

**CONGRESO ESTRUCTURAS 2019**  
**XIIV SEMINARIO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA**  
**SAN JOSÉ, COSTA RICA 29 AL 30, AGOSTO 2019**

**EVALUACIÓN DEL END IMPACTO-ECO PARA DETECCIÓN DE VACÍOS  
EN DUCTOS DE VIGAS POSTENSADAS Y DEFECTOS EN LOSAS DE  
CONCRETO DE PUENTES USANDO ESPECÍMENES DE LABORATORIO**

***Ing. Esteban Villalobos-Vega, M.Sc.***

*Costa Rica, [esteban.villalobos@ucr.ac.cr](mailto:esteban.villalobos@ucr.ac.cr), (506) 2511-4974, PIE, LanammeUCR, Coordinador Unidad de Puentes*

***Ing. Sofía Vignoli-Vargas***

*Costa Rica, [sofia-vignoli@gci-ing.com](mailto:sofia-vignoli@gci-ing.com), (506) 8334-0222, GCI Ingeniería, Ingeniera Estructural*

***Ing. Kevin Soto-Navarro***

*Costa Rica, [ksoto@cega.cr](mailto:ksoto@cega.cr), (506) 8856-2871, CEGA S.A., Ingeniero Estructural*

***Ing. Francisco Villalobos-Ramírez, M.Sc.***

*Costa Rica, [francisco.villalobosramirez@ucr.ac.cr](mailto:francisco.villalobosramirez@ucr.ac.cr), (506) 2511-4970, LanammeUCR, Jefe Laboratorio de Estructuras*

**RESUMEN**

La presente ponencia muestra los resultados de una línea de investigación y aplicación en Ensayos No Destructivos (END) en elementos de concreto reforzado del LanammeUCR, siendo en este caso el enfoque en la evaluación de estructuras de puentes a través del uso del método Impacto-Eco por medio de 2 proyectos. El primero consiste en evaluar el desempeño del método en el análisis del estado del relleno de ductos de postensión de vigas preesforzadas. La evaluación se realiza utilizando información experimental obtenida en pruebas realizadas sobre 3 especímenes. Las variables que se analizaron en la investigación son: el diámetro de los ductos, el diámetro de los impactores, la edad del mortero de inyección, el porcentaje del mortero de inyección (vacíos de distintos porcentajes), ubicación del equipo en la medición y la existencia de acero entre el ducto y la medición. El segundo proyecto consiste en evaluar el desempeño del método en la detección de defectos en losas de puentes existentes. Para esto se diseñaron y construyeron 2 especímenes de prueba que poseen las características más representativas de los puentes de tipo viga-losa en servicio en Costa Rica. Se incluyeron en los especímenes defectos intencionales (vacíos, delaminaciones y segregación) con posiciones controladas. Se evaluaron diferentes variables: el efecto de la ubicación del equipo con respecto a la posición de un defecto, la influencia del tipo de defecto, la capacidad de detección del equipo con respecto a los límites teóricos, la capacidad del equipo para medir espesores, el efecto la ubicación de la prueba dentro del elemento y la influencia del acero de refuerzo. En ambos proyectos se concluyó que el equipo permite la detección de vacíos en los ductos y de los defectos en las losas sólo con algunas excepciones, siendo relevantes variables que se deberían tener en cuenta durante las mediciones. Los resultados de estas investigaciones ayudarán a mejorar la detección temprana de problemas que de otra forma sólo sería posible observar por medio de la inspección visual ya cuando el daño es tal que las reparaciones son muy costosas o cuando implican un problema de seguridad para los usuarios del puente. Además, los especímenes construidos en ambos proyectos están disponibles en las instalaciones del LanammeUCR para futuros proyectos.

## **INTRODUCCIÓN: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)**

Los Ensayos No Destructivos (END) son métodos de inspección indirecta que permiten determinar propiedades o defectos de los materiales, en donde de otra forma se tendría que recurrir a pruebas destructivas, parcialmente destructivas o que simplemente no serían posible detectar únicamente por medios visuales. Permite a los ingenieros ejecutar una inspección relativamente rápida, dependiendo del método o de la combinación de estos, y efectiva de la estructura. Los END son significativos para la ingeniería civil debido a que permiten detectar deficiencias internas importantes que afectan el correcto funcionamiento de las estructuras, lo que posibilita prevenir fallas prematuras e inesperadas (TRB, 2013).

Debido a estas ventajas y bajo la premisa de que es importante conocer las limitaciones de estos métodos, así como determinar su desempeño y confiabilidad en condiciones reales, es que el LanammeUCR ha venido desarrollando una línea de investigación y aplicación en END desde hace varios años, principalmente en concreto reforzado y presforzado, lo que además le ha permitido ofrecer el servicio en varios de los métodos. Ver por ejemplo: Navas (1993), Salas (1993), Barrantes (2012) y Quesada (2014), sólo por mencionar algunas de las investigaciones.

Dentro de los métodos de END ampliamente aceptados y continuamente evaluados a nivel mundial para elementos de concreto reforzado y presforzado, se encuentra el Impacto-Eco, el cual consiste en la emisión de ondas de esfuerzo por medio de un impacto y de la medición periódica e interpretación de su propagación a través del material, ya sea por la reflexión en una interfase, o para la medición del espesor de un elemento sólido (ACI 228.2R-13, 2013).

### **IMPACTO-ECO (I-E)**

#### **EMISIÓN Y REFLEXIÓN DE ONDAS**

Existen tres tipos de ondas de propagación de esfuerzo en un material: las ondas P, S y R. Las ondas P y S, las cuales viajan a través del interior del elemento, se caracterizan por la dirección del movimiento de las partículas respecto a la dirección de propagación de su frente de onda: las ondas P son paralelas a la dirección del movimiento mientras que las ondas S son perpendiculares; en cambio, el movimiento de las partículas en las ondas R, las cuales viajan a través de la superficie, es retrogrado-elíptico (Sansalone y Carino, 1986).

