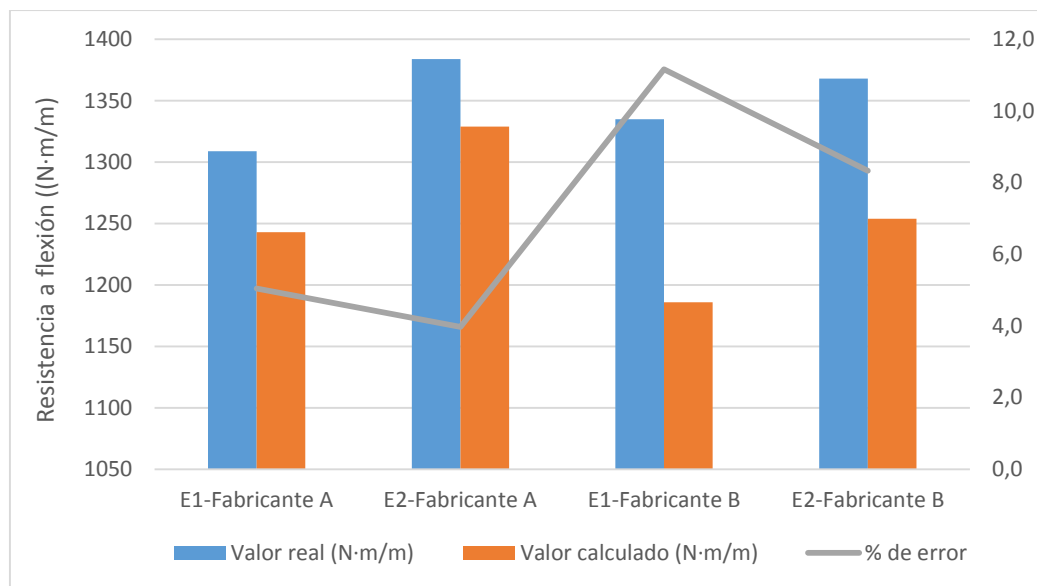


Figura 33. Estimación de capacidad en flexión para baldosas con su % de error respectivo para cada ensayo

En la figura 32 se muestra que, al igual que con las columnas, los porcentajes de error que se obtienen en comparación con el valor real son relativamente bajos, siendo el máximo un 11 % para el ensayo uno del fabricante B y un mínimo de 4 % para el ensayo dos del fabricante A.

Un aspecto importante a notar en las figuras 32 y 33, es la variabilidad presente en los resultados obtenidos, ya que si bien es cierto que, tanto para las columnas como para las baldosas, los porcentajes de error son relativamente bajos, estos resultados pueden no ser confiables.

Esta variabilidad surge principalmente de un aspecto discutido en la sección 5.5, que corresponde al recubrimiento de los elementos, el cual, como se mostró en las figuras 30 y 31, presenta igualmente variabilidad en cada ensayo. Esto es debido a que como se está evaluando la capacidad en flexión de los elementos, un aspecto como la resistencia del concreto no es tan influyente como lo son el diámetro del refuerzo o la configuración geométrica.

Es por esto que, aunque se obtuvieron buenos resultados en cuanto al porcentaje de error, no se puede asegurar que estos valores vayan a permanecer constante para todo el elemento, ya que el recubrimiento varía de manera relativamente constante a lo largo de los elementos.

