

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Evaluación del ensayo no destructivo impacto-eco para la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Sofía Vignoli Vargas

Director del proyecto de graduación:

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

HOJA DE APROBACIÓN



Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

Director



Sofía Vignoli Vargas

Estudiante



Ing. Esteban Villalobos Vega, M.Sc.

Asesor



Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA

Asesor

Fecha: 2018, mayo, 7

La suscrita, **Sofía Vignoli Vargas**, cédula 1-1585-0390, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B27206**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Evaluación del ensayo no destructivo impacto-eco para la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes**, bajo la Dirección del **Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.**, 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 mis padres, que me han acompañado en cada paso del camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, sin ellos nada de esto sería posible. Con su apoyo incondicional, amor y guía constante, me han impulsado en cada momento de mi vida y me han permitido llegar hasta aquí. A mi hermana Isabella, por todo su cariño. Esta carrera universitaria se la dedico a ellos.

Al Ing. Alejandro Navas por su guía y apoyo durante la realización de este proyecto y sus consejos profesionales. De la misma forma, agradezco al Ing. Esteban Villalobos y al Ing. Luis Carlos Meseguer quienes estuvieron siempre anuentes a ayudarme en todas las etapas del proyecto.

Al LanammeUCR como institución y a todos sus ingenieros, técnicos y personal administrativo, su colaboración fue indispensable para la realización de este trabajo y las pruebas experimentales que conllevó. Agradezco a los ingenieros de la Unidad de Puentes del LanammeUCR, quienes fueron excelentes mentores durante los tres años que trabajé como asistente.

A la empresa Puente Prefa y al Ing. Carlos Gamboa, por su colaboración en la construcción de los elementos de pruebas.

Finalmente, agradezco a mis compañeros y amigos quienes hicieron de la universidad una experiencia lindísima y me apoyaron y acompañaron durante todos estos años.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. El problema específico	1
1.1.2. Importancia	2
1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema	2
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Delimitación del problema.....	6
1.4.1. Alcance.....	6
1.4.2. Limitaciones.....	7
1.5. Metodología.....	7
Capítulo 2. Marco teórico	10
2.1. Ensayos no destructivos	10
2.2. Método de impacto-eco	10
2.2.1. Principio de funcionamiento del impacto-eco.....	11
2.2.2. Aplicaciones	14
2.2.3. Límites de detección del equipo	14
Longitud de onda mínima λ_{min}	16
2.3. Hipótesis	16
Capítulo 3. Diseño y construcción de losas de prueba.....	17
3.1. Diseño de especímenes de prueba.....	17
3.1.1. Revisión de las losas de los puentes de la Red Vial Nacional.....	17
3.1.2. Dimensiones de los especímenes de prueba.....	18
3.2. Diseño de los defectos intencionales.....	21

3.3.	Proceso constructivo	27
3.3.1.	Construcción de defectos	27
3.3.2.	Colocación de la formaleta y la armadura	29
3.3.3.	Instalación y fijación de los defectos	31
3.3.4.	Colado del concreto	34
3.3.5.	Curado del concreto y falla de cilindros.....	37
Capítulo 4.	Fase experimental y resultados.....	38
4.1.	Preparación de los elementos de prueba	38
4.2.	Ensayos de impacto-eco sobre la Losa 1	40
4.2.1.	Medición de la velocidad de onda.....	40
4.2.2.	Ubicación de los puntos de prueba.....	41
4.2.3.	Resultados obtenidos.....	41
4.3.	Ensayos de impacto-eco sobre la Losa 2	44
4.3.1.	Medición de la velocidad de onda.....	44
4.3.2.	Ubicación de los puntos de prueba.....	45
4.3.3.	Resultados obtenidos.....	45
Capítulo 5.	Análisis de Resultados.....	50
5.1.	Velocidad de onda.....	50
5.2.	Configuración de ubicación del impactor y el transductor.....	50
5.3.	Tamaño del impactor vs tamaño del defecto y profundidad	53
5.4.	Medición de espesores.....	60
5.5.	Efecto frontera.....	65
5.6.	Efecto del acero de refuerzo	68
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	72
6.1.	Conclusiones	72
6.2.	Recomendaciones	75

Referencias bibliográficas.....	78
Anexo 1. Base de datos de losas de puentes de la Red Vial Nacional	80
Anexo 2. Planos constructivos de las losas de prueba.....	86
Anexo 3. Planos as-built de las losas de prueba	91

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Límites de detección para cada diámetro de impactor del impacto-eco.....	16
Cuadro 2. Características más comunes de las losas de puentes de la Red Vial Nacional	18
Cuadro 3. Características de los vacíos y delaminaciones intencionales.....	23
Cuadro 4. Caracterización de los hormigueros intencionales	25
Cuadro 5. Caracterización de las zonas con espesor menor	25
Cuadro 6. Resultados de la prueba ASTM C39.....	37
Cuadro 7. Resultados obtenidos para la Losa 1	43
Cuadro 8. Resultados obtenidos para la Losa 2	47
Cuadro 9. Espesor promedio y desviación estándar para los defectos de la Losa 1	51
Cuadro 10. Espesor promedio y desviación estándar para los defectos de la Losa 2	51
Cuadro 11. Puntos con diferencias importantes entre los resultados de las mediciones para un mismo defecto con un mismo impactor	53
Cuadro 12. Límites de detección para los impactores estudiados.	54
Cuadro 13. Condición de detección identificada para defectos de la Losa 1	55
Cuadro 14. Condición de detección identificada para defectos de la Losa 2	57
Cuadro 15. Resultados para la medición de espesores en ambas losas.....	61
Cuadro 16. Defectos afectados por el efecto frontera	65
Cuadro 17. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 12,5 mm	69
Cuadro 18. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 8,0 mm.....	70
Cuadro 19. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 5,0 mm.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de ejecución del proyecto de graduación.....	8
Figura 2. Método de calibración para obtener frecuencia base	12
Figura 3. Pico de frecuencia obtenido por la reflexión total de la onda P.....	13
Figura 4. Picos e frecuencia obtenidos por la reflexión parcial de la onda P.....	13
Figura 5. Esquema constructivo de la Losa 1 sin defectos intencionales.....	20
Figura 6. Esquema constructivo de la Losa 2 sin defectos intencionales.....	21
Figura 7. Esquema de la ubicación de los defectos intencionales en la Losa 1	26
Figura 8. Esquema de la ubicación de los defectos intencionales en la Losa 2	27
Figura 9. Bloque de concreto permeable cubierto con plástico	28
Figura 10. Láminas de poliestireno expandido unidas para formar diferencia de espesor.....	28
Figura 11. Formaleta y armadura de la Losa 1	30
Figura 12. Formaleta y armadura de la Losa 2	30
Figura 13. Fijación de los discos de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero	31
Figura 14. Fijación de los discos de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero	32
Figura 15. Fijación de los bloques de concreto permeable por medio de varilla y alambre de acero.....	32
Figura 16. Fijación de los bloques de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero	33
Figura 17. Totalidad de los defectos instalados en la Losa 1 previo a la colocación del concreto.....	33
Figura 18. Totalidad de los defectos instalados en la Losa 2 previo a la colocación del concreto.....	34
Figura 19. Proceso de colocación del concreto en la Losa 1.....	35
Figura 20. Vibrado del concreto en la Losa 1	35
Figura 21. Proceso de acabado de la superficie en ambas losas.....	36
Figura 22. Acabado final de la Losa 2.....	36
Figura 23. Losa 1 con defectos identificados sobre su superficie.....	38
Figura 24. Losa 2 con defectos identificados sobre su superficie.....	39
Figura 25. Configuraciones utilizadas para realizar las pruebas de impacto-eco.....	40

Figura 26. Ubicación de los puntos de prueba sobre la Losa 1	41
Figura 27. Reporte de medición realizada sobre la Losa 1, en el punto 1 configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm.	42
Figura 28. Ubicación de los puntos de prueba sobre la Losa 2	45
Figura 29. Reporte de medición realizada sobre la Losa 2, en el punto 9 configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm.	46
Figura 30. Proceso de realización de pruebas de impacto-eco	49
Figura 32. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 12,5 mm	62
Figura 33. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 8,0 mm	62
Figura 34. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 5,0 mm	63
Figura 35. Desviaciones estándar por punto de prueba para los tres impactores utilizados	64
Figura 36. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-5,5 A, Losa 1, punto de prueba 1	66
Figura 37. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-9,5 A, Losa 1, Punto de prueba 2	66
Figura 38. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-13 A, Losa 1, Punto de prueba 3	67
Figura 39. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L2-11,5-5,5 A, Losa 2, Punto de prueba 1	67
Figura 40. Espesores medidos vs. espesor real en zona sin defecto, Losa 2, punto de prueba 2	68

Vignoli Vargas, Sofía

Evaluación del ensayo no destructivo impacto-eco para la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes.

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

S. Vignoli V., 2018

xvii, 79, [11]h, ils. col.- 19 refs.

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación consiste evaluar el desempeño del método no destructivo impacto-eco en condiciones controladas para determinar sus capacidades y limitaciones en la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes existentes.

Para realizar la evaluación del impacto-eco se diseñaron y construyeron dos elementos de prueba de tipo losa, a los cuales se les incluyó defectos intencionales y se ensayaron utilizando el método no destructivo. Se realizó una revisión de los planos de los puentes existentes en la Red Vial Nacional, con el fin de determinar las condiciones más comunes en las losas de puentes existentes. Las losas de prueba se diseñaron con las condiciones determinadas durante dicha revisión. Por otro lado, para diseñar los defectos intencionales, se estudiaron los límites de detección teóricos del equipo y se incluyeron defectos dentro y fuera de estos límites. Además, se estudió la capacidad del equipo para medir espesores al incluir zonas con espesores distintos.

Durante la realización de las pruebas del impacto-eco se evaluaron diferentes variables, las cuales son: el efecto de la ubicación del impactor y el transductor con respecto a la posición del defecto, la capacidad de detección de defectos con base en los límites teóricos, la capacidad del equipo para medir de espesor, efecto de la condición de borde y la influencia del acero de refuerzo.

Se determinó que la ubicación del impactor y el transductor con respecto a la posición del defecto no influye en gran medida con los resultados obtenidos. En un 93% de los casos, se obtuvo resultados sumamente similares utilizando las configuraciones estudiadas. Se concluye que el impacto-eco es un método adecuado para determinar el espesor de un elemento de concreto, un 90,5% de los resultados coincidieron con las condiciones reales. Se determinó que el efecto frontera puede influenciar resultados obtenidos y puede generar mediciones erróneas. Se evidenció que el acero de refuerzo no influye en los resultados obtenidos con el método. Se determinó que el impacto-eco es capaz de detectar defectos dentro y fuera de los límites de detección teóricos; sin embargo, no en todos los casos es capaz de determinar su profundidad real.

IMPACTO-ECO, ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS, LOSAS, PUENTES.

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. El problema específico

Durante años la inspección visual ha sido el método más utilizado para evaluar el estado de las losas de puentes. Aunque la inspección visual ha probado ser sumamente conveniente debido a que es de bajo costo, permite examinar áreas extensas, es de rápida realización y no es destructiva, resulta insuficiente para identificar defectos internos tales como vacíos, delaminaciones, grietas, problemas de consolidación, entre otros. Dichas condiciones antes mencionadas pueden reducir considerablemente la capacidad de carga de una losa de puente y, por consiguiente, su vida útil de servicio.

Por otro lado, existen métodos destructivos como la extracción de núcleos los cuales sí permiten determinar las condiciones internas de la estructura. Sin embargo, estos no son adecuados para examinar áreas extensas como las losas ya que deben ser aplicados en zonas puntuales. Además, son costosos y requieren de trabajos posteriores de reparación.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede asegurar que para realizar una inspección adecuada y completa de las losas de puentes, se requiere de metodologías nuevas de evaluación las cuales deben ser de relativo bajo costo, confiables, no destructivas y que permitan conocer la condición interna de la estructura, tanto en área extensas como puntuales. Estas metodologías se conocen como ensayos no destructivos. No obstante, a pesar de sus ventajas sobre otros métodos de inspección, en Costa Rica estos métodos son poco utilizados debido a que se tiene limitado conocimiento sobre su uso.

El método de impacto-eco es un ensayo no destructivo aplicable sobre elementos de concreto. Utiliza el principio de propagación de ondas de esfuerzo a través de un material para determinar la presencia de defectos internos y para medir espesores (Malhotra y Carino, 2004). Con esta investigación se pretende estudiar el método de impacto-eco evaluando su capacidad para detectar defectos internos en losas de concreto reforzado de puentes. Lo anterior con el fin de generar mayor conocimiento y entendimiento del método para que este pueda ser utilizado como una herramienta confiable en las labores de control de calidad, mantenimiento, rehabilitación e inspección de puentes.

1.1.2. Importancia

Actualmente, uno de los mayores problemas en infraestructura de transporte en el país son los puentes, muchos de los cuales presentan alto grado de deterioro debido a que se les ha dado poco o nulo mantenimiento. Debido a que los puentes son una parte esencial dentro de un sistema de transportes, es necesario intervenirlos con reparaciones o actividades de mantenimiento para poder mantener su vida útil de diseño. Sin embargo, los recursos para este propósito son limitados, por lo que es necesario encontrar una metodología de inspección de puentes efectiva, económica y rápida que permita valorar su estado y elegir cuáles deben ser intervenidos primero.

Dentro de los puentes, las losas son los elementos estructurales que suelen presentar mayor deterioro. Al estar expuestos al aumento de las cargas vehiculares tanto en magnitud como en frecuencia y a elementos ambientales como el sol y la lluvia, generalmente tienen menor vida útil que los demás elementos estructurales de un mismo puente (Khalim y Sagar, 2010). Es por lo anterior que una medida de rehabilitación efectiva y ampliamente utilizada por las agencias de transporte de los EUA, como resultado del uso de sistemas de gestión, es enfocarse en la intervención de las losas, siempre y cuando la estructura no sea hidráulica o sísmicamente vulnerable.

La importancia de este proyecto radica entonces en determinar las capacidades y limitaciones del impacto-eco con el fin de ser utilizado como un método no destructivo de inspección confiable de losas de concreto reforzado de puentes. Esto permitirá que sea utilizado como una herramienta precisa a la hora de establecer cuáles son las losas de puentes más deterioradas y priorizar su intervención. De esta forma, se podrán realizar las actividades de mantenimiento o rehabilitación adecuadas lo antes posible y evitar mayores deterioros de estos elementos, los cuales suelen estar asociados a reparaciones mucho más costosas, interrupciones del tráfico vehicular e incluso posibles riesgos a la seguridad de los usuarios (Transportation Research Board, 2013).

1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En Costa Rica se ha realizado una única investigación sobre el método no destructivo de impacto-eco. Esta investigación corresponde al Proyecto Final de Graduación para obtener el grado de licenciatura del Ing. Kevin Soto Navarro. En dicho proyecto, Soto evalúa la

capacidad del impacto-eco para determinar el estado del relleno de ductos de inyección en vigas preesforzadas utilizadas en puentes. Se evalúan diferentes condiciones como la edad del mortero, el porcentaje de vacío en el ducto, la ubicación del ducto y la configuración de la ubicación del impactor y el transductor. Finalmente, como conclusión del proyecto se presentan recomendaciones del uso del impacto-eco para esta aplicación en específico.

Además, a nivel internacional también se han llevado a cabo investigaciones con el fin de evaluar y validar la capacidad de detección de defectos y las limitaciones de este y otros métodos no destructivos. Una de las investigaciones fue realizada por el Instituto Federal para la Investigación y Pruebas de Materiales (BAM) en Berlín, Alemania, la cual se presenta en los documentos *Advanced NDT Methods for Quality Assurance of Concrete Structures* (Wiggenhauser, 2009) y *Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing* (Beutel et al., 2008). En este trabajo se construyó una losa de concreto con el fin de utilizarla como espécimen de referencia para la validación, calibración y comparación de varios equipos de ensayos no destructivos (entre ellos el impacto-eco). Dentro de la losa, se diseñaron diferentes configuraciones y se incluyeron defectos intencionales tales como vacíos y hormigueros, lo cual permitió comparar los resultados obtenidos con los equipos y de esta forma comprobar su exactitud.

La losa tiene unas dimensiones de 10 m x 4 m y un espesor regular de 0,30 m. Consta de dos secciones las cuales están unidas entre sí por una junta con dovelas. La primera sección incluía ductos de tendones de presfuerzo con diferentes diámetros y recubrimientos. En la lechada de los ductos se construyeron defectos intencionales. Por otro lado, en la segunda sección se construyeron zonas con diferentes espesores y vacíos. Se incluyó también una zona con una placa de acero en la parte inferior para determinar la velocidad de la onda de esfuerzo.

Por otro lado, el Segundo Programa de Investigación Estratégica de Carreteras (SHRP 2 por sus siglas en inglés) en Washington D.C., Estados Unidos, (SHRP, 2013) realizó una investigación titulada *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deterioration*. En esta investigación se buscó evaluar las tecnologías no destructivas en losas de puentes utilizando pruebas de laboratorio y pruebas en el campo. Se evaluaron únicamente los defectos que fueron considerados de mayor relevancia en losas de concreto para puentes,

los cuales son: delaminaciones, corrosión del acero, grietas verticales y degradación del concreto.

Como parte de las pruebas de laboratorio, se fabricó una losa con dimensiones de aproximadamente 6 m x 2,5 m y un grosor de 0,22 m. Se colocaron dos mallas de refuerzo con barras No. 5 espaciadas a 0,20 m en la dirección transversal y a 0,25 m en la dirección longitudinal. El recubrimiento de concreto superior fue de entre 60 y 75 mm, mientras que el recubrimiento inferior fue de 50 mm.

En cuanto a los defectos, se fabricaron 9 delaminaciones y 4 grietas verticales intencionales. Además, se colocaron dos segmentos de refuerzo oxidados. Los segmentos corroídos se conectaron eléctricamente a los segmentos normales. Para realizar las pruebas, se estableció una cuadrícula de 0,3 m x 0,3 m y, una vez que se habían finalizado todas las pruebas, se extrajeron 4 núcleos.

Al finalizar la investigación se concluyó que ninguna de las tecnologías de ensayos no destructivos evaluadas era capaz de detectar los cuatro tipos de defectos estudiados, por lo que se recomendó combinar varios ensayos para identificar la mayor cantidad de defectos posible. Además, se determinó que el impacto-eco era adecuado para la detección de delaminaciones, grietas verticales y degradación del concreto.

Por otro lado, en la Universidad de Florida se realizó en el año 2010 un proyecto llamado *Validation of Nondestructive Testing Equipment for Concrete*. (Hiltunen, 2010) cuyo objetivo principal fue diseñar, construir e implementar una instalación destinada a la calibración y validación de metodologías de ensayos no destructivos en elementos de concreto. Con el fin de evaluar y calibrar los equipos, se construyeron especímenes con características conocidas. Las tecnologías no destructivas utilizadas en el proyecto fueron: eco ultrasónico, impacto-eco, pachómetro, GPR y perfilómetro láser. Con base a estos problemas y las capacidades de los equipos escogidos se diseñaron los siguientes cuatro especímenes calibración.

El espécimen 0 correspondía a un bloque de control. Este no poseía condiciones especiales sino que fue diseñado para servir como referencia para comparar con las mediciones tomadas en los demás bloques. El espécimen 1 contenía diferentes configuraciones de acero de refuerzo. En este bloque se evaluó la influencia de diferentes diámetros de varilla,

profundidades, espaciamentos y capas. El espécimen 2 evaluaba la capacidad de los equipos de medir diferentes espesores de losa, los cuales iban desde los 150 mm hasta los 500 mm. Finalmente, el espécimen 3 contenía ductos de tendones de presfuerzo. En este caso se buscó detectar la ubicación de los ductos y obtener información sobre su interior. Todos los bloques, excepto el espécimen 1, fueron evaluados con el impacto-eco.

Las principales conclusiones de la investigación relacionadas con el impacto-eco son las siguientes. En el caso del bloque de control, se obtuvo un espesor relativamente constante en todo el bloque con excepción de las zonas cercanas a las fronteras del elemento, en las que se observaron patrones distintos. Esto se atribuye a la reflexión de las ondas en las paredes del bloque conocido como efecto frontera. En el caso del bloque 2, la mayoría de las mediciones estuvieron controladas por el efecto frontera por lo que se obtuvieron resultados de espesores distintos a la realidad. Finalmente, en el bloque tres fue posible ubicar los ductos de tendones de presfuerzo, sin embargo, no se observaron diferencias entre las zonas con y sin lechada.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño del método no destructivo impacto-eco en condiciones controladas para determinar sus capacidades y limitaciones en la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes existentes.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar y diseñar los defectos a construir que sean más comunes en losas de concreto de puentes y que permitan evaluar la capacidad de detección del impacto-eco utilizando como base los principios de funcionamiento del equipo.
- Determinar la geometría y la configuración de refuerzo representativas de las losas de concreto de puentes existentes de la Red Vial Nacional.
- Construir los elementos de prueba que contengan los defectos diseñados y las condiciones representativas de los puentes existentes de la Red Vial Nacional.
- Aplicar el método de impacto-eco sobre los elementos de prueba.

- Evaluar los principios, aplicaciones, limitaciones y funcionamiento del método no destructivo impacto-eco.
- Determinar si los resultados obtenidos de forma experimental concuerdan con las condiciones reales de los elementos de prueba.
- Establecer recomendaciones para el uso del método no destructivo impacto-eco sobre losas de concreto de puentes.

1.4. Delimitación del problema

1.4.1. Alcance

- Se construyeron dos especímenes de prueba que representen de la forma más cercana posible las losas de los puentes de la Red Vial Nacional que sean de tipo viga-losa, con vigas de acero o concreto reforzado y simplemente apoyados.
- Se fabricaron defectos intencionales de varios tamaños y se incluyeron en las losas de prueba en distintas ubicaciones y a varias profundidades. Los defectos intencionales representan vacíos, delaminaciones y hormigueros, ya que estos son los defectos más comúnmente encontrados en losas de concreto reforzado de puentes.
- Con el fin de determinar cómo construir defectos intencionales de manera que simulen verdaderamente vacíos, delaminaciones y hormigueros reales, se estudiaron investigaciones internacionales con condiciones similares a las de este proyecto y se utilizaron los materiales y métodos constructivos que probaron ser adecuados para cumplir este propósito.
- En las losas de prueba anteriormente descritas, se aplicó el método de impacto-eco con el fin de evaluar si los resultados con el equipo concuerdan con las condiciones reales de los elementos. Se probó tanto zonas con defectos intencionales como zonas sanas, para verificar la veracidad de los resultados. Además, se estudió la capacidad del impacto-eco para medir espesores al incluir zonas con diferentes espesores, las cuales también fueron probadas.
- El equipo utilizado corresponde al DOcter Impact-Eco fabricado por la empresa Germann Instruments, Inc., el cual fue adquirido por la Unidad de Puentes del LanammeUCR en el año 2016. Este equipo posee tres impactores, los cuales son esferas de acero con diámetro de 5,8 y 12,5 mm.

- Para determinar la cantidad de defectos a construir, así como su tamaño y profundidad a la que se ubican, se utilizó la literatura sobre el método (tal como ASTM International (2015), Germann Instruments (2013), Hellier (2003), Malhotra (2004) y RILEM (2012)) para definir los límites de detección del equipo. Con base en dicha literatura se diseñaron defectos dentro y fuera de estos límites.
- También se desea estudiar el efecto de la condición de borde, por lo que se colocarán tres defectos más a una distancia desde el borde menor al espesor del elemento.

1.4.2. Limitaciones

Existe una diferencia entre las losas de prueba construidas en laboratorio y las losas de puentes reales de la Red Vial Nacional, debido a que las losas de puentes reales probablemente presentan algún nivel de deterioro asociado a las cargas vehiculares y a los efectos del medio ambiente. Es por esto que los resultados de las velocidades de onda y las frecuencias obtenidos en este experimento, no pueden ser utilizados de forma comparativa para validar o rechazar pruebas realizadas en campo.

Además, existe una limitación importante la cual consiste en que en este experimento se trabajó con condiciones idóneas que no se encuentran cuando se aplica el método en el campo. Por ejemplo, se procuró dar un acabado totalmente liso a las losas de prueba con el fin de no afectar el impacto de las esferas de acero del equipo. Sin embargo, en puentes reales, las losas tienen superficies rugosas que pretenden evitar el deslizamiento de los vehículos, por lo que resulta necesario pulir o suavizar la superficie de la losa. Además, en el caso de este experimento se conoce el tipo y ubicación exacta de los defectos, lo cual evidentemente, no sucede al realizar pruebas en sitio.

1.5. Metodología

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1. El desarrollo del proyecto consta de cuatro fases principales: fase teórica, fase de diseño, fase experimental y fase de análisis.

