

# Aplicación de Redes de Período Largo en Fibras Ópticas para la Sensorización de Materiales Cementíceos

## Long Period Fiber Gratings Application for Cement Based Materials Sensing

Presentación: 06/10/2020

Doctorando:

**Diego Horacio Alustiza**

Centro de Investigaciones Ópticas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET), Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Universidad Nacional de La Plata (UNLP) / Facultad Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional (UTN) – Argentina  
[dalustiza@ciop.unlp.edu.ar](mailto:dalustiza@ciop.unlp.edu.ar); [dalustiza@frlp.utn.edu.ar](mailto:dalustiza@frlp.utn.edu.ar)

Director/es:

**Nélida Araceli Russo**

Co-director/es:

**Yury Andrés Villagrán Zaccardi**

### Resumen

Los materiales de base cementícea son los materiales artificiales más usados. El conocimiento de la evolución temporal de sus características y propiedades es de gran interés debido a que éstas influyen en el desempeño de las estructuras que conforman. Desde ese punto de vista, el monitoreo de los cambios en determinados parámetros relacionados con su durabilidad puede beneficiar la toma de decisiones orientada a la prevención de situaciones que potencialmente afecten el cumplimiento de los requerimientos de funcionalidad (rigidez), seguridad (resistencia) y estética (aspecto superficial) para los cuales las estructuras fueron diseñadas. La detección de la presencia y/o del cambio en la concentración de agentes químicos específicos pueden ser empleados para acusar la gestación o propagación de fenómenos que atenten contra la vida útil de la estructura. En este trabajo se analiza la aplicación de una técnica óptica basada en el empleo de redes de período largo en fibra óptica para el monitoreo de la presencia y/o del nivel de concentración de agentes químicos nocivos internos al material. Se presentan los resultados preliminares correspondientes al desarrollo de un sensor de humedad que será empleado en la determinación de humedad interna de estructuras civiles.

Palabras clave: Materiales cementíceos, Sensado, Sensores ópticos, Fibra óptica, Redes de período largo.

### Abstract

Cement based materials are the most widely artificial materials. The knowledge of the evolution in time of their characteristics and properties is of great interest because they influence the performance of the structures they conform. From this point of view, monitoring changes in certain parameters related to durability can benefit decision-making aimed at preventing situations that potentially affect requirements compliance related to service (stiffness), safety (resistance) and aesthetics (surface appearance) for which the structures were designed at project stage. The detection of the presence and / or changes in concentration of specific chemicals can be used to identify the incubation or propagation of phenomena that threaten the service life of the structure. This paper analyzes the application of an optical technique based on the use of long period fiber gratings for monitoring the presence and / or concentration levels of harmful chemicals inside the material. Preliminary results corresponding to the development of a humidity sensor that will be used in the determination of internal humidity of civil structures are presented.

Keywords: Cement based materials, Sensing, Optical sensors, Optical fiber, Long period gratings.

## Introducción

Los materiales de base cementícea usados en obras civiles están expuestos a procesos de deterioro/degradación que pueden comprometer severamente la integridad de las estructuras. El ataque de agentes físicos y químicos o la corrosión de armaduras (en el caso del hormigón armado), entre otros, son ejemplos de tales procesos. La exposición del hormigón a condiciones ambientales agresivas puede generar la penetración de cloruros y dióxido de carbono, los cuales dan lugar al proceso de despasivación y corrosión de las barras de acero en su interior. Esto provoca la generación de sustancias que no solo ocupan varias veces el volumen del acero original produciendo tensiones que pueden exceder la resistencia a la tracción del hormigón y originar grietas, sino que también provoca la disminución de la sección transversal original de la barra. Por ello, el monitoreo de la concentración de ciertas sustancias (agentes químicos atacantes) en el seno del material, resulta altamente relevante para predecir la vida útil de las estructuras teniendo en cuenta que la degradación del material disminuye la seguridad, compromete la funcionalidad y el aspecto estético de las estructuras (Alustiza, Mineo, Aredes, & Russo, 2019). La presencia de agua es funcional a los procesos de transporte dentro del hormigón, y por lo tanto de primordial interés para predecir la vida útil de las estructuras.