La propagación de ondas de esfuerzo transiente a través de un sólido finito es un fenómeno complejo. Un entendimiento básico de la relación entre las propiedades físicas de un material y la velocidad de onda, puede ser adquirida por medio de la teoría de propagación de onda en un medio infinito, isotrópico y elástico (Malhota y Carino, 2003). Para elementos sólidos infinitos, la velocidad de la onda P depende del módulo de elasticidad (E), de la densidad ( $\rho$ ), y de la razón de Poisson ( $\nu$ ) y se denota de la siguiente manera (Sansalone y Carino, 1986):

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [1]$$

Por ejemplo, para el caso del concreto, con un  $\nu$  de 0,2 y una calidad aceptable del material, el valor de  $C_p$  es de aproximadamente 4 000 m/s, la cual puede variar en  $\pm 500$  m/s según la calidad.

Cuando los frentes de ondas atraviesan una interface entre 2 medios diferentes (diferente densidad), se genera el fenómeno de reflexión y refracción (Malhota y Carino, 2003). Las ondas de esfuerzo pueden ser visualizadas entonces como rayos de luz, por lo que en el límite entre los dos medios se refleja una porción de la onda, el resto penetra y se refracta. Las amplitudes relativas de las ondas reflejadas dependen de un desajuste de las impedancias en la interface. La pequeña parte de la onda P que se refleja depende de la impedancia acústica (Z), la cual se representa con la siguiente ecuación (Sansalone y Carino, 1986):

$$Z = \rho C_p \quad [2]$$

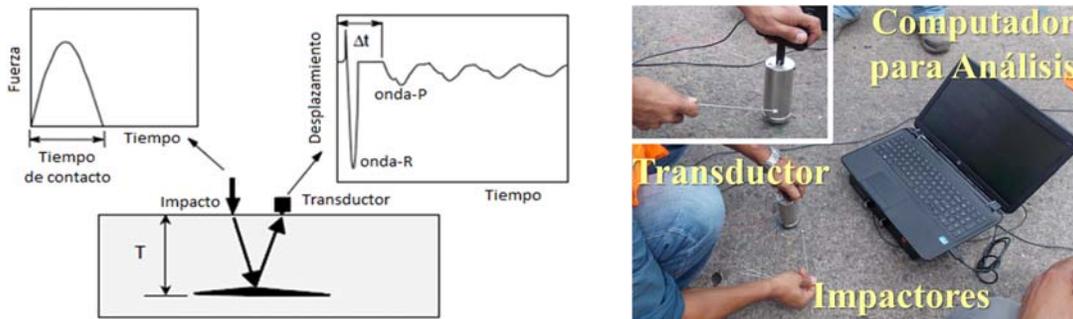
La amplitud de la onda reflejada,  $A_r$ , es máxima cuando el ángulo del rayo incidente es normal a la interface y depende de la impedancias acústicas de cada medio ( $Z_1, Z_2$ ) y de la amplitud de la onda incidente ( $A_i$ ) (Sansalone y Carino, 1986):

$$A_r = A_i \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad [3]$$

Si  $Z_1$  es mayor que  $Z_2$ ,  $A_r$  será negativa, lo que indica que ocurrió un cambio de fase, pero si  $Z_1$  es menor que  $Z_2$ ,  $A_r$  será positiva por lo que no ocurre ningún cambio de fase. Por ejemplo, las diferencias en las impedancias acústicas entre el concreto y el aire es tal ( $Z_1$  es mucho mayor que  $Z_2$ ), que prácticamente hay un 100 % de reflexión en la interfase, cualidad que permite detectar los defectos y razón por la cual el método es tan ampliamente utilizado con ese fin.

### MÉTODO DE IMPACTO-ECO (I-E)

El método I-E consiste en producir un pulso en el objeto a estudiar por medio de un impacto mecánico producido por esferas metálicas, el cual se propaga a través del material por medio de ondas P, las cuales generan esfuerzos de compresión o movimientos paralelos a la dirección de la onda como se indicó anteriormente (Carino, 2001). La frecuencia generada por los impactores depende de su diámetro: a mayor diámetro implica menor frecuencia, mayor longitud de onda, y por lo tanto penetran mayores distancias pero tienen menor resolución; diámetros menores producen frecuencias mayores, menor longitud de onda, y penetran menos con más resolución, pero a la vez su medición se dificulta más porque es más afectado por el “ruido”. Una vez formado el impacto se miden las ondas reflejadas, que al llegar al punto donde este se generó, produce desplazamientos en la superficie cuyo arribo en el tiempo se mide con un transductor (Carino, 2001) (Ver **Fig. 1**).



**Figura 1.-** En la imagen de la izquierda, un impacto mecánico genera ondas de esfuerzos y un transductor cerca del punto de impacto mide el resultado obtenido (Fuente: Carino, 2001). En la imagen de la derecha la composición del equipo: Impactores metálicos esféricos para generar el impacto, un transductor de contacto en seco para medir los resultados y un computador para interpretar en el sitio los resultados.

Al colocar el transductor cerca de la zona de impacto, la distancia recorrida por las ondas reflejadas será  $2T$ , donde  $T$  es la distancia de profundidad del defecto. Por lo tanto, la frecuencia de la onda P depende de la velocidad de la onda en el elemento en estudio ( $C_{pp}$ ) y se representa por la siguiente ecuación, la cual es la ecuación fundamental del método de Impacto-Eco (Carino, 2001):

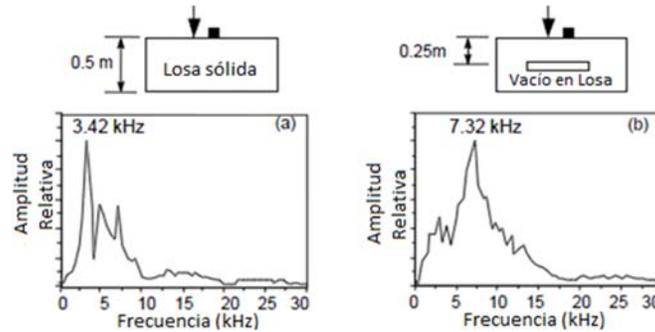
$$f = \frac{C_{pp}}{2T} \quad [4]$$

$$\text{donde: } C_{pp} = 0.96 C_p \quad [5]$$

La **Ec. [5]** se debe a que se ha encontrado por medio de análisis rigurosos que la velocidad de onda medida con el I-E es un 96 % de la velocidad de onda P real,  $C_p$  (Malhotra y Carino, 2003).

