

NUEVO MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE DEFECTOS DE LLENADO EN VAINAS DE POSTENSADO

Marcelo Ruffolo, Teresita Frigerio, Joaquin Boselli, Peter Thieberger y Mario A.J. Mariscotti
THASA
info@thasa.com

RESUMEN

La determinación de defectos de llenado en vainas de postensado mediante el método gammagráfico ha sido objeto de publicaciones previas. Este método ha mostrado ser muy efectivo en vigas de espesores menores a 60 cm. En el presente trabajo se describen los primeros resultados obtenidos en vainas existentes en piezas de mayor espesor. El método utiliza un pequeño espectrómetro gamma como elemento receptor de la radiación transmitida en lugar de placas gammagráficas. El trabajo fue realizado sobre muestras preparadas por Simpson, Gumpertz y Heger de Massachussets a raíz de un pedido del Departamento de Transporte del Estado de Florida. Capas de diferente densidad fueron medidas, en la mayoría de los casos, con precisiones de 2mm en altura y 0,1 g/cm³ en densidad relativa.

ABSTRACT

The observation of grouting defects in postensioned ducts using the gammagraphic method has been reported in previous communications. This method provides precise data but is limited to concrete pieces less than 60 cm thick. In the present work, the first results obtained in ducts embedded in large volumes of concrete are described. They were achieved by using a small gamma-ray spectrometer instead of gammagraphic plates. The work was performed on samples prepared by Simpson, Gumpertz and Heger of Massachussets following a request by Florida State's Department of Transport. Layers of different densities were determined in most cases with accuracies better than 2 mm in height and 0,1 g/cm³ in relative densities.

INTRODUCCION

La determinación de defectos de llenado en vainas de postensado es un tema de creciente interés debido al riesgo de corrosión bajo tensión de los cables.

Un método para detectar este tipo de defectos ha sido el uso de gammagrafías, análogo a las radiografías de uso médico pero aplicando una fuente de rayos gamma para obtener imágenes de vainas de postensado en el interior de una pieza de hormigón.^{1,2} Dos ejemplos de resultados obtenidos con este método se muestran en la Figura 1. Estos corresponden a mediciones realizadas en el Complejo Zárate-Brazo Largo³ y en el puente N.S. da Guía en Ponte de Lima, Portugal en colaboración con la Universidad de Oporto.⁴

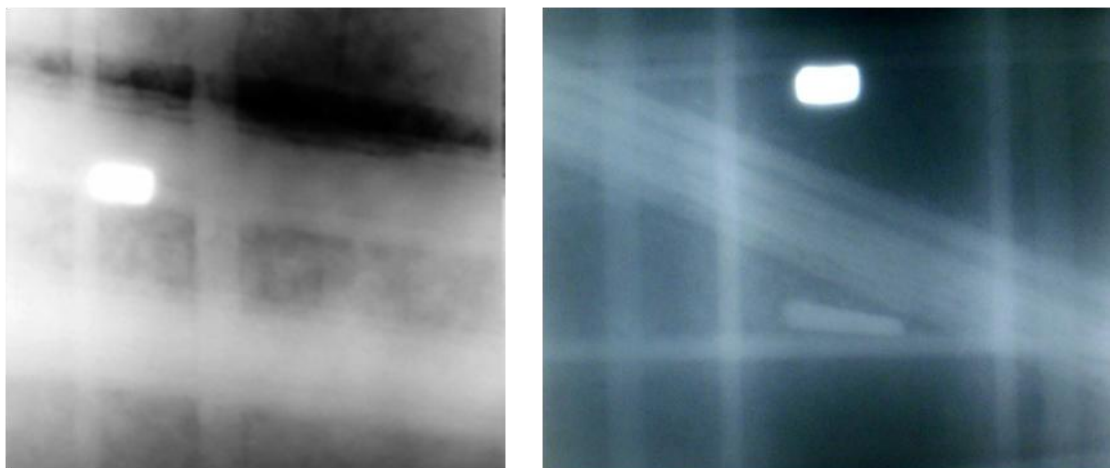


Figura 1. Gammagrafías mostrando vainas en vigas del Complejo Zárate Brazo largo (foto de la izquierda con una banda oscura que indica un defecto severo de llenado) y vaina en puente N.S. da Guía en Ponte de Lima, Portugal (derecha).

El método gammagráfico ha mostrado ser muy efectivo y preciso para el estudio de vigas de bajo espesor (30-60 cm dependiendo de la fuente de rayos gamma que se utilice).

A fines de 2012 la firma Simpson, Gumpertz & Heger (SGH) de Waltham MA nos consultó si era posible detectar fallas en el llenado de vainas de postensado en cabezales de pilas de un puente en el Estado de Florida (Figura 2 más abajo).

Las dimensiones de estos cabezales y la distancia de las vainas a una de sus caras no permiten utilizar el método gammagráfico. Por lo tanto se decidió realizar pruebas aplicando la tecnología THATIR que se describe más abajo.

