

Caracterización Óptica de una Fibra de Cristal Fotónico

L. A. Torres[†], L. C. Barbosa[‡], E. F. Chillce[‡], R. R. González[‡] y C. R. Eyzaguirre[§]

^{†§}Laboratorio de Óptica, FC-UNI, Perú;

[‡]Laboratório de Novos Materiais Vítreos, DEQ-IFGW-UNICAMP, Brasil;

[§]ceyza001@yahoo.com.br, [†]ltorresq@uni.pe

Recibido el 30 de abril del 2010; aceptado el 28 de mayo del 2010

En las últimas décadas las investigaciones científicas sobre fibras de cristal fotónico (Photonic Crystal Fiber-PCF) han aumentado considerablemente debido a las aplicaciones en diferentes áreas, tales como comunicaciones ópticas, óptica no-lineal, sensores, biología, entre otras. En este trabajo se presenta resultados concernientes a la caracterización óptica de una PCF. Entre estas principales caracterizaciones se muestra resultados de la atenuación espectral y la dispersión cromática de una fibra fotónica fabricada en el Laboratório de Novos Materiais Vítreos-IFGW-UNICAMP-Brasil. Los resultados experimentales son comparados con cálculos numéricos que utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF).

Palabras Claves: Fibra de cristal fotónico, fibra óptica convencional, dispersión cromática.

In recent decades scientific research on photonic crystal fibers (PCF) have increased considerably due to applications in different areas, such as optical communications, nonlinear optics, sensors, biology, among others. This paper presents results concerning the optical characterization of a PCF. Among these main characterizations of the results shows spectral attenuation and chromatic dispersion of a PCF manufactured in the Laboratório de Novos Materiais Vítreos-IFGW-UNICAMP. The experimental results are compared with theoretical calculations based on the Finite Element Method (FEM).

Keywords: Photonic crystal fiber, conventional fiber, chromatic dispersion.

1. Introducción

Las PCFs constituyen una nueva generación de medio de transmisión óptica con propiedades geométricas distintas a las de las fibras ópticas convencionales (FO). Estas se caracterizan por tener una geometría microestructurada, compuesta con material de bajo índice de refracción (generalmente huecos de aire que se extienden a lo largo de toda la fibra) sobre un material de mayor índice de refracción, que suele ser óxido de silicio (SiO₂, conocido en la literatura como sílica fundida).

Las PCFs pueden clasificarse en dos categorías: fibras de núcleo sólido y fibras de núcleo hueco (o núcleo de un material con menor índice de refracción que otros materiales que componen la fibra). Las primeras guían la luz de manera similar a las fibras convencionales, por el núcleo, basándose en el mecanismo de reflexión total interna. Esto se consigue gracias al menor índice de refracción de la región microestructurada con agujeros con respecto al núcleo (por lo general de sílica).

En cambio, las fibras de núcleo hueco se basan en el efecto de banda prohibida (photonic bandgap - PBG) [4]. Gracias a este fenómeno, la luz se confina en el interior del núcleo de bajo índice, siendo imposible la propagación de la luz a través de la cubierta de material microestructurado. En la Figura 1 se muestran fotos de las secciones transversales de ambos tipos de fibras tomadas por un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

Este singular mecanismo de guiado de la luz hace que las PCFs presenten una serie de propiedades que las diferencian de las FO; como poder ser construidas con

núcleos de tamaño muy pequeño para incrementar los efectos no lineales, o que presenten dispersión anómala en el rango visible de longitudes de onda.

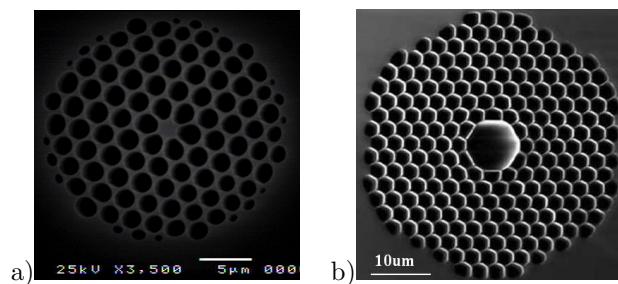


Figura 1. PCF: imágenes de las secciones transversales de las fibras tomadas por MEB a) PCF de núcleo sólido. b) PCF de núcleo hueco (“Hollow core”) [4].