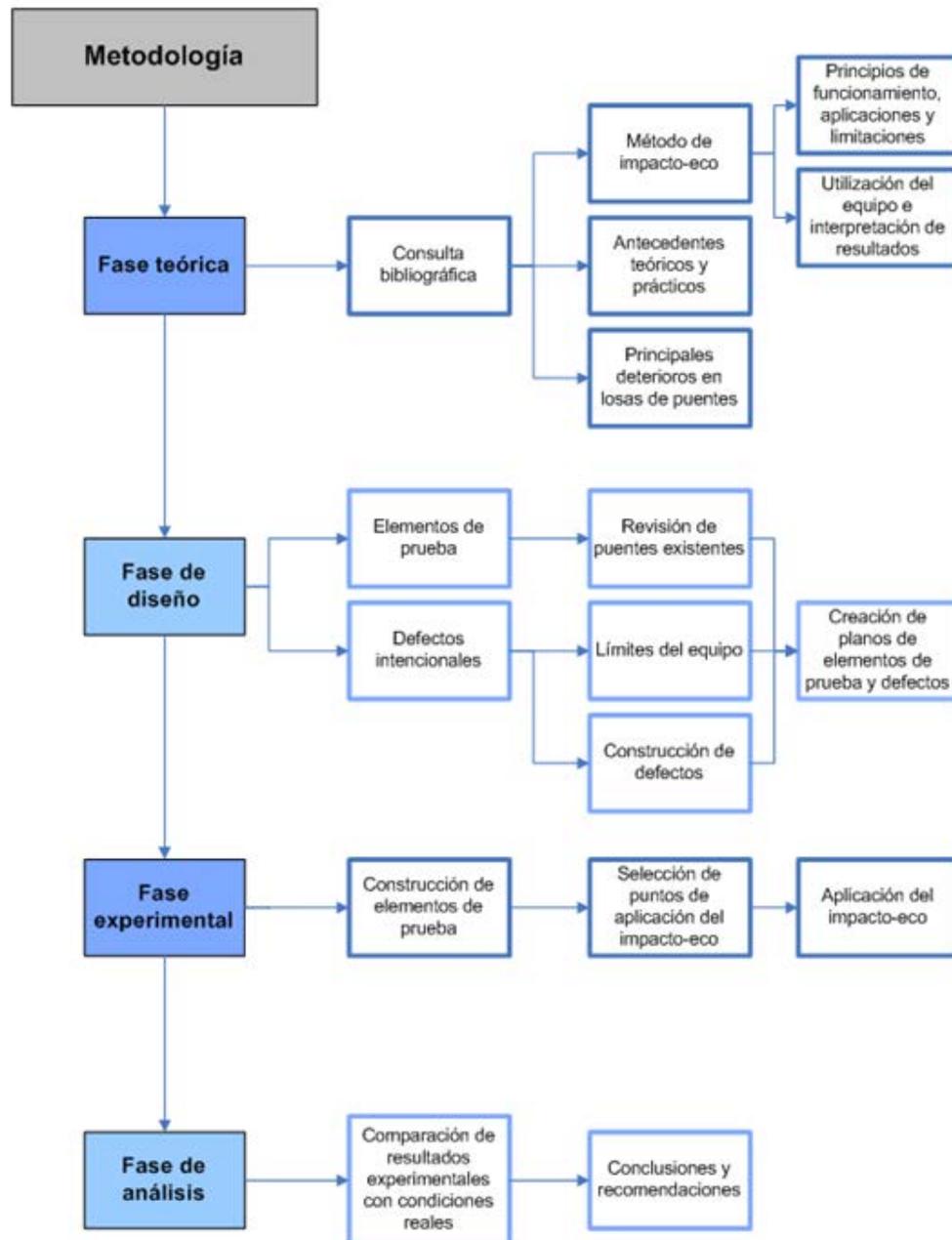


Figura 1. Metodología de ejecución del proyecto de graduación

La fase teórica consiste en realizar una consulta bibliográfica de toda la información relacionada con el tema de este proyecto. Se estudiará el método de impacto-eco a fondo: tanto su principio de funcionamiento, aplicaciones y limitaciones, como la forma de utilizar el equipo y la interpretación de resultados. Además, se buscará sobre investigaciones previas realizadas en este campo. Finalmente, se determinará cuáles son los defectos y

deterioros más comunes en las losas de concreto reforzado de puentes del país según las investigaciones previas y bases de datos de la Unidad de Puentes del LanammeUCR.

La fase de diseño incluye el diseño de los elementos de prueba y de los defectos intencionales. Para el diseño de la losa es necesario realizar una revisión de los puentes de la Red Vial Nacional que sean de tipo viga-losa, con vigas de acero o concreto reforzado y simplemente apoyados, con el fin de determinar el espesor de losa y la configuración de acero más representativa de los puentes de este tipo en el país.

En cuanto a la elección de los defectos intencionales, se debe investigar los límites de detección establecidos en el manual de usuario del impacto-eco y la literatura sobre el método para así incluir defectos dentro y fuera de estos límites y comprobar las capacidades y limitaciones del equipo. Además, se debe escoger el material más adecuado para la construcción de cada uno de los defectos. Esto se hará tomando en cuenta la información obtenida durante la fase teórica. Finalmente, se deben realizar planos o esquemas con los elementos de prueba (incluyendo el acero de refuerzo longitudinal y transversal y el espesor) y los defectos diseñados (incluyendo el tamaño, profundidad, ubicación y material del que están compuestos).

Seguidamente se realizará la fase experimental la cual está compuesta de las pruebas de laboratorio e involucran tres sub-fases. La primera es la construcción de los elementos de prueba con base en los esquemas previamente diseñados. La segunda es la escogencia de los puntos de aplicación del impacto-eco de modo que se pueda estudiar el impacto-eco en zonas con defectos y zonas sanas. Por último, se implementará el método de impacto-eco en los puntos establecidos anteriormente. En cada punto se tomarán varias mediciones de impacto-eco con el fin de validar estadísticamente los resultados.

Finalmente, se debe realizar la fase de análisis. Esta fase involucra el análisis de los resultados del ensayo y su comparación con las condiciones reales construidas. Con base en estos resultados será posible determinar la capacidad del método de impacto-eco para la detección de defectos, así como sus limitaciones. Finalmente, se definirán las conclusiones y recomendaciones finales para su uso en losas de concreto reforzado de puentes.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Ensayos no destructivos

La evaluación no destructiva se define como la prueba, examen o evaluación realizada a cualquier objeto sin que este sea alterado ni modificado (Hellier, 2003). En el caso de estructuras civiles, este término se refiere a la evaluación de estructuras de concreto y de acero mediante ensayos que no ponen en peligro la vida útil de la estructura y permiten que vuelvan a ser probadas las mismas zonas.

Los ensayos o métodos no destructivos son utilizados para determinar la condición de un elemento o estructura. Son capaces de: detectar defectos y discontinuidades internas y externas tales como vacíos, grietas y delaminaciones, ubicar zonas problemáticas que requieran de mayor atención, determinar las dimensiones de un elemento, localizar el acero de refuerzo, determinar el grado de consolidación del concreto, revelar la presencia de corrosión y otras condiciones.

Los ensayos no destructivos funcionan utilizando diferentes principios, por lo cual es necesario combinar varios ensayos distintos para determinar todos los defectos de una estructura (Khalim y Sagar, 2010). Algunos de los ensayos no destructivos más comunes son: impacto-eco, velocidad de pulso ultrasónico, termografía infrarroja, radar de penetración terrestre, pachómetro y martillo Schmidt. En este trabajo se estudia únicamente el impacto-eco.

2.2. Método de impacto-eco

El método de impacto-eco consiste en la generación de un pulso mediante el impacto de una esfera de acero sobre la superficie del concreto. El pulso se propaga como ondas que viajan a través del material, las cuales son reflejadas cuando interactúan con fronteras externas o con interfaces internas como defectos o vacíos. Un receptor monitorea el movimiento en la superficie y registra las ondas reflejadas. Estos registros entonces se utilizan para determinar la presencia de delaminaciones, vacíos y otras imperfecciones (Malhotra y Carino, 2004). El principio de funcionamiento de este método, sus aplicaciones y limitaciones se explican en las siguientes secciones.

2.2.1. Principio de funcionamiento del impacto-eco

El principio de propagación de ondas de esfuerzo indica que al aplicarse un impacto sobre la superficie de un elemento se produce una onda de esfuerzo que se propagará a través de dicho elemento, siempre y cuando este sea homogéneo. Si por el contrario dicho elemento es heterogéneo, la onda se propagará a través del elemento hasta que se encuentre con alguna discontinuidad. En este punto, cierto porcentaje de la onda será reflejado nuevamente hacia su punto de origen debido a que el material que compone la discontinuidad tiene una diferente impedancia acústica que el material original. La impedancia acústica de un material depende de su densidad y la velocidad del sonido en dicho material. (RILEM, 2012)

Los impactos mecánicos producen 3 tipos de ondas de esfuerzo: las ondas P, las ondas S y las ondas Rayleigh o R. Las ondas R son ondas superficiales por lo que se mueven a través de la superficie del elemento y no sirven para detectar defectos internos. Por otro lado, las ondas P y las ondas S son ondas de cuerpo por lo que sí viajan a través del elemento (Malhotra y Carino, 2004). De estas últimas, las ondas P son las que se toman en cuenta para el ensayo de impacto-eco ya que generan mayores desplazamientos (RILEM, 2012). El método del impacto-eco se basa en los principios anteriores y a continuación se explica su funcionamiento.

Primero que todo, se aplica de un impacto mecánico en la superficie del elemento de concreto, el cual produce ondas de esfuerzo de corta duración (menores a 100 μ s). Este impacto es generado con esferas de acero de diferentes diámetros. Como se explicó anteriormente, la onda P generada viaja a través del elemento hasta encontrarse con alguna heterogeneidad (ya sea las fronteras del elemento o alguna discontinuidad interna) y en este punto es reflejada. En el caso de la interfaz concreto-aire, se da una reflexión de onda del 100% (RILEM, 2012).

Cerca del punto de impacto, se coloca un transductor sensible al movimiento el cual mide los desplazamientos superficiales generados por la llegada de la onda P reflejada. Finalmente, se convierte los movimientos registrados en frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier (RILEM, 2012). Estas frecuencias son utilizadas para determinar la presencia y profundidad de defectos internos.

Para determinar la presencia de defectos es necesario primero calibrar el equipo de impacto-eco. Para esto, se debe realizar el ensayo en un punto del elemento donde no haya defectos y el espesor sea conocido. La onda emitida viajará hasta la frontera del elemento, será reflejada y llegará nuevamente a la superficie con una cierta frecuencia. Dicha frecuencia se representa en un gráfico de amplitud en función de la frecuencia como un pico y será tomada como el valor base de calibración (ver Figura 2)

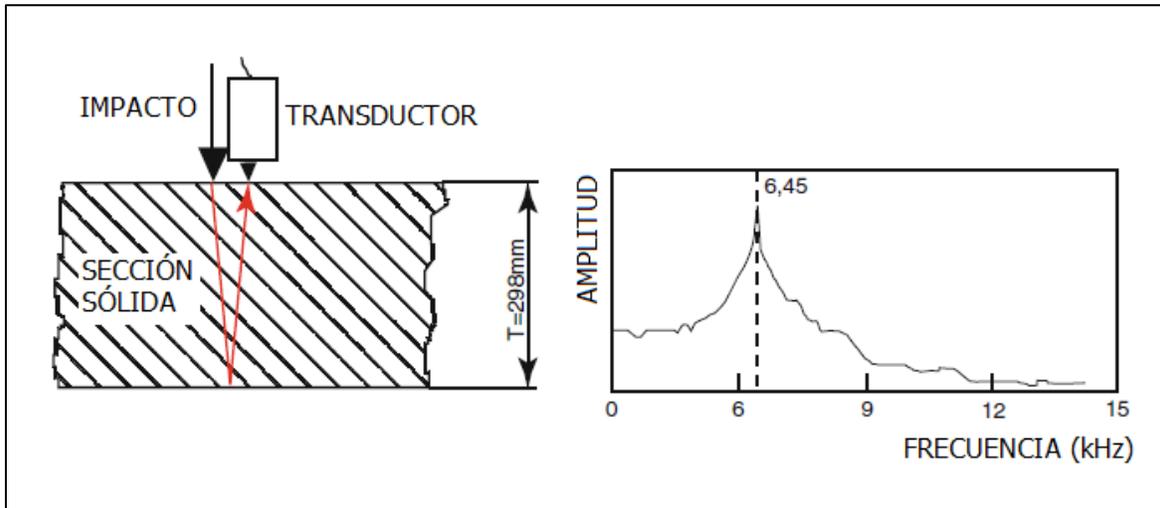


Figura 2. Método de calibración para obtener frecuencia base

Fuente: RILEM, 2012

Modificado por: Vignoli, 2018

Una vez calibrado el equipo se puede proceder a realizar pruebas en otros puntos del mismo elemento y, si al realizar las pruebas se obtienen frecuencias diferentes al valor base, se puede inferir la presencia de una discontinuidad. Cuando se obtienen picos de frecuencia menores a la base, significa que la onda viajó y se encontró con un defecto pequeño en comparación con su longitud de onda, por lo que no se reflejó sino que lo bordeó. Por el contrario, cuando se obtienen picos de frecuencia mayores a la frecuencia base, se puede determinar la presencia de un defecto grande que sí logró reflejar por completo la onda antes de que esta pudiera llegar a la frontera del elemento (Figura 3). También es posible obtener una combinación de ambos resultados anteriores, donde se observen picos de frecuencia mayores y menores a la frecuencia base. Lo anterior indica qué parte de la onda fue reflejada y qué parte bordeó la discontinuidad (Figura 4).

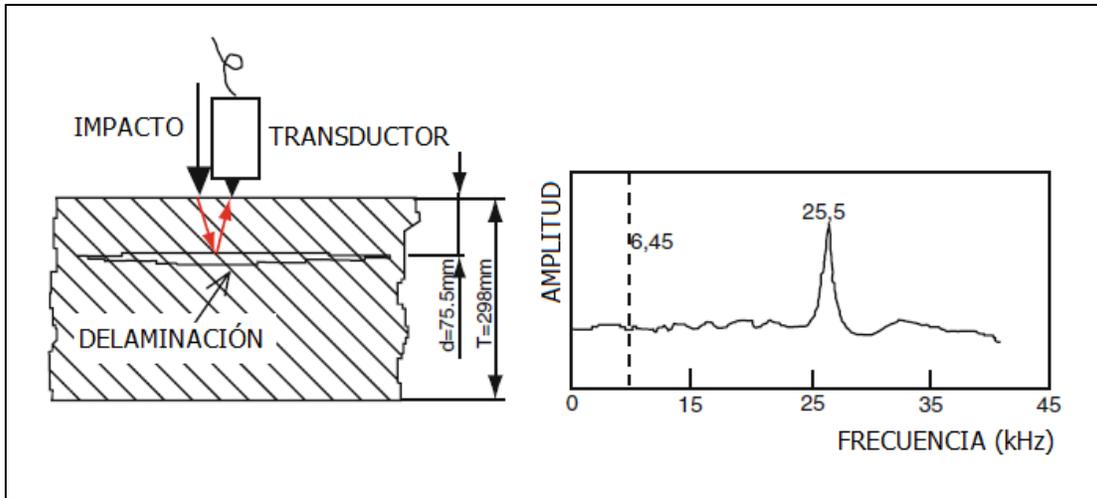


Figura 3. Pico de frecuencia obtenido por la reflexión total de la onda P

Fuente: RILEM, 2012

Modificado por: Vignoli, 2018

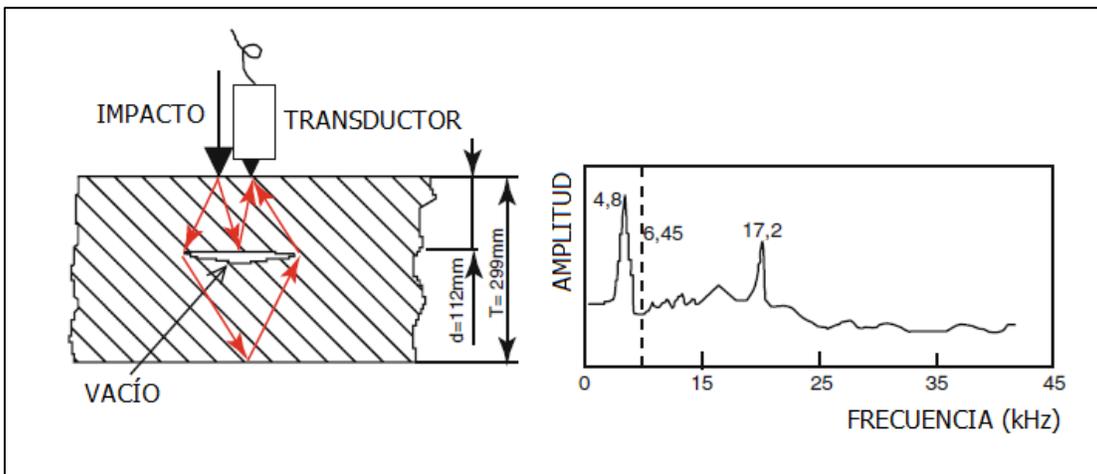


Figura 4. Picos de frecuencia obtenidos por la reflexión parcial de la onda P

Fuente: RILEM, 2012

Modificado por: Vignoli, 2018

La ecuación 1 mostrada a continuación sirve para determinar la velocidad de la onda de esfuerzo emitida y la profundidad a la que se ubica un defecto.

$$T = \frac{c_p}{2f} \quad (1)$$

Donde,

- T es el espesor del elemento de concreto
- f es la frecuencia de la onda reflejada
- C_p es la velocidad de onda

La velocidad de onda C_p es constante para un mismo material y se determina durante el proceso de calibración ya que se conoce el espesor del elemento y la frecuencia base de calibración. Luego, si se realiza la prueba en otros puntos del mismo elemento y se obtienen frecuencias pico distintas, es posible determinar la profundidad a la que se encuentra un defecto sustituyendo en la ecuación 1 la velocidad de onda C_p y la frecuencia pico f obtenida en ese punto.

2.2.2. Aplicaciones

La principal aplicación del impacto-eco es identificar la presencia y profundidad de defectos internos tales como delaminaciones, vacíos o cavidades y hormigueros. Sin embargo, también pueden ser utilizados para: medir espesores en elementos sólidos, determinar la profundidad de grietas superficiales, detectar zonas separación en la interface entre el acero y el concreto e identificar vacíos en la lechada de inyección en ductos de postensado. (RILEM, 2012)

2.2.3. Límites de detección del equipo

Según el Manual de Operación y Mantenimiento del equipo de impacto-eco de la empresa Germann Instruments, Inc. (2013), el tamaño mínimo de un defecto que es posible detectar y el rango de profundidades a las que es posible ubicarlo depende directamente del tamaño del impactador utilizado. En general, a menor diámetro de la esfera más pequeños son los defectos que se pueden detectar y a una menor profundidad. Esto se debe al rango de frecuencias emitidas durante el impacto y se explica en detalle a continuación.

Al impactar la superficie de concreto con una esfera de metal es posible obtener un gráfico de la fuerza en función del tiempo, donde el tiempo total corresponde al tiempo de contacto entre la esfera y el concreto (t_c). Esta función depende del tamaño de esfera utilizado para el impacto.

Con base en la función fuerza vs. tiempo, es posible determinar el rango de frecuencias que compone la onda de esfuerzo generada. La frecuencia máxima f_{max} , la cual se define como la máxima frecuencia útil que puede ser detectada por el transductor, se obtiene con la ecuación 2 mostrada más abajo.

$$f_{max} = \frac{1250}{t_c} \quad (2)$$

Donde, se determinó que el tiempo de contacto t_c es aproximadamente igual al ancho de la onda R generada durante el impacto. Para el caso específico de una superficie de concreto pulida y preparada, con una velocidad de onda P de 4000 m/s, el tiempo de contacto para un diámetro de esfera se calcula con la ecuación 3.

$$t_c = 4.4 \varnothing \quad (3)$$

Donde, \varnothing es el diámetro de la esfera utilizada como impactor.

La longitud de onda más pequeña de la onda de esfuerzo generada λ_{min} se relaciona con la frecuencia máxima mediante la ecuación 4.

$$\lambda_{min} = \frac{c_p}{f_{max}} \quad (4)$$

A su vez, el tamaño lateral mínimo de defecto L_{min} identificable por una esfera de diámetro \varnothing es igual a la longitud de onda mínima λ_{min} (ecuación 5). Además, la profundidad mínima d_{min} y la profundidad máxima d_{max} a la cual es posible detectar un defecto de dimensiones L_{min} se determinan con las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$L_{min} = \lambda_{min} \quad (5)$$

$$d_{min} = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (6)$$

$$d_{max} = 4 * \lambda_{max} \quad (7)$$

Los resultados para cada diámetro de esfera se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Límites de detección para cada diámetro de impactor del impacto-eco

Diámetro del impactor D (mm)	Tiempo de contacto t_c (μ s)	Frecuencia útil máxima f_{max} (kHz)	Longitud de onda mínima λ_{min} (mm)	Longitud lateral de defecto mínima L (mm)	Mínima profundidad de defecto con tamaño L, d_{min} (mm)	Máxima profundidad de defecto con tamaño L, d_{max} (mm)
2	10	125	32	32	16	128
4	18	69	57	57	29	228
5	22	57	70	70	35	280
6,5	29	43	90	90	45	360
8	35	36	111	111	56	444
9,5	42	30	133	133	67	532
12,5	55	23	175	175	88	700
15	66	19	210	210	105	840

Fuente: Germann Instruments, Inc., 2013

Otra limitación del método es conocida como el “efecto frontera”, el cual se da cuando las ondas interactúan con las paredes verticales del elemento y son reflejadas nuevamente hacia el punto de origen. Esta reflexión interfiere con la onda de esfuerzo original y puede generar errores en las mediciones. Para evitar el efecto frontera, se deben realizar pruebas a una distancia desde los bordes no menor al espesor de la losa. Además, también por esta razón, se establece en la norma ASTM C1383-15 que este método es aplicable únicamente a elementos cuyas dimensiones laterales sean por lo menos seis veces su espesor.

2.3. Hipótesis

Se espera que al aplicar el impacto-eco sobre los elementos de prueba, se identifiquen los defectos intencionales construidos y se puedan medir los espesores correctamente, siempre y cuando estos estén dentro de los límites de detección del equipo.

Capítulo 3. Diseño y construcción de losas de prueba

3.1. Diseño de especímenes de prueba

3.1.1. Revisión de las losas de los puentes de la Red Vial Nacional

El proyecto consiste en la evaluación experimental del método no destructivo impacto-eco con el fin de determinar su eficacia en la detección de defectos de losas de concreto reforzado de puentes. Por lo tanto, los especímenes de prueba deben representar de la forma más cercana posible las losas de los puentes de la Red Vial Nacional que sean de tipo viga-losa, con vigas de acero o concreto reforzado y simplemente apoyados.

Siguiendo con este objetivo, se procedió a realizar un estudio de los planos de los puentes existentes de la Red Vial Nacional que cumplen las características anteriores. Se estudió un total de 65 puentes de las Rutas Nacionales Primarias número 1, 2, 4, 32 y 34, los cuales se obtuvieron de la base de datos de la Unidad de Puentes del LanammeUCR. De cada puente, se determinaron las siguientes características:

- Año de diseño
- Resistencia a la compresión del concreto de la losa (f'_c)
- Espesor de la losa
- Tamaño de varilla, espaciamiento y recubrimiento del refuerzo transversal
- Tamaño de varilla y espaciamiento del refuerzo longitudinal

En el Anexo 1 se presentan todos los datos recopilados por puente. Con base en estos datos se determinó cuáles son las características más representativas de las losas de puentes en el país. Específicamente se determinó: la configuración de acero más común, la resistencia mínima a la compresión del concreto más utilizada y el espesor de losa mínimo, máximo y promedio. Estos valores se presentan en el Cuadro 2 a continuación.

Cuadro 2. Características más comunes de las losas de puentes de la Red Vial Nacional

Parámetro		Resultado
Losas de concreto reforzado	Espesor mínimo (cm)	15,9
	Espesor medio (cm)	16,8
	Espesor máximo (cm)	25,0
	Resistencia f'_c (kg/cm ²)	210-280
Refuerzo longitudinal superior	Tamaño de varilla	#4
	Espaciamiento (cm)	32,0
Refuerzo longitudinal inferior	Tamaño de varilla	#4
	Espaciamiento (cm)	20,0
Refuerzo transversal superior	Tamaño de varilla	#5
	Espaciamiento (cm)	16,0
	Recubrimiento (cm)	4,0
Refuerzo transversal inferior	Tamaño de varilla	#5
	Espaciamiento (cm)	16,0
	Recubrimiento (cm)	3,0

3.1.2. Dimensiones de los especímenes de prueba

Con base en los datos del Cuadro 2 de la sección anterior, se diseñaron los especímenes de prueba. Se optó por diseñar y fabricar dos elementos de prueba de tipo losa, los cuales poseen características y defectos distintos. Estos elementos de prueba serán referidos en adelante como Losa 1 y Losa 2. Ambas losas tienen configuraciones distintas de acero de refuerzo y de espesor con el fin de evaluar si estos parámetros afectan las mediciones del impacto-eco.