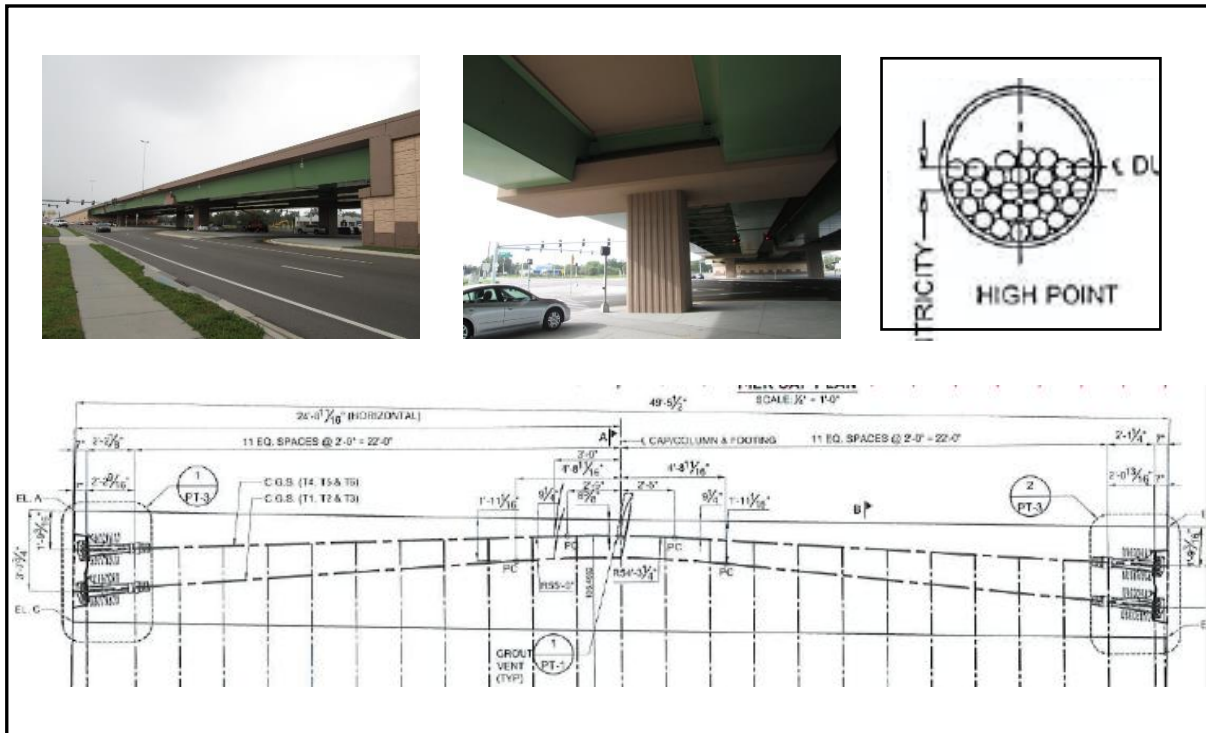


Figura 2. Foto del puente sobre la ruta SR50 en el Estado de Florida y del cabezal dentro del cual están las vainas que se desean estudiar. Arriba a la derecha se ve el detalle del tendón en el centro de la vaina y abajo el diagrama del postensado.

Las pruebas se realizaron sobre seis muestras preparadas por SGH con distintas combinaciones de volúmenes y densidades de lechadas y de tendones.

LA TECNOLOGÍA “THATIR” Y SU APLICACIÓN AL PRESENTE CASO

El sistema THATIR (Tomografía de Hormigón Armado en Tiempo Real) fue desarrollado originalmente para la detección de sarro en el interior de cañerías de agua de la red metropolitana subterránea⁵. Luego fue aplicado al estudio de perfiles doble T en bovedillas y a la medición de armaduras y oquedades en piezas de gran espesor.

Su aplicación a la inspección de vainas de postensado se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.

Una fuente radioactiva y un pequeño detector-espectrómetro de rayos gamma⁶ se desplazan hacia abajo por sendas perforaciones verticales de 2 cm de diámetro que pasan por ambos lados de la vaina a ser inspeccionada. Un motor controlado por una computadora, mueve el sistema en intervalos regulares de tiempo y espacio y la intensidad de la radiación gamma que llega al detector es registrada y analizada.