Cada vez que la onda P llega al punto de impacto se generan los desplazamientos característicos, los cuales son registrados. Para la interpretación de las mediciones del método I-E se utiliza la técnica del *análisis de frecuencia en el tiempo* (Carino, 2001). Con las frecuencias registradas de cada onda P

reflejada, se determina la frecuencia dominante utilizando la *Transformada de Fourier* (FFT por sus siglas en inglés). Es así como, por ejemplo, la medición del desplazamiento en el tiempo por la llegada de las ondas en la imagen superior derecha de la **Fig. 1** izquierda, se vería en el dominio de la frecuencia como la imagen derecha de la **Fig. 2** (Carino, 2001). Con el valor de frecuencia obtenido, se determina el espesor del elemento (usando por ejemplo la norma ASTM C1383-15) o las propiedades del defecto (para lo cual previamente se debe determinar la velocidad de onda P en concreto sano), por medio de la **Ec. [4]**.



**Figura 2.-** Ejemplo del espectro de amplitud: a) porción sólida de 0.5 m de grosor. b) Vacío artificial de 0.25 m de profundidad (Fuente: Carino, 2001).

Con respecto a la capacidad teórica que tiene el I-E para detectar anomalías, existen tres tendencias principalmente. La primera consiste en que el valor obtenido mediante el ensayo es igual o sumamente cercano a la profundidad real del defecto; en estos casos, se dice que el método midió el defecto correctamente. La segunda condición observada, es que el valor obtenido es considerablemente mayor a la profundidad del defecto y al espesor del elemento; se puede considerar en estos casos, que la onda de esfuerzo P bordeó el defecto y se reflejó en el fondo de la losa (detectado pero no medido). Finalmente, la tercera tendencia consiste en que el valor obtenido es igual o cercano al espesor real de la losa, lo cual evidencia que el ensayo no detectó el defecto; en algunas situaciones y por medio de la interpretación de la forma de la gráfica en el dominio de la frecuencia, es posible determinar que existe un defecto, pero es necesario un impactor de diámetro más pequeño para poder detectarlo.

## EJMPLOS DE APLICACIONES

- Detección de vacíos en lechadas de inyección de ductos de postensión: Los espacios vacíos sin mortero de inyección en los ductos de postensión, aumentan las probabilidades de que los torones se corroan, aumentando el riesgo de falla debido a la pérdida de sección transversal del acero. Al aplicar el I-E, se pueden detectar estos vacíos de forma rápida y económica sin realizar grandes daños en la estructura y, así, prevenir un posible fallo (Soto, 2017).
- Detección de defectos en concreto como delaminaciones, vacíos y segregación: Por el proceso de corrosión, se expande el acero de refuerzo, lo que genera fracturas internas y delaminaciones que se extienden sobre un área entre la superficie y el acero (Vignoli, 2018). Con el I-E se detectan las fracturas y delaminaciones antes de que estas sean visibles, por medio del espectro de amplitudes, pues genera varios picos consecutivos que determinan estas fallas. También detecta la profundidad de la falla, vacíos o segregaciones que se pueden formar en las estructuras de concreto durante los procesos constructivos (Vignoli, 2018).

## DETECCIÓN DE VACÍOS EN DUCTOS DE VIGAS POSTENSADAS

### PROBETAS DE ANÁLISIS

Se planteó como objetivo evaluar el Ensayo No Destructivo I-E en especímenes de laboratorio que simulen las condiciones y características de vigas típicas presforzadas en Costa Rica, con el fin de analizar la posibilidad de detección de vacíos en el mortero de inyección de los ductos corrugados metálicos donde se ubican los torones de presfuerzo. Para cumplir con estas condiciones, se tomaron en cuenta las variables de: resistencia del concreto, tamaño de los ductos de inyección (80 mm y

65 mm, de uso típico en Costa Rica), mortero de inyección, ubicación de los ductos y existencia de acero entre la medición y el ducto. Así mismo, se consideraron variables que permitiesen conocer la posibilidad de detección en relación al tamaño del vacío y efectividad del método. Como impactores, se utilizaron los siguientes diámetros: 2 mm, 3 mm, 5 mm, 8 mm y 12 mm.

Se realizaron un total de tres probetas identificadas como A, B y C (Ver **Fig. 3**). La primera de estas se construyó en LanammeUCR previo a la confección de la dos siguientes para evaluar el proceso constructivo y la efectividad del ensayo. A partir de los primeros resultados del espécimen A, se procedió a la elaboración de las probetas B y C construidas en plantas de concreto prefabricado nacional. Se buscó uniformizar todas las probetas, de forma que fuera posible conocer los resultados bajo propiedades similares. El espécimen A varía con respecto al B y C en su proceso constructivo, al utilizar un concreto fabricado en batidora y con mano de obra no calificada; mientras que en las restantes se utilizó concreto premezclado y condiciones de plantas de prefabricado estándar. El objetivo de estas dos últimas, es poder realizar los ensayos en elementos fabricados en las mismas condiciones y por las mismas compañías que construyen las vigas presforzadas en las cuales se harían los ensayos en la práctica. En todos los casos se especificó una resistencia a los 28 días de 70 MPa, la cual es la resistencia comúnmente utilizada hoy en día (90 MPa de valor real promedio obtenido).

El control del tamaño de los vacíos se realizó por medio de ventanas de inspección durante el proceso de colocación del mortero, definiendo previamente un límite de llenado correspondiente a porcentajes de: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Se definió una zona de la probeta sin ductos para la calibración del equipo y medición de la velocidad de onda en el concreto sano.