En este trabajo, que refleja parte del contenido del Plan de Tesis Doctoral, se plantea el estudio y la aplicación de técnicas ópticas que asistan a la caracterización de mezclas de base cementícea, con el objeto de determinar presencia y/o concentración de especies químicas relacionadas con la durabilidad del material. Para ello se prevé el desarrollo de técnicas basadas en la implementación de esquemas de sensado que utilicen las propiedades de interacción que existen entre dispositivos de fibra óptica y el medio que los rodea.

Una fibra óptica es una estructura cilíndrica, fina y flexible, que permite el guiado de luz a través suyo conservando significativamente la intensidad del haz transmitido mediante el confinamiento logrado gracias al fenómeno de reflexión interna total (TIR, Total Internal Reflection). Un modelo sencillo que explica su funcionamiento consiste en un sistema de dos cilindros concéntricos de vidrio (núcleo y revestimiento) con índices de refracción levemente diferentes. Finalmente una tercera capa cilíndrica (cubierta) se dispone sobre el revestimiento, y su función es brindar protección mecánica al conjunto núcleo-revestimiento. La Fig. 1 muestra un corte en perspectiva de un segmento de fibra óptica en el que se observan las tres zonas antedichas (lado izquierdo), y un corte recto longitudinal del conjunto núcleo-revestimiento en el que se representa la propagación de un modo luminoso del núcleo mediante el empleo de una aproximación de la óptica geométrica denominada Teoría de rayos (lado derecho).

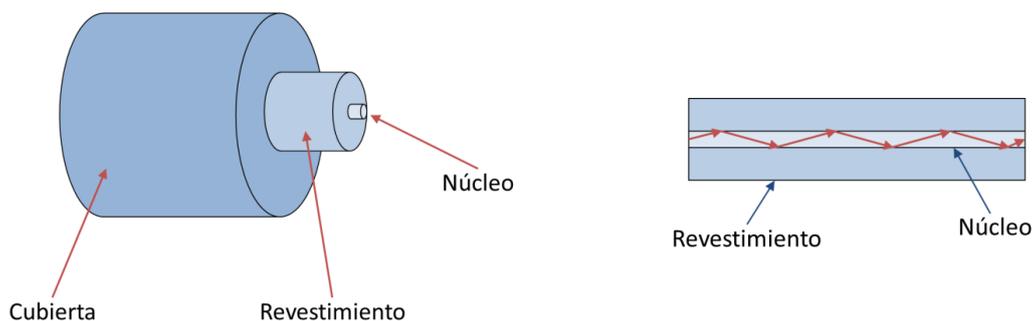


Figura 1: Capas constitutivas de una fibra óptica (izq.) y representación de la propagación de un modo luminoso del núcleo de la fibra (der.).

La Fig. 2 esquematiza a un sensor típico de fibra óptica (cabe aclarar que existen otras arquitecturas). Se identifican dos tramos de fibra óptica que actúan como puertos de entrada y de salida de la luz, y una caja prismática que representa la zona sensible a la magnitud de interés (mensurando, que en el caso tratado en este trabajo es la presencia y/o concentración de un agente químico específico). Este elemento representa la existencia de un dispositivo que brinda un mecanismo de transducción y que es implementado con/en la fibra óptica. La transducción puede ser realizada mediante diferentes procesos físicos, dependiendo del dispositivo elegido para cumplir con los

requerimientos de detección. En el desarrollo de este trabajo se implementó un dispositivo llamado Red de Período Largo (LPG, Long Period Grating).