Con respecto al acero de refuerzo, la Losa 1 contiene una configuración de acero comúnmente presente en las losas de puentes del país estudiadas (ver Cuadro 2) y la Losa 2 tiene únicamente acero por retracción y temperatura. Por otro lado, la Losa 1 tiene un espesor constante de 17 cm, el cual corresponde al espesor promedio observado en puentes estudiados, mientras que la Losa 2 tiene un espesor de 25 cm, el cual corresponde al espesor máximo observado.

Por otro lado, la norma ASTM C1385-5 *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method* y el Manual de Operación y Mantenimiento para el DOCTer Impact-Echo, establecen que el método de

impacto eco es aplicable únicamente a elementos con forma de placa y con dimensiones laterales mayores a seis veces el espesor. Es por esto que se decidió que ambas losas fueran elementos cuadrados con dimensión lateral de 1,50 m

A continuación se presenta un resumen las características de ambas losas. Además, en la Figura 5 y la Figura 6 se presentan los esquemas constructivos de la Losa 1 y la Losa 2, respectivamente, sin la inclusión de los defectos. El diseño de los defectos intencionales se presenta en la siguiente sección.

Losa 1:

- Espesor: 17 cm
- Dimensiones laterales: 1,50 m x 1,50 m.
- Configuración de acero de refuerzo típico de una losa de concreto de puente.
- Acero transversal superior e inferior: varilla #5 espaciada a cada 16 cm
- Acero longitudinal superior: varilla #4 espaciada a cada 32 cm
- Acero longitudinal inferior: varilla #4 espaciada a cada 20 cm
- Recubrimiento de refuerzo superior: 4 cm
- Recubrimiento de refuerzo interior: 3 cm
- Resistencia $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

Losa 2:

- Espesor: 25 cm
- Dimensiones laterales: 1,50 m x 1,50 m.
- Acero de refuerzo únicamente para temperatura
- Acero transversal superior e inferior: varilla #3 espaciada a cada 40 cm
- Acero longitudinal superior e inferior: varilla #3 espaciada a 40 cm.
- Recubrimiento de refuerzo superior: 4 cm
- Recubrimiento de refuerzo interior: 3 cm
- Resistencia $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

Con respecto al concreto, se optó por utilizar una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 245 kg/cm^2 . Como se muestra en el Cuadro 2, a partir de la revisión de los puentes de la Red Vial Nacional, se determinó que la mayoría de los puentes existentes se

diseñaron utilizando concreto de f'_c de entre 210 y 280 kg/cm². Además, como se puede observar en el Anexo A, en una gran cantidad de planos no se indicó la resistencia mínima utilizada, sino que únicamente se especifica que se utiliza un concreto de "Clase A". Esta notación no se utiliza en la actualidad; sin embargo, según las especificaciones para el diseño de puentes AASHTO de 1973, el concreto Clase A corresponde a concreto cuya resistencia mínima a la compresión es de 210 kg/cm². Por esta razón, se optó por utilizar un concreto con $f'_c = 245$ kg/cm², ya que corresponde al promedio entre 210 y 280 kg/cm².

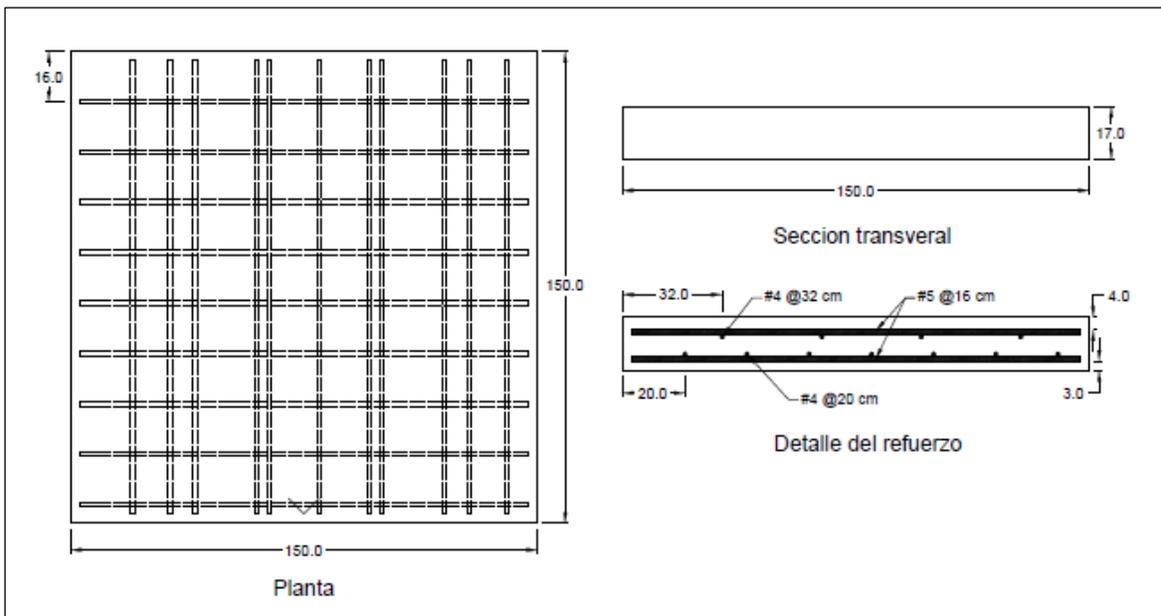


Figura 5. Esquema constructivo de la Losa 1 sin defectos intencionales

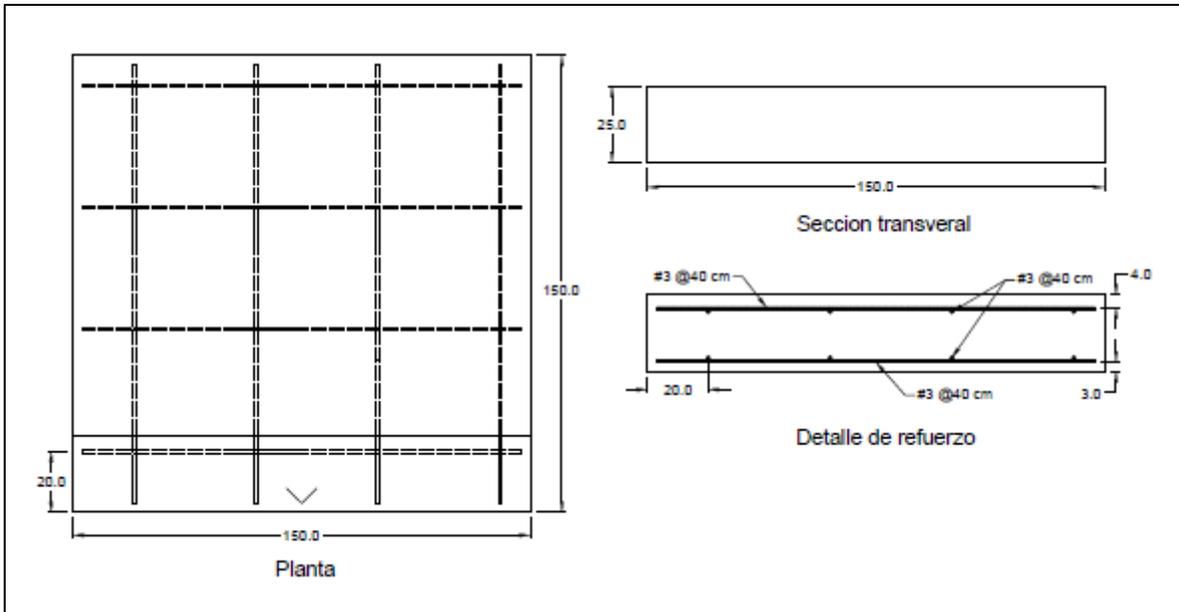


Figura 6. Esquema constructivo de la Losa 2 sin defectos intencionales

3.2. Diseño de los defectos intencionales

Los defectos intencionales que se incluyen en las losas de prueba son vacíos, delaminaciones y problemas de consolidación como hormigueros, ya que son problemas comúnmente presentes en losas de puentes. Además, se pretende evaluar la capacidad del impacto-eco para determinar el espesor de una losa al incluir zonas en los elementos con diferentes espesores.

Como es de esperarse, los defectos intencionales deben fabricarse de forma tal que representen defectos reales. Para esto, se estudiaron investigaciones internacionales con condiciones similares a las de este proyecto y se utilizaron los materiales y métodos constructivos que probaron ser adecuados para cumplir este propósito. Dichas investigaciones se citan en la sección de fuentes de consulta y corresponden a las siguientes: Asano (2003), Beutel (2008), Clayton (2012), Hiltunen (2010), Transportation Research Board (2013) y Wiggenhausen (2009).

Con base en las fuentes anteriores, se procedió a definir los materiales adecuados para fabricar los defectos intencionales. Para los vacíos y las delaminaciones se optó por utilizar discos de poliestireno expandido de 19 mm de espesor. Para el caso de los hormigueros, se

utilizarán bloques de concreto permeable. Finalmente, para simular diferentes espesores se anclarán bloques de poliestireno expandido al fondo de las losas. Los defectos serán insertados en las losas y se asegurarán en su posición mediante varillas de acero y alambres de metal a las barras del refuerzo principal.

Para determinar la cantidad de defectos a construir, así como su tamaño y profundidad a la que se ubican, se utilizó la literatura sobre el método para definir los límites de detección del equipo. Como se explicó en la sección de marco teórico, el diámetro de la esfera utilizada para generar el pulso determina el tamaño mínimo y el rango de profundidad a las que es posible detectar un defecto (ver Cuadro 1). Con base a lo anterior se escogieron las pruebas a realizar: 21 defectos que simulan vacíos o delaminaciones, 4 defectos que simulan hormigueros y 2 cambios de espesor, los cuales están ubicados en ambas losas de prueba.

De esta forma, se decidió construir tres defectos de tipo vacío que tienen el tamaño mínimo detectable y están ubicados a la profundidad mínima de detección por cada esfera utilizada (5, 8 y 12 mm respectivamente). Además, se incluyeron otros dos defectos de tipo vacío para cada tamaño mínimo identificable por esfera, pero a dos profundidades más, las cuales son mayores a la profundidad mínima y corresponden a aproximadamente $1/3$ y $2/3$ de la distancia entre la profundidad mínima y el espesor de la losa. También, se decidió incorporar tres defectos más cuyo tamaño es menor al tamaño mínimo identificable por las tres esferas y un defecto cuyo tamaño es superior al tamaño mínimo de todos los impactores.

Por otro lado, con el fin de estudiar el efecto frontera, se colocaron tres defectos de tipo vacío a una distancia desde el borde del elemento, menor al espesor de la losa. Es decir a una distancia desde el borde menor a 170 mm para el caso de la Losa 1 y menor a 250 mm para el caso de la Losa 2. Además, se pretendió estudiar la capacidad del método para medir espesores al realizar pruebas con zonas de diferente espesor. Específicamente se incluyen zonas con espesores de 160 mm, 200 mm y 250 mm. Finalmente, en la Losa 2, se incluyeron 5 defectos iguales a 5 defectos presenten en la Losa 1, con el fin de determinar el efecto del acero de refuerzo.

En el Cuadro 3 a continuación se presentan las características de los vacíos y delaminaciones intencionales y se describen las condiciones de evaluación explicadas en los párrafos anteriores. En el Cuadro 4 se presentan las características para los defectos que simulan

problemas de consolidación de tipo hormiguero. En el Cuadro 5 se presentan las características de las zonas con espesores menores al espesor de la losa. Además, en la Figura 7 y Figura 8 se presentan los esquemas de la ubicación de los defectos en la Losa 1 y Losa 2 respectivamente. Finalmente, en el Anexo 2 se presentan los esquemas constructivos finales de ambas losas.

Cuadro 3. Características de los vacíos y delaminaciones intencionales

Nombre del defecto	Losa	Diámetro (cm)	Profundidad (cm)	Descripción
V-L1-11,5-5,5 ^a	Losa 1	11,5	5,5	Se evalúa el efecto frontera en un defecto de tamaño mínimo y profundidad mínima identificable para esfera de 8 mm
V-L1-4-3,5	Losa 1	4,0	3,5	Defecto de tamaño menor que el mínimo identificable ubicado a profundidad mínima identificable para esfera de 5 mm
V-L1-7-3,5	Losa 1	7,0	3,5	Defecto de tamaño mínimo y profundidad mínima identificable para esfera de 5 mm
V-L1-11,5-5,5B	Losa 1	11,5	5,5	Defecto de tamaño mínimo y profundidad mínima identificable para esfera de 8 mm
V-L1-17,5-9	Losa 1	17,5	9,0	Defecto de tamaño mínimo y profundidad mínima identificable para esfera de 12,5 mm
V-L1-11,5-9,5A	Losa 1	11,5	9,5	Se evalúa el efecto frontera en defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-4-8	Losa 1	4,0	8,0	Defecto de tamaño menor que el mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-7-8	Losa 1	7,0	8,0	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-11,5-9,5B	Losa 1	11,5	9,5	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una

Nombre del defecto	Losa	Diámetro (cm)	Profundidad (cm)	Descripción
				profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-17,5-10,5	Losa 1	17,5	10,5	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 12,5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-11,5-13A	Losa 1	11,5	13,0	Se evalúa el efecto frontera en defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-4-11	Losa 1	4,0	11,0	Defecto de tamaño menor que el mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-7-11	Losa 1	7,0	11,0	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-11,5-13B	Losa 1	11,5	13,0	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-17,5-15	Losa 1	17,5	15,0	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 12,5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L1-20-15	Losa 1	20,0	15,0	Defecto de tamaño mayor que el mínimo identificable para las tres esferas
V-L2-11,5-9,5A	Losa 2	11,5	9,5	Se evalúa el efecto frontera en defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L2-4-8	Losa 2	4,0	8,0	Defecto de tamaño menor que el mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L2-7-8	Losa 2	7,0	8,0	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera
V-L2-11,5-9,5B	Losa 2	11,5	9,5	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 8 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera

Nombre del defecto	Losa	Diámetro (cm)	Profundidad (cm)	Descripción
V-L2-17,5-10,5	Losa 2	17,5	10,5	Defecto de tamaño mínimo identificable para esfera de 12,5 mm, ubicado a una profundidad mayor que la profundidad mínima para dicha esfera

Cuadro 4. Caracterización de los hormigueros intencionales

Nombre del defecto	Losa	Dimensiones laterales	Espesor (cm)	Profundidad (cm)
H-L1-7x7-7	Losa 1	7,0 cm x 7,0 cm	10,0	7,0
H-L1-14x14-7	Losa 1	14,0 cm x 14,0 cm	10,0	7,0
H-L2-7x7-15	Losa 2	7,0 cm x 7,0 cm	10,0	15,0
H-L2-7x21-15	Losa 2	7,0 cm x 21,0 cm	10,0	15,0

Cuadro 5. Caracterización de las zonas con espesor menor

Nombre del defecto	Losa	Dimensiones laterales	Espesor (cm)	Profundidad (cm)
E-L2-50x50-16	Losa 2	50,0 cm x 50,0 cm	9,0	16,0
E-L2-50x50-20	Losa 2	50,0 cm x 50,0 cm	5,0	20,0

Para nombrar los defectos a construir se utilizó una nomenclatura cuyo fin es describir las características de cada defecto. Cada nombre está compuesto de cuatro secciones separadas entre sí por medio de guiones, cada una de ellas indica una característica del defecto y se explican a continuación.

La primera letra del nombre corresponde al tipo de defecto: se utiliza una V para describir defectos que representan vacíos y delaminaciones, H para los defectos que simulan hormigueros y E para las zonas en donde se construyó un espesor menor. Por otro lado, la segunda sección del nombre está compuesta por una letra y un número, los cuáles indican en cuál de las losas se ubica el defecto; es decir, L1 para la Losa 1 y L2 para la Losa 2.

La tercera sección del nombre indican las dimensiones laterales del defecto. En el caso de los vacíos, el número indica el diámetro en cm del disco de poliestireno expandido. Por otro lado, en el caso de los hormigueros y los espesores, la tercera sección indica las dimensiones

del rectángulo vistas en planta. Por último, la cuarta sección del nombre indica la profundidad a la que se encuentra el defecto.

Como se puede observar en el siguiente cuadro, existen ciertos defectos de tipo vacío que tiene el mismo nombre con la única diferencia de que se agregó una letra A o B al final del nombre. Lo anterior indica que los defectos se encuentran en la misma losa, tienen las mismas dimensiones laterales y se ubican a la misma profundidad. La única diferencia radica en la posición dentro de la Losa en la que están ubicados. En el caso en el que se agregó una letra A, el defecto se encuentra dentro de la zona correspondiente al "efecto frontera"; es decir, se ubica a una distancia menor al espesor de la losa desde el borde de esta. Lo contrario sucede cuando se agrega una letra B. Esto se demuestra en la Figura 7 y Figura 8 a continuación.

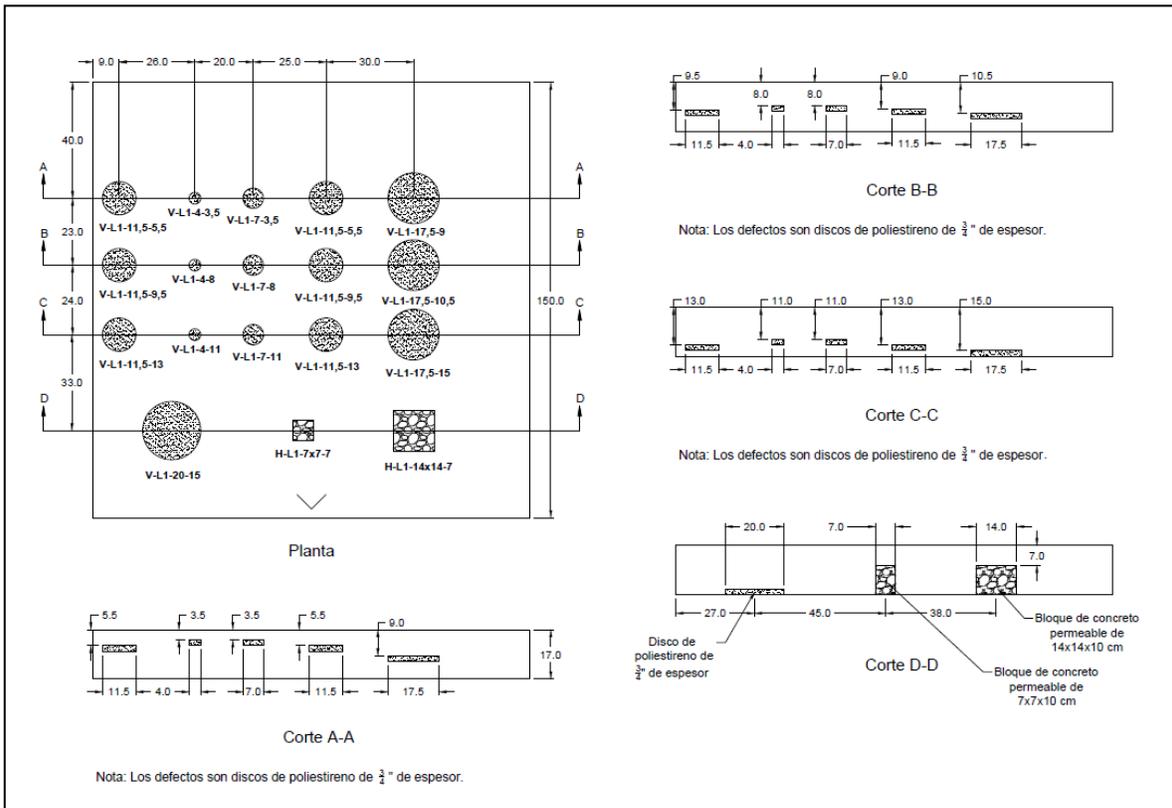


Figura 7. Esquema de la ubicación de los defectos intencionales en la Losa 1

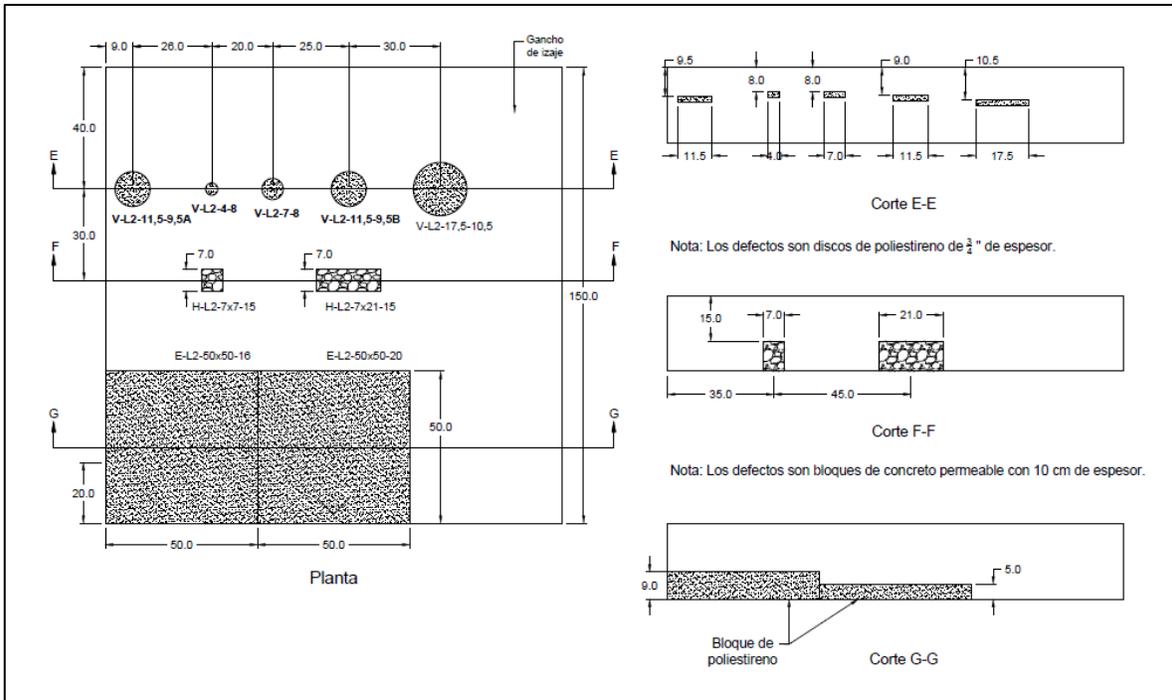


Figura 8. Esquema de la ubicación de los defectos intencionales en la Losa 2

3.3. Proceso constructivo

3.3.1. Construcción de defectos

El primer paso de la fase constructiva consistió en la fabricación de los defectos intencionales. Como se explicó anteriormente, los vacíos se elaboraron cortando láminas de poliestireno expandido de 19 mm de espesor en forma de discos. Los hormigueros se crearon con bloques de concreto permeable los cuales se fueron cubiertos con plástico transparente para evitar que el concreto fresco ingresara a través de sus vacíos, tal y como se muestra en Figura 9. Finalmente, las diferencias de espesor se fabricaron uniendo varias láminas de poliestireno expandido hasta dar con el grosor diseñado (ver Figura 10).



Figura 9. Bloque de concreto permeable cubierto con plástico



Figura 10. Láminas de poliestireno expandido unidas para formar diferencia de espesor

Una vez que se finalizó con la fabricación de los defectos intencionales, se procedió a realizar la construcción de las losas de prueba. Para esto se contó con el apoyo de la empresa Puente Prefa, la cual diseña y construye puentes en el país. En esta empresa, con ayuda del personal que regularmente ahí labora, se completó la construcción de las losas; específicamente se realizaron las labores de colocación de la formaleta y la armadura, la instalación de los defectos, el colado del concreto y el curado de las losas. Cabe destacar que durante el proceso constructivo se mantuvo una inspección constante con el fin de corroborar y asegurar que todo fuera construido de acuerdo con lo establecido en planos.

3.3.2. Colocación de la formaleta y la armadura

En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran la formaleta y armadura debidamente colocada para la Losa 1 y la Losa 2, respectivamente. Como se puede observar en las fotografías, se utilizó formaleta de acero, la cual se ajustó de modo que las dimensiones laterales fueran de 1,5 m x 1,5 m en ambos casos. En cuanto al espesor de las losas, se utilizaron guías de madera para asegurar que el espesor de la Losa 1 fuera de 17 cm y de la Losa 2 fuera de 25 cm. Seguidamente se colocó dentro de la formaleta la armadura de ambas losas. A estas se les dio el recubrimiento especificado utilizando helados de concreto. Antes de iniciar con la colocación de los defectos, se corroboró que el espaciamiento de acero concordara con el establecido en el diseño.



Figura 11. Formaleta y armadura de la Losa 1



Figura 12. Formaleta y armadura de la Losa 2

3.3.3. Instalación y fijación de los defectos

Se procedió a instalar los defectos y a fijarlos de modo que no se desplazaran durante el colado del concreto. Lo anterior permite conocer la ubicación exacta de los defectos, lo cual es de suma importancia ya que le da validez a los resultados obtenidos durante la fase experimental. Los defectos se instalaron utilizando varillas de acero y alambre de metal tal y como se muestra en la Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 16. Luego, se midió que su posición coincidiera con la ubicación indicada en planos. Como era de esperarse, se identificaron pequeñas diferencias entre el diseño y la construcción, por lo que estas se modificaron en los planos *as built*, los cuales se presentan en el Anexo 2.

