

## DESARROLLO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN MEZCLAS CEMENTÍCEAS

Diego H. Alustiza<sup>1,2</sup>, Marcos Mineo<sup>1</sup>, Anahí López<sup>2,3</sup>, Yury A. Villagrán Zaccardi<sup>4,5</sup>, Nélide A. Russo<sup>6</sup>

<sup>1</sup> CIOP / CONICET, Gonnet, Argentina, [dalustiza@ciop.unlp.edu.ar](mailto:dalustiza@ciop.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> UTN FRLP, La Plata, Argentina

<sup>3</sup> LEMIT / CICPBA, La Plata, Argentina

<sup>4</sup> LEMIT / CONICET, La Plata, Argentina

<sup>5</sup> Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Gante, Bélgica

<sup>6</sup> CIOP / CICPBA, Gonnet, Argentina

### RESUMEN

---

El conocimiento del nivel de humedad es fundamental en el campo de la durabilidad del hormigón debido a que el agua actúa como vía de ingreso de agentes agresivos y afecta la estabilidad volumétrica del material. Por ello, la determinación del nivel de humedad interna en estructuras civiles se muestra actualmente como una opción atractiva al momento de abordar el diseño de sistemas de monitoreo de salud estructural. Así mismo, la generación de sensores de humedad embebibles en hormigón brinda una herramienta potencialmente aplicable a la verificación de modelos predictivos de la vida útil de estructuras civiles y materiales de construcción. Las técnicas ópticas ofrecen actualmente una opción alternativa para la determinación de humedad, permitiendo extender el concepto de monitoreo/sensorización de estructuras y proporcionando a la Ingeniería Civil potenciales herramientas de medición que implementan técnicas no destructivas. En este trabajo se reportan los resultados parciales obtenidos de la evaluación realizada sobre un sensor experimental de humedad embebible en mezclas cementíceas. El mismo fue construido en forma local utilizando una serie de técnicas y procesos de fácil implementación, comparándolos con las técnicas convencionales. El sensor óptico está basado en el empleo de un dispositivo grabado en una fibra óptica llamado Red de Período Largo (LPG).

**Palabras clave:** sensor, fibra óptica, red de período largo, humedad.

### INTRODUCCIÓN

Uno de los factores que influyen tanto en las propiedades de desempeño como en la durabilidad de los materiales de base cementícea que componen las estructuras civiles, es el nivel de humedad interna. En sus primeras etapas de vida, la tasa de hidratación del cemento está relacionada con la disponibilidad de humedad, por lo cual la formación de la estructura de poros de la matriz se encuentra condicionada por el nivel de humedad durante el curado de la mezcla. Por otro lado, en estado endurecido los procesos físicos y químicos que atacan al hormigón se ven beneficiados por el tamaño, forma y calidad de conexión entre poros, siendo éstos los canales de transporte de las moléculas de agua dentro del material y otros agentes agresivos que pueda acarrear [1]. También, las variaciones de humedad dentro del hormigón producen cambios volumétricos, ya sea bajo carga (*creep*)

o no (contracción por secado). Por lo dicho, tanto durante el endurecimiento como en el estado endurecido, el monitoreo de la humedad interna es relevante. En el primer caso debido a que permite predecir la evolución de la formación de la estructura de poros, en el segundo caso debido a que permite evaluar el nivel de uno de los principales medios de transporte de iones químicos que atacan al hormigón ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), y en el tercer caso porque permitiría prevenir fisuración innecesaria en estructuras con restricciones externas.

Es por ello que resulta conveniente la determinación de la humedad interna del hormigón, mediante la medición de la humedad relativa (HR) a diferentes profundidades respecto de la superficie de la muestra bajo análisis [2]. La revisión bibliográfica evidencia la existencia de múltiples técnicas no invasivas para la medición de la HR interna en el hormigón, la mayoría basadas en la aplicación de principios eléctricos [3]. El empleo de técnicas ópticas ofrece un camino alternativo actualmente en estudio por varios grupos de investigación del mundo.