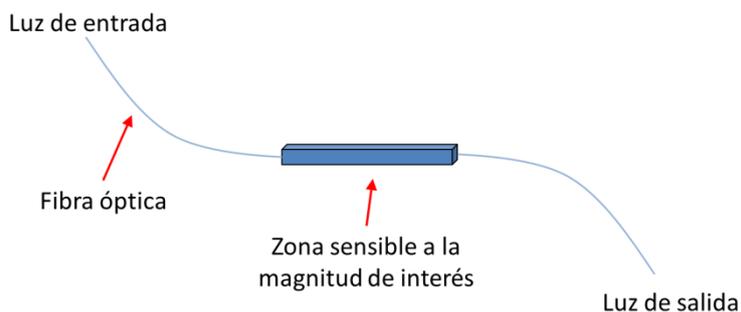


Figura 2: Esquema básico de un sensor de fibra óptica

Las LPG son estructuras ópticas grabadas en la fibra óptica mediante alguna técnica, que convierten parte de la energía del modo luminoso fundamental guiado en el núcleo de la fibra en energía asociada a modos que se propagan en la misma dirección pero por el revestimiento. La energía que se trasvasa al revestimiento es absorbida en un corto tramo de su recorrido debido a que no se verifican las condiciones de reflexión interna total. Esto se manifiesta en el espectro de la luz guiada por la fibra como una serie de bandas de atenuación ubicadas en las longitudes de onda correspondientes a modos que verifican una dada condición de resonancia (llamada condición de ajuste de fase). En la Fig. 3 se observa cómo lucen los espectros tanto de la luz inyectada por el puerto de entrada a la fibra (izquierda), como el de la luz detectada en el puerto de salida (derecha), debido a que el haz que viaja por la fibra se encuentra en su camino con una LPG. En la figura, las flechas rojas representan la propagación de la luz dentro de la fibra (centro de la figura). El espectro de salida presenta una banda centrada en la longitud de onda  $\lambda_n$ , en la que la potencia óptica se encuentra atenuada debido al trasvaso de energía del núcleo al revestimiento de la fibra.

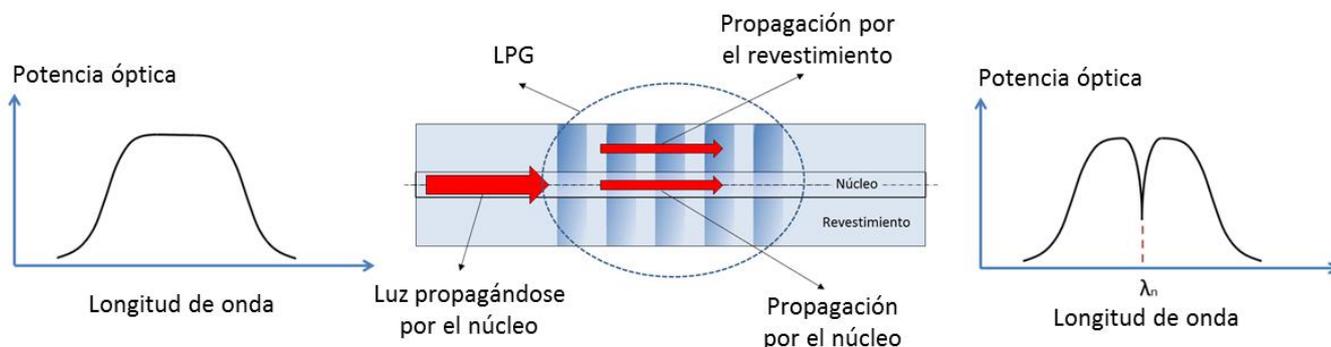


Figura 3: Espectro de la luz en el puerto de entrada (izq.), acoplamiento de luz del núcleo al revestimiento de la fibra (centro), espectro de la luz en el puerto de salida (der).

La posición espectral de la banda de atenuación ( $\lambda_n$ ) es dependiente de la carga ambiental que sufre la fibra óptica (temperatura, deformación longitudinal e índice de refracción del medio circundante). Por ello, un cambio en las características ópticas del medio que rodea la fibra en la zona donde se encuentra la LPG, generará un cambio en la posición espectral de la banda de atenuación mencionada. Para el caso de aplicación tratado, el medio circundante es el material de base cementícea. Un cambio de concentración del mensurando en el entorno de la fibra trae aparejada una variación del índice de refracción de tal medio, por lo que resulta factible detectar cambios en la concentración de agentes químicos mediante el relevo de la posición espectral de la banda de atenuación. Para mejorar la sensibilidad a la presencia/concentración de sustancias específicas, la superficie de la zona sensible de la fibra óptica se recubre con un material que favorece la detección del compuesto químico de interés (capa funcional que mejora la selectividad de detección).