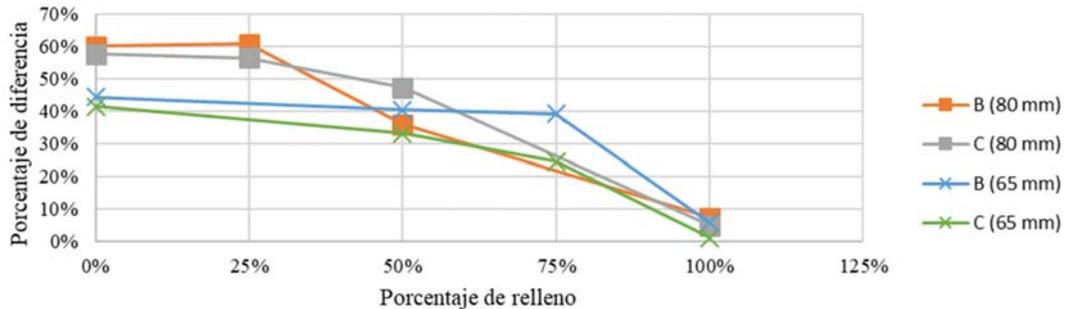
**Figura 3.-** Fotografía de la probeta B, igual en geometría a la A y C.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Para la realización del ensayo I-E se calibró el valor de la velocidad de onda en el concreto según la norma ASTM C1383-15 para cada una de las probetas. Para la medición se utilizó la sección del espécimen completamente relleno de concreto y con un espesor conocido. Se realizaron primero ensayos sobre las probetas variando la ubicación del equipo con respecto al ducto de inyección, obteniendo como mejor resultado la colocación del transductor y generación del impacto inmediatamente encima del ducto, lo cual implica que el punto de inicio y llegada de la onda en la superficie del elemento en estudio influye directamente en el recorrido de la onda; este resultado indica que entre mejor se conozca la ubicación de los ductos (por medio de un Geo-Radar de Penetración o GPR, por ejemplo), mejores resultados se pueden obtener. Se realizaron además pruebas en todas las probetas a 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días desde la colocación del mortero de relleno dentro de los ductos, para conocer la posible afectación de esta variable; sin embargo, no se observó una tendencia que se relacionara con los resultados obtenidos. Por lo tanto, la edad de colado del mortero no se consideró como una variable que afectara los resultados.

En base a las consideraciones encontradas de los resultados anteriores, se continuó con la realización de los ensayos sobre los tres especímenes fabricados. La principal variable tomada en cuenta para la definición de cantidad de ensayos correspondió al tamaño de los vacíos en los ductos, relacionada de forma directa con el porcentaje de relleno colocado y el tamaño de los ductos de inyección. En la

**Fig. 4** se muestran los resultados promedio obtenidos al realizar las mediciones del espesor del espécimen con el método I-E de las probetas B y C en ductos de diámetro interno de 65 mm y 80 mm. Se muestra la relación entre el porcentaje de diferencia obtenido entre el espesor medido y el espesor real del espécimen, contra el porcentaje de relleno dentro de los ductos. Porcentajes de diferencia mayores al 10% permiten detectar la existencia de un vacío dentro de los ductos de inyección. Se logra observar que para estas probetas en todos los casos se logra la detección de los vacíos.



**Figura 4.-** Resultados promedio obtenidos del porcentaje de diferencia entre el espesor real del elemento y el medido por el ensayo, con respecto al porcentaje de relleno.

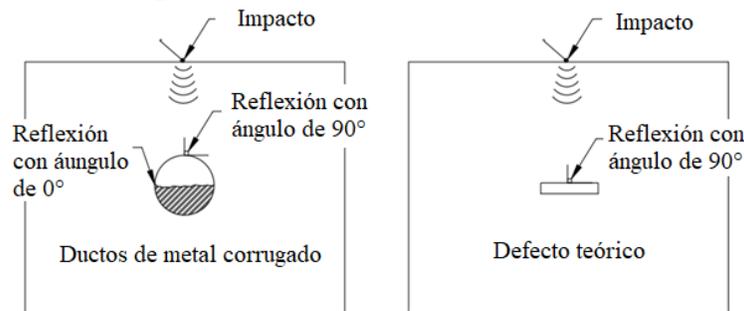
En la **Tabla 1** se indica con una “D” cuando se logró detectar un vacío, “PD” para posible detección y “ND” para cuando no se logró detectar. Las celdas vacías “-” corresponden a las configuraciones donde no contaba con ese porcentaje de vacío para el diámetro del ducto indicado en cada una de las probetas, y por lo tanto, en esos casos no se realizó el ensayo. Se observa que para las probetas B y C se logró detectar el vacío en todos los casos para ambos tipos de ductos, mientras que para la probeta A se encontró problemas en la detección en el ducto de 65 mm en porcentajes de vacío de 25 % y 50 %. Esta situación puede estar relacionada al proceso de construcción de la probeta A, donde no se contó con mano de obra calificada ni con el proceso de calidad de una planta de prefabricado como si sucedió en las probetas B y C, resultando como consecuencia una superficie irregular y rugosa. Es importante mencionar además que en teoría, para los diámetros de ductos de postensión estudiados de 65 mm y 80 mm, los únicos impactores que deberían detectar los vacíos por medio de la reflexión completa de la onda deberían ser los de 2 mm y 3 mm; se debe recordar que esos diámetros de ducto de postensión fueron escogidos y usados por ser los más comunes en el medio nacional.

**Tabla 1.-** Detección de vacíos según los resultados obtenidos del END Impacto Eco.

Probeta	Diámetro interno del ducto (mm)	Porcentaje de vacío			
		100 %	75 %	50 %	25 %
A	65	D	D	PD	ND
	80	D	-	D	-
B	65	D	D	D	D
	80	D	-	D	-
C	65	D	D	D	D
	80	D	-	D	-

A partir de la detección de los vacíos con los resultados obtenidos, se evaluaron los posibles efectos de otras variables como la presencia de acero en el recorrido de la onda mecánica y las condiciones de borde del elemento. Para la presencia de acero no se obtuvieron tendencias que indicarán la afectación en la medición, sin embargo, la cuantía de acero de los especímenes es baja (era de retracción y temperatura, y por transporte) y no es posible conocer la incidencia de este efecto en zonas de alta aglomeración de acero, como efectivamente podría suceder en la práctica. Si bien es cierto y de acuerdo con la **Ec. [3]**, como la impedancia del acero es mucho mayor que la impedancia del concreto no hay cambio de fase en la interfase, y además la reflexión es del 67 % de la onda, no es posible determinar si en zonas con muy alta congestión los resultados se podrían ver afectados.