En este trabajo se presentan los resultados parciales obtenidos de la implementación experimental de un sensor potencialmente embebible en el seno de una estructura de hormigón, basado en principios puramente ópticos que ofrecería una alternativa a las actuales técnicas para la determinación de HR.

El sensor se basa en el aprovechamiento tecnológico de las propiedades de transmisión de luz que posee un dispositivo específico grabado en una fibra óptica. Esta estructura óptica a la que se hace referencia es llamada red de período largo (LPG, por sus siglas en inglés). Existen antecedentes relativamente recientes de trabajos científicos desarrollados fundamentalmente en algunos países de Europa, en Estados Unidos/Canadá y China/Japón, que abordan la problemática de la medición de HR utilizando este tipo de dispositivos ópticos cuyo sustrato físico es una fibra óptica [4]. Cabe destacar que no hay antecedentes regionales (Latinoamérica) al respecto. Debido a que se trata de desarrollos que todavía se encuentran en fase de experimentación, no se verifican aún implementaciones comerciales de este tipo de sensores en ámbitos de la Ingeniería Civil.

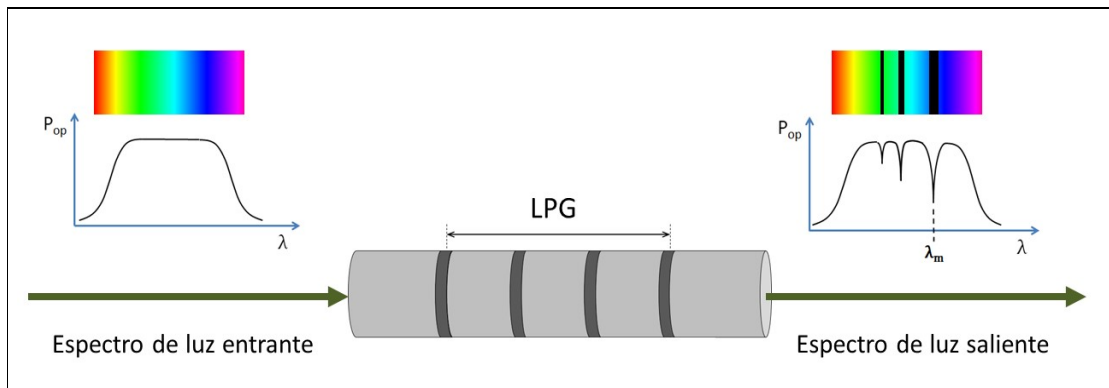
### Descripción básica de una LPG en fibra óptica

Una LPG es un dispositivo grabado en una fibra óptica que actúa sobre la luz guiada por ella atenuando su potencia en una serie de determinadas longitudes de onda. Consiste en una serie de cambios equidistanciados del índice de refracción de las capas que forman la fibra, ubicados a lo largo de un tramo longitudinal. Tales longitudes de onda verifican la llamada condición de ajuste de fase, matemáticamente descrita por la Ecuación 1. Para mayor profundidad referirse a [5].

$$\lambda_m = (n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{revestimiento},m}) \cdot \Lambda \quad (1)$$

donde,  $\lambda_m$  es la longitud de onda asociada al m-ésimo modo de propagación del revestimiento,  $n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}$  y  $n_{\text{eff}}^{\text{revestimiento},m}$  son los índices de refracción efectivos del núcleo y del revestimiento respectivamente, y finalmente  $\Lambda$  es el período de red de la LPG.

La Figura 1 muestra un tramo de fibra óptica a la que se le inyecta un haz de luz por el extremo izquierdo. En el extremo derecho se observan una serie de picos en el espectro de transmisión ("*dips*" de atenuación) que denotan la fuerte atenuación en las longitudes de onda que verifican la Ecuación 1. A modo ilustrativo la Figura 1 muestra la presencia del espectro visible completo en el puerto de entrada mientras que en el de salida, el espectro presenta una serie de ausencias de colores en las bandas asociadas a los picos de atenuación. Cabe aclarar que el espectro de longitudes de onda transmitidas por el tipo de fibra óptica empleada en este trabajo no es el correspondiente al visible.