Uno de los factores que influyen tanto en las propiedades de desempeño como en la durabilidad de los materiales de base cementícea, es el nivel de humedad interna (Parrott, 1988). Tanto durante el endurecimiento como en el estado endurecido, el monitoreo de la humedad interna es relevante desde el punto de vista ingenieril. 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 y reacción de agentes químicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) que atacan al hormigón, además de que permitiría prevenir procesos de fisuración en estructuras con restricciones externas.

En el presente trabajo se muestran los resultados iniciales obtenidos en la implementación experimental de un sensor potencialmente embebible en el seno de la estructura de materiales de base cementícea basado en el empleo de LPGs grabadas en fibra óptica, que ofrecería una alternativa a las actuales técnicas para la determinación de humedad relativa (HR) interna.

## Desarrollo

La primera etapa de la fase experimental consistió en la implementación del grabado de LPGs en la fibra óptica. Para ello se utilizó la técnica llamada “inducción por arco eléctrico” que 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 angostamiento del diámetro (ver Fig. 4) (Alustiza, Mineo, Aredes, & Russo, 2019). La estructura óptica que surge de esta reducción del diámetro original por estiramiento es llamada  $\mu$ -taper. En éste, el valor del índice de refracción es distinto al de la fibra original, tanto en el núcleo como en el revestimiento, debido a distintos fenómenos que se producen durante y luego de la aplicación del arco eléctrico (efectos elasto-ópticos y termo-ópticos). La generación de un conjunto de  $\mu$ -tapers equidistanciados longitudinalmente en un tramo de fibra óptica resulta en la construcción de una LPG. Ésta podría definirse como una modulación periódica y axial del índice de refracción de la fibra, que al ser atravesada por un haz luminoso de banda ancha genera que parte de la luz deje de ser guiada por el núcleo y se acople al recubrimiento de la fibra. El valor de este desarrollo inicial se basa en la generación de disponibilidad tecnológica para la fabricación de LPGs a nivel local como sustitución de los disponibles comercialmente que implican un costo económico mucho mayor.

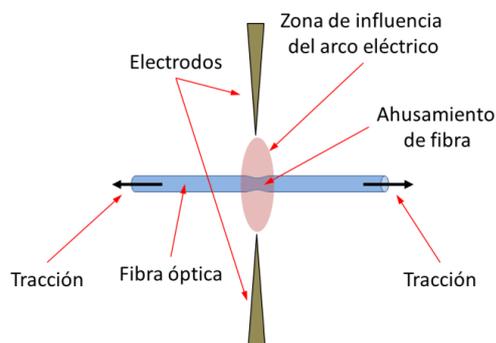


Figura 4: Generación de  $\mu$ -taper en fibra óptica mediante un arco eléctrico en simultáneo con una acción de tracción (izquierda), montaje experimental para la implementación de LPGs inducidas mediante arco eléctrico (derecha).

La conformación mecánica otorga una primera sensibilidad que debe ser magnificada. Para mejorar la sensibilidad de la LPG a la HR se recubrió esa región de la fibra óptica con una capa compuesta por partículas de  $\text{TiO}_2$  (Consales, Berruti, Borriello, & Cussano, 2014), debido a que este compuesto presenta un acentuado comportamiento hidrofílico. La adhesión de estas partículas a la superficie de la fibra óptica se logró mediante la deposición de una red polimérica de poliuretano (PU) que ofició de matriz de soporte de las partículas de  $\text{TiO}_2$ . Tal deposición se obtuvo mediante la ejecución de un proceso de inmersión, secado y horneado (bajo condiciones controladas en tiempo y temperatura) en una solución de acetona y PU en sus dos partes constitutivas (poliol e isocianato).