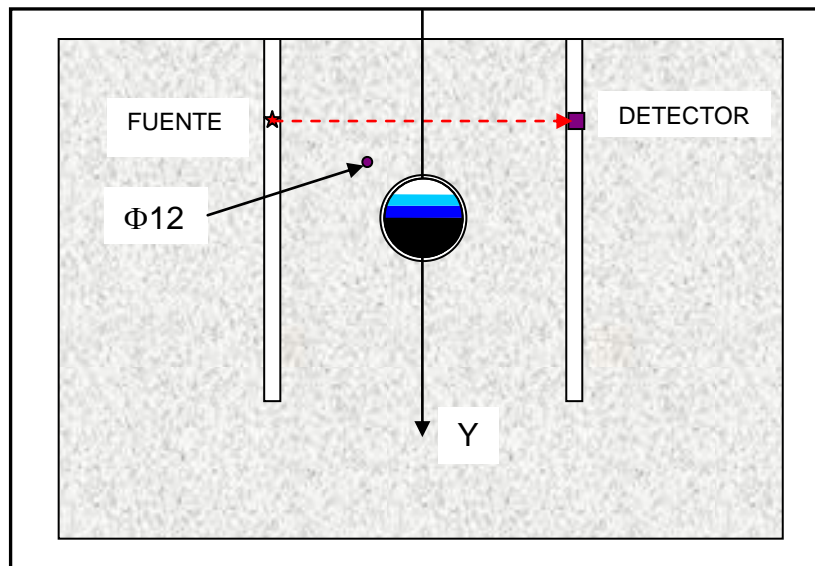


Figura 3. Esquema conceptual del sistema THATIR y la disposición usada para el modelo de cálculo cuyos resultados se muestran en la Figura 4. El círculo central representa una vaina de postensado dentro de un bloque de hormigón. Dentro de la vaina existen zonas con vacío (blanco), lechada de baja densidad (celeste), lechada de densidad correcta (azul oscuro) y tendón (negro). Un poco más arriba y a la izquierda se ha supuesto la existencia de una barra de acero de 12 mm. En sendas perforaciones de 2 cm de diámetro se desplazan hacia abajo en pasos de 1mm, una fuente radioactiva y un detector gamma.

El área negra dentro de la vaina en la Figura 3 representa el acero del tendón que en este caso está ubicado en la parte inferior de aquella porque las secciones de interés son las que se encuentran cercanas al punto medio del cabezal (ver Figura 2). Las bandas azul oscuro y azul claro representan zonas de lechada de alta y baja densidad, respectivamente. En la Figura 3 la parte superior de la sección de la vaina se muestra vacía.

Los rayos gamma son atenuados y absorbidos por la materia. La intensidad de un haz de rayos gamma atravesando una muestra es una función del espesor y de la densidad de los elementos en el interior de la misma. Por lo tanto una zona vacía en la vaina producirá un incremento de la intensidad gamma registrada mientras que los rayos gamma que atraviesan el tendón serán más atenuados que cuando éstos atraviesan el mismo espesor de concreto.

El dispositivo consiste en: a) un bastidor que soporta el sistema de movimiento y los dos tubos que contienen en sus extremos la fuente y el detector; b) una fuente de energía; c) un analizador multicanal que permite registrar las distintas energías gamma y d) una computadora portátil.

Los resultados de un modelo teórico preliminar, que sirven para ilustrar el alcance del THATIR, son mostrados en la Figura 4.