Durante esta fase también se realizó la instalación de cuatro ganchos de izaje en cada losa para facilitar su traslado. Cada gancho se colocó a una distancia de 30 cm desde los bordes del elemento. En la Figura 17 y en la Figura 18, se muestran fotografías de la Losa 1 y la Losa 2 respectivamente con todos los defectos intencionales y los ganchos de izaje instalados y asegurados antes de llevar a cabo el colado del concreto.



Figura 13. Fijación de los discos de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero



Figura 14. Fijación de los discos de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero



Figura 15. Fijación de los bloques de concreto permeable por medio de varilla y alambre de acero



Figura 16. Fijación de los bloques de poliestireno por medio de varilla y alambre de acero



Figura 17. Totalidad de los defectos instalados en la Losa 1 previo a la colocación del concreto



Figura 18. Totalidad de los defectos instalados en la Losa 2 previo a la colocación del concreto

3.3.4. Colado del concreto

Para el concreto de las losas se utilizó un diseño de mezcla estándar de la empresa Puentes Prefa el cual tiene una resistencia $f'_c = 245\text{kg/cm}^2$. Esta resistencia se consideró adecuada ya que se encuentra dentro de las características comúnmente presentes en las losas de puentes de la Red Vial Nacional estudiados (ver Cuadro 2).

Con el fin de evitar que se formaran vacíos y hormigueros no intencionales, se buscó que la mezcla de concreto fuera bastante fluida. Para esto, se hizo uso de aditivos plastificantes. Se realizó la prueba de revenimiento dos veces con base en la norma ASTM C 143 y se obtuvo como resultado 13,0 cm y 16,4 cm de revenimiento.

Antes de iniciar el colado del concreto, se marcó en la formaleta los lugares en los cuales se ubicaban los defectos para que en estas zonas los operarios introdujeran el vibrador con cuidado y no se dañara el poliestireno expandido. El proceso de colado y vibrado del concreto se muestra en la Figura 19 y en la Figura 20 respectivamente. A ambas losas se les dio un acabado liso, tal y como se muestra en la Figura 21 y la Figura 22.



Figura 19. Proceso de colocación del concreto en la Losa 1



Figura 20. Vibrado del concreto en la Losa 1



Figura 21. Proceso de acabado de la superficie en ambas losas



Figura 22. Acabado final de la Losa 2

3.3.5. Curado del concreto y falla de cilindros

Las losas se curaron durante 7 días, tres veces al día con saturación de agua. Por otro lado, para comprobar la resistencia a la compresión del concreto utilizado, se fabricaron 12 cilindros de 10 cm x 20 cm los cuales se curaron en cámara húmeda. Con base en la norma ASTM C 39 se fallaron a compresión los cilindros de la siguiente forma:

- 3 cilindros a los 7 días
- 3 cilindros a los 14 días
- 3 cilindros a los 28 días
- 3 cilindros el día de inicio de las pruebas de impacto-eco

Los resultados obtenidos durante dichas pruebas se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Resultados de la prueba ASTM C39

Prueba	Fecha	Cilindro	Diámetro promedio (cm)	Altura (cm)	Tipo de falla	Falla (kN)	Resistencia (kg/cm ²)
7 días	1-nov-17	Cilindro 1	10.10	20.33	2	143.85	183.06
		Cilindro 2	10.09	20.18	3	150.25	191.47
		Cilindro 3	10.08	20.09	3	148.85	190.06
14 días	8-nov-17	Cilindro 1	10.07	20.27	2	192.60	246.56
		Cilindro 2	10.10	20.30	2	195.30	248.68
		Cilindro 3	10.12	20.10	2	200.20	253.86
28 días	22-nov-17	Cilindro 1	10.05	20.40	2	243.60	313.19
		Cilindro 2	10.11	20.37	2	236.90	300.61
		Cilindro 3	10.11	20.36	3	236.85	300.49
Inicio de pruebas	13-feb-18	Cilindro 1	10.13	20.31	2	296.00	374.68
		Cilindro 2	10.10	20.32	3	299.15	380.88
		Cilindro 3	10.11	20.29	2	279.90	355.38

Capítulo 4. Fase experimental y resultados

4.1. Preparación de los elementos de prueba

Los ensayos de impacto-eco realizados sobre la Losa 1 y la Losa 2 fueron efectuados en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales LanammeUCR los días 12 y 13 de febrero del 2018. Ambas losas se apoyaron sobre bloques de madera con el fin de crear una separación entre la superficie inferior de la losa y el contrapiso de concreto del laboratorio para, de esta forma, asegurar que las ondas de esfuerzo no se propagaran más allá del concreto de las losas. Además, se limpió la superficie superior de cada losa con el fin de remover cualquier partícula suelta y se marcaron los puntos en los cuales se construyeron los defectos intencionales tal y como se muestra en la Figura 23 y la Figura 24.

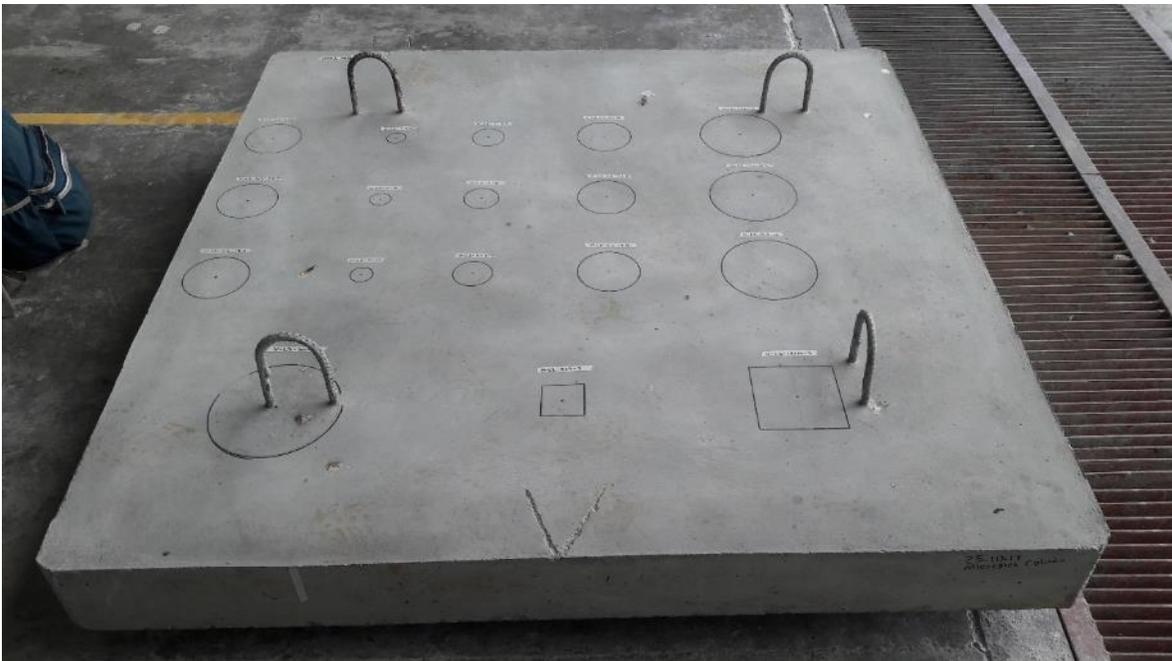


Figura 23. Losa 1 con defectos identificados sobre su superficie



Figura 24. Losa 2 con defectos identificados sobre su superficie

En cada una de las losas se ensayaron 20 puntos utilizando el equipo de impacto-eco. En cada uno de estos puntos, se realizaron tres pruebas utilizando tres configuraciones distintas. La configuración A consistió en colocar el impacto en el centro del defecto y el transductor a su lado. La configuración B consistió en colocar el transductor en el centro del defecto y realizar el impacto a su lado. Por último, la configuración C involucró colocar el impactor y el transductor a los lados del centro del defecto. Las tres configuraciones anteriormente explicadas se muestran gráficamente en la Figura 25. En los casos en los que se ensayaron zonas sanas sin defectos intencionales, también se realizaron tres pruebas en dichos puntos, sin embargo no se indican las configuraciones A, B y C ya que, como no hay presencia de un defecto, no es posible su centro como referencia para definir las configuraciones explicadas anteriormente.

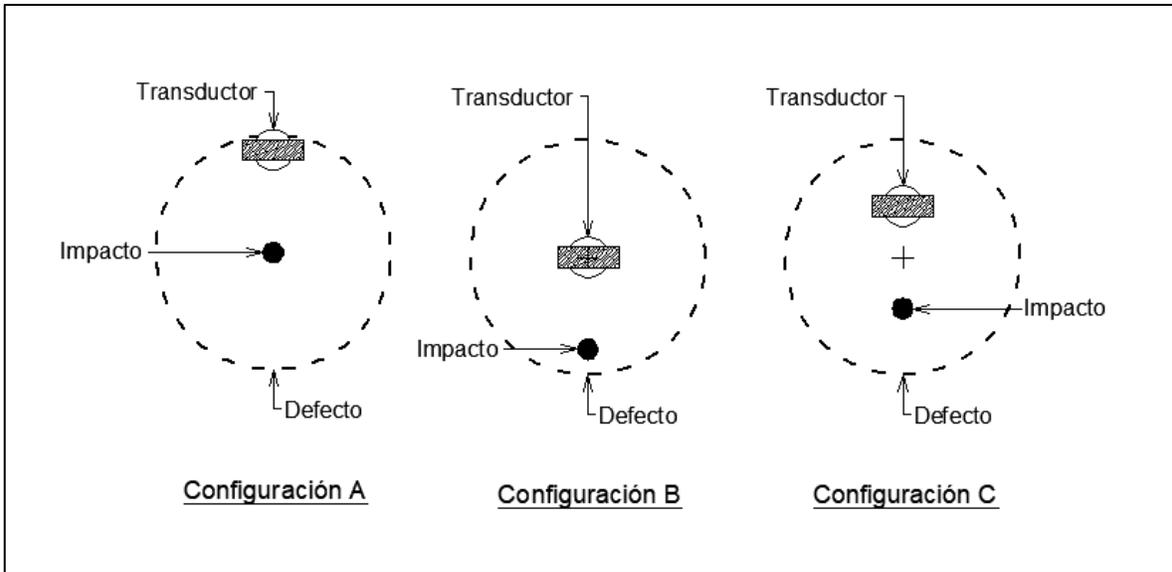


Figura 25. Configuraciones utilizadas para realizar las pruebas de impacto-eco

4.2. Ensayos de impacto-eco sobre la Losa 1

4.2.1. Medición de la velocidad de onda

Se determinó la velocidad de onda del concreto de la Losa 1 utilizando el impactor de 12,5 mm y siguiendo lo indicado en el Procedimiento B de la norma ASTM C1383-16. Dicho procedimiento establece que para casos en donde no es imperativo conocer con exactitud la velocidad de onda es permitido obtener mediante el equipo de impacto-eco la frecuencia en un punto donde el espesor es conocido y luego determinar la velocidad de onda utilizando la ecuación 1 (ver Capítulo 2. Marco teórico).

$$T = \frac{c_p}{2f} \quad (1)$$

Al realizar este procedimiento sobre la Losa 1, se obtuvo una frecuencia de 10,26 kHz en las zonas en donde el espesor es de 170 mm. De esta forma, aplicando la ecuación 1, se obtuvo una velocidad de onda de 3488 m/s.

$$2 f T = c_p$$

$$2 (10260 \text{ Hz})(0,17\text{m}) = 3488\text{m/s}$$

4.2.2. Ubicación de los puntos de prueba

En la siguiente figura se muestran los puntos en los cuales se realizaron las pruebas de impacto-eco sobre la Losa 1. Cada uno de estos puntos se ensayaron utilizando los tres tipos de impactores que se han tomado en cuenta en este proyecto: 12,5 mm, 8,0 mm y 5,0 mm.

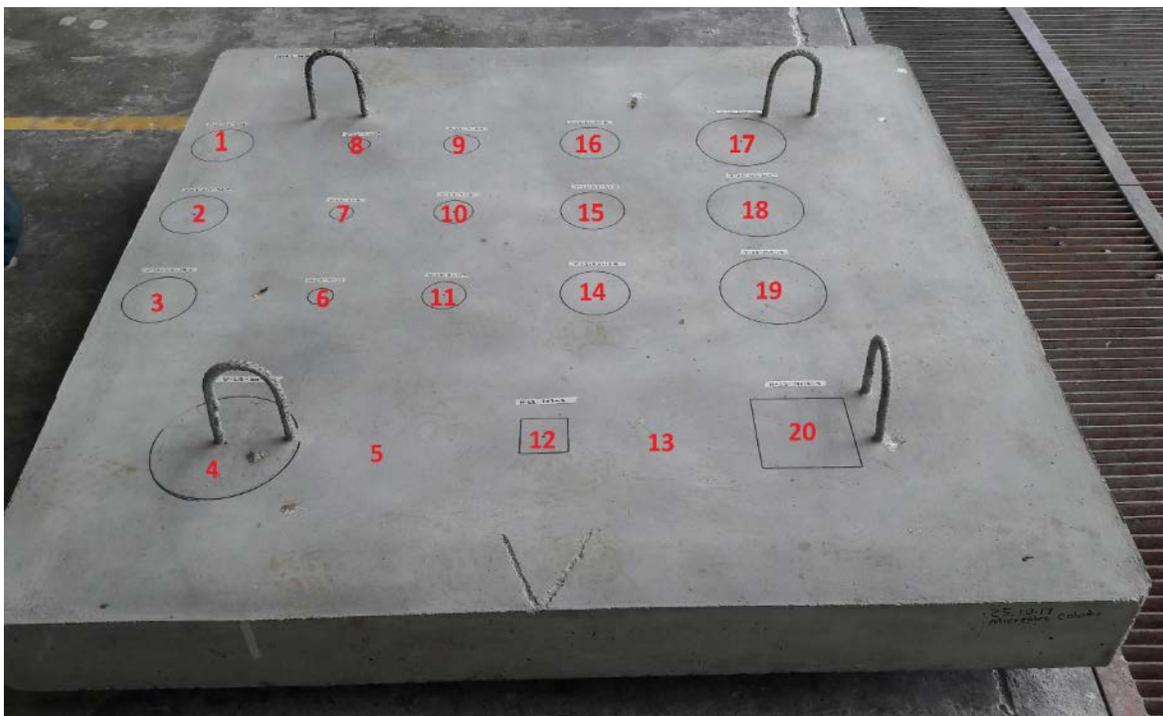


Figura 26. Ubicación de los puntos de prueba sobre la Losa 1

4.2.3. Resultados obtenidos

En cada medición realizada se obtuvo un gráfico de desplazamiento y un gráfico de frecuencia como el que se muestra en la siguiente figura. Tal y como se indicó en la sección de Marco Teórico, el pico de frecuencia muestra el momento en el cual la onda de esfuerzo P llega nuevamente a la superficie y es recibida por el transductor. Este pico permite determinar, por medio de la ecuación 1, el espesor de la losa. En ocasiones, las ondas son reflejadas varias veces y por consiguiente se obtienen varios picos de frecuencia. En estos casos el software del equipo *Viking Software v.7.3* indica el mayor pico de frecuencia.

En la siguiente figura se muestra el reporte emitido por el software para la prueba realizada sobre el punto 1 bajo la configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm. Además, en el Cuadro 7 más adelante se presentan los resultados obtenidos en todas las pruebas llevadas a cabo sobre la Losa 1.

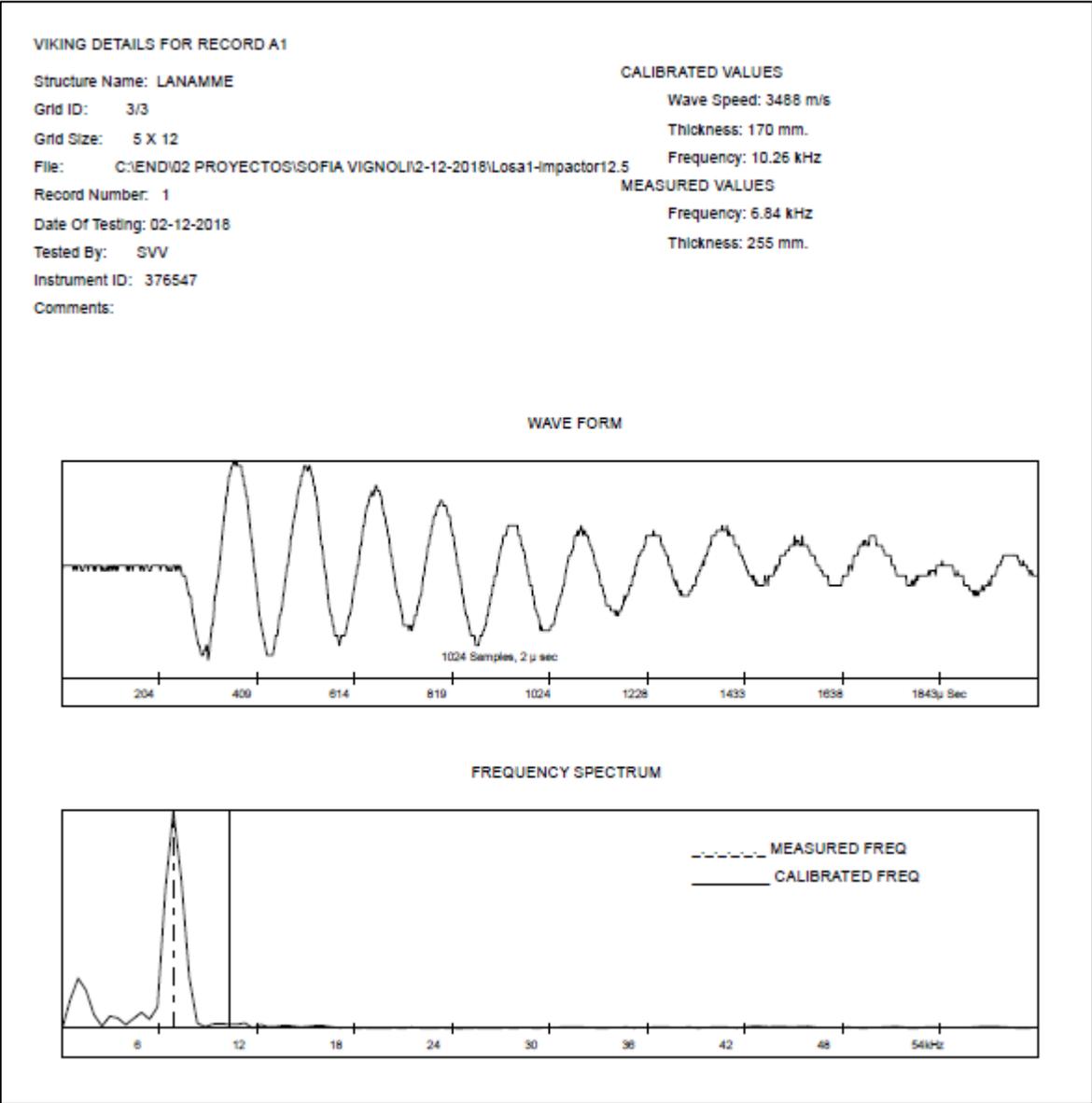


Figura 27. Reporte de medición realizada sobre la Losa 1, en el punto 1 configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm.

Cuadro 7. Resultados obtenidos para la Losa 1

Impactor (mm)			12,5		8,0		5,0		Espesor real (mm)
Punto de prueba	Configuración	Defecto ensayado	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	
1	A	V-L1-11,5-5,5 A	6.84	255	6.84	255	6.84	255	55
	B		6.84	255	6.84	255	6.84	255	
	C		6.84	255	6.84	255	6.84	255	
2	A	V-L1-11,5-9,5 A	7.33	238	7.33	238	7.33	238	95
	B		7.33	238	6.84	255	7.33	238	
	C		7.33	238	7.33	238	7.33	238	
3	A	V-L1-11,5-13 A	10.74	162	10.26	170	10.26	170	130
	B		11.23	155	11.23	155	11.23	155	
	C		10.26	170	2.93	595	10.74	162	
4	A	V-L1-20-15	12.21	143	10.74	162	12.21	143	150
	B		12.21	143	11.72	149	11.72	149	
	C		11.72	149	12.21	143	14.65	119	
5	-	Zona sin defecto	10.26	170	10.26	170	10.26	170	170
	-		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
	-		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
6	A	V-L1-4-11	10.26	170	10.26	170	10.26	170	110
	B		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
	C		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
7	A	V-L1-4-8	10.26	170	10.26	170	10.26	170	850
	B		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
	C		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
8	A	V-L1-4-3,5	10.26	170	9.76	179	10.26	170	40
	B		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
	C		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
9	A	V-L1-7-3,5	6.84	255	9.28	188	9.76	179	35
	B		6.84	255	9.28	188	9.76	179	
	C		6.84	255	9.28	188	9.76	179	
10	A	V-L1-7-8	7.33	238	9.28	188	9.28	188	80
	B		7.33	238	9.28	188	9.28	188	
	C		6.84	255	9.28	188	9.76	179	
11	A	V-L1-7-11	6.84	255	9.76	179	9.76	179	110
	B		6.84	255	9.76	179	9.76	179	
	C		6.84	255	9.28	188	9.28	188	
12	A	H-L1-7x7-7	9.76	179	9.76	179	9.76	179	70
	B		9.28	188	9.28	188	9.28	188	
	C		9.76	179	9.76	179	9.76	179	

Impactor (mm)			12,5		8,0		5,0		Espesor real (mm)
Punto de prueba	Configuración	Defecto ensayado	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	
13	-	Zona sin defecto	10.26	170	10.26	170	10.26	170	170
	-		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
	-		10.26	170	10.26	170	10.26	170	
14	A	V-L1-11,5-13 B	6.84	255	6.84	255	14.65	119	125
	B		6.84	255	6.84	255	15.63	112	
	C		6.84	255	6.84	255	15.63	112	
15	A	V-L1-11,5-9,5 B	7.33	238	7.33	238	7.33	238	95
	B		7.33	238	7.33	238	6.84	255	
	C		7.33	238	7.33	238	7.33	238	
16	A	V-L1-11,5-5,5 B	6.84	255	6.84	255	7.33	238	60
	B		6.84	255	6.84	255	7.33	238	
	C		6.84	255	6.84	255	7.33	238	
17	A	V-L1-17,5-9	4.88	357	4.88	357	4.88	357	95
	B		4.88	357	4.88	357	4.88	357	
	C		4.88	357	4.88	357	4.88	357	
18	A	V-L1-17,5-10,5	4.88	357	4.88	357	16.11	108	108
	B		4.88	357	4.88	357	4.88	357	
	C		4.88	357	4.88	357	16.6	105	
19	A	V-L1-17,5-15	2.93	595	13.18	132	11.23	155	150
	B		9.76	179	12.69	137	10.74	162	
	C		2.93	595	11.23	155	12.69	137	
20	A	H-I1-14x14-7	6.35	275	6.84	255	7.33	238	70
	B		6.84	255	6.84	255	6.84	255	
	C		6.84	255	6.84	255	6.84	255	

4.3. Ensayos de impacto-eco sobre la Losa 2

4.3.1. Medición de la velocidad de onda

Al igual que para la Losa 1, se determinó la velocidad de onda del concreto de la Losa 2 siguiendo el procedimiento B de la norma ASTM C1383-16. En las zonas en las que el espesor de la losa es de 250 mm se obtuvo una frecuencia de 7,33 kHz. Por lo tanto, se determinó que la velocidad de onda en la Losa 2 es de 3665 m/s.

4.3.2. Ubicación de los puntos de prueba

En la Losa 2 también se ensayaron 20 puntos utilizando el equipo de impacto-eco. Nuevamente, en cada uno de dichos puntos se implementaron las configuraciones A, B y C expuestas en la sección 4.1. (ver Figura 25). A continuación se muestran en la siguiente figura la ubicación de los puntos de prueba sobre la Losa 2.



Figura 28. Ubicación de los puntos de prueba sobre la Losa 2

4.3.3. Resultados obtenidos

En la Figura 29 se presenta, a modo de ejemplo, el reporte generado por el software *Viking* v.7.3. para el punto de prueba 9, configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm. Además, en el Cuadro 8 se resumen todos los resultados obtenidos sobre la Losa 2.

VIKING DETAILS FOR RECORD C1

Structure Name: LANAMME
Grid ID:
Grid Size: 5 X 12
File: C:\END\02 PROYECTOS\SOFA VIGNOLI\2-13-2018\Losa2-impactor12.5
Record Number: 25
Date Of Testing: 02-13-2018
Tested By: SVV
Instrument ID: 376547
Comments:

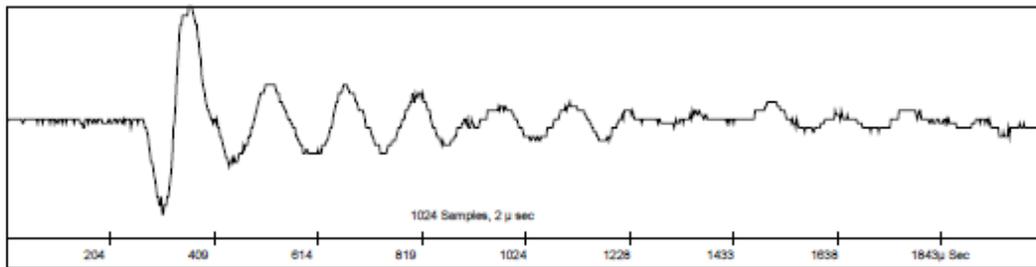
CALIBRATED VALUES

Wave Speed: 3665 m/s
Thickness: 250 mm.
Frequency: 7.33 kHz

MEASURED VALUES

Frequency: 6.84 kHz
Thickness: 268 mm.