Además la dispersión en las PCFs pueden modificarse muy fácilmente mediante el diseño adecuado de su geometría, pudiendo obtenerse valores imposibles de alcanzar en una FO, propiedad que se puede usar para el diseño de compensadores de dispersión en sistemas de comunicaciones ópticas.

En cuanto a la fabricación de las PCF, el método más usado es “stack-and-draw” (apilar y estirar) introducido por J. C Knight y P. Russel en 1996 [4] y se ha convertido en la técnica de fabricación preferida en los últimos años, que consiste en crear una preforma, que contiene la estructura de interés, pero en una escala macroscópica.

Primero se fabrican muchos capilares a partir de un tubo de sílica pura en una torre de fabricación, luego los capilares son apilados para formar la estructura periódica deseada, posteriormente se monta toda la estructura en un tubo de sílica (todo el conjunto es lo que se conoce como preforma) y finalmente esta preforma es llevada a la torre de fabricación para ser transformada en fibra [4].

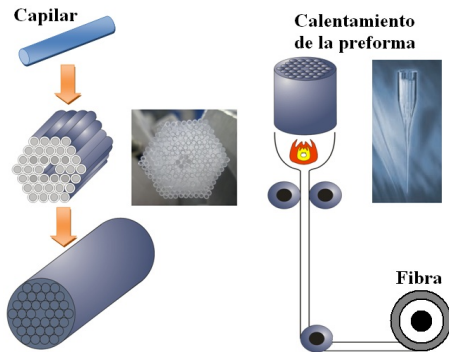


Figura 2. Esquema del proceso de fabricación de PCF.

2. Fundamento Teórico

2.1. Atenuación en PCFs

El principal inconveniente que afecta a este nuevo tipo de fibras se relaciona con la atenuación, que es superior a la de las FO. Los mecanismos de atenuación se presentan de forma diferente para PCF de núcleo sólido y de núcleo hueco, excepto por las pérdidas por confinamiento de la luz en el núcleo, que es similar para ambos tipos. Estas pérdidas por confinamiento se deben a la cantidad finita de huecos en la microestructura que circunda al núcleo, como consecuencia, se produce un guiado con fugas.

Por ejemplo, la luz que se propaga en el núcleo sólido de la PCF está confinada dentro de esta región gracias a los huecos que forman la microestructura. La luz se escapar  del núcleo si el confinamiento proporcionado por los huecos es insuficiente; esto significa que es importante controlar ciertos parámetros al diseñar la estructura de la fibra, así como el diámetro de los huecos, el espaciado entre huecos, etc. a fin de fabricar una PCF de baja pérdida por este mecanismo.

Para el presente trabajo nos es de particular interés entender los mecanismos de pérdidas para las PCFs con núcleo sólido, como pasamos a describir a continuación.

a) PCF de núcleo sólido:

La atenuación α de este tipo de fibras, medido en dB/km , considerando una pérdida de confinamiento insignificante, se puede expresar de la siguiente forma [4]:

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^4} + B + \alpha_{OH} + \alpha_{IR} \quad (1)$$

donde:

- A: Coeficiente de dispersión Rayleigh.
- B: Pérdidas por imperfecciones de la fibra.
- α_{OH} : Absorción por impurezas de OH^- .
- α_{IR} : Pérdidas por absorpci n infrarroja.
- λ : longitud de onda de la luz transmitida.

En la actualidad las pérdidas en las PCFs se deben principalmente a las pérdidas por la presencia de iones OH^- (que penetran en la región central de la fibra durante el proceso de fabricación) y debido a las imperfecciones de las fibras, principalmente por la rugosidad de la superficie de los huecos de la microestructura, que sufren pequeños rasguños al momento de la fabricación y si esta rugosidad de la superficie es comparable con la longitud de onda de trabajo, puede aumentar significativamente la atenuación.

En una PCF t pica la pérdida por absorpci n OH^- es mayor a $10dB/km$ en $1380nm$, correspondiente a su primer armónico (ya que su frecuencia de resonancia está en $2,7\mu m$), por ello es considerado un factor determinante de la atenuación de las fibras fotónicas y en el que se debe poner mayor énfasis; esto se hace actualmente mediante un proceso de deshidratación del ambiente en el cual se fabrica la fibra. Otra combinación de frecuencias aparece en $1,24\mu m$.

En la figura 3 se muestra como ha ido disminuyendo la atenuación de las PCF de núcleo sólido a lo largo de los años; hasta el año 2006.