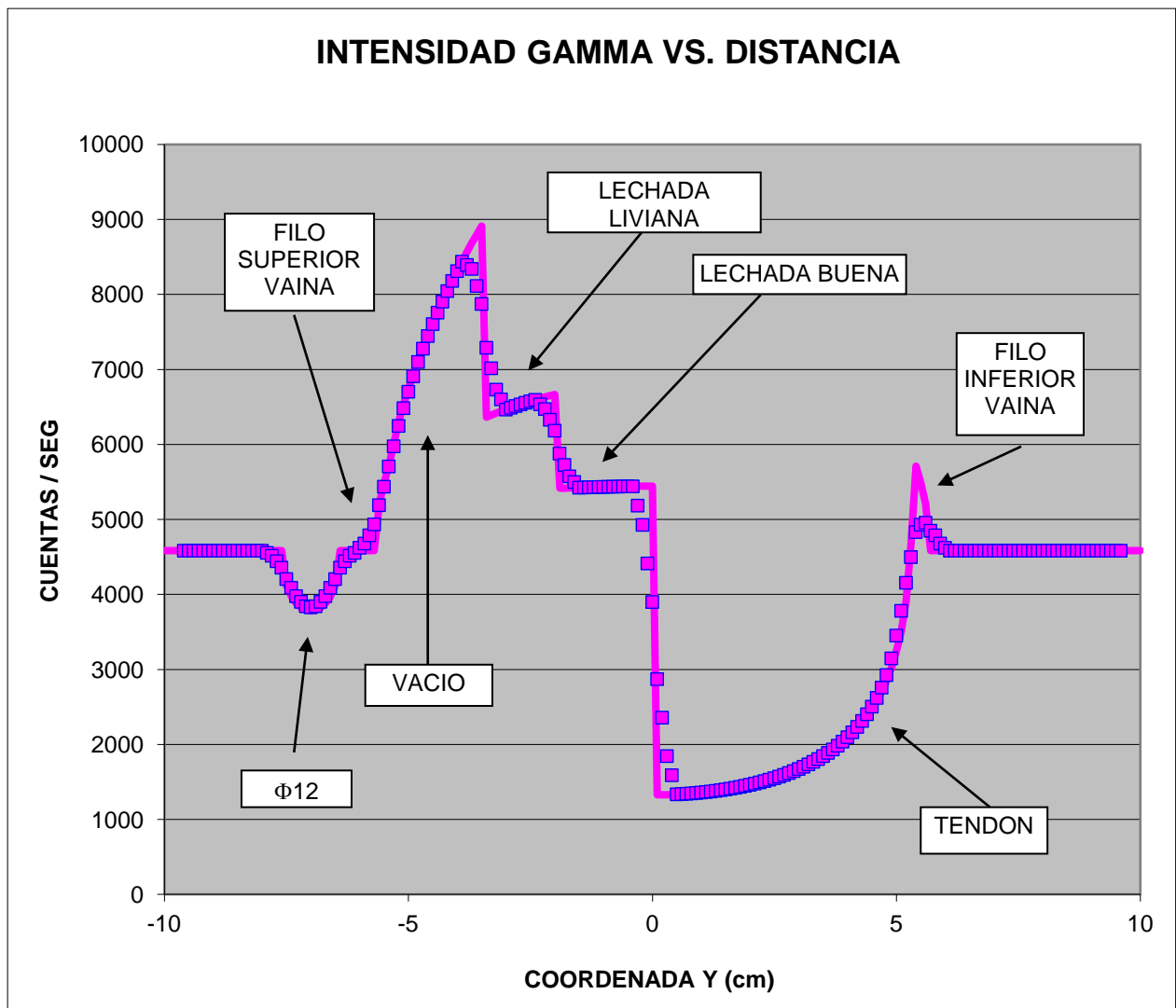


Figura 4. Intensidad gamma en función del eje Y calculada para el modelo indicado en Figura 3. En su desplazamiento hacia abajo el sistema detecta primero la barra $\Phi 12$. Luego detecta la zona superior de la vaina que está vacía, la zona de lechada liviana de baja densidad, la zona de lechada de alta densidad y el tendón.

La Figura 4 muestra la intensidad de la radiación gamma que llega al detector en cada punto de su recorrido vertical (eje Y) calculada para una vaina de 11,4 cm de diámetro, de 0,356 cm de espesor de pared y densidad $0,5 \text{ g/cm}^3$. Las densidades de la lechada liviana, de la lechada de alta densidad y del tendón, usadas para este cálculo son de 1,4; 2,1 y $6,5 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

La línea magenta y los puntos azules muestran los resultados suponiendo un detector puntual y un detector de 1 cm^2 de área mirando a la fuente, respectivamente. El tamaño del detector suaviza los cambios de intensidad al pasar de una zona a otra.

El modelo incluye una barra de acero a la izquierda de la vaina. La intensidad constante observada al principio y al final del eje Y corresponden a la atenuación debida al concreto (supuesto homogéneo de $2,5 \text{ g/cm}^3$). A $Y \approx -7 \text{ cm}$ se ve el efecto de mayor atenuación debido a la barra de acero. Luego la intensidad gamma crece debido a la zona de vacío dentro de la vaina, y decrece al ingresar en la zona de lechada de baja intensidad y más aún en la zona de lechada de alta densidad. A $Y = 0$ el sistema fuente-detector llega al borde superior de la zona del tendón donde la atenuación de la radiación es mayor que la que produce el concreto.

MUESTRAS Y ARREGLO EXPERIMENTAL

Como fue indicado más arriba las muestras fueron preparadas por la firma Simpson, Gumpertz & Heger y enviadas a Buenos Aires. Las características cualitativas de las seis muestras usadas se muestran en la Figura 5.