6. Conclusiones

- Los resultados obtenidos para la resistencia del concreto haciendo uso de la ecuación producto de la regresión lineal para el esclerómetro, generan en promedio porcentajes de error de 14 % y 10 % respectivamente para los ensayos uno y dos del fabricante A, mientras que para el fabricante B son de 10 % y 8 %. Estos resultados se encuentran por debajo del 25 % mencionado por Malhotra (2004). Los resultados con un mayor porcentaje de error corresponden a los cilindros asociados a la mezcla de columnas del primer ensayo del Fabricante A, donde se observa el porcentaje de error máximo promedio de 32 %, el cual corresponde al cilindro tres, por lo que se puede considerar como un caso puntual donde cabe la posibilidad de que el error humano estuviera involucrado en la confección inadecuada o problemas de transporte, lo cual pudo tener un efecto negativo en ese cilindro en particular.
- El modelo para la estimación de la resistencia en compresión del concreto a partir del valor Q , el tipo de fabricante y el tipo de elemento, es confiable para los casos específicos evaluados, correspondientes a las columnas y baldosas de los fabricantes A y B; esto de acuerdo a la revisión estadística de los porcentajes de error de cada muestra. Se debe tomar en consideración que los ensayos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio.
- Para las estimaciones obtenidas mediante el empleo del modelo producto de la regresión lineal para los datos del ultrasonido, se obtuvo en promedio porcentajes de error de 12 % y 6 % respectivamente para los ensayos uno y dos del fabricante A, mientras que para el fabricante B son de 5 % y 7 %, donde al igual que con los resultados del esclerómetro, el error máximo se presenta en la mezcla para columnas del primer ensayo del Fabricante A, específicamente en el cilindro tres.
- A partir de los porcentajes de error y los valores estadísticos obtenidos, se considera que el modelo generado a partir de la regresión lineal para el ultrasonido es confiable para la estimación de la resistencia a compresión del concreto, esto para las columnas y baldosas procedentes de los fabricantes A y B.
- De acuerdo con lo discutido en la sección 5.4, correspondiente a los resultados obtenidos con el medidor de resistividad, para efectos del presente trabajo se

concluye que los resultados, debido a la que no hay corrosión activa en los elementos, no presentan una interpretación física coherente.

- Con el detector de metales, los resultados no se consideran satisfactorios, esto a pesar de que para las columnas sí se obtuvieron diámetros similares al especificado; sin embargo, los valores de diámetro de varilla y el recubrimiento en ambos elementos presentaron porcentajes de error altos en comparación con la especificación y el valor real. No obstante, se demuestra que el equipo sí permite determinar con certeza la ubicación del acero de refuerzo, lo cual permite que se utilice como complemento para el empleo de otros ensayos no destructivos.
- De acuerdo los resultados obtenidos con la estimación teórica de la capacidad en flexión de los elementos, se concluye que, a pesar de haber obtenido porcentajes de error relativamente bajos, no son completamente confiables debido a la variabilidad interna del recubrimiento de los elementos.

7. Recomendaciones

- Como se mencionó previamente, el esclerómetro se puede utilizar satisfactoriamente para estimar la resistencia en compresión para los fabricantes analizados. En caso de que se desee emplear la ecuación para predicción de resistencia planteada a otro fabricante, esta debe ser recalibrada, ya que como se pudo observar en la Sección 5.2, el tipo de fabricante tiene una influencia significativa en los resultados obtenidos.
- De igual forma, para el modelo calculado para la estimación de resistencia con el ultrasonido, si este desea emplearse para otros fabricantes u otro tipo de elemento, se debe recalibrar con una nueva serie de datos.
- Si bien es cierto que se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a porcentajes de error en comparación a los valores reales, tanto para el esclerómetro como para el ultrasonido; estos procedimientos no deben ser utilizados como único factor para aceptación de productos. Si se desea incluir un procedimiento parecido en la normativa INTECO para productos prefabricados, se deberían realizar ensayos a más fabricantes y por consiguiente a más especímenes, esto para generar una base de datos que permita evaluar mayores rangos de aplicación.
- En esta investigación se observó que el uso adecuado y sin escatimar del gel conductor es recomendable debido a que al tener un correcto acople acústico entre

los transductores y el elemento a evaluar, se obtuvieron resultados con dispersiones controladas.