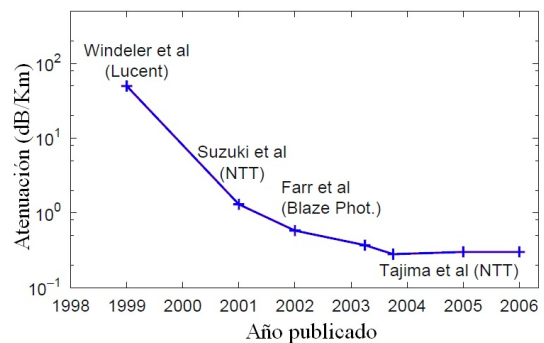


Figura 3. Comportamiento de la atenuación en fibras fotónicas de núcleo sólido en los últimos años, hasta el 2006.[4 p. 22].

b) Método para la medición de la atenuación:

La atenuación α de una PCF de longitud $L(Km)$ es por lo general especificada en decibelios por kilómetro (dB/km), y en términos de la potencia de entrada P_{in} y de salida P_{out} , viene dada por:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2)$$

Para determinar experimentalmente la atenuación " " de una PCF se puede usar el método de corte (*cut-back*); este método está basado en la medida y comparación de la potencia óptica medida en dos puntos distintos de la PCF sin cambiar las condiciones de inyección (potencia de un haz de una cierta longitud de onda en la entrada de la PCF).

Concretamente la realización de este método consiste en medir la potencia óptica recibida a la salida de una longitud L_1 , normalmente grande, de la PCF que se quiere caracterizar; a este valor lo llamaremos P_1 . Si se conociera la potencia de entrada en la PCF (P_{in}), según la ecuación (2) la atenuación estaría dada por:

$$\alpha = \frac{10}{L_1} \log \left(\frac{P_{in}}{P_1} \right) \quad (3)$$

Midiendo ahora la potencia de salida para otra longitud L_2 de la misma PCF, que se obtiene cortando la PCF inicial sin modificar las condiciones de inyección en la entrada de la misma (la potencia de entrada P_{in} es la misma para ambas longitudes de PCF); se obtiene una potencia P_2 , aplicando nuevamente la ecuación (2) se tiene:

$$\alpha = \frac{10}{L_2} \log \left(\frac{P_{in}}{P_2} \right) \quad (4)$$

y eliminando P_{in} de las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\alpha = \frac{10}{L_1 - L_2} \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5)$$

Por lo tanto, a partir de P_1 y P_2 medidos experimentalmente, las pérdidas por atenuación en la PCF para una cierta longitud de onda λ , medidas en dB/Km (con L_1 y L_2 en Km .), esta dado por la ecuación (5). Para determinar la atenuación en un rango espectral, bastará con aplicar la ecuación (5) para cada valor de λ dentro de dicho rango.

2.2. Dispersión cromática en PCFs

Como es sabido, el índice de refracción de un material depende de la frecuencia (o de la longitud de onda) de la onda electromagnética que por este se propaga, por ejemplo, para la sílica dicha dependencia puede ser aproximada en función de los términos de Sellmeier de la siguiente forma:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3} \quad (6)$$

La dependencia $n(\lambda)$ trae como consecuencia que cuando un pulso de luz se propague a través de una PCF, este pulso sufre un ensanchamiento debido a los diferentes tiempos de llegada entre los diferentes componentes de una señal; esto es lo que conocemos como *dispersión de la velocidad de grupo* (o también conocida como *dispersión cromática* de la PCF).

Se considera que el campo eléctrico de un modo de propagación en una guía de onda arbitraria (en particular en una PCF) es expresada como [6]:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = (\vec{E}_t + E_z \hat{z}) e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (7)$$

donde:

- \hat{z} : Vector unitario paralelo al eje de la PCF.
- ω : Frecuencia angular de la onda.
- \vec{E}_t : Componente transversal del campo eléctrico.
- \vec{E}_z : Componente longitudinal del campo eléctrico.
- β : Constante de propagación (componente del número de onda K a lo largo de la PCF).