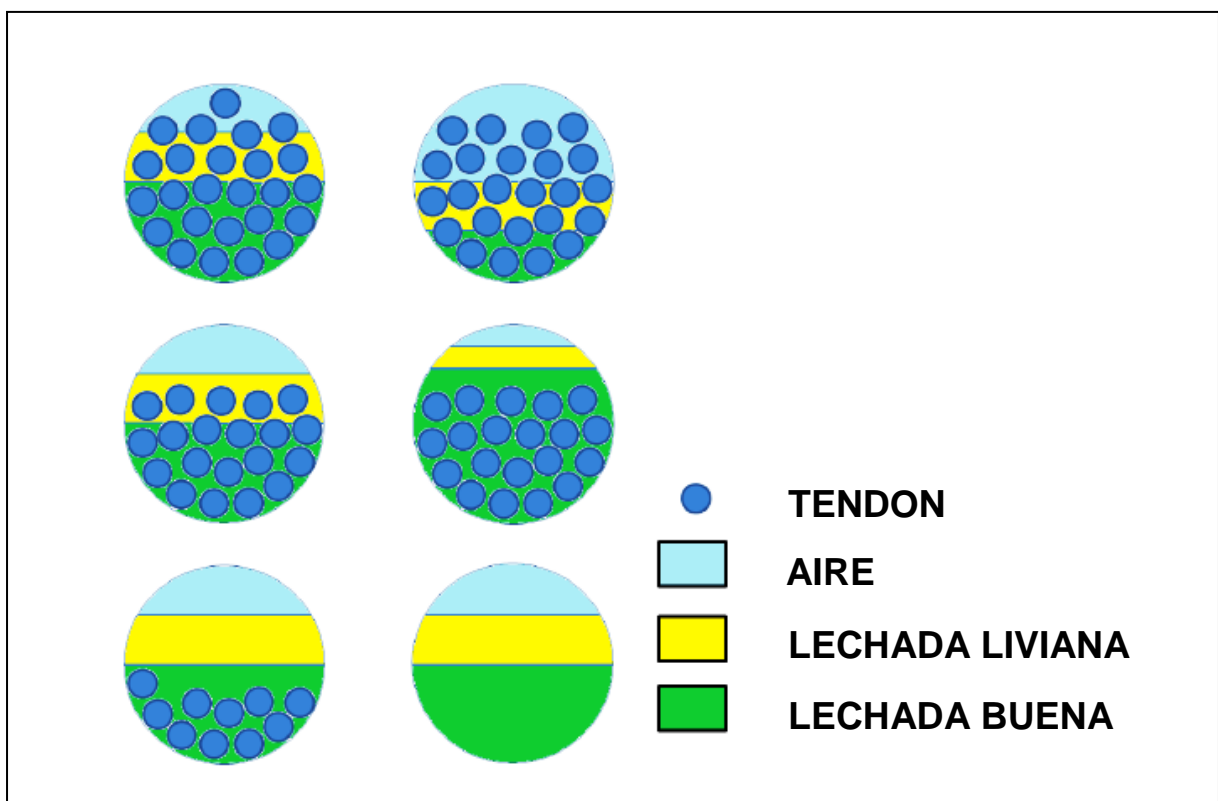


Figura 5. Tipología de las muestras fabricadas por Simpson, Gumpertz & Heger.



Figura 6. Disposición experimental. Una de las vainas medidas se encuentra inserta en el centro del conjunto de bloques de hormigón. El sistema THATIR se encuentra sobre la cara superior del conjunto. La fuente y el detector están en el extremo inferior de sendos tubos que se deslizan hacia abajo y que en la foto se los ve cerca del final de su recorrido.

El arreglo experimental utilizado se muestra en la Figura 6. Bloques de hormigón fueron fabricados de modo de simular una situación realista, es decir, la de una vaina rodeada de una masa significativa de hormigón, porque el hormigón produce una apreciable cantidad de radiación dispersa que afecta la resolución y sensibilidad del instrumento. Se ve, asimismo, el conjunto de bloques de hormigón rodeando una de las vainas medidas en este trabajo, y arriba de estos, el sistema THATIR con los dos tubos que contienen la fuente radioactiva (tubo rojo) y el detector, casi al final de su recorrido a lo largo del eje Y.

MEDICIONES Y RESULTADOS

Las seis muestras fueron medidas en dos secciones diferentes cada una. Por razones de brevedad mostramos sólo dos que ilustran adecuadamente el alcance de esta tecnología. En cada caso los resultados se presentan con un gráfico de intensidad gamma en función del desplazamiento vertical Y del sistema fuente-detector. Los puntos azules y amarillos corresponden a los resultados obtenidos a 30 y 45 cm del extremo de la vaina, respectivamente.

Estos datos fueron ajustados (la línea magenta) usando la función teórica del modelo donde las variables de ajuste son los valores Y del nivel superior de las zonas de vacío, lechada de baja y alta densidad y tendón, que denominamos PT (por Punto de Transición) y sus respectivas densidades. Estos PT's son identificados con las letras A, B, C, D y E como se muestran en la Figura 7.

Las mediciones fueron hechas en pasos de 1 mm y el tiempo de cada punto fue de 10 segundos.

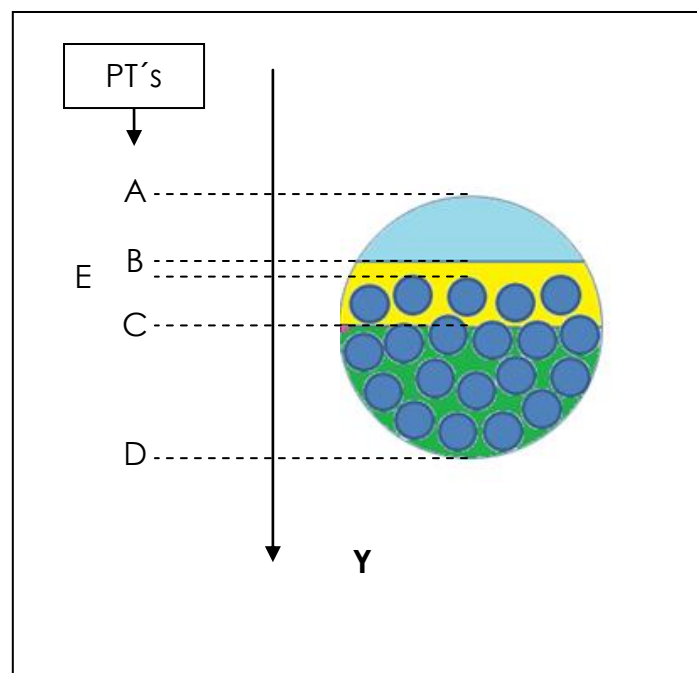


Figura 7. Indicación de los "Puntos de Transición" (PT's) utilizados como referencia en la presentación de los resultados (Figuras 8 y 9). A = punto superior de la vaina; B = interfase vacío-lechada de baja densidad; C = interfase lechada baja densidad-lechada alta densidad; D = punto inferior de vaina; E = nivel superior de tendón.