- Se recomienda utilizar el detector de metales como complemento a los demás ensayos no destructivos, ya que localizar el acero de refuerzo permite que estos puntos no sean evaluados cuando se vayan a emplear los otros ensayos, en los cuales la presencia de acero puede influir negativamente en los resultados obtenidos.
- Para el detector de metales se sugiere obtener un sensor inductivo con mayor precisión, que permite determinar diámetros menores de 5 mm, ya que si se logra determinar el diámetro y recubrimiento del acero de refuerzo en estos elementos, se podría estimar el momento de falla por métodos no destructivos.
- Se recomienda para futuros trabajos, considerar fabricantes que utilicen la configuración de una sola varilla de acero en el centro de las columnas, ya que el solo tener esta varilla disminuye la variabilidad que se puede asociar al recubrimiento.

8. Referencias bibliográficas

- Asociación Española de Ensayos No Destructivos. (2017). *Ensayos No Destructivos (END)*. Madrid: AEND.
- ASTM. (2006). *ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. West Conshohocken: ASTM International.
- Barrantes, J. I. (2012). Evaluación de ensayos no destructivos en laboratorio y campo utilizados en el análisis estructural de edificaciones de concreto reforzado. Esclerómetro Schmidt y detector de acero por el método electromagnético. *Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Bungey, J., Millard, S., & Grantham, M. (2006). *Testing of concrete in structures*. Oxon, Maryland: Taylor & Francis.
- Elcometer S.A. (2017). *Medidor de cobertura de hormigón Elcometer 331*. Manchester: Elcometer.
- Gutiérrez, J. C. (1987). Revisión experimental del Sistema Prefa para paredes. *Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Helal, J., Sofi, M., & Mendis, P. (2015). Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 97-105.
- INTECO. (2017). *INTE C131:2017 Elementos prefabricados de concreto para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante el sistema de baldosas horizontales y columnas. Requisitos*. San José: INTECO.
- INTECO. (2017). *INTE C133:2017 Elementos prefabricados de concreto para la construcción de viviendas unifamiliares de un nivel, mediante el sistema de baldosas horizontales y columnas. Métodos de ensayo*. San José: INTECO.
- Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A., & Salehi, M. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. *Concrete International*, 41-46.

- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- Proceq S.A. (2016). *Operating Instructions Concrete Durability Testing Resipod*. Schwerzenbach: Proceq.
- Proceq S.A. (2016). *Operating Instructions Pundit Lab*. Schwerzenbach: Proceq.
- Proceq S.A. (2016). *Operating Instructions SilverSchmidt*. Schwerzenbach: Proceq.
- Quesada, D. (s.f.). Evaluación de ensayos no destructivos para caracterizar la resistencia del sistema prefabricado de columnas y baldosas para viviendas unifamiliares de un nivel. Medidor de permeabilidad, determinación de velocidad de onda por ultrasonido . *Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Quesada, M. G. (2005). Evaluación de la competencia estructural de los límites y recomendaciones del método de diseño simplificado del capítulo de vivienda unifamiliar del Código Sísmico de Costa Rica de 2002. *Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Salas, G. A. (1993). Calibración de equipo utilizado en pruebas no-destructivas. *Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Sivasubramanian, K., Jaya, K. P., & Neelemegam, M. (2013). Covermeter for identifying cover depth and rebar diameter in high strength concrete . *International Journal of civil and structural engineering, Volumen 3*.
- Villalobos Ramírez, F., & Alfaro Martínez, J. P. (2012). Pruebas experimentales para determinar la capacidad de columnas de concreto prefabricado. Comparación entre el método de flexión en voladizo y método de flexión con carga en los tercios. *Métodos y Materiales, Volumen 2*, Universidad de Costa Rica, Lanamme UCR.
- When, R. (1974). Non-Destructive testing of concrete. *Building Science*, 157-166.

