



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Universidad Autónoma del Estado de Morelos

**Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y
Aplicadas**

Centro de Investigación en ingeniería y ciencias aplicadas

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS
ÓPTICAS ADELGAZADAS PARA APLICACIÓN EN
SENSORES ÓPTICOS**

Tesis para obtener el título de

**Licenciado en Tecnología con área terminal en física
aplicada**

Presenta

María del Carmen Soto Robles

Director de tesis

Dr. J. Jesús Castellón Uribe

Índice

Lista de figuras.....	4
Lista de tablas.....	8
Resumen	9
Objetivo general.....	10
Objetivos particulares	10
Justificación	10
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	11
1.1 Resumen	11
1.2 Introducción	11
1.3 Fibras ópticas	12
1.4 Fibras ópticas adelgazadas (FOA)	17
1.4.1 Técnicas de fabricación de las FOA	20
1.5 Técnica de fusión por calentamiento estirado.....	27
CAPÍTULO 2: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA	29
2.1 Resumen	29
2.2 Descripción del equipo utilizado para el desarrollo del proyecto	29
2.3 Calculo teórico para el diseño geométrico de las FOA	36
2.4. Metodología para la fabricación de las microestructuras de fibra óptica.....	38
2.4.1 Preparación inicial de la fibra óptica	38
2.4.2 Fabricación de las microestructuras (<i>tapers</i>).....	39
2.5 Metodología para la caracterización geométrica y espectral de las microestructuras	40
2.5.1 Caracterización geométrica de las microestructuras	40

2.5.2	Caracterización espectral de las microestructuras	41
CAPITULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES		43
3.1	Resumen	43
3.2	Geometría de los <i>tapers</i>	43
3.3	Respuesta espectral de las microestructuras ópticas	59
3.4.	Respuesta espectral de las microestructuras al inducir una perturbación.....	61
3.5	Discusión de resultados.....	64
CAPITULO 4: SUMARIO		67
REFERENCIAS		69

Lista de figuras

Figura 1.1 Vista frontal de la sección transversal y sus dimensiones de una Fibra óptica. Fuente: [10].	13
Figura 1.2 Representación de un rayo que incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes con diferente índice de refracción, el rayo es parcialmente reflejado y refractado. Fuente: [11]	14
Figura 1.3 Estructura 3D de una fibra óptica.	15
Figura 1.4 Propagación de la luz en una fibra monomodo de índice escalonado. Fuente: [9]	16
Figura 1.5 Propagación de la luz en una fibra multimodal de índice gradual. Fuente: [9]	16
Figura 1.6 Regiones de una estructura básica de fibras ópticas adelgazadas.	17
Figura 1.7 Diagrama de zona de transición en un taper. Fuente: [15].	18
Figura 1.8 Principio de operación de las fibras ópticas adelgazadas.	19
Figura 1.9 Sistema de motores y electrodos en la empalmadora A-80S.	21
Figura 1.10 Diagrama de un filamento en forma de omega invertida Fuente: [14]	21
Figura 1.11 Fotografías de microscopio de <i>tapers</i> obtenidos por el método de desbaste. Fuente: [17]	23
Figura 1.12 Técnica de adelgazamiento por ataque químico, a) fibra en un contenedor con una solución de ataque, b) punta de la fibra después de 100 minutos y c) punta de la fibra después de 140 minutos. Fuente: [20].	24
Figura 1.13 Diagrama del sistema calentamiento estirado por mechero.	26
Figura 2.1 Rollo de fibra monomodo modelo SMF-28.	29
Figura 2.2 Fusionadora de fibra óptica modelo A-80S COMPTCO	31
Figura 2.3 Cortadora de fibra modelo FC-6S	33
Figura 2.4 Fuente de luz Deuterio-Halógeno modelo DH-2000-BAL	34
Figura 2.5 Espectrómetro modelo NIR-512	35
Figura 2.6 Grafica diámetro final <i>taper</i> vs longitud de estiramiento.	36
Figura 2.7 Fibra óptica colocada en el sistema de calentamiento estirado.	39
Figura 2.8 Microscopio óptico y hoja de calibración.	40
Figura 2.9 Fotografía de una fibra óptica modelo SMF-28, obtenida durante el proceso de calibración del microscopio óptico.	41
Figura 2.10 Diagrama del arreglo experimental para la medición de espectros.	41

Figura 2.11 Fotografía del arreglo experimental para la medición de espectros. ...	42
Figura 3.1 Zona sin adelgazar izquierda, <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	44
Figura 3.2 Zona de transición izquierda, <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	44
Figura 3.3 Cintura del <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	45
Figura 3.4 Zona de transición derecha, <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	45
Figura 3.5 Zona sin adelgazar derecha, <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	45
Figura 3.6 Fotografía del <i>taper</i> completo No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	45
Figura 3.7 Fotografía con microscopio óptico de la zona de transición y cintura del <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	45
Figura 3.8 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$	46
Figura 3.9 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 2, $\rho = 99\mu\text{m}$	46
Figura 3.10 Zona sin adelgazar izquierda del <i>taper</i> No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	47
Figura 3.11 Zona de transición izquierda del <i>taper</i> No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	47
Figura 3.12 Cintura del <i>taper</i> No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	47
Figura 3.13 Zona de transición derecha del <i>taper</i> No. 4 $\rho = 76\mu\text{m}$	48
Figura 3.14 Zona sin adelgazar derecha del <i>taper</i> No. 4 $\rho = 76\mu\text{m}$	48
Figura 3.15 Fotografía del <i>taper</i> completo No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	48
Figura 3.16 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del <i>tape</i> No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	48
Figura 3.17 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 3, $\rho = 75\mu\text{m}$	49
Figura 3.18 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$	49
Figura 3.19 Zona sin adelgazar izquierda del <i>taper</i> No 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	50
Figura 3.20 Zona de transición izquierda del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	50
Figura 3.21 Cintura del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	50
Figura 3.22 Zona de transición derecha del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	51
Figura 3.23 Zona sin adelgazar derecha del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	51
Figura 3.24 Fotografía del <i>taper</i> completo No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	51
Figura 3.25 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	51
Figura 3.26 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$	52
Figura 3.27 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$	52
Figura 3.28 Zona sin adelgazar izquierda del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	53

Figura 3.29 Zona de transición izquierda del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	53
Figura 3.30 Cintura del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	53
Figura 3.31 Zona de transición derecha del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	53
Figura 3.32 Zona sin adelgazar derecha del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	53
Figura 3.33 Fotografía del <i>taper</i> completo No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	54
Figura 3.34 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	54
Figura 3.35 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$	55
Figura 3.36 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 8, $\rho = 31\mu\text{m}$	55
Figura 3.37 Zona sin adelgazar izquierda del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	56
Figura 3.38 Zona de transición izquierda del <i>taper</i> No. 9 $\rho = 24\mu\text{m}$	56
Figura 3.39 Cintura del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	56
Figura 3.40 Zona de transición derecha del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	56
Figura 3.41 Zona sin adelgazar derecha del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	56
Figura 3.42 Fotografía del <i>taper</i> completo No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	57
Figura 3.43 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	57
Figura 3.44 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$	58
Figura 3.45 Grafica geometría del <i>taper</i> No. 10, $\rho = 24\mu\text{m}$	58
Figura 3.46 Respuesta espectral de los <i>tapers</i> No. 1 $\rho = 101\mu\text{m}$ y No. 2 $\rho = 99\mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 25\%$	59
Figura 3.47 Respuesta espectral de los <i>tapers</i> No. 3 $\rho = 75\mu\text{m}$ y No. 4 $\rho = 76\mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 25\%$	59
Figura 3.48 Respuesta espectral de los <i>tapers</i> No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$ y No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 85\%$	60
Figura 3.49 Respuesta espectral del <i>taper</i> No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 92.5\%$. ..	60
Figura 3.50 Respuesta espectral del <i>taper</i> No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 60\%$	60
Figura 3.51 Respuesta espectral del <i>taper</i> No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$ al inducir una perturbación.....	61
Figura 3.52 Respuesta espectral del <i>taper</i> No. 3, $\rho = 75\mu\text{m}$ al inducir una perturbación.....	62
Figura 3.53 Respuesta espectral del <i>taper</i> No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$ al inducir una perturbación	62

Figura 3.54 Respuesta espectral del *taper* No. 7, $\rho = 31 \mu\text{m}$ al inducir una perturbación
..... 63

Lista de tablas

Tabla 1.1 Diferentes técnicas de fabricación de <i>tapers</i> y bibliografías que emplean dicha técnica	25
Tabla 2.1 Especificaciones geométricas y mecánicas de la fibra monomodo modelo SMF-28. Fuente: [21]	30
Tabla 2.2 Especificaciones ópticas de la fibra monomodo modelo SMF-28. Fuente: [21]	30
Tabla 2.3 Especificaciones de la fusionadora modelo A-80S COMPTYCO. Fuente: [22]	32
Tabla 2.4 Datos técnicos cortadora de fibra FC-6S. Fuente: [23]	33
Tabla 2.5 Datos técnicos Fuente de luz DH-2000-BAL. Fuente: [24].	34
Tabla 2.6 Datos introducidos al software que controla el proceso de calentamiento-estirado para la fabricación de los <i>tapers</i>	37
Tabla 3.1 Diámetros de cintura obtenidos de las microestructuras	43
Tabla 3.2 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del <i>taper</i> No. 1, $\rho=101\mu\text{m}$ y <i>taper</i> No. 2, $\rho= 99\mu\text{m}$	46
Tabla 3.3 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del <i>taper</i> No. 3, $\rho= 75\mu\text{m}$ y <i>taper</i> No. 4, $\rho= 76\mu\text{m}$	49
Tabla 3.4 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del <i>taper</i> No. 5, $\rho= 58\mu\text{m}$ y <i>taper</i> No. 6, $\rho= 59\mu\text{m}$	52
Tabla 3.5 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del <i>taper</i> No. 7, $\rho= 31\mu\text{m}$ y <i>taper</i> No. 8, $\rho= 31\mu\text{m}$	54
Tabla 3.6 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del <i>taper</i> No. 9, $\rho= 24\mu\text{m}$ y <i>taper</i> No. 10, $\rho= 24\mu\text{m}$	57
Tabla 3.7 Bibliografía fibras ópticas adelgazadas fabricadas con diferentes técnicas y el parámetro físico que midieron	66

Resumen

La fibra óptica ha representado una revolución en el mundo de las telecomunicaciones principalmente por su capacidad de transmitir grandes cantidades de información, incluyendo video y datos. Las investigaciones en este campo han permitido ampliar el espectro de aplicaciones de las fibras ópticas, dando lugar al desarrollo de nuevos dispositivos, como los láseres de fibra y sensores de fibra óptica. Actualmente, la investigación y desarrollo de dispositivos sensores de fibra óptica ha extendido sus aplicaciones a diversos campos tecnológicos, incluyendo la industria médica, química y de telecomunicaciones [1].

Por lo anterior, una fibra óptica es una guía de onda óptica en forma de filamento y generalmente está hecha de vidrio (aunque también puede estar hecha de materiales plásticos). Una fibra óptica se compone de tres partes: el núcleo, el revestimiento y el recubrimiento. Las fibras se pueden producir en una variedad de tamaños; un diámetro de revestimiento común es de 125 μm , mientras que el núcleo típicamente oscila en un intervalo de 10 a 50 μm [2].

Hoy en día la necesidad de extender los límites de detección en sistemas sensores ha conducido a la investigación de nuevos dispositivos y/o técnicas para diversas aplicaciones.

Las fibras ópticas estrechadas (*tapers*) de diámetro micrométrico han mostrado gran potencial para aplicaciones en sensado óptico. En estas microestructuras, parte de la energía es guiada a través de la fibra en forma de ondas evanescentes. Cuando se producen cambios de índice de refracción en el entorno externo al *taper*, estas ondas experimentan un cambio espectral y de intensidad proporcional a la perturbación externa; lo cual hace a estas microestructuras ideales para el desarrollo de sensores altamente sensibles [3].

Objetivo general

Fabricar y caracterizar fibras ópticas adelgazadas a través de la técnica de fusión por calentamiento-estirado para particulares aplicaciones en sensado óptico.

Objetivos particulares

- Fabricar microestructuras de fibra óptica con diferentes diámetros de cintura en un intervalo entre [25 μm - 100 μm].
- Determinar la geometría y medir la respuesta espectral de las microestructuras.
- Investigar las aplicaciones de las fibras ópticas estrechadas como sensores ópticos.

Justificación

Las fibras ópticas adelgazadas fundidas bicónicas (*Biconical Fused Optical Fiber Tapers*) o simplemente *tapers*, son fibras ópticas a las cuales se les ha reducido el diámetro inicial en una determinada sección de su longitud total. El propósito de adelgazar la fibra es alterar de forma pasiva la luz que se propaga dentro de ella [4].

Los sensores basados en fibra óptica adelgazada han atraído recientemente un interés considerable para una variedad de aplicaciones ópticas [5].

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Resumen

En este capítulo se presentan los principales conceptos para comprender a las fibras ópticas y a las fibras ópticas adelgazada (*tapers*). Además, se describen los principales métodos de fabricación de estas microestructuras, particularmente la técnica de fusión por calentamiento – estirado. Finalmente, se describen los parámetros más importantes relacionados con la geometría de estas microestructuras ópticas.

1.2 Introducción

La fibra óptica es uno de los grandes descubrimientos de la segunda mitad del siglo XX, con su descubrimiento se ha logrado acelerar en grandes pasos los procesos de intercambio de información.

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica, hecha en su mayoría de vidrio de sílice, consta de un núcleo central en el que la luz es guiada, un revestimiento externo de índice de refracción variado y un recubrimiento que proporcionar protección y flexibilidad [6]. Las principales aplicaciones de las fibras ópticas se encuentran en el área de las telecomunicaciones, no obstante, el área de influencia se extiende a campos tan variados como la medicina, los sensores físicos, bioquímicos y la iluminación arquitectónica por mencionar algunas [7].

Sus aplicaciones son innumerables, pero hay un área de mayor interés, como son los sensores de fibra óptica, que debido a su eficiencia participan en una nueva gama de equipos que están empezando a sobresalir en la rama de la transferencia de información [8].

La tecnología de los sensores de fibra óptica ha estado en desarrollo durante los últimos 40 años y ha dado como resultado la producción de varios dispositivos, entre ellos los giroscopios de fibra óptica; sensores de temperatura, presión y vibración; y sondas químicas. Los sensores de fibra óptica ofrecen una serie de ventajas, como una mayor sensibilidad en comparación con las técnicas existentes y versatilidad geométrica, que permite la configuración en formas arbitrarias [2].

Una fibra óptica que es adelgazada por cualquiera de los métodos existentes, es un dispositivo eficiente que sirve para inyectar luz a través de ella de forma que puede interactuar con alguna propiedad física externa a la fibra y con ello darnos una respuesta del comportamiento de la luz a través de ella.

Las fibras ópticas adelgazadas son utilizadas en diversas aplicaciones para diferentes áreas de la óptica, por ejemplo, en el área de sensores, detección óptica, espectroscopia, óptica no lineal y gases cuánticos [6].

1.3 Fibras ópticas

Una fibra óptica es una guía de onda óptica en forma de filamento que generalmente está hecha de vidrio (aunque también puede estar hecha de materiales plásticos) [2]. La fibra óptica está compuesta de un núcleo, su función es de guiar la luz a través de la fibra, un revestimiento que se encarga de confinar la luz, esto se logra gracias a la diferencia de índices de refracción que tienen el uno del otro [9]. En su forma más simple, una fibra óptica consta principalmente de un núcleo con valores de entre 9 y 100 μm , un revestimiento de 125 μm y un recubrimiento de 250 μm que promueve mayor estabilidad mecánica a la fibra [3]. En la actualidad existe una variedad de fibras las cuales poseen dimensiones de núcleos y revestimientos con valores más amplios, en la **Figura 1.1** podemos observar la comparación de las dimensiones de una

fibra óptica con respecto a un cabello humano y el rango de valores que tiene cada parte de la estructura de la fibra.