El incremento de intensidad gamma a la izquierda del PT "A" que se ve en ambos casos se debe al inevitable espacio vacío que queda entre el borde superior de la vaina y el concreto en la disposición experimental usada en este trabajo.

El hecho de que los datos no exhiban cambios abruptos en los PT's es debido al tamaño del detector pero esto no afecta la precisión de los resultados.

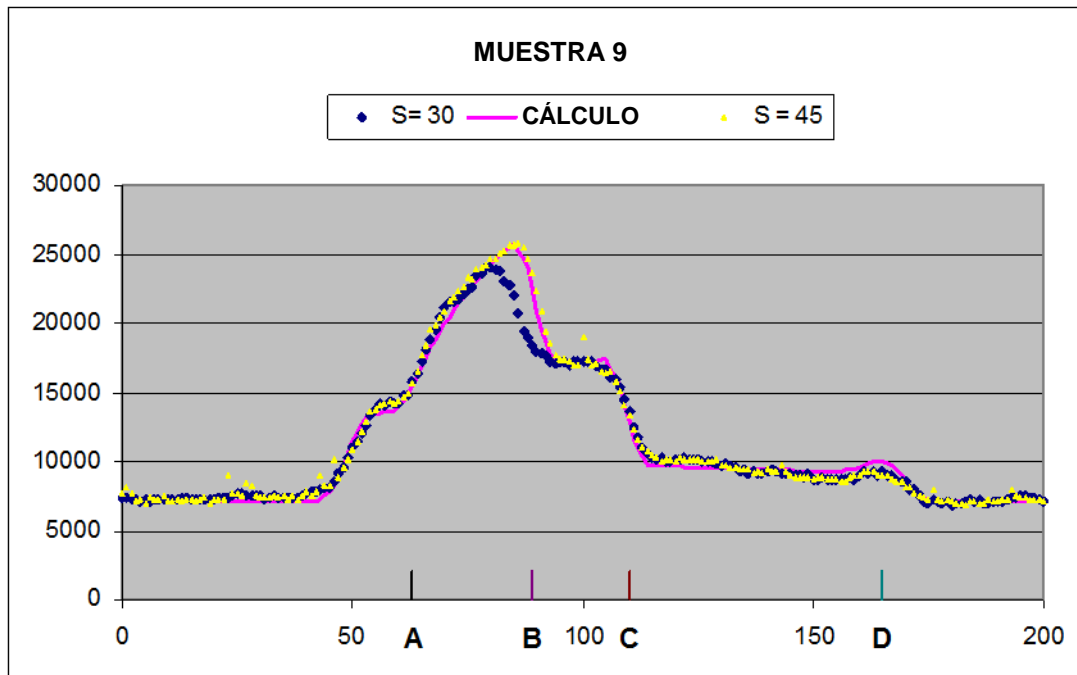
El primer ejemplo, muestra 7 (Figura 8), corresponde a un caso donde no hay tendón. En este caso la precisión en la determinación de los PT's y las densidades relativas es muy buena (mejor a 2 mm y $0,1 \text{ gr/cm}^3$). En el segundo caso, muestra 9 (Figura 9), se trata de una vaina con tendón y aquí existe mayor incerteza en la determinación de las interfaces lechada liviana-lechada buena (3,7 cm) y nivel superior del tendón (0,5 cm) (puntos PT's C y E).

Dentro de las incertezas señaladas nuestros resultados coincidieron con los valores de fabricación de SGH.

Finalmente, la Figura 10, muestra el detalle de los resultados de la Figura 9 en la zona del tendón. Se alcanza a observar la ondulación de los datos esperable por la existencia de cordones individuales. La separación entre los máximos de estas ondulaciones permite deducir que el diámetro de estos cordones de 17,8 mm

CONCLUSIONES

Este trabajo describe una nueva técnica para la detección de defectos en el llenado de vainas de postensado embebidas en piezas de hormigón de gran magnitud. Fue desarrollada a pedido de la firma Simpson, Gumpertz & Heger de Waltham, MA para satisfacer una necesidad del Departamento de Transporte del Estado de Florida (EEUU). La técnica utiliza un dispositivo que desplaza una pequeña fuente de rayos gamma y un pequeño detector-espectrómetro por sendas perforaciones verticales que pasan a cada lado de la vaina. Los resultados de mediciones realizadas sobre muestras provistas por la firma mencionada muestran que el método es apto para localizar vacíos, nivel y densidad de lechada y posición de tendones con la precisión requerida salvo en el caso que el nivel de la lechada esté por debajo del nivel del tendón en cuyo caso la imprecisión es algo mayor. Hasta donde llega nuestro conocimiento no existe al presente otro método para la detección de defectos de llenado en vainas de postensado en grandes piezas de hormigón, lo que fue corroborado recientemente en ocasión de presentar estos resultados ante profesionales del Departamento de Transporte del Estado de Florida.