La teoría del END Impacto-Eco indica la posibilidad de detección de la profundidad a la que se encuentra la anomalía, por medio del estudio del espectro de frecuencia de la reflexión de ondas generadas por el impacto mecánico, que al encontrarse una anomalía debería mostrar un segundo pico de frecuencia en el espectro (Ver **Fig. 2**). Sin embargo, en las pruebas realizadas no fue posible detectar una indicación de la profundidad a la que se encuentran los vacíos detectados; lo que se detectó fue un espesor aparente mayor, es decir, la medición de una mayor duración de viaje de las ondas debido a que estas rodean la anomalía y recorren por lo tanto una mayor distancia, pero no se reflejan por completo. La razón de esto es que los ductos presentan una geometría que provoca un ángulo de incidencia de la onda entre  $90^\circ$  y  $0^\circ$ . Para obtener el máximo coeficiente de reflexión se requiere de una incidencia lo más cercano a la normal ( $90^\circ$ ), por lo cual en este tipo de defectos se distorsiona la posibilidad de una reflexión de la onda ideal, logrando detectar la anomalía por medio de la interpretación del espesor aparente, como sucedió en este caso, pero evitando la medición exacta de la posición del vacío (Ver **Fig. 5**).



**Figura 5.-** Incidencia de la onda mecánica sobre el defecto.

## DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LOSAS DE CONCRETO DE PUENTES

### PROBETAS DE ANÁLISIS

La investigación pretendía evaluar el desempeño del Ensayo No Destructivo I-E en condiciones controladas para determinar sus capacidades y limitaciones en la detección de defectos en losas de concreto reforzado de puentes existentes. Para esto, se diseñaron dos especímenes de prueba que representan losas de puentes reales y, en estas, se incluyeron defectos intencionales. Sobre las losas se realizaron ensayos de I-E, tanto en zonas sanas como defectuosas, utilizando tres impactores con diámetros de 5 mm, 8 mm, 12 mm.

Se pretendía que los especímenes de prueba representaran de la forma más cercana posible las losas de puentes en servicio de la Red Vial Nacional que son de tipo viga-losa, con vigas de acero o concreto reforzado y simplemente apoyadas, la cual es por mucho la tipología más común. Para esto, se realizó un estudio de los planos de 65 puentes existentes en las Rutas Nacionales No. 1, 2, 4, 32 y 34, que cumplen con las características anteriores. De cada losa de puente, se determinaron las siguientes características: espesor, resistencia a compresión del concreto ( $f'_c$ ), recubrimiento, espaciamiento y tamaño del refuerzo longitudinal y transversal. A partir de dicha revisión, se determinó cuáles son las características más representativas en los puentes existentes y estas se incorporaron para diseñar los especímenes de prueba.

De esta forma, los especímenes de prueba consisten en dos losas con dimensiones laterales de 1,50 m x 1,50 m, con resistencia a la compresión especificada de  $f'_c=24$  MPa (medida al inicio de los ensayos, aproximadamente 100 días después del colado,  $f'_c=37$  MPa en promedio). En los dos especímenes se incluyeron defectos intencionales y la única diferencia entre ambas radica en que la *Losa 1* posee un espesor de 170 mm y una mayor densidad de acero (la configuración típica de acero de losas de puente existentes), mientras que la *Losa 2* tiene un espesor de 250 mm y una menor densidad de acero (por retracción y temperatura, así como para el transporte). Esta última variación se incluyó además con el fin de identificar el efecto que tiene el refuerzo en la medición de los defectos.

Los defectos intencionales que se incluyeron en las losas corresponden a: vacíos, delaminaciones y problemas de consolidación (hormigueros), ya que son los problemas identificados como los más comunes en losas de puentes. Además, se evaluó la capacidad del I-E para determinar el espesor de una losa al incluir en la *Losa 2* diferentes espesores.

Para definir el material con el cuál se debían fabricar los defectos y espesores, se analizaron investigaciones internacionales con condiciones similares a las del proyecto y se utilizaron los materiales y métodos constructivos que probaron ser adecuados para cumplir este propósito. De esta forma, los vacíos y delaminaciones se construyeron con discos de poliestireno expandido de 19 mm de espesor. Los hormigueros con bloques de concreto permeables cubiertos con plástico (para que no se saturaran), y los cambios de espesor se fabricaron con bloques de poliestireno.

Los defectos intencionales se diseñaron utilizando los métodos de detección del equipo que establece la literatura para cada diámetro de impactor. En la **Tabla 2**, se presentan los límites de detección para los impactores utilizados en el proyecto, los cuáles y tal y como se indicó anteriormente, dependen del diámetro de la esfera. Con base en estos límites, se definió la cantidad de defectos, su tamaño lateral y la profundidad a la que se ubican. La intención fue diseñar defectos dentro y fuera de estos límites para evaluar las capacidades y limitaciones del método. En la **Figura** más adelante, se muestran fotografías de ambas losas con los defectos intencionales, antes de la colocación del concreto.

**Tabla 2.** Límites de detección del I-E para los impactores de 5 mm, 8 mm y 12 mm de diámetro.

Diámetro del impactor, D (mm)	Longitud lateral mínima, L (mm)	Profundidad mínima, $d_{min}$ (mm)	Profundidad máxima, $d_{max}$ (mm)
5	70	35	280
8	111	56	444
12	175	88	700

Fuente: Germann Instrumentos, Inc., 2013

En total se definieron 40 puntos de prueba (20 puntos en la *Losa 1* y 20 puntos en la *Losa 2*). Como se mencionó anteriormente, los puntos de prueba se establecieron en zonas defectuosas y en zonas sanas. En cada punto de prueba se realizaron tres ensayos de I-E con el fin de medir la variabilidad de los resultados al utilizar el método.