Anexos 1. Base de datos utilizada para las regresiones lineales

Cuadro A1. Base de datos del esclerómetro Silverschmidt

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
1	27,6	35,0	1	1	31,5	14
1	27,6	38,5	1	1	33,5	21
1	27,6	34,0	1	1	31,0	12
1	27,6	39,0	1	1	33,8	22
1	27,6	40,0	1	1	34,4	25
1	27,6	39,5	1	1	34,1	24
1	27,6	39,0	1	1	33,8	22
1	27,6	39,0	1	1	33,8	22
1	27,6	41,0	1	1	34,9	27
1	27,6	38,5	1	1	33,5	21
2	27,5	37,5	1	1	32,9	20
2	27,5	38,0	1	1	33,2	21
2	27,5	36,5	1	1	32,4	18
2	27,5	42,0	1	1	35,5	29
2	27,5	35,5	1	1	31,8	16
2	27,5	41,0	1	1	34,9	27
2	27,5	38,5	1	1	33,5	22
2	27,5	35,5	1	1	31,8	16
2	27,5	41,0	1	1	34,9	27
2	27,5	39,5	1	1	34,1	24
3	25,6	37,5	1	1	32,9	29
3	25,6	39,0	1	1	33,8	32
3	25,6	36,0	1	1	32,1	25
3	25,6	38,5	1	1	33,5	31
3	25,6	41,5	1	1	35,2	38
3	25,6	39,5	1	1	34,1	33
3	25,6	39,0	1	1	33,8	32
3	25,6	41,5	1	1	35,2	38
3	25,6	38,5	1	1	33,5	31
3	25,6	37,5	1	1	32,9	29
4	31,6	37,0	1	1	32,7	3
4	31,6	38,0	1	1	33,2	5
4	31,6	38,0	1	1	33,2	5
4	31,6	38,0	1	1	33,2	5
4	31,6	38,5	1	1	33,5	6

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
4	31,6	37,0	1	1	32,7	3
4	31,6	40,0	1	1	34,4	9
4	31,6	36,5	1	1	32,4	2
4	31,6	39,0	1	1	33,8	7
4	31,6	36,0	1	1	32,1	2
5	30,2	37,5	0	1	27,8	8
5	30,2	40,5	0	1	29,5	2
5	30,2	40,0	0	1	29,2	3
5	30,2	36,5	0	1	27,2	10
5	30,2	39,0	0	1	28,6	5
5	30,2	35,5	0	1	26,6	12
5	30,2	38,0	0	1	28,1	7
5	30,2	38,5	0	1	28,4	6
5	30,2	36,0	0	1	26,9	11
5	30,2	38,5	0	1	28,4	6
6	27,5	43,0	0	1	30,9	12
6	27,5	35,5	0	1	26,6	3
6	27,5	42,0	0	1	30,3	10
6	27,5	40,0	0	1	29,2	6
6	27,5	42,5	0	1	30,6	11
6	27,5	40,0	0	1	29,2	6
6	27,5	39,0	0	1	28,6	4
6	27,5	37,0	0	1	27,5	0
6	27,5	37,5	0	1	27,8	1
6	27,5	42,5	0	1	30,6	11
7	26,2	36,5	0	1	27,2	4
7	26,2	39,5	0	1	28,9	10
7	26,2	41,0	0	1	29,8	14
7	26,2	40,0	0	1	29,2	12
7	26,2	40,0	0	1	29,2	12
7	26,2	38,5	0	1	28,4	8
7	26,2	37,5	0	1	27,8	6
7	26,2	37,5	0	1	27,8	6
7	26,2	38,5	0	1	28,4	8
7	26,2	39,5	0	1	28,9	10
8	25,9	39,0	0	1	28,6	11
8	25,9	38,5	0	1	28,4	9
8	25,9	39,0	0	1	28,6	11
8	25,9	42,0	0	1	30,3	17
8	25,9	39,5	0	1	28,9	12