**Figura 1:** Efecto sobre un haz de luz inyectado en una fibra óptica, debido a la presencia de una LPG.

### Uso de una LPG como sensor

La Ecuación 1 muestra la dependencia de las longitudes de onda que definen la ubicación espectral de los dips de atenuación ( $\lambda_m$ ), con el índice de refracción efectivo del revestimiento ( $n_{\text{eff}}^{\text{revestimiento},m}$ ). Éste a su vez depende de la carga ambiental a la que está sometida la LPG, esto es: tensión axial ( $\mathcal{E}$ ), temperatura (T) e índice de refracción del medio que rodea a la fibra óptica ( $n_{\text{mrf}}$ ) [6]. Estas dependencias son las que fundamentan el uso de una LPG como elemento sensor. La posición espectral de un dip de atenuación es susceptible de ser medida, por lo que todo cambio detectable en tal posición acusa que al menos una de las tres magnitudes mencionadas ha variado. Una magnitud física/química que influya a sobre  $\mathcal{E}$ , T y/o  $n_{\text{mrf}}$  es también susceptible de ser determinada en forma indirecta empleando de este tipo de dispositivo óptico.

### Sensores de humedad basados en el uso de LPG

La sensibilidad de la posición espectral de los dips de atenuación al  $n_{\text{mrf}}$  puede ser aprovechada para la determinación del nivel de humedad [7], debido a que la variación del contenido de agua de un dado medio material provoca una variación del índice de refracción que lo caracteriza ópticamente. Por ello, si una LPG se encuentra inmersa en dicho medio, el análisis espectral de la señal luminosa en el puerto de salida de la fibra que contiene la LPG brinda la información de la variación del nivel de humedad.

Para potenciar la sensibilidad de la LPG a la humedad del medio que la rodea, suele implementarse la deposición de una fina capa de un material que propicie el aumento de la concentración de moléculas de agua en las cercanías de la superficie de la fibra, y que sea capaz de adherirse robustamente a su superficie.

Existen numerosos estudios en los que se evalúan diferentes materiales (diureasil, poliuretano, alcohol polivinílico,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CoCl}_2$ , etc) y técnicas de deposición para la implementación de la capa sensibilizadora antedicha (*sol-gel dipping*, baño de inmersión/secado/horneado). La mayoría de estas técnicas implican delicados procesos que demandan tanto un control ambiental fino, como la inmersión de la fibra óptica en un baño químico durante un determinado período de tiempo. Existen modelos matemáticos que predicen el espesor de la capa de deposición (para el caso de la técnica *sol-gel dipping*), si se controlan ciertas variables involucradas en el proceso como por ejemplo la velocidad con la que se retira la fibra del baño químico. La precisión con la que se alcance el control de tales variables determinará el grado de regularidad del espesor de la capa depositada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Construcción del sensor de HR

#### Generación de la LPG en fibra óptica

Para la generación de la LPG en la fibra óptica se utilizó la técnica “inducción por arco eléctrico” [8]. Ésta consiste en la aplicación de una descarga eléctrica en una zona puntual de la fibra óptica mientras que en simultáneo se aplica un esfuerzo de tracción, generando un ahusamiento. La estructura óptica que surge de esta reducción del diámetro original de la fibra óptica por estiramiento es llamada  $\mu$ -taper. La existencia de un  $\mu$ -taper produce el cambio de índice de refracción tanto en el núcleo como en el revestimiento en la zona en la que éste existe debido a distintos fenómenos que se producen durante y luego de la aplicación del arco eléctrico (efectos elasto-ópticos y termo-ópticos). La inducción sistemática de  $\mu$ -tapers equidistanciados a lo largo de una dada longitud resulta en la construcción de una LPG conforme a su definición.