Para determinar la dispersión cromática de una PCF es necesario conocer el inverso de la velocidad de grupo $\tau(\lambda)$ y el índice efectivo $N(\lambda)$ definido como el cociente entre la constante de propagación β y el número de onda K , ya que de la definición de la dispersión cromática se tiene:

$$D(\lambda) = \frac{\partial(\tau)}{\partial \lambda} \quad (8)$$

y en función del índice efectivo N viene dado por [2]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 N}{\partial \lambda^2} \quad (9)$$

Considerando la siguiente función de ajuste para τ [5]:

$$\tau(\lambda) = a + b\lambda + c\lambda^{-2} \quad (10)$$

y de las ecuaciones (8) y (10) se concluye que la correspondiente función para $D(\lambda)$ tendrá la forma:

$$D(\lambda) = A\lambda + B\lambda^{-3} \quad (11)$$

Análogamente, de las ecuaciones (9) y (10) por integración directa, la función correspondiente para el índice efectivo N estará representado por una función de la forma:

$$N(\lambda) = m\lambda^{-2} + n\lambda^2 + p\lambda + q \quad (12)$$

2.3. Designación de los modos de propagación en PCFs

Cuando una onda luminosa se propaga por el núcleo de una PCF, aparecen ciertas distribuciones del campo eléctrico y magnético a lo largo de la PCF, en particular en su sección transversal; estas distribuciones de los campos eléctricos y magnéticos dan lugar a una distribución de la intensidad de la luz en la sección transversal de la PCF, que es lo que se podría ver experimentalmente al observar la sección de la PCF en un microscopio óptico.

Se sabe también que algunas distribuciones distintas de los campos eléctricos y magnéticos originan la misma distribución de intensidades en la sección de la fibra (degeneración de los modos), por ello para evitar ambigüedades es conveniente usar la designación LP (Linealmente Polarizados) de los modos [3] como se observa en la Figura 4.

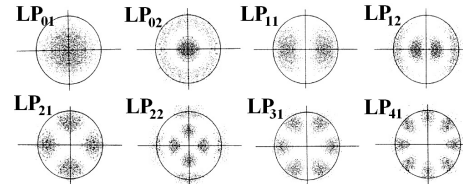


Figura 4. Designación LP_{lm} de la distribución de intensidad correspondiente a los modos de propagación.

En la Figura 4, los círculos representan la zona del núcleo de la PCF, y la intensidad en un punto de esta región es proporcional a $|E_t^2|$ evaluado en dicho punto (E_t : componente transversal del campo eléctrico).

El primer subíndice “ l ” denota la dependencia acimutal de la distribución de intensidad en la sección de la PCF con un periodo igual a π/l cuando $l \neq 0$, y si $l = 0$ no hay dependencia acimutal. El segundo subíndice “ m ” denota la dependencia radial, y nos da el número de máximos de intensidad en dicha dirección.

Una descripción detallada de la generación de los modos que se propagan en PCFs puede verse en [1].

3. Parte Experimental

El trabajo experimental desarrollado consistió en la medición de la atenuación espectral y la dispersión cromática de una PCF de núcleo sólido de 1 periodo (1 anillo de huecos alrededor del núcleo sólido); adicionalmente se hizo una simulación para hallar la dispersión cromática de la PCF a partir de un registro fotográfico de su sección transversal obtenida por MEB, que muestra su microestructura.

3.1. Medición de Atenuación espectral

La sección transversal de la PCF analizada se muestra en la Figura 5a, cuyo diámetro externo y diámetro del núcleo son aproximadamente $208\mu m$ y $12\mu m$ respectivamente. Para las medidas de atenuación se utilizó un analizador de fibra óptica modelo PK 2500, el cual usa una Lámpara halógena OSLAM SYLVANIA INC (20W, 12V). El método usado para la medición de la atenuación de la PCF fue el método “cut back”. Primero se tomó 25m de la PCF cuyos extremos fueron “clivados” (cortados transversalmente) y colocados en el equipo; por un extremo ingresa la luz que proviene de una lámpara halógena de espectro continuo (600nm - 1800nm aproximadamente), y la intensidad que sale por el otro extremo pasa a través de un monocromador obteniéndose así un espectro discreto de intensidades. Luego cortamos la PCF de 25m de manera que solo nos quedamos con 2m, sin variar el extremo por donde ingresa la luz y la intensidad de salida es medida nuevamente por el equipo.

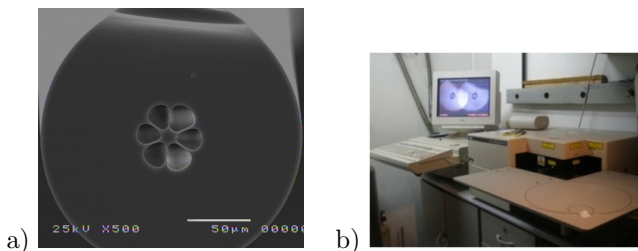


Figura 5. a) Imagen de la sección transversal de la PCF, obtenida con un MEB. b) Analizador de fibra óptica modelo PK 2500.