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
8	25,9	37,5	0	1	27,8	7
8	25,9	39,0	0	1	28,6	11
8	25,9	39,5	0	1	28,9	12
8	25,9	41,5	0	1	30,1	16
8	25,9	39,5	0	1	28,9	12
1	35,9	42,0	1	1	35,5	1
1	35,9	44,5	1	1	36,9	3
1	35,9	42,0	1	1	35,5	1
1	35,9	41,0	1	1	34,9	3
1	35,9	39,0	1	1	33,8	6
1	35,9	39,0	1	1	33,8	6
1	35,9	41,0	1	1	34,9	3
1	35,9	38,0	1	1	33,2	7
1	35,9	40,0	1	1	34,4	4
1	35,9	40,0	1	1	34,4	4
2	37,4	43,0	1	1	36,1	4
2	37,4	43,5	1	1	36,4	3
2	37,4	42,5	1	1	35,8	4
2	37,4	40,0	1	1	34,4	8
2	37,4	42,0	1	1	35,5	5
2	37,4	41,5	1	1	35,2	6
2	37,4	39,5	1	1	34,1	9
2	37,4	38,5	1	1	33,5	10
2	37,4	41,0	1	1	34,9	7
2	37,4	39,0	1	1	33,8	10
3	37,3	40,0	1	1	34,4	8
3	37,3	38,5	1	1	33,5	10
3	37,3	37,5	1	1	32,9	12
3	37,3	37,5	1	1	32,9	12
3	37,3	39,0	1	1	33,8	9
3	37,3	39,0	1	1	33,8	9
3	37,3	39,0	1	1	33,8	9
3	37,3	40,5	1	1	34,7	7
3	37,3	40,0	1	1	34,4	8
3	37,3	37,5	1	1	32,9	12
4	36,3	39,5	1	1	34,1	6
4	36,4	40,5	1	1	34,7	5
4	36,4	42,5	1	1	35,8	2
4	36,4	38,5	1	1	33,5	8
4	36,4	41,5	1	1	35,2	3

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
4	36,4	41,0	1	1	34,9	4
4	36,4	42,0	1	1	35,5	3
4	36,4	42,0	1	1	35,5	3
4	36,4	38,5	1	1	33,5	8
4	36,4	39,5	1	1	34,1	6
5	33,7	38,5	0	1	28,4	16
5	33,7	39,5	0	1	28,9	14
5	33,7	37,5	0	1	27,8	17
5	33,7	42,5	0	1	30,6	9
5	33,7	43,5	0	1	31,2	7
5	33,7	38,0	0	1	28,1	17
5	33,7	35,5	0	1	26,6	21
5	33,7	38,5	0	1	28,4	16
5	33,7	35,5	0	1	26,6	21
5	33,7	40,0	0	1	29,2	13
6	31,5	38,0	0	1	28,1	11
6	31,5	38,0	0	1	28,1	11
6	31,5	43,0	0	1	30,9	2
6	31,5	42,0	0	1	30,3	4
6	31,5	39,0	0	1	28,6	9
6	31,5	35,5	0	1	26,6	15
6	31,5	39,0	0	1	28,6	9
6	31,5	35,0	0	1	26,4	16
6	31,5	39,5	0	1	28,9	8
6	31,5	37,5	0	1	27,8	12
7	34,5	40,0	0	1	29,2	15
7	34,5	37,0	0	1	27,5	20
7	34,5	39,5	0	1	28,9	16
7	34,5	39,0	0	1	28,6	17
7	34,5	40,5	0	1	29,5	14
7	34,5	42,5	0	1	30,6	11
7	34,5	39,5	0	1	28,9	16
7	34,5	43,0	0	1	30,9	10
7	34,5	39,0	0	1	28,6	17
7	34,5	40,0	0	1	29,2	15
8	33,2	38,5	0	1	28,4	15
8	33,2	40,5	0	1	29,5	11
8	33,2	39,5	0	1	28,9	13
8	33,2	40,5	0	1	29,5	11
8	33,2	38,0	0	1	28,1	15