#### Generación del revestimiento sensibilizador

Para mejorar la sensibilidad de la LPG a la HR se propuso la implementación sobre la fibra óptica, de una capa compuesta por partículas de  $\text{TiO}_2$ , debido a que este compuesto presenta un fuerte comportamiento hidrofílico. Para adherir estas partículas a la superficie de la fibra óptica se implementó la deposición de una red polimérica de poliuretano (PU). Ésta ofició de matriz de soporte de las partículas de  $\text{TiO}_2$ . Tal deposición fue lograda mediante la ejecución de un proceso que se describe a continuación:

- Inmersión: la fibra en la que se grabó la LPG fue inmersa durante 30 minutos en un baño líquido de una solución de PU ( $[2\pm 0,001]$  g) y acetona ( $[20\pm 0,001]$  g) en la que se encontraban dispersas las partículas de  $\text{TiO}_2$  ( $[0,075\pm 0,001]$  g).
- Secado: luego de retirarse la fibra del baño se la dejó reposar a temperatura ambiente durante 60 minutos, permitiendo así la evaporación de la fase líquida de la solución.
- Horneado: se sometió a la fibra óptica a un proceso de horneado a 200 °C durante aproximadamente 60 minutos.

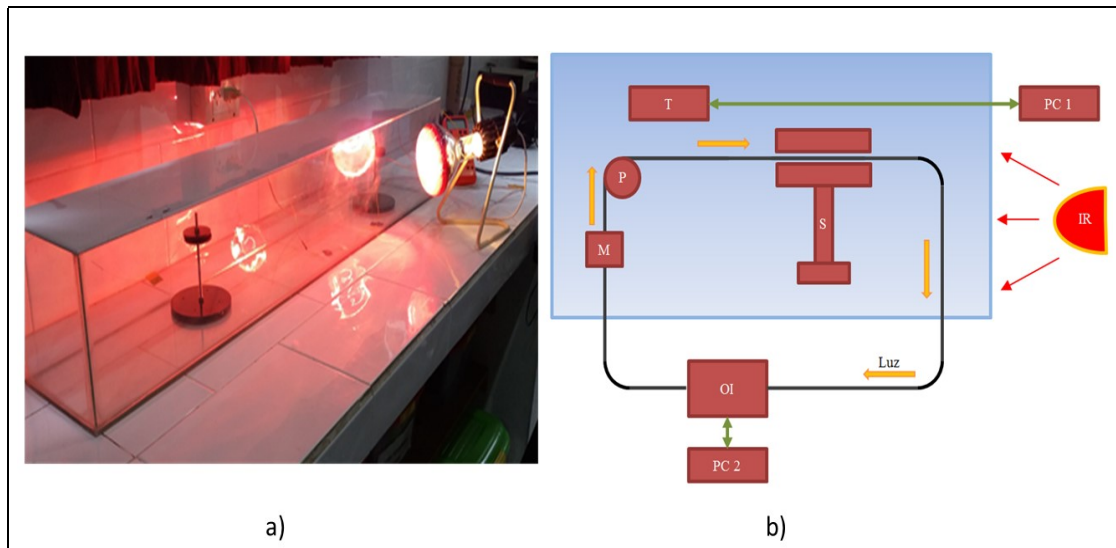
#### Caracterización del sensor óptico

Debido a que la LPG es sensible a la temperatura, al índice de refracción que rodea la fibra y a la tensión axial, se realizó el montaje de un arreglo experimental que permitió determinar la sensibilidad a la temperatura y al índice del medio fijando el valor de la tensión axial. La sensibilidad a la temperatura se la utilizó para desafectar a la medición del índice del medio (que permite determinar la HR en forma indirecta) de los efectos de la variación térmica sobre la LPG.

#### Determinación de la sensibilidad a la temperatura

La Figura 2 muestra un diagrama en bloques del arreglo experimental montado. El ensayo se efectuó aislando a la LPG en una cámara hermética de vidrio. El montaje de la fibra óptica dentro de la cámara fue efectuado mediante el uso de un pedestal (bloque S) y un sistema de polea/masa (bloques P y M) con el objetivo de fijar el valor de la tensión de la fibra de montaje en montaje. Se registró la posición del dip de atenuación del espectro de transmisión para distintos valores de temperatura de equilibrio alcanzado en el interior de la cámara. Para la determinación de la temperatura se usó un sensor DHT22 (bloque T), y para la medición de los espectros de transmisión se empleó un sistema de interrogación óptica de la firma uOptics, modelo SM125 (bloque OI) conectado a una PC para el registro