Las intensidades registradas para ambas longitudes de PCF, para cada longitud de onda de trabajo, son procesados para determinar la correspondiente atenuación en dB/Km basándose en la ecuación (5), la gráfica correspondiente de la atenuación espectral de la PCF es

mostrada en la Figura 6, en la cual se indica los valores mínimos y máximos de atenuación obtenidos.

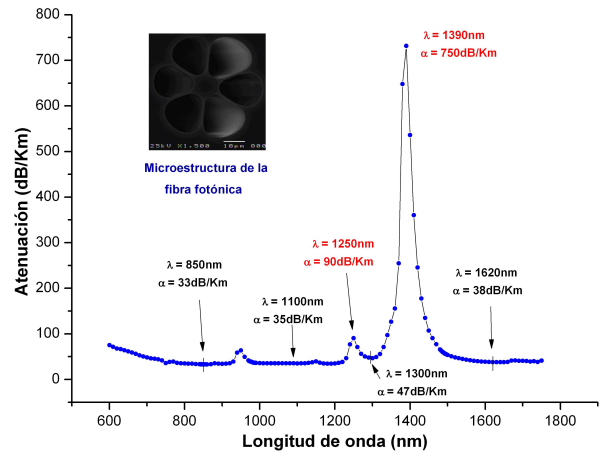


Figura 6. Curva de atenuación espectral para la PCF de 1 periodo, cuya microestructura se muestra.

3.2. Empalme de una FO con una PCF

Para hacer el empalme FO-PCF se usó un equipo de empalme de fibras por fusión modelo FFS-2000 de la empresa Vytran.

Fue necesario hacer el empalme FO-PCF para realizar las medidas de dispersión debido a que los conectores del medidor de dispersión usado son exclusivamente para FO. Se empalm  1m de FO monomodo a cada extremo de la PCF de 1 periodo (de 22m de longitud). Para empalmar las fibras primero se cliv  lo mejor posible los extremos a ser fusionados y colocarlos luego en el equipo de empalme siguiendo una serie de procedimientos.

El extremo libre de la FO monomodo va hacia una fuente de luz, esta luz se transmite por la FO monomodo y pasa hacia la PCF a través del acople de aire (ver Figura 7) y el extremo libre de la PCF es llevada al microscopio que es donde veremos el modo que se excita.

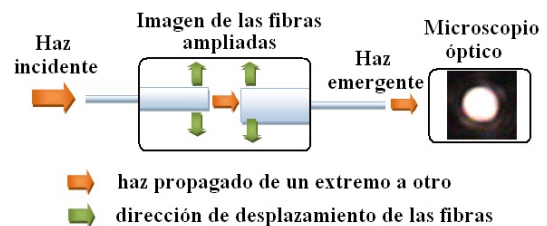


Figura 7. Esquema de acoplamiento de un modo de propagación específico durante el empalme de fibras.

El equipo trabaja conjuntamente con una computadora mediante la cual se puede ver claramente los extremos de las fibras en el monitor para ser manipulados con mayor facilidad (ver Figura 8). Así mismo cuenta con microposicionadores a los que se encuentran fijos los extremos a empalmarse de las fibras, de modo que variando la posición entre dichos extremos se fue excitando

diversos modos hasta conseguir el modo fundamental de propagación, y este es para el cual medimos la dispersión cromática de la PCF.

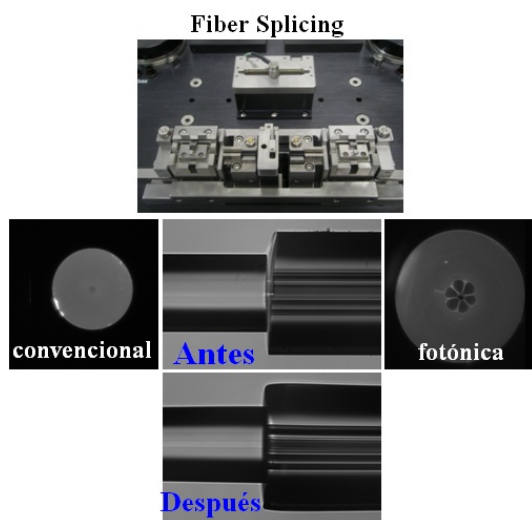


Figura 8. Empalme de una FO monomodo con una PCF de 1 periodo.