Debido a que una LPG es sensible a la temperatura, al índice de refracción que rodea la fibra y a la tensión axial (James & Tatam, 2003), se implementó un arreglo experimental para la determinación de la sensibilidad a la temperatura y al índice del medio circundante, fijando el valor de la tensión axial. Luego, esta sensibilidad a la temperatura permitió desafectar los cambios espectrales generados por variaciones térmicas en la LPG y considerar sólo los efectos producidos por los cambios de índice (que a su vez permitieron determinar la HR en forma indirecta).

Para la valoración de la sensibilidad a la humedad relativa, se montó un ensayo que consistió en registrar el espectro de transmisión óptico mediante el arreglo mostrado en la Fig. 5 a medida que se variaba la HR ambiental interna de la cámara de ensayo en un rango controlado mediante la utilización de sales higroscópicas reguladoras. 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 y así evaluar la mejora en la sensibilidad a la HR del sensor. La medición de la HR del interior de la cámara fue realizada mediante un sensor DHT22 interrogado por una etapa electrónica apropiada, cuyos datos fueron transmitidos a una computadora para su posterior correlación con las mediciones espectrales capturadas en otra computadora. Todo el conjunto de mediciones espectrales fue complementado con mediciones de temperatura en el entorno de la LPG con el objetivo de desafectar los corrimientos de las bandas de atenuación debidos a variaciones térmicas.



Figura 5: arreglo experimental montado para la determinación de la sensibilidad de la LPG a la HR.

## Resultados

La aplicación de la técnica de inducción por arco eléctrico para la generación de sensores de fibra óptica del tipo LPG resultó en la obtención de dispositivos sensores cuyo comportamiento espectral fue el esperado conforme a las consideraciones teóricas. La Fig. 6 (izquierda) muestra la respuesta en transmisión de una de las LPGs generadas (trazo azul) comparándola con la característica espectral del emisor de luz usado (trazo rojo). Desde el punto de vista geométrico, dichas LPGs presentan típicamente una extensión longitudinal no mayor a 15mm. La Fig. 6 (derecha) muestra una fotografía de la estructura lograda en una fibra del tipo SMF28, normalmente usada en comunicaciones ópticas. Desde el punto de vista óptico, se logró predecir la posición de la banda de atenuación en el rango de 1490nm a 1620nm, seleccionando adecuadamente la distancia entre los  $\mu$ -tapers que conforman la red (entre 500  $\mu$ m y 600  $\mu$ m aprox.). La profundidad de atenuación de los picos fue superior a 20 dB en la mayoría de los casos, mientras que el ancho espectral se mantuvo en el rango de los 25nm a 30nm (FWHM), características similares a las de las LPGs encontradas en el mercado internacional. Sin embargo, es importante destacar que la posibilidad de generar en nuestro laboratorio estos dispositivos, permite un notable ahorro económico (aproximadamente 100USD por unidad) a la vez de poder diseñarlos de acuerdo a la aplicación a desarrollar.

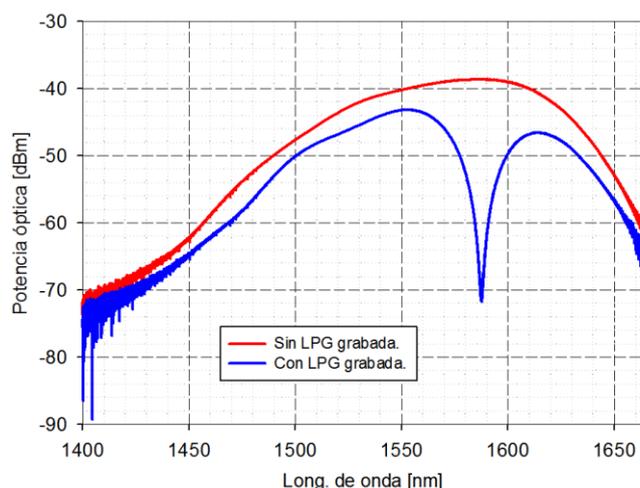


Figura 6: Comparación de la característica de transmisión espectral de la fibra óptica con (azul) y sin LPG (rojo) (izquierda); tren de  $\mu$ -tapers logrados sobre la fibra óptica.