**Figura 6.** Fotografía de la *Losa 1* (izquierda) y de la *Losa 2* (derecha) antes del colado del concreto.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Se determinó que el I-E arrojó, en la mayor parte de los puntos de prueba, resultados que concuerdan con los límites teóricos. Por ejemplo, no fue posible detectar los defectos de menor tamaño (40 mm) pero el equipo sí detectó con todos los impactores los defectos de mayor tamaño (200 mm). Esto concuerda con los límites teóricos, como se evidencia de la **Tabla 1**, ya que los defectos de 40 mm tienen una longitud lateral menor a la longitud mínima detectable y los defectos de 200 mm tiene un tamaño superior al mínimo detectable por todos los impactores.

Sin embargo, no todos los resultados obtenidos coinciden con la teoría: en aproximadamente 30 % de los puntos de prueba en los cuales se esperaba que el impactor lograra detectar correctamente un

defecto midiendo su profundidad real, esto no se logró; en el 70% de estos casos, se identificó que el método bordeó el defecto y en el restante 30 % no se logró identificar del todo. En otros casos se observó lo opuesto: un 50 % de los puntos probados 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. Cuando las ondas bordean la anomalía, estas recorren una mayor distancia lo que resulta en un espesor aparente mayor, lo cual permite deducir la presencia de alguna discontinuidad interna aun cuando no es posible conocer su profundidad real (se dice que se detectó el defecto pero este no se midió). Con respecto a la capacidad del método para medir espesores de elementos de concreto, se determinó que en el 90 % de los casos, el I-E lo hizo correctamente.

Adicionalmente, a partir de los resultados, fue posible identificar dos tendencias importantes. Primero, se observó que entre más pequeño es el diámetro del impactor, más exactos son los resultados. La segunda tendencia determinada para la medición de espesores utilizando I-E, es que entre mayor es el diámetro del impactor, mayor es la variabilidad entre las mediciones para un mismo punto usando un mismo impactor. Por lo tanto, entre menor es el diámetro del impactor, mayor es la precisión del método, lo cual era un resultado esperado de la teoría según se indicó al inicio.

Para analizar el efecto del acero de refuerzo, se compararon los defectos que son iguales en la *Losa 1* y *Losa 2*. Se determinó que las condiciones identificadas por cada diámetro de impactor para un mismo tipo de defecto en las dos losas son sumamente similares. Por esta razón, se considera que la densidad del acero utilizada, la cual se asemeja a la de losas de concreto de puentes reales, no tiene ningún efecto importante sobre las mediciones realizadas con I-E.

## CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas sobre los especímenes con características semejantes a vigas postensadas utilizadas en el país, permiten verificar la posibilidad de detectar vacíos dentro de los ductos de inyección por medio del I-E. Se debe tomar en consideración el correcto manejo y desarrollo de la prueba como la ubicación del equipo e impacto, así como la limpieza de la zona a ensayar para no ver afectados los resultados.
2. Debido a la forma geométrica de los vacíos dentro de los ductos de inyección, no fue posible obtener una buena reflexión de parte de la onda mecánica; lo que impide la posibilidad de detectar la profundidad a la que se ubican los vacíos, para los diámetros de ducto estudiados.
3. Con el método de I-E sí fue posible determinar la presencia de los dos tipos de defectos internos de losas de puente estudiados: delaminaciones y hormigueros.
4. En cuanto a la relación entre el diámetro del impactor y su capacidad para detectar y medir la profundidad de un defecto, se obtuvo 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, recorriendo una distancia mayor que si lo hiciera de forma recta. De esta forma, es posible deducir la presencia de una discontinuidad aun cuando no es posible conocer su profundidad exacta.
5. 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 obtuvo 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.
6. En cuanto a la capacidad del equipo para medir espesores, se determinó que el I-E resulta bastante adecuado.
7. Las densidades de acero de refuerzo utilizadas dentro de los especímenes de concreto no afectaron los resultados obtenidos con I-E.

## TRABAJOS FUTUROS

Los especímenes que se construyeron para los dos proyectos están disponibles en las instalaciones del LanammeUCR para futuras investigaciones, tanto internas como de externos con algún interés en el tema. La línea de investigación en END está formalmente inscrita como proyecto en la Vicerectoría de Investigación de la UCR desde enero de 2019 hasta finales del 2021 con opción de prórroga. Bajo esta misma línea, el siguiente proyecto, en este momento en ejecución, es la elaboración de especímenes para el estudio de los métodos de Termografía Infrarroja y Geo-Radar de Penetración para la detección de defectos y propiedades de losas de concreto de puentes.

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc., Director General, y al Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA, Coordinador de Laboratorios Área de Construcción, ambos de LanammeUCR, por su ayuda, dirección y compromiso durante la realización de los proyectos. A las empresas PuentePrefa y Productos de Concreto, por facilitar la fabricación y materiales para la confección de las probetas en plantas de prefabricado de concreto nacional.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACI 228.2R-13** (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, EUA.

**ASTM C1383-15** (2015). *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*, West Conshohocken: ASTM International.

**Barrantes, J.** (2012). *Evaluación de Ensayos No Destructivos en laboratorio y campo utilizados en el análisis estructural de edificaciones de concreto reforzado. Esclerómetro Schmidt y detector de acero por el método electromagnético*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

**Carino, N.** (2001). "Impact-Echo Method: An Overview", ASCE World Structural Engineering Conference, Washington D.C, pp.5-8.

**Malhotra, V. y Carino, N.** (2003). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. 2<sup>da</sup> Ed., CRC Press, Florida.