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
8	33,2	37,0	0	1	27,5	17
8	33,2	41,5	0	1	30,1	9
8	33,2	41,0	0	1	29,8	10
8	33,2	39,5	0	1	28,9	13
8	33,2	42,0	0	1	30,3	9
1	30,5	46,0	1	0	30,2	1
1	30,5	45,5	1	0	29,9	2
1	30,5	50,0	1	0	32,5	6
1	30,5	45,0	1	0	29,7	3
1	30,5	46,0	1	0	30,2	1
1	30,5	43,0	1	0	28,5	7
1	30,5	47,0	1	0	30,8	1
1	30,5	46,0	1	0	30,2	1
1	30,5	48,0	1	0	31,4	3
1	30,5	43,5	1	0	28,8	6
2	29,9	44,5	1	0	29,4	2
2	29,9	46,0	1	0	30,2	1
2	29,9	44,0	1	0	29,1	3
2	29,9	40,0	1	0	26,8	10
2	29,9	46,0	1	0	30,2	1
2	29,9	49,0	1	0	31,9	7
2	29,9	46,0	1	0	30,2	1
2	29,9	44,5	1	0	29,4	2
2	29,9	44,5	1	0	29,4	2
2	29,9	48,5	1	0	31,7	6
3	28,5	40,5	1	0	27,1	5
3	28,5	45,5	1	0	29,9	5
3	28,5	46,5	1	0	30,5	7
3	28,5	42,0	1	0	27,9	2
3	28,5	42,0	1	0	27,9	2
3	28,5	42,0	1	0	27,9	2
3	28,5	43,5	1	0	28,8	1
3	28,5	46,5	1	0	30,5	7
3	28,5	46,5	1	0	30,5	7
3	28,5	47,0	1	0	30,8	8
4	31,5	47,5	1	0	31,1	1
4	31,5	47,5	1	0	31,1	1
4	31,5	44,0	1	0	29,1	8
4	31,5	50,5	1	0	32,8	4
4	31,5	45,0	1	0	29,7	6

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
4	31,5	43,0	1	0	28,5	10
4	31,5	48,5	1	0	31,7	0
4	31,5	46,5	1	0	30,5	3
4	31,5	46,5	1	0	30,5	3
4	31,5	50,0	1	0	32,5	3
5	18,7	39,0	0	0	21,1	13
5	18,7	37,5	0	0	20,2	8
5	18,7	41,5	0	0	22,5	20
5	18,7	41,5	0	0	22,5	20
5	18,7	43,0	0	0	23,3	25
5	18,7	37,0	0	0	19,9	7
5	18,7	38,5	0	0	20,8	11
5	18,7	43,0	0	0	23,3	25
5	18,7	39,0	0	0	21,1	13
5	18,7	40,0	0	0	21,6	16
6	18,3	39,0	0	0	21,1	15
6	18,3	36,0	0	0	19,4	6
6	18,3	42,0	0	0	22,8	25
6	18,3	35,0	0	0	18,8	3
6	18,3	36,5	0	0	19,6	7
6	18,3	39,5	0	0	21,4	17
6	18,3	43,0	0	0	23,3	28
6	18,3	42,0	0	0	22,8	25
6	18,3	40,0	0	0	21,6	18
6	18,3	37,0	0	0	19,9	9
7	19,1	38,5	0	0	20,8	9
7	19,1	41,5	0	0	22,5	18
7	19,1	41,0	0	0	22,2	16
7	19,1	44,5	0	0	24,2	27
7	19,1	43,0	0	0	23,3	22
7	19,1	40,0	0	0	21,6	13
7	19,1	41,5	0	0	22,5	18
7	19,1	40,5	0	0	21,9	15
7	19,1	40,5	0	0	21,9	15
7	19,1	41,5	0	0	22,5	18
8	17,7	36,5	0	0	19,6	11
8	17,7	39,0	0	0	21,1	19
8	17,7	42,5	0	0	23,1	30
8	17,7	38,0	0	0	20,5	16
8	17,7	40,0	0	0	21,6	22