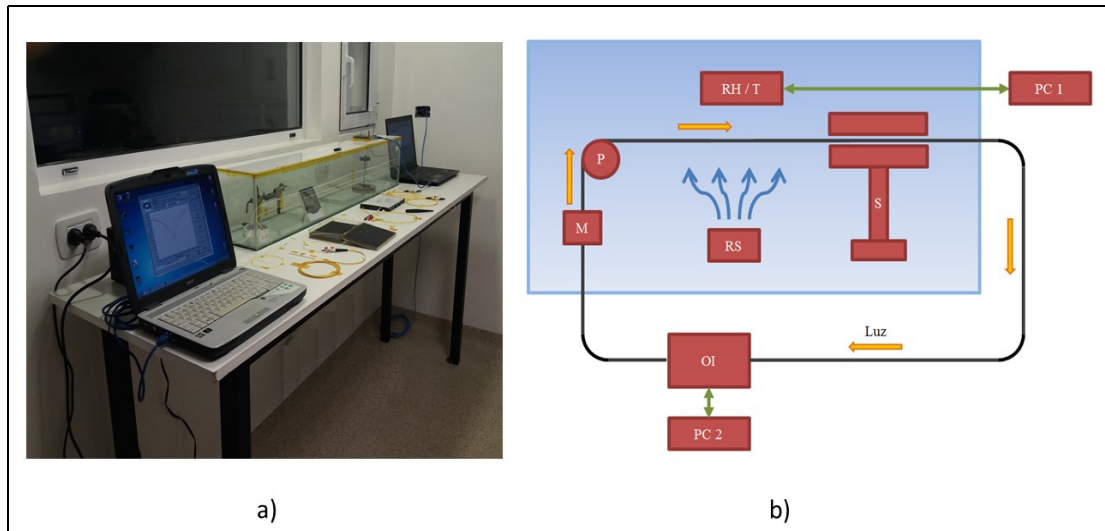
de los datos (bloque PC2). La excitación térmica fue implementada mediante el uso de una lámpara infrarroja externa a la cámara (bloque IR), ubicada a distintas distancias de la misma para lograr las diferentes temperaturas de equilibrio.



**Figura 2:** a) Cámara de aislamiento y lámpara infrarroja usadas para la determinación de la sensibilidad a la temperatura; b) Diagrama en bloques del montaje experimental.

### Determinación de la sensibilidad a la HR

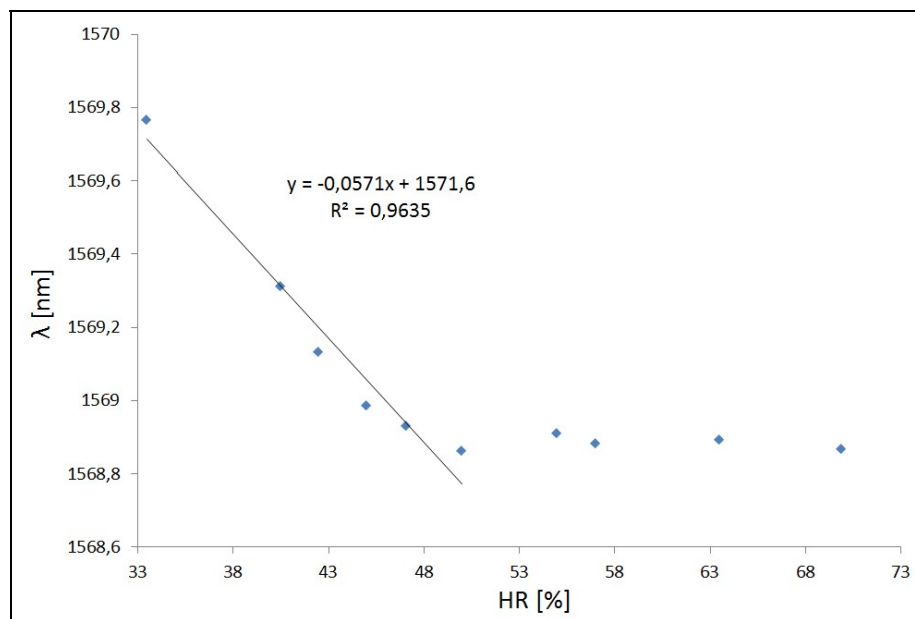
El ensayo consistió en registrar el espectro de transmisión, en base al mismo arreglo experimental descrito en la sección previa. La Figura 3 muestra el arreglo experimental montado y el diagrama en bloques que lo describe. Se varió la HR ambiental interna de la cámara de ensayo en un rango de 35 % a 80 %, aproximadamente, mediante la utilización de sales reguladoras (bloque RS). En una primera etapa se ensayó la LPG sin la aplicación de la capa sensibilizadora, para luego repetir el ensayo pero con la capa depositada. El objetivo de esto último fue ponderar la mejora de la sensibilidad a la HR que experimentó el sensor luego de la aplicación de la capa. La medición de la HR del interior de la cámara fue realizada mediante un sensor DHT22 (bloque RH/T) interrogado por una placa Arduino Mega2560 (no mostrada en la Figura), cuyos datos fueron transmitidos a una computadora (bloque PC1) para su posterior correlación con las mediciones espectrales capturadas en otra computadora (bloque PC2). Todo el conjunto de mediciones espectrales fue complementado con mediciones de la temperatura (bloque RH/T) con el objetivo de desafectar a los corrimientos de los dips de atenuación debido a variaciones térmicas.