**Navas, Alejandro.** (1993). *Ensayos No-Destructivos en Obras Civiles*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

**Quesada, D.** (2014). *Evaluación de ensayos no destructivos para caracterizar la resistencia del sistema prefabricado de columnas y baldosas para vivienda unifamiliares de un nivel. Medidor de permeabilidad, determinación de velocidad de onda por ultrasonido, esclerómetro Schmidt y detector de metales*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

**Sansalone, M. y Carino, N.** (1986). *Impact-Echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves*, National Bureau of Standards Department of Commerce, Rep. NBSIR 86-3452, Washington D.C.

**Salas, G.** (1993). *Calibración de Equipo utilizado en Pruebas No-Destructivas*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

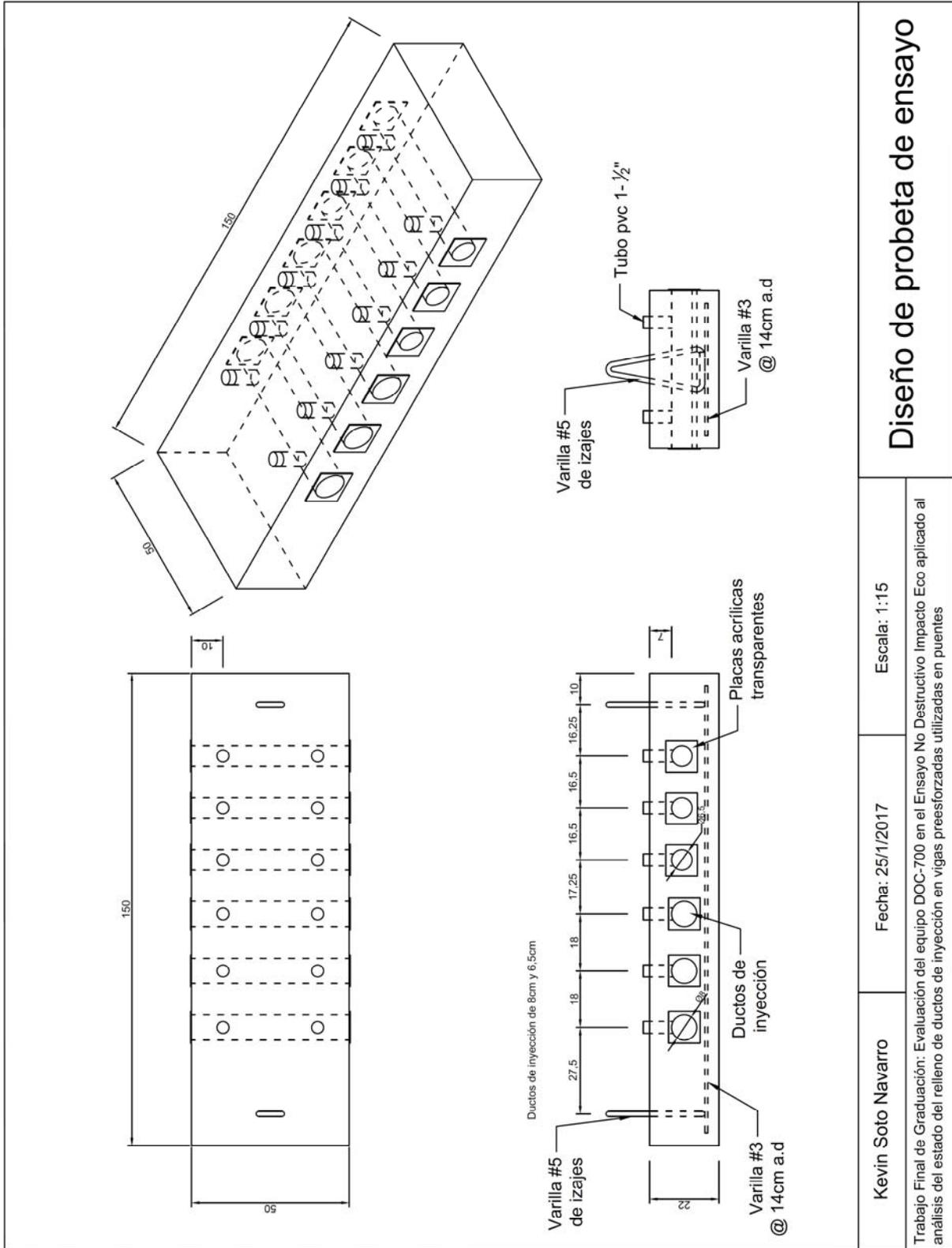
**Soto, K.** (2017). *Evaluación del equipo DOC-700 en el END Impacto Eco aplicado al análisis del estado del relleno de ductos de inyección en vigas preesforzadas utilizadas en puentes*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

**Transportation Research Board** (2013). *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration*. National Academies, Rep. S2-R06A-RR-1, Washington, D.C.

**Vignoli, S.** (2018). *Evaluación del ensayo no destructivo impacto-eco para la detección de defectos en losas de concreto reforzado en puentes*, Proyecto Final de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

# ANEXO: PLANOS AS-BUILT DE LOS ESPECÍMENES

## DETECCIÓN DE VACÍOS EN DUCTOS DE VIGAS POSTENSADAS



Diseño de probeta de ensayo

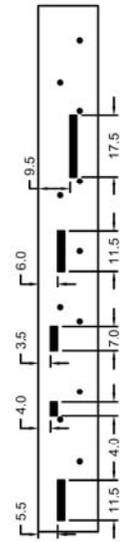
Kevin Soto Navarro

Fecha: 25/1/2017

Escala: 1:15

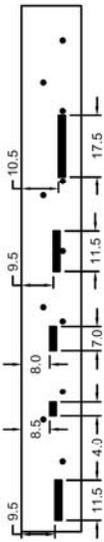
Trabajo Final de Graduación: Evaluación del equipo DOC-700 en el Ensayo No Destructivo Impacto Eco aplicado al análisis del estado del relleno de ductos de inyección en vigas preesforzadas utilizadas en puentes