La Figura 8 muestra el antes y después del empalme por fusión de las fibras. Lo mismo se hace por el otro extremo de la PCF.

3.3. Medición de Dispersión cromática

El equipo usado fue el sistema de medición de dispersión cromática modelo PK 2800, este equipo cuenta con 2 acopladores para conectar las fibra directamente; las fibras deben tener un diámetro del revestimiento de aproximadamente $125\mu m$, lo cual hace al equipo ideal para trabajar con FO que ya están estandarizadas a esa medida, en cambio las PCFs las tenemos de diámetros muy variados; esta es la razón por la cual fue necesario empalmar previamente 2 tramos de FO monomodo en cada extremo de la PCF.

El equipo no mide directamente la dispersión cromática sino $\tau(\lambda)$ en ns/Km , desde $1200nm$ hasta $1800nm$ aproximadamente.

Debido a que a la PCF se le agregó 1m de FO monomodo a cada lado, fue necesario hacer una calibración previa la cual consistió en medir $\tau(\lambda)$ primero para $2m$ de la misma FO monomodo que se usó para los empalmes.

Seguidamente se hizo la misma medición para el conjunto FO-PCF-FO y de ambas mediciones el equipo determina el $\tau(\lambda)$ únicamente para la PCF.

Haciendo un ajuste de los valores de $\tau(\lambda)$, para la PCF considerando la función dada por la ecuación (10) la función para $\tau(\lambda)$ resultó:

$$\tau(\lambda) = -43405,35 + 0,01594\lambda^2 + 2,91213 \cdot 10^{10} \lambda^{-2} \quad (13)$$

en la que se expresó a $\tau(\lambda)$ en ps/Km y λ en nm ; y usando la ecuación (8) obtenemos:

$$D(\lambda) = 0,03188\lambda - 5,8242 \cdot 10^{10} \lambda^{-3} \quad (14)$$

con $D(\lambda)$ en $ps/nm.Km$ y λ en nm .

Por lo tanto, la curva de dispersión de la PCF correspondiente al modo fundamental de propagación LP_{01} obtenida de la ecuación (14) resulta (ver Figura 9).

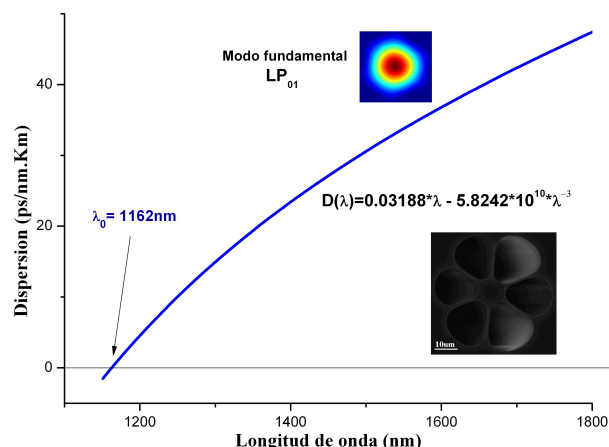


Figura 9. Curva de dispersión cromática para la PCF de 1 periodo ($\lambda_0 = 1162nm$).

3.4. Simulación de la dispersión de la PCF

Se usó la interfaz gráfica “GiD 7.2” para preparar la geometría de la fibra, definiendo las zonas correspondientes a materiales distintos (contornear los huecos), luego se particiona la sección transversal de la PCF en elementos triangulares (sólo la parte que contiene la microestructura), y se definen todos los demás parámetros necesarios, como son: zona PML, material del núcleo, material de los huecos, tamaño de los elementos, etc.

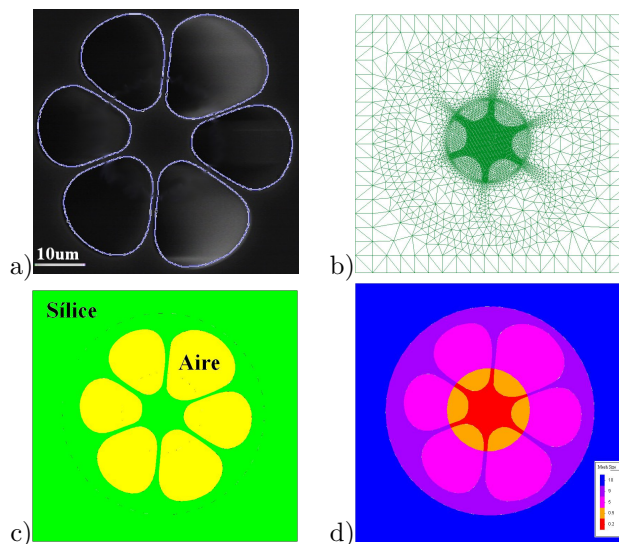


Figura 10. a) Definir los huecos de aire. b) Particionado de la microestructura en elementos triangulares. c) Asignando los materiales. d) Tamaño de los elementos triangulares asignados.