WAVE FORM



FREQUENCY SPECTRUM

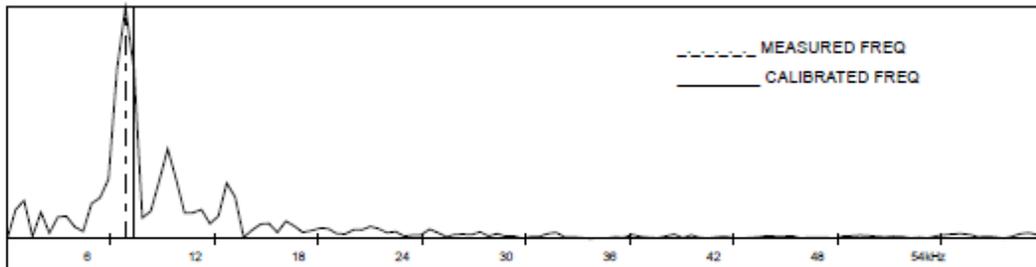


Figura 29. Reporte de medición realizada sobre la Losa 2, en el punto 9 configuración A utilizando el impactor de 12,5 mm.

Cuadro 8. Resultados obtenidos para la Losa 2

Impactor (mm)			12,5		8,0		5,0		Espesor real (mm)
Punto de prueba	Configuración	Defecto ensayado	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	
1	A	V-L2-11,5-5,5 A	5.37	341	5.37	341	5.37	341	100
	B		5.37	341	5.37	341	5.37	341	
	C		5.37	341	5.37	341	5.37	341	
2	-	Zona sin defecto	5.86	313	5.86	313	5.86	313	250
	-		5.86	313	5.86	313	5.86	313	
	-		5.86	313	5.86	313	5.86	313	
3	-	E-L2-50x50-16	5.37	341	10.74	171	11.23	163	165
	-		3.42	536	11.23	163	11.23	163	
	-		3.42	536	10.74	171	10.26	179	
4	-	E-L2-50x50-16	9.28	198	11.23	163	10.74	171	165
	-		9.28	198	9.28	198	10.74	171	
	-		9.28	198	11.23	163	10.74	171	
5	-	E-L2-50x50-16	11.23	163	11.23	163	11.23	163	165
	-		11.23	163	11.23	163	11.23	163	
	-		11.23	163	10.74	171	10.74	171	
6	-	E-L2-50x50-16	9.28	198	9.76	188	10.74	171	165
	-		9.76	188	9.76	188	10.74	171	
	-		9.76	188	9.76	188	10.26	179	
7	A	H-L2-7x7-15	6.84	268	6.84	268	7.33	250	150
	B		6.84	268	6.84	268	7.33	250	
	C		6.84	268	6.84	268	12.69	144	
8	A	V-L2-4-8	7.33	250	7.33	250	7.33	250	85
	B		7.33	250	6.84	268	7.33	250	
	C		7.33	250	6.84	268	7.81	235	
9	A	V-L2-7-8	6.84	268	6.35	289	6.35	289	82
	B		6.84	268	6.84	268	7.33	250	
	C		6.84	268	6.84	268	7.33	250	
10	-	Zona sin defecto	6.84	268	6.84	268	7.33	250	250
	-		6.84	268	6.84	268	7.81	235	
	-		6.84	268	6.84	268	7.33	250	
11	-	E-L2-50X50-20	9.28	198	10.26	179	9.28	198	200
	-		9.28	198	8.79	209	9.28	198	
	-		9.28	198	10.26	179	9.28	198	
12	-	E-L2-50X50-20	9.76	188	8.79	209	8.79	209	200
	-		1.95	940	2.44	750	8.79	209	
	-		2.44	750	9.28	198	8.79	209	

Impactor (mm)			12,5		8,0		5,0		Espesor real (mm)
Punto de prueba	Configuración	Defecto ensayado	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	Frecuencia medida (kHz)	Espesor medido (mm)	
13	-	E-L2-50X50-20	1.95	940	9.28	198	6.35	289	200
	-		9.28	198	9.28	198	9.76	188	
	-		1.95	940	8.79	209	7.33	250	
14	-	E-L2-50X50-20	9.28	198	8.79	209	9.28	198	200
	-		9.28	198	8.79	209	9.76	188	
	-		9.28	198	8.79	209	9.28	198	
15	A	H-L2-7x21-15	6.35	289	6.35	289	6.35	289	150
	B		6.84	268	6.84	268	12.69	144	
	C		6.84	268	6.35	289	12.69	144	
16	A	V-L2-11,5-9,5 B	5.86	313	5.86	313	5.86	313	95
	B		6.35	289	6.35	289	5.86	313	
	C		6.35	289	5.86	313	5.86	313	
17	A	V-L2-17,5-10,5	4.88	375	4.88	375	4.88	375	110
	B		4.88	375	4.88	375	4.88	375	
	C		4.88	375	4.88	375	4.88	375	
18	-	Zona sin defecto	7.33	250	7.33	250	7.33	250	250
	-		7.33	250	7.33	250	7.33	250	
	-		7.33	250	7.33	250	7.33	250	
19	-	Zona sin defecto	7.33	250	7.33	250	7.81	235	250
	-		7.33	250	7.33	250	7.81	235	
	-		7.33	250	7.33	250	7.33	250	
20	-	Zona sin defecto	7.33	250	7.33	250	7.81	235	250
	-		7.33	250	7.33	250	7.81	235	
	-		6.84	268	6.84	268	7.81	235	



Figura 30. Proceso de realización de pruebas de impacto-eco

Capítulo 5. Análisis de Resultados

5.1. Velocidad de onda

Al medir la velocidad de la onda P en el concreto de ambas losas se obtuvo un valor de 3488 m/s para la Losa 1 y un valor de 3665 m/s para la Losa 2. Como es evidente, se obtuvo diferentes valores para cada losa, aun cuando se utilizó el mismo tipo de concreto. Según la Agencia Internacional de Energía Atómica, (International Atomic Energy Agency, 2002) la velocidad de onda se ve afectada por numerosos factores tales como el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la cantidad y tipo de aditivos, el tipo y tamaño de agregado, las condiciones de curado y la resistencia y edad del concreto. La diferencia entre las velocidades puede estar relacionada con alguna pequeña variabilidad entre los factores anteriores en las dos losas. Sin embargo, en concretos de densidad normal, la velocidad de las ondas de esfuerzo generalmente se encuentra entre los 3000m/s y los 4500 m/s (Malhotra y Carino, 2004). Por lo tanto, se considera que los valores obtenidos son adecuados ya que se encuentran comprendidos entre los límites indicados en la literatura para este tipo de material.

5.2. Configuración de ubicación del impactor y el transductor

Como se explicó anteriormente, en los puntos en donde se ubica cada defecto intencional se realizaron tres pruebas de impacto-eco utilizando diferentes configuraciones de ubicación del impactor y el transductor, las cuales se explican en la Sección 4.1. y se muestran en la Figura 25.

Para analizar si dichas configuraciones tienen algún efecto sobre los resultados obtenidos, se calculó el espesor promedio y la desviación estándar para las tres mediciones tomadas con un impactor en cada defecto. Estos resultados se presentan en el Cuadro 9 y el Cuadro 10 para las Losas 1 y 2 respectivamente. En este análisis se omitieron los puntos en los cuales no hay defectos intencionales ya que en estos puntos no es posible estudiar el efecto de las tres configuraciones.

Cuadro 9. Espesor promedio y desviación estándar para los defectos de la Losa 1

Impactor (mm)		12.5		8.0		5.0	
Punto de prueba	Defecto ensayado	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
1	V-L1-11,5-5,5 A	255.0	0.0	255.0	0.0	255.0	0.0
2	V-L1-11,5-9,5 A	238.0	0.0	243.7	8.0	238.0	0.0
3	V-L1-11,5-13 A	162.3	6.1	306.7	204.0	162.3	6.1
4	V-L1-20-15	145.0	2.8	151.3	7.9	137.0	13.0
6	V-L1-4-11	170.0	0.0	170.0	0.0	170.0	0.0
7	V-L1-4-8	170.0	0.0	170.0	0.0	170.0	0.0
8	V-L1-4-3,5	170.0	0.0	173.0	4.2	170.0	0.0
9	V-L1-7-3,5	255.0	0.0	188.0	0.0	179.0	0.0
10	V-L1-7-8	243.7	8.0	188.0	0.0	185.0	4.2
11	V-L1-7-11	255.0	0.0	182.0	4.2	182.0	4.2
12	H-L1-7x7-7	182.0	4.2	182.0	4.2	182.0	4.2
14	V-L1-11,5-13 B	255.0	0.0	255.0	0.0	114.3	3.3
15	V-L1-11,5-9,5 B	238.0	0.0	238.0	0.0	243.7	8.0
16	V-L1-11,5-5,5 B	255.0	0.0	255.0	0.0	238.0	0.0
17	V-L1-17,5-9	357.0	0.0	357.0	0.0	357.0	0.0
18	V-L1-17,5-10,5	357.0	0.0	357.0	0.0	190.0	118.1
19	V-L1-17,5-15	456.3	196.1	141.3	9.9	151.3	10.5
20	H-L1-14x14-7	261.7	9.4	255.0	0.0	249.3	8.0

Cuadro 10. Espesor promedio y desviación estándar para los defectos de la Losa 2

Impactor		12.5		8.0 mm		5.0 mm	
Punto de prueba	Defecto ensayado	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)
1	V-L2-11,5-5,5 A	341.0	0.0	341.0	0.0	341.0	0.0
7	H-L2-7x7-15	268.0	0.0	268.0	0.0	214.7	50.0
8	V-L2-4-8	250.0	0.0	262.0	8.5	245.0	7.1
9	V-L2-7-8	268.0	0.0	275.0	9.9	263.0	18.4
15	H-L2-7x21-15	275.0	9.9	282.0	9.9	192.3	68.4
16	V-L2-11,5-9,5 B	297.0	11.3	305.0	11.3	313.0	0.0
17	V-L2-17,5-10,5	375.0	0.0	375.0	0.0	375.0	0.0

De los resultados anteriores se puede observar que en la mayoría de los casos las tres configuraciones de ubicación del impactor y el transductor arrojan resultados similares, ya

que las desviaciones estándar obtenidas son bajas (menos de 2,0 cm). Estos casos representan el 93% de las mediciones estudiadas. Por esta razón, se considera que la elección de una configuración no altera en gran medida el resultado y por lo tanto, no es un factor significativo.

En el 7% restante de los puntos se obtuvo diferencias importantes entre los resultados de las mediciones para un mismo defecto con un mismo impactor. Estos valores se resaltan en amarillo en los Cuadro 9 y el Cuadro 10 y corresponden a defectos con las mayores dimensiones.

Si se comparan estos resultados con los datos del Cuadro 7 y del Cuadro 8, se puede observar que en todos los casos una o dos de las mediciones arrojaron un valor cercano al espesor real y en las mediciones restantes se obtuvo valores mayores. Esto sugiere que en los casos en los que se detectó un valor cercano al real, la onda de esfuerzo P rebotó completamente con el defecto. Por el contrario, en los otros casos, la onda probablemente bordeó el defecto y, por lo tanto, se midió un mayor espesor que el real.

Sin embargo, no es posible concluir cuál de las configuraciones estudiadas es la más exacta ya que los resultados cuyo valor es más cercano al espesor real se dieron utilizando las configuraciones todas las tres configuraciones estudiadas: A, B y C. Lo anterior se muestra en el siguiente cuadro (Cuadro 11), en donde se resumen los puntos en los cuales se calcularon desviaciones estándar importantes y en amarillo se resaltan los espesores medidos con los valores más cercanos al espesor real.

Cuadro 11. Puntos con diferencias importantes entre los resultados de las mediciones para un mismo defecto con un mismo impactor

Losa	Punto de prueba	Defecto ensayado	Impactor (mm)	Desviación estándar (mm)	Configuración	Espesor medido	Espesor real
Losa 1	3	V-L1-11,5-13 A	8.0	204.0	A	170	130
					B	155	
					C	595	
	18	V-L1-17,5-10,5	5.0	118.1	A	108	108
					B	357	
					C	105	
19	V-L1-17,5-15	12.5	196.1	A	595	150	
				B	179		
				C	595		
Losa 2	7	H-L2-7x7-15	5	50	A	250	150
					B	144	
					C	250	
	15	H-L2-7x21-15	5	68.4	A	289	150
					B	144	
					C	144	

5.3. Tamaño del impactor vs tamaño del defecto y profundidad

Mediante las pruebas realizadas también es posible analizar la capacidad que tienen los tres impactores utilizados para detectar defectos dependiendo de su dimensión lateral máxima y la profundidad en la que están ubicados. Para esto, se utilizó como base los límites de detección encontrados en la literatura para cada diámetro del impactor; específicamente los límites establecidos en el Manual de Usuario del Docter Impact-Eco de la empresa Germann Instruments Inc. Lo anterior se explicó en detalle la Sección 2.2.3. de este proyecto y se resume en el Cuadro 1. Además, en el siguiente cuadro se vuelve a presentar la información del Cuadro 1 pero únicamente para los tres impactores utilizados.

Cuadro 12. Límites de detección para los impactores estudiados.

Diámetro del impactor D (mm)	Tiempo de contacto t_c (μs)	Frecuencia útil máxima f_{max} (kHz)	Longitud de onda mínima λ_{min} (mm)	Longitud lateral de defecto mínima L (mm)	Mínima profundidad de defecto con tamaño L d_{min} (mm)	Máxima profundidad de defecto con tamaño L d_{max} (mm)
5	22	57	70	70	35	280
8	35	36	111	111	56	444
12,5	55	23	175	175	88	700

Fuente: Germann Instruments, Inc., 2013

En los resultados obtenidos se observó únicamente tres tendencias. La primera es que el valor obtenido es igual o sumamente cercano al espesor real de la losa de prueba. La segunda tendencia consiste en que el valor medido es considerablemente mayor a la profundidad del defecto y al espesor real del elemento. La tercera tendencia es que el espesor medido es cercano al valor real de profundidad del defecto, dentro de un rango de aproximadamente ± 20 mm. A partir de las tendencias anteriores y con la idea de corroborar lo establecido en la literatura, se establecieron tres criterios para valorar los resultados obtenidos, los cuales son:

- No detectó el defecto
- Bordeó el defecto
- Detectó el defecto

Se dice que el impacto-eco no detectó el defecto cuando se obtuvo un valor de espesor igual al de las losas; es decir, 170 mm en el caso de la Losa 1 y 250 mm en el caso de la Losa 2. Por otro lado, cuando se obtuvo una medición con un valor considerablemente mayor al espesor de la losa, se consideró que el impacto-eco bordeó el defecto. En estos casos, la onda viajó desde el punto de impacto, bordeó el defecto, rebotó en la superficie inferior, bordeó nuevamente el defecto y llegó al punto de partida donde fue recibida por el transductor. Evidentemente el tiempo que transcurre desde el impacto hasta la llegada de la onda es mayor que si no hubiera defecto, por lo que el equipo mide un espesor mayor al real.

Por último, en los casos en los cuales se obtuvo una medición de espesor igual o similar al espesor real (con una variación de aproximadamente ± 20 mm), se consideró que el impacto-eco sí detectó el defecto ya que la onda rebotó con algún material antes de alcanzar la superficie inferior de la losa.

En el Cuadro 13 y el Cuadro 14 se clasifican los resultados obtenidos para cada defecto con cada impactor utilizando como base los criterios mencionados anteriormente. Para este análisis se omitieron los defectos que se encuentran cercanos a los bordes de los elementos ya que estos pueden estar gobernados por el efecto frontera (cuyo efecto se estudia más adelante) y los puntos con diferente espesor ya que estos tienen un tamaño lateral considerablemente mayor al de los defectos de tipo delaminación y hormiguero.

Cuadro 13. Condición de detección identificada para defectos de la Losa 1

Defecto ensayado	Longitud lateral max de defecto (mm)	Profundidad de defecto (cm)	Condición identificada		
			Impactor 12,5 mm	Impactor 8,0 mm	Impactor 5,0 mm
V-L1-20-15	200	150	Detectó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
			Detectó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
			Detectó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
V-L1-4-11	40	110	No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
V-L1-4-8	40	850	No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
V-L1-4-3,5	40	40	No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
V-L1-7-3,5	70	35	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-7-8	70	80	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-7-11	70	110	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
H-L1-7x7-7	70	70	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto

Defecto ensayado	Longitud lateral max de defecto (mm)	Profundidad de defecto (cm)	Condición identificada		
			Impactor 12,5 mm	Impactor 8,0 mm	Impactor 5,0 mm
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-11,5-13 B	115	125	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
V-L1-11,5-9,5 B	115	95	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-11,5-5,5 B	115	60	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-17,5-9	175	95	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L1-17,5-10,5	175	108	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
V-L1-17,5-15	175	155	Bordeó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
			Detectó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Detectó el defecto	Detectó el defecto
H-I1-14x14-7	140	70	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto

Cuadro 14. Condición de detección identificada para defectos de la Losa 2

Defecto ensayado	Longitud lateral max de defecto (mm)	Profundidad de defecto (cm)	Condición identificada		
			Impactor 12,5 mm	Impactor 8,0 mm	Impactor 5,0 mm
H-L2-7x7-15	70	150	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
V-L2-4-8	40	85	No detectó el defecto	No detectó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	Bordeó el defecto	No detectó el defecto
			No detectó el defecto	Bordeó el defecto	No detectó el defecto
V-L2-7-8	70	82	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	No detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	No detectó el defecto
H-L2-7x21-15	210	150	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Detectó el defecto
V-L2-11,5-9,5 B	115	95	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
V-L2-17,5-10,5	175	110	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto
			Bordeó el defecto	Bordeó el defecto	Bordeó el defecto

De los cuadros anteriores se puede observar que para todos los defectos de menor tamaño (40 mm) el impacto-eco no fue capaz de detectar la presencia de los defectos. Esto concuerda con lo establecido en la literatura ya que el menor tamaño identificable por los impactores es de 70 mm para el caso del impactor de 5,0 mm.

Por otro lado, el defecto de mayor tamaño (de 200 mm) fue detectado correctamente por todos los impactores. Esto también concuerda con lo establecido en la literatura, ya que la longitud lateral de defecto mínima identificable para los tres impactores es menor que 200 mm.

Para los defectos restantes, se obtuvo resultados distintos con los tres impactores utilizados. En general y como era de esperarse, se observó tanto en la Losa 1 como en la Losa 2, entre menor es el tamaño del impactor mayor cantidad de defectos este logró detectar correctamente.

Sin embargo, no todos los resultados obtenidos fueron los esperados. En muchos casos en los que se esperaba que un impactor lograra detectar un defecto midiendo su profundidad real, no fue así. Un ejemplo de esto, es el caso del defecto V-L1-17,5-9 cuya dimensión lateral es de 175 mm y no fue posible medir su profundidad real con los impactores de 8,0 y 5,0 mm.

A continuación se listan todos los defectos en los que, a partir de sus dimensiones laterales y su ubicación, se indica en la literatura que debía poder detectarse su profundidad real con alguno de los impactores pero que no fue así en los resultados obtenidos durante las pruebas.

- V-L1-7-3,5 con el impactor de 5,0 mm*
- V-L1-7-8 con el impactor de 5,0 mm*
- V-L1-7-11 con el impactor de 5,0 mm*
- H-L1-7x7-7 con el impactor de 5,0 mm
- V-L1-11,5-13B con el impactor de 8,0 mm*
- V-L1-11,5-9,5B con el impactor de 5,0 mm y 8,0 mm*
- V-L1-11,5-5,5B con el impactor de 5,0 mm y 8,0 mm*
- V-L1-17,5-9 con el impactor de 5,0 mm, 8,0 mm y 12,5 mm*
- V-L1-17,5-10,5 con el impactor de 8,0 mm*
- H-L1-14x14-7 con el impactor de 5,0 y 8,0 mm*
- H-L2-7x7-15 con el impactor de 5,0 mm
- V-L2-7-8 con el impactor de 5,0 mm
- H-L2-7x21-15 con el impactor de 8,0 mm y 12,5 mm
- V-L2-11,5-9,5 B con el impactor de 5,0 mm y 8,0 mm*
- V-L2-17,5-10,5 con el impactor de 5,0 mm, 8,0 mm y 12,5 mm*

En los casos anteriores señalados con un asterisco, los resultados arrojaron valores mayores al espesor real, lo que indica que la onda de esfuerzo bordeó el defecto. De esta forma, el método de impacto-eco dio indicios de la presencia de un defecto pero no fue capaz de medir correctamente su profundidad.

Lo anterior puede parecer una desventaja del método; sin embargo, también se observó lo contrario. En algunos casos en los que se esperaba que algún impactor fuera totalmente

incapaz de detectar un defecto debido a sus dimensiones laterales o a su profundidad, se observó que el método bordeó el defecto. Esto permite deducir la presencia de alguna discontinuidad interna aun cuando no es posible conocer su profundidad real.

Los defectos en los cuales se pronosticaba que ciertos impactores no eran capaces de detectarlos pero que durante las pruebas se determinó que las ondas emitidas bordearon el defecto son los siguientes:

- V-L1-7-3,5 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- V-L1-7-8 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- V-L1-7-11 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- H-L1-7x7-7 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- V-L1-11,5-13 B con el impactor de 12,5 mm
- V-L1-11,5-9,5 B con el impactor de 12,5 mm
- V-L1-11,5-5,5 B con el impactor de 12,5 mm
- H-L1-14x14-7 con el impactor de 12,5 mm
- H-L2-7x7-15 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- V-L2-4-8 con el impactor de 8,0 mm
- V-L2-7-8 con el impactor de 12,5 mm y 8,0 mm
- V-L2-11,5-9,5 B con el impactor de 12,5 mm

Lo anterior puede ser considerado una ventaja ya que, aun cuando no se pudo determinar la profundidad real de un defecto interno, si se obtiene un espesor mayor al real se puede deducir la presencia de dicho defecto lo cual permite conocer de forma cualitativa la condición de un elemento de concreto.

Además, se determinó que en los casos en los que la onda del impacto-eco bordeó la discontinuidad interna, los resultados fueron constantes al utilizar diferentes configuraciones de ubicación de transductor e impactor y de impactores. Por esta razón, se sugiere que al realizar pruebas sobre un punto se utilicen los tres impactores y si se obtiene resultados de espesores mayores al real de forma constante, se establezca que existe la presencia de algún defecto interno.

Por otro lado, es importante recalcar que con el método de impacto-eco sí fue posible determinar la presencia de los dos tipos de defectos internos estudiados: delaminaciones

(construidos con discos de poliestireno) y hormigueros (construidos con bloques de concreto permeables forrados con plástico).

5.4. Medición de espesores

Con el fin de analizar la capacidad del método de impacto-eco para determinar correctamente el espesor de un elemento, se estudiaron las mediciones obtenidas en los puntos de prueba en los cuales no hay defectos intencionales y los puntos de prueba en los cuales se construyó un cambio de espesor utilizando poliestireno expandido. Estos puntos de prueba se resumen en el Cuadro 15. Además, en el mismo cuadro se presenta el espesor real en cada punto y los espesor medidos promedio y la desviación estándar de las mediciones con cada impactor en cada punto de prueba. En este análisis se excluyó el punto de prueba 2 de la Losa 2, ya que éste está también bajo la influencia del efecto frontera.

Cabe destacar que las zonas con espesores menores a los de la losa, se pueden considerar como defectos de gran tamaño (500mm x 500 mm) y, debido a sus dimensiones y profundidad, deberían ser detectados por todos los impactores. En la sección anterior, se estudió el caso de defectos cuyas dimensiones y profundidad son las mínimas detectables para ciertos impactores. Para el caso específico de losas de puentes, se espera que existan daños que se extiendan sobre grande áreas y no solamente sobre área puntuales. En estos casos, el tipo de defecto representa prácticamente un cambio de espesor. De esta forma, el estudio de la medición de espesores resulta también válido para detectar defectos de grandes dimensiones laterales, los cuales pueden estar presentes en losas de concreto de puentes.