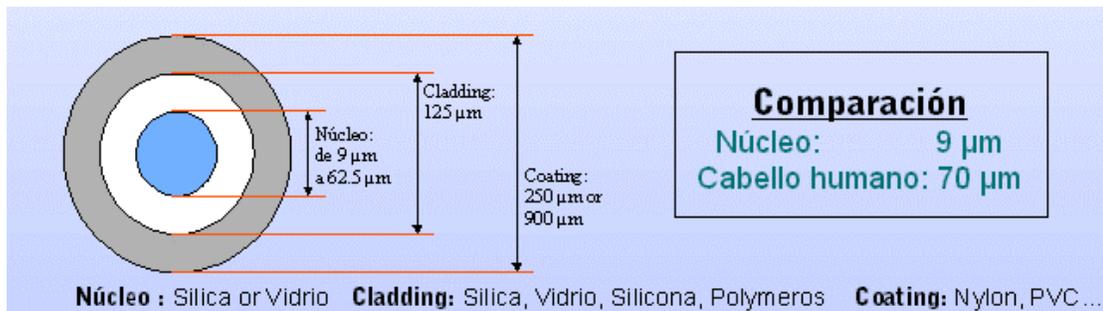


Figura 1.1 Vista frontal de la sección transversal y sus dimensiones de una Fibra óptica. [10]

Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes, la onda en general es parcialmente reflejada y refractada al segundo material. Los rayos incidente, reflejado y refractado, así como la normal a la superficie, yacen todos en el mismo plano, una de las leyes de la reflexión nos dice que el ángulo de reflexión θ_r es igual al ángulo de incidencia θ_a para todas las longitudes de onda y para cualquier material, esta relación se conoce como *ley de reflexión*.

$$\theta_r = \theta_a \quad (1)$$

La razón de los senos de los ángulos θ_a y θ_b , donde los dos ángulos están medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al inverso de la razón de los índices de refracción, a esto se le llama *ley de refracción* o *ley de Snell*.

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{\text{sen } \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad (2)$$

La *ley de Snell* establece que la refracción de un rayo de luz en una interfaz es el resultado de la diferencia de velocidad de la luz en dos materiales que tienen diferentes índices de refracción, en la **Figura 1.2** se representa esta ley de forma gráfica. Cuando el ángulo del rayo incidente decrece de tal manera que el rayo refractado es paralelo a la interface de la superficie se produce una reflexión total interna, a esto se le conoce como *ángulo crítico* [11].

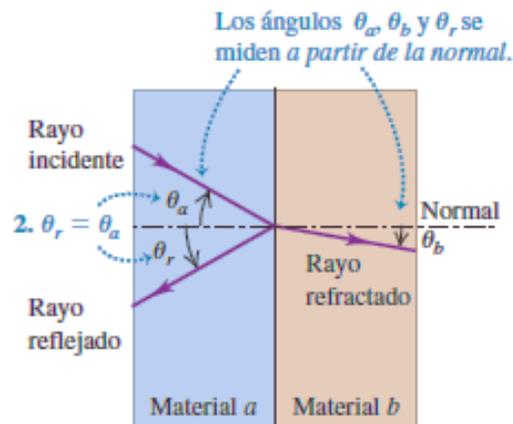


Figura 1.2 Representación de un rayo que incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes con diferente índices de refracción, el rayo es parcialmente reflejado y refractado [11].

Para lograr que el haz se guíe a través de la fibra óptica debe presentarse la reflexión total interna, esta se alcanza cuando el índice de refracción n_1 es ligeramente mayor al índice de refracción n_2 . Las capas del núcleo de sílice y del revestimiento difieren ligeramente en su composición debido a pequeñas cantidades de materiales, como boro o germanio. Esto altera las características del índice de refracción de ambas capas dando como resultado las propiedades de confinamiento de luz necesarias para la propagación de rayos. En la **Figura 1.3** se muestra la distinción de tamaño que tienen estas capas unas con otras y la diferencia de índices de refracción que tiene el núcleo con el revestimiento.

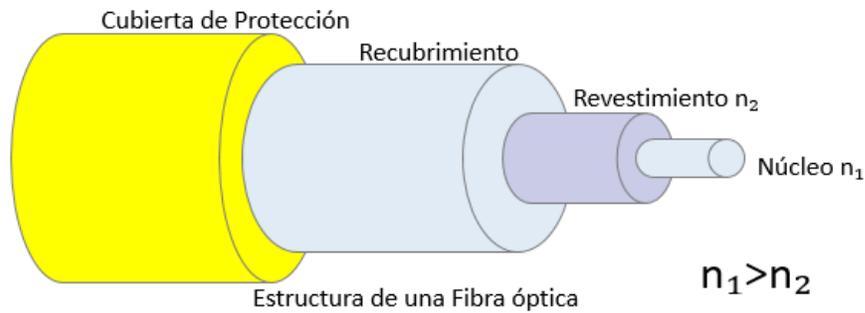


Figura 1.3 Estructura 3D de una Fibra óptica.

Una fibra óptica permite que la luz viaje de muchas formas diferentes a través del conjunto núcleo-revestimiento, a estas variantes en la manera que viaja la luz se le llama modos de propagación y que en forma aproximada podemos decir que son rayos de luz viajando en ángulos diferentes. Haciendo que el radio del núcleo y la diferencia de índices de refracción entre núcleo y revestimiento sean pequeños, se puede suprimir la propagación de la mayoría de los modos existentes en la fibra óptica, a esto se le llama guiado débil, ya que los pocos modos que logran propagarse a través de ella, son guiados con las condiciones mínimas necesarias para que la luz no escape al exterior, pero en general, el guiado es lo suficientemente fuerte para soportar curvaturas de pocos centímetros.

Las fibras ópticas se pueden clasificar dependiendo de la cantidad de modos que son excitados, es decir, la cantidad de modos que se descompone la luz como consecuencia de su confinamiento.

Las *Fibras ópticas monomodo* es fibra óptica en la que solo se propaga un modo de luz que corresponde al modo fundamental, es decir, un camino para los rayos de luz por el centro de la fibra como se observa en la **Figura 1.4**, esto se logra reduciendo el tamaño de su núcleo alrededor de los 8 y 10 μm . El perfil de índice de refracción de una fibra monomodo es de índice escalonado.

Las *Fibras ópticas multimodales* son fibras ópticas que pueden propagar más de un modo de luz, tienen un diámetro de núcleo mucho mayor que la de una fibra monomodo, por lo tanto, puede guiar varios modos de propagación, estas pueden tener un perfil de índice escalonado o gradual [9]. En la **Figura 1.5** se muestra el perfil de índice gradual que presentan las fibras ópticas multimodales de este tipo, estas curvan los rayos de la luz en caminos sinuosos, debido a que el índice de refracción del núcleo no es uniforme.

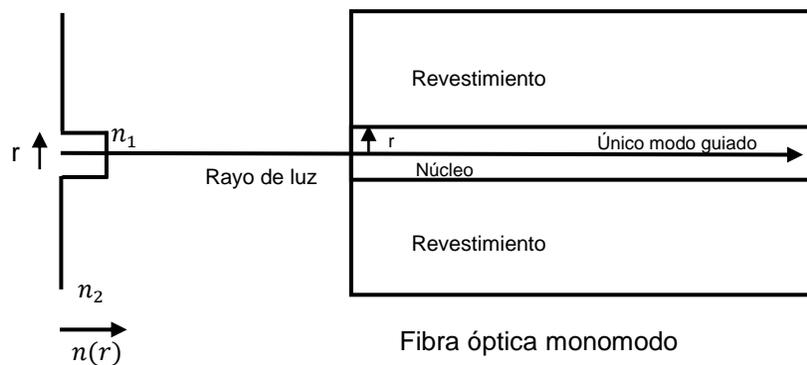


Figura 1.4 Propagación de la luz en una fibra monomodo de índice escalonado [9].

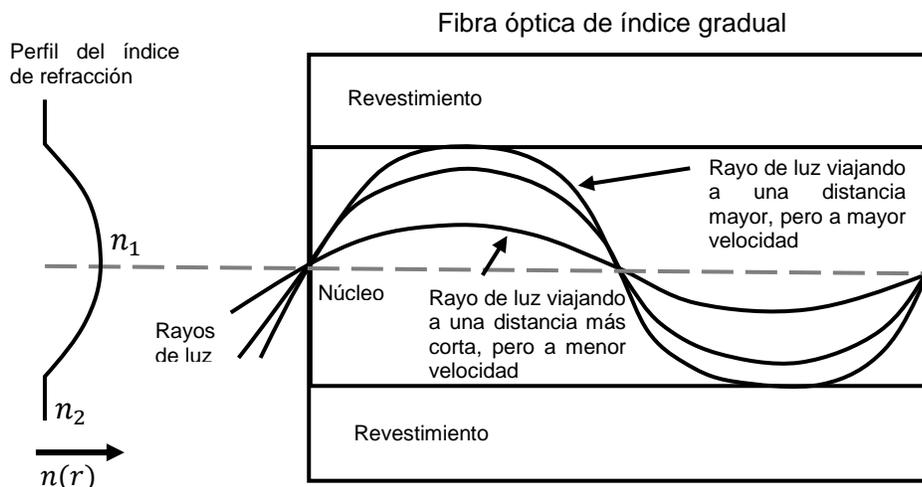


Figura 1.5 Propagación de la luz en una fibra multimodal de índice gradual [9].

1.4 Fibras ópticas adelgazadas (FOA)

Las fibras ópticas adelgazadas fundidas bicónicas (Biconical Fused Optical Fiber Tapers) o simplemente *tapers*, son fibras ópticas a las cuales se les ha reducido el diámetro a lo largo de una sección. La palabra en inglés “*taper*” se refiere en general a cualquier estructura con una geometría cónica. El propósito de adelgazar la fibra es de alterar de forma pasiva la luz que se propaga dentro de ella, por ejemplo, modificando la Apertura Numérica o alterar la densidad de potencia óptica en la superficie circundante a la cintura del *taper* [12].

La estructura básica de una fibra óptica adelgazada consiste principalmente en las siguientes regiones presentadas en la **Figura 1.6**.

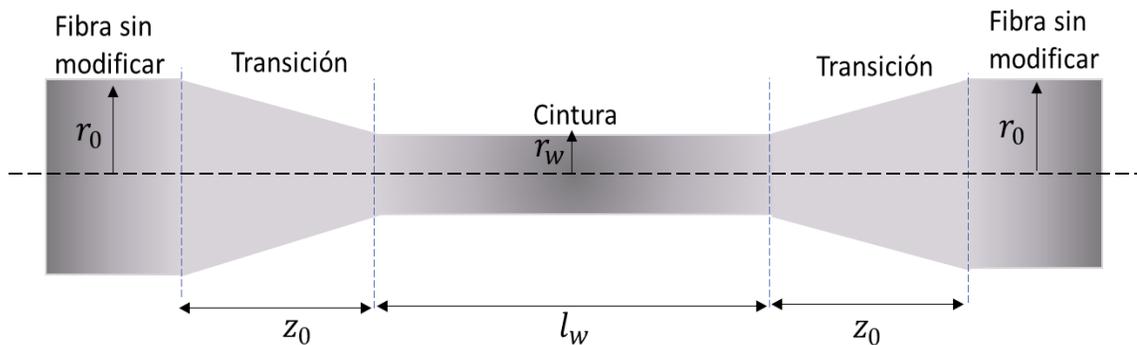


Figura 1.6 Regiones de una estructura básica de fibras ópticas adelgazadas.

Durante el proceso de adelgazamiento hay dos regiones de la fibra óptica que no sufren modificación alguna, con un radio constante r_0 . Las regiones llamadas *transición* de longitud z_0 , corresponden a zonas de transición en las que el radio de la fibra decrece, por último la región *cintura* es la zona más estrecha de la fibra de longitud l_w que además presenta un radio constante de cintura r_w .

Un *taper* de fibra óptica es aproximadamente adiabático si el ángulo cónico (ángulo de transición $\Omega(z)$ ver **Figura 1.7**) es lo suficientemente pequeño en cualquier lugar para garantizar que haya una pérdida insignificante de potencia del modo fundamental a medida que se propaga a lo largo de la longitud del *taper* [13]. El criterio de adiabaticidad más simple es el criterio de longitud - escala. Se basa en el argumento físico de que la longitud - escala cónica local debe ser mucho mayor que la longitud de acoplamiento entre el modo fundamental y el modo de acoplamiento dominante para que la pérdida de potencia sea pequeña. [14].

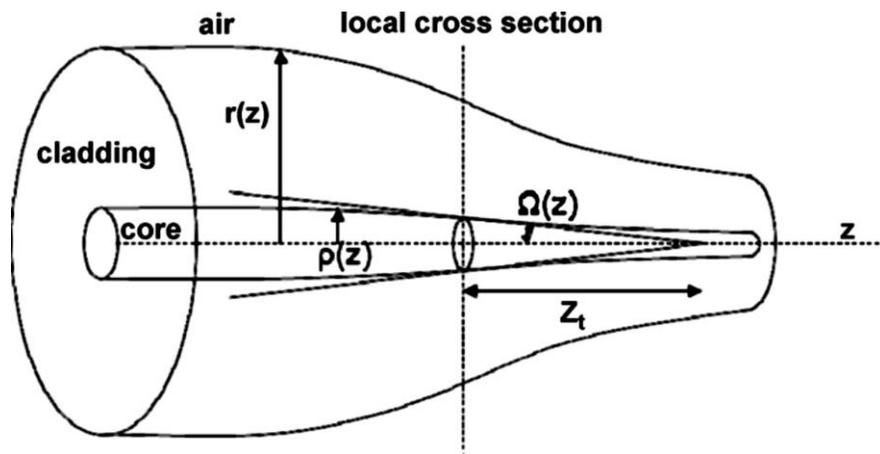


Figura 1.7 Diagrama de la zona de transición en un taper [15].

La transmisión de la luz en una fibra óptica adelgazada se presenta en el esquema de la **Figura 1.8**, en estas microestructuras, parte de la energía es guiada a través de la fibra en forma de ondas evanescentes. Cuando se producen cambios de índice de refracción en el entorno externo al *taper*, estas ondas experimentan un cambio espectral y de intensidad proporcional a la perturbación externa; lo cual hace estas microestructuras ideales para el desarrollo de sensores altamente sensibles [6].

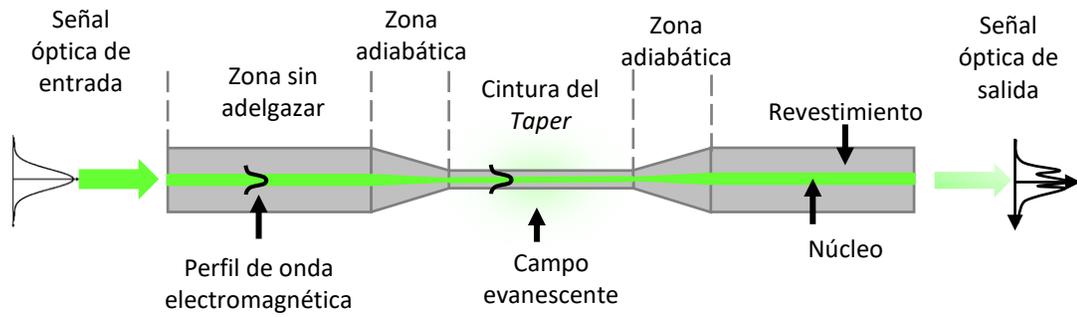


Figura 1.8 Principio de operación de las fibras ópticas adelgazadas.

El área cónica de la fibra óptica facilita la espectroscopia de onda evanescente, en la que se mide el espectro de absorción del medio circundante. Alternativamente, la influencia del medio circundante sobre las propiedades de los modos ópticos de la guía de ondas cónica se puede explicar como un cambio en el índice de refracción, es decir, funcionará como un refractómetro [16].

1.4.1 Técnicas de fabricación de las FOA

Existen diversos métodos de fabricación de fibras ópticas adelgazadas, los cuales se pueden clasificar en dos grupos: 1) adelgazamiento por calentamiento – estirado y 2) adelgazamiento por desbaste, de estos se desglosan diferentes técnicas las cuales se presentan a continuación:

a) Adelgazamiento por calentamiento – estirado:

Arco eléctrico: La fibra óptica es calentada al hacerla pasar por un arco eléctrico generado por un par de electrodos, al mismo tiempo se debe generar tensión en los extremos de la fibra para su estrechamiento.

Una descarga de arco es un fenómeno complejo durante el cual ocurren diferentes procesos, como la emisión de electrones por un electrodo, donde se produce una alta intensidad de campo eléctrico generado por las puntas de los electrodos, y mientras la fibra transita entre los electrodos se ionizan átomos de nitrógeno y oxígeno, a través de impactos, creando un plasma de alta temperatura que comprende electrones e iones [6].