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
8	17,7	38,0	0	0	20,5	16
8	17,7	38,5	0	0	20,8	17
8	17,7	37,0	0	0	19,9	12
8	17,7	39,0	0	0	21,1	19
8	17,7	41,0	0	0	22,2	25
1	31,7	43,0	1	0	28,5	10
1	31,7	40,5	1	0	27,1	14
1	31,7	39,5	1	0	26,5	16
1	31,7	40,0	1	0	26,8	15
1	31,7	43,5	1	0	28,8	9
1	31,7	42,5	1	0	28,2	11
1	31,7	39,0	1	0	26,2	17
1	31,7	41,5	1	0	27,7	13
1	31,7	45,0	1	0	29,7	6
1	31,7	40,5	1	0	27,1	14
2	33,2	42,5	1	0	28,2	15
2	33,2	42,0	1	0	27,9	16
2	33,2	45,5	1	0	29,9	10
2	33,2	40,0	1	0	26,8	19
2	33,2	44,0	1	0	29,1	12
2	33,2	42,0	1	0	27,9	16
2	33,2	44,5	1	0	29,4	11
2	33,2	41,0	1	0	27,4	17
2	33,2	44,5	1	0	29,4	11
2	33,2	42,5	1	0	28,2	15
3	30,2	43,0	1	0	28,5	6
3	30,2	44,5	1	0	29,4	3
3	30,2	43,0	1	0	28,5	6
3	30,2	46,0	1	0	30,2	0
3	30,2	45,0	1	0	29,7	2
3	30,2	40,0	1	0	26,8	11
3	30,2	45,5	1	0	29,9	1
3	30,2	45,5	1	0	29,9	1
3	30,2	45,0	1	0	29,7	2
3	30,2	40,5	1	0	27,1	10
4	31,6	43,5	1	0	28,8	9
4	31,6	46,5	1	0	30,5	3
4	31,6	45,0	1	0	29,7	6
4	31,6	45,0	1	0	29,7	6
4	31,6	43,5	1	0	28,8	9

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
4	31,6	46,0	1	0	30,2	4
4	31,6	44,5	1	0	29,4	7
4	31,6	45,5	1	0	29,9	5
4	31,6	42,5	1	0	28,2	11
4	31,6	44,5	1	0	29,4	7
5	16,7	34,5	0	0	18,5	11
5	16,7	33,5	0	0	17,9	7
5	16,7	35,0	0	0	18,8	12
5	16,7	33,5	0	0	17,9	7
5	16,7	34,0	0	0	18,2	9
5	16,7	33,0	0	0	17,6	6
5	16,7	36,5	0	0	19,6	17
5	16,7	31,5	0	0	16,8	0
5	16,7	35,0	0	0	18,8	12
5	16,7	33,5	0	0	17,9	7
6	17,4	35,0	0	0	18,8	8
6	17,4	33,0	0	0	17,6	1
6	17,4	32,5	0	0	17,4	0
6	17,4	30,5	0	0	16,2	7
6	17,4	31,0	0	0	16,5	5
6	17,4	31,5	0	0	16,8	3
6	17,4	33,0	0	0	17,6	1
6	17,4	34,0	0	0	18,2	5
6	17,4	34,5	0	0	18,5	6
6	17,4	33,0	0	0	17,6	1
7	18,3	32,0	0	0	17,1	7
7	18,3	32,0	0	0	17,1	7
7	18,3	30,5	0	0	16,2	11
7	18,3	31,0	0	0	16,5	10
7	18,3	31,0	0	0	16,5	10
7	18,3	35,0	0	0	18,8	3
7	18,3	30,5	0	0	16,2	11
7	18,3	34,0	0	0	18,2	0
7	18,3	33,0	0	0	17,6	3
7	18,3	33,5	0	0	17,9	2
8	18,2	33,5	0	0	17,9	1
8	18,2	38,0	0	0	20,5	13
8	18,2	33,5	0	0	17,9	1
8	18,2	31,0	0	0	16,5	9
8	18,2	32,0	0	0	17,1	6