Cuadro 15. Resultados para la medición de espesores en ambas losas

Impactor			12,5 mm		8,0 mm		5,0 mm		Espesor real (mm)
Losa	Punto de prueba	Defecto ensayado	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Espesor promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	
1	5	Zona sin defecto	170	0	170	0	170	0	170
	13	Zona sin defecto	170	0	170	0	170	0	170
2	3	E-L2-50x50-16	471	92	168	4	168	8	165
	4	E-L2-50x50-16	198	0	175	16	171	0	165
	5	E-L2-50x50-16	163	0	166	4	166	4	165
	6	E-L2-50x50-16	191	5	188	0	174	4	165
	10	Zona sin defecto	268	0	268	0	245	7	250
	11	E-L2-50X50-20	198	0	189	14	198	0	200
	12	E-L2-50X50-20	626	319	386	258	209	0	200
	13	E-L2-50X50-20	693	350	202	5	242	42	200
	14	E-L2-50X50-20	198	0	209	0	195	5	200
	18	Zona sin defecto	250	0	250	0	250	0	250
	19	Zona sin defecto	250	0	250	0	240	7	250
	20	Zona sin defecto	256	8	256	8	235	0	250

En el Cuadro 15 anterior, se resaltó en amarillo los puntos en los que se evidenció que el espesor promedio, medido utilizando las tres configuraciones de transductor e impactor, tiene una diferencia importante con respecto al valor del espesor real. Estos casos representan un 9.5% del total de los casos. De lo anterior, se puede determinar que, en general, el método de impacto-eco resulta bastante adecuado para medir espesores de elementos. Si bien es cierto que algunas mediciones difieren del valor real, en la mayoría de los casos (90,5%) los espesores medidos son cercanos al espesor real, con una diferencia máxima de 42 mm.

Con respecto a la medición de espesores, en general se observaron dos tendencias. Primero que todo, se observó que entre más pequeño es el diámetro del impactor, más similares son los resultados obtenidos con el espesor real. Esto se ilustra gráficamente en las siguientes tres figuras. En la Figura 31, la Figura 32 y la Figura 33 se presenta la tendencia

del espesor medido promedio y del espesor real para cada defecto utilizando los impactores de 12,5 mm, 8,0 mm y 5,0 mm respectivamente.

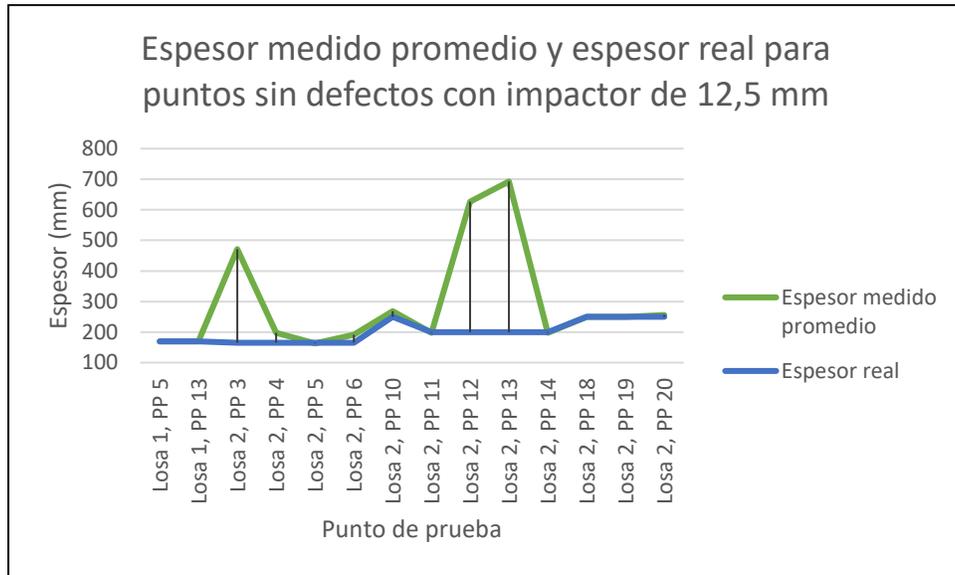


Figura 31. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 12,5 mm

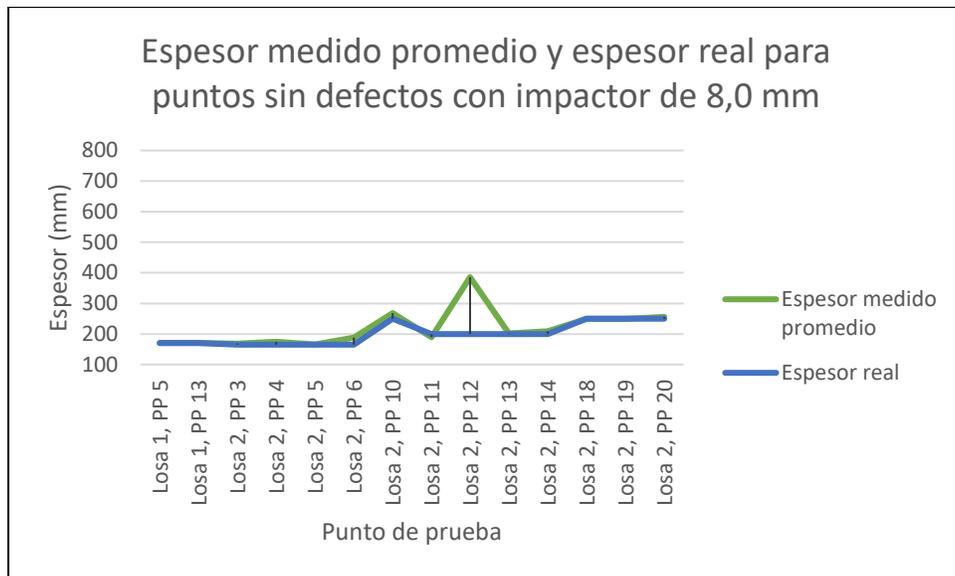


Figura 32. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 8,0 mm

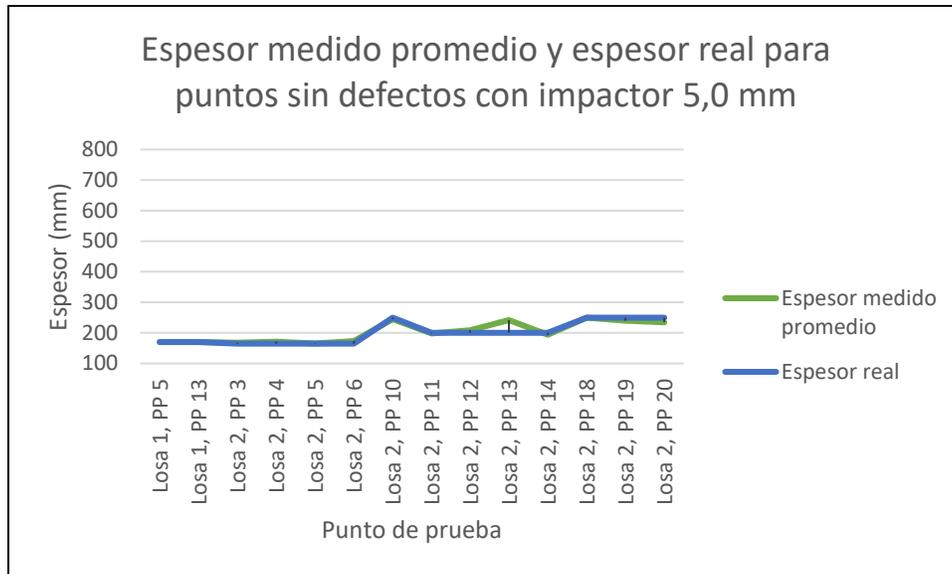


Figura 33. Tendencia del espesor medido promedio y el espesor real para puntos sin defecto intencionales utilizando el impactor de 5,0 mm

En la Figura 31 se observa que cuando se utilizó el impactor de 12,5 mm en tres puntos de prueba los valores medidos resultaron considerablemente distintos a los espesores reales. Por otro lado, en la Figura 32 se muestra solo un pico en donde hay una diferencia importante entre el valor real y el medido. Por último, en la Figura 33 la tendencia del espesor medido promedio y el espesor real se mantiene bastante similar en todos los puntos de prueba. Por esta razón, se considera que entre menor es el tamaño del impactor mejores son los resultados obtenidos, siendo el impactor de 5,0 mm el más exacto de todos.

La segunda tendencia determinada para la medición de espesores utilizando impactor-eco, es que entre mayor es el diámetro del impactor, mayor es la diferencia entre medidas para un mismo punto usando un mismo impactor. Esto se puede comprender mediante el uso de la desviación estándar para las mediciones realizadas en un mismo punto con un mismo impactor, que se presentan en el Cuadro 15. En la siguiente figura se grafica la desviación estándar para las mediciones tomadas en un mismo punto con un mismo impactor.

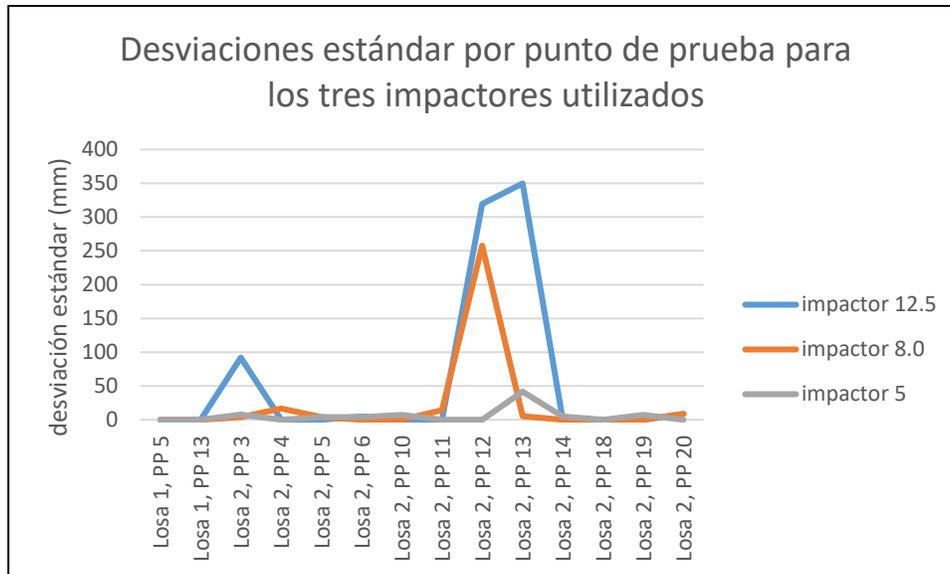


Figura 34. Desviaciones estándar por punto de prueba para los tres impactores utilizados

Evidentemente, la condición más deseable es que la desviación estándar de las mediciones tenga un valor cercano a cero, ya que esto implica que los resultados son constantes. Sin embargo, del gráfico se puede observar que esto no fue así en todos los casos. Para el impactor mayor de 12,5 mm se observaron mayores desviaciones estándar y mayor cantidad distinta de cero. Por el contrario, para el impactor menor de 5,0 mm presenta una tendencia en la cual las desviaciones estándar son prácticamente nulas. Por su parte, el impactor de 8,0 mm muestra un comportamiento intermedio. Por esta razón, se puede considerar que cuando se mide el espesor de un elemento, entre menor es el diámetro del impactor, mayor es la precisión de sus mediciones.

Si bien el impactor de 5,0 mm resultó ser el más preciso y exacto a la hora de medir espesores de elementos de concreto, su uso también supone un inconveniente. Durante la realización de las pruebas se determinó que era más difícil generar una señal adecuada con este impactor, ya que el golpe sobre la superficie es más suave y por tanto la onda de esfuerzo es más tenue. En ocasiones incluso, el transductor no era capaz de detectar la señal generada con el impacto de 5,0 mm; especialmente en la losa de mayor espesor (Losa 2).

Por esta razón, se recomienda que para medir espesores utilizando impacto-eco, para un mismo punto se realicen pruebas utilizando los tres impactores distintos. Se recomienda

iniciar con el impactor de mayor tamaño y proseguir disminuyendo gradualmente el tamaño de los impactores. Para el resultados final, se debe tomar en cuenta que entre menor sea el tamaño del impacto más precisos y exactos son los resultados.

5.5. Efecto frontera

Con el fin de analizar el impacto del “efecto frontera” (ver Capítulo 2. Marco Teórico), se estudiaron los resultados obtenidos sobre los puntos de prueba que se encuentran ubicados cerca del borde de cada losa. Específicamente, se estudiaron los puntos que se ubican a una distancia menor a 17 cm desde el borde en la Losa 1 y a una distancia menor a 25 cm desde el borde en la Losa 2. En la Losa 1 dichos puntos corresponden a tres defectos. En la Losa 2, corresponden a un defecto y una zona sana. En el Cuadro 16 se listan dichos defectos y se resumen sus propiedades y los resultados obtenidos.

Cuadro 16. Defectos afectados por el efecto frontera

Losa	Punto de prueba	Configuración	Defecto ensayado	Impactor de 12,5 mm	Impactor de 8,0 mm	Impactor 5.0	Espesor real
Losa 1	1	A	V-L1-11,5-5,5 A	255	255	255	55
		B		255	255	255	
		C		255	255	255	
	2	A	V-L1-11,5-9,5 A	238	238	238	95
		B		238	238	238	
		C		238	238	238	
	3	A	V-L1-11,5-13 A	162	162	170	130
		B		155	155	155	
		C		170	170	162	
Losa 2	1	A	V-L2-11,5-5,5 A	341	341	341	100
		B		341	341	341	
		C		341	341	341	
	2	-	Zona sin defecto	313	313	313	250
		-		313	313	313	
		-		313	313	313	

A continuación en la Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39 se demuestra gráficamente la diferencia entre los espesores medidos y el espesor real en cada punto de prueba.

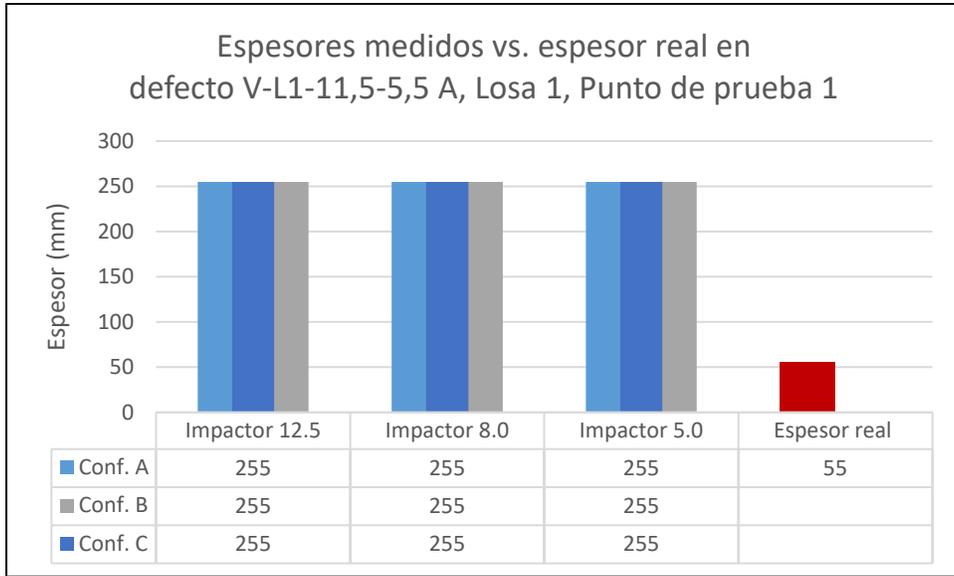


Figura 35. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-5,5 A, Losa 1, punto de prueba 1

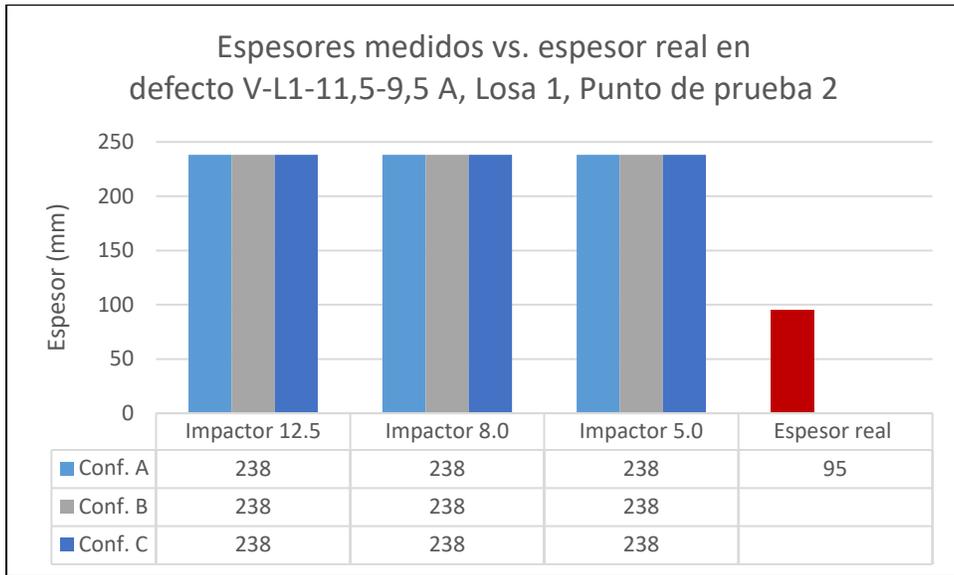


Figura 36. Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-9,5 A, Losa 1, Punto de prueba 2

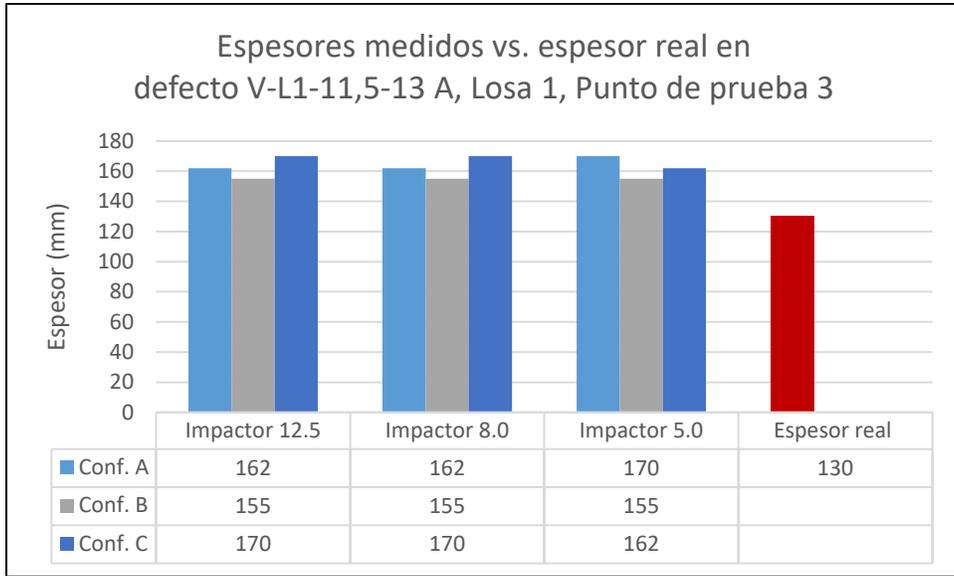


Figura 37. *Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L1-11,5-13 A, Losa 1, Punto de prueba 3*

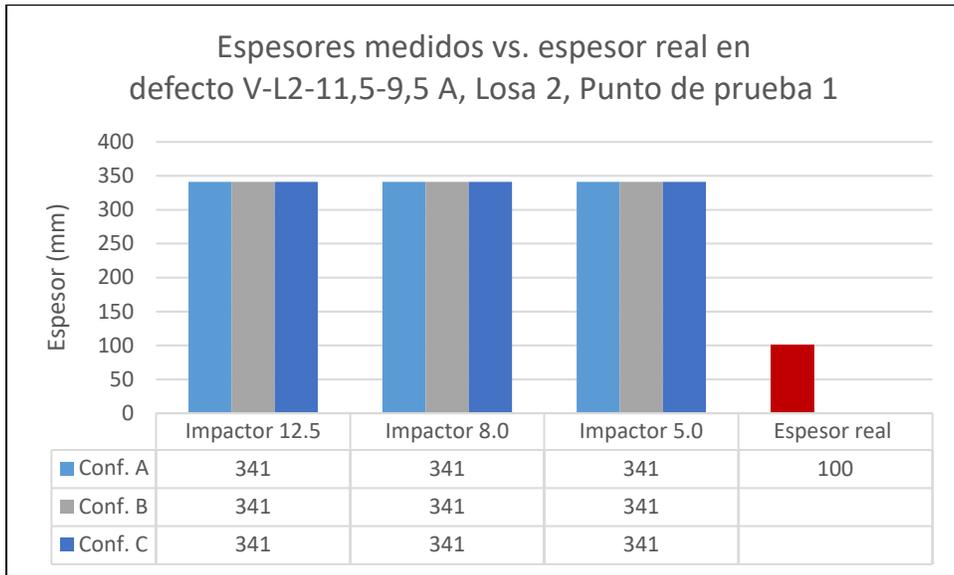


Figura 38. *Espesores medidos vs. espesor real en defecto V-L2-11,5-5,5 A, Losa 2, Punto de prueba 1*

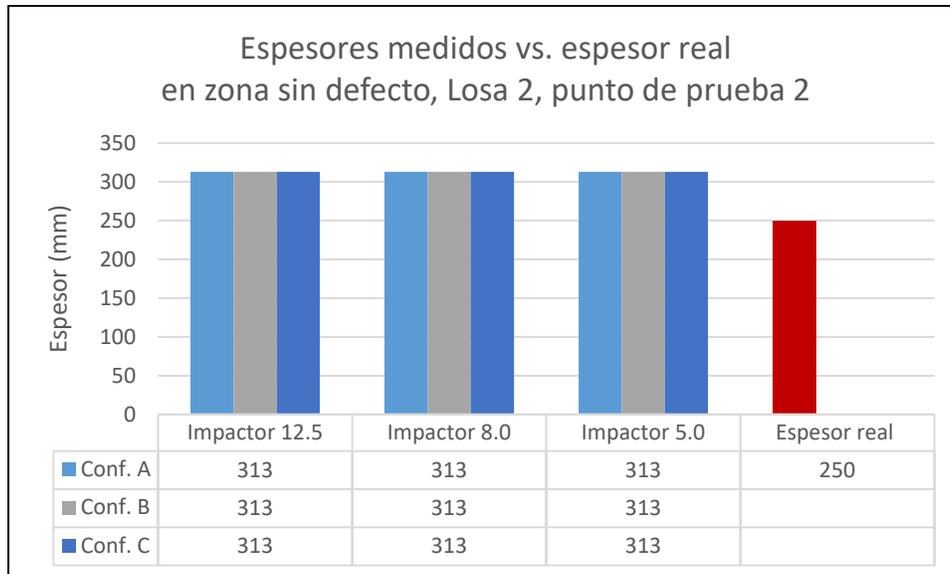


Figura 39. Espesores medidos vs. espesor real en zona sin defecto, Losa 2, punto de prueba 2

Como se puede observar en las figuras anteriores, en los cinco puntos de prueba existe una diferencia considerable entre los espesores medidos y el espesor real del elemento. Además, se demuestra que en todos los casos los espesores medidos son mayores que el espesor real.

Lo anterior podría indicar erróneamente que la onda de esfuerzo detectó el defecto y lo bordeó, obteniendo así espesores mayores al real. Sin embargo, se infiere que esto no es así por dos razones. Primero, porque con los tres tipos de impactores se obtuvo resultados iguales o muy similares, aun cuando los defectos tienen una dimensión lateral de 11,5 cm y podrían ser detectados por el impactor de menor tamaño. Segundo, porque incluso en la zona sana se observó el mismo comportamiento. Por esta razón, se concluye que en las zonas ubicadas a una distancia menor al espesor del elemento, se da una reflexión de la onda que interfiere con la onda original y suele generar errores en las mediciones.

5.6. Efecto del acero de refuerzo

Para analizar el efecto del acero de refuerzo, se compararon los defectos que son iguales en las Losas 1 y 2. Estos defectos corresponden a los siguientes:

- V-L1-4-8 y V-L2-4-8

- V-L1-7-8 y V-L2-7-8
- V-L1-11,5-9,5B y V-L2-11,5-9,5B
- V-L1-17,5-10,5 y V-L2-17,5-10,5

Para los defectos anteriores, se determinaron las condiciones identificadas de la misma forma que se realizó en la Sección 5.3. Los resultados se muestran en los siguientes tres cuadros.