**Figura 3:** a) Arreglo experimental para la determinación de la sensibilidad de la LPG a la HR; b) Diagrama en bloques del montaje.

## RESULTADOS

La Figura 4 muestra los puntos experimentales relevados durante el ensayo de barrido de humedad para la determinación de la sensibilidad del sensor a la HR ambiental. Se observa la evolución de la posición espectral del dip de atenuación de la LPG, al variarse la HR en el rango completo de ensayo (de 30 % a 70 %).



**Figura 4:** Posición espectral del dip de atenuación vs. HR.

También se muestra la línea de tendencia asociada a los puntos experimentales comprendidos en el rango de 30 % a 50 %. La regresión lineal acusa una sensibilidad de -57,1 pm/unidad porcentual de HR. La figura muestra la función de ajuste hallada y su parámetro de correlación R. Para HR > 50 %, este sensor con estas geometrías específicas presenta sensibilidad casi nula. Cabe destacar que la sensibilidad del mismo espécimen hallada en un ensayo previo a la deposición de la capa sensibilizadora fue de -0,3

pm/unidad porcentual de HR, lo que implica un aumento notable de la sensibilidad con el tratamiento de recubrimiento.

## **DISCUSIÓN**

El método empleado para la deposición de la capa sensibilizadora sobre la LPG es simple de ser realizado comparándolo con otras técnicas halladas en la bibliografía. Si bien en este trabajo no se muestran los resultados de las mediciones que caracterizan al comportamiento óptico de las LPG obtenidas mediante la técnica de inducción por arco eléctrico, la calidad de éstas es comparable con la de sus contrapartes comerciales encontradas en el mercado internacional. Se observó que el proceso de sensibilización a la humedad no deterioró las características ópticas de la LPG (profundidad de dip y ancho de banda, por ejemplo), cumpliendo con el cometido de su implementación. La aplicación de la capa sensibilizadora mejoró la sensibilidad a la HR en 190 veces aproximadamente, lo que es aún un valor bajo comparado con las sensibilidades halladas en las referencias científicas relativas a sensores ópticos (hasta 500 pm/unidad porcentual de HR). Se planea modificar la técnica de deposición de la capa sensibilizadora con el objetivo de aumentar el espesor de la deposición, bajo la hipótesis de que tal acción mejorará la sensibilidad aún más y potencialmente en un rango mayor de valores de HR.

El comportamiento lineal de la respuesta del sensor aparenta estar acotado al rango comprendido entre 33 % a 50 % aproximadamente. Si bien esto no restringe la aplicación del sensor en el rango completo en el que se lo ensayó, sí condiciona la calidad de medición del mismo cuando éste se somete a valores de HR superiores a 50 %. Esto es debido a que su sensibilidad disminuye al aumentar el valor de HR. Por otro lado, el arreglo experimental no soportó el abordaje de niveles de HR menores a 30 %. La tendencia de los puntos experimentales sugiere que la sensibilidad mejoraría en el rango de 0% a 30%. Con el objetivo de estudiar el comportamiento del sensor en el rango completo, se planea modificar pertinentemente el arreglo experimental.