Cilindros	Resistencia real	Valor Q	Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
8	18,2	32,0	0	0	17,1	6
8	18,2	34,5	0	0	18,5	2
8	18,2	32,0	0	0	17,1	6
8	18,2	33,0	0	0	17,6	3
8	18,2	35,5	0	0	19,1	5

Cuadro A2. Base de datos del Ultrasonido PunditLab

Cilindros	Resistencia real	Ultrasonido		Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
		54 kHz	150 kHz				
1	27,6	2707	3937	1	1	29,5	8
1	27,6	2664	3963	1	1	31,3	14
2	27,6	2697	4010	1	1	32,8	20
2	27,6	2673	4032	1	1	34,1	24
3	25,6	2690	3963	1	1	30,9	21
3	25,6	2703	3984	1	1	31,6	24
4	31,6	2938	3978	1	1	27,8	12
4	31,6	2964	4010	1	1	28,8	9
5	30,2	2689	3989	0	1	29,3	3
5	30,2	2730	4032	0	1	30,5	1
6	27,5	2704	4005	0	1	29,7	8
6	27,5	2694	4010	0	1	30,1	10
7	26,2	2707	3937	0	1	26,8	3
7	26,2	2707	3937	0	1	26,8	3
8	25,9	2700	3989	0	1	29,1	13
8	25,9	2724	4016	0	1	29,9	16
1	35,9	2793	4050	1	1	33,1	8
1	35,9	2752	4039	1	1	33,2	7
2	37,4	2732	4066	1	1	34,7	7
2	37,4	2740	4077	1	1	35,1	6
3	37,3	2745	4039	1	1	33,3	11
3	37,3	2770	4055	1	1	33,7	10
4	36,4	2725	4039	1	1	33,6	8
4	36,4	2762	4061	1	1	34,0	7
5	33,7	2760	4066	0	1	31,6	6
5	33,7	2750	4077	0	1	32,2	4
6	31,5	2725	4029	0	1	30,5	3
6	31,5	2701	4023	0	1	30,6	3

Cilindros	Resistencia real	Ultrasonido		Elemento	Fabricante	Resistencia calculada	% de error
7	34,5	2737	4050	0	1	31,2	9
7	34,5	2752	4029	0	1	30,1	13
8	33,2	2747	4099	0	1	33,2	0
8	33,2	2767	4099	0	1	32,9	1
1	30,5	2657	3850	1	0	26,5	13
1	30,5	2625	3859	1	0	27,3	10
2	29,9	2625	3879	1	0	28,2	6
2	29,9	2657	3971	1	0	31,7	6
3	28,5	2641	3830	1	0	25,8	9
3	28,5	2653	3904	1	0	28,9	1
4	31,5	2664	3950	1	0	30,7	3
4	31,5	2681	3960	1	0	30,9	2
5	18,7	2539	3675	0	0	17,9	4
5	18,7	2531	3681	0	0	18,3	2
6	18,3	2576	3681	0	0	17,6	4
6	18,3	2563	3681	0	0	17,8	3
7	19,1	2516	3633	0	0	16,4	14
7	19,1	2506	3615	0	0	15,8	17
8	17,7	2539	3650	0	0	16,8	5
8	17,7	2541	3668	0	0	17,6	1
1	31,7	2680	3973	1	0	31,5	1
1	31,7	2661	4010	1	0	33,3	5
2	33,2	2657	4005	1	0	33,2	0
2	33,2	2678	4010	1	0	33,1	0
3	30,2	2717	3989	1	0	31,6	5
3	30,2	2700	4005	1	0	32,5	8
4	31,6	2676	4005	1	0	32,9	4
4	31,6	2671	3984	1	0	32,1	1
5	16,7	2579	3797	0	0	22,6	35
5	16,7	2559	3797	0	0	22,9	37
6	17,4	2745	3742	0	0	17,8	2
6	17,4	2747	3765	0	0	18,7	8
7	18,3	2728	3746	0	0	18,2	0
7	18,3	2747	3760	0	0	18,5	1
8	18,2	2767	3774	0	0	18,8	3