El cálculo (línea magenta) es para S=45 (puntos amarillos). B corresponde a este cálculo

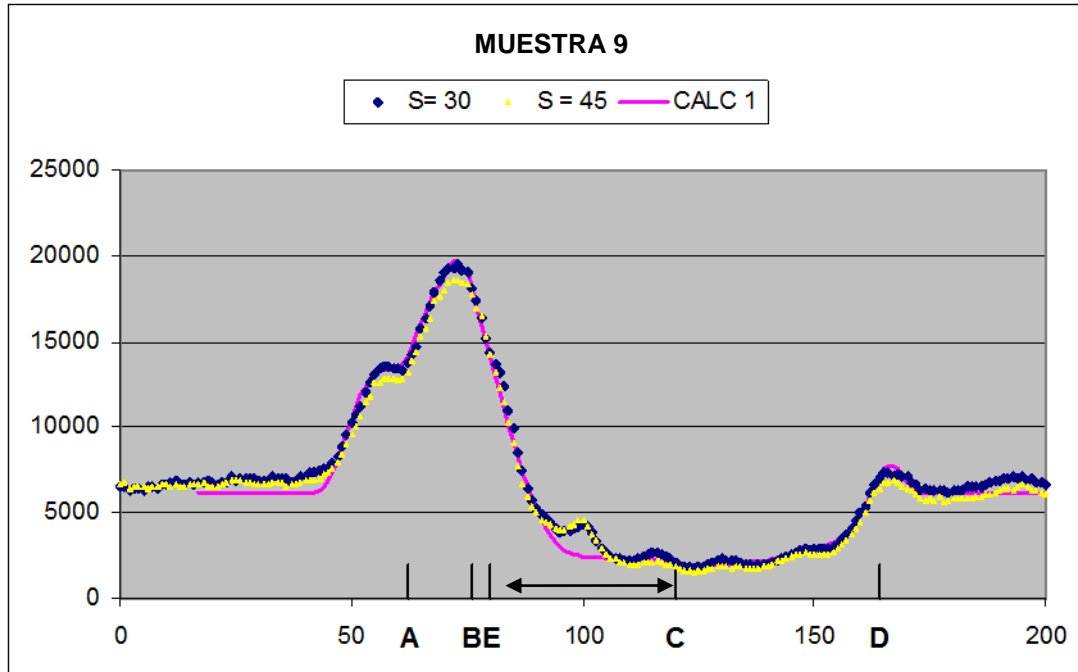
Identificación de Puntos de Transición PT's (mm)

	Sección S (cm)	(A)	(B)	(C)	(E)	(D)
Posición Y de PT	30	61	85	110	---	163
	45	61	89	110		163

Densidades (g/cm²)

Hormigón	vaina	vacío	Lechada liviana	Lechada buena	Tendones
2.12	1.2	0.4	1.15	1.95	---

Figura 8. Resultados para la muestra 7. Esta muestra no contiene tendones. Los datos han sido ajustados suponiendo las densidades mostradas en la tabla inferior. Los valores de los PT's coinciden con los informados por el fabricante dentro de los 2 mm



El cálculo (línea magenta) es para S=30 (puntos azules).
La incerteza en C está indicada con la doble flecha

Identificación de Puntos de Transición PT's (mm)

	Sección S (cm)	(A)	(B)	(C)	(E)	(D)
Posición Y de PT	30	62	76	83-120	85-80	164
	45	62	76	83-120	85-80	164

Densidades (g/cm²)

Hormigón	vaina	vacío	Lechada liviana	Lechada buena	Tendones
2.2	1.2	0.4	1.2	2.1	5

Figura 9. Resultados para la muestra 9. Esta muestra contiene tendones. Los datos han sido ajustados suponiendo las densidades mostradas en la tabla inferior. Los valores de los PT's coinciden dentro de los 2 mm con los informados por el fabricante salvo los puntos C y E que tienen mayor incerteza.