La Fig. 7 muestra la dependencia de la longitud de onda central de la banda de atenuación con el valor de la HR ambiental (aire) medida en la cámara de ensayo confeccionada. Una ventaja del método empleado para la deposición de la capa sensibilizadora sobre la LPG es su simpleza comparándola con otras técnicas publicadas. Se observó que el proceso de sensibilización a la humedad no deterioró las características ópticas de la LPG (profundidad de la banda de atenuación y ancho de banda, por ejemplo). La aplicación de la capa sensibilizadora mejoró la sensibilidad a la HR en 190 veces aproximadamente. Como puede apreciarse en la Fig. 7, 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 mismo en el rango completo en el que se lo ensayó, sí condiciona la calidad de medición 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. 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. A futuro también se prevé la posibilidad de mejorar el rango de medición mediante alguna variación del recubrimiento sensibilizador utilizado.

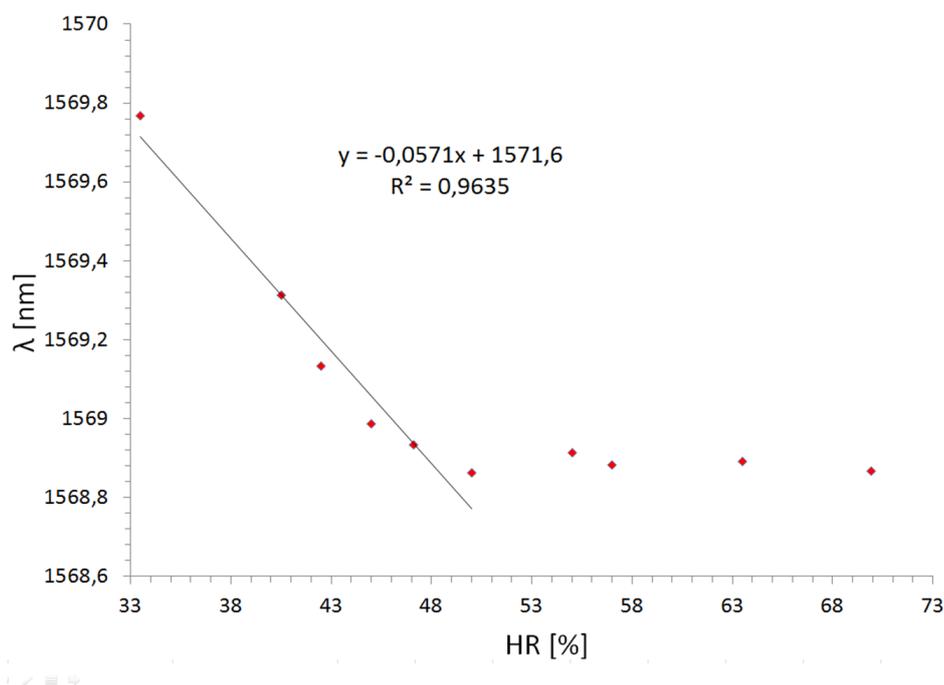


Figura 7: Dependencia de la posición en longitud de onda de la banda de atenuación de la LPG con la HR del ambiente que la rodea.

## Referencias

- Alustiza, D. H., Mineo, M., Aredes, D., & Russo, A. N. (15 de Agosto de 2019). Fabricación local de sensores de fibra óptica aplicables al sensado de magnitudes relevantes en ingeniería civil. (G. Botasso, Ed.) *Ingenio Tecnológico*, 1(1), 1 - 10.
- Consales, M., Berruti, G., Borriello, A., & Cussano, A. (Julio de 2014). Nanoscale TiO<sub>2</sub>-coated LPGs as radiation-tolerant humidity sensors for high-energy physics applications. *Optics Letters*, 39(14).
- James, S. W., & Tatam, R. P. (2003). Optical fibre long-period grating sensor: characteristics and applications. *Measurement Science and Technology*, 14(3), R49-R61.
- Parrott, L. J. (Julio de 1988). Moisture profiles in drying concrete. *Advances in Cement Research*, 1(3), 164-170.