Para determinar el índice efectivo correspondiente a un cierto modo de propagación en la PCF, a una determinada longitud de onda, se usó un programa elaborado

en Matlab, el cual se basa en el Método de Elementos Finitos (MEF); este programa trabaja con los valores que definen toda la geometría de la sección de la fibra, valores que nos entrega el GiD 7.2.

El tipo de material se especifica mediante su índice de refracción, por ejemplo, para los huecos de aire de la microestructura se considera $n=1.0$, para cualquier λ .

En el caso particular de la sílica, material con el que fue fabricada la PCF, el programa ya considera la dispersión del índice de refracción de este material (ecuación 6) con los valores de las constantes correspondientes para la sílica, por lo que sólo se necesita especificar la longitud de onda λ de trabajo y el programa se encarga de calcular el respectivo índice de refracción.

El programa halla los índices efectivos $N = \beta/K$ para un cierto modo de propagación y para una longitud de onda λ dada, por ejemplo, para $\lambda = 630nm$, la distribución de la intensidad de la luz en la sección transversal difiere mucho para un valor de N complejo y real, como se observa en la Figura 11.

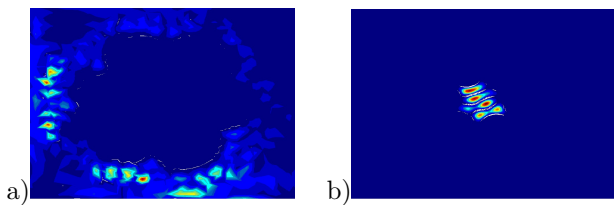


Figura 11. Distribución de la intensidad de la luz en la sección de la PCF. a) $Im(N) \neq 0$, la luz se propaga fuera del núcleo. b) $Im(N) = 0$, la luz se propaga sólo por el núcleo.

El trabajo consistió en determinar los N con parte imaginaria considerablemente nula (en el orden de 10^{-15}) para los modos LP_{01} , LP_{11} y LP_{21} , para un rango de longitudes de onda desde $430nm$ hasta 1630 (tomadas cada $100nm$), de modo que la dispersión para la PCF fue determinado a partir de estos valores haciendo uso de la ecuación (9).

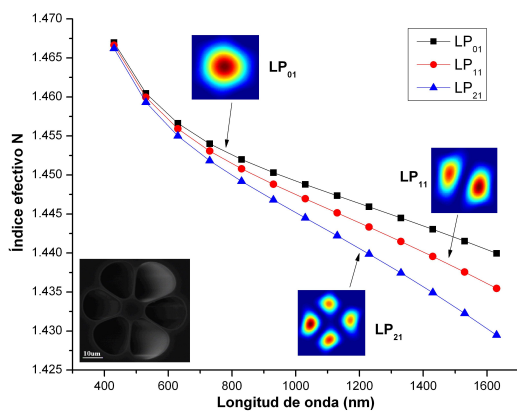


Figura 12. Valores de los índices efectivos N obtenidas para cada modo.

Teniendo en cuenta la ecuación (9) y (11) no es complicado ver que N debe tener la forma:

$$N(\lambda) = \left(\frac{-cA}{6}\right)\lambda^{-2} + \left(\frac{-cB}{2}\right)\lambda^2 + a\lambda + b \quad (15)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Los valores de N obtenidos por el programa se resumen en la Figura 12.

Ajustando estas curvas para cada modo, mediante la ecuación (15) se determinan las constantes A y B para cada modo (tomando $c = 30 \cdot 10^{-8} Km/ps$, para que las unidades de $D(\lambda)$ sean $ps/(nm.Km)$), las cuales fueron:

Modo LP_{01} : $A = 0,034119467$, $B = -66782647400$.

Modo LP_{11} : $A = 0,044560667$, $B = -66656337800$.

Modo LP_{21} : $A = 0,058302467$, $B = -66466356000$.

Las unidades de A y B son las adecuadas para que la unidad de la dispersión $D(\lambda)$ sea $ps/nm.Km$

Con todo esto, las curvas de dispersión $D(\lambda)$, para cada uno de los modos, resultan finalmente (ver figura 13).

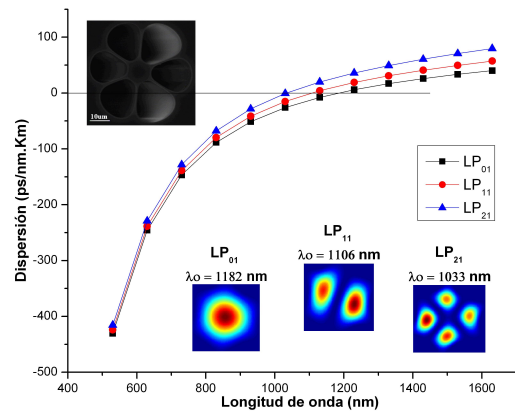


Figura 13. Curvas de dispersión obtenidas de la simulación, para los 3 modos de propagación mostrados.

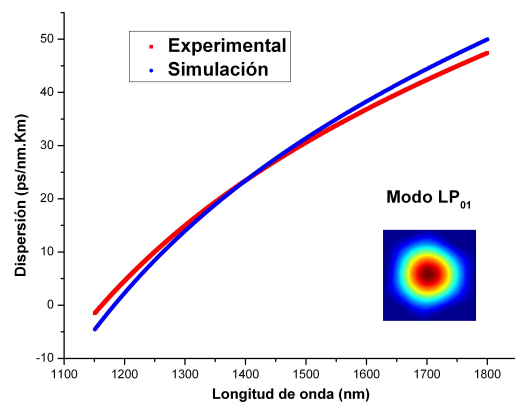


Figura 14. Comparación entre la curva de dispersión experimental y la hallada mediante la simulación, para el modo fundamental de propagación LP_{01} .

4. Conclusiones

La PCF caracterizada presenta mínimos de atenuación para longitudes de onda de $850nm$, $1100nm$, $1300nm$ y $1620nm$ (Figura 6); las cuales están alrededor de $40dB/Km$, podemos afirmar que la calidad de esta PCF, en cuanto a atenuación, es comparable con las mejores PCF de núcleo sólido reportadas hasta hace 10 años aproximadamente, si tomamos como referencia la Figura 3. También se evidencia claramente los picos de máxima atenuación en $950nm$, $1250nm$ y en $1390nm$, correspondiente a la absorción por iones OH^- , siendo más pronunciado en $1390nm$, correspondiente a su primer armónico de vibración.

De la Figura 13 se observa que para diferentes modos de propagación en la PCF se obtienen diferentes curvas de dispersión en las cuales se aprecia un corrimiento a menores valores de $\lambda_0(D_{(\lambda_0)}) = 0$ para modos de órdenes

mayores; por lo tanto es importante saber qué modo se está propagando por la PCF en el momento de empalmarlos con la FO para una correcta caracterización de la dispersión. La figura 14 muestra la concordancia entre los resultados experimentales de la dispersión cromática y los obtenidos con la simulación, para el modo fundamental de propagación LP_{01} ; lo cual reafirma la validez de la simulación como un método para caracterizar la dispersión de una PCF incluso para cualquier otro modo de propagación.

Agradecimientos

L. A. Torres y la Dra. C. R. Eyzaguirre agradecen al Dr. L. C. Barbosa por permitirnos usar las instalaciones del Laboratório de Novos Materiais Vitreos-IFGW-UNICAMP-Brasil.

-
1. Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin, and Jian Shuisheng. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers. OPTICS EXPRESS / Vol. 11, No. 11. Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing, China. 2003.
 2. R. Buczynski. Photonic Crystal Fibers. ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 106, No. 2. Information Optics Group, Faculty of Physics, Warsaw University. Pastura, Warsaw, Poland. 2004, p.152.
 3. Chin-Lin Chen. Foundations For Guided-Wave Optics. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2007, p. 242
 4. F. Poli A. Cucinotta S. Selleri. Photonic Crystal Fibers, Properties and Applications. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 2007, p.13, 21-23, 34-37, 191.
 5. Manual de usuario del equipo "Chromatic Dispersion Measurement System PK 2800".
 6. Victor H. Aristizabal. Fibra micro-estructurada para la compensación de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas. Dyna, Año 76, Nro. 160, pp. 63-69. Medellín. 2009.