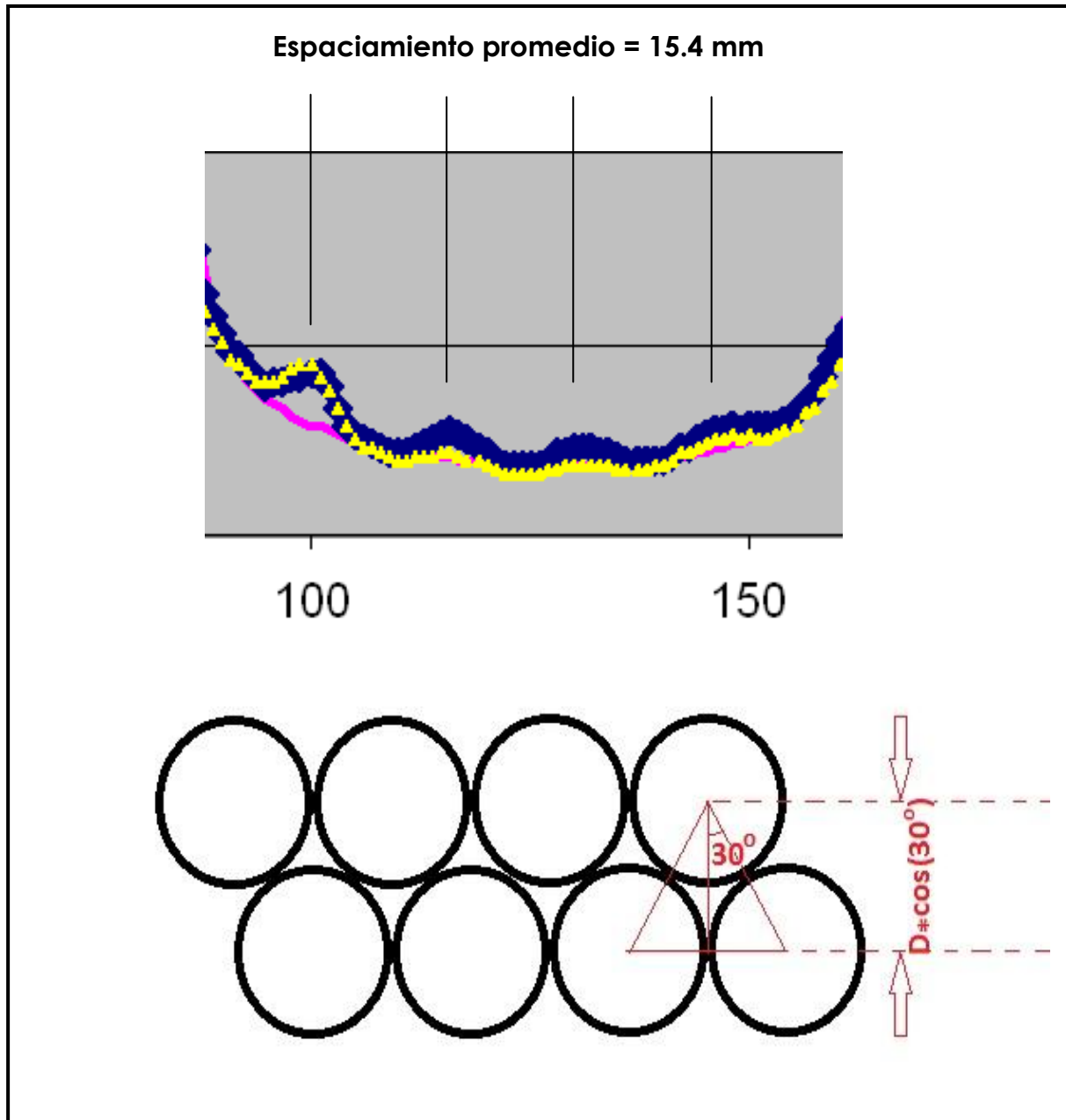


Figura 10. Detalles de los resultados para la muestra 9. La medición tiene la suficiente resolución espacial como para revelar el detalle del tendón y permitir una determinación de los diámetros de cada cordón. El espaciamiento promedio es 15,4 mm. Este valor corresponde a un diámetro de 17,8 mm.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Paul L. Kelly, Jennifer A. Grubb, Brett Holland and Paul C. Scheiner de Simpson, Gumpertz & Heger, por la solicitud de este desarrollo y la confianza en la tecnología de THASA. Ellos fabricaron las muestras que se usaron en este trabajo y luego organizaron la presentación ante el Departamento de Transporte del Estado de Florida de los resultados de este trabajo.

Referencias:

¹ Gamma-Ray Imaging for Void and Corrosion Assessment M. A. J. Mariscotti, F. Jalinoos, T. Frigerio, M. Ruffolo y P. Thieberger, ACI International, November 2009, Vol. 31 No. 11 pp. 48-53.

² Gamma-ray inspection of post tensioning cables in a concrete bridge. M. Pimentel, J. Figueiras, M.A.J. Mariscotti, P. Thieberger, M. Ruffolo and T. Frigerio, Structural Faults & Repair 2010, Edinburgh, United Kingdom, June 15 to 20, 2010

³ Informe THASA, Estudio de vainas en Complejo Zárate Brazo Largo, 1999.

⁴ Informe THASA, Estudio de vainas en puente N.S. da Guía, Ponte de Lima, 2008.

⁵ Patente Argentina, AR-018132-B1, "Método no destructivo para la determinación de sarro y otras impurezas en el interior de piezas amuradas o enterradas, de forma y constitución conocidas", 11 de Noviembre de 2004.

⁶ Un espectrómetro de rayos gamma es un dispositivo capaz no solo de detectar fotones de este tipo sino también de medir su energía. Esto es importante en esta aplicación pues es entonces posible filtrar electrónicamente los fotones menos energéticos que han sido dispersados en su pasaje por el hormigón y que atentan contra la calidad de la medición.