Los resultados mostrados en este trabajo se corresponden con ensayos en los que el medio que rodea al sensor es aire humedecido. No se ha evaluado aún el comportamiento del mismo dentro de una probeta constituida de algún material de uso civil. Se planea realizar esta acción a corto plazo, fundamentalmente para analizar la estabilidad del sensor en un ámbito altamente alcalino.

Una desventaja que este tipo de sensores posee es su fragilidad mecánica. Se está estudiando la forma de robustecer al sensor mediante la implementación de una interfaz mecánica de mayor resistencia. Ésta debe soportar las potenciales agresiones que pueden suscitarse tanto durante el proceso de instalación del sensor dentro del hormigón, como durante la etapa de curado en la que pueden producirse contracciones por secado significativas.

Los resultados presentados en este trabajo fueron obtenidos de un espécimen testigo. Otros sensores muestran similar comportamiento. Se planea la realización de una serie de ensayos sobre un lote de sensores generados en iguales condiciones y usando las mismas técnicas con el objetivo de hallar una confirmación estadística del comportamiento descripto.

## **CONCLUSIÓN**

El análisis de los ensayos realizados sobre la LPG sensibilizada a la humedad del medio que la rodea, permite concluir que es factible el uso de la LPG como elemento sensor de HR en el rango comprendido entre el 30 % y el 50 %.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por ANPCyT y CIC, a través del Proyecto de Investigación Científico-Tecnológica “Hormigones de Bajo Impacto Ambiental Resistentes a Carbonatación” (PICT 2017-0091) dirigido por el Dr. Yury Villagrán Zaccardi (LEMIT) y del Proyecto de Investigación de la CIC “Desarrollo de Dispositivos Basados en Fibra Óptica Recubiertas con Nanopartículas Metálicas para la Posterior Implementación de Sensores de Contaminantes Ambientales en Medios Acuáticos” (Res. N° 801/18) dirigido por la Dra. Nélide Russo (CIOp). Parte del financiamiento de este trabajo fue brindado por la CIC a través del subsidio otorgado a la Dra. Nélide A. Russo (Res. N° 602/16 y 195/17).

## REFERENCIAS

- [1] Bertolini L, Elsener B, Pedeferri P, Polder R, “Corrosion of steel in concrete – Prevention, diagnosis, repair”, Wiley (2004), 21 – 48.
- [2] Parrott LJ, “Moisture profiles in drying concrete”, *Advances in Cement Research*, Vol. 1, Issue 3, (1988), 1751 - 7605.
- [3] Granja JL, Azenha M, de Sousa C, Faria R, Barros J, “Higrometric assessment of internal relative humidity in concrete: practical application issues”, *Journal of Advances Concrete Technology*, Vol. 12, (2014), 250 - 265.
- [4] Ascorbe J, Corres J, Arregui F, Matias I, “Recent developments in fiber optic humidity sensors”, *Sensors MDPI*, Vol. 17, Issue 4, (2017), 893 - 916.
- [5] Alustiza D, Russo N, Mineo M, Aredes D, “Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado de magnitudes relevantes en ingeniería civil”, *Ingenio Tecnológico*, Vol. 1, (2019), 1 - 10. Disponible Online en:  
<http://ingenio.frtp.utn.edu.ar/index.php/ingenio/article/view/10>.
- [6] James SW, Tatam RP, “Optical fibre long-period grating sensor: characteristics and application”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, Issue 5, (2003), R49 – R61.
- [7] Wang Y, Liu Y, Zou F, Jiang C, Mou C, Wang T, “Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with polymer composite film”, *Sensors MDPI*, Vol. 19, (2019), 2063 – 2074.
- [8] Mendes de Rego G, “Arc-induced long-period fiber gratings. Fabrication and their applications in optical communications and sensing”, Ph. D Tesis, Universidade do Porto, Portugal, (2006).