Cuadro 17. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 12,5 mm

Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada	Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada
V-L1-4-8	170	No detectó el defecto	V-L2-4-8	250	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		250	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		250	No detectó el defecto
V-L1-7-8	238	Bordeó el defecto	V-L2-7-8	268	No detectó el defecto
	238	Bordeó el defecto		268	No detectó el defecto
	255	Bordeó el defecto		268	No detectó el defecto
V-L1-11,5-9,5 B	238	Bordeó el defecto	V-L2-11,5-9,5 B	313	Bordeó el defecto
	238	Bordeó el defecto		289	Bordeó el defecto
	238	Bordeó el defecto		289	Bordeó el defecto
V-L1-17,5-10,5	357	Bordeó el defecto	V-L2-17,5-10,5	375	Bordeó el defecto
	357	Bordeó el defecto		375	Bordeó el defecto
	357	Bordeó el defecto		375	Bordeó el defecto

Cuadro 18. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 8,0 mm

Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada	Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada
V-L1-4-8	170	No detectó el defecto	V-L2-4-8	250	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		268	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		268	No detectó el defecto
V-L1-7-8	188	No detectó el defecto	V-L2-7-8	289	Bordeó el defecto
	188	No detectó el defecto		268	No detectó el defecto
	188	No detectó el defecto		268	No detectó el defecto
V-L1-11,5-9,5 B	238	Bordeó el defecto	V-L2-11,5-9,5 B	313	Bordeó el defecto
	238	Bordeó el defecto		289	Bordeó el defecto
	238	Bordeó el defecto		313	Bordeó el defecto
V-L1-17,5-10,5	357	Bordeó el defecto	V-L2-17,5-10,5	375	Bordeó el defecto
	357	Bordeó el defecto		375	Bordeó el defecto
	357	Bordeó el defecto		375	Bordeó el defecto

Cuadro 19. Comparación de las condiciones identificadas para defectos en la Losa 1 y Losa 2 utilizando el impactor de 5,0 mm

Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada	Defecto ensayado	Espesor medido (mm)	Condición identificada
V-L1-4-8	170	No detectó el defecto	V-L2-4-8	250	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		250	No detectó el defecto
	170	No detectó el defecto		235	No detectó el defecto
V-L1-7-8	188	No detectó el defecto	V-L2-7-8	289	No detectó el defecto
	188	No detectó el defecto		250	No detectó el defecto
	179	No detectó el defecto		250	No detectó el defecto
V-L1-11,5-9,5 B	238	Bordeó el defecto	V-L2-11,5-9,5 B	313	Bordeó el defecto
	255	Bordeó el defecto		313	Bordeó el defecto
	238	Bordeó el defecto		313	Bordeó el defecto
V-L1-17,5-10,5	108	Detectó el defecto	V-L2-17,5-10,5	375	Bordeó el defecto
	357	Bordeó el defecto		375	Bordeó el defecto
	105	Detectó el defecto		375	Bordeó el defecto

Como se puede observar de los cuadros anteriores, las condiciones identificadas por cada impactor para un mismo tipo de defecto en las dos losas son sumamente similares. Por esta razón, se considera que la densidad del acero no tiene ningún efecto importante sobre las

mediciones realizadas con impacto-eco. Lo anterior puede atribuirse a que las varillas de acero tienen dimensiones menores a las que los impactores son capaces de detectar (ver Cuadro 1) y por esta razón, no influyen en los resultados.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se determinó que los defectos más comunes en losas de concreto reforzado de puentes son vacíos, delaminaciones y hormigueros. Por un lado, los vacíos y delaminaciones se construyeron de la misma forma utilizando discos de poliestireno expandido. Por su parte, los hormigueros se construyeron con bloques de concreto permeable forrados con plástico. Ambos tipos de defectos se sujetaron en la posición deseada por medio de varillas de refuerzo y alambre de acero. Tanto los materiales utilizados como el proceso constructivo implementados probaron ser adecuados para representar defectos internos en las losas de prueba.
- Se construyeron dos especímenes de prueba de tipo losa los cuales contienen defectos intencionales internos y condiciones particulares que permiten estudiar a fondo los principios, aplicaciones, limitaciones y funcionamiento del método no destructivo impacto-eco. Estos especímenes pueden ser utilizados más adelante para investigaciones posteriores y capacitaciones en el método de impacto-eco y otros ensayos no destructivos. Los planos constructivos y los planos *as built* se presentan en el Anexo B y el Anexo C respectivamente.
- Se realizó una revisión de los planos de los puentes actualmente existentes que se encuentran en las principales rutas nacionales; es decir, las rutas 1, 2, 4, 32 y 34 de la Red Vial Nacional. A partir de dicha revisión se determinó que los puentes de tipo losa con vigas de concreto o acero, simplemente apoyados, con losa de concreto reforzado y construidos entre 1950 y 1980 tienen diseños muy similares en cuanto a cantidad, tamaño y espaciamiento del acero de refuerzo, recubrimiento, espesor de losa y resistencia mínima del concreto. Además, se determinó que a este tipo de puente es el más común entre los puentes existentes de la Red Vial Nacional. Por esta razón, es posible concluir que los resultados obtenidos en este proyecto son aplicables a la mayoría de los puentes existentes de la Red Vial Nacional.

- Se considera que la elección de una configuración de ubicación del impactor y el transductor en particular no altera en gran medida el resultado. Esto debido a que el 93% de las mediciones presentan valores muy similares utilizando las tres configuraciones distintas (con desviaciones estándar menores de 2 cm). Por esta razón, se considera que este factor no es significativo.
- Además, en el 7% restante de las mediciones, los resultados cuyos valores son similares al espesor real se obtuvieron utilizando las tres configuraciones. Por lo tanto, en casos en los que sí se muestran diferencias en las mediciones, no se puede concluir cuál de las tres configuraciones es la más exacta.
- En cuanto a la relación entre el diámetro del impactor y su capacidad para detectar y medir la profundidad de un defecto, se obtuvieron resultados que no concordaron completamente con lo establecido en la literatura. En algunos casos en los que se esperaba que un impactor lograra detectar un defecto midiendo su profundidad real, no fue así. Sin embargo, aun cuando no se midió correctamente la profundidad real de un defecto, en muchos casos se obtuvo una medición de espesor que era considerablemente mayor a la profundidad de dicho defecto y al espesor de la losa. Lo anterior significa que la onda bordeó el defecto, midiendo así una profundidad mayor a la real. De esta forma, es posible deducir la presencia de una discontinuidad aun cuando no es posible conocer su profundidad exacta.

Por otro lado, en algunos casos en los que se esperaba que un impacto no fuera capaz de detectar por completo la presencia de un defecto, se obtuvieron mediciones de espesor mucho más elevadas que la profundidad del defecto y del espesor de la losa. Nuevamente, esto indica que la onda de esfuerzo bordeó la discontinuidad, dando de esta forma indicios de su presencia y permitiendo determinar de forma cualitativa la condición interna del elemento.

- Con el método de impacto-eco sí fue posible determinar la presencia de los dos tipos de defectos internos estudiados: delaminaciones (construidos con discos de

poliestireno) y hormigueros (construidos con bloques de concreto permeables forrados con plástico).

- En cuanto a la capacidad del equipo para medir espesores, se determinó que el impacto-eco resulta bastante adecuado para medir espesores de elementos, ya que en la mayoría de los casos en los que no se incluyeron defectos intencionales internos fue capaz de identificar correctamente el espesor del elemento.
- Durante la medición de espesores, se observó también que entre más pequeño es el diámetro del impactor, más similares son los resultados obtenidos con el espesor real. Además, se comprobó que entre mayor es el diámetro del impactor, mayor es la diferencia entre medidas para un mismo punto usando un mismo impactor. Por esta razón, se concluye que entre menor es el tamaño del impactor mejores son los resultados obtenidos, siendo el impactor de 5,0 mm el más exacto y preciso de los tres impactores estudiados en esta investigación.
- Al realizar las pruebas se determinó que entre más pequeño es el impactor, resulta más difícil que el transductor detecte la onda de esfuerzo, ya que el golpe sobre la superficie es más suave y por tanto la onda de esfuerzo es más tenue. Además, entre mayor es el diámetro del impactor, es posible obtener un gráfico de desplazamiento más uniforme.
- Los resultados obtenidos en los puntos de prueba que se ubican cerca de los bordes de las losas son consistentemente diferentes al valor del espesor real, incluso en una zona sana. De esta forma, se concluye que el efecto frontera es un problema real que se da al realizar la prueba de impacto-eco y, por tanto, se debe evitar realizar pruebas en las zonas ubicadas a una distancia menor del borde que el espesor del elemento.
- La densidad del acero de refuerzo dentro de un elemento de concreto no afecta los resultados obtenidos con impacto-eco. No se observó el efecto del acero en las

mediciones realizadas sobre la Losa 1 (que tiene una configuración de acero normal para losas puentes) y la Losa 2 (que tiene únicamente acero por temperatura).

6.2. Recomendaciones

Las recomendaciones específicas acerca de la utilización del método no destructivo impacto-eco sobre losas de concreto de puentes son las siguientes:

- El método de impacto-eco permite realizar ensayos para conocer la condición de un elemento en áreas muy puntuales. Las losas de puentes poseen áreas grandes, por lo que ensayar toda la losa con el impacto-eco puede resultar sumamente lento y trabajoso. Por esta razón, se recomienda que para inspeccionar una losa se aplique primero algún otro método no destructivo de rápida realización con el fin de identificar las zonas más “problemáticas” o que presenten probabilidad de contener defectos. Luego, se recomienda aplicar sobre estas zonas, el método de impacto-eco para conocer el estado interno del elemento.
- Debido a que el impacto-eco es un método muy puntual, se recomienda realizar varias pruebas de impacto-eco variando ligeramente la posición del transductor y del impactor, con el fin de tener mayor probabilidad de identificar los defectos de menor tamaño.
- Se recomienda evitar realizar pruebas de impacto-eco en zonas ubicadas a una distancia desde el borde menor al espesor del elemento.
- Se sugiere que al realizar pruebas sobre un punto se utilicen los tres impactores y si se obtiene resultados de espesores mayores al real de forma constante, se establezca que existe la presencia de algún defecto interno.
- Para medir el espesor de un elemento con dimensiones similares a las utilizadas en este trabajo, se recomienda hacer pruebas de impacto-eco utilizando los tres impactores distintos. Se sugiere iniciar con el impactor de mayor tamaño y proseguir disminuyendo gradualmente el tamaño de los impactores hasta donde sea posible,

tomando en cuenta que entre menor sea el tamaño del impacto más precisos y exactos son los resultados pero más difícil resulta la medición de la onda.

En cuanto al futuro de las investigaciones sobre el método de impacto-eco aplicado a losas de concreto reforzado de puentes, se recomienda lo siguiente:

- Realizar investigaciones que contemplen el efecto de la rugosidad de la superficie sobre el método. Lo anterior debido a que es común que en losas de puentes la superficie no sea totalmente lisa, como se estudió en esta investigación. Más bien, es usual que se construyan superficies rugosas con el fin de aumentar la fricción entre las ruedas de los vehículos y la superficie de rodamiento. Para esto es necesario fabricar nuevos elementos de prueba que incluyan esta variable.
- Evaluar si el porcentaje de humedad en el concreto tiene algún efecto sobre la velocidad de las ondas de esfuerzo y sobre las mediciones realizadas. En esta investigación solo se hicieron pruebas sobre las losas completamente secas, ya que estas se mantuvieron bajo techo y nunca se mojaron. Sin embargo, se considera que el factor de humedad es importante ya que las losas de puentes reales se encuentran en la intemperie y en Costa Rica la precipitación es un factor considerable. Estas pruebas pueden ser realizadas sobre las losas fabricadas como parte de esta investigación.
- Realizar investigaciones similares a las de este proyecto estudiando el efecto de la resistencia del concreto en los resultados de impacto-eco. Lo anterior debido a que la mayoría de los puentes existentes actualmente tiene una resistencia mínima a la compresión del concreto f'_c comprendida entre 210 kg/cm^2 y 280 kg/cm^2 . Sin embargo, en años recientes se han utilizado en elementos de puentes concretos con resistencias mayores. Por esta razón, se considera importante estudiar el efecto de la resistencia del concreto en los resultados de impacto-eco.
- Realizar investigaciones en donde se valide y compruebe la velocidad de onda obtenida con el impacto-eco utilizando otros equipos no destructivos.

- Se recomienda continuar utilizando las dos losas de prueba construidas como producto de este proyecto, ya que pueden ser aprovechadas como un insumo para capacitar a ingenieros y técnicos en el uso del método no destructivo impacto-eco. Además, pueden ser de mucha utilidad para realizar nuevas investigaciones y continuar aumentando el conocimiento y entendimiento de los principios, aplicaciones, limitaciones y funcionamiento de este método para la inspección de losas de concreto reforzado de puentes en el país.

Referencias bibliográficas

- American Association of State Highway Officials. (1973). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Onceava edición. Washington, DC.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *The Manual for Bridge Evaluation Second Edition*. Washington, DC.
- American Concrete Institute. (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures*. ACI 228.2R-13. Michigan, Estados Unidos.
- Asano, M. et al. (2003). *Impact acoustics methods for defect evaluation in concrete*. Federal Institute for Material Research and Testing (BAM).
- ASTM International. (2015). *ASTM C1385-5 Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. Pennsylvania, EUA.
- Beutel, R. et. Al. (2008). *Comparative performance tests and validation of NDT Methods for Concrete Testing*. (2008) 27: 59–65. Federal Institute for Material Research and Testing (BAM).
- Clayton, D. A., Hileman, M. S. (2012). *Light Water Reactor Sustainability Non-Destructive Evaluation for Concrete Research and Development Roadmap*. ORNL/TM-2012/360. Oak Ridge National Laboratory.
- Clayton, D. (2013). *Evaluation of Ultrasonic Techniques on Concrete Structures*. ORNL/TM-2013/430. Oak Ridge National Laboratory.
- Germann Instruments, Inc. (2013). *Operation and Maintenance Manual for DOCTer Impact-Echo Test Systems Using Viking Software v. 7.3*. Illinois, EUA.
- Hellier, J. C. (2003). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Editorial McGraw-Hill.
- Hiltunen, D.R. (2010). *Validation of Nondestructive Testing Equipment for Concrete*. Departamento de Ingeniería Civil y Costera. Universidad de Florida. Florida, EUA.

- International Atomic Energy Agency (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna, Austria.
- Khalim, A.R.; Sagar, D. (2010). *Combination of Nondestructive Evaluations for Reliable Assessment of Bridge Deck*. Conference on Advances in Bridge Engineering-II. Dhaka, Bangladesh.
- Malhotra, V.M.; Carino, N.J. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Segunda Edición. ASTM International. Pennsylvania, EUA.
- Popovics, J.S., Zhu, J. (2007). *Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo*. Journal of Engineering Mechanics 133(6), 628–640.
- RILEM The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materiales, Systems and Structures (2012). *Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combine Techniques*. Talence, France.
- Soto Navarro, K. (2017). *Evaluación del equipo Doc-700 en el Ensayo No Destructivo Impacto Eco aplicado al análisis del estado del relleno de ductos de inyección en vigas preesforzadas utilizadas en puentes*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Transportation Research Board (2013). *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration*. Strategic Highway Research Program SHRP2. Washington D.C., Estados Unidos.
- Wiggenhauser, H. (2009). *Advanced NDT Methods for Quality Assurance of Concrete Structures*. Federal Institute for Material Research and Testing (BAM). Berlín, Alemania.

Anexo 1. Base de datos de losas de puentes de la Red Vial Nacional

Cuadro A1. Características de las losas de los puentes de la Red Vial Nacional estudiados.

#	Puente	Ruta	Año de diseño	f'c losa (kg/cm ²)	Espesor (cm)
1	Río Ahogados	1	1951	Clase A	16,5
2	Río Azufrado	1	1953	Clase A	16,5
3	Río Cabalceta	1	1955	Clase A	17,8
4	Río Claro	1	1951	Clase A	17,8
5	Río Las Vueltas	1	1951	Clase A	17,8
6	Río Santa Inés	1	1955	Clase A	17,8
7	Río Sonzapote	1	1955	Clase A	17,8
8	Río Cañas	1	1952	Clase A	16,5
9	Río Blanco	1	1952	Clase A	16,5
10	Río Montenegro	1	1953	Clase A	17,8
11	Río Villa Vieja	1	1953	Clase A	17,8
12	Río Estanque	1	1952	Clase A	16,5
13	Río Bagaces	1	1953	Clase A	17,8
14	Quebrada la Urraca	1	1952	Clase A	16,5
15	Río Pijije	1	1952	Clase A	16,5
16	Río Caraña	1	1951	Clase A	17,8
17	Río Arena	1	1953	Clase A	17,8
18	Río Liberia	1	1951	Clase A	15,9
19	Río Lajas	1	1952	Clase A	16,5
20	Paso Superior La Galera	2	1974	Clase A (f'c min=210)	16,0
21	Río Claro	2	1952	No disponible	16,5

#	Puente	Ruta	Año de diseño	f'c losa (kg/cm2)	Espesor (cm)
22	Río Nuevo	2	1952	Clase A	16,5
23	Río Platanares	2	1957	Clase A	17,8
24	Río Puerto Nuevo	2	1958	Clase A	17,8
25	Río Terraba	2	1951	Clase A	17,8
26	Río Olla Cinco	2	1957	Clase A	17,8
27	Río Burio	4	1975	Clase A (f'c min=210)	16,0
28	Río Peñas Blancas	4	1999	Clase A (f'c min=225)	16,0
29	Río San Carlos	4	1974	Clase A (f'c min=210)	16,0
30	Río Sarapiquí	4	1970	Clase A (f'c min=210)	17,0
31	Río Blanco Guápiles	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
32	Río Blanco Limón	32	1968	Clase A	16,0
33	Río Chirripó	32	1969	Clase A	17,0
34	Río Corinto	32	1983	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
35	Río Cimarrones	32	1968	Clase A	16,0
36	Río Costa Rica	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
37	Río Cuba	32	1968	Clase A	16,0
38	Río Destierro	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
39	Río Dos Novillos	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
40	Río Dos Vueltas	32	1974	No disponible	16,0
41	Río Escondido	32	1968	Clase A	16,0
42	Río Guacimo	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
43	Río Hondo	32	1968	Clase A	16,0
44	Río Jiménez	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
45	Río Madre de Dios	32	1968	Clase A	16,0
46	Río Pacuare	32	1972	Clase A (f'c min=211)	19,0

#	Puente	Ruta	Año de diseño	f'c losa (kg/cm2)	Espesor (cm)
47	Río Parismina	32	1974	No disponible	16,0
48	Río Rocas	32	1974	Clase RN 250B (f'c=250)	16,0
49	Río Toro	32	1968	Clase A	18,0
50	Hatillo Nuevo	34	1973	Clase A	18,0
51	Quebrada La Gloria	34	1973	Clase A (f'c min=210)	18,0
52	Río Ballena	34	1988	Clase A (f'c min=225)	16,0
53	Río Aguas	34	1972	Clase A	16,0
54	Río Balsar	34	1976	Clase A (f'c min=225)	16,0
55	Río Balso	34	1973	Clase A (f'c min=225)	16,0
56	Río Camaronal	34	1973	Clase A (f'c min=225)	16,0
57	Río Copey	34	1973	Clase A (f'c min=210)	16,0
58	Río Coronado	34	1973	Clase A (f'c min=225)	16,0
59	Río Dominical	34	1973	Clase A (f'c min=225)	16,0
60	Río Las Palmas	34	1972	Clase A	16,0
61	Río Matapalo	34	1973	Clase A (f'c min=210)	18,0
62	Río Palo Seco	34	1973	Clase A (f'c min=210)	18,0
63	Río Piñuela	34	1981	Clase A (f'c min=225)	16,0
64	Río Punta Mala	34	1976	No disponible	16,0
65	Paso Inferior Int. Paso Ancho	39	2014	No disponible	25,0

Según las especificaciones para el diseño de puentes de AASHTO de 1973, el concreto Clase A se define como concreto cuya resistencia mínima a la compresión a los 28 días es de 210 kg/cm²(3000 psi).

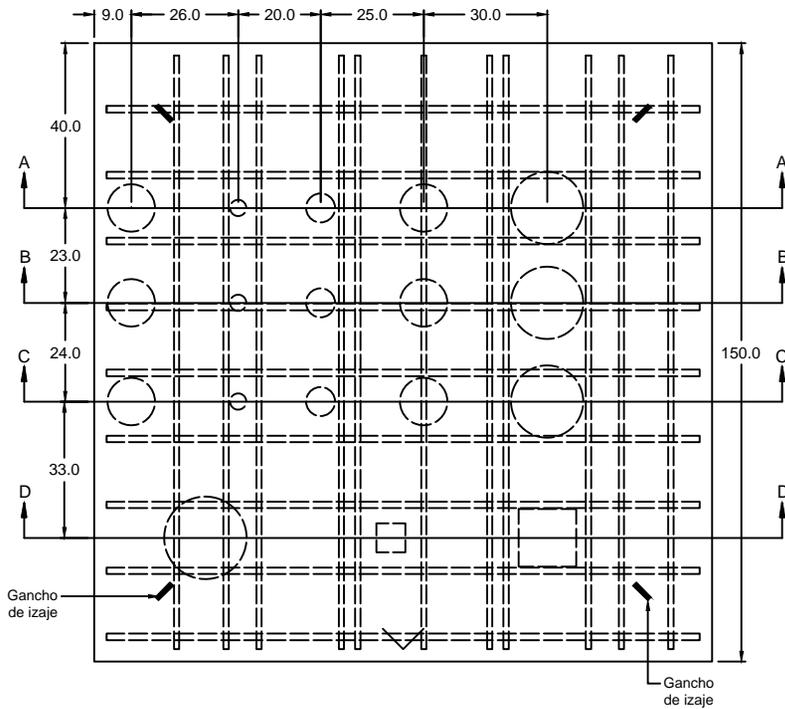
Cuadro A2. Características del refuerzo utilizado en las losas de los puentes de la Red Vial Nacional estudiados.

#	Puente	Refuerzo transversal superior			Refuerzo transversal inferior			Refuerzo longitudinal superior		Refuerzo longitudinal inferior	
		Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)
1	Río Ahogados	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	25.4	#4	25.4
2	Río Azufrado	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	20.3	#4	20.3
3	Río Cabalceta	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
4	Río Claro	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	26.7	#4	26.7
5	Río Las Vueltas	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	26.7	#4	26.7
6	Río Santa Inés	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
7	Río Sonzapote	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
8	Río Cañas	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
9	Río Blanco	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
10	Río Montenegro	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
11	Río Villa Vieja	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
12	Río Estanque	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
13	Río Bagaces	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
14	Quebrada la Urraca	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
15	Río Pijije	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
16	Río Caraña	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
17	Río Arena	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
18	Río Liberia	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	25.4	#4	25.4
19	Río Lajas	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
20	Paso Superior La Galera	#5	36.0	4.0	#5	36.0	3.0	#5	30.0	#4	30.0
21	Río Claro	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6

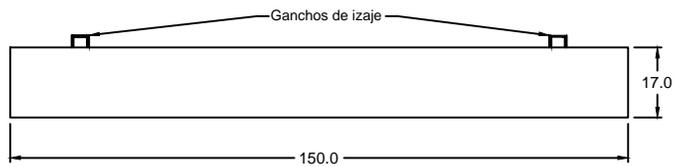
#	Puente	Refuerzo transversal superior			Refuerzo transversal inferior			Refuerzo longitudinal superior		Refuerzo longitudinal inferior	
		Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)
22	Río Nuevo	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	21.6	#4	21.6
23	Río Platanares	#5	17.8	ND	#5	17.8	ND	#4	ND	#4	ND
24	Río Puerto Nuevo	#5	35.6	ND	#5	35.6	ND	#4	21.6	#4	21.6
25	Río Terraba	#5	35.6	4.4	#5	35.6	3.2	#4	24.8	#4	24.8
26	Río Olla Cinco	#4	35.6	4.4	#4	35.6	3.2	#4	31.6	#4	ND
27	Río Burio	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	30.0	#4	30.0
28	Río Peñas Blancas	#4	14.0	5.0	#4	14.0	3.0	#3	15.0	#3	15.0
29	Río San Carlos	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	40.0	#4	20.0
30	Río Sarapiquí	#5	36.0	4.0	#5	36.0	2.5	#4	33.8	#4	25.4
31	Río Blanco Guápiles	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	45.0	#4	13.0
32	Río Blanco Limón	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#5	21.0
33	Río Chirripó	#5	24.0	4.5	#5	24.0	3.5	#4	18.0	#5	18.0
34	Río Corinto	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	45.0	#4	12.3
35	Río Cimarrones	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#4	15.0
36	Río Costa Rica	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	45.7	#4	13.0
37	Río Cuba	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#4	15.0
38	Río Destierro	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	46.3	#4	13.0
39	Río Dos Novillos	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	46.3	#4	13.0
40	Río Dos Vueltas	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	46.3	#4	13.0
41	Río Escondido	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#4	15.0
42	Río Guacimo	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	45.7	#4	13.0
43	Río Hondo	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#5	ND
44	Río Jiménez	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	45.7	#4	13.0

#	Puente	Refuerzo transversal superior			Refuerzo transversal inferior			Refuerzo longitudinal superior		Refuerzo longitudinal inferior	
		Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Recubrimiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)	Tamaño varilla	Espaciamiento (cm)
45	Río Madre de Dios	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	38.6	#5	21.0
46	Río Pacuare	#5	30.0	5.0	#5	30.0	3.0	#4	42.5	#4	ND
47	Río Parismina	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	46.3	#4	13.0
48	Río Rocas	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	44.7	#4	13.0
49	Río Toro	#5	26.0	4.0	#5	26.0	3.0	#4	42.3	#5	21.6
50	Hatillo Nuevo	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	31.8	#5	11.0
51	Quebrada La Gloria	#5	26.0	4.0	#5	26.0	4.0	#4	24.4	#4	14.5
52	Río Ballena	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	44	#4	13.3
53	Río Aguas	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	36.3	#4	18.2
54	Río Balsar	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#5	36.3	#5	27.3
55	Río Balso	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	36.3	#4	18.2
56	Río Camaronal	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	36.3	#4	18.2
57	Río Copey	#5	30.0	4.0	#5	30.0	3.0	#4	36.3	#4	18.2
58	Río Coronado	#5	28.0	ND	#5	28.0	ND	#5	36.3	#5	27.3
59	Río Dominical	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	36.3	#4	18.2
60	Río Las Palmas	#5	30.0	ND	#5	30.0	ND	#4	36.3	#4	18.2
61	Río Matapalo	#5	26.0	4.0	#5	26.0	3.0	#4	24.4	#4	14.5
62	Río Palo Seco	#5	26.0	4.0	#5	26.0	3.0	#4	24.4	#4	14.5
63	Río Piñuela	#5	28.0	ND	#5	28.0	ND	#5	36.3	#5	27.3
64	Río Punta Mala	#5	28.0	ND	#5	28.0	ND	#5	36.3	#5	27.3
65	Paso Inferior Int. Paso Ancho	#5	22.5	3.8	#5	22.5	2.5	#5 y #6 intercalados	20.8	#5	24.9