# DETECCIÓN DE DEFECTOS EN LOSAS DE CONCRETO DE PUENTES



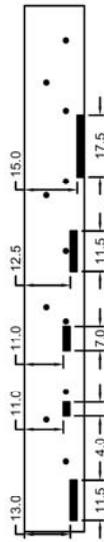
**Corte A-A**

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de 3" de espesor



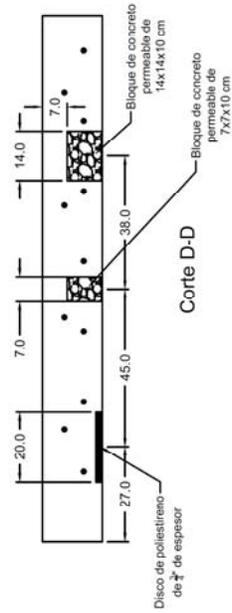
**Corte B-B**

Nota: Los defectos son discos de poliestireno de 3" de espesor

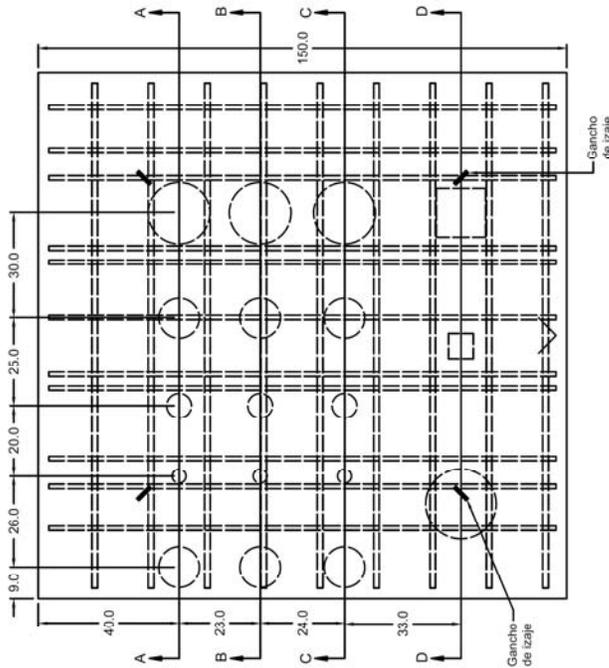


**Corte C-C**

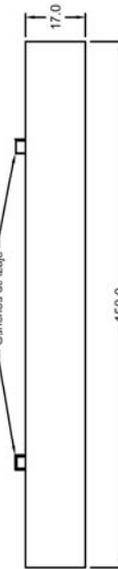
Nota: Los defectos son discos de poliestireno de 3" de espesor



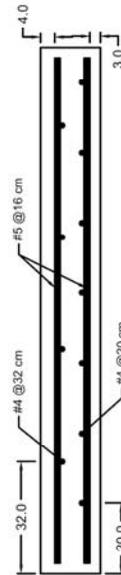
**Corte D-D**



**Planta**

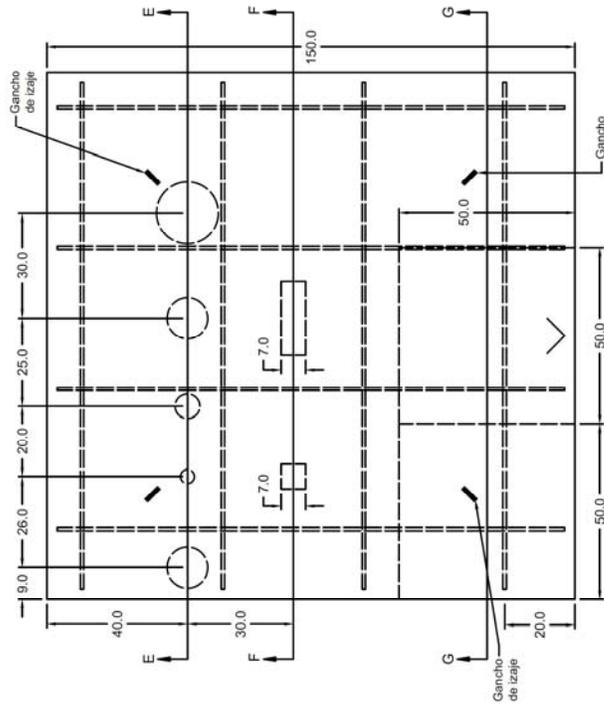


**Sección transversal**

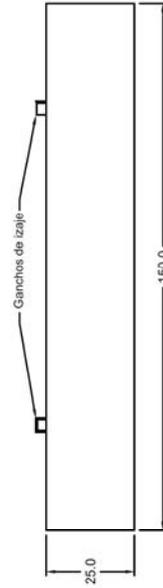


**Detalle del refuerzo**

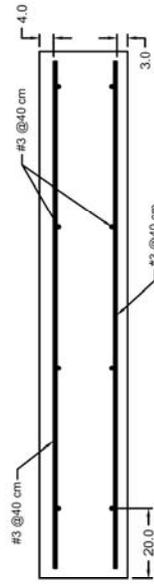
<p>Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Civil</p>	<p>Contenido: Planos as built de la losa 1</p>	<p>Lamina: 1 de 2</p>
<p>Proyecto de graduación: Evaluación del ensayo no destructivo impacto-eco para la evaluación de losas de concreto reforzado de puentes</p>		<p>Elaborado por: Sofía Vignoli Vargas</p>
<p>Fecha: 24 de marzo de 2018</p>		



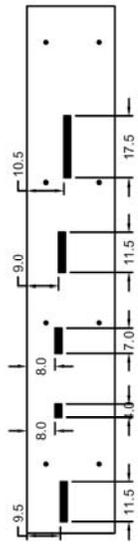
Planta



Seccion transversal

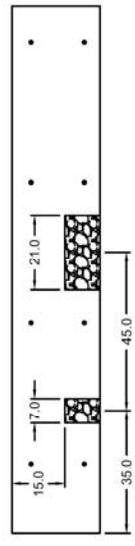


Detalle de refuerzo



Corte E-E

Nota: Los deflectores son discos de poliestireno de 2" de espesor.



Corte F-F

Nota: Los deflectores 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.

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