Existen diferentes dispositivos comerciales de diferentes costos para fabricar un *taper* basados esta técnica, como la empalmadora de fusión A-80S de COMPTON mostrada en la **Figura 1.9**, utilizando el software de estrechamiento de fibras que permite controlar la longitud del *taper*, la posición de la fibra, la potencia de calentamiento absoluta o relativa, y la combinación de motores.

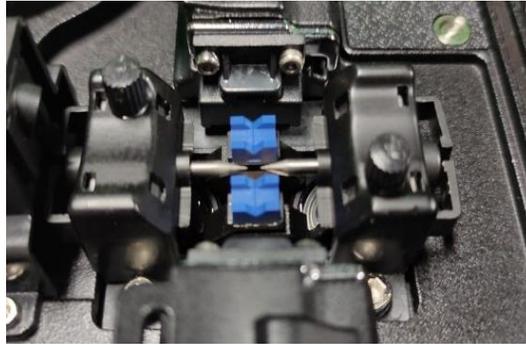


Figura 1.9 Sistema de motores y electrodos en la empalmadora A-80S.

Filamento de fusión: El filamento de fusión se base en un elemento que se calienta por una resistencia eléctrica, dadas las temperaturas requeridas, son muy pocos los metales que pueden cumplir con esta condición. Al igual que el método de fusión por arco eléctrico, la fibra se calienta predominantemente por convección térmica a través del ambiente circundante, se utiliza típicamente una cinta de tungsteno en la forma de omega invertida como se muestra en la **Figura 1.10**, mientras que el tungsteno tiene un punto de fusión muy alto, este se oxida rápidamente, por lo tanto, un gas de purga inerte debe rodear el filamento [17].



Figura 1.10 Diagrama de un filamento en forma de omega invertida [18].

Láser de CO₂: El principio de estrechamiento en esta técnica consiste en utilizar un láser como fuente térmica para calentar la fibra, y al generar tensión en sus extremos con motores a pasos, lograr el estrechamiento de ésta. Comúnmente se utiliza un láser de CO₂ debido a la alta potencia que alcanza. Al utilizar un láser, se tiene la ventaja de utilizar una fuente de calor puntual, y de esta forma poder controlar con precisión la longitud de las fibras estrechadas [19].

Debido a que las fibras a base de sílice son de altísima pureza y transparencia en el visible y el infrarrojo cercano, es posible calentarlas con un láser de CO₂, que tiene una longitud de onda de alrededor de los 10 micrómetros, la cual es bien absorbida por el material [20].

Mechero: En esta técnica se utiliza un mechero que genera una flama por combustión de gases como el hidrogeno, propano o butano como combustible y oxigeno como carburante, que solo calienta una pequeña sección de la fibra por un tiempo específico.

El calentamiento de la fibra debe ser de manera oscilatoria a una velocidad constante a lo largo de la sección, de esta forma, en cada ciclo de oscilación cada elemento en dicha longitud de la fibra se calienta idénticamente. Mientras el calentador actúa, se produce una tensión en cada extremo de la fibra por la acción de los motores [6].

b) Adelgazamiento por desbaste:

Pulido mecánico: Con el pulido mecánico se pueden obtener ángulos que oscilan entre los 30° y 130° con la ventaja de obtener superficies altamente lisas que mejoran la adherencia de películas metálicas en la zona adelgazada.

En la **Figura 1.11** se presentan imágenes de microscopio de *tapers* obtenidos por el método de pulido mecánico a) con un ángulo de cono de 30°, b) con un ángulo de cono de 50°, c) ángulo de cono de 90° y d) ángulo de cono de 130°.

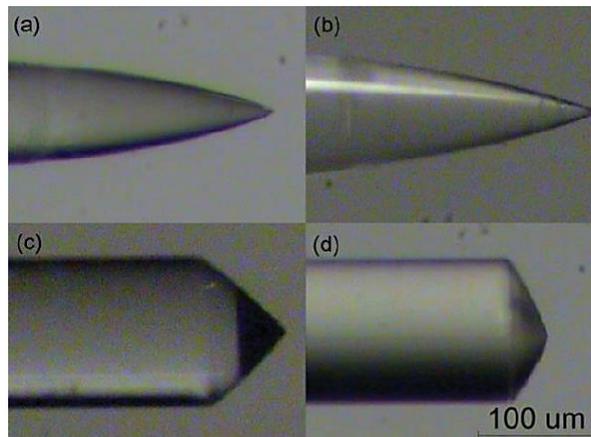


Figura 1.11 Fotografías de microscopio de *tapers* obtenidos por el método de desbaste [21].

Ataque químico: El ataque químico es una técnica principalmente para fabricar sondas de fibra óptica con puntas de fibra óptica adelgazada, se trata de una técnica en la que consiste básicamente en insertar un extremo de la fibra, la longitud deseada, en un compuesto química por un determinado tiempo para que este modifique la estructura de la fibra [22].

La estructura y la interfaz núcleo/revestimiento se conserva en los métodos por calentamiento y estirado, mientras que en los *tapers* fabricados por ataque químico tienden a dejar solo el núcleo en la región de la cintura, en particular el índice de refracción disminuye a medida que el núcleo se elimina a través de esta técnica [23].

En la **Figura 1.12** se muestra el proceso de como el perfil de la punta de una fibra óptica es adelgazada como resultado al tiempo que transcurre sumergida en la solución del ataque químico.

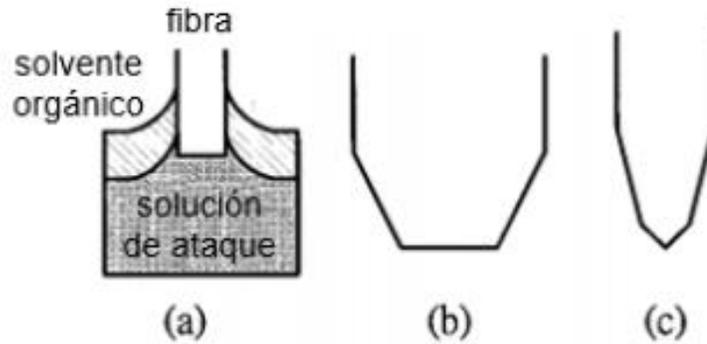


Figura 1.12 Técnica de adelgazamiento por ataque químico, a) fibra en un contenedor con una solución de ataque, b) punta de la fibra después de 100 minutos y c) punta de la fibra después de 140 minutos [22].

Técnica de adelgazamiento de fibras ópticas	Referencia
Calentamiento –estirado	<p>[24] R. P. Kenny, T. A. Birks, and K. P. Oakley, Control of optical fiber taper shape, <i>Electron. Lett.</i> 27, 1654–1656, (1991).</p> <p>[14] T. A. Birks and Y. W. Li, The shape of fiber tapers, <i>IEEE J. Lightwave Technol.</i> 10, 432–438 (1992).</p> <p>[25] Villatoro, J., Monzon-Hernandez, D., and Mejia, E. Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors, <i>Appl. Opt.</i>, 2003, 42, pp. 2278–2283.</p>
Laser CO2	<p>[26] Anthony Grellier, “Characterization of optical fibre tapering using a co2 laser,” University of Kent, Doctoraal Thesis, (2000).</p>
Arco eléctrico	<p>[27] Benye Li, Lan Jiang n , Sumei Wang, Qianghua Chen Mengmeng Wang, Jinpeng Yang. A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing. <i>Opt Lasers Eng.</i> 50 (2012) 829-832.</p> <p>[28] Y.M.Raji a, H.S.Lin a,b, S.A.Ibrahim a, M.R.Mokhtar a, Z.Yusoff a,n Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature. <i>Optics & Laser Technology</i> 86(2016)8–13.</p>
Ataque químico	<p>[29] Kim, Jeong, Kwon, Park, Lee, Control of the characteristics of a long-period grating by cladding etching, <i>Applied Optics</i>, 39(13), pp. 2038-2042 (2000).</p> <p>[30] Vasiliev S.A., Dianov E. M., Varelas D., Limberger H. G., Salathé R. P., Postfabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings. <i>Opt. Letters</i>, 21(22), pp. 1830-1832 (1996).</p>

Tabla 1.1 Diferentes técnicas de fabricación de *tapers* y bibliografías que emplean dicha técnica.

Haciendo una comparación entre las técnicas de adelgazamiento de fibras, el método de fusión y estiramiento simultáneo es de los más sencillos ya que no existe la necesidad de remover el revestimiento para generar la zona adelgazada; la utilización de una fuente de alta energía como un láser, o la utilización de una empalmadora de fusión para fibras ópticas. También, estas técnicas requieren de un sistema de control y monitoreo de diámetro para no dañar la fibra durante el proceso de adelgazamiento, en particular la superficie del núcleo. En el caso del ataque químico el control del tiempo de acción del químico sobre el vidrio de la fibra, para conseguir el diámetro deseado, depende de varios factores (concentración, volumen, presencia de impurezas), lo que dificulta establecer un método preciso (ver **Tabla 1.1**)

1.5 Técnica de fusión por calentamiento estirado

El vidrio basado en sílice no tiene una temperatura exacta de fusión como otros materiales, sin embargo, su viscosidad se reduce considerablemente al grado de poder ser manipulable alrededor de los 1200°C; para aplicaciones donde se necesita que varias fibras se fusionen entre sí, esta temperatura debe llegar a más de 2100°C [15], con el propósito de que la viscosidad de la fibra se reduzca lo suficiente como para permitir que la tensión superficial del vidrio disminuya; con esto se logra que el vidrio fluya y se mezclen sus componentes.

La cantidad de fuentes de calor que alcanzan esta temperatura son limitadas. Por otro lado, la zona en que se aplica el calor debe ser altamente controlada, no solo en el control de la temperatura y su estabilidad, sino también en su área geométrica, la ubicación de la fibra a la fuente de calor y un ambiente con una atmosfera libre de polvo [14].

En la técnica de fusión por calentamiento estirado, el mechero debe estar en oscilación al mismo tiempo que la fibra se estira longitudinalmente hasta dejarla con el diámetro deseado, como se muestra en la **Figura 1.13**.

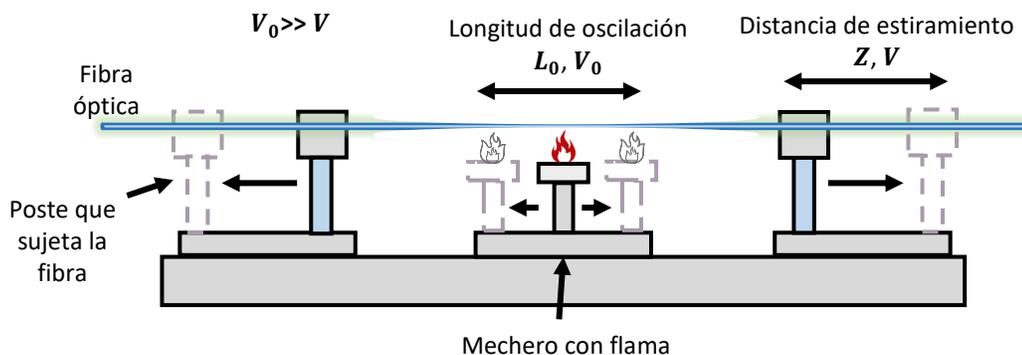


Figura 1.13 Diagrama esquemático del sistema de fusión por calentamiento estirado.

El tiempo de calentamiento y el diámetro final de la fibra son determinados por los parámetros que se le introducen al sistema, los cuales son: *velocidad de oscilación del mechero* v_0 , *velocidad de estiramiento de la fibra* v , *longitud de estiramiento de la fibra* z y la *longitud de oscilación del mechero* L_0 .

En un modelo simple para la forma de una fibra adelgazada, se supone que una longitud fija L_0 se calienta y estira uniformemente, mientras que fuera de esta zona la fibra es fría y sólida. Se predice que el diámetro ρ del *taper* variará con la extensión del valor de Z como a continuación:

$$\rho = \rho_0 \exp\left[\frac{-Z}{2 \cdot L_0}\right] \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

Donde, L_0 es la longitud de oscilación del mechero, Z la longitud de estiramiento, ρ_0 el diámetro inicial de la fibra y ρ el diámetro final de la fibra que se obtendrá [25].

CAPÍTULO 2: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA

2.1 Resumen

En este capítulo se presenta una descripción de todos los elementos, dispositivos y equipo que se utilizaron a lo largo de toda la etapa experimental del proyecto; así como la técnica que se llevó a cabo para la fabricación de los *tapers* y la metodología que se siguió para tomar las diferentes medidas en la caracterización física y espectral de las microestructuras.

2.2 Descripción del equipo utilizado para el desarrollo del proyecto

Fibra monomodo modelo SMF-28

La fibra óptica que se utilizó para la fabricación de los *tapers* es la fibra monomodo modelo SMF-28 de Thorlabs revestida con tubo Hytrel amarillo de $\varnothing 900 \mu\text{m}$ que se muestra en la **Figura 2.1** [31].



Figura 2.1 Rollo de fibra monomodo modelo SMF-28 de Thorlabs.

A continuación, se presentan algunas de sus especificaciones técnicas y características de la fibra óptica:

Geometrical & Mechanical	
Core Diameter	8.2 μm
Cladding Diameter	125 \pm 0.7 μm
Coating Diameter	242 \pm 5 μm
Core-Clad Concentricity	\leq 0.5 μm
Coating-Clad Concentricity	<12 μm
Fiber Curl	\geq 4.0 m Radius of Curvature
Operating Temperature	-60 to 85 $^{\circ}\text{C}$
Proof Test Level (245 coat)	\geq 100 kpsi (0.7 GN/m ²)
Fiber Length	100 m
Jacket	\varnothing 900 μm Hytrel

Tabla 2.1 Especificaciones geométricas y mecánicas de la fibra monomodo modelo SMF-28 [31].

Optical	
Numerical Aperture (nominal)	0.14
Attenuation*	\leq 0.32 dB/km @ 1310 nm \leq 0.32 dB/km @ 1383 nm** \leq 0.21 dB/km @ 1490 nm \leq 0.18 dB/km @ 1550 nm \leq 0.20 dB/km @ 1625 nm
Operating Wavelength	1260 - 1625 nm
Mode Field Diameter	9.2 \pm 0.4 μm @ 1310 nm 10.4 \pm 0.5 μm @ 1550 nm
Dispersion	\leq 18.0 ps/(nm·km) @ 1550 nm \leq 22.0 ps/(nm·km) @ 1625 nm
Polarization Mode Dispersion, Link Design Value	\leq 0.04 ps//km
Polarization Mode Dispersion, Maximum Individual Fiber	\leq 0.1 ps//km
Bend Loss for 100 Turns on 25 mm Mandrel	\leq 0.01 dB @ 1550 nm

Tabla 2.2 Especificaciones ópticas de la fibra monomodo modelo SMF-28 [31].

Fusionadora de fibra óptica modelo A-80S COMPTYCO

La fusionadora o empalmadora de fibra óptica A-80S es una máquina especializada de alto rendimiento que se utilizó para crear empalmes de fibra óptica, el modelo que se tiene en el laboratorio se muestra en la **Figura 2.2**. Este proceso, conocido como empalme, consiste en fundir los revestimientos de dos fibras, mediante la aplicación de una fuente calorífica, producida por dos electrodos que generan un arco eléctrico, cuando se les aplica una fuente de alta tensión, de 4000 a 5000 voltios con corriente controlada [32].



Figura 2.2 Fusionadora de fibra óptica modelo A-80S COMPTYCO.

A continuación, se presentan las principales características de la empalmadora modelo A-80S COMPTCO:

Fibras compatibles	SM (G.652&G.657), MM(G.651), DS(G.653), NZDS(G.655)
Pérdida promedio real de empalme	0,02dB (SM), 0,01dB (MM), 0,04dB (DS/NZDS)
Pérdida de retorno	60dB o mayor
Tiempo de empalme	9 segundos
Duración media horneado	26 segundos(el tiempo es configurable y la temperatura ajustable)
Alineación de la fibra	Alineación precisa, alineación por núcleo, alineación por revestimiento
Diámetro de fibra	diámetro de revestimiento 80-150 μm , diámetro de la capa de recubrimiento 100 -1000 μm
longitud de corte	Capa de recubrimiento de 250 μm : 8-16 mm capa 250 - 1000 μm : 16 mm
Test de tensión	Estandar 2N (opcional)
Soporte de la fibra	Abrazadera multifunción para fibra desnuda, pigtails, jumpers; abrazadera intercambiable para SC y otros conectores de fibra óptica y cable FTTH
Factor de amplificación	400 veces (Eje X y Eje Y)
Tubo termoretráctil	60 mm, 40mm y series mini
Pantalla	5 pulgadas TFT Color LCD reversible
Interface	USB para descarga de datos y actualización del software
Modos de empalme	17 configuraciones
Modos de calentamiento	9 configuraciones
Almacenamiento de pérdida de empalme	Se almacenan en el almacenamiento los últimos 5000 resultados de empalme
Batería	Admite empalmes y horneados continuos por no menos de 200 veces
Fuente de alimentación	Incluye batería de litio de 11,8V Tiempo de carga menos de 3,5 horas Adaptador externo, entrada AC 100-240V50 / 60Hz, salida DC13,5V / 4.81A
Ahorro de energía	El 15% de la energía de la batería de litio se puede ahorrar con un uso típico
Ambiente de trabajo	Temperatura: -10 a 50 °C Humedad: <95 %RH Altitud: <5000 metros
Dimensiones	158 mm (largo) x 130 mm (ancho) x 156 mm (alto)
Peso	1,77 Kg (sin batería) 2,14 Kg (con batería)

Tabla 2.3 Especificaciones de la fusionadora A-80S COMPTCO [32].

Cortadora de fibra modelo FC-6S

La cortadora de fibra FC-6S es una cortadora de fibra óptica a presión, con un proceso de corte de dos pasos, el principio de funcionamiento consta de los siguientes pasos:

- a) Se pela y se limpia la fibra de cualquier suciedad o mota de polvo.
- b) Se coloca la fibra de manera cuidadosa en la cortadora para poder pasar la cuchilla adiamantada.
- c) Sobre la fibra se aplica una fuerza controlada y medida que rompe la fibra precisamente en el lugar del corte [33].

A continuación, se presentan las especificaciones de la cortadora de fibra modelo FC-6S y en la **Figura 2.3** una fotografía del equipo.



Figura 2.3 Cortadora de fibra FC-6S.

Fibras aplicadas	Fibra singular estándar
Diámetro de recubrimiento	250 - 900 μm
Diámetro de fibras	125 μm
Longitud de fibra pelada	9 mm - 16 mm (fibras singulares con recubrimiento de 0,25 mm) 10 mm - 16 mm (fibras singulares con recubrimiento 0,9 mm)
Angulo de corte promedio	0,5 * fibras singulares
Tiempo de vida útil de cuchilla	36,000 operaciones
Dimensiones	63 x 65 x 63 mm
Peso	430 g (sin bandeja para residuos) 475 g (con bandeja para residuos)

Tabla 2.4 Datos técnicos cortadora de fibra FC-6S [33].

Fuente de luz modelo DH-2000-BAL

La fuente de luz utilizada que se muestra en la **Figura 2.4** produce un espectro uniforme desde el UV hasta el NIR usando una combinación de lámparas de deuterio y halógeno que es ideal para medir múltiples características en diferentes regiones espectrales [34].



Figura 2.4 Fuente de luz Deuterio-Halógeno modelo DH-2000-BAL.

Rango de onda:	210 nm - 2,5 μ m
Fuente:	Deuterio y tungsteno halógeno
Potencia nominal de la bombilla:	25 W (deuterio) 20 W (halógeno de tungsteno)
Potencia de salida típica:	194 μ W (bombilla de deuterio) 615 μ W (bombilla de tungsteno)
Vida útil de la fuente:	1000 horas
Estabilidad de la salida de la fuente de luz:	$\leq 0,1$ %/hora a 254 nm (deuterio) $\leq 0,1$ %/hora a 700 nm (halógeno de tungsteno)
Tiempo de calentamiento:	25 minutos

Tabla 2.5 Datos técnicos de la Fuente de luz DH-2000-BAL [34].

Espectrómetro modelo NIR-512

El espectrómetro de fibra óptica en miniatura modelo NIR512 (**Figura 2.5**) es un espectrómetro plug-and-play de tamaño reducido para aplicaciones que requieren sensibilidad en la región del infrarrojo cercano, como caracterización de longitud de onda láser sintonizable, análisis de humedad y espectroscopia NIR general. Efectivo en el rango de longitud de onda de 0,9 a 1,7 μm y proporciona una resolución espectral de características de alto rendimiento [35].



Figura 2.5 Espectrómetro modelo NIR-512.

2.3 Cálculo teórico para el diseño geométrico de las FOA

Para obtener microestructuras de diferentes anchos de cintura, se determinaron y asignaron algunos parámetros fijos de la **Ecuación 3** que se vio en el capítulo anterior.

Donde se mantuvo una longitud de estiramiento Z en 10 mm, así, al conocer el diámetro inicial ρ_0 de la fibra ($125\mu\text{m}$) y el diámetro final ρ que deseábamos obtener de cada *taper*, solo fue modificado el valor de la longitud de oscilación del mechero L_0 , que fue variando de 3 a 24 mm.

En la gráfica de la **Figura 2.6** podemos observar los diámetros de cintura que obtendremos si mantenemos fijo el parámetro de longitud de estiramiento Z en 10 mm.

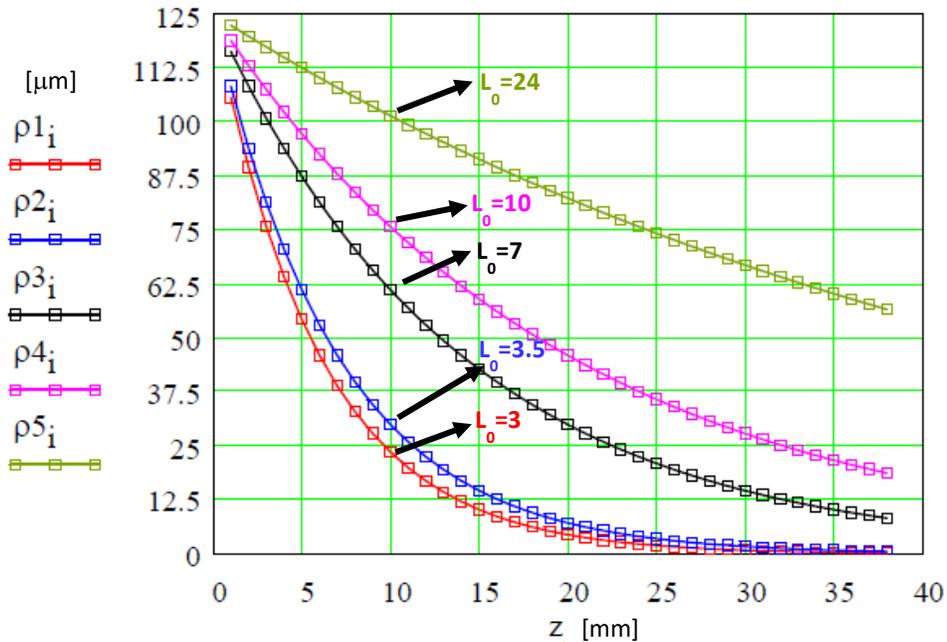


Figura 2.6 Gráfica diámetro final *taper* vs longitud de estiramiento.

A continuación, se presenta una tabla con los valores que se determinaron para el diseño y fabricación de las microestructuras, particularmente el ancho de cintura:

Diámetro inicial de la fibra: ρ_0 [μm]	Distancia de estiramiento: z [mm]	Distancia de oscilación del mechero: L_0 [mm]	Diámetro final de la fibra: ρ [μm]
125	10	24	100
125	10	10	75
125	10	7	60
125	10	3.5	30
125	10	3	25

Tabla 2.6 Datos introducidos al software que controla el proceso de calentamiento-estirado para la fabricación de los *tapers*.

2.4. Metodología para la fabricación de las microestructuras de fibra óptica

2.4.1 Preparación inicial de la fibra óptica

Para la fabricación de los *tapers* es necesario hacer un empalme de fibras y así obtener una zona sin recubrimiento para poder estirla en el sistema de calentamiento estirado por mechero.

Los pasos a seguir para hacer un empalme de fibra son los siguientes:

- a) Se cortan dos tramos de fibra óptica SMF-28 de aproximadamente 30 cm de largo.
- b) Se retira toda la cubierta de la fibra hasta llegar al revestimiento o cladding a lo largo de aproximadamente 3 cm.
- c) Se limpia la fibra con la ayuda de alcohol isopropílico para eliminar cualquier resto de suciedad y pelusa en la fibra.
- d) Se realiza el proceso de corte con la cortadora de presión a una longitud de aproximadamente 1 cm.
- e) Se coloca la fibra óptica previamente cortada en la zona donde se encuentra los electrodos de la empalmadora, dejando la fibra en la zona v, evitando que la punta se sobrepase la altura de los electrodos y teniendo particular cuidado en no fracturar o contaminar la fibra.
- f) Se colocan ambas fibras en la fusionadora, a fin de realizar el empalme.

Después de realizar el empalme se obtienen aproximadamente 4 cm de fibra desnuda que nos sirvió para la fabricación del *taper*.

2.4.2 Fabricación de las microestructuras (*tapers*)

Con los parámetros calculados previamente y mostrados en la **Tabla 2.6** se procedió con lo siguiente:

Para la fabricación de las microestructuras se introdujeron los parámetros al software que controla el sistema electromecánico de estiramiento como se muestra en la **Figura 2.7**. Enseguida, se colocó la fibra óptica previamente preparada al sistema de calentamiento estirado. Previo al colocar la fibra, el sistema fue calibrado posicionando los motores a pasos y el mechero de forma manual de manera que la zona descubierta de la fibra este colocada en medio del mechero como se muestra a continuación en la **Figura 2.7**. El procedimiento fue repetido para cada diferente diseño de microestructura óptica considerado en la **Tabla 2.6**.



Figura 2.7 Fibra óptica colocada en el sistema de calentamiento estirado.

2.5 Metodología para la caracterización geométrica y espectral de las microestructuras

2.5.1 Caracterización geométrica de las microestructuras

Posteriormente a la fabricación de los *tapers*, se tomaron imágenes con el microscopio óptico para determinar el diámetro de las fibras a lo largo de toda la zona adelgazada. En las imágenes se observan tanto la zona de transición como la zona de la cintura de las FOA obtenidas.

Antes de capturar las imágenes, se procedió con la calibración del microscopio con la ayuda de la hoja de calibración que viene incluida en el equipo, como podemos observar en la **Figura 2.8**.



Figura 2.8 Microscopio óptico y hoja de calibración.

La **Figura 2.9** muestra la imagen de una fibra óptica modelo SMF-28 (desnuda) para un diámetro de $\sim 124.9 \mu\text{m}$ que es el valor esperado para una fibra de este tipo es decir $125 \mu\text{m}$, lo cual indica que la calibración del microscopio se hizo correctamente. Después de la calibración del microscopio se capturaron las fotografías de los diferentes diseños de

tapers fabricados. Por lo anterior, se realizaron 3 mediciones por cada 2.5 mm, que es lo que nos permitía el microscopio capturar por cada imagen, con estos datos se procesaron y graficaron las estructuras geométricas de cada *taper*.



Figura 2.9 Fotografía de una fibra óptica modelo SMF-28, obtenida durante el proceso de calibración del microscopio óptico.

2.5.2 Caracterización espectral de las microestructuras

Para la obtención de los espectros de transmisión de las microestructuras se implementó el arreglo experimental mostrado en la **Figura 2.10**.

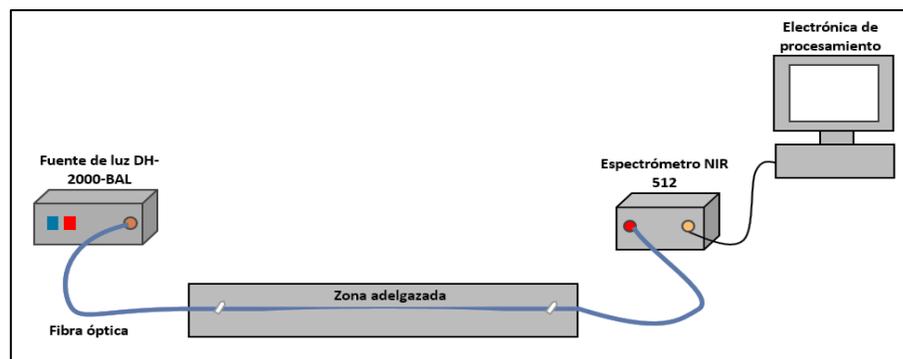


Figura 2.10 Diagrama del arreglo experimental para la medición de espectros.

Antes de conectar el *taper* a la fuente y al espectrómetro fue necesario empalmar conectores a los extremos del *taper*. El arreglo experimental tiene un *taper* conectado a una fuente de luz de deuterio-halógeno que emite en un rango espectral del infrarrojo cercano, mientras el *taper* está fijado en una placa de acrílico para tener un mejor manejo del mismo. El otro extremo del *taper* está conectado al espectrómetro modelo *NIR-512* para realizar las mediciones del espectro en la zona de infrarrojo cercano. Las mediciones de los espectros se hicieron con las luces apagadas para que el ruido ambiental sea lo mínimo posible. En la **Figura 2.11** se muestra una fotografía del arreglo experimental implementado en el laboratorio.

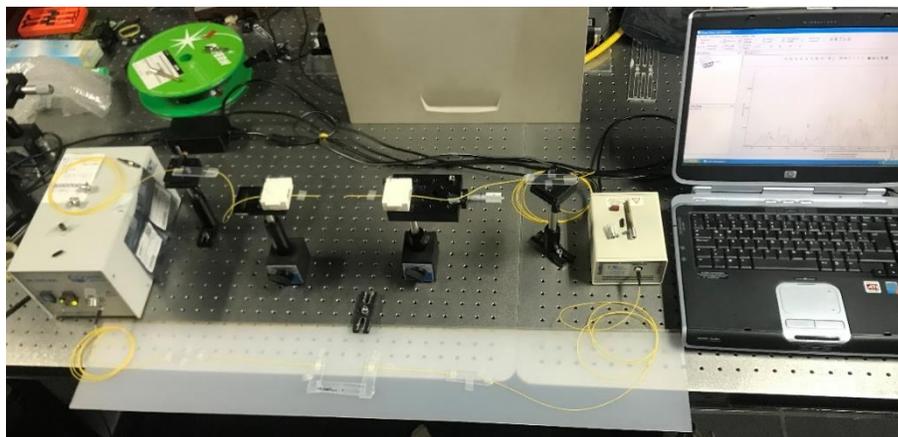


Figura 2.11 Fotografía del arreglo experimental para la medición de espectros.

CAPITULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Resumen

De acuerdo al procedimiento presentado en el capítulo anterior y siguiendo la metodología propuesta, se presentan: tablas, gráficas y fotografías de los resultados obtenidos de las microestructuras fabricadas, así como sus dimensiones, características geométricas y espectrales.

3.2 Geometría de los *tapers*

Prosiguiendo con la metodología para la fabricación de los *tapers*, la **Tabla 3.1** muestra el diámetro de cintura final medido de las diferentes FOA que se fabricaron, así como los parámetros que se utilizaron en el sistema para su fabricación:

Nº de <i>taper</i>	Diámetro inicial de la fibra: ρ_0 [μm]	Distancia de estiramiento: z [mm]	Distancia de oscilación del mechero: L_0 [mm]	Diámetro final de la fibra: ρ [μm]
1	125	10	24	101
2	125	10	24	99
3	125	10	10	75
4	125	10	10	76
5	125	10	7	58
6	125	10	7	59
7	125	10	3.5	31
8	125	10	3.5	31
9	125	10	3	24
10	125	10	3	24

Tabla 3.1 Diámetros de cintura obtenidos de las microestructuras

En la fabricación de los *tapers* se obtuvieron 2 por cada diámetro de cintura deseado, lo que nos dio un total de 10 *tapers*. Primero, se registró la geometría de los *tapers* por medio de fotografías sucesivas en el microscopio óptico. Segundo, se elaboró una tabla con las principales características de los *tapers* fabricados para los diferentes diámetros de cintura obtenidos. Tercero, se muestran las gráficas de la geometría de las diferentes microestructuras fabricadas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los *tapers* No. 1, 4, 6, 7 y 9.

Taper No.1 diámetro de cintura 101 μ m



Figura 3.1 Zona sin adelgazar izquierda, *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.

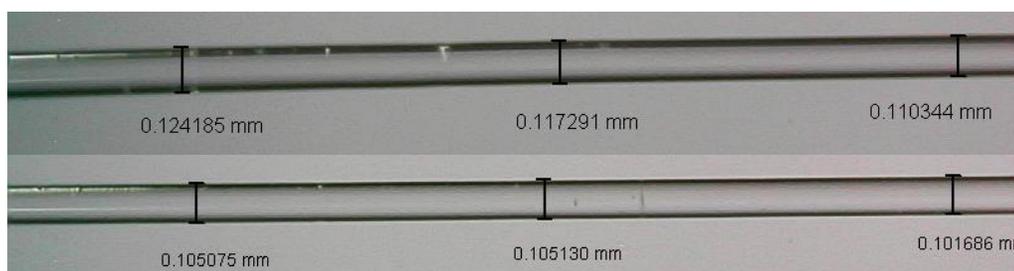


Figura 3.2 Zona de transición izquierda, *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.

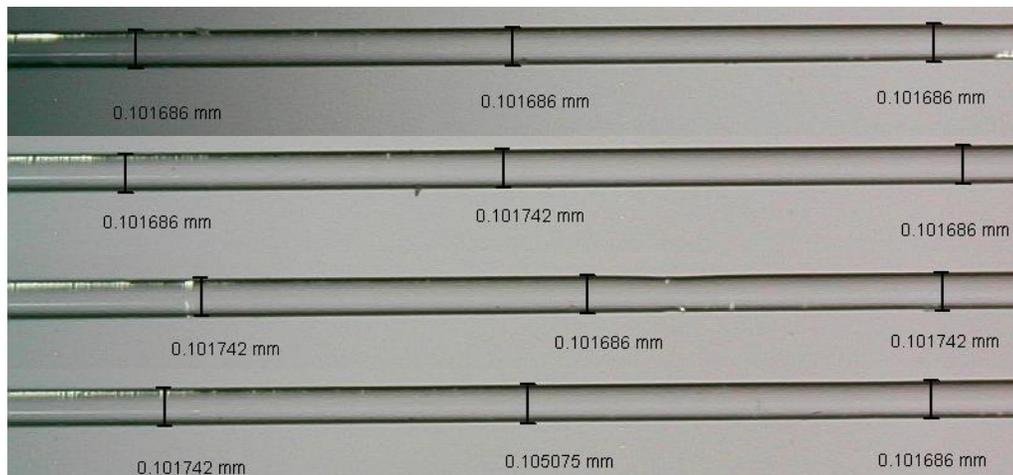


Figura 3.3 Cintura del *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.



Figura 3.4 Zona de transición derecha, *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.



Figura 3.5 Zona sin adelgazar derecha, *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.



Figura 3.6 Fotografía del *taper* completo No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.



Figura 3.7 Fotografía con microscopio óptico de la zona de transición y cintura del *taper* No. 1, $\rho = 101\mu\text{m}$.

Longitud de la geometría del taper	Taper No. 1 $\rho=101\mu\text{m}$	Taper No. 2 $\rho=99\mu\text{m}$
Longitud zona de transición izquierda z_0	5 mm	5 mm
Longitud zona de transición derecha z_0	5 mm	5 mm
Longitud cintura del taper l_w	47.5 mm	40 mm
Longitud total de taper	52.5 mm	50 mm

Tabla 3.2 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del taper No. 1, $\rho=101\mu\text{m}$ y taper No. 2, $\rho=99\mu\text{m}$.

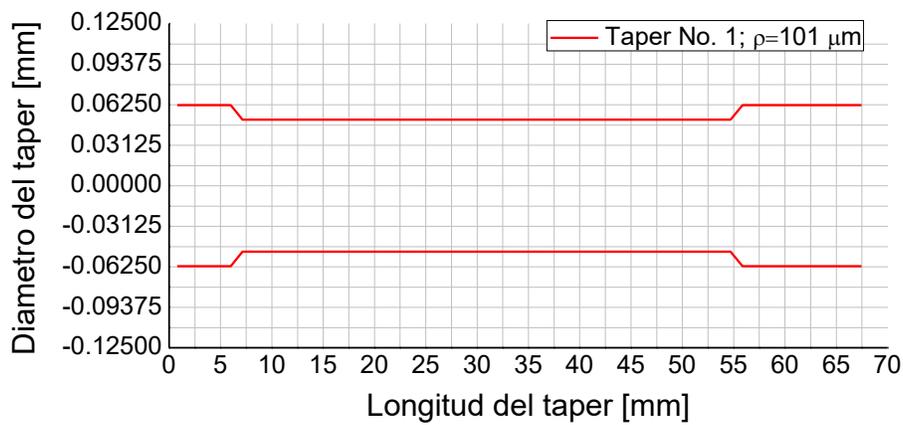


Figura 3.8 Grafica geometría del taper No. 1, $\rho=101\mu\text{m}$.

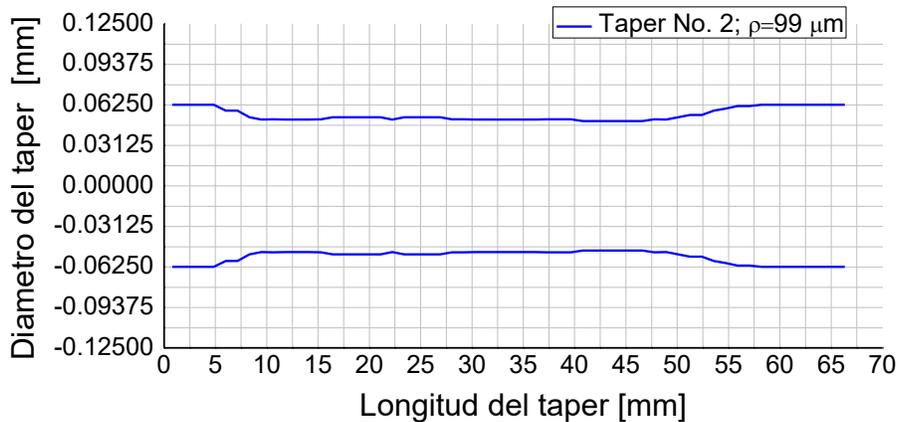


Figura 3.9 Grafica geometría del taper No. 2, $\rho=99\mu\text{m}$.

Taper No. 4 diámetro de cintura 76 μ m.



Figura 3.10 Zona sin adelgazar izquierda del *taper* No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$.



Figura 3.11 Zona de transición izquierda del *taper* No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$.

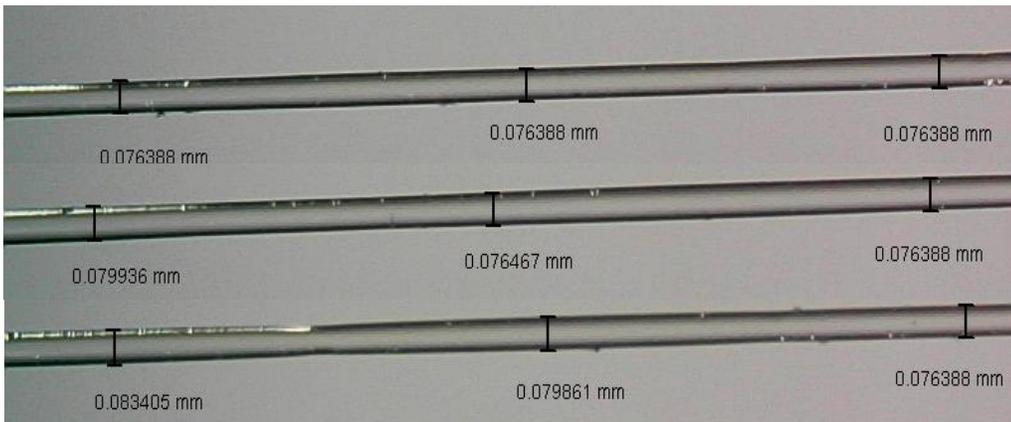


Figura 3.12 Cintura del *taper* No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$.



Figura 3.13 Zona de transición derecha del *taper* No. 4 $\rho = 76\mu\text{m}$.



Figura 3.14 Zona sin adelgazar derecha del *taper* No. 4 $\rho = 76\mu\text{m}$.



Figura 3.15 Fotografía del *taper* completo No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$.



Figura 3.16 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del *taper* No. 4, $\rho = 76\mu\text{m}$.

<i>Longitud de la geometría del taper</i>	<i>Taper No. 3 $\rho=75\mu\text{m}$</i>	<i>Taper No. 4 $\rho=76\mu\text{m}$</i>
<i>Longitud zona de transición izquierda z_0</i>	7.5 mm	10 mm
<i>Longitud zona de transición derecha z_0</i>	7.5 mm	10 mm
<i>Longitud cintura del taper l_w</i>	12.5 mm	7.5 mm
<i>Longitud total de taper</i>	27.5 mm	27.5 mm

Tabla 3.3 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del *taper* No. 3, $\rho=75\mu\text{m}$ y *taper* No. 4, $\rho=76\mu\text{m}$

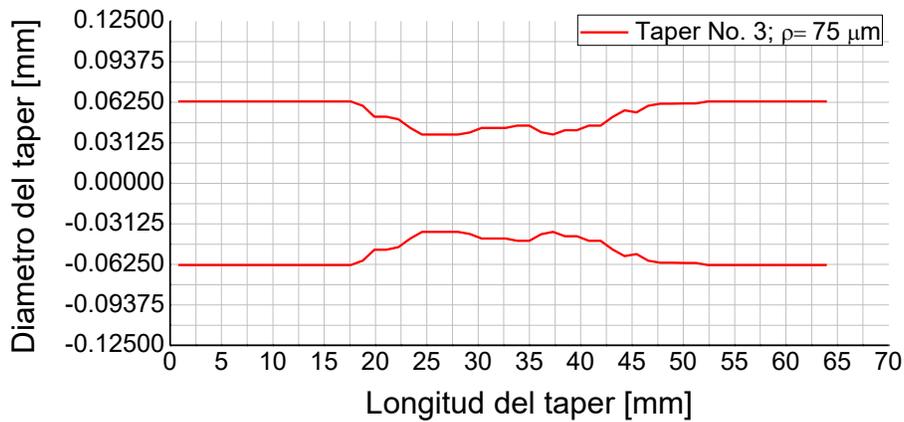


Figura 3.17 Gráfica geometría del *taper* No. 3, $\rho=75\mu\text{m}$.

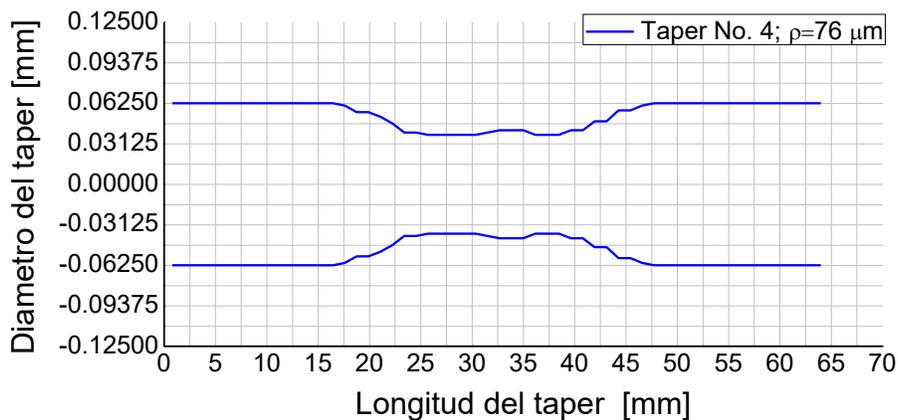


Figura 3.18 Gráfica geometría del *taper* No. 4, $\rho=76\mu\text{m}$.

Taper No. 6 diámetro de cintura 59 μ m

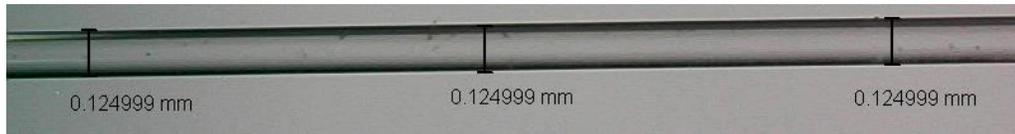


Figura 3.19 Zona sin adelgazar izquierda del *taper* No 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.

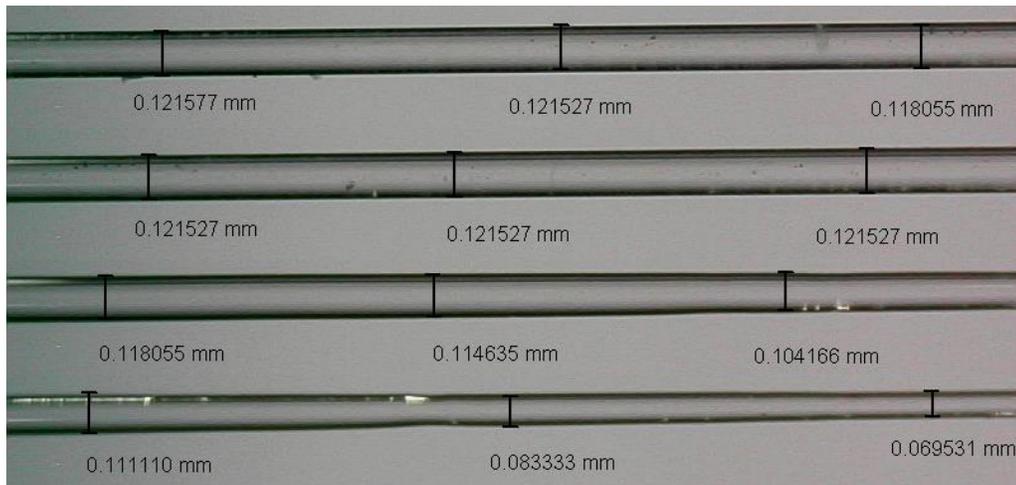


Figura 3.20 Zona de transición izquierda del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.



Figura 3.21 Cintura del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.

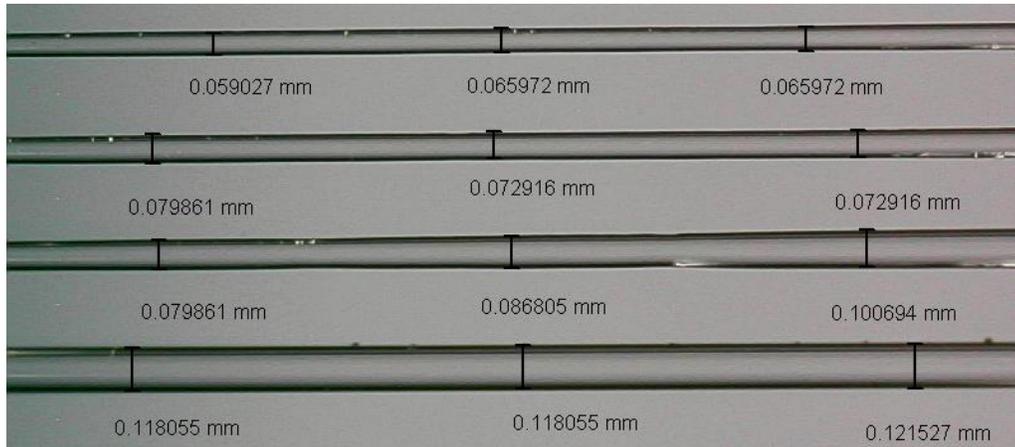


Figura 3.22 Zona de transición derecha del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.

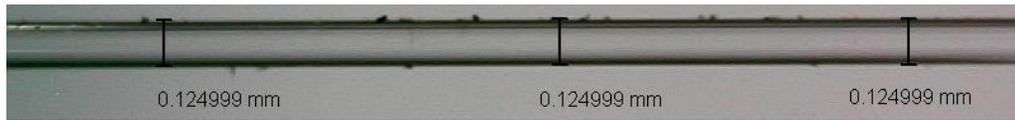


Figura 3.23 Zona sin adelgazar derecha del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$



Figura 3.24 Fotografía del *taper* completo No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.



Figura 3.25 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.

<i>Longitud de la geometría del taper</i>	<i>Taper No. 5 $\rho = 58\mu\text{m}$</i>	<i>Taper No. 6 $\rho = 59\mu\text{m}$</i>
<i>Longitud zona de transición izquierda z_0</i>	7.5 mm	10 mm
<i>Longitud zona de transición derecha z_0</i>	7.5 mm	10 mm
<i>Longitud cintura del taper l_w</i>	7.5 mm	5 mm
<i>Longitud total de taper</i>	22.5 mm	25

Tabla 3.4 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del *taper* No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$ y taper No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$

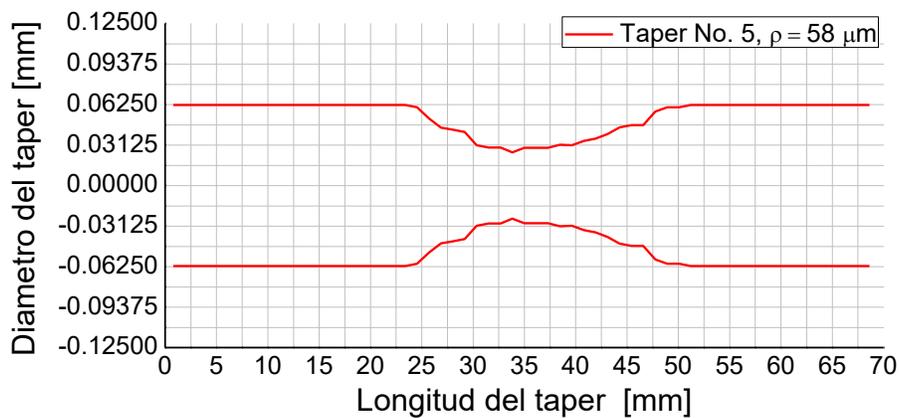


Figura 3.26 Gráfica geometría del *taper* No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$.

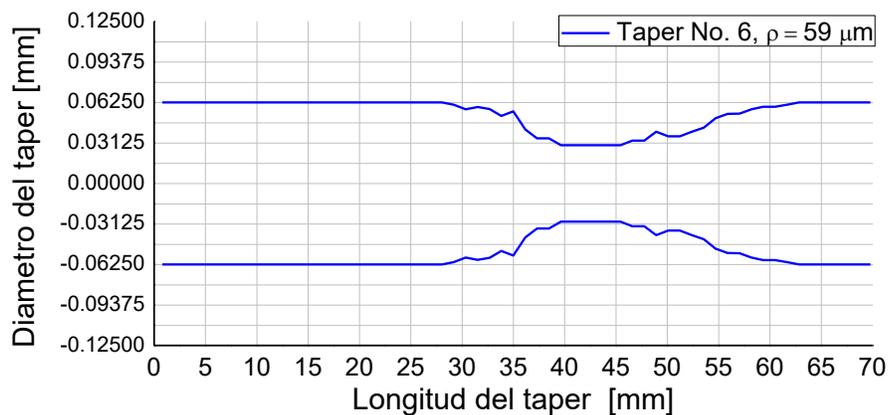


Figura 3.27 Gráfica geometría del *taper* No. 6, $\rho = 59\mu\text{m}$.

Taper No. 7 diámetro de cintura 31 μ m



Figura 3.28 Zona sin adelgazar izquierda del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.

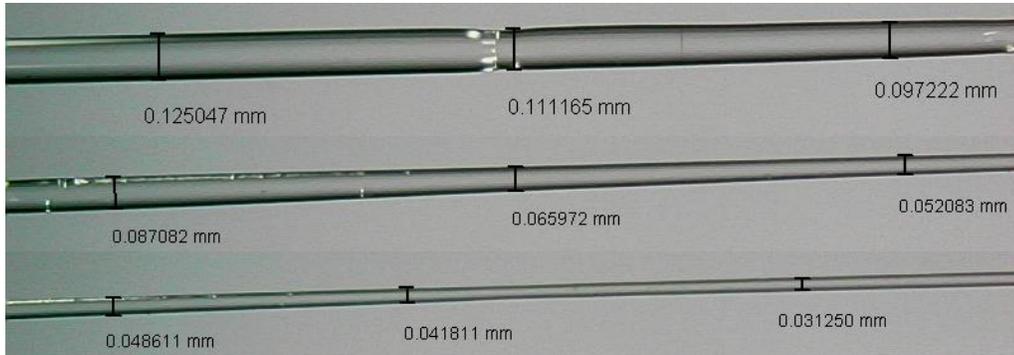


Figura 3.29 Zona de transición izquierda del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.

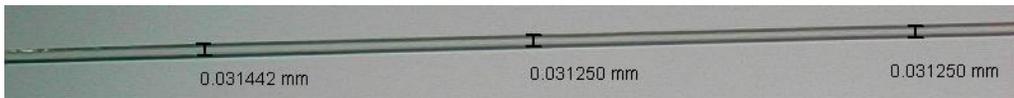


Figura 3.30 Cintura del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.

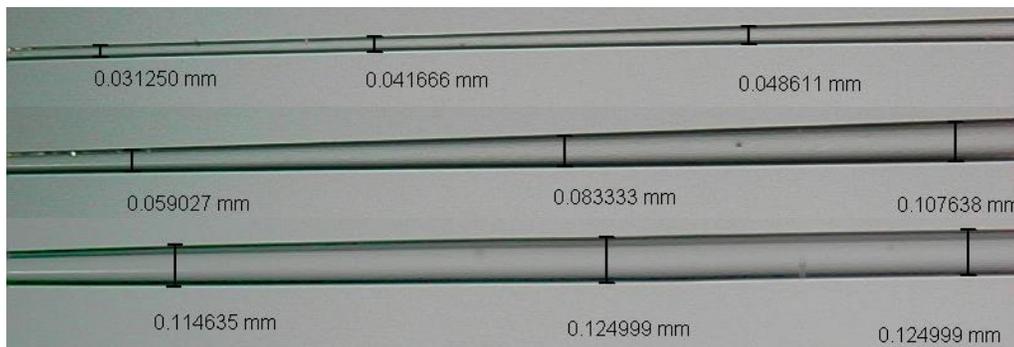


Figura 3.31 Zona de transición derecha del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.



Figura 3.32 Zona sin adelgazar derecha del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.



Figura 3.33 Fotografía del *taper* completo No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.

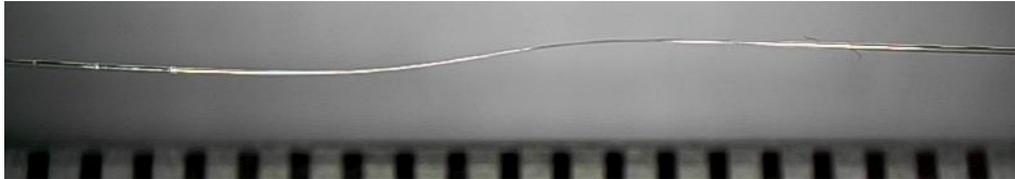


Figura 3.34 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$.

<i>Longitud de la geometría del taper</i>	<i>Taper No. 7 $\rho = 31\mu\text{m}$</i>	<i>Taper No. 8 $\rho = 31\mu\text{m}$</i>
<i>Longitud zona de transición izquierda z_0</i>	7.5 mm	5 mm
<i>Longitud zona de transición derecha z_0</i>	7.5 mm	5 mm
<i>Longitud cintura del taper l_w</i>	2.5 mm	7.5 mm
<i>Longitud total de taper</i>	17.5 mm	17.5 mm

Tabla 3.5 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del *taper* No. 7, $\rho = 31\mu\text{m}$ y taper No. 8, $\rho = 31\mu\text{m}$.

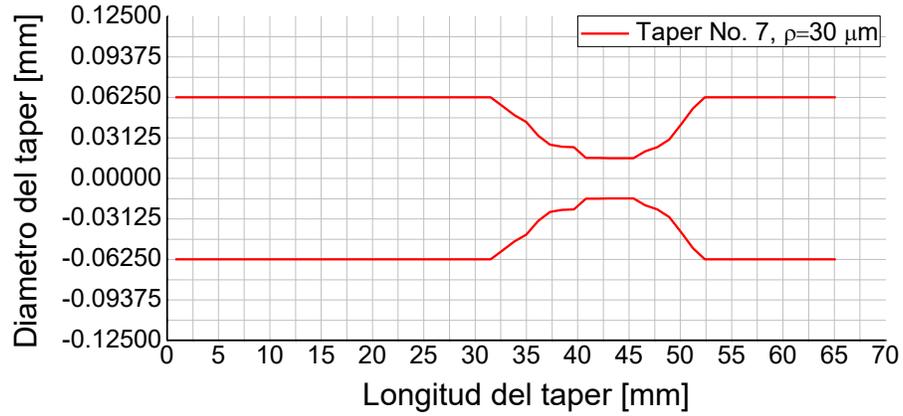


Figura 3.35 Grafica geometría del *taper* No. 7, $\rho=31 \mu\text{m}$.

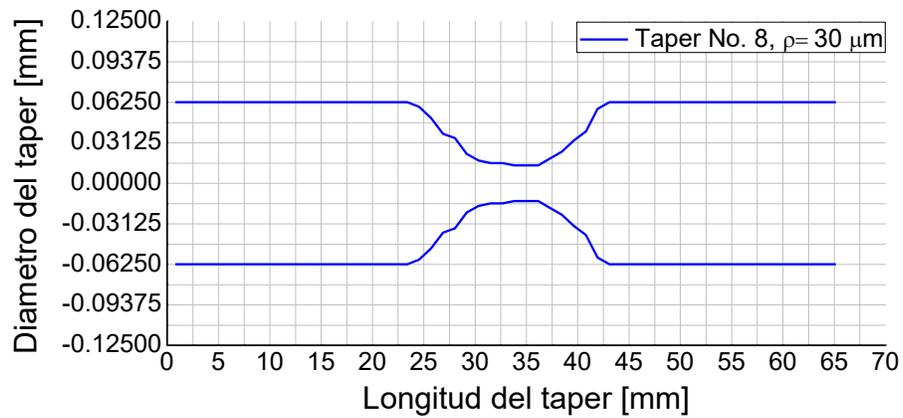


Figura 3.36 Grafica geometría del *taper* No. 8, $\rho=31 \mu\text{m}$.

Taper No. 9 diámetro de cintura 24 μ m



Figura 3.37 Zona sin adelgazar izquierda del taper No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$.



Figura 3.38 Zona de transición izquierda del taper No. 9 $\rho = 24\mu\text{m}$.

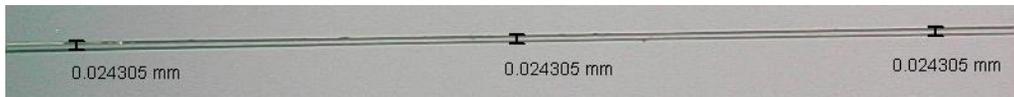


Figura 3.39 Cintura del taper No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$.



Figura 3.40 Zona de transición derecha del taper No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$.



Figura 3.41 Zona sin adelgazar derecha del taper No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$.

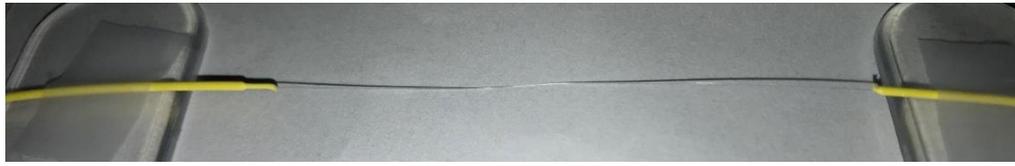


Figura 3.42 Fotografía del *taper* completo No. 9, $\rho = 24 \mu\text{m}$.



Figura 3.43 Fotografía con microscopio óptico de la zona adiabática y cintura del *taper* No. 9, $\rho = 24 \mu\text{m}$.

<i>Longitud de la geometría del taper</i>	<i>Taper No. 9 $\rho = 24 \mu\text{m}$</i>	<i>Taper No. 10 $\rho = 24 \mu\text{m}$</i>
<i>Longitud zona de transición izquierda z_0</i>	5 mm	7.5 mm
<i>Longitud zona de transición derecha z_0</i>	7.5 mm	7.5 mm
<i>Longitud cintura del taper l_w</i>	2.5 mm	5 mm
<i>Longitud total de taper</i>	15 mm	20 mm

Tabla 3.6 Longitudes obtenidas de las diferentes regiones del *taper* No. 9, $\rho = 24 \mu\text{m}$ y *taper* No. 10, $\rho = 24 \mu\text{m}$.

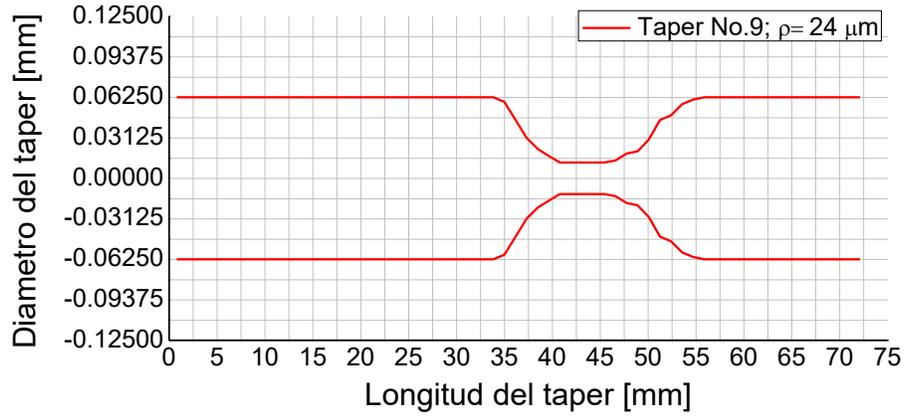


Figura 3.42 Grafica geometría del *taper* No. 9, $\rho = 24\mu\text{m}$.

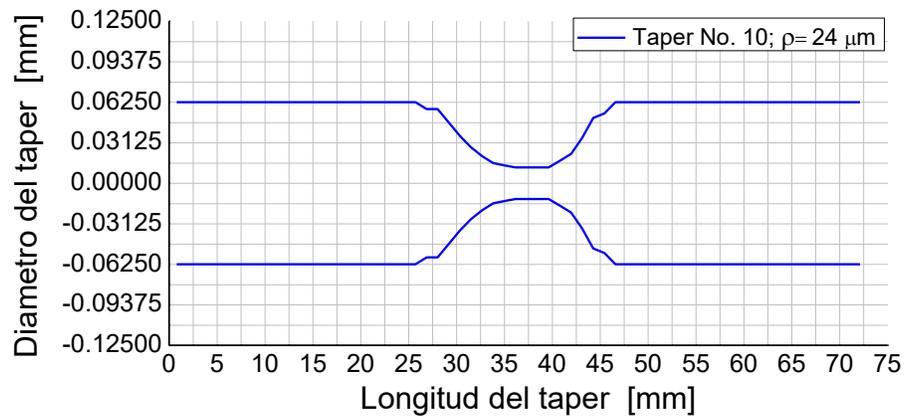


Figura 3.43 Grafica geometría del *taper* No. 10, $\rho = 24\mu\text{m}$.

3.3 Respuesta espectral de las microestructuras ópticas

La respuesta espectral de los *tapers* fue medida en el intervalo de los 900 nm a 1700 nm de longitud de onda utilizando el arreglo experimental de la **Figura 2.11**. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los espectros ópticos de cada par de *tapers*, comparados con la referencia del espectro de la fuente de luz inyectado a través de una fibra óptica sin modificar.

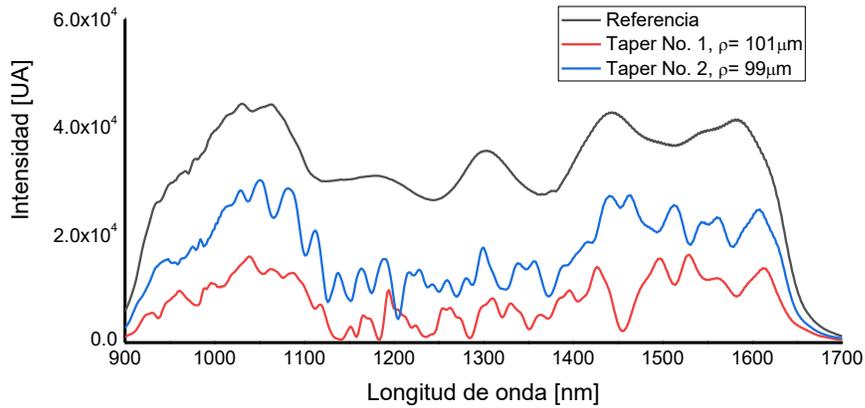


Figura 3.46 Respuesta espectral de los *tapers* No. 1 $\rho = 101 \mu\text{m}$ y No. 2 $\rho = 99 \mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 25\%$.

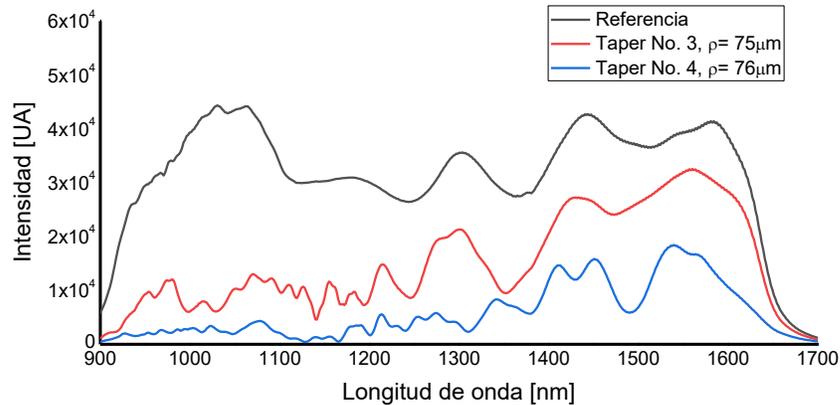


Figura 3.47 Respuesta espectral de los *tapers* No. 3 $\rho = 75 \mu\text{m}$ y No. 4 $\rho = 76 \mu\text{m}$, pérdida $\alpha \cong 25\%$.

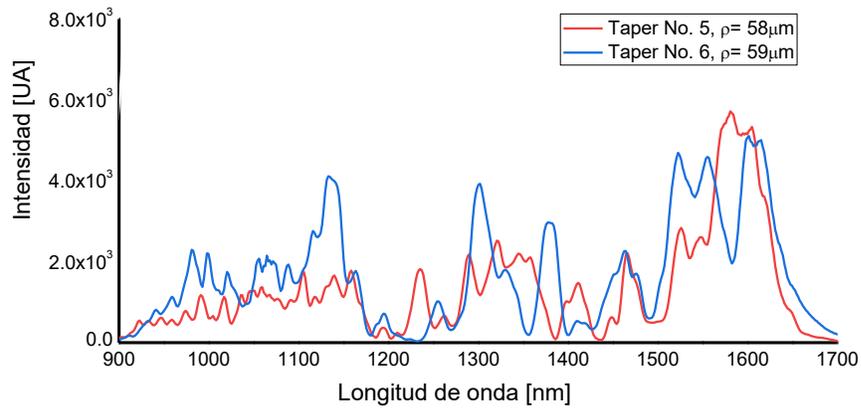


Figura 3.48. Respuesta espectral de los *tapers* No. 5, $\rho = 58 \mu\text{m}$ y No. 6, $\rho = 59 \mu\text{m}$, perdida $\alpha \cong 85\%$.

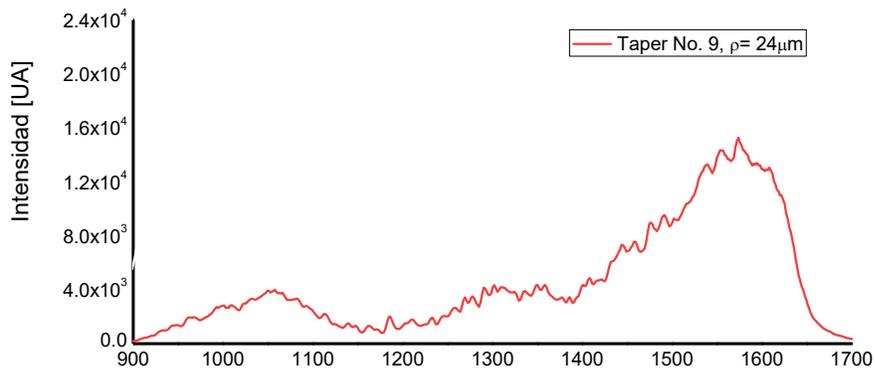


Figura 3.49. Respuesta espectral del *taper* No. 7, $\rho = 31 \mu\text{m}$, perdida $\alpha \cong 92.5\%$.

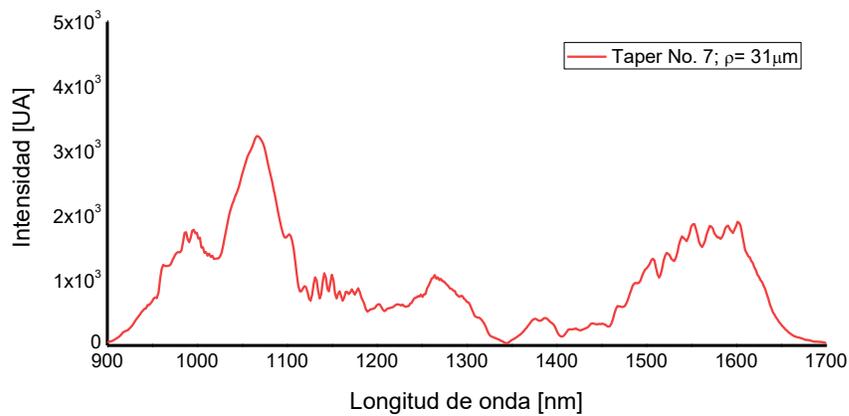


Figura 3.50. Respuesta espectral del *taper* No. 9, $\rho = 24 \mu\text{m}$, perdida $\alpha \cong 60\%$..

3.4. Respuesta espectral de las microestructuras al inducir una perturbación

Para llevar a cabo la medición de la respuesta espectral de los *tapers* (ver Fig. 2.11), las diferentes fibras ópticas adelgazadas fabricadas fueron fijadas en ambos extremos y sujetadas en una montura especial para su fácil manipulación. Posteriormente, para observar la sensibilidad de estas microestructuras ópticas, se indujo una perturbación en el *taper* y con ello lograr excitar diferentes modos de propagación los cuales fueron registrados en los espectros de transmisión.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de inducir una perturbación, a las microestructuras ópticas fabricadas.

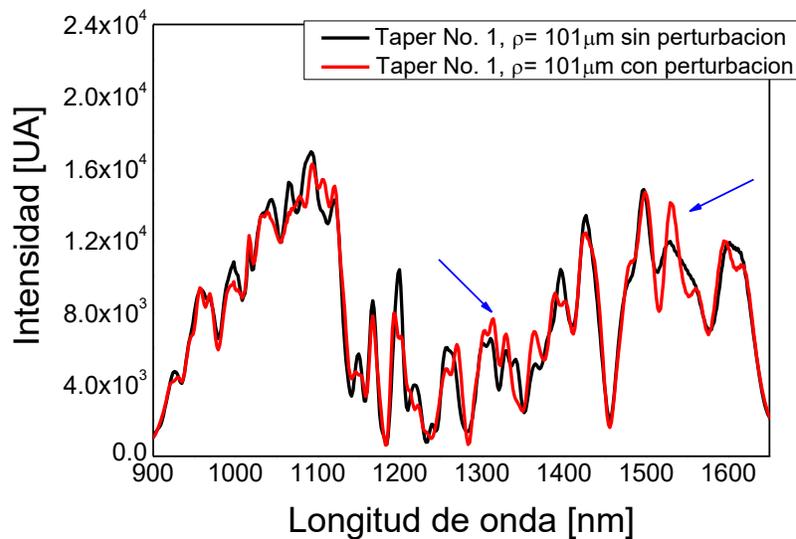


Figura 3.51 Respuesta espectral del *taper* No. 1, $\rho = 101 \mu\text{m}$ al inducir una perturbación.

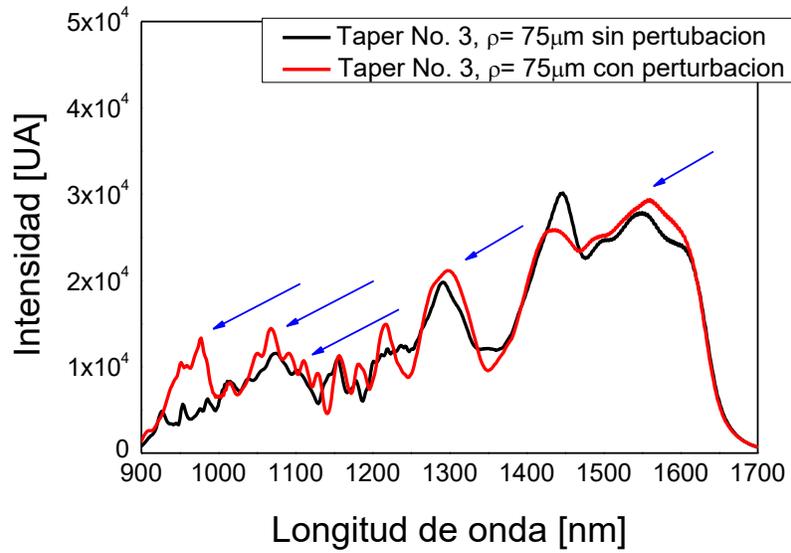


Figura 3.52 Respuesta espectral del *taper* No. 3, $\rho = 75\mu\text{m}$ al inducir una perturbación.

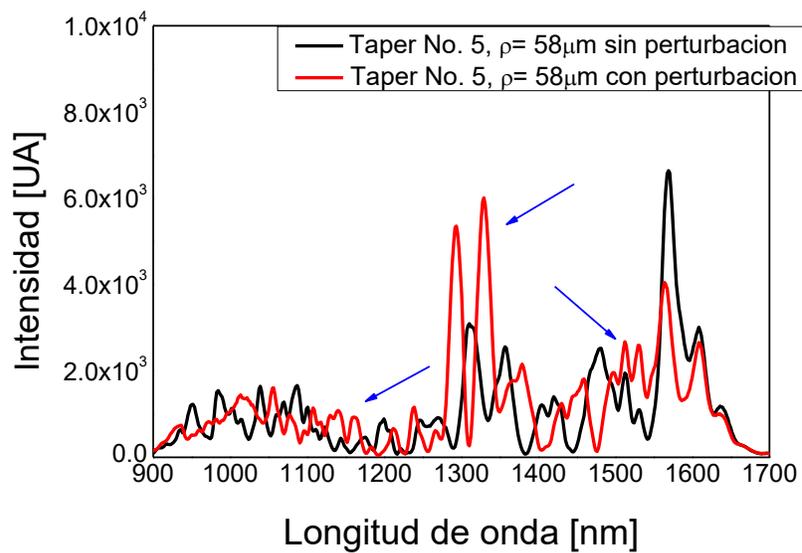


Figura 3.53 Respuesta espectral del *taper* No. 5, $\rho = 58\mu\text{m}$ al inducir una perturbación.

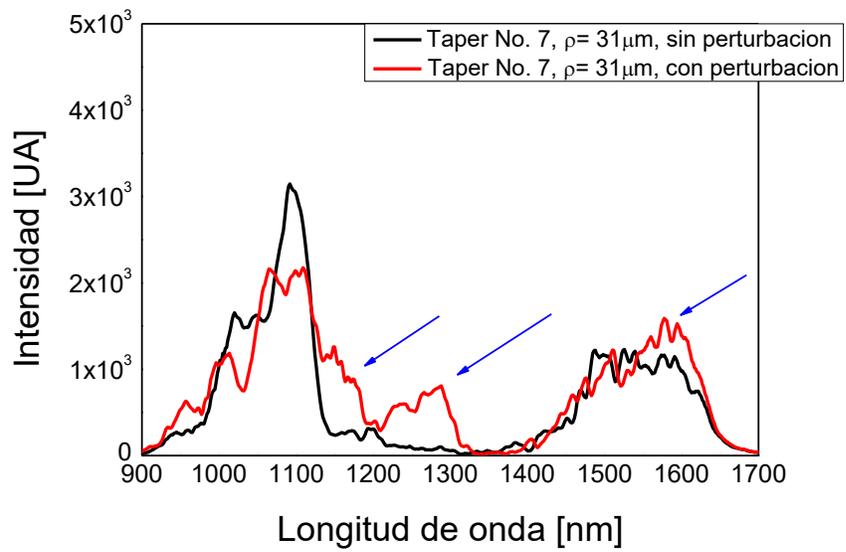


Figura 3.54 Respuesta espectral del *taper* No. 7, $\rho = 31 \mu\text{m}$ al inducir una perturbación.

3.5 Discusión de resultados.

- Con la técnica de calentamiento – estirado por mechero se comprobó que es un método de fabricación adecuado para la elaboración de *tapers* largos (52.5 mm) así como también *tapers* cortos (15 mm).
- De la geometría de las fibras ópticas adelgazadas podemos observar que para los *tapers* con un mayor diámetro de cintura (100 μm), también se tiene una mayor longitud de cintura (47.5 mm) con una zona adiabática muy corta (5 mm); mientras que para los *tapers* de un diámetro de cintura medio (76 y 59 μm), estos tienen una longitud de cintura muy corta 7.5 y 5 mm respectivamente, con una zona adiabática más larga 7.5 y 12.5 mm respectivamente.
- Para las fibras ópticas adelgazadas de diámetro pequeño (31 y 24 μm), su zona adiabática y su cintura, ambas son de una longitud corta, 7.5 y 2.5 mm respectivamente.
- De los resultados obtenidos podemos observar que a medida que la longitud de oscilación del mechero disminuye de 24 a 3 mm y la longitud de estiramiento se mantiene en 10 mm, el diámetro de cintura del *taper* también disminuye.
- También, podemos observar que a medida que el diámetro de cintura de los *tapers* disminuye, diferentes modos de propagación son excitados hacia la longitud de onda en el intervalo de 1550 nm a 1600 nm como se registró en las gráficas de los espectros de transmisión.

- De los 10 *tapers* fabricados, en 2 de ellos no fue posible medir su respuesta espectral, esto se debe a que en los *tapers* más delgados correspondientes a los de $31\mu\text{m}$ y $24\mu\text{m}$ la manipulación debía ser extremadamente cuidadosa, por lo que no se logró hacer la comparación de su respuesta espectral.
- Las microestructuras ópticas fueron perturbadas físicamente con un pequeño doblamiento y con ello observar su respuesta óptica. Para las fibras ópticas adelgazadas de $100\mu\text{m}$ y $75\mu\text{m}$ algunos modos son excitados y observados en todo el intervalo de la longitud de onda; mientras que para *tapers* de menor diámetro de cintura $30\mu\text{m}$ y $25\mu\text{m}$, los modos excitados se desplazan hacia longitudes de onda más cortas en la longitud de onda de los 1500 a 1600 nm, lo cual corresponde al régimen de operación unimodal de la fibra. Lo anterior conlleva a la aplicación de estas microestructuras como sensores ópticos.

Diversas configuraciones de sensores basados en fibras ópticas adelgazadas han sido reportadas a la fecha en la literatura para aplicaciones de sensado óptico de diferentes parámetros físicos, como: índice de refracción, concentración, curvatura, temperatura, etc.

En la siguiente tabla se presentan algunas de las aplicaciones de estas microestructuras tomando en consideración la técnica de fabricación y la perturbación física medida.

Técnica de fabricación	Parámetro físico a medir *	Referencia
Calentamiento – estirado	Índice de refracción	[36] J. Villatoro, <i>et al</i> “High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre”. <i>Electron. Lett.</i> ,(40), 106 – 107, 2004
C02	Curvatura	[37] Niu L, <i>et al</i> . “Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber” [J]. <i>Optics Communications</i> , 2014, 333:11-15.
Arco eléctrico	Índice de refracción	[38] Benye Li, <i>et al</i> “A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing”. <i>Opt Lasers Eng.</i> 50 (2012) 829-832.
Arco eléctrico	Temperatura	[39] Y.M.Raji a, <i>et al</i> “Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature”. <i>Optics & Laser Technology</i> 86(2016)8–13.
Ataque químico	Concentración	[40] Chen, X., <i>et al</i> , (2004). “Optical Chemsensors Utilizing Long-Period Fiber Gratings UV-Inscribed in D-Fiber With Enhanced Sensitivity Through Cladding Etching”. <i>IEEE Photonics Technology Letters</i> , 16(5), 1352–1354. doi:10.1109/lpt.2004.826148

***Áreas de aplicación:** Industria, biotecnología, alimentos, medio ambiente, robótica, etc.

Tabla 3.7 Bibliografía fibras ópticas adelgazadas fabricadas con diferentes técnicas y el parámetro físico que midieron.

De acuerdo a la **Tabla 3.7**, en la bibliografía se reportan diversas aplicaciones de las fibras ópticas estrechadas como sensor óptico. Las microestructuras ópticas fabricadas y reportadas en este trabajo de tesis, pueden ser aplicadas para desarrollar sensores de fibra óptica considerando para su aplicación *tapers* con longitudes largas del orden de 52 mm o mayores, así como, *tapers* cortos del orden de 15 mm o menores. La elección del tipo y características del taper dependerá de la aplicación para el sensado óptico.

CAPITULO 4: SUMARIO

- Las fibras ópticas estrechadas (*tapers*) de diámetro micrométrico tienen un gran potencial para aplicaciones en sensado óptico. El propósito de adelgazar la fibra es el de alterar de forma pasiva la luz que se propaga dentro de ella. Los sensores basados en fibra óptica adelgazada han atraído recientemente un interés considerable para el desarrollo de sensores fotónicos para medición de diferentes variables físicas.
- En este trabajo se realizó una revisión teórica de los conceptos básicos de fibras ópticas y fibras ópticas adelgazada (*tapers*). Además, de los principales métodos de fabricación de estas microestructuras, particularmente la técnica de fusión por calentamiento – estirado, los parámetros más importantes relacionados con la geometría de estas microestructuras ópticas y sus características.
- Se determinaron los parámetros para el diseño y fabricación de los *tapers* como: V_0 , V , Z y L_0 con estos se determinaron las dimensiones para cada diámetro de cintura deseado que en nuestro proyecto se propuso *tapers* de: 25 μm , 30 μm , 60 μm , 75 μm y 100 μm .
- Se fabricaron microestructuras ópticas, (*tapers* no adiabáticos) a través de la técnica de fusión por calentamiento – estirado, obteniendo diámetros de cintura de: 101 μm , 99 μm , 75 μm , 76 μm , 58 μm , 59 μm , 31 μm y 24 μm , obteniendo un total de 10 *tapers* de diferentes anchos de cintura.
- Posteriormente, se realizó un registro de la geometría de cada FOA fabricada, a través de un barrido de microscopio donde se fue capturando el diámetro de cintura a lo largo de la FOA, se procesaron los datos y se

graficaron los resultados, así como también, se registró en una tabla la longitud y principales características de cada región del *taper*.

- Se midió la respuesta espectral de cada microestructura utilizando un espectrofotómetro, en el rango de 900nm a 1700nm. Se graficaron los resultados y se observó que para *tapers* de mayor diámetro, una mayor cantidad de modos excitados a través de todo el espectro es observado; mientras que para *tapers* más cortos los modos excitados se desplazaron a la región de la longitud de onda de 1550 nm a 1600 nm.
- Las microestructuras de fibra óptica presentadas en este trabajo de tesis pueden ser utilizadas para el desarrollo de sensores fotónicos, considerando diferentes geometrías como los *tapers* largos y/o *tapers* cortos fabricados con la técnica de calentamiento - estirado. La aplicación de estas microestructuras ópticas utilizadas como sensores fotónicos impactan el área de la Industria, biotecnología, alimentos, medio ambiente, robótica, medicina, etc. como se mencionó en la **Tabla 3.7**.

REFERENCIAS

[1] C. M Garcia, R. A. Vazquez y J. A. Villanueva, (2013) *Sensores de fibra óptica y sus aplicaciones en el medio ambiente*. Espacio I+D Innovación más Desarrollo, 2 (3), 94-115. Doi: 10.31644/IMASD.3.2013.a06.

[2] J. Castellon-Urbe (2012). *Optical Fiber Sensors: An Overview*, Fiber Optic Sensors, Dr. Moh. Yasin (Ed.)

[3] M. A. Fuentes, (2012) "*Interferencia multimodal en fibras ópticas con núcleo líquido*" (Tesis de maestría). Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica, Tonantzintlan, Puebla.

[4] J. P. Clarkin, "*Tapered Fibers and Specialty Fiber Microcomponents*," in *Specialty Optical Fibers Handbook*, San Diego, Academic Press, 2007, p. 582.

[5] Ghahrizjani, R. T., Sadeghi, H., & Mazaheri, A. (2016). *A novel method for online monitoring engine oil quality based on tapered optical fiber sensor*. IEEE Sensors Journal, 16(10), 3551-3555.

[6] M. Ramírez, (2020) "*Desarrollo, diseño e implementación de un prototipo estrechador de micro-fibra óptica*" (Tesis de maestría). Centro de Investigación en óptica, León Guanajuato México.

[7] Goff David R., *Fiber Optic Reference Guide*, Focal Press, 2002.

[8] H.H Cerecedo-Nuñez, A. Sánchez-Martínez y P. Padilla-Sosa, (2009). “*Revisión y análisis experimental de modos LP nm en fibras ópticas*”. Facultad de física e Inteligencia artificial, Universidad Veracruzana. PACS: 42.81.-i; 42.81.Dp; 42.81.Qb

[9] B. Chomycz, Instalaciones de fibra óptica Fundamentos, métodos y aplicaciones. Interamericana de España, 1998, p.17.

[10] Monografias. (2022). Blog institucional. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos104/introduccion-fibra-optica/introduccion-fibra-optica>

[11] Z. Sears y F. Young. (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2*. Edo. De México, México. Pearson.

[12] J. P. Clarkin, "Tapered Fibers and Specialty Fiber Microcomponents," in *Specialty Optical Fibers Handbook*, San Diego, Academic Press, 2007, p. 582.

[13] J.D. Love, W.M. Henry, W.J. Stewart, R.J. Black, S. Lacroix, F. Gonthier, "Tapered single-mode fibers and devices Part 1: Adiabaticity criteria", IEE Proceedings-J., Vol. 138, No. 5, October 1991.

[14] T.A.Birks, Y.W. Li, "The shape of fiber tapers", J. Lightwave Technol., 10, pp.432–438, 1992.

[15] Harun, SW, Lim, KS, Tio, CK, Dimyati, K. y Ahmad, H. (2013). “*Theoretical analysis and fabrication of conical fiber*”. Optik - Revista internacional de óptica de Luz y electrones, 124 (6), 538–543. doi:10.1016/j.ijleo.2011.12.054

- [16] Renata Jarzebinska, Sergiy Korposh, Stephen James, William Batty, Ralph Tatam & Seung-Woo Lee (2012). "Optical Gas Sensor Fabrication Based on Porphyrin-Anchored Electrostatic Self- Assembly onto Tapered Optical Fibers", *Analytical Letters*, 45:10, 1297-1309
- [17] G. Brambilla, "Optical fibre nanowires and microwires: a review," IOP Publishing, pp. 1-19, 2010.
- [18] B. Wang and E. Mies, "Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers," *SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering*, pp. 71950A-71961A, febrero 2009.
- [19] S. Zhu, J. W. Xing, F. F. Pang, and T. Y. Wang, "Temperature sensor based on a single-mode tapered optical fiber ", *Journal of shanghai University*, vol.15, pp. 101-104, apr 2011.
- [20] V. Berikashvili, A. A. Gordeev, A. P. Gorchakov and A. P. Zhilinskiy, "CO₂-laser-fused biconical couplers", *telecommunications & radio engineering*, vol. 46, no. 1, pp. 13-15., 1991.
- [21] Y. K. Cheong, K. S. Lim, W. H. Lim, W. Y. Chong, R. Zakaria and H. Ahmad, "Note: Fabrication of tapered fibre tip using mechanical polishing method", *Review of Scientific Instruments*, vol.82, no. 8, p. 086115, 2011.
- [22] H. J. Khashi, "Fabrication of submicron-diameter and taper fibers using chemical etching, "*Journal of Materials Science & Technology*", vol. 28, no. 4, pp. 308-312, 2012.

- [23] Y. H. Chuang, K. G. Sun, C. J. Wang, J. Y. Huang and C. L. Pan, "A simple chemical etching technique for reproducible fabrication of robust scanning near-field fiber probes", *Review of Scientific Instruments*, vol. 69, pp. 437-439, feb 1998.
- [24] R. P. Kenny, T. A. Birks, and K. P. Oakley, "Control of optical fiber taper shape," *Electron. Lett.* 27, 1654–1656 (1991).
- [25] Villatoro, J., Monzon-Hernandez, D., and Mejia, E. "Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors", *Appl. Opt.*, 2003, 42, pp. 2278–2283.
- [26] Anthony Grellier, "Characterization of optical fibre tapering using a co2 laser," University of Kent, Doctoraal Thesis, (2000).
- [27] Benye Li, Lan Jiang n , Sumei Wang, Qianghua Chen Mengmeng Wang, Jinpeng Yang. "A new Mach-Zehnder interferometer in a thinned-cladding fiber fabricated by electric arc for high sensitivity refractive index sensing". *Opt Lasers Eng.* 50 (2012) 829-832.
- [28] Y.M.Raji a, H.S.Lin a,b, S.A.Ibrahim a, M.R.Mokhtar a, Z.Yusoff a, "Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature". *Optics & Laser Technology* 86 (2016) 8–13.
- [29] Kim, Jeong, Kwon, Park, Lee, Control of the characteristics of a long-period grating by cladding etching, *Applied Optics*, 39(13), pp. 2038-2042 (2000).
- [30] Vasiliev S.A., Dianov E. M., Varelas D., Limberger H. G., Salathé R. P., Postfabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings. *Opt. Letters*, 21(22), pp. 1830- 1832 (1996).

- [31] Thorlabs (2015). *Single Mode Fiber With 900 μ m Hytrel Jacket SMF-28*. Recuperado de: <https://www.thorlabs.com/drawings/5c3c9ddf94d65b-F660FFC2-B017-7398-3D96047F9120543F/SMF-28-100-SpecSheet.pdf>
- [32] De fibra óptica. (2022). Tienda online de artículos de fibra. Recuperado de: <https://defibraoptica.com/fusionadora-fibra-optica/a80s-comptyco/>
- [33] TOOLBOOM supermarket for engineers. (2006-2022). Recuperado de: <https://toolboom.com/es/fiber-optic-cleaver-fc-6s/>
- [34] Ocean Insight (1989-2022). *DH-200 Deuterium-Halogen Light Source*. Recuperado de: <https://www.oceaninsight.com/products/light-sources/uv-vis-nir-light-sources/dh-2000-bal/?qty=1>
- [35] LabX.com (1998-2022). Tienda online. Recuperado de: <https://www.labx.com/product/ocean-optics-nir-512>
- [36] Villatoro, J., Monzón-Hernández, D., & Talavera, D. (2004). “*High-resolution refractive index detection with coated multimode conical optical fiber*”. *Electronic Letters*, 40(2), 106. doi:10.1049/el:20040069.
- [37] Niu, L., Zhao, CL-L., Gong, H., Li, Y. y Jin, S. (2014). “*Curvature sensor based on two modal interferometers of cascading abrupt cones in single-mode fiber*”. *Comunicaciones ópticas*, 333, 11–15. doi:10.1016/j.optcom.2014.07.036.
- [38] Li, B., Jiang, L., Wang, S., Mengmeng Wang, QC y Yang, J. (2012). “*A new Mach-Zehnder interferometer in a thin coating fiber made of electric arc for high sensitivity refractive index detection*”. *Óptica y láser en ingeniería*, 50(6), 829–832. doi:10.1016/j.optlaseng.2012.01.

[39] Raji, YM, Lin, HS, Ibrahim, SA, Mokhtar, MR y Yusoff, Z. (2016). “*Abrupt fiber Mach-Zehnder interferometer with intensity modulation for simultaneous detection of temperature and curvature*”. *Óptica y tecnología láser*, 86, 8–13. doi:10.1016/j.optlastec.2016.06.

[40] Chen, X., Zhou, K., Zhang, L., & Bennion, I. (2004). “Optical Chemsensors Utilizing Long-Period Fiber Gratings UV-Inscribed in D-Fiber With Enhanced Sensitivity Through Cladding Etching”. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(5), 1352–1354. doi:10.1109/lpt.2004.826148.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria Ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
P r e s e n t e.

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el C. **MARIA DEL CARMEN SOTO ROBLES** con número de matrícula **20164013029** cuyo título es:

“Fabricación y caracterización de fibras ópticas adelgazadas para aplicación en sensores ópticos”.

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **Licenciado en Tecnología Área Terminal en Física Aplicada.**

Cuernavaca, Mor a 22 de noviembre de 2022

Atentamente
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES
MTRO. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO
DR. J. JESUS CASTRELLON URIBE
ING. JOSE LUIS ROMAN ZUBILLAGA
LIC. ROEL DAVID RIVAS LOZADA

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
SUPLENTE
SUPLENTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

J JESUS CASTRELLON URIBE | Fecha:2022-11-25 15:43:25 | Firmante

QwqZEIhU2Y/3dMmpnQ6U7y5a50FKbf98Bhst05duH8GxkMW2vL/R4l2sQLAuKbszPE+VF6U84FLpOaqn8LH1piTaTgz2CbXTqOC22SbEOJmsv96FBvDn2AhPh6gUMOsKiDIaRg1BG7mVlwkawHVaiKf2HIndrr/x9n9JGQOCk0XmVKAsyZas022K37vRDjyWZcB5oGtnt+9Qky9htZf1CsNpu2Rzp2TJgGfSNEeYs/n15QNVkRXC50Yr9/CRfwfSWDR2n0w4bYHpnInnazzojHP6EzofuluDVGr4tbtj9exKta+MPjvdeymv/wza+vzG2wGgkb/PrnUBPSiOL2sg==

ROEL DAVID RIVAS LOZADA | Fecha:2022-11-25 19:00:37 | Firmante

d3MDq8HHsN2gPcPSOP1aNFcQe3x6/SIDJkalkj/w/ultFdtKhVdr93fws2RRWq9iFZBfiADWnU2m6RRyKMCXX5goFxtCd+IVdBzTeL0VBpWMdvjqQHcU4aWmhMam/PADmdTbHk3z504U+xLQ38+GJQrib4H9Nyzif3HJsvwUZwIn1u9xwLDXVX/9Xivi+AVP9v2K4AAJ1HS6mS1qeRW0kR22/W2b4xVvEiM2OMGCxR7aQXu/Dgak3r3B+7zYoKDDs9owALRWJq+Aq2MIR1k8g8loYsVp02t9oN8tdlnjGRVfADWF3da/3maNL7uihY8tvVZZfpr/3JNUdtkCSLja==

JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2022-11-27 20:17:27 | Firmante

OjP7HLchDXdg0LXncXFO1pT6BQvTv09qwcYSubyjaAZ2M8sAdJxvnBp+5UL/Xn3mvqnekHYzOLGJG2RLj9EzaYC7mxaMXBsBKOqUuMiAaRGRVnXwa1l4ruWkh+/rmUTccv8omPvkU+XyjM7itcCdAVXkA8uRrdePRr32jXh1U/oLT2YEsmeRt3loXLM2/gblsRFD4WrCV+5yolWZNTtBB1aewZa1TS68kHbb+jJTMGEedOPMBdZaZhyjbnxLLcA8dJcEYda8PccDjp2q2AANGlcM04xVMY0cFRGsUYqD6sHpAd4j7zZx/rvZCXHy+9cJGjaCahQexF1Ufh+nnOXQ==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2022-11-29 13:35:05 | Firmante

nK+2ZQaTU/nsY+Q6j5NISCEz0GZ5BAvO4F/J33+JhNxnreRyrryS6RHWOjxey34UKmAtqcMbiGmtQku/+jzoBeBmwizCO3JuAiJKBpISQVGVW2Rn1YCanas3PrjAj+rQnd8pMFFYRCJgoiWIB8JhI9Z+vlswx2pKpdBGpN4wG2s1iCoZe9G/lZPVPuqdvO+YY6GijEtJ3AwBj0U5r84MeIRa/nCn/WA4pCof7H7r+IMS1m6/0x7IXeLYGK/Z/s6xVqU3OaRBasmX6vVexpqTDqCP+d9SOOQAhnfD8EoaWfPQCCjxcA5HJ6P0nVldsESSdDTq/LmMNVCE5Rhb7eNRw==

JOSE LUIS ROMAN ZUBILLAGA | Fecha:2022-12-01 14:33:57 | Firmante

vYF37byZITcVAS0x7DgNHEVFij/xPxh8WQ6DRCRI5dSNRfmY4UyieskRRA3zi3DGWGRICHAoVcy2eq+UYEr68jGGJqJReSPVM8ROwc5DSslajfRx++tdnExS9Lkgy7+ig4+deEqYv2SM9bScOgtR0lqPybS8thSD4Tq1ky32XCeuMfeps1vtUNBzKpGF5oWBjzV8oJ2Th27kruKN1eZT6ZdSWor/VaAnruCuGeaoOQZnnSYYSOXpVkdXhGAEo8KywSnll6EFghKPTOCWCRA2s/hciuy+LeViDIMaRg67tTe/Ewhf5pXZhd3hQJwje9R4jwwOyS1n6Rbl+KiMnQEG==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



3vQRDzdOH

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/abhZHSdkbTQ216AU7ov8UwE5JAJmdhYR>