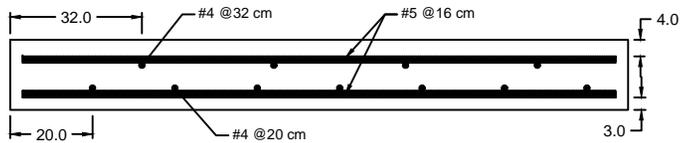
Anexo 2. Planos constructivos de las losas de prueba



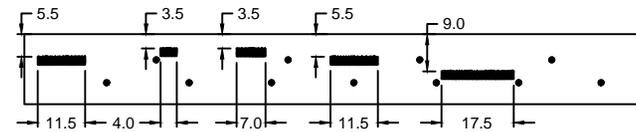
Planta



Seccion transversal

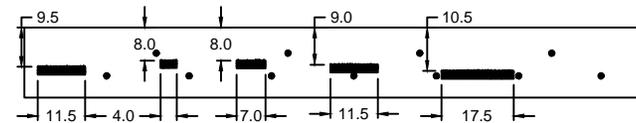


Detalle del refuerzo



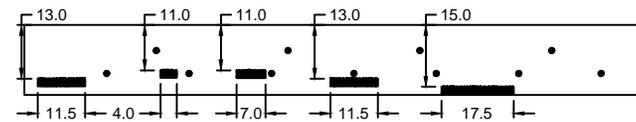
Corte A-A

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



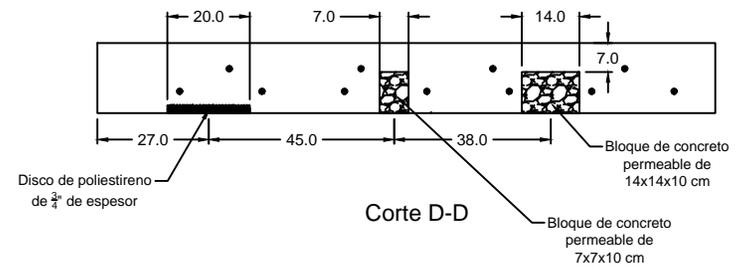
Corte B-B

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



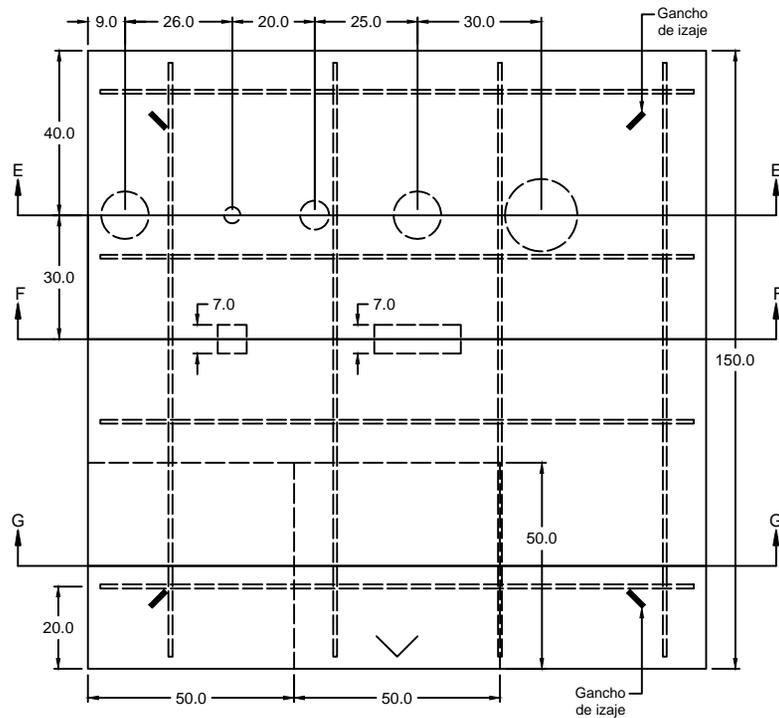
Corte C-C

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.

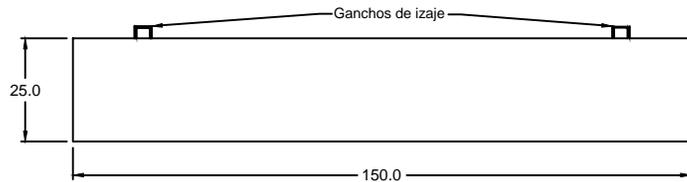


Corte D-D

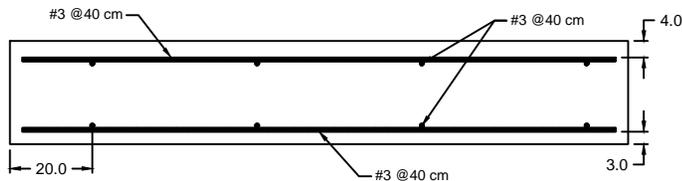
Universidad de Costa Rica Escuela de Ingenieria Civil Proyecto de graduacion: Evaluacion del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluacion de losas de concreto reforzado de puentes	Contenido: Planos constructivos de la losa 1	Lamina: 1 de 4
	Elaborado por: Sofia Vignoli Vargas	Fecha: 25 de agosto de 2017



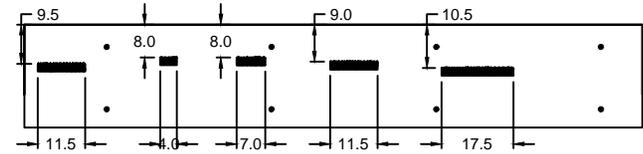
Planta



Seccion transversal

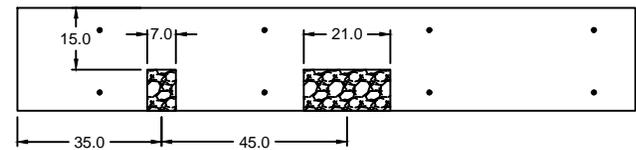


Detalle de refuerzo



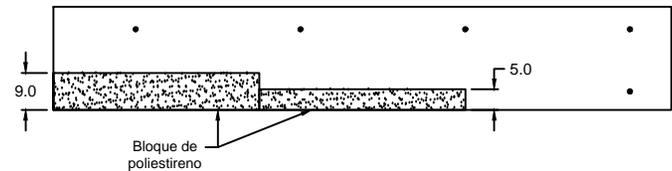
Corte E-E

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



Corte F-F

Nota: Los defectos son bloques de concreto permeable con 10 cm de espesor.

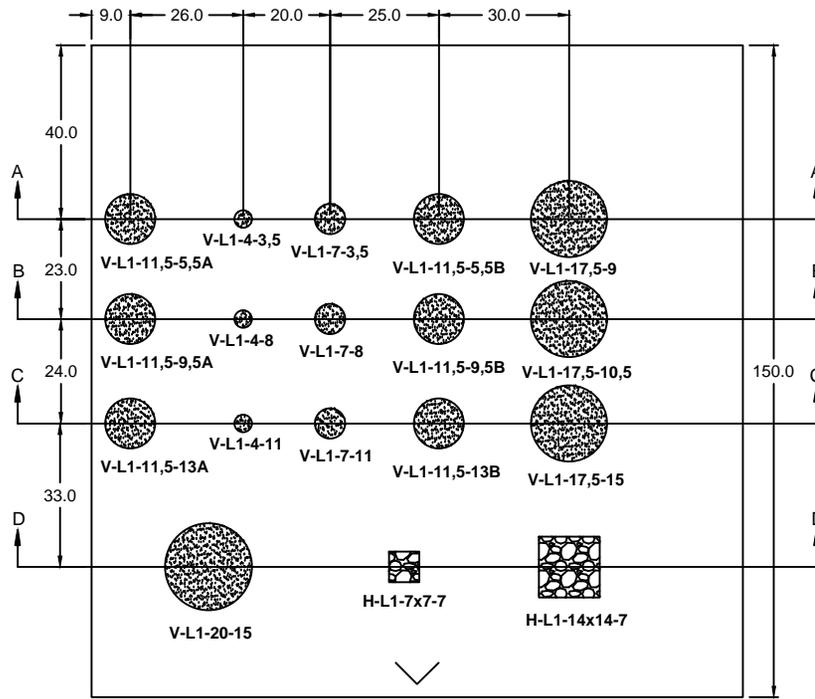


Corte G-G

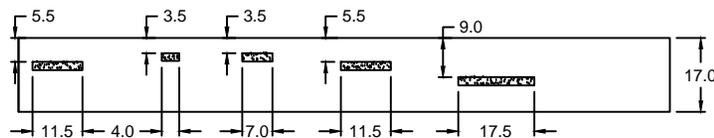
Notas:

El refuerzo utilizado en ambas losas es varilla de acero A706.
 La resistencia minima del concreto en ambas losas debe estar entre 210 kg/cm² y 280 kg/cm².
 Preferiblemente se debe utilizar concreto autocompactante.
 El acabado debe ser completamente liso en todas las caras.
 Se deben colocar gazas de izaje a una distancia de 17 cm desde las esquinas de las losas.

Universidad de Costa Rica Escuela de Ingenieria Civil	Contenido: Planos constructivos de la losa 2	Lamina: 2 de 4
Proyecto de graduacion: Evaluacion del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluacion de losas de concreto reforzado de puentes	Elaborado por: Sofia Vignoli Vargas	Fecha: 25 de agosto de 2017

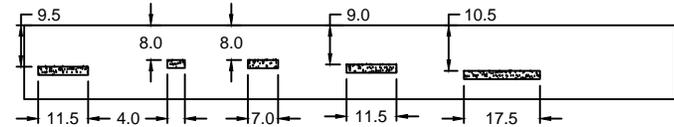


Planta



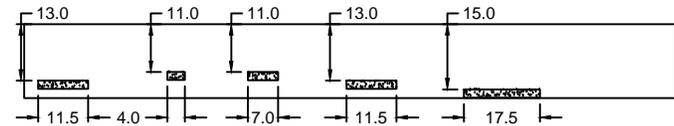
Corte A-A

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



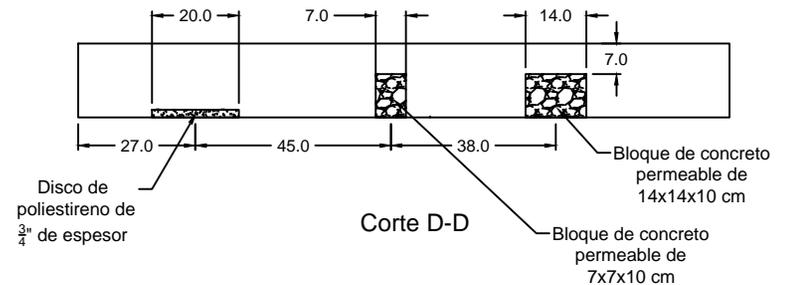
Corte B-B

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



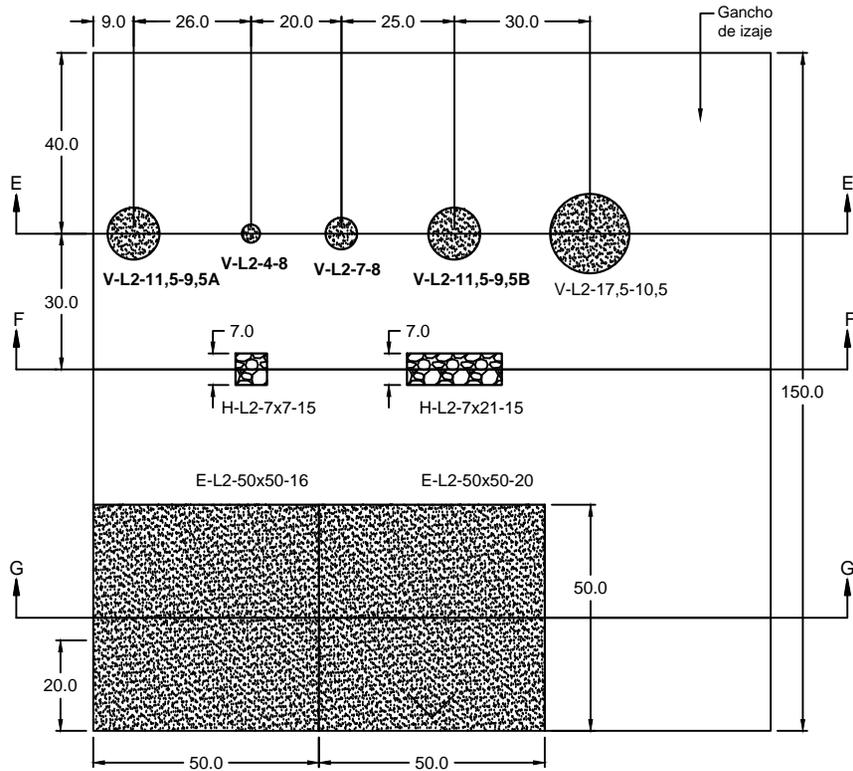
Corte C-C

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.

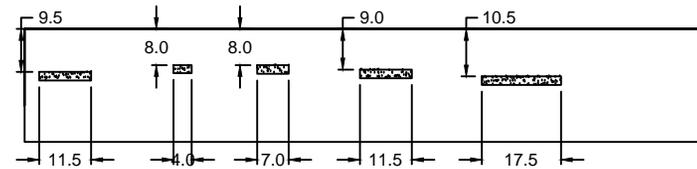


Corte D-D

<p>Universidad de Costa Rica Escuela de Ingenieria Civil</p>	<p>Contenido: Defectos de la losa 1</p>	<p>Lamina: 3 de 4</p>
<p>Proyecto de graduacion: Evaluacion del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluacion de losas de concreto reforzado de puentes</p>	<p>Elaborado por: Sofia Vignoli Vargas</p>	<p>Fecha: 25 de agosto de 2017</p>

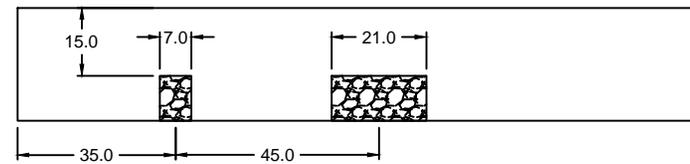


Planta



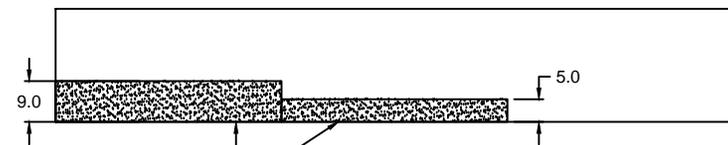
Corte E-E

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



Corte F-F

Nota: Los defectos son bloques de concreto permeable con 10 cm de espesor.



Corte G-G

Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingenieria Civil

Contenido:
Defectos
de la losa 2

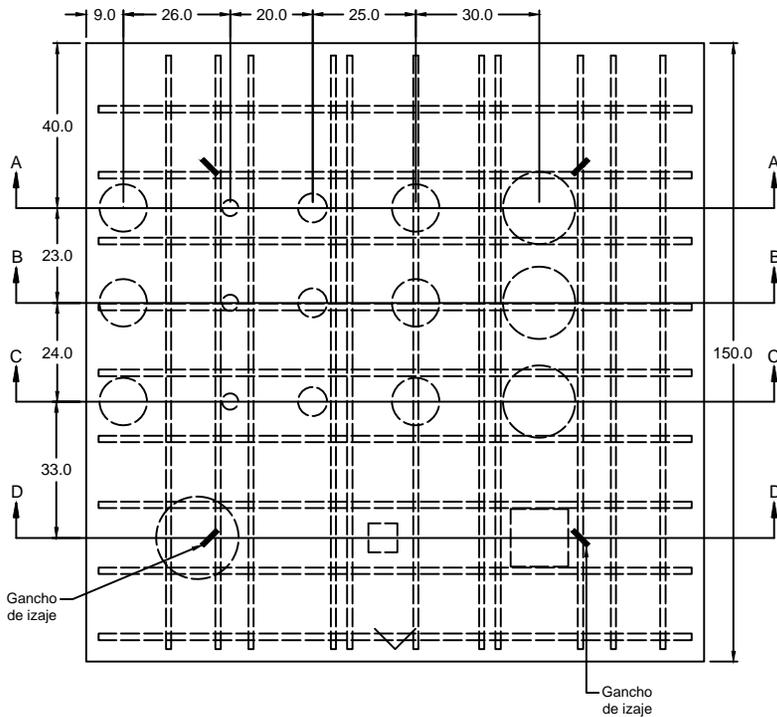
Lamina:
4 de 4

Proyecto de graduacion:
Evaluacion del ensayo no destructivo
impacto-eco para la evaluacion de losas
de concreto reforzado de puentes

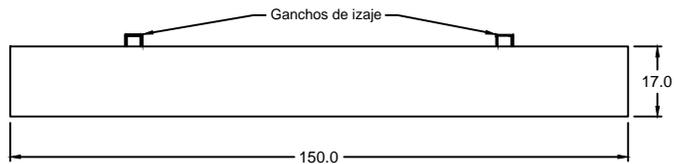
Elaborado por:
Sofia Vignoli Vargas

Fecha:
25 de agosto de 2017

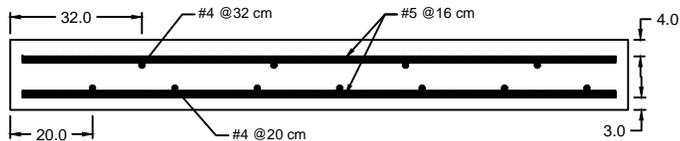
Anexo 3. Planos *as-built* de las losas de prueba



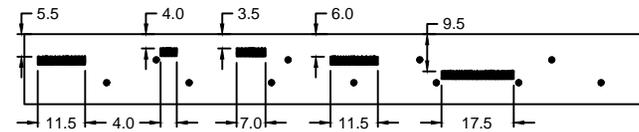
Planta



Seccion transversal

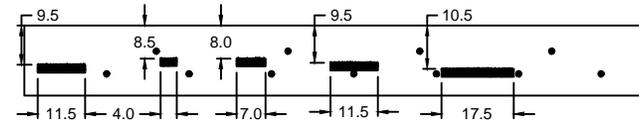


Detalle del refuerzo



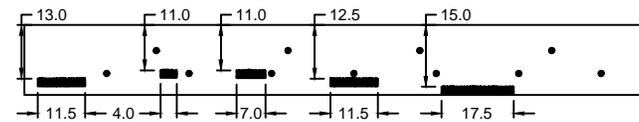
Corte A-A

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



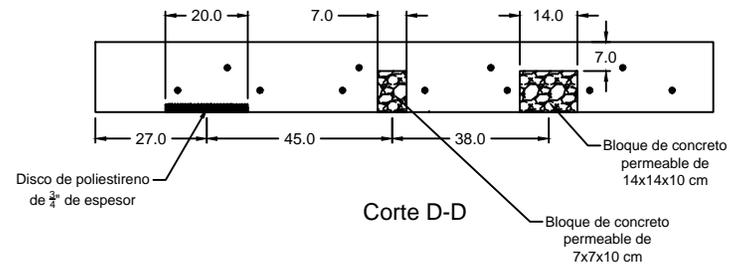
Corte B-B

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



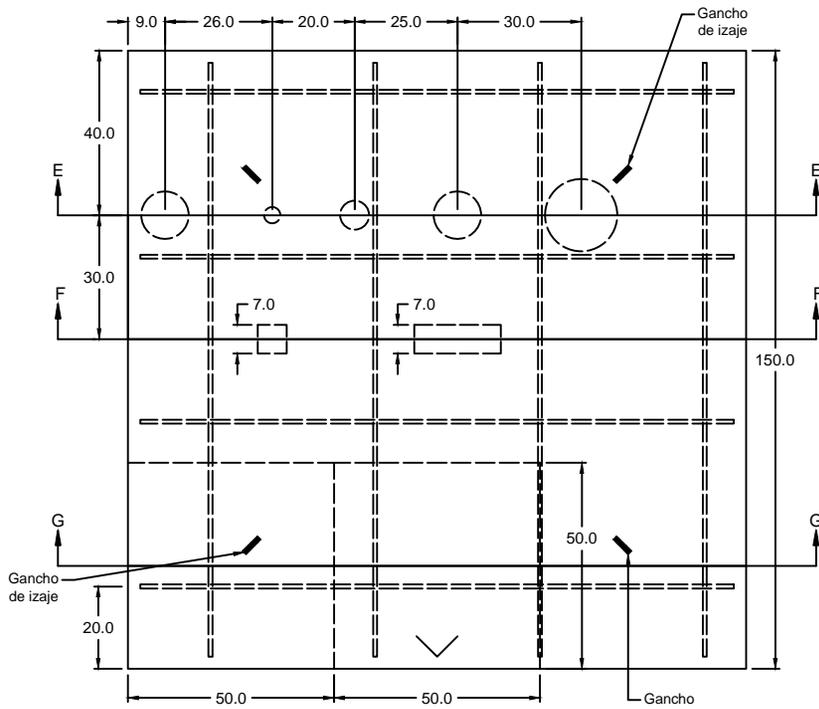
Corte C-C

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.

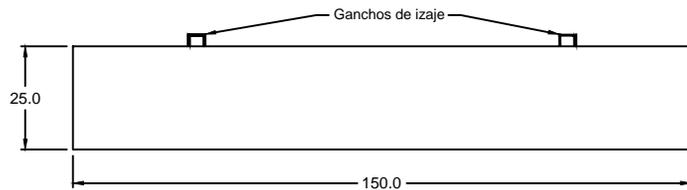


Corte D-D

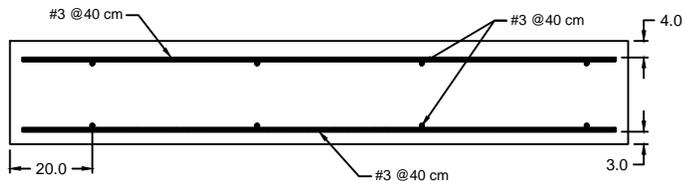
Universidad de Costa Rica Escuela de Ingenieria Civil Proyecto de graduacion: Evaluacion del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluacion de losas de concreto reforzado de puentes	Contenido: Planos as built de la losa 1	Lamina: 1 de 2
	Elaborado por: Sofia Vignoli Vargas	Fecha: 24 de marzo de 2018



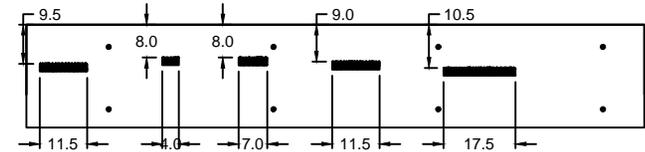
Planta



Seccion transversal

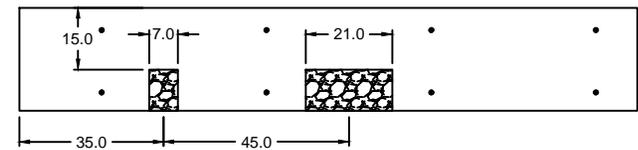


Detalle de refuerzo



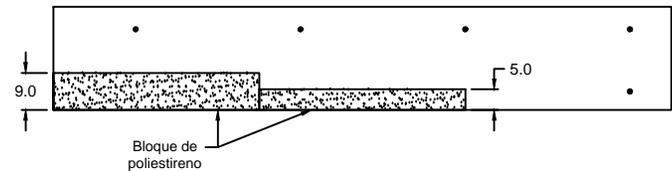
Corte E-E

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de $\frac{3}{4}$ " de espesor.



Corte F-F

Nota: Los defectos son bloques de concreto permeable con 10 cm de espesor.



Corte G-G

Notas:

- El refuerzo utilizado en ambas losas es varilla de acero A706.
- La resistencia minima del concreto en ambas losas es de 280 kg/cm².
- Se debe utilizar concreto fluido.
- El acabado es completamente liso en todas las caras.
- Se colocaron gazas de isaje a una distancia de 30 cm desde las esquinas de las losas.

<p>Universidad de Costa Rica Escuela de Ingenieria Civil</p>	<p>Contenido: Planos as built de la losa 2</p>	<p>Lamina: 2 de 2</p>
<p>Proyecto de graduacion: Evaluacion del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluacion de losas de concreto reforzado de puentes</p>	<p>Elaborado por: Sofia Vignoli Vargas</p>	<p>Fecha: 24 de marzo de